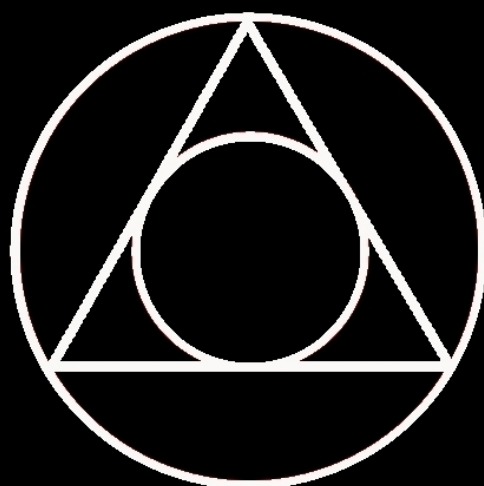


Annales Astronomiae Novae



Tom 6

Rzepliennik Biskupi 2025

ANNALES

Astronomiae Novae

2025

Tom zawiera materiały z czwartej konferencji „Meet the Space”

6-7 czerwca 2024, Tarnów

oraz

z sesji poświęconej 70-tej rocznicy śmierci

prof. Tadeusza Banachiewicza

15 listopada 2024, Kraków

Volumin 6

Redakcja

Bogdan Wszolek i Agnieszka Kuźmich

Wersja elektroniczna pisma jest dostępna na stronach

www.astronomianova.org

www.oa.uj.edu.pl

oraz

www.oajadwiga.pl

Annales Astronomiae Novae

Redakcja

Bogdan Wszolek i Agnieszka Kuźmicz

Autorzy przyczynków:

Emilia Andres	Agnieszka Kuźmicz
Jakub Antosz	Marta Kwiatkowska
Jakub Chruszcz	Agata Lada
Jan Chyczyński	Jakub Lipiński
Oleg Gerasymov	Agnieszka Lisowska-Lis
Mariusz Gibiec	Michał Marek
Marek Jamrozy	Natalia Marszałek
Hanna Jarlaczyńska	Kamila Niedźwiedź
Jacek Jasielski	Władimir Nikolin
Michał Kisilewicz	Maciej Paszyński
Andrzej Kołodziej	Arkadiusz Raj
Agata Kołodziejczyk	Alex Schwarzenberg-Czerny
Aleksander Kopyto	Piotr Simajchel
Adrian Kordos	Piotr Strzelczyk
Damian Kordos	Jakub Suchecki
Hubert Kowalczyk	Zuzanna Wesołowska
Dorota Kozieł-Wierzbowska	Robert Wielgat
Dominik Kozimoir	Bogdan Wszolek
Stanisław Kozłowski	Dominik Zdieszyński
Jerzy Kreiner	David Zierler
Jacek Kruk	Stanisław Zoła
Amelia Krupa	Przemysław Żołądek
Larysa Kudashkina	Marta Żyłka
Wiktoria Kujawa	Wojciech Żyłka
Adam Kulczycki	



Stowarzyszenie Astronomia Nova

Rzepiennik Biskupi 2025

Autorzy odpowiadają osobiście za wyrażane przez nich treści.
O przyjęciu artykułu do druku w AAN decyduje Redaktor Naczelny.

Redakcja

Bogdan Wszolek (Red. Naczelny)

Obserwatorium Astronomiczne Królowej Jadwigi w Rzepienniku Biskupim

Agnieszka Kuźmich

Obserwatorium Astronomiczne, Uniwersytet Jagielloński

Korektorzy

Bogdan Wszolek, Marek Jamrozy, Agnieszka Kuźmich,

Magdalena Wszolek

Projekt okładki

Agnieszka Kuźmich, Bogdan Wszolek

© Copyright by Stowarzyszenie Astronomia Nova

© Copyright by Obserwatorium Astronomiczne Królowej Jadwigi

ISSN 2719-3616

Druk książki został sfinansowany przez Obserwatorium Astronomiczne
Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie, Akademię Tarnowską oraz ze
środków stowarzyszenia Astronommnia Nova.

Wydawnictwo Astronomia Nova

Ul. Orla 171, 30-244 Kraków

Tel. +48 518-043-166

wan@oa.uj.edu.pl

Wstęp / Foreword

Annales Astronomiae Novae (AAN) to oficjalne pismo Stowarzyszenia Astronomia Nova (AN). Na jego łamach astronomowie oraz przedstawiciele nauk pokrewnych astronomii mogą zamieszczać raporty ze swoich dokonań na polu nauki, wyrażać opinie w sprawach naukowych i okołonaukowych, przybliżać epizody z historii nauki, oddziaływać dydaktycznie na osoby zainteresowane naukami przyrodniczymi.

AAN z założenia mają być pismem niezależnym politycznie i niekoniecznie podporządkowanym się stereotypom i trendom mody w zakresie upowszechniania wiedzy naukowej. Od autorów przyczynków oczekuje się intencji szczerego dzielenia się z czytelnikami wiedzą, dokonaniami i przemyśleniami. Mamy nadzieję, że autorzy, recenzenci i redaktorzy Annales będą współtworzyć niniejsze pismo bezinteresownie i bez oczekiwania gratyfikacji finansowej oraz, w miarę możliwości, będą finansowo wspierać jej druk.

Annales Astronomiae Novae (AAN) – the official magazine of Astronomia Nova Association (AN) – is intended to be an independent, high-level opinion-forming scientific journal. In its pages, astronomers and representatives of astronomy-related sciences would publish reports on achievements in the field of science, express opinions on purely scientific and scientific-related matters, present interesting episodes concerning the history of science as well as exert an appropriate influence on people interested in natural sciences.

Annales Astronomiae Novae is intended to be a politically independent magazine and not necessarily subordinate to stereotypes and various trends of scientific fashion in the process of dissemination of scientific knowledge. The authors of the publications are expected to honestly share their knowledge, original scientific achievements and thoughts with the readers. We hope that authors, reviewers, and editors of Annales will receive no financial rewards, and they will provide some financial support toward printing and publishing the magazine.

Zespół redakcyjny/Editorial Board



Zorza polarna widoczna z miejscowości Turza ($\varphi=49^{\circ}.77$) 10 maja 2024 roku
o godzinie 22:33. (fot. A. Kuźmich)

Spis treści

Agnieszka Kuźmich – <i>W roku 2025</i>	1
Agnieszka Kuźmich – <i>W roku 2026</i>	5
Część pierwsza	9
Bogdan Wszolek i Agata Kołodziejczyk – <i>Kronika AN – 2024</i>	11
Część druga	33
Mariusz Gibiec, Amelia Krupa – <i>AGH Space Systems – dziesięć lat istnienia</i>	35
Władimir Nikolin – <i>Poznając Kosmos, człowiek poznaje siebie</i>	39
Jacek Kruk – <i>Rekordy lotów załogowych</i>	41
David Zierler – <i>Virginia Trimble, Pioneer of Dark Matter Astrophysics and Historian of Astronomy</i>	47
Bogdan Wszolek – <i>Święta Lucja dnia przyrzucza</i>	71
Bogdan Wszolek – <i>W stronę Marsa – eksperyment MOXIE</i>	79
Materiały z czwartej konferencji <i>Meet the Space</i>	83
Bogdan Wszolek – <i>Prolog</i>	85
Bogdan Wszolek – <i>Wstęp do przyczynków konferencyjnych</i>	87
Artykuły pokonferencyjne	89
Olexandr Petrenko, Vladimir Taftay, Dmitrij Bajew – <i>Rakiety nośne, jako środki transportu dla kosmosu (i nie tylko)</i>	91
Michał Kisilewicz – <i>Analiza możliwości wytwarzania zintegrowanej dyszy i komory silnika raketowego na paliwo stałe</i>	97
Zuzanna Wesołowska, Mariusz Gibiec – <i>The chronicles of AGH Space Systems Rocketry Division</i>	103
Jakub Antosz, Jakub Chruszcz – <i>Wykorzystanie kamer w misjach stratosferycznych</i>	115

Jacek Jasielski, Robert Wielgat – <i>Monitorowanie lotów balonów stratosferycznych</i>	119
Przemysław Żołądek, Arkadiusz Raj, Marta Kwiatkowska, Jakub Lipiński, Jakub Suchecki, Stanisław Kozłowski – <i>Zwiększanie świadomości sytuacyjnej w przestrzeni kosmicznej dzięki systemom optycznym o bardzo szerokim polu widzenia</i>	129
Marta Żyłka, Wojciech Żyłka – <i>Wpływ nieważkości na organizm człowieka i technologie wspierające aktywność fizyczną astronautów na ISS</i>	143
Natalia Marszałek, Marta Żyłka – <i>Transfer technologii kosmicznych do ziemskich zastosowań</i>	149
Agata Kołodziejczyk, Kamila Niedźwiedź, Bogdan Wszolek – <i>10 lat warsztatów rakietowych w Rzepienniku</i>	159
Hubert Kowalczyk, Dominik Kozimor, Adam Kulczycki, Hanna Jarlaczyńska, Jan Chyczyński – <i>“Grażyna” Sounding Rocket Mission Control Software</i>	171
Emilia Andres, Wiktoria Kujawa – <i>Is there a beekeeper flying with us? Or what does the honeycomb do in a rocket ...</i>	179
Aleksander Kopyto – <i>Studium radaru pasywnego do śledzenia lotu rakiety i utrzymania łączności</i>	183
Andrzej Kołodziej, Robert Wielgat – <i>The impact of cosmic radiation on the operation of electronic systems</i>	191
Agnieszka Lisowska-Lis – <i>Ogniwa fotowoltaiczne (PV) i ogniwa paliwowe (FC) w zasilaniu pojazdów kosmicznych</i>	195
Piotr Strzelczyk, Adrian Kordos, Damian Kordos – <i>Badanie zjawisk akustycznych generowanych przez wejścia atmosferyczne obiektów kosmicznych</i>	207
Agata Lada, Michał Marek, Dominik Zdzeszyński, Piotr Simajchel – <i>Wpływ ekstremalnych warunków stratosferycznych na skład chemiczny ciasta w aspekcie niekonwencjonalnego transportu żywności</i>	213
Streszczenia wykładów nie ujętych w artykułach pokonferencyjnych	223
Podziękowania	240
Materiały z sesji poświęconej 70-tej rocznicy śmierci prof. Tadeusza Banachiewicza	243
Jerzy M. Kreiner – <i>Obserwacyjne inicjatywy Tadeusza Banachiewicza</i>	245
Alex Schwarzenberg-Czerny – <i>O trwałym dorobku Tadeusza Banachiewicza</i>	259

Maciej Paszyński – <i>Profesor Tadeusz Banachiewicz jako prekursor nowoczesnych metod optymalizacji bibliotek numerycznych</i>	269
Część trzecia	285
Oleg Gerasymov, Larysa Kudashkina – <i>On the morphological similarity of matter distribution in complex systems: from micromechanical (granular) to the scale of the Universe</i>	287
Dorota Kozieł-Wierzbowska – <i>Badanie własności AGN-ów aktywnych radiowo z uwzględnieniem ich morfologii – Autoreferat</i>	295
Stanisław Zoła – <i>Laudacja</i>	320
Agnieszka Kuźmich – <i>Badanie własności gigantycznych radioźródeł oraz ich galaktyk macierzystych – Autoreferat</i>	323
Marek Jamrozy – <i>Laudacja</i>	341



Kometa C/2023 A3 Tsuchinshan-ATLAS sfotografowana 18.10.2024.
(*fot. A. Kuźmich*)

W roku 2025

(Agnieszka Kuźmich)

W kolumnach podano kolejno dzień miesiąca, godzinę (UT) oraz występujące zjawisko.

Styczeń			5	12:32	Plejady 0°.6 S od Księżyca
3	15:24	Wenus 1°.4 N od Księżyca	6	16:32	Pierwsza kwadra Księżyca
4	14	Ziemia w peryhelium: 0.98333 AU	8	6	Maksymalna elongacja Merkurego: 18°.2 E
4	17:18	Saturn 0°.7 S od Księżyca	9	00:27	Mars 1°.7 S od Księżyca
6	23:56	Pierwsza kwadra Księżyca	9	11:06	Pollux 2°.0 N od Księżyca
7	23:34	Księżyc w perygeum: 370173 km	12	06:07	Regulus 2°.2 S od Księżyca
10	01:01	Plejady 0°.3 S od Księżyca	12	10	Saturn w koniunkcji ze Słońcem
10	4	Maksymalna elongacja Wenus: 47°.2 E	14	06:55	Pełnia Księżyca
13	21:45	Pollux 2°.1 N od Księżyca	14	06:59	Całkowite zaćmienie Księżyca; mag=1.178
13	22:27	Pełnia Księżyca	16	19:16	Spica 0°.3 N od Księżyca
14	03:42	Mars 0°.2 S od Księżyca	17	16:37	Księżyc w apogeum: 405754 km
16	1	Opozycja Marsa	19	22	Neptun w koniunkcji ze Słońcem
16	14:57	Regulus 2°.2 S od Księżyca	20	09:02	Początek astronomicznej wiosny
18	16	Wenus 2°.2 N od Saturna	20	15:58	Antares 0°.5 N od Księżyca
19	14	Merkury w aphelium	22	11:30	Ostatnia kwadra Księżyca
21	03:53	Spica 0°.1 N od Księżyca	23	1	Dolna koniunkcja Wenus
21	04:55	Księżyc w apogeum: 404299 km	24	20	Dolna koniunkcja Merkurego
21	20:31	Ostatnia kwadra Księżyca	29	10:47	Częściowe zaćmienie Słońca; mag=0.938
23	17:07	Mars 2°.3 S od Polluxa	29	10:58	Nów Księżyca
24	23:34	Antares 0°.3 N od Księżyca	29	19:29	Mars 3°.9 S od Polluxa
29	12:36	Nów Księżyca	30	05:26	Księżyc w perygeum: 358127 km
Luty			Kwiecień		
1	04:46	Saturn 1°.1 S od Księżyca	1	20:28	Plejady 0°.6 S od Księżyca
1	20:27	Wenus 2°.3 N od Księżyca	5	02:15	Pierwsza kwadra Księżyca
2	02:43	Księżyc w perygeum: 367457 km	5	16:46	Pollux 2°.0 N od Księżyca
5	08:02	Pierwsza kwadra Księżyca	5	19:04	Mars 2°.2 S od Księżyca
6	06:43	Plejady 0°.5 S od Księżyca	8	11:51	Regulus 2°.2 S od Księżyca
9	12	Górna koniunkcja Merkurego	10	12	Merkury 2°.1 N od Saturna
9	19:36	Mars 0°.8 S od Księżyca	13	00:22	Pełnia Księżyca
10	05:19	Pollux 2°.1 N od Księżyca	13	01:39	Spica 0°.3 N od Księżyca
12	13:53	Pełnia Księżyca	13	22:48	Księżyc w apogeum: 406295 km
12	23:21	Regulus 2°.2 S od Księżyca	16	22	Mars w aphelium: 1.66606 AU
17	12:01	Spica 0°.3 N od Księżyca	16	22:19	Antares 0°.4 N od Księżyca
18	01:11	Księżyc w apogeum: 404882 km	21	01:36	Ostatnia kwadra Księżyca
19	18	Wenus w peryhelium	21	19	Maksymalna elongacja Merkurego: 27°.4 W
20	17:33	Ostatnia kwadra Księżyca	22	13	Lirydy
21	08:21	Antares 0°.4 N od Księżyca	25	01:21	Wenus 2°.4 N od Księżyca
28	00:45	Nów Księżyca	25	04:15	Saturn 2°.3 S od Księżyca
Marzec			26	01:05	Merkury 4°.4 S od Księżyca
1	04:03	Merkury 0°.4 N od Księżyca	27	16:15	Księżyc w perygeum: 357119 km
1	21:18	Księżyc w perygeum: 361967 km			
4	14	Merkury w peryhelium			

27	19:31	Nów Księżyc	4	4	Maksymalna elongacja
28	19	Wenus 3°.7 N od Saturna			Merkurego: 25°.9 E
29	06:35	Plejady 0°.5 S od Księżyc	5	02:29	Księżyc w apogeum: 404627 km
Maj			7	17:37	Antares 0°.4 N od Księżyc
3	00:02	Pollux 2°.1 N od Księżyc	10	20:37	Pełnia Księżyc
3	23:12	Mars 2°.1 S od Księżyc	13	08:32	Wenus 3°.1 N od Aldebarana
4	13:52	Pierwsza kwadra Księżyc	14	13	Merkury w aphelium
5	17:58	Regulus 2°.0 S od Księżyc	16	10:19	Saturn 3°.8 S od Księżyc
10	07:43	Spica 0°.4 N od Księżyc	18	00:38	Ostatnia kwadra Księżyc
11	00:49	Księżyc w apogeum: 406245 km	20	10:27	Plejady 0°.7 S od Księżyc
12	16:56	Pełnia Księżyc	20	13:52	Księżyc w perygeum: 368047 km
14	04:10	Antares 0°.3 N od Księżyc	23	04:20	Jowisz 4°.9 S od Księżyc
18	1	Uran w koniunkcji ze Słońcem	24	19:11	Nów Księżyc
20	11:59	Ostatnia kwadra Księżyc	26	19:44	Regulus 1°.4 S od Księżyc
22	17:51	Saturn 2°.8 S od Księżyc	28	19:45	Mars 1°.3 N od Księżyc
23	23:52	Wenus 4°.0 S od Księżyc	31	05:45	Spica 1°.0 N od Księżyc
26	01:37	Księżyc w perygeum: 359023 km	Sierpień		
27	03:02	Nów Księżyc	1	0	Dolna koniunkcja Merkurego
30	4	Górna koniunkcja Merkurego	1	12:41	Pierwsza kwadra Księżyc
30	09:13	Pollux 2°.3 N od Księżyc	1	20:37	Księżyc w apogeum: 404164 km
31	13	Merkury w peryhelium	4	01:40	Antares 0°.6 N od Księżyc
Czerwiec			9	07:55	Pełnia Księżyc
1	2	Maksymalna elongacja	12	7	Wenus 0°.9 S od Jowisza
		Wenus: 45°.9 W	12	15:05	Saturn 4°.0 S od Księżyc
1	09:49	Mars 1°.4 S od Księżyc	12	20	Perseidy
2	01:30	Regulus 1°.8 S od Księżyc	14	18:01	Księżyc w perygeum: 369287 km
3	03:41	Pierwsza kwadra Księżyc	16	05:12	Ostatnia kwadra Księżyc
6	14:15	Spica 0°.5 N od Księżyc	16	16:09	Plejady 0°.9 S od Księżyc
7	10:42	Księżyc w apogeum: 405553 km	19	10	Maksymalna elongacja
10	10:25	Antares 0°.3 N od Księżyc			Merkurego: 18°.6 W
11	07:44	Pełnia Księżyc	19	21:05	Jowisz 4°.8 S od Księżyc
12	3	Wenus w aphelium	20	12:07	Pollux 2°.4 N od Księżyc
17	02:05	Mars 0°.7 N od Regulusa	21	16:14	Merkury 3°.7 S od Księżyc
18	19:19	Ostatnia kwadra Księżyc	23	06:06	Nów Księżyc
19	03:47	Saturn 3°.4 S od Księżyc	26	16:41	Mars 2°.8 N od Księżyc
21	02:42	Początek astronomicznego lata	27	12	Merkury w peryhelium
21	19:51	Merkury 4°.8 S od Polluxa	27	13:57	Spica 1°.1 N od Księżyc
23	02:59	Plejady 0°.6 S od Księżyc	29	15:34	Księżyc w apogeum: 404552 km
23	04:43	Księżyc w perygeum: 363178 km	31	06:25	Pierwsza kwadra Księżyc
24	15	Jowisz w koniunkcji ze Słońcem	31	09:55	Antares 0°.7 N od Księżyc
25	10:31	Nów Księżyc	Wrzesień		
26	19:14	Pollux 2°.5 N od Księżyc	7	18:09	Pełnia Księżyc
27	06:02	Merkury 2°.9 S od Księżyc	7	18:12	Całkowite zaćmienie Księżyc; mag=1.362
29	10:26	Regulus 1°.5 S od Księżyc	8	20:09	Saturn 4°.0 S od Księżyc
30	01:05	Mars 0°.2 S od Księżyc	10	12:09	Księżyc w perygeum: 364781 km
Lipiec			12	21:48	Plejady 1°.0 S od Księżyc
2	19:30	Pierwsza kwadra Księżyc	13	03:28	Mars 2°.0 N od Spiki
3	21	Ziemia w aphelium: 1.01664 AU	13	11	Górna koniunkcja Merkurego
3	21:39	Spica 0°.8 N od Księżyc	14	10:33	Ostatnia kwadra Księżyc

16	11:06	Jowisz 4°.6 S od Księżycy	5	13:19	Pełnia Księżycy
16	17:58	Pollux 2°.4 N od Księżycy	5	22:29	Księżyc w perygeum: 356833 km
19	08:57	Wenus 0°.4 N od Regulusa	6	15:26	Plejady 0°.8 S od Księżycy
19	11:11	Regulus 1°.3 S od Księżycy	9	02:41	Merkury 2°.6 N od Antaresa
19	11:46	Wenus 0°.8 S od Księżycy	10	06:40	Pollux 2°.7 N od Księżycy
21	5	Opozycja Saturna	10	07:56	Jowisz 4°.0 S od Księżycy
21	19:42	Częściowe zaćmienie Słońca; mag=0.855	12	05:28	Ostatnia kwadra Księżycy
21	19:54	Nów Księżycy	12	22:51	Regulus 1°.1 S od Księżycy
22	18:20	Początek astronomicznej jesieni	13	4	Merkury 1°.2 S od Marsa
23	11	Opozycja Neptuna	17	10:11	Spica 1°.2 N od Księżycy
23	21:31	Spica 1°.1 N od Księżycy	17	18	Leonidy
24	14:50	Mars 3°.9 N od Księżycy	20	02:48	Księżyc w apogeum: 406693 km
26	09:46	Księżyc w apogeum: 405552 km	20	06:47	Nów Księżycy
27	17:34	Antares 0°.6 N od Księżycy	20	9	Dolna koniunkcja Merkurego
29	23:54	Pierwsza kwadra Księżycy	21	13	Opozycja Urana
Październik			23	11	Merkury w peryhelium
2	11	Wenus w peryhelium	28	06:59	Pierwsza kwadra Księżycy
6	02:46	Saturn 3°.8 S od Księżycy	29	19:08	Saturn 3°.7 S od Księżycy
7	03:47	Pełnia Księżycy	Grudzień		
8	12:36	Księżyc w perygeum: 359819 km	4	02:54	Plejady 0°.8 S od Księżycy
10	05:20	Plejady 0°.9 S od Księżycy	4	11:06	Księżyc w perygeum: 356962 km
13	18:13	Ostatnia kwadra Księżycy	4	23:14	Pełnia Księżycy
13	22:31	Jowisz 4°.3 S od Księżycy	7	15:48	Jowisz 3°.7 S od Księżycy
13	23:31	Pollux 2°.5 N od Księżycy	7	16:21	Pollux 2°.9 N od Księżycy
16	16:56	Regulus 1°.3 S od Księżycy	7	21	Maksymalna elongacja Merkurego: 20°.7 W
19	20	Merkury 2°.0 S od Marsa	10	06:32	Regulus 0°.8 S od Księżycy
19	21:37	Wenus 3°.7 N od Księżycy	11	20:52	Ostatnia kwadra Księżycy
21	12	Orionidy	14	7	Geminidy
21	12:25	Nów Księżycy	14	16:27	Spica 1°.4 N od Księżycy
23	16:15	Merkury 2°.3 N od Księżycy	17	06:09	Księżyc w apogeum: 406324 km
23	23:31	Księżyc w apogeum: 406445 km	18	12:29	Antares 0°.4 N od Księżycy
25	00:15	Antares 0°.5 N od Księżycy	20	01:43	Nów Księżycy
29	16:21	Pierwsza kwadra Księżycy	21	15:03	Początek astronomicznej zimy
29	22	Maksymalna elongacja Merkurego: 23°.9 E	22	16	Ursydy
Listopad			27	03:24	Saturn 4°.0 S od Księżycy
2	01:02	Wenus 3°.3 N od Spiki	27	19:10	Pierwsza kwadra Księżycy
2	10:46	Saturn 3°.7 S od Księżycy	31	13:21	Plejady 0°.9 S od Księżycy

W nawiasach po dacie podano czas uniwersalny (UT) występowania zjawiska w okrągłych godzinach bądź w godzinach i minutach.

Ziemia w peryhelium: 4 styczeń (14)

Ziemia w aphelium: 3 lipiec (21)

Początek astronomicznej wiosny: 20 marzec (09:02)

Początek astronomicznego lata: 21 czerwiec (02:42)

Początek astronomicznej jesieni: 22 wrzesień (18:20)

Początek astronomicznej zimy: 21 grudzień (15:03)

Data juliańska (JD) = 2460676.5 + d + część dnia licząc od godziny 0 UT (d - kolejny dzień roku)

Zaćmienia:

- | | |
|--------|---|
| 14 III | Całkowite zaćmienie Księżyca (Europa, Azja, Australia, Afryka) |
| 29 III | Częściowe zaćmienie Słońca (Europa, Pn Azja, Pn-Z Afryka, Pn Ameryka, północna część Ameryki Pd, Atlantyk) |
| 7 IX | Całkowite zaćmienie Księżyca (Europa, Azja, Australia, Afryka, zachodnia część Ameryki Pn, wschodnia część Ameryki Pd, Pacyfik, Atlantyk, Ocean Indyjski, Antarktyda) |
| 21 IX | Częściowe zaćmienie Słońca (Pd Australia, Pacyfik, Atlantyk, Antarktyda) |

W roku 2026

(Agnieszka Kuźmich)

W kolumnach podano kolejno dzień miesiąca, godzinę (UT) oraz występujące zjawisko.

Styczeń

1	21:43	Księżyc w perygeum: 360348 km
3	10:03	Pełnia Księżyca
3	17	Ziemia w peryhelium: 0.98330 AU
3	22:01	Jowisz 3°.7 S od Księżyca
4	03:28	Pollux 3°.0 N od Księżyca
6	11	Merkury w aphelium
6	16	Górna koniunkcja Wenus
6	16:20	Regulus 0°.5 S od Księżyca
9	10	Mars w koniunkcji ze Słońcem
10	8	Opozycja Jowisza
10	15:48	Ostatnia kwadra Księżyca
10	23:50	Spica 1°.6 N od Księżyca
13	20:48	Księżyc w apogeum: 405437 km
14	19:28	Antares 0°.6 N od Księżyca
18	19:52	Nów Księżyca
21	16	Górna koniunkcja Merkurego
22	20	Wenus w aphelium
23	12:31	Saturn 4°.3 S od Księżyca
26	04:47	Pierwsza kwadra Księżyca
27	21:07	Plejady 1°.1 S od Księżyca
29	21:53	Księżyc w perygeum: 365878 km
31	02:31	Jowisz 3°.8 S od Księżyca
31	13:45	Pollux 3°.0 N od Księżyca

Luty

1	22:09	Pełnia Księżyca
3	02:48	Regulus 0°.4 S od Księżyca
7	08:26	Spica 1°.8 N od Księżyca
9	12:43	Ostatnia kwadra Księżyca
10	16:52	Księżyc w apogeum: 404577 km
11	03:19	Antares 0°.7 N od Księżyca
17	12:01	Nów Księżyca
17	12:12	Obrączkowe zaćmienie Słońca; mag=0.963
18	23:03	Merkury 0°.1 N od Księżyca
19	11	Merkury w peryhelium
19	18	Maksymalna elongacja Merkurego: 18°.1 E
19	23:54	Saturn 4°.6 S od Księżyca
24	02:43	Plejady 1°.2 S od Księżyca
24	12:28	Pierwsza kwadra Księżyca
24	23:18	Księżyc w perygeum: 370132 km
27	06:26	Jowisz 4°.0 S od Księżyca
27	21:34	Pollux 3°.0 N od Księżyca

Marzec

2	12:00	Regulus 0°.4 S od Księżyca
3	11:34	Całkowite zaćmienie Księżyca; mag=1.151
3	11:38	Pełnia Księżyca
6	17:24	Spica 1°.8 N od Księżyca
7	11	Dolna koniunkcja Merkurego
10	11:32	Antares 0°.7 N od Księżyca
10	13:43	Księżyc w apogeum: 404385 km
11	09:39	Ostatnia kwadra Księżyca
15	19	Merkury 3°.4 N od Marsa
17	14:07	Merkury 2°.0 N od Księżyca
17	21:51	Mars 1°.5 S od Księżyca
19	01:23	Nów Księżyca
20	12:39	Wenus 4°.6 S od Księżyca
20	14:46	Początek astronomicznej wiosny
22	10	Neptun w koniunkcji ze Słońcem
22	11:40	Księżyc w perygeum: 366858 km
23	08:32	Plejady 1°.1 S od Księżyca
25	8	Saturn w koniunkcji ze Słońcem
25	19:18	Pierwsza kwadra Księżyca
26	7	Mars at Perihelion: 1.38126 AU
26	12:13	Jowisz 3°.9 S od Księżyca
27	03:18	Pollux 3°.0 N od Księżyca
29	19:00	Regulus 0°.4 S od Księżyca

Kwiecień

2	02:12	Pełnia Księżyca
3	01:32	Spica 1°.8 N od Księżyca
3	23	Maksymalna elongacja Merkurego: 27°.8 W
6	19:21	Antares 0°.6 N od Księżyca
7	08:32	Księżyc w apogeum: 404974 km
10	04:52	Ostatnia kwadra Księżyca
16	00:45	Mars 3°.7 S od Księżyca
17	11:52	Nów Księżyca
19	06:57	Księżyc w perygeum: 361631 km
19	08:49	Wenus 4°.8 S od Księżyca
19	16:28	Plejady 1°.0 S od Księżyca
19	19	Mars 1°.2 N od Saturna
20	10	Merkury 0°.5 S od Saturna
20	22	Merkury 1°.7 S od Marsa
22	19	Lirydy
22	22:06	Jowisz 3°.6 S od Księżyca
23	08:59	Pollux 3°.2 N od Księżyca

24 02:32 Pierwsza kwadra Księżycy
 24 04:17 Wenus 3°.4 S od Plejad
 26 00:37 Regulus 0°.2 S od Księżycy
 30 08:17 Spica 1°.8 N od Księżycy

Maj

1 17:23 Pełnia Księżycy
 4 02:20 Antares 0°.5 N od Księżycy
 4 22:30 Księżyc w apogeum: 405843 km
 9 21:10 Ostatnia kwadra Księżycy
 14 14 Górna koniunkcja Merkurego
 15 4 Wenus w peryhelium
 16 20:01 Nów Księżycy
 17 13:48 Księżyc w perygeum: 358074 km
 18 10 Merkury w peryhelium
 19 01:50 Wenus 2°.9 S od Księżycy
 20 12:39 Jowisz 3°.1 S od Księżycy
 20 16:30 Pollux 3°.4 N od Księżycy
 22 16 Uran w koniunkcji ze Słońcem
 23 06:41 Regulus 0°.0 N od Księżycy
 23 11:11 Pierwsza kwadra Księżycy
 27 14:09 Spica 1°.9 N od Księżycy
 31 08:32 Antares 0°.4 N od Księżycy
 31 08:45 Pełnia Księżycy

Czerwiec

1 04:32 Księżyc w apogeum: 406369 km
 7 16:17 Wenus 4°.6 S od Polluxa
 8 10:00 Ostatnia kwadra Księżycy
 9 20 Wenus 1°.6 N od Jowisza
 13 13:15 Plejady 1°.0 S od Księżycy
 14 23:18 Księżyc w perygeum: 357196 km
 15 02:54 Nów Księżycy
 15 20 Maksymalna elongacja Merkurego:
 24°.5 E
 16 19:32 Merkury 2°.6 S od Księżycy
 17 02:08 Pollux 3°.6 N od Księżycy
 17 06:54 Jowisz 2°.5 S od Księżycy
 17 20:21 Wenus 0°.3 S od Księżycy
 19 14:31 Regulus 0°.3 N od Księżycy
 21 08:25 Początek astronomicznego lata
 21 21:55 Pierwsza kwadra Księżycy
 23 20:11 Spica 2°.2 N od Księżycy
 25 12 Merkury 3°.8 S od Jowisza
 27 14:32 Antares 0°.5 N od Księżycy
 28 07:11 Księżyc w apogeum: 406267 km
 28 18:32 Mars 4°.3 S od Plejad
 29 23:57 Pełnia Księżycy

Lipiec

1 10 Merkury w aphelium
 6 18 Ziemia w aphelium: 1.01664 AU
 7 19:29 Ostatnia kwadra Księżycy

9 14:36 Wenus 0°.9 N od Regulusa
 10 22:54 Plejady 1°.1 S od Księżycy
 13 1 Dolna koniunkcja Merkurego
 13 07:50 Księżyc w perygeum: 359111 km
 14 09:43 Nów Księżycy
 17 00:07 Regulus 0°.5 N od Księżycy
 17 16:31 Wenus 2°.0 N od Księżycy
 21 03:21 Spica 2°.4 N od Księżycy
 21 11:06 Pierwsza kwadra Księżycy
 24 21:00 Antares 0°.6 N od Księżycy
 25 16:45 Księżyc w apogeum: 405549 km
 29 12 Jowisz w koniunkcji ze Słońcem
 29 14:36 Pełnia Księżycy

Sierpień

2 8 Maksymalna elongacja Merkurego:
 19°.5 W
 6 02:21 Ostatnia kwadra Księżycy
 7 06:23 Plejady 1°.2 S od Księżycy
 9 05:31 Mars 4°.4 S od Księżycy
 10 11:18 Księżyc w perygeum: 363288 km
 10 22:38 Pollux 3°.6 N od Księżycy
 11 12:48 Merkury 2°.1 S od Księżycy
 12 17:37 Nów Księżycy
 12 17:46 Całkowite zaćmienie Słońca;
 mag=1.039
 13 2 Perseidy
 14 9 Merkury w peryhelium
 15 6 Maksymalna elongacja Wenus:
 45°.9 E
 16 08:47 Wenus 2°.1 N od Księżycy
 17 11:49 Spica 2°.4 N od Księżycy
 20 02:46 Pierwsza kwadra Księżycy
 21 04:18 Antares 0°.6 N od Księżycy
 22 08:20 Księżyc w apogeum: 404644 km
 27 17 Górna koniunkcja Merkurego
 28 04:13 Częściowe zaćmienie Księżycy;
 mag=0.930
 28 04:18 Pełnia Księżycy

Wrzesień

1 13:24 Wenus 1°.2 S od Spiki
 3 12:03 Plejady 1°.2 S od Księżycy
 4 07:51 Ostatnia kwadra Księżycy
 6 18:24 Mars 3°.0 S od Księżycy
 6 20:26 Księżyc w perygeum: 368255 km
 7 06:32 Pollux 3°.6 N od Księżycy
 8 18:13 Jowisz 0°.8 S od Księżycy
 9 19:36 Regulus 0°.5 N od Księżycy
 11 03:27 Nów Księżycy
 13 20:53 Spica 2°.4 N od Księżycy
 14 11:10 Wenus 0°.5 S od Księżycy
 17 12:18 Antares 0°.6 N od Księżycy

18	20:44	Pierwsza kwadra Księżycy	9	07:02	Nów Księżycy
19	03:00	Księżyc w apogeum: 404217 km	10	9	Merkury w peryhelium
23	00:06	Początek astronomicznej jesieni	10	13:49	Wenus 0°.1 S od Spiki
26	0	Opozycja Neptuna	11	03:58	Antares 0°.3 N od Księżycy
26	01:49	Merkury 0°.8 N od Spiki	13	17:50	Księżyc w apogeum: 405619 km
26	16:49	Pełnia Księżycy	16	4	Mars 1°.2 N od Jowisza
30	17:39	Plejady 1°.1 S od Księżycy	17	11:48	Pierwsza kwadra Księżycy
Październik			18	0	Leonidy
1	20:41	Księżyc w perygeum: 369338 km	20	23	Maksymalna elongacja Merkurego: 19°.6 W
3	13:25	Ostatnia kwadra Księżycy	24	11:18	Plejady 0°.9 S od Księżycy
4	12	Opozycja Saturna	24	14:53	Pełnia Księżycy
4	12:27	Pollux 3°.8 N od Księżycy	25	07:47	Mars 1°.6 N od Regulusa
5	05:30	Mars 1°.2 S od Księżycy	25	20:58	Księżyc w perygeum: 359348 km
6	10:18	Jowisz 0°.2 S od Księżycy	25	23	Opozycja Urana
7	02:57	Regulus 0°.6 N od Księżycy	28	01:27	Pollux 4°.2 N od Księżycy
10	15:50	Nów Księżycy	30	09:18	Jowisz 1°.2 N od Księżycy
12	02:30	Wenus 3°.1 S od Księżycy	30	14:35	Regulus 1°.1 N od Księżycy
12	10	Maksymalna elongacja Merkurego: 25°.2 E	30	19:32	Mars 3°.3 N od Księżycy
12	20:08	Merkury 2°.1 N od Księżycy	Grudzień		
14	20:25	Antares 0°.4 N od Księżycy	1	06:09	Ostatnia kwadra Księżycy
16	22:56	Księżyc w apogeum: 404639 km	4	18:36	Spica 2°.5 N od Księżycy
18	16:13	Pierwsza kwadra Księżycy	9	00:52	Nów Księżycy
21	18	Orionidy	11	06:46	Księżyc w apogeum: 406421 km
24	3	Dolna koniunkcja Wenus	12	15:35	Jowisz 1°.3 N od Regulusa
26	04:12	Pełnia Księżycy	14	13	Geminidy
28	01:11	Plejady 1°.0 S od Księżycy	17	05:43	Pierwsza kwadra Księżycy
28	18:01	Księżyc w perygeum: 364411 km	21	20:50	Początek astronomicznej zimy
31	18:00	Pollux 4°.0 N od Księżycy	21	22:37	Plejady 1°.0 S od Księżycy
Listopad			22	22	Ursydy
1	20:28	Ostatnia kwadra Księżycy	24	01:28	Pełnia Księżycy
2	14:23	Mars 1°.1 N od Księżycy	24	8	Merkury w aphelium
2	23:11	Jowisz 0°.5 N od Księżycy	24	08:30	Księżyc w perygeum: 356650 km
3	08:40	Regulus 0°.8 N od Księżycy	25	11:41	Pollux 4°.4 N od Księżycy
4	14	Dolna koniunkcja Merkurego	25	21	Wenus w peryhelium
7	11:31	Wenus 1°.1 N od Księżycy	27	17:32	Jowisz 1°.5 N od Księżycy
7	12:40	Spica 2°.4 N od Księżycy	27	22:44	Regulus 1°.4 N od Księżycy
			30	18:59	Ostatnia kwadra Księżycy

W nawiasach po dacie podano czas uniwersalny (UT) występowania zjawiska w okrągłych godzinach bądź w godzinach i minutach.

Ziemia w peryhelium: 3 styczeń (17)

Ziemia w aphelium: 6 lipiec (18)

Początek astronomicznej wiosny: 20 marzec (14:46)

Początek astronomicznego lata: 21 czerwiec (08:25)

Początek astronomicznej jesieni: 23 wrzesień (00:06)

Początek astronomicznej zimy: 21 grudzień (20:50)

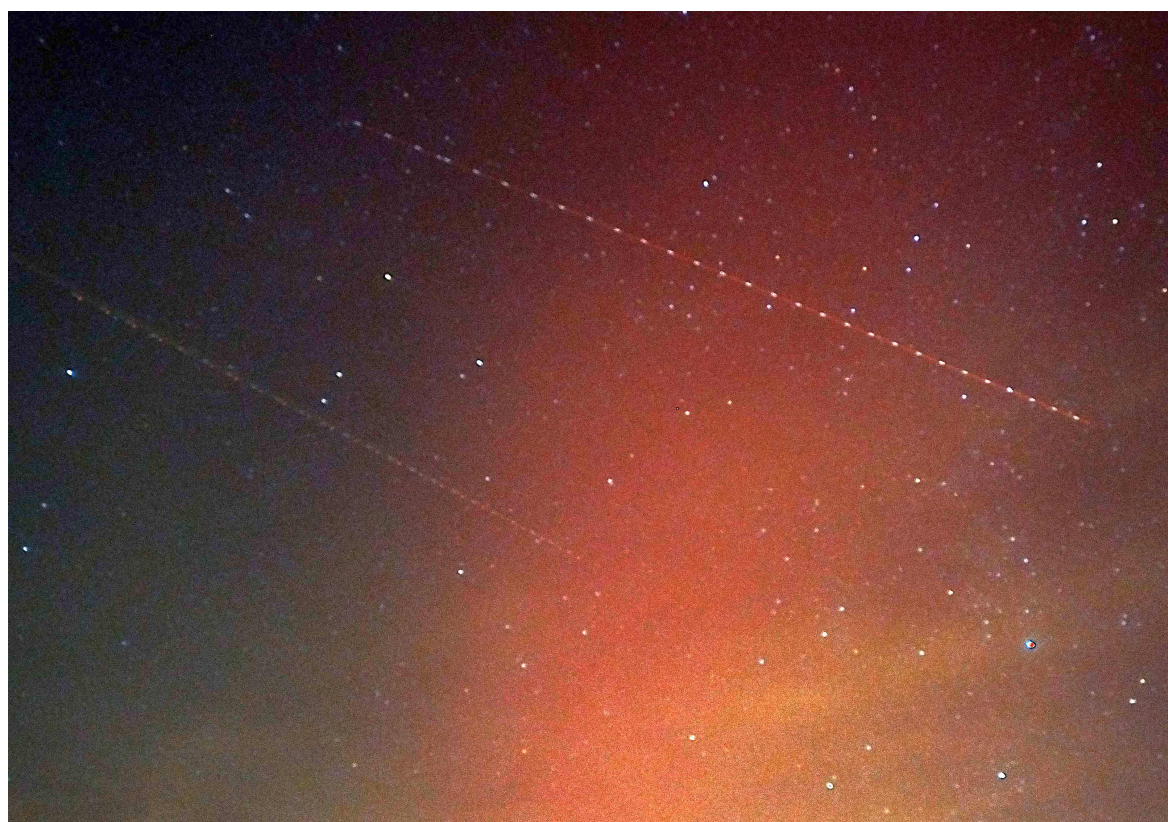
Data juliańska (JD) = 2461041.5 + d + część dnia licząc
od godziny 0 UT (d - kolejny dzień roku)

Zaćmienia:

- 17 II Obrączkowe zaćmienie Słońca (Pd Argentyna, Chile, Pd Afryka, Antarktyka)
- 3 III Całkowite zaćmienie Księżyca (wschodnia Azja, Australia, Pacyfik, Ameryka Pn, Pd)
- 12 VIII Całkowite zaćmienie Słońca (północna część Ameryki Pn, zachodnia Afryka, Europa – Hiszpania, Grenlandia, Islandia)
- 28 VIII Częściowe zaćmienie Księżyca (wschodni Pacyfik, Ameryka Pn, Pd, Europa, Afryka)

Część pierwsza

(informacyjna)



Zorza polarna widoczna z miejscowości Turza ($\varphi=49^{\circ}.77$) 1 stycznia 2025 roku
o godzinie 19:18. (fot. A. Kuźmich)

Kronika AN – 2024

Bogdan Wszolek¹ i Agata Kołodziejczyk²

¹ Obserwatorium Astronomiczne Królowej Jadwigi, Rzepiennik Biskupi

² Centrum Technologii Kosmicznych, AGH, Kraków

Nowa funkcja prof. Agnieszki Pollo

Profesor Agnieszka Pollo, wiceprezes AN, objęła odpowiedzialną funkcję Zastępcy Dyrektora ds. Naukowych w Narodowym Centrum Badań Jądrowych (NCBJ). Wcześniej kierowała w NCBJ bardzo prężnie rozwijającym się tam Zakładem Astrofizyki.



Agnieszka Pollo aktywnie współpracuje z naukowcami z różnych miejsc na świecie. Kieruje polskim konsorcjum projektu Vera Rubin Observatory – LSST (ang. Legacy Survey of Space and Time), a także współkieruje konsorcjum projektu POLAR-2. Ponadto jest członkinią Komitetu Astronomicznego Polskiej Akademii Nauk oraz reprezentuje Polskę w Komitecie Użytkowników Europejskiego Obserwatorium Południowego.

Habilitacje z astronomii



Dr hab. Dorota Kozieł Wierzbowska
(fot. K. Magda)



Dr hab. Agnieszka Kuźmich
(fot. K. Magda)

Dwie członkinie AN, astronomki w Uniwersytecie Jagiellońskim, uzyskały w roku 2024 najwyższy stopień naukowy – doktora habilitowanego; w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, w dyscyplinie astronomia. W części trzeciej niniejszego tomu zamieszczamy ich autoreferaty habilitacyjne (str. 295 oraz 323).

AAN5

W pierwszym kwartale roku zredagowano i wydano piąty tom *Annales Astronomiae Novae*. Przyczynki piętnastu autorów dały w sumie 266 stron opracowania. Tradycyjnie książkę redagowali wolontaryjnie Bogdan Wszolek i Agnieszka Kuźmich. Druk wersji papierowej był współfinansowany przez Obserwatorium Astronomiczne Uniwersytetu Jagiellońskiego oraz ze środków prywatnych Magdaleny i Bogdana Wszolek. Wersja elektroniczna pisma (PDF do pobrania) jest tradycyjnie darmo dostępna na stronie www.astronomianova.org pod zakładką publikacje.

Kronika życia astronoma

W roku 2024 Instytut Historii Nauki PAN wydał niezwykłą książkę, w której legendarny astronom, Eugeniusz Rybka, przedstawia kronikę swojego życia. W twardej obwolucie książka, licząca ponad 1000 stron, jest dostępna w Internecie w cenie poniżej stu złotych.



Pierwsza strona okładki książki.

Misje Analogowe

W roku 2024 dr Agata Kołodziejczyk zorganizowała w Rzepienniku dalszych 18 misji analogowych. Wymieniamy je tutaj w porządku chronologicznym kontynuując numerację biorącą początek w 2016 roku.

- 76 Athena [2024-02-10 – 2024-02-18]; Barbara Szaflarska (Polska), Wojciech Kajfosz (Polska), Maciej Talar (Polska), Kajetan Gudowski (Polska), Martyna Baran (Polska), Igor Kondek (Polska).
- 77 SymbioSpace Explorers [2024-02-29 – 2024-03-08]; Izabela Świca (Polska), Adam Starowicz (Polska), Piotr Libudzki (Polska).
- 78 Celestia [2024-03-09 – 2024-03-17]; Maria Muszyńska (Polska), Mirosława Malkovska (Bułgaria), Naga Venkata Uday Kiran (Indie).
- 79 NASA National Geographic [2024-04-02 – 2024-04-03]; Karolina Modzelewska (Polska), Jakub Wojciechowski (Polska), Piotr Cieśliński (Polska), Katarzyna Gandor (Polska), Maciej Szczerba (Polska), Witold Lazar (Polska).
- 80 EMMPOL 19 [2024-04-13 – 2024-04-20]; Axel Defrance (Francja), Marzena Krzek (Polska), Cenzo Berthet (Francja), Mattéo Irigoyen (Francja), Joachim Jouve (Francja).

- 81 Yggdrasil [2024-04-27 – 2024-05-05]; Thomas Rimbot (Francja), Gabriela Bergiel (Polska), Wiktoria Wiejak (Polska), Sara Garnarczyk (Polska).
- 82 Eagle Horison [2024-05-11 – 2024-05-19]; Kajetan Gudowski (Polska), Patrycja Zuber (Polska), Adrianna Waterford (USA).
- 83 EMMPOL 20 Artemis3 [2024-05-25 – 2024-06-02]; Matthew Harvey (Irlandia), Clara Laforet (Francja).
- 84 Lunar [2024-06-08 – 2024-06-16]; Jakub Stefański (Polska), Julia Baścik (Polska), Swayam Jyoti (Indie).
- 85 Lotus [2024-07-20 – 2024-07-28]; Cassandra Verdan (Martinika), Anna Harutyunyan (Armenia), Jasmin Della Guardia (Niemcy/Włochy/Japonia), Helena Tataj (Polska), Maria Luvina Ramos Moreno (Meksyk).
- 86 Atalanta [2024-07-20 – 2024-07-28]; Cassandra Verdan (Martinika).
- 87 Biosignatime [2024-08-03 – 2024-08-11]; Agnieszka Winiarska-Furtak (Polska), Iniya Pragati (Indie) wraz z ojcem, Ryan Kirby (USA), Preveen Kumar (Indie).
- 88 Augusta 2 - mission possible [2024-08-17 – 2024-08-25]; Praveen Kumar (Indie), Iniya Pragati (Indie), Aseel Nama (Izrael).
- 89 Ad Astra [2024-09-21 – 2024-09-28]; Nicolas Lai (USA, Chiny).
- 90 Luna I [2024-10-19 – 2024-10-27]; Benedetta Facini (Włochy), Hope Lea (USA), Jair Ibarra (Peru), Jeel Moya Salazar (Meksyk).
- 91 Aurora [2024-10-28 – 2024-11-05]; Marisol Ramos Camacho (Peru), Nataly Andrea Rojas Barnett (Peru), Diana Karen Hernandez Araujo (Meksyk), Romildo Genaro Silva Cuadros (Peru).
- 92 AATC 92 [2024-11-05 – 2024-11-14]; Neharika Gambhir (Fidzi), Julia Karpierz (Polska), Hanna Grechuta (Polska).
- 93 Lunar X [2024-11-23 – 2024-12-01]; Kinga Kaim (Polska), Paulina Kudzia (Polska), Gabriela Kowalik (Polska), Prakruthi Prakash (Indie).

Testy silników rakietowych

W 10-tym roku swego istnienia Koło Naukowe AGH Space Systems przeprowadziło czterokrotnie na hamowni w Obserwatorium Astronomicznym Królowej Jadwigi (OAKJ) testy swojego dużego silnika rakietowego na paliwo ciekłe: 15-17 marca, 13-15 kwietnia, 10-12 maja oraz 20-24 września.

Wyjątkowa sytuacja zaistniała podczas testów w maju. W głębi nocy niebo nad testującymi rozjaśniało piękną i bardzo jasną zorzą polarną. Studentom udało się udokumentować fotograficznie obydwa maksima pojaśnień – sprzed północy oraz po północy.

Postępująca współpraca AGH Space Systems z OAKJ i AN zaowocowała czynnym udziałem studentów Koła w IV konferencji naukowej „Meet the Space” (Tarnów 6-7 czerwca) i stąd też publikacjami na łamach niniejszego tomu. Podczas testów wrześniowych studenci wykazali zainteresowanie jedną z anten satelitarnych w OAKJ i zadeklarowali zaangażowanie dla jej zagospodarowania na potrzeby telekomunikacji kosmicznej.



Grupa studentów przeprowadzająca test silnika w marcu. Od lewej: Maciej Talar, Filip Kazek, Wiktor Opszański, Jakub Siębor, Mikołaj Cichoń, Lena Stec, Aleksandra Bednarz, Piotr Słonka, Karolina Włodarczyk, Jan Chyczyński, Zuzanna Wesołowska, Mikołaj Ostrowski, Aleksander Kopyto, Wojciech Szumlański, Piotr Nowosielski, Michał Samek, Zuzanna Cebula, Wiktoria Kujawa, Emilia Andres, Piotr Sławęcki, Eliza Marzec.



Noc 10/11 maja, przed północą. Zorza polarna sfotografowana przez studenta z AGH Space Systems w OAKJ. Prześwietlony obiekt po lewej to Księżyc. (fot. A. Kulczycki).



Noc 10/11 maja, po północy. Zorza polarna sfotografowana przez studenta z AGH Space Systems nad hamownią w OAKJ. Podświetlenie oddolne pobliskich drzew pochodzi od oświetlenia hamowni podczas testów. (fot. W. Opszański)



Studenci AGH Space Systems na wieży przy antenie RT-5.4 w OAKJ. Od lewej: Mikołaj Sala, Igor Wielgus, Mikołaj Cichoń, Mikołaj Ostrowski, Wiktor Opszański, Piotr Nowosielski, Dominik Kozimor, Wiktoria Kujawa, Aleksander Kopyto, Zuzanna Wesołowska i Bogdan Wszolek.

Dzień Gagarinowski w OAKJ

Tegoroczne świętowanie Dnia Kosmonautyki (12 kwietnia) w OAKJ rozpoczęto grupowym przemierzeniem „Szlaku 108 minut” – ubogaconego świeżo zainstalowanymi planszami dydaktycznymi. AN-artysta, Vladimir Nikolin, przyniósł prezent w postaci świeżo namalowanego portretu Mirosława Hermaszewskiego ku ozdobie wnętrza sali reprezentacyjnej w OAKJ. Artysta zasugerował również możliwość namalowania fresku na ścianie zewnętrznej kopuły. Pomysł został zaakceptowany i wdrożony w letnich miesiącach. Z przedstawicielami Akademii Tarnowskiej (AT) zostały omówione konieczne szczegóły dotyczące organizacji IV konferencji „Meet the Space”, która odbyła się w czerwcu i zacieśniła współpracę między AT i AN.



Vladimir Nikolin z namalowanym przez siebie portretem Mirosława Hermaszewskiego.



W Zagajniku Pionierów Kosmosu zorganizowanym w OAKJ. Od lewej: Robert Wielgat, Michał Kisilewicz i Bogdan Wszolek.

10 lat POLSA

W dniu 4 czerwca odbyła się w Warszawie uroczysta gala z okazji dziesiątej rocznicy formalnego powstania Polskiej Agencji Kosmicznej (POLSA). Zaproszono na nią kilkaset osób, w tym prezesa AN. Podczas wystąpień oficjalnych przybliżono szczegóły związane z powstaniem Agencji oraz podsumowano osiągnięcia z pierwszej dekady jej funkcjonowania. Roztoczono też śmiałe plany dalszych przedsięwzięć Agencji, pośród których pierwszeństwo zajmuje lot kosmiczny Sławosza Uznańskiego.



Sławosz Uznański i Bogdan Wszolek.

MTS w Tarnowie

W dniach 6-7 czerwca w Tarnowie odbyła się IV Konferencja naukowa „Meet the Space”. Było to wspólne przedsięwzięcie AT i AN. Tematy wykładów koncentrowały się na zagadnieniach dotyczących eksploracji kosmosu. Otwarcie konferencji zaszczylicili swoją obecnością i ciepłymi przemówieniami Wojewoda Małopolski Krzysztof Klęczar oraz Prezydent Tarnowa Jakub Kwaśny. Celem konferencji była integracja i rozwój współpracy naukowo-biznesowej na arenie międzynarodowej w świetle kreowania usytuowania Polski w rozwoju technologii i badań kosmicznych. Konferencja była kierowana w szczególności do młodych. Więcej o konferencji w materiałach pokonferencyjnych na str. 83 niniejszego tomu.

Walne Zebranie AN

W dniu 22 czerwca odbyło się w Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Jagiellońskiego Walne Zebranie (wyborcze) AN. Zebraniu przewodniczył Marek Jamrozy. Władze AN na czwartą pięcioletnią kadencję ukonstytuowały się następująco: prezes – Bogdan Wszolek, wiceprezesa – Agnieszka Pollo i Marek Jamrozy, sekretarz – Rafał Kurczab, skarbnik – Agnieszka Kuźmich, członkowie zarządu – Agata Kołodziejczyk i Piotr Strzelczyk, przewodniczący komisji rewizyjnej – Marian Soida, członkowie komisji rewizyjnej – Stanisław Ryś i Tomasz Kisiel.

Podczas zebrania Zarządu, które poprzedziło Walne Zebranie, w szeregi AN przyjęto następujące osoby:

prof. Olexandr Petrenko (specjalista od rakiet, Narodowy Uniwersytet w Dnieprze, Ukraina), dr hab. prof. AT Rafał Kurczab (prorektor Akademii Tarnowskiej do spraw nauki i rozwoju), dr inż. Michał Kisilewicz (pracownik naukowy Akademii Tarnowskiej), dr Mariusz Gibiec (pracownik naukowy w AGH, opiekun KN AGH Space Systems), dr inż. Marta Żyłka (pracownik naukowy Politechniki Rzeszowskiej), dr inż. Wojciech Żyłka (pracownik naukowy Politechniki Rzeszowskiej i Akademii Tarnowskiej), mgr Robert Górka (dyrektor I LO w Gorlicach), mgr inż. Zbigniew Koczvara, inż. Dymitr Bajew (biznesmen, znawca tematyki raketowej), stud. Aleksander Kopyto (AGH Space Systems).

Dyrekcji OAUI należy wyrazić wdzięczność za życzliwe udostępnienie przestrzeni dla przeprowadzenia zebrania oraz za organizację atrakcji towarzyszących.



Marek Jamroz w roli przewodniczącego zebrania.



Uczestnicy zebrania podczas zwiedzania Obserwatorium.

Okrągłe urodziny Królowej Jadwigi

W OAKJ pamiętano o 650-rocznicy urodzin Królowej Jadwigi. Wspomniano ją w szczególności jako jedyną kobietę w roli króla Polski, króla słynącego z wrażliwej dobroci i ofiarnej troski o swój naród. Króla dobrze rozumiejącego kluczową rolę edukacji narodu dla wzrostu jego potęgi.

Pamięć Jadwigi Andegaweńskiej pozostaje żywa również u Polonusów węgierskich. Pani Jadwiga Városin z Budapesztu, wyjątkowa fanka Królowej Jadwigi, zorganizowała rocznicową, 2-tygodniową, wycieczkę dla całych rodzin Polonii Węgierskiej pod hasłem „Śladami Królowej Jadwigi”. Na trasie tej wakacyjnej przygody był Wawel, Biecz i Rzepiennik – ze swoim OAKJ.



Królowa Jadwiga na obrazie w Auli Collegium Novum
Uniwersytetu Jagiellońskiego.

Podczas mini sesji urodzinowej w OAKJ pani Jadwiga, z zawodu przewodniczka turystyczna po Budapeszcie, podzieliła się ze słuchaczami ciekawą hipotezą dotyczącą wizerunku Matki Boskiej Częstochowskiej. Istnieją mianowicie historycznie poparte przesłanki, że restauratorzy mocno zniszczonego obrazu Czarnej Madonny, nie będąc w stanie odtworzyć oryginalnych rysów jej twarzy, skopiowali z deski trumiennej wizerunek Królowej



Grupa z Budapesztu podczas zwiedzania OAKJ.

Jadwigi. Restauracja obrazu odbywała się na Wawelu na zlecenie Władysława Jagiełły i trwała długo. Artysci, którzy trochę wcześniej trudzili się nad wiernym odwzorowaniem (z pamięci) wizerunku młodej królowej, mieliby ten sam wizerunek namalować na restaurowanym obrazie.

Warsztaty raketowe

W dniach 5-10 sierpnia odbyły się w Rzepienniku już 10-te warsztaty raketowe, organizowane przez dr Agatę Kołodziejczyk. Tradycyjnie warsztaty prowadzili Kacper Zieliński i Andrzej Chwastek z Polskiego Towarzystwa Rakietowego. Wykonano siedem rakiet o zbyt wygórowanych parametrach, by można je było odpalać w Rzepienniku. Starty rakiet odbyły się na Pustyni Błędowskiej. Rakiety wznosiły się na wysokość ok. 900 m. Wszystkie modele rakiet z sukcesem wylądowały na ziemi.



Na Pustyni Błędowskiej przed rozpoczęciem startów testowych.

Colony 1

W dniach od 30 sierpnia do 7 września, w habitacie w Rzepienniku Suchym, odbyła się największa w świecie symulacja kolonii analogowej – Colony 1. Kolonia została zorganizowana przez Analog Astronaut Training Center. Uczestniczyło w niej 30 osób z 4 kontynentów i 14 krajów, w tym najmłodszy na świecie sześciolatek analogowy astronauta: Aleksandra Harasymczuk. W czasie misji z sukcesem zrealizowano 18 zadań eksperymentalnych oraz przeprowadzono symulacje spacerów kosmicznych (EVA - Extravehicular Activities). Patronami honorowymi tego trudnego przedsięwzięcia były Polska Agencja Kosmiczna, Europejska Fundacja Kosmiczna, Universeh – Europejski Uniwersytet Kosmiczny, Centrum Technologii

Kosmicznych AGH oraz Stowarzyszenie Astronomia Nova. Eksperymenty naukowe przeprowadzono we współpracy z Deakin University z Australii, Uniwersytetem w Kopenhadze, IPSA (fr. Institut Polytechnique des Sciences Avancées) z Tuluzy, Uniwersytetem w Arizonie, Uniwersytetem Rolniczym w Krakowie, AGH w Krakowie, Uniwersytetem Jagiellońskim (Collegium Medicum) oraz Uniwersytetem Ekonomicznym w Krakowie. Sponsorami były: bioinformatyczna firma SANO, firma ESTIMOTE i WE-SSPER.



Rodzinna symulacja spaceru kosmicznego.



Antropologia kosmiczna

(Autorka notki: Anna Szolucha z UJ)

11 września 2024 roku w Obserwatorium Astronomicznym Królowej Jadwigi gościła międzynarodowa grupa kosmicznych antropologów, którzy przyjechali do Krakowa, aby uczestniczyć w sympozjum organizowanym na Uniwersytecie Jagiellońskim pt. „Ethnographies of Outer Space”.

Antropologia kosmiczna zajmuje się badaniem społecznych i kulturowych aspektów eksploracji kosmosu. W swojej pracy antropolodzy kosmosu analizują, jak ludzie postrzegają kosmos, jakie znaczenie przypisują mu w różnych kulturach, a także jak wpływa on na nasze tożsamości, technologie i relacje społeczne. Podczas wizyty w Obserwatorium goście mieli okazję nie tylko zapoznać się z historią tego miejsca, ale także wysłuchać prezentacji Dr Agaty Kołodziejczyk o jej pracy w ramach Analog Astronaut Training Center. Antropolodzy mieli wiele pytań dotyczących funkcjonowania Centrum i z zaintrygowaniem przysłuchiwali się doświadczeniom Pani doktor Kołodziejczyk. Po prezentacji oraz gościnnym przyjęciu przez gospodarzy Obserwatorium Państwa Magdaleny i Bogdana Wszołków, przyszedł czas na obejrzenie z bliska części Obserwatorium oraz przejście się szlakiem Gagarina. Pomimo niedawno zakończonej misji w Habitacie 2.0 antropolodzy mieli także okazję obejrzeć z bliska i usłyszeć, jak wyglądają symulacje w habitacie oraz z jakimi wyzwaniami spotkali się jego uczestnicy.

W Rzepienniku Biskupim zagraniczni antropolodzy mieli okazję spotkać się z polskimi badaczami kosmosu. Wizyta w Obserwatorium była dla nich doskonałą okazją do zweryfikowania swoich teoretycznych rozważań w praktyce i nawiązania międzynarodowej współpracy. Dyskusje toczyły się wokół takich zagadnień jak: wpływ izolacji na psychikę człowieka, kulturowe aspekty eksploracji kosmosu, a także etyczne wyzwania związane z kolonizacją innych planet. Wizyta w Rzepienniku Biskupim utwierdziła ich w przekonaniu, że Polska jest ważnym ośrodkiem badań kosmicznych w Europie i że istnieje ogromny potencjał do dalszej współpracy.

Wizyta antropologów kosmicznych w Obserwatorium Astronomicznym Królowej Jadwigi była nie tylko okazją do wymiany wiedzy i doświadczeń, ale także do nawiązania trwałych relacji między naukowcami z różnych krajów. To wydarzenie pokazało, jak ważna jest interdyscyplinarność w badaniach kosmicznych i jak wiele jeszcze przed nami w odkrywaniu tajemnic Wszechświata.



Międzynarodowa grupa antropologów kosmicznych. W tle na kopule świeżo namalowany przez Vladimira Nikolina fresk o tematyce antropologiczno kosmicznej.

Astronauta NASA w Krakowie

W dniach 13-14 września przebywał w Krakowie prof. Jeffrey Hoffman, amerykański astronom i astronauta. Podjęciem niezwykle gościa zajął się przede wszystkim prof. Marian Soida, dyrektor Obserwatorium Astronomicznego UJ w Krakowie. W pierwszym dniu prof. Hoffman najpierw zwiedził Obserwatorium, a potem odwiedził Collegium Novum, Collegium Maius i Bibliotekę Jagiellońską. Wstąpił też do kolegiaty św. Anny, gdzie odwiedził pomnik-memoriał Mikołaja Kopernika. Gość był bowiem zainteresowany przede wszystkim krakowskimi pamiątkami po Mikołaju Koperniku.

W dniu 14 września, na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UJ w Krakowie, miało miejsce publiczne wydarzenie o nazwie „Oddech Marsa i eksploracja Kosmosu”. Impreza składała się z dwóch części. W pierwszej przedstawiono kilka wykładów popularnonaukowych o tematyce astronomicznej i astronautycznej: Dominika Król (Dlaczego galaktyki bywają aktywne?), Sebastian Szybka (Narodziny Wszechświata), Maciej Kania (Mars – planeta możliwości), Michał Drahus (HYADES – misja kosmiczna UJ), Aditya Narendra (Pomiar odległości do rozbłysków gamma z wykorzystaniem uczenia maszynowego), Jeffrey Hoffman (Produkcja tlenu na Marsie – MOXIE i przyszłość ludzkiej eksploracji kosmosu). Bezpośrednio po części wykładowej odbyła się otwarta debata, podczas której odpowiadano na pytania z sali dotyczące wcześniej wykładanych treści oraz lotów kosmicznych odbytych przez Hoffmana. Debatę prowadził prof. Patryk Mach, a odpowiedzi udzielali Jeffrey Hoffman, Sebastian Szybka i Michał Drahus. Dr Michał Drahus jest autorem i realizatorem ambitnego programu kosmicznego HYADES, który to program czyni Uniwersytet

Jagielloński liczącym się europejskim podmiotem w zakresie eksploracji kosmosu.



W Bibliotece Jagiellońskiej. Profesorowie Jeffrey Hoffman i Marian Soida pochyleni nad rękopisem *De revolutionibus*. (fot. K. Jarosik)



Debata. (Od lewej): Patryk Mach, Michał Drahus, Jeffrey Hoffman, Sebastian Szybka.

Od AN Jeffrey Hoffman otrzymał w prezencie książkę „Towards Mysteries of the Cosmos with Johannes Kepler”. Prezent okazał się trafiony, bo w spontanicznej reakcji na niego Profesor powiedział: „Contemporary World needs Keplers”. W rewanżu Astronauta pozostawił swój wpis na mapie Marsa, przywiezionej z OAKJ specjalnie na to wydarzenie.

[Bardzo polecamy prześledzenie w internecie dokonań prof. Hoffmana (red.)]



Memoriał Mikołaja Kopernika z pocz. XIX wieku
w Kolegiacie św. Anny w Krakowie.



Jeffrey Hoffman i Bogdan Wszolek z książką „Towards Mysteries of the Cosmos
with Johannes Kepler”



Wpis i podpis Jeffreya Hoffmana na mapie Marsa.

Kosmiczna inauguracja

Dnia 4 października w AGH odbyła się uroczysta inauguracja roku akademickiego. Uroczystość miała liczne akcenty kosmiczne, z których najdonioślejszym było oficjalne otwarcie nowego budynku D-3 dla Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki oraz dla Centrum Technologii Kosmicznych (CTK). JM Rektor AGH, prof. dr. hab. inż. Jerzy Lis, podczas swojego obszernego przemówienia wielokrotnie wymieniał różne prokosmiczne aktywności AGH, w tym organizację w AGH dziesiątej edycji European Rover Challenge. Minister Nauki i Szkolnictwa Wyższego Pan Dariusz Wiecek, a także Pan Wojewoda Małopolski Krzysztof Klęczar i Pan Marszałek Łukasz Smółka, wyrażali wielką aprobatę dla kosmicznych przedsięwzięć podejmowanych przez AGH i hojnie deklarowali wieloraką pomoc. Wykład inauguracyjny wygłosił prof. dr hab. Grzegorz Wrochna – prezes Polskiej Agencji Kosmicznej. Mówił o polskich aktywnościach prokosmicznych, czyniąc przy tym ukłony również w stronę AGH. Uroczyste otwarcie budynku D-3, odbywające się bezpośrednio po tym wykładzie, miało też czysto kosmiczny wydźwięk. Kosmiczną aktywność AGH w sposób systematyczny przedstawił licznie zebranym gościom sam Profesor Tadeusz Uhl, spiritus movens kosmicznego zrywu Uczelni. Na jego ręce prezes AN złożył w podarunku swój podręcznik akademicki „Wprowadzenie do Astronomii” – z komentarzem, że podstawowa wiedza astronomiczna jest kluczowa dla wszystkich, którzy angażują się prokosmicznie.

W budynku D-3 rozległą powierzchnię laboratoryjną przydzielono dr Agacie Kołodziejczyk, członkini Zarządu AN, odpowiedzialnej za liczne kosmiczne przedsięwzięcia w AGH.



Po przecięciu wstęgi na otwarcie budynku D-3. Od lewej: JM Rektor AGH, prof. dr hab. inż. Jerzy Lis, Minister Nauki i Szkolnictwa Wyższego Dariusz Wieczorek, prof. dr hab. inż. Tadeusz Uhl.



Prof. Ewa Szuszkiewicz (z prawej) z Uniwersytetu Szczecińskiego – astronomka i naczelną polską astrobiolog – przyjechała z gratulacjami dla Uczelni i personalnie dla dr Agaty Kołodziejczyk (z lewej), podejmującej działania na rzecz rozkwitu polskiej astrobiologii.

10 lat AGH Space Systems

Z okazji tego Jubileuszu, 8 listopada odbyła się konferencja „10 Years for Space” w Muzeum Lotnictwa Polskiego w Krakowie, której celem było celebrowanie dekady działalności Koła. Konferencja stała się wyjątkowym wydarzeniem, które zgromadziło zarówno ekspertów z branży kosmicznej, jak i studentów oraz entuzjastów technologii kosmicznych. W sumie w wydarzeniu wzięło udział blisko 150 osób zrzeszonych w wielu różnych organizacjach, uczelniach oraz firmach. Szczegółowy raport z konferencji znajduje się na str. 35 niniejszego tomu.

70-ta rocznica śmierci Tadeusza Banachiewicza

Z okazji 70-tej rocznicy śmierci prof. Tadeusza Banachiewicza, 15 listopada w Obserwatorium Astronomicznym UJ odbyło się uroczyste seminarium. Prof. Jerzy Kreiner (UKEN, Kraków) wygłosił wykład pt. „O inicjatywach obserwacyjnych Tadeusza Banachiewicza”, a prof. Aleksander Schwarzenberg-Czerny (CAMK, Warszawa) przedstawił referat pt. „Tadeusz Banachiewicz jako pionier informatyki w astronomii i naukach pokrewnych”. Po ciekawych wykładach, których treści zamieszczamy w niniejszym wydaniu (str. 245, 259 oraz 269), przy wypełnionej po brzegi sali wykładowej, miała miejsce dyskusja dotycząca zachowania spuścizny prof. T. Banachiewicza. W jej trakcie prof. J. Kreiner przekazał w darze dla OAUI wyjątkowy i niezwykle cenny prezent – dwa segregatory z archiwalnymi materiałami, związanymi z działalnością zawodową i osobistą Tadeusza Banachiewicza. Prof. Aleksander Schwarzenberg-Czerny zwrócił uwagę m.in. na fakt, że w Polsce po upływie 70-letniego okresu ochrony, autorskie prawa majątkowe do utworu wygasają, a utwór przechodzi do tzw. domeny publicznej. W praktyce oznacza to, że po upływie 70 lat od dnia śmierci twórcy każdy może swobodnie korzystać z jego dzieła.

W niedzielę 17 listopada grono byłych i obecnych pracowników OAUI złożyło w Krypcie Zasłużonych na Skałce kwiaty i zapaliło znicz przy sarkofagu ś.p. T. Banachiewicza.

W obu wyżej wspomnianych wydarzeniach uczestniczył senior krakowskiej astronomii dr Jan Mietelski, który jako jedyny z uczestników znał osobiście Tadeusza Banachiewicza.



W trakcie seminarium (od lewej): prof. Aleksander Schwarzenberg-Czerny, dr Marek Weźgowiec, prof. Sebastian Szybka, dr hab. Agnieszka Kuźmich, prof. Jerzy Machalski, dr Jan Mietelski i prof. Jerzy Kreiner. (fot. J. Kubisz)



W Krypcie Zasłużonych na Skałce. Od lewej: Grzegorz Kundera, Elżbieta Kuligowska, Dorota Antosiewicz, Jerzy Kreiner, Jerzy Kubisz, Marek Jamroz, Jan Mietelski i Tomasz Kundera. (fot. K. Jarosik)

Space Expedition II

W dniach 15-20 listopada Astronomia Nova zorganizowała w Rzepienniku drugie międzynarodowe warsztaty „Space Expedition – Human Factor in the Settlement of the Moon and Mission Operations Workshop”. Koszty przedsięwzięcia pokryto z grantu NAWA (National Agency for Academic Exchange). W szkoleniu udział wzięło 30 studentów: 18 studentów z Ukrainy, 4 z Francji, 2 ze Szwecji i 6 z Polski. Studenci podzieleni zostali na 2 grupy. Przez pierwsze dwa dni odbywali szkolenia w dwóch rzepiennickich habitatach. Trzeciego dnia zajęcia odbyły się w Obserwatorium Astronomicznym Królowej Jadwigi. W kolejny dzień odbył się hackaton, a w ostatni dzień podsumowanie szkolenia. W godzinach 9 – 15 uczestnicy wykonywali praktyczne zajęcia, wieczorami odbywała się część konferencyjna.

Wykłady poprowadzili: prezes AN dr Bogdan Wszolek, dr Daniel Ziemiański z Politechniki Krakowskiej, Mateusz Harasymczuk z Astro Tech, Reid Stowe, dr Agata Kołodziejczyk z Centrum Technologii Kosmicznych AGH.



Uczestnicy warsztatów w Obserwatorium Astronomicznym Królowej Jadwigi.



Zorza polarna w nocy 12/13 sierpnia 2024. (*fot. P. Strzelczyk*)

Część druga



Kometa C/2023 A3 Tsuchinshan-ATLAS na tle zorzy wieczornej (16.10.2024).
(*fot. P. Strzelczyk*)

AGH Space Systems – dziesięć lat istnienia

Mariusz Gibiec, Amelia Krupa

Akademia Górniczo Hutnicza w Krakowie

Minęło dziesięć lat od założenia Koła Naukowego AGH Space Systems. W 2014 siedmiu studentów zainicjowało założenie organizacji studenckiej, która do dzisiaj zrzesza studentów pasjonujących się rozwojem technologii kosmicznych, jak i chęcią popularyzacji wiedzy o kosmosie. Przez te dziesięć lat Koło dynamicznie rozwijało się, co było możliwe dzięki ogromnemu zaangażowaniu członków oraz ich opiekunów. Chęć do jeszcze większego rozwoju sprawiła, że oprócz Sekcji Rakiet, powstały dwie nowe – Sekcja Łazika oraz Sekcja Eksperymentów Balonowo-Rakietowych. Każda z nich prężnie pracuje nad własnymi projektami i odnosi sukcesy na międzynarodowych zawodach. Ponadto w Kole powstała sekcja Marketingu i Logistyki, która jest odpowiedzialna za widoczność zespołów w mediach społecznościowych, oprawę graficzną, kwestie logistyczne podczas zewnętrznych wydarzeń i zawodów oraz zajmuje się pozyskiwaniem i współpracą ze sponsorami.

Z okazji tego Jubileuszu, 8 listopada 2024 roku odbyła się konferencja „10 years for space” w Muzeum Lotnictwa w Krakowie, której celem było celebrowanie dekady działalności Koła. Konferencja stała się wyjątkowym wydarzeniem, które zgromadziło zarówno ekspertów z branży kosmicznej, jak i studentów oraz entuzjastów technologii kosmicznych. W sumie w wydarzeniu wzięło udział blisko 150 osób zrzeszonych w wielu różnych organizacjach, uczelniach oraz firmach. W ramach wydarzenia odbyły się liczne prelekcje, podczas których zostały poruszone tematy dotyczące m.in. astrobiologii, możliwości rozwoju kariery w sektorze kosmicznym, czy budowy i programowania systemów robotycznych. Wydarzenie cieszyło się dużym zainteresowaniem, dlatego było również transmitowane na żywo w serwisie Youtube. Nagranie to można obejrzeć na kanale Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH.

Konferencja oficjalnie rozpoczęła się o godzinie 10.00, a jej prowadzącymi byli Patrycja Pisarczyk i Wojciech Żebrowski. Gospodarzem tego

wydarzenia był dyrektor Muzeum Lotnictwa Tomasz Kosecki, który swoją przemową podziękował, że właśnie to miejsce zostało wybrane do świętowania tego wyjątkowego jubileuszu. Następnie swoje przemówienie wygłosił Prorektor Akademii Górniczo-Hutniczej ds. Studenckich profesor Rafał Dańko, który zwrócił uwagę na imponujące osiągnięcia i rosnący prestiż Koła, które mimo krótkiej historii już teraz działa na światowym poziomie. Profesor Tadeusz Uhl, dyrektor Centrum Technologii Kosmicznych AGH, opowiedział o genezie powstania Koła, podkreślając, że jego absolwenci z powodzeniem znaleźli zatrudnienie w polskim przemyśle kosmicznym, gdzie ich pasja przerodziła się w karierę zawodową.

Podczas wstępu do konferencji na scenie wystąpili również przewodnicząca KN AGH Space Systems Katarzyna Wcisło oraz opiekun Koła doktor Mariusz Gibiec, którzy powitali prelegentów i uczestników oraz otworzyli Konferencję.

Pierwszą częścią programu Konferencji były prezentacje przygotowane przez liderów poszczególnych sekcji AGH Space Systems. Lider sekcji Rakiet, Mikołaj Cichoń, przedstawił chronologiczny układ powstawania rakiet w tym zespole: w przeciągu 9 lat powstało 8 rakiet i odbyło się aż 19 lotów. Ponadto, opowiedział o sukcesach na międzynarodowych zawodach, między innymi o zdobyciu pierwszego miejsca na zawodach Virtual Spaceport America Cup 2021 wraz z rakieta Skylark. Teraz sekcja ta pracuje nad udoskonalaniem pierwszej w Polsce studenckiej rakiety na paliwo ciekłe – Turbulencja.

Kolejną prezentację poprowadził Arkadiusz Mika, lider sekcji Łazika. Przedstawił on pierwszy projekt tej sekcji – łazika Phobos, który mimo starań całego zespołu okazał się być niepowodzeniem. Jednak doświadczenie zdobyte przy jego budowie okazało się bezcenne, torując drogę do stworzenia Kalmana w 2017 roku. To właśnie ten łazik pięć lat później zdobył pierwsze miejsce na zawodach University Rover Challenge!

Amelia Krupa, liderka sekcji Marketingu i Logistyki, powstałej w 2019 roku, przedstawiła dynamiczny rozwój zespołu, wynikający z rosnącej rozpoznawalności Koła. W swojej prezentacji omówiła kluczowe zadania sekcji takie jak prowadzenie mediów społecznościowych, organizacja logistyki wyjazdów na zawody sekcji technicznych, współpraca ze sponsorami oraz tworzenie materiałów graficznych.

Ostatnią prezentację poprowadziła Barbara Szaflarska, liderka sekcji Eksperymentów Balonowo-Rakietowych. Mimo, że jest to oficjalnie najmłodsza sekcja, to jej działalność trwa niemal dziesięć lat. Na początku zespół brał udział w misjach balonowych Global Space Balloon Challenge.

Obecnie trwają prace nad projektem Elsa 2.0 oraz nad projektem GraviTE, który dostał rekomendację do lotu na Międzynarodową Stację Kosmiczną! Ponadto w ciągu 8 lat odbyło się ponad 20 balonowych misji oraz pojawiło się 9 artykułów konferencyjnych.

Po prezentacjach poszczególnych sekcji Koła nadszedł czas na wystąpienia zaproszonych gości. Pierwszym prelegentem był Maciej Myśliwiec, wieloletni przyjaciel AGH Space Systems oraz założyciel Space Agency, który od blisko dwóch dekad zajmuje się skutecznym przekazywaniem wiedzy oraz dzieleniem się z innymi swoją fascynacją nauką. Jego wystąpienie zatytułowane „Jak mówić o kosmosie, żeby ludzie chcieli słuchać” skupiło się na kluczowych elementach efektywnej narracji. Ponadto zwrócił uwagę na sposób przekazywania swojego odkrycia innym, tak aby zainteresować słuchacza.

Kolejnym prelegentem był dr inż. Tomasz Barciński z Centrum Badań Kosmicznych PAN, który poprowadził wykład pod tytułem „Kalman i sterowanie na orbicie”. W swojej prezentacji przedstawił genezę nazwy „Kalman”, pochodzącej od nazwiska Rudolfa Emila Kalmana – amerykańskiego matematyka pochodzenia węgierskiego, twórcy rewolucyjnego algorytmu. Po rozważeniu zagadnień związanych z „niepewnością” oraz „teorią i pomiarem”, dr Barciński szczegółowo wyjaśnił zasadę działania algorytmu Kalmana oraz jego zastosowanie w systemach sterowania.

Następnie Karol Kołacz, reprezentujący Radę Studentów przy prezeście POLSA, przedstawił jej działalność. Opisał działania mające na celu popularyzację sektora kosmicznego oraz integrację środowiska akademickiego.

W dalszej części programu dr Agata Kołodziejczyk przybliżyła historię pierwszego studenckiego projektu astrobiologicznego w Polsce oraz opowiadała o współpracy z członkami AGH Space Systems. Wymieniła również wiele projektów, które były lub nadal są prowadzone przez studentów w zakresie astrobiologii. Zaznaczyła, że są one nieocenionym źródłem wiedzy oraz mogą przyczynić się do zrozumienia zaistnienia i rozwoju życia w kosmosie.

Następnym prelegentem był Daniel Płudowski, który poruszył temat kariery w sektorze kosmicznym. Ponadto przedstawił analizę rynku pracy tego sektora w zakresie, nie tylko ogólnopolskim, ale także światowym.

Kolejną prelegentką była Kinga Gruszecka, która przybliżyła kwestię własnego biznesu kosmicznego oraz podzieliła się cennymi wskazówkami

jak radzić sobie w miejscu pracy. Co więcej, wymieniła organizacje i społeczności sektora kosmicznego, które mogą być bardzo pomocne dla zdobywania doświadczenia.

Następnym punktem programu było meteorytowe FAQ poprowadzone przez doktora Marcina Kaczmarzyka. Podczas tej części konferencji można było poznać odpowiedzi na najczęściej zadawane pytania na temat meteorytów, między innymi „Czy da się przewidzieć miejsce upadku meteorytu?” oraz „Jak często meteoryty spadają na Ziemię?”. Zostały również przedstawione różne rodzaje meteorytów.

Kolejny wykład o tytule „Produkty – następny krok Polski w rynku kosmicznym” został zaprezentowany przez Bartosza Paszczę. Przybliżył on początki firmy SpaceX oraz przyczyny jej sukcesu. Na koniec zwrócił uwagę, że polski sektor kosmiczny czeka dynamiczny rozwój oraz przedstawił proces powstawania satelity w firmie Creotech Instruments.

Jednym z kluczowych momentów wydarzenia była prezentacja poprowadzona przez poprzednich liderów Sekcji Łazika – Jana Brzyka i Adama Zagrajka. Tematem ich wystąpienia była robotyczna eksploatacja Księżyca, która obecnie staje się jednym z priorytetów agencji kosmicznych na świecie. Ponadto zaznaczyli istotną wartość zespołów studentów konstruujących łaziki w Polsce, którzy zdobywają doświadczenie i mimo to, że ich obecne projekty nie polecą w kosmos, to mogą na wczesnym etapie zetknąć się z prawdziwymi problemami i nabyć umiejętności, które będą początkiem ich udziału w eksploracji kosmicznej.

Obchody 10-lecia Koła Naukowego AGH Space Systems zakończyły się podsumowaniem sukcesów oraz wyzwań, jakie stanęły przed zespołem w ciągu ostatnich dziesięciu lat. Z pewnością można stwierdzić, że celebrowanie tego jubileuszu była idealnym odwzorowaniem codziennej działalności Koła, która polega na zjednoczeniu pasjonatów kosmosu. Zakończenie tej dekady jest jednocześnie początkiem nowego rozdziału – pełnego wyzwań i odkryć, które wciąż czekają na obecnych i przyszłych członków AGH Space Systems. Dziękujemy wszystkim za te wspólne dziesięć lat.

Poznając Kosmos, człowiek poznaje siebie

Włodimir Nikolin

Astronomia Nova

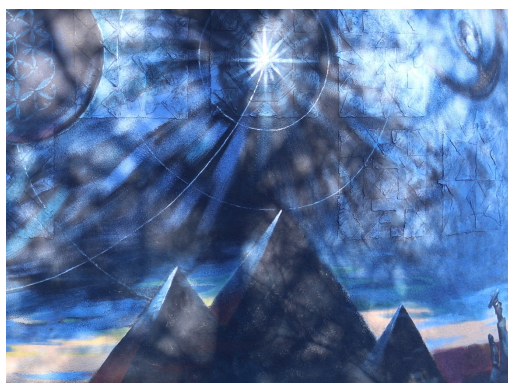
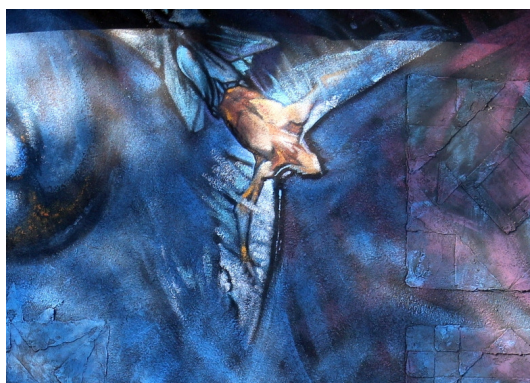
Czy kiedykolwiek zastanawiamy się jak niesamowitymi jesteśmy istotami, w których każda komórka istnieje i działa dzięki harmonijnemu dostrojeniu się do całego Wszechświata? Chęć wzbudzania takiej refleksji u osób odwiedzających Obserwatorium Astronomiczne Królowej Jadwigi przyświecała mi, jako artyście, podczas tworzenia kosmicznego fresku na ścianie kopuły astronomicznej.



Człowiek, w całym swoim jestestwie, zdaje się być elementarną kumulacją energii kosmicznej. Ma w sobie źródło kosmicznego napędu, który przenika duszę miłością i światłem. Wzywa ono człowieka do podejmowania wysiłków twórczych i pomaga odróżniać dobro od zła.

Co sprawia, że człowiek patrzy w gwiazdy? Że wyrusza w przestrzeń kosmiczną, pokonując trudności i przeciwności losu? Co w nas ciągnie ku niebu? Oczy, mózg, a może coś jeszcze? Może jakaś Uniwersalna Świadomość? Skądinąd, dlaczego dzisiejszy człowiek przestaje patrzeć w gwiazdy i zagłębiać się myślą we Wszechświat? Czyżby zapomniał skąd pochodzi

wieczne, niewyczerpane, źródło życiodajnej energii? Czy pogardza już Duchem Uniwersalnego Stwórcy, który wyposażył człowieka w stosowne siły i nieustannie wzywa go do myślenia i twórczego wysiłku dla świetlanego rozwoju ludzkości? Jest o czym myśleć.



Mam szczerą nadzieję, że moja praca ścienna nie zostanie pominięta powierzchownym, obojętnym spojrzeniem, lecz otworzy świadomość i uruchomi fantazję u odbiorcy dzieła. Aby nadać większy sens rozważaniom nad tym, co napisałem tekstem i namalowałem farbami, przywołam tu dwa przewodnie symbole zawarte we fresku.

Słońce jest symbolem ambicji zdobywania wiedzy i oświecenia, objawienia prawdziwej wiedzy, dającej energię, radość tworzenia i dobrobyt.

Skrzydła jako symbol wolności, dającej możliwość przekroczenia ograniczeń fizycznych i społecznych, stają się pomostem między niewolą a wolną realizacją marzeń. Zniszczenie skrzydeł, kojarzone z mitycznym Ikarem, przypomina nam o konieczności rozważnego i ostrożnego korzystania z zasobów naturalnych oraz z osiągnięć technologicznych.

Duch, dusza i ciało zawsze idą przez życie razem, jako jedna niepodzielna całość, stanowiąc istotę człowieka. Człowiek jest powołany do harmonijnego rozwijania tej niepodzielnej trójcy w sobie. Ogarnąć ją i zagospodarować własnym umysłem, a nie czyimś umysłem z zewnątrz. Powinien cały swój kosmiczny potencjał wykorzystać ku wznoszeniu się, ku wzrostowi.

Nasza świadomość jest kluczem do rozwikłania tajemnic Wszechświata. Zadajemy sobie pytanie, kim jesteśmy i co tutaj robimy, nie tylko jako osoby w ciele fizycznym, ale jako świadome istoty, zdolne do odczuwania, myślenia, wzniesienia marzeń i ich spełniania.

Rekordy lotów załogowych

Jacek Kruk

Uniwersytet Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie

W załogowych lotach kosmicznych, które mają już 63-letnią historię, rekordy padają niezbyt często, a niektóre wyniki utrzymują się przez dziesiątki lat. Przykładem takiego długowiecznego rekordu jest najdłuższy lot załogowy, zakończony 22 marca 1995 roku. Rekordzista – Walery Polakow – zmarł dwa lata temu nie doczekawszy poprawienia jego 437 dniowego wyniku. Jeszcze starszy rekord, bo pochodzący z października 1985 roku, dotyczy najliczniejszej załogi statku kosmicznego, kiedy to na pokładzie wahadłowca Challenger wyruszyło w kosmos ośmioro astronautów.



Walery Polakow w oknie stacji Mir widziany z amerykańskiego wahadłowca.
(NASA).

Rok 2024 przyniósł jednak kilka znaczących osiągnięć, w tym dwa rekordy w zbliżonych dziedzinach, a mianowicie łącznego czasu spędzonego przez kosmonautę na orbicie oraz liczby ludzi znajdujących się jednocześnie w kosmosie. 23 września 2024 roku powrócił na Ziemię Oleg Kononienko ze swej piątej misji na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej, a jego łączny nalot wyniósł 1110 dni. Poprzedni rekord, ustanowiony również

przez rosyjskiego kosmonautę Giennadija Padałkę, także w trakcie 5 misji, wynosił 878 dni i utrzymywał się przez 9 lat. Rosjanie od dawna przodują w ilości czasu spędzonego w kosmosie – zajmują osiem pierwszych miejsc (Tabela 1), dopiero na 9. miejscu jest Amerykanka Peggy Whitson z nalotem 675 dni. W 2025 roku ma ona wziąć udział w piątej misji (wraz z polskim astronautą Sławoszem Uznańskim), po której przesunie się na ósmą pozycję wyprzedzając Walerego Polakowa. Zresztą sam Kononienko, być może, nie powiedział jeszcze ostatniego słowa – 60-letni obecnie kosmonauta może odbyć jeszcze nie jedną misję, podczas gdy jego najgroźniejszy rywal Padałka wycofał się z oddziału kosmonautów w 2017 roku.



Oficjalny portret Olega Kononienki (Roskosmos).

Wrzesień 2024 roku przyniósł jeszcze jeden niezwykle rekord: w dniach 11-15.09 na orbicie wokółziemskiej (a ściślej na trzech różnych orbitach) przebywało jednocześnie 19 osób. Złożyły się na ten wynik: 3-osobowa załoga chińskiego statku Shenzhou, dwie 3-osobowe załogi rosyjskich statków Sojuz MS, dwie 4-osobowe załogi amerykańskich statków Dragon oraz 2-osobowa załoga amerykańskiego statku Starliner. Jeśli chodzi o skład narodowościowy to wyglądał następująco: 11 Amerykanów, pięciu Rosjan i trzech Chińczyków. W ostatnich latach standardem jest 10 osób pracujących na dwóch stacjach orbitalnych: międzynarodowej ISS (7 osób) i chińskiej Tiangong (3 osoby). Jednak w czasie wymian załóg przez kilka dni na stacji pracują dwie załogi – stara i nowa. Oprócz tego amerykańskie Dragony wykonują czasem misje orbitalne nie związane ze stacją ISS, co

TABELA 1. Łączny czas lotów.

L.p.	Kosmonauta (kraj)	dni:h:min:s	Liczba lotów
1.	O. D. Kononienko (Rosja)	1110:14:58:43	5
2.	G. I. Padałka (Rosja)	878:11:29:48	5
3.	J. I. Malenczenko (Rosja)	827:09:23:19	6
4.	S. K. Krikalow (Rosja)	803:09:38:31	6
5.	A. J. Kaleri (Rosja)	769:06:35:01	5
6.	S. W. Awdiejew (Rosja)	747:14:12:27	3
7.	A. N. Szkaplerow (Rosja)	709:08:05:25	4
8.	W. W. Polakow (Rosja)	678:16:33:04	2
9.	P. A. Whitson (USA)	675:03:50:12	4
10.	F. N. Jurczychin (Rosja)	672:20:39:32	5
...	...	...	...
47.	Guangfu Ye (Chiny)	374:13:58:06	2

mania wysokości trzeba używać silników rakietowych i zużywać paliwo. Powyżej 400 km z kolei zwiększa się zagrożenie radiacyjne od naładowanych cząstek uwieczonych w polu magnetycznym Ziemi (w tzw. pasach Van Allena). Dlatego przebywanie człowieka w tych rejonach powinno być stosunkowo krótkotrwałe, a statki załogowe posiadać dodatkową ochronę. Jednym z celów misji Polaris Dawn było właśnie zmierzenie wielkości tego groźnego promieniowania. W misji Dragona dokonano także pierwszego wyjścia nieprofesjonalnych astronautów w przestrzeń kosmiczną, użyto przy tym nowej generacji skafandrów kosmicznych.

Wspomnieliśmy na początku o nie pobitych rekordach Polakowa i Challengera, dodajmy jeszcze rekord dwóch amerykańskich astronautów, którzy mają za sobą siedem lotów kosmicznych. To Jerry Ross i Franklin Chang-Diaz, którzy swoje ostatnie loty odbyli w roku 2002 (Ross w kwietniu, Chang-Diaz w czerwcu). Od 22 lat nikt nie dołączył do tej elitarnej grupy, a tym bardziej nie pobił ich rekordu. Ale nic dziwnego – obaj swoje loty wykonywali w epoce wahadłowców, kiedy misje kosmiczne były krótkie ale częste. Nieprzypadkowo rekordowa liczba lotów tych pojazdów w roku – 9 – przypadła na pierwszy okres eksploatacji wahadłowców, konkretnie na rok 1985. Liczba wszystkich lotów załogowych w owym roku osiągnęła 11 – to rekord nie pobity do dziś. Po katastrofie Challengera na początku 1986 roku program wahadłowców zweryfikowano, a częstotliwość lotów zmniejszono, zaś po kolejnej katastrofie w 2003 roku, tym razem pojazdu Columbia, podjęto decyzję o ich wycofaniu, które ostatecznie nastąpiło w 2011 roku.

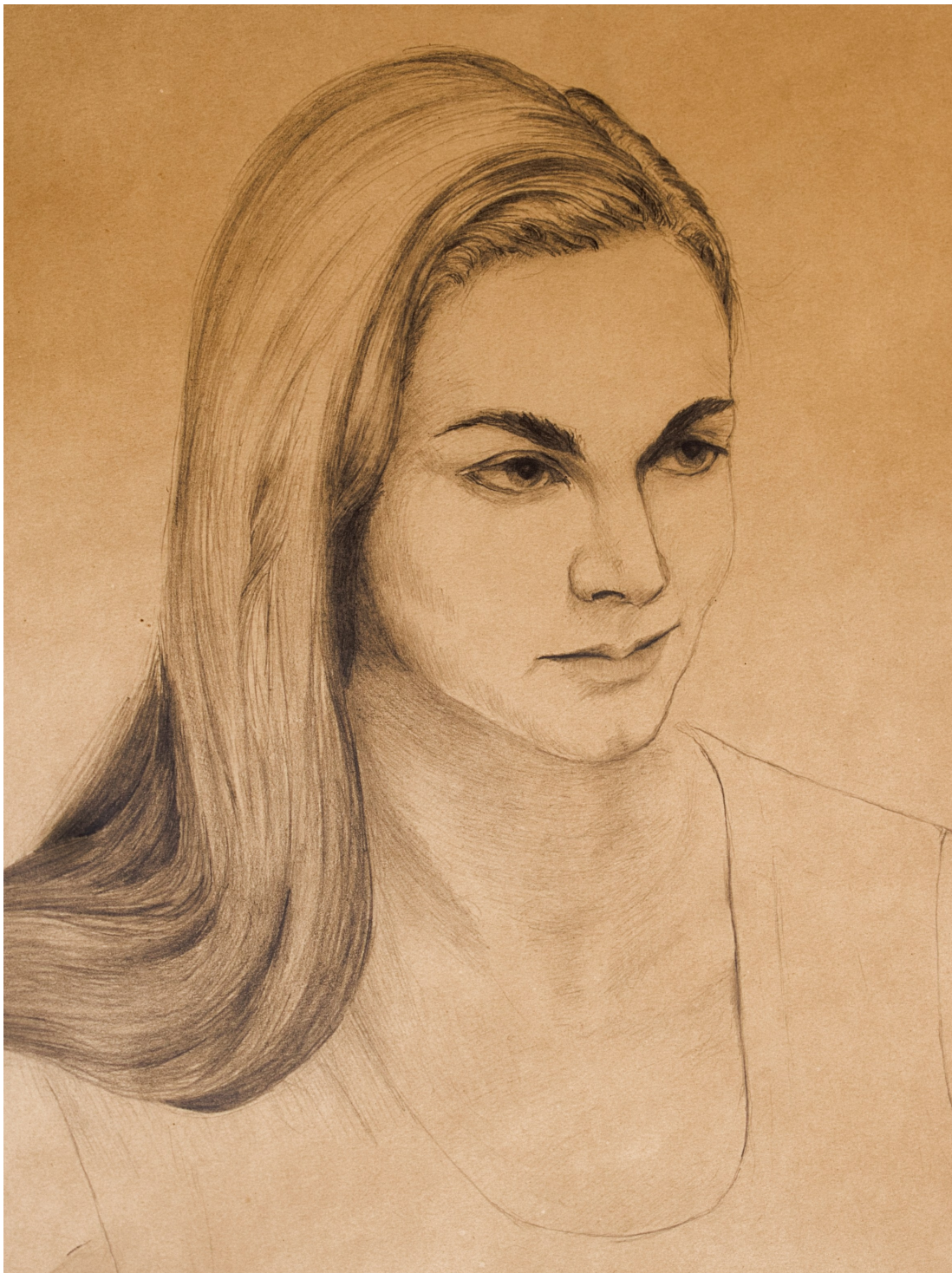
Warto na koniec odnotować osiągnięcie kosmonautów chińskich, zwanych też taikonautami. Otóż w 2024 roku chińska załoga stacji Tiangong uzyskała czas lotu 192 dni, co stanowi rekord krajowy, a jej dowódca Guangfu Ye przekroczył rok łącznego pobytu w kosmosie (374 dni) i zajął 47 pozycję na liście rekordzistów sumarycznej długości lotów. Choć historia

chińskich lotów załogowych liczy sobie zaledwie 21 lat, kraj ten w astronautyce szybko dołączył do światowej czołówki. Chińskie ambicje sięgają nie tylko orbity wokółziemskiej – na rok 2028 zapowiedziano lot załogowy wokół Księżyca, a w 2030 lądowanie taikonautów na naszym satelicie.

* * *



Planowana załoga Axiom-4 we wnętrzu statku Dragon. Od lewej: Węgier Tibor Kapu, Hindus Shubhanshu Shukla (pilot statku), Amerykanka Peggy Whitson (dowódca misji) i Polak Sławosz Uznański-Wiśniewski. (fot. *AxiomSpace*)



The photo is of an original drawing of Dr. Virginia Trimble drawn by Richard Feynman in 1965, titled, "Astronomer." Virginia was 22 years old.

[Submitted by Dawn Deshefy, cousin of Virginia Trimble. Photo was taken by Bradley Stelcik in March 1, 2025.]

Virginia Trimble, Pioneer of Dark Matter Astrophysics and Historian of Astronomy

Interview by David Zierler

Director of the Caltech Heritage Project (February 19, 2024)

Foreword: The Caltech faculty decision to admit Virginia Trimble as a graduate student in astronomy was “exceptional,” as she calls it. The de facto admission policy at the time was that the program was not available to women, but Trimble was too brilliant, too full of promise, and too well-credentialed not to gain admission. Her subsequent career, as one of the world’s preeminent scientists working in dark matter research and the structure and evolution of stars and galaxies, supports a decision that never should have been a question in the first place. With over 600 publications, legendary conference talks, and a distinguished record as a historian of astronomy, Trimble is both a giant of the field and a trailblazer for the long overdue inclusion of women in the ranks of elite astronomy.

In the discussion below, Trimble speaks frankly of the gender politics of the time, and the strategies she used to navigate in an environment where it was never just about the science. Trimble insists that she had fun and she always felt empowered, not despite the power imbalances but because she learned to use them in her favor. As Trimble jokes, she was a happy participant in all kinds of interactions that “would get everyone fired today.” Whether despite the culture or because of it, the result was a sustained investigation of the Crab Nebula which remains a classic in the field, a postdoctoral appointment at the University of Cambridge during the dying days of the Steady State theory of the universe, and a decorated research career that continues to the present day.

Interview Transcript

DAVID ZIERLER (DZ): This is David Zierler, Director of the Caltech Heritage Project. It is Monday, February 19, 2024. It is my great privilege

to be here with Professor Virginia L. Trimble. Virginia, wonderful to be with you. Thank you so much for joining me.

VIRGINIA TRIMBLE (VT): Thanks for asking!

DZ: To start, would you please tell me your title and institutional affiliation?

VT: I am Professor of Physics and Astronomy – in fact Professor 8 in the University of California system – at University of California, Irvine.

DZ: Virginia, how long have you been at University of California, Irvine?

VT: That's a complicated question, because I arrived in Fall of 1971, but for 30 years I spent half of each year at the University of Maryland because I was tenured in California and my husband Joe Weber was tenured in Maryland. From 1973 until his death in 2000, we spent January to June in California and July to December in Maryland.

DZ: The duality of having appointments at both universities, having that dual perspective, what was the value of that for your research and all of the things you've worked on?

VT: Research, that's going to take a long one, but it was useful in giving me the perspective on how different universities could organize their teaching, their committees, their enforcement of academic honesty on their students, and umpteen-godzillion other things, some of which were the same both places and many of which were different.

DZ: You're still active in research and teaching these days. What is interesting to you in physics and astronomy and astrophysics?

VT: Let me back up and answer the second half of your previous question. When I arrived at UC Irvine in the Fall of 1971, I was not only the first woman on the faculty; I was the first astronomer, and I was the only woman and the only astronomer for 15 years each. Going to Maryland, at least there were other astronomers, and in fact there were a few other women astronomers, like the wonderful, wonderful Jill Knapp who was just finishing her graduate work. She is now at Princeton. She pioneered teaching in prisons.

DZ: Given that you're still active in research and writing, what is interesting to you in astronomy and astrophysics, cosmology, all the things that you've worked on?

VT: Let me give you a very broad answer – the structure and evolution of stars, galaxies, and the universe, and of the communities of scientists who study them. That second half is history of science and financial metrics.

DZ: I'd love to know, as a fellow historian of science, what prompted you to get interested in history of science?

VT: I got old.

DZ: [laughs]

VT: I'm – semi-seriously. From time to time, I was asked to do something, either introductory remarks at a conference or sometimes concluding remarks, and I would realize that in the course of the conference, or on the program of the conference, nobody had said anything about how we got to the position to have this conference. So I started putting in, into introductory remarks, and sometimes into concluding remarks, a bit about the history of the subject of the conference. I started writing, and people asked me to write more. My publication list passed a thousand last year. [laughs]

DZ: Amazing.

VT: A lot of them are book reviews, but they're almost all sole author.

DZ: [laughs] A fun question – if you could go back in time, to the first time that you thought about dark matter – here we are in 2024 – are you surprised at how little progress or how much progress has been made in dark matter research?

VT: Neither of the above. Look, when you're 80 years old, it takes a lot to surprise you!

DZ: [laughs]

VT: Seriously. I wrote one of the first all-over reviews on dark matter for *Annual Reviews* in 1983, or somewhere in the mid 1980s, and what I thought then is what I still think that the phrase is a wonderful shorthand for an enormous range of observations that indicate somehow gravity gets stronger as you go to larger scales.

DZ: Do you feel like we're any closer today than in 1983?

VT: We know some more things that are not the right answer or probably not the right answer, because people have looked hard for them and not found them, or done observations or experiments to test what would happen if a particular kind of dark matter was there in large quantities. So, if ruling out things is progress – and I think in science we have to count ruling out things as progress, and sometimes in politics as well – but if ruling out things is progress, there has been progress. Do I think people are going to find a magic particle that is the answer? I don't know!

DZ: We'll have to wait and see.

VT: I am in some way a protégé of Richard Feynman; it doesn't bother me.

DZ: [laughs] That's right.

VT: He always said, "If you have an unanswered question and it bothers you, you shouldn't be a physicist."

The Path to Astronomy

DZ: That's a great segue. I want our conversation today to be a complement to the oral history that you've already done with David DeVorkin, and of course what brings us together is Caltech, so I want to focus our conversation on the stories about how you got to Caltech and your experiences at Caltech. Let's start first – as an undergraduate, I know you were very wide-ranging in your interests. When did you begin to focus on astronomy?

VT: Never. [laughs] In fairness, in the good old days, when I applied to UCLA to be an undergraduate there, it was the only place I applied, and Caltech was the only place I applied for graduate school. When you applied to UCLA in those days, you had to declare a major. I wanted to be an Egyptologist, and I almost made it by marrying into the profession, but in the end I didn't. But you had to declare a major. They didn't offer archeology at UCLA as an undergraduate major. They sent a catalog, and the first thing listed was art. That was clearly not a good choice, overwhelmingly. But my father looked at the catalog and my father declared, "You've always been interested in astronomy." What he had in mind was that when I was a kid I liked being taken to Griffith Observatory.

There were three astronomy majors. There was pure astronomy, there was astronomy math, and astronomy physics. I applied in astronomy math, and was accepted at UCLA, with a Thomas H. Watson Memorial Scholarship. I didn't cost my folks very much to go to college. I started out in astronomy math. That moved over to engineering, because it was really orbits, and orbits became satellites rather than meteors, comets, and asteroids. I stayed behind in liberal arts in astronomy physics. The official advisor was George Ogden Abell, of blessed memory. I approached what would have been the beginning of my senior year – it turned out I would in fact finish in three and a half years instead of four because of good use of summer school – Uncle George said I should apply to Caltech, and he put me in for a Woodrow Wilson Scholarship, fellowship. I got the fellowship and I was admitted to Caltech, so I went. I did the astronomy physics major with a lot of other courses, because in those days students were allowed to take many more courses than they are now. The norm was six every year plus a unit left over to sing with the UCLA A Capella Choir under Roger Wagner. I got to take linguistics. I got to take a year of ancient Egyptian hieroglyphs with the wonderful Miriam Lichtheim. I got to have a year of ancient Egyptian art and architecture with the remarkable Alexander Badawy. And paleontology and other fun things.

DZ: What were George's connections at Caltech? Did he have formal collaborations here?

VT: George was a Caltech alum. I think he was maybe the second person to do a PhD in Astronomy there after Greenstein established the program. I think the first was Helmut Abt, who still lives and flourishes, and I exchange emails with him occasionally. I think Uncle George was the second Caltech PhD in Astronomy, and then the third was Chip Arp. Then they finally got away from the A's.

An Exceptional Admission to Caltech

DZ: Did you know at the time that Caltech had almost no women students, graduate and certainly not undergraduate?

VT: Yes and no. It was only somewhat afterwards that I actually saw the catalog that said, "Women are admitted only under exceptional circumstances." I wrote my essay to explain my exceptional circumstance, which was that I had the Woodrow Wilson Fellowship and it required me to change institutions. That meant I had to leave UCLA. Caltech was the only other place in Southern California that had astronomy in those days. I was not prepared to leave home. I lived with my parents through my first year of graduate school. I wasn't prepared to leave home and I wasn't prepared to leave Hollywood, because there were some money-making opportunities there.

DZ: What were those opportunities?

Hollywood Interlude

VT: The one that is now I think almost not invisible was being with *Twilight Zone* for a year.

DZ: What did that entail?

VT: You're not old enough to remember Rod Serling and *Twilight Zone*, are you?

DZ: I've heard of it, of course.

VT: Their last year of new programs, they wanted to get the ratings up so they could sell the residuals for more. It was the publicity agency, Rogers & Cowan that had the idea, to get an elegant call girl and dress her in a space suit. The space suit disappeared. But because I had been in *LIFE* magazine the previous year, somebody at Rogers & Cowan identified me as a likely Miss Twilight Zone. I interviewed with the publicity agency and

with Rod Serling as a possible person to tour for them to all the Nielsen cities – Houston, Dallas, Chicago, Cincinnati; I know them all in order – to tour all the Nielsen cities to advertise *Twilight Zone*, in newspaper interviews and morning wake-up programs, radio, television, and dot-dot-dot. I did a couple weeks of that and it brought in enough money to pay my registration and books and things for the last two years of my time at UCLA.

DZ: How long did you stay with *The Twilight Zone*?

VT: I was Miss Twilight Zone for the year. I toured for two weeks. Then the next year they didn't do new programs anymore. The official shtick was I was supposed to read the scripts for scientific accuracy. They sent me a whole pile. I read them, and I sent some suggestions. I believe my suggestions were taken twice out of umpteen godzillion. But that's a lot for a kid.

DZ: [laughs] What were the circumstances of winning the Woodrow Wilson Fellowship? Obviously this was available to women.

VT: I only learned later that first-year NSF's were not, so I didn't get an NSF until my third year of graduate school. The Woodrow Wilson was in those days designed primarily for the liberal arts, but I was not in fact the only Caltech astronomy student to have been offered one. I took it because somebody else – it may have been Jeff Scargle – somebody else was offered one and took an NSF because it paid more. I took the Woodrow Wilson because it was what I was offered. I was interviewed by them, and what made them think I was an appropriate person in spite of being an astronomy physics major was that I could read and write ancient Egyptian hieroglyphics.

DZ: That was too irresistible for them.

VT: There's no such thing as useless knowledge, David.

DZ: There you go. I like that.

VT: Smith College interviewed me for my first job out of graduate school because they liked that, but what really persuaded President Mendenhall that I was the right person for them – I could sing second sister in the faculty production of *Pirates of Penzance*.

DZ: [laughs] That works!

VT: It works. I'm teaching Physics of Music this quarter.

DZ: Really!

VT: As well as General Relativity, yeah.

DZ: Oh, that's great. Virginia, what year did you arrive at Caltech?

VT: 1964. I left in Spring of 1968. I went from high school graduation to a PhD in seven years and three months.

DZ: Wow. What was it like when you arrived on campus? What do you remember?

VT: They decided I should come for an interview, because they had written that my credentials clearly made me eligible, but they thought I might be happier elsewhere. The first thing I consciously remember is going up the stairs in Robinson Hall and looking around to find a room number I was supposed to report to. The second thing I remember – I talked to a number of faculty members. Greenstein wasn't there that day, and I talked to him on the phone later. But I noticed that Guido Münch was wearing a wedding ring in May of 1968. When I arrived as a student in September, the wedding ring was gone.

DZ: And then what happened?

VT: What do you think happened? [laughs]

DZ: [laughs]

VT: Somebody told me I should tell all my stories because I know all the skeletons in the closet. There are contexts where I *am* the skeleton in the closet. Two things happened. I did my PhD with Guido on the Crab Nebula, and we became lovers. We were almost getting married, and he decided he couldn't afford me and dumped me for a woman who was self-supporting.

DZ: How did you feel about that?

VT: How did I feel?

DZ: Yeah!

VT: Miserable!

DZ: But you recovered?

VT: Oh, yes! I fairly recently wrote the National Academy of Sciences memoir about him.

DZ: What did you say?

VT: I knew him both as a human being and as a scientist, and that's a perspective you don't get all that often.

The Beautiful Wrongness of Steady State Cosmology

DZ: That's right. Virginia, what were the big topics in astronomy when you joined at Caltech? What were people working on?

VT: A lot of them were still working on stars. Cosmology and relativity had not been part of the landscape there. H.P. Robertson, the great relativist, had died a couple years before, and they had not replaced him. When they replaced him, it was in 1966, and they hired Kip Thorne from

Princeton. So, there was not relativity. There was not really cosmology. It was not taken seriously by the Astronomy faculty. The students wanted cosmology, and so Jim Gunn, who is also now Emeritus at Princeton, organized a student seminar where we met weekly and each of us took a topic and we taught each other cosmology. Maybe mostly Jim Gunn taught the rest of us, in fact. I picked Big Bang versus Steady State, which was also then settled. It wasn't really an open issue. But I've always loved Steady State cosmology; it's just wrong. It's beautiful; it's just wrong. Most people worked on stars and galaxies, where stars and galaxies included interstellar material, and trying to understand the distribution of stuff in the Milky Way. The spiral structure of the Milky Way was only just then being established by the radio astronomers, so one looked for it also in optical data. Münch himself was interested in stuff above and below the plane of Milky Way in spiral structure, and also as the Space Age got started, in the atmospheres and other structures of Mars and Jupiter and so forth. I never dabbled in planetary science. Most of his students did stars and galaxies, but he himself became quite interested in the atmosphere of Mars, showing that it was much thinner than people had thought before, and in the structure of the atmospheres of Jupiter and Saturn, in the data from Mariner 9. Greenstein continued to love white dwarfs. That was my second-year research project. It was thought to be impossible. If you have an impossible task, you give it to a graduate student! And if it's *really* impossible, you give it to a female graduate student. Consider the case of Jocelyn Bell at Cambridge.

Jesse Greenstein and White Dwarves

DZ: What came of the white dwarf research?

VT: Several papers. The first one was Greenstein and Trimble; the second one was Trimble and Greenstein. It turned out that what he wanted *could* be done, which was to measure the general relativistic redshift of the light coming from the surface of white dwarfs. Back in 1964 or 1965 when we started this, there were three white dwarfs whose mass was known – the companion of Sirius, the companion of Procyon, and the companion of 40 Eridani B. Their masses were 0.4, 0.6, and 1.2 solar masses. Now, with a factor of two uncertainly, what is the average mass of a white dwarf? Gravitational redshift was a way to try and establish that. The number that we ended up with is now regarded as slightly too large. The official number now is something like 0.55 solar masses. Our number was more

like 0.65. So, the gravitational redshift was a little larger than people studying the atmospheres now think it should be. The reason for this is not understood, at least not by me.

DZ: It's not necessarily that you made a mistake?

VT: I suppose in some sense I must have, but it's not clear what mistake I made. The problem was to figure out what part of the line profile to focus on. The absolute core was not relevant because that is established way up in the upper atmosphere, where you have the most opacity. The extreme wings were wrong as well, because they're down in where pressure effects are important. If you look at an average white dwarf hydrogen line profile, it has a sharp core, it has wings, and it has a sort of plateau. I focused on the plateaus. Apparently there's some very small effect that makes the average white dwarf line profile very slightly redshifted when you look at the plateaus. It's got to be something like convection. It has got to be a gas-type effect. I don't know to this day exactly what it was. I also am not actually sure I was wrong [laughs]. The other measurements are also indirect, and they measure m over r squared, rather than m over r . Nevertheless, those papers at the time were very highly cited, and Greenstein talked about the results at the 3rd Texas Symposium in New York in January of 1967.

DZ: You mentioned your appreciation for Steady State. Did you ever meet Fred Hoyle?

VT: Of course! I did a two-year postdoc in Cambridge! He was officially my advisor! [laughs]

DZ: Did he ever give up on Steady State, or he held onto that until the end?

VT: Yes and no. [laughs] Look at the other two first. Hermann Bondi went on to become a major figure in politics of science in Britain and in Europe in general. He was the director of ESRO, The European Space Research Organisation. Tommy Gold also went on to other things like the surface of the Moon and quasars and what have you. Hoyle stuck largely to cosmology, though he also did things like trying to prove that the archeopteryx fossil was a forgery. He had three or four postdocs and young faculty with him in Cambridge who reinforced his self-confidence. One is still alive, Jayant Narlikar in India, so there is still one Steady State person alive, I think. And I hope that will remain true for a long time!

Maxwell said that science progressed one funeral at a time, because people who believed in something died out and that made room for a new idea. Narlikar was one of Hoyle's acolytes and he still supports some kind of Steady State, I think, as did Geoff Burbidge and others. Chip Arp, of

course. But Hoyle was an absentee landlord. He only came to the Institute when his buddies were there to work on something with him, Willie Fowler and the Burbidges and so forth, so the intellectual leadership at the time I was there was provided by Martin Rees, who is now the Astronomer Royal and Lord Rees of Ludlow and all that.

DZ: What was Hoyle's perspective on the cosmic microwave background?

VT: Of course that came already quite late in his life, but he and some others tried to – well, they did a calculation, which was correct. It turns out the universe is about a quarter helium, and if you turn a quarter of the hydrogen into helium, you get a bunch of photons, and the energy density in those photons is the equivalent of about three Kelvin. You can't use it; it's in the wrong wavelength. They postulated an intergalactic population of long, thin, iron needles which would thermalize the radiation from fusing hydrogen to helium into a microwave background. It's not impossible. It begins to fail when you ask about deviations from the precise black-body spectrum and deviations from the precise isotropy of the microwave background. Eventually, it fails. But it only truly failed when Hoyle was really past being very interested in the universe, I think.

DZ: Were there any Steady State believers at Caltech?

VT: No. [laughs] Dear old Uncle Allan – Allan Sandage is quoted in Helge Kragh's *History of Cosmology* as saying, "Steady State was never taken very seriously in California."

DZ: [laughs]

VT: That's hysterically funny because by California he means Pasadena, because just 50 or 70 miles south is the University of California San Diego, and Margaret and Geoff Burbidge were there, and they took Steady State very seriously.

Palomar and Imaging the Crab Nebula

DZ: Right. [laughs] Virginia, tell me about your time at Palomar Observatory. What did you work on there?

VT: I was attempting to get images of the Crab Nebula in narrow wavelength bands that would focus on particular emission lines to do a study of the distribution of ionization and excitation energy in the Crab Nebula, using more data points than were available from existing spectra taken by first Rudolf Minkowski and then by Guido Münch. The way to do that was to isolate the line with a combination of particular Eastman Kodak emulsions of which there were like 25 in those days, and a particular filter

that would cut off light both too long-wave and too short-wave to be in the particular line you wanted. This would have been something that might have been rather interesting done with a 200-inch, in a large image of the Crab Nebula, but 200-inch time was not available to graduate students. I did this with a 48-inch Schmidt. The images in the different lines looked very different, and I did some analysis of that – it’s in my thesis – and it was sort of published in *Astronomical Journal* a couple years after I finished the PhD, and refereed by Rudolf Minkowski, who found a horrible mistake in the table and just kindly told me and didn’t tell anybody else. He was a real gentleman.

Anyway, the goal was to find out the distribution of ionization and excitation energy, which is a moderately interesting problem now because the ionization unquestionably comes from continuum radiation that is powered by the synchrotron radiation from the electrons that are accelerating by the pulsar, whereas a lot of the excitation apparently is powered by collisional energy between the outer bits of the nebula and the surrounding interstellar material. But the data weren’t good enough to do a very good job of this. And nobody else is now interested. [laughs] It’s just one of those things.

DZ: If I understand correctly, you were also a bit of a woman pioneer at Palomar. There really had not been women who worked at Palomar before.

VT: I was number two to be assigned time in my own right. Margaret Burbidge had observed there, extensively, with time assigned officially to Geoff, her husband. The first woman ever assigned time in her own right at Palomar was Vera Rubin, and I was number two when I went in 1966. She went in 1965. When I went in 1966, I was the second woman ever assigned time there in my own right, in my own name.

DZ: What was the state of the art in Crab Nebula research, and how did your research respond to those big questions?

VT: There had been two PhD dissertations on the Crab before mine. The first one was a very extensive study of everything available at the time in 1957 by Lodewijk Woltjer. Then Bob Williams, who is now the retired head of Space Telescope Science Institute, did a thesis on plasma processes in the Crab Nebula. What happened was that Guido had two piles of plates, one taken in emission lines and one taken in the continuum. He divided his plates into those two piles and he gave the continuum plates to Jeff Scargle and the emission line plates to me. He said, “Go measure things.” I think – well, I guess I *know* – that he thought the continuum plates were going to be more interesting. And with a little more – well,

five years later, they probably would have been, because there's all kinds of motion that is centered around the pulsar. But the pulsar had not yet been discovered.

What might be interesting in the emission line plates was not obvious. But what I got out of that was a good measurement of the distance, a good measurement of the fact that the expansion had been accelerated over the age of the nebula, that the acceleration was the amount you would expect from the pressure from the relativistic particles and magnetic field inside that were making the continuum the synchrotron radiation, and a bit about the ionization and excitation. As this was going on, the first pulsars were discovered, and then one in the Crab Nebula that had in fact been imaged through radio earlier by Tony Hewish and Sam Okoye in Cambridge. Sam Okoye was an interesting guy, the first Nigerian astronomer, radio astronomer. It turned out to be a good year to work on the Crab Nebula. It got me invitations to go to conferences and be invited to give talks and get a job. It was a good year to be interested in the Crab Nebula.

DZ: What was it like working at Palomar?

VT: Cold! The Crab Nebula is up in November, December, January, which is not the best weather in California. I was rained out part of the time. There's a Chip Arp story that goes with that. When the telescope could be used at all, the first thing was it was cold. I hate being cold. The other thing is that the 48-inch Schmidt – now called the Oschin Telescope, I think – required in those days that you lift a plate holder into the focal plane and clamp it down at the back of the telescope, lifting it over your head. California in those days had a law that women could not have jobs that required them to lift more than 40 pounds. [laughs] The 48-inch plate holder weighed 50 pounds. I could just barely lift it. But the night assistant usually helped. I was violating the laws of the state of California when I observed there! [laughs] I was lifting something more than 40 pounds. I couldn't do it now, probably. I'm also not tall enough to reach the focal plane of the 48-inch!

There were lots of interesting things. My very first run, I hadn't understood the time schedule. You finally get to bed maybe at 5:00 or 5:30 a.m., maybe 6:00 a.m. after developing your plates and drying them out and all the rest, and I didn't realize that the first meal would be at 12:00. I was awakened by my thesis advisor calling the next morning to find out how it had gone, and I was grateful because otherwise I would have gotten no food! [laughs] The other thing – I require regular meals. I really do. It turned out just fine in the end. They arranged things so that people

who were on a daytime schedule get a lunch at 12:00, the observers who observed the previous night get breakfast at 12:00, and then there's a general meal before sunset for everybody. Then for those who are on the night schedule there's midnight lunch, which in those days was fixed by the night assistants.

DZ: Virginia, tell me about Guido. What was he like as a person?

VT: It's Guido; it's a hard "G."

DZ: Oh, Guido, okay.

VT: Guido. [laughs] He was very charming. He really was. He was a womanizer, of course. The wedding ring that he had shed between May and September of 1964 was already his second marriage. His third wife really was the love of his life, Eve-Marie. She was Danish. She predeceased him of metastasized breast cancer when they were in Europe. She was a wine importer and self-supporting, which made her more attractive than me in many ways! [laughs] After she died, he married a fourth time. He liked women. I think there's no doubt about that. He was really a very, very good advisor in the sense that he had at least a dozen PhD students at Caltech while he was there, and one or two later in Europe, and he saw to it that everybody got a job afterwards if they were job hunting. One of the students opted to go to Australia with her husband, which is perhaps not a – anyway – and his students all got jobs. I sensed they all stayed in science afterwards, which isn't always true. So there's no doubt he was a very good advisor.

He had started his life of course as a theorist with Chandrasekhar in Chicago, and his early papers are on radiative transfer and things like that, the spectrum of the Sun and stars. He got to Caltech brought by Greenstein, who also came from Chicago, and was expected to become an observer, and he worried that he didn't know enough about telescopes and spectrographs and things, but it turned out he did. Late in life, he turned to this theory again mostly to understand things about the atmospheres of the planets and some more about the spectra of Sun and stars. He was both a theorist and an observer, and a very good one, I think.

DZ: Did he collaborate with Jesse? Did they work together?

VT: No. *Almost* no. In those days, senior scientists didn't work with each other, with rather few exceptions. You have to look hard to even think of significant papers with two authors or three from before the 1960s. Greenstein went to Caltech in 1948, I think, and Guido came a couple years later, 1951 maybe. There's one Münch and Zirin paper on gas above the galactic plane. There are a couple of Münch and Neugebauer things. Greenstein did some papers with his students and maybe postdocs, but

most of his work was as a sole author. It was characteristic at the time.

DZ: Was Jesse your co-advisor?

VT: No, Jesse – I did my second year research project with Uncle Jesse, the white dwarf thing. Guido was my thesis advisor.

DZ: What was it like to work with Jesse?

VT: Well, [laughs] I had almost forgotten until he reminded me after some years – he was the only faculty member who ever drove me to tears over scientific issues. I was supposed to be measuring something, I had not a clue how to do it, and he tried to explain it. The more he explained, the less I understood. I finally left his office with tears streaming down my cheeks. [laughs] Jim Gunn chatted with me and said it was all right, he'd tell me what I had to do. And he did, and it was all okay. Jesse was – again, he gave me a project he didn't think I could do, because he had tried and he couldn't do it. He had a computer working for him, Grace Vess, and she couldn't do it. If the head honcho and the computer couldn't do it, why could this long-haired [laughs] slinky Hollywood female do it?

DZ: Was he gracious about it when you proved your mettle?

VT: Well, I was second author on the first paper, and first author on the second paper, so yes, I guess so.

DZ: [laughs]

VT: We had a tiny run-in on that first paper. Jesse actually spoke very, very clearly, but he didn't write as clearly as he spoke. I saw the first draft of this paper that I was going to be second author on, and I thought my job was to reorganize it so it read like competent English. When I did that, he was very angry.

A Different Side of Feynman

DZ: Let's move on to meeting Richard Feynman. When did that happen? How did that happen?

VT: Well, let me put on my glasses. In the good old days, all the women graduate students in Astronomy shared a – we varied in number, from one or two to five – we shared an office in the back of the library so a librarian could act as a dueña. I was walking across campus from a class, and I don't remember which class, but it was in the Spring of 1965. Feynman in those days was learning to draw from Zorthian. Am I going to get Zorthian's first name? Maybe not, doesn't matter. The deal was they were going to teach each other. Feynman will teach Zorthian physics, and Zorthian

would teach Feynman art. Feynman learned to draw fairly well; Zorthian never learned any physics.

But I was walking across campus, and Feynman was learning to draw, and he wanted models, and he spotted me walking across campus and started to follow me. I disappeared into Robinson, the astronomy lab, just as Guido was coming out. Feynman stopped Guido and he said, “I’m hunting. Maybe you know the quarry.” He described me. Guido said yes, he knew me, and took Feynman back to the office in the back of the library and introduced us. Feynman said would I pose for him, and I said sure. For a while it was Tuesdays for two hours for actually \$5.50 an hour, which was a lot in those days, and all the physics I could swallow. I did this quite regularly through spring and summer, and into the fall, of 1965. One day my mother phoned me – October, I had by then an apartment in Pasadena – my mother phoned me and said, “Feynman has just won the Nobel Prize.” By the time I got to school at 7:30, I already knew. Richard came into my office. It was a Tuesday. The physics prizes are still announced on Tuesday. Richard came to my office in the back of the library and said, “We have to cancel our [laughs] drawing appointment” – for that evening. I said, “Yes, I know, and congratu...” – I don’t know what I said – “Wow, congratulations,” or whatever. We continued sporadically after that. But I was among the first to get to congratulate him on the Nobel Prize. That day, he was wearing a jacket and tie, which he hardly ever did.

DZ: Where did the drawing sessions take place?

VT: In the basement of his house in Altadena. His wife Gweneth would bring us orange juice and cookies halfway through the two hours.

DZ: Being a graduate student, being drawn by Richard Feynman, did you ever feel uncomfortable? Did it ever feel odd?

VT: No. David, you have to understand, I was actually very attractive in my youth. That men would want to look at me dressed or undressed did not surprise me. And Feynman was enormous fun. He had all these stories, many of which are now of course in books, but he told them, live. By the time I was posing for him he was actually very good. I have one drawing of myself, by him, that hangs – I can see it now. It’s on my living room wall. It’s my second favorite portrait ever of myself. My very favorite was done by the UCLA Egyptologist, Alexander Badawy, and it’s chalks and it’s gorgeous. Anyway, it was fun posing for him. He told stories. If he didn’t say anything, he expected the model to talk. He didn’t like silence. I remember pontificating about R Cor Bor stars once.

He always wanted to do science his own way. He wasn’t good about

taking off from somebody else's ideas. He had to work things out for himself. He didn't much like having graduate students. He said that a PhD thesis was research done by the professor under extremely difficult circumstances, because he couldn't give a problem to a student until he kind of already knew the answer himself. The result was he did not have large numbers of graduate students who became famous, unlike Schwinger. Julian Schwinger had 65 graduate students or something, many of whom became world-class physicists.

DZ: Was Feynman always a gentleman during the artist sessions?

VT: [laughs] The answer to the question you're trying to ask is no, but it would not have made much difference if the answer had been yes. The answer was no, not because – he was worried about babies. I was worried about the fact that Gweneth was going to arrive with orange juice in about 10 minutes. [laughs]

DZ: [laughs]

VT: Does that answer the question you wanted to ask?

DZ: It does. Thank you, thank you. Did you learn physics from him? Did he just like to talk, or it was actually educationally useful for you?

VT: I certainly learned vocabulary. Different branches of science have been even more hostile than astronomy was. The first woman I ever met who sounded like a particle theorist was Glennys Farrar. She's essentially my age and she's up for election to the American Academy of Arts and Sciences this year. I wished I could have voted for her twice. I learned some vocabulary, and knowing the right words in which to ask a question is enormously valuable. It gives you a very different kind of answer. I once met a nine-year-old boy who asked in literally these words, "What is the status of the suggested companions of Barnard's star?" He got a very, very different answer than the nine-year-old who said, "Are there planets around other stars?" I learned vocabulary, certainly. Another thing about Feynman, of course, is when he gave public talks and lectures at conferences and taught class, you always came away from one of his lectures enormously inspired, but you usually couldn't do any calculations you couldn't do before. I'm not the only one who said this. It was characteristic of his presenting things that you'd come away inspired and wanting to work on them but you wouldn't quite know where to start to do the next calculation.

DZ: Did Feynman take you seriously as a scientist? Did he ever take an interest in your research?

VT: He listened, sometimes. Yes, and in fairness, he is thanked in my thesis because he actually read some chapters and provided advice.

DZ: Virginia, who else was on your thesis committee?

VT: Good question. Feynman was not, I don't think. Certainly Harold Zirin, because he is the one who coached me through the qualifying exam. Uch! Bev Oke. Jesse. And I think Wal Sargent. Oh, I'm sorry, no, the qualifying exam committee included Robert Leighton, who found me totally incompetent and decided that my PhD could not be Astronomy and Physics. I just didn't know enough physics to please him. It was five. Both the qualifying exam committee – which was an oral in those days, three hours, and the PhD exam were orals – with five faculty. The PhD exam was fun because when you're defending your thesis, you know more about it than anybody else in the room, so defending a thesis is a fun exam. The oral qualifying was not a fun exam! [laughs]

DZ: They put you through the wringer?

VT: Well, I failed, is what it comes down to. I failed the first time around. There's no doubt about that. I had to do it a second time, and Leighton still wasn't satisfied.

DZ: What did you improve upon the second time around?

VT: In the 10 weeks in between, Harold Zirin very nobly had coached me, once a week, on things like how does Mössbauer scattering work, how do lasers work, things like that. High powered new technologies depending on new physics. The qualifying exam, I had assumed it would cover what we had had in class, but it didn't. It covered things like what was in *Scientific American* over the past year, what was in the colloquia in Physics and Astronomy over the past year. I had actually missed colloquia for a good part of a quarter because I was dating a guy who expected me to turn up at 5:00, so I couldn't go to colloquia for a long time. He went off to Japan for two weeks, and – well! – I got to go to colloquia.

I wasn't prepared for the qualifying exam because I didn't know what was going to be on it. The guys all knew. People had been keeping track of what the questions were and who asked what, and they had a notebook and passed it around so that people went to the qualifying exam knowing what things they were going to be asked. I was out of that particular social circle. The gal who took the exam the same year I did, Vicky Peterson, her husband was also a graduate student, so she saw the notebook, so she did just fine on the qualifying exam. Afterwards, there was at least one faculty member who said he was terribly puzzled that Vicky did so much better than Virginia, because he thought Virginia was smarter. I don't think that's true [laughs] but he was surprised how badly I did. It was because I had never seen the questions before!

DZ: What about Jim Gunn? Did he serve in an advisory capacity to you

at all?

VT: [laughs] Look, back in 1960-whatever, most of the things that went on would get us all fired these days! [laughs]

DZ: Yes, a very different time.

VT: [laughs] In fact, I pulled out my copy of Jim's PhD dissertation quite recently, because I'm going to talk about weak lensing. His PhD dissertation actually was what is now called weak gravitational lensing. It wasn't called that, then. I pulled it out because I'm going to be giving a talk for the American Physical Society in April as the winner of the Pais Prize. I pulled that out to talk about weak lensing. Anyway, yes, we were very close. Does that answer your question? [laughs]

DZ: Yes it does. Yes it does.

VT: Of course Guido was angry with both of us. I don't know whether it is of any use or not, but nobody was ever jealous of Feynman.

DZ: You mean due to his fame, nobody was jealous?

VT: I don't know what it was. But Guido was – controlling, I suppose, is the right – I don't know – Guido was seriously jealous of Jim Gunn. He was seriously jealous of Peter Scheuer. But he was never jealous of Feynman. I mean, in connection with me. I don't know what that means. It has puzzled me on and off for [laughs] 50 years now. Jim was the one who dried my tears when Jesse drove me to distraction over how to measure the white dwarfs, and he taught me several other things – of course how to calibrate the plates of the Crab Nebula's emission lines. He had invented and built an instrument that turned nonlinear H&D curves into something pretty much linear in the number of photons that hit the plate. I scanned those plates with that device and he taught me how to use it.

DZ: Virginia, was JPL, the Jet Propulsion Laboratory, an asset for you at all? Did you ever spend time up at the Lab?

VT: As a scientist, no. [laughs] After Jim was working there, we used to meet fairly often underneath a particular willow tree on the grounds of JPL.

DZ: [laughs]

VT: That was a long time ago! I never worked there. I've been there since then, of course, but not as a student.

DZ: What do you see as the main scientific conclusions of your thesis?

VT: The Crab Nebula is at a distance of two kiloparsecs, and the expansion has been accelerated by the right magnetic field which is order 10^{-4} gauss, and a corresponding energy density in relativistic electrons that accounts for the synchrotron emission, all the way from X-rays to radio.

That supply of electrons has to be kept up, and how that supply of electrons was kept up was a major puzzle in 1964, 1965, 1966. Even for the optical emission, it was kind of on the ragged edge. When the X-rays were discovered in 1964 or 1965, it became a real issue, and therefore the pulsar in the Crab Nebula was a godsend for all of us. By then I had my PhD.

Cambridge and the Paczyński Code

DZ: Did you want to move on to other things after Caltech, or did you want to stay with Crab Nebula research?

VT: Oh, I had some very, very good advice. It came from Lodewijk Woltjer. Yes, [laughs] I was also engaged at one stage, and I still have the ring! [laughs] He had a view from his days I think working with Jan Oort in the Netherlands that when you finish your PhD, you should give that topic a five-year sabbatical and not return to that topic for at least five years. I kind of did that. I went and worked on other topics – things in stellar structure and evolution – using the Paczyński Code which I got a copy of in 1969 at the summer school at Stony Brook. I did structure and evolution of stars for a while with that. I did binary stars and various other things. I came back to the Crab occasionally and contributed – well, Woltjer and I had one paper together on it, persuading ourselves if nobody else that there was no extra material at low temperatures hidden in the cores of the line-emitting filaments where there could have been. It's still kind of a puzzle where all the mass is, that that star must have had. There's a couple in the neutron star and a couple in the nebula, but it must have started out with like eight or ten.

I did a few Crab Nebula things in my two years in Cambridge, a couple of them with Martin Rees. There's a paper called "Planet, Pulsar, 'Glitch' and Wisp"; that's Rees, Trimble, and Cohen. There's something on the expansion energy, I think, or the expansion center, that was I think more or less correct, things that appeared in *Monthly Notices* or *Nature* or conference proceedings. Then I started doing the stellar structure with Paczyński. That was an interesting exchange, because he was in Poland, and I was in Cambridge, and then I was in the U.S. We wrote back and forth to each other, frequently, and each letter had to be read on both sides, because a wicked capitalist country, a wicked communist country, people couldn't exchange letters with technical content without somebody reading them! [laughs]

DZ: [laughs]

VT: Our colleagues didn't care. Our colleagues were in favor of it, because he was brilliant. That structure code, the Paczyński Code – still forms of it are in use – was the first open source astronomy computer code where you could get everything about it and all the instructions, and exactly what each step did, and make whatever changes you wanted. If you wanted to describe a star with a different composition or a different rule for the interface between radiative and convective transport, or a different rule for opacities, you could play with it. You could make changes. I did that, mostly with his advice – entirely with his advice. And – yes. [laughs]

DZ: A few questions on the social and political side during your time at Caltech. In the 1960s, was the campus at all politically oriented? Were people talking about Vietnam or race relations or women's liberation?

VT: Hardly at all. I almost missed the 1960s, you know. [laughs] It didn't happen at Caltech, and it really didn't happen at Smith College! There were a couple things that we were aware of. One was President Johnson's poverty line. A bunch of us were at some social event – I don't remember now which one – and realized that we were all beneath Johnson's poverty line, but we wouldn't always be there, so it was okay. Then the Peace and Freedom Party was trying to get on the ballot in California, and a bunch of us dropped whatever party we had been registered with – I was a Republican in those days, because my parents were Republicans, at least my father – we dropped our registrations and registered for the Peace and Freedom Party to get it on the ballot. Then I went back to being [laughs] something normal after that. So, there was some awareness. There were also people of course who went to Vietnam, including Jim Gunn, who had been in ROTC in Texas to pay for his education and therefore owed the government a couple of years. He did one year at JPL and part of a year in Vietnam. But most of us were not very politically aware, I think it's fair to say.

DZ: Of course in 1970, Caltech finally made the decision to go co-ed, admitting women undergraduates. Were you aware of any of those conversations? Did you participate in them?

VT: No, I was gone by then. The little bit of that that I was aware of was Jenijoy La Belle, the first woman hired on the faculty, in some humanities-type department. The department did not want to give her tenure, and she made a big fuss and got tenure, and I thought it was very tiresome of her.

DZ: You don't recall faculty members ever debating the question of admitting women undergraduates? That must have happened after you left.

VT: Well, or it wasn't something they shared with graduate students. Or

they weren't very interested, either. They certainly weren't talking about it except a few special cases, where somebody came with a package deal with a thesis advisor or with a spouse that they really wanted the guy, in graduate school. At the undergraduate level, at the time they didn't actually have living facilities for women. The men graduate students could live in dormitories but women had to rent apartments. The economic issues were serious; let me just leave it at that. I don't know who really was making the push for women undergraduate students. I don't think it was Astronomy.

The First Among Many Women Astronomers

DZ: Your admission as an extraordinary exception, did those rules relax during your time at Caltech? Were more women graduate students getting admitted that didn't have a package deal?

VT: In Astronomy, yes. I was the first admitted on my own, and the reason was that I had this fellowship where I couldn't stay at UCLA. The gals who came after me – Judy Cohen was in effect part of a package deal because she thought – and initially he thought – she was engaged to somebody who came the year before. Then he dumped her. Donna Weistrop was certainly admitted entirely on her own. Sue Werner, who moved over to Geology and became Sue Kieffer after a year or so, came as a student of Harold Zirin when he joined the faculty. He had been at Colorado and she had been his student at Colorado in Astronomy. She was in our girls' office for a summer and then moved over to geosciences. Anneila Sargent came with her husband who came on the faculty, Wal. I think that takes care of the lot. It was then like a decade before there was another woman who got her PhD in Astronomy. There were a few gals in Physics. Jean Swank, I think.

DZ: Do you think your research accomplishments at Caltech helped to pave the way for other women graduate students, or convinced the faculty that women really should be a bigger part of the program?

VT: I shouldn't think so. If I convinced them, I think it was women were a nuisance! [laughs]

DZ: [laughs] For the last part of our talk, a few reflective questions. What has stayed with you from your Caltech days? What do you remember fondly and not so fondly?

VT: [laughs] Fondly – the fact that it worked, that it all became possible.

My father was a chemist, quite a good chemist but a rather poor businessman, and he tapped out with a master's degree just after World War II. But I think my parents never doubted that I would go to college, that I would get a PhD. My father used to say, "A PhD is not a union card. It's something you do for yourself." [laughs] It has become a union card, and that's kind of sad. I think we had a lot more fun than most graduate students do now. There was no question of there being a firm 40-hour limit, 20-hour limit, on the number of hours we could work for somebody else. The one year that I didn't have a fellowship I was paid as a research assistant. It was Jesse's money because I was doing the white dwarf project. It didn't occur to anybody that there was a limit on the number of hours I was allowed to work on this. Mostly it was a lot of fun. And a lot of fun with the guys. When I arrived, there were 14 women in the entire campus directory excluding secretaries. You put 14 women down among 1,400 men, they're going to have a lot of fun. [laughs] That's life! It was a wonderful place to learn things. There's absolutely no doubt about that. Cambridge was equally wonderful.

DZ: What did you learn about what it takes to succeed as a scientist that has stayed with you from Caltech?

VT: Nothing. I'm not aware of having been consciously influenced in this way. I had very good luck with three people all of whom turned out to be, A, morning people, and B, thinking that hard work was a good thing – my father, my thesis advisor, and my husband. I continue to think that hard work is a good thing, which is how I got all my papers graded before this [laughs] conversation, because I started at about 6:30 this morning!

DZ: On that note, one final question to wrap up our discussion – have you remained connected with Caltech? Have you been an active alumnus over the years?

VT: Not very. I've been invited back to give talks twice. I've been invited back to do other things a few times. I was elected to the Alumni Association board of directors, and they told me I'd have to come up about once every three months. It turned out the first month I had to come up three times. But what really drove me to resign from the board of directors was the following: I had been on it for maybe a year, and there came up the issue of a paper directory of the alumni. I still have the last one that was issued as a paper version. It was decided that it was too expensive to produce a paper alumni directory. At the same time at that meeting it was announced that they had just committed \$60 million to a new dormitory. The alumni directory would have cost about one percent of that, maybe even a tenth of a percent of that. I said to myself, this organization is

not doing things where what I can do will be useful to them or to me, so I resigned from the board of directors of the Alumni Association.

DZ: You made your own choices.

VT: Well, you can't make choices for anybody else! They won't do what you want! [laughs]

DZ: [laughs]

VT: And letting other people make your decisions doesn't work very well either! [laughs]

DZ: It has worked for you; there's no doubt about that.

VT: I also married a man who I had known him 11 days. [laughs]

DZ: [laughs]

VT: *Portions* of 11 days, and that lasted twenty eight and a half years until he died.

DZ: Virginia, this has been a lovely conversation. I want to thank you so much for sharing your memories with me.

VT: Thanks for asking.

[Reprinted with permission by David Zierler]



The photo is of an original drawing of Dr. Virginia Trimble drawn by Alexander M. Badawy (1913-1986).

[Submitted by Dawn Deshefy, cousin of Virginia Trimble. Photo was taken by Bradley Stelcik in March, 2025.]

Święta Łucja dnia przyrzuca

Bogdan Wszolek

Obserwatorium Astronomiczne Królowej Jadwigi w Rzepienniku Biskupim

[Upominek dla św. Jadwigi Królowej w roku 650-rocznicy jej urodzin]

Wstęp

Powszechnie wiadomo, choćby z przekazów medialnych, że najkrótszy dzień przypada na półkuli północnej podczas tzw. przesilenia zimowego, które ma miejsce około daty 22 grudnia i poprzedza bezpośrednio Boże Narodzenie. Jest to święto radości z nadejścia okresu wydłużającego się dnia, z narastającego włączania się Słońca w życie człowieka i przyrody.

Pospolicie znanym jest też powiedzenie: „Święta Łucja dnia przyrzuca”. Świętą Łucję wspomina się 13 grudnia, zatem ponad tydzień przed przesileniem zimowym. Jak zatem pogodzić „niezgodność” poglądów na temat daty, od kiedy na półkuli północnej zaczyna przybywać dnia?

W niniejszym artykule zostanie pokazane, że wspomniana niezgodność jest pozorna i nie kłóci się z ustaleniami astronomicznymi.

Uwaga: Wszelkie użyte w dalszej części specjalistyczne określenia i wzory są zdefiniowane i wyprowadzone w ramach podstaw astronomii. W razie potrzeby zaleca się skorzystanie np. z podręczników: [1] – Jan Mietelski, *Astronomia w Geografii*, PWN Warszawa, 1989 (lub dowolne starsze/nowsze wydanie); [2] – Bogdan Wszolek, *Wprowadzenie do astronomii*, Wyd. Poligram w Częstochowie, 2018, (dostępna jest również wersja elektroniczna książki na stronie www.astronomianova.org w zakładce publikacje).

Długość dnia

Dzień jest w astronomii definiowany jako odstęp czasu dzielący wschód i, następujący po nim, zachód Słońca. Wschód Słońca występuje w momencie, w którym górny brzeg tarczy słonecznej przetnie po stronie wschodniej

linię horyzontu astronomicznego obserwatora. Zachodowi odpowiada sytuacja, kiedy górny brzeg tarczy słonecznej przetnie horyzont po stronie zachodniej. Długość dnia jest funkcją szerokości geograficznej φ , na której znajduje się obserwator oraz deklinacji Słońca δ dla ustalonej daty. Funkcja ta uwzględnia również wydłużenie dnia wynikające z refrakcji atmosferycznej oraz z rozmiaru katowego tarczy słonecznej.

W układzie równikowym godzinny wschód Słońca określa t_w – kąt godzinny wschodu. Podobnie, kąt godzinny Słońca t_z odpowiada zachodowi. Długość dnia wyraża się zatem jako $T_D = 24^h - t_w + t_z$. Kąty godzinne t_w oraz t_z można łatwo obliczyć stosując ogólny wzór na cosinus kąta godzinnego obiektu na sferze niebieskiej:

$$\cos t = (\sin h - \sin \delta \sin \varphi) / \cos \delta \cos \varphi$$

Występujące we wzorze h jest wysokością (w układzie horyzontalnym) obiektu na sferze niebieskiej. Dla wschodzącego i zachodzącego Słońca wysokość ta ma wartość ujemną, wynoszącą około $-0^\circ 51'$ (jeśli przyjąć za promień katowy tarczy słonecznej uśrednioną wartość $0^\circ 16'$, a za refrakcję atmosferyczną w horyzoncie wartość średnią $0^\circ 35'$).

Jeśli za h w powyższym wzorze wstawimy wartość $-0^\circ 51'$ to wyliczymy kąt godzinny zachodu Słońca t_z oraz t_w (równanie ma bowiem dwa rozwiązania w zakresie kątów od zera do 360 stopni).

Dla rozwiązania powyższego równania ze względu na t musimy znać nie tylko h , lecz także szerokość geograficzną obserwatora φ oraz deklinację Słońca δ . Deklinacja Słońca zmienia się w ciągu roku w zakresie od $-\epsilon$ (dla przesilenia zimowego) do $+\epsilon$ (podczas przesilenia letniego), gdzie $\epsilon = 23^\circ.44$ jest kątem pomiędzy płaszczyznami równika niebieskiego i ekliptyki. Dla danej daty odczytuje się wartość deklinacji Słońca z odpowiedniej tabeli lub wylicza się bezpośrednio z dość skomplikowanych wzorów.

Z powyższego wynika, że długość dnia w zadanym miejscu, która zależy praktycznie tylko od deklinacji Słońca, powinna dla obszarów pozapolarnych półkuli północnej przyjmować minimalną wartość dla przesilenia zimowego, kiedy deklinacja Słońca przyjmuje minimalną wartość $\delta = -\epsilon = -23^\circ.44$, odpowiadającą początkowi astronomicznej zimy. Przypada to około 22 grudnia.

Jak zatem odnieść się do stwierdzenia „Święta Łucja dnia przyrzuca”? Z pewnością nie rozchodzi się w tym stwierdzeniu o długość dnia, bo ta zaczyna narastać dopiero po 22 grudnia. Nasuwa się inna możliwość, mianowicie taka, że przy wciąż jeszcze malejącym dniu, z jakiejś przyczyny,

czas zachodu Słońca zaczyna od 13 grudnia się opóźniać. Opóźniający się zachód miałyby być tym „dnia przyrzuceniem”.

Podążając tym tropem należy sobie wyraźnie uzmysłwić czym właściwie jest ten „czas zachodu Słońca”. Tu każdy zgadnie, że chodzić może tylko o taki czas, jaki pokazują nasze zegary. Problem jednak w tym, co nasze zegary pokazują. Jak się mają wskazania naszych zegarów do tego co się rozgrywa na niebie?

Definicje czasu

Dotykając pojęcia czasu należy zauważyć, że nie jest ono w przyrodoznawstwie wystarczająco doprecyzowane. Z jednej strony czas obejmuje następstwa zdarzeń, a z drugiej czas charakteryzuje tempo upływu. Pierwszy jego aspekt zdaje się być mocniejszy od drugiego. Tempo upływu czasu jest podwójnie względne; zależne od definicji jego jednostki i zależne (zgodnie z teorią względności Einsteina) od układu odniesienia w którym jest mierzone.

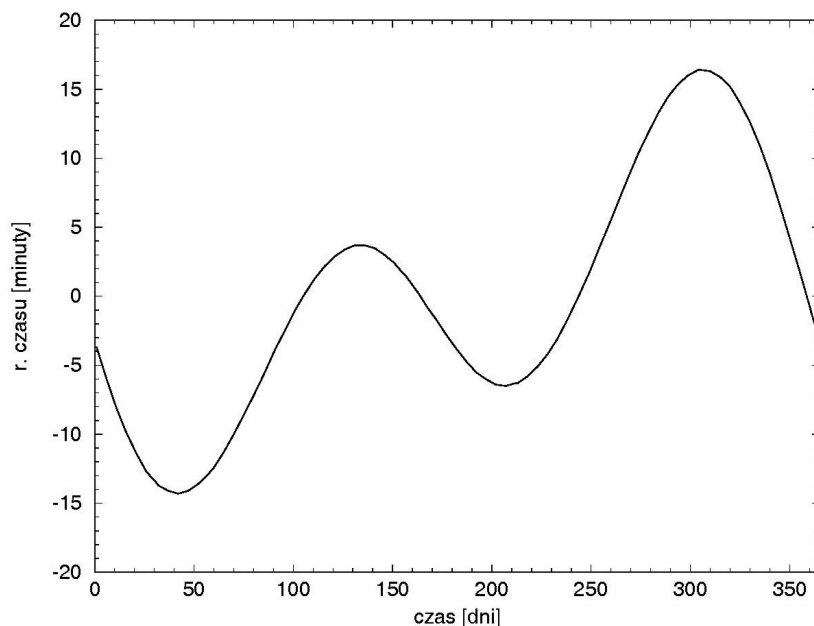
Za naturalną jednostkę miary tempa upływu czasu przyjęto z początku dobę prawdziwą słoneczną (odstęp czasu pomiędzy kolejnymi górowaniami Słońca). Jednostka ta nawiązuje do tempa wirowania globu ziemskiego oraz do tempa przemieszczania się Ziemi w jej ruchu dookoła Słońca (odzwierciedlonym jako pozorny ruch Słońca na tle gwiazd, średnio ok. 1° na dobę w kierunku wschodnim). O ile prędkość kątowna wirowania Ziemi jest bardzo wolno zmienna, o tyle ruch naszej planety po jej okołosłonecznej orbicie eliptycznej odbywa się (w zgodzie z prawami Keplera) ze zmieniającą się wyraźnie prędkością kątową. W konsekwencji doba prawdziwa słoneczna (wiernie oddawana przez zegary słoneczne) ma zmieniającą się z datą długość. Te zmiany są praktycznie niezauważalne w życiu codziennym, jednak uznano kiedyś, że taka zmieniająca swoją wartość jednostka upływu czasu jest wielce niewygodna, bo jak tu zrobić zegary mechaniczne nadążające za tymi zmianami? Dziś bez problemu można zaprogramować zegary elektroniczne tak, żeby uwzględniały nierównomierny ruch Słońca na tle gwiazd, zatem będące doskonalszą, bo całodobową i niezależną od pogody, wersją dawniejszych zegarów słonecznych.

W miarę postępu cywilizacyjnego uznano, że zamiast naturalnego wskaźnika tempa upływu czasu należy wprowadzić jego wersję ulepszoną. Wymyślono tzw. czas średni słoneczny. W miejsce Słońca, z jego niejednostajnym ruchem rocznym po ekliptyce, wprowadzono tzw. słońce średnie

– punkt poruszający się jednostajnie wzdłuż równika niebieskiego. Odstęp czasu pomiędzy kolejnymi górowaniami tego matematycznie określonego punktu nazywamy dobą średnią słoneczną. Tempo przemieszczania się słońca średniego wzdłuż równika wynosi 360° na rok zwrotnikowy. Jest zatem takie samo jak uśrednione po roku zwrotnikowym tempo przemieszczania się Słońca po ekliptyce. Doba średnia słoneczna różni się od doby prawdziwej słonecznej. Różnica jest dla każdego dnia w roku inna. Nazywano ją równaniem czasu i oznaczono jako $\Delta\alpha$. Jego definicja wyraża się poniższym wzorem, a zależność od dnia w roku ilustruje rysunek.

$$\Delta\alpha = t_S - t_{s\acute{s}}$$

gdzie t jest kątem godzinnym – odpowiednio Słońca (S) i słońca średniego ($s\acute{s}$). Z rysunku widać, że są dni w roku kiedy doba średnia słoneczna różni się od doby prawdziwej słonecznej nawet o ok. 15 minut.



Wykres równania czasu. Równanie czasu uwzględnia dwa elementy procedury przejścia z czasu prawdziwego słonecznego na średni słoneczny: 1) rzutowanie dobowych przyrostów długości ekliptycznej Słońca na odpowiadające im przyrosty rektascensji wzdłuż równika niebieskiego oraz 2) ujednolitenie ruchu słońca średniego.

Doba jest wyjściową jednostką tempa upływu czasu. Ze względów praktycznych dzieli się ją na 24 godziny. Godziny dzieli się na minuty, te zaś na sekundy.

Czas średni słoneczny, leżący u podstaw tego co wskazują zwyczajne zegary, jest definiowany jako:

$$T_{s\acute{s}} = t_{s\acute{s}} + 12^h$$

(stałą w postaci 12 godzin wstawiono po to, żeby kolejny dzień brał początek o północy, a nie w południe). Czas średni słoneczny ma charakter lokalny, zależny od długości geograficznej (λ), na której znajduje się obserwator. Wprowadzono czas uniwersalny (UT), jako czas średni słoneczny dla południka zerowego, który umownie przechodzi przez Królewskie Obserwatorium Astronomiczne w Greenwich. Podzielono też glob ziemski na 24 strefy czasowe, o rozciągłości w długości geograficznej równej (na ogół, są wyjątki) 15° , odpowiadającej jednej godzinie (z podzielenia 360° przez 24). W strefach zegary wskazują te same minuty i sekundy co zegary na zerowym południku. Wskazania zegarów w strefach różnią się okrągłą ilością godzin od czasu uniwersalnego. Czas środkowoeuropejski (CSE), obowiązujący w Polsce (abstrahując od eksperymentów z czasem letnim), otrzymujemy przez dodanie jednej godziny do czasu uniwersalnego.

Przyrzucanie dnia

Zjawisko zachodu Słońca odnosi się do Słońca rzeczywistego. Zegar słoneczny wykazałby najwcześniejszy zachód Słońca w ciągu roku w dniu przesilenia zimowego. Jeśli chcemy określić moment zachodu w czasie średnim słonecznym, to musimy uwzględnić równanie czasu. Jego wartość sprawia, że już od 13 grudnia nasze zegarki wykażą opóźnienie się momentu zachodu Słońca (przyrzucenie dnia). Naturalnie, wykażą one również opóźnienie wschodu Słońca (skrócenie dnia). Efekt skrócenia dnia wynika z malejącej deklinacji Słońca. W dniach bezpośrednio poprzedzających przesilenie ta deklinacja maleje już bardzo powoli i w rezultacie ubytki długości dni też są bardzo małe. W okolicy 13 grudnia tempo zmiany długości dnia staje się już na tyle małe, że tempo zmiany równania czasu (akurat wtedy duże) zaczyna nad nim dominować i zachód Słońca zaczyna się opóźniać. A co ze wschodem Słońca? Opóźnia się on podobnie jak zachód. Mało tego, opóźnienie to nie kończy się w dniu przesilenia zimowego, ale ciągnie się do początku stycznia. Zatem dopiero od początku stycznia mamy przyrzucenie dnia i z rana i z wieczora.

Pomiędzy czasem słonecznym i czasem średnim słonecznym zachodzi relacja:

$$T_{ss} = T_S - \Delta\alpha$$

Obowiązuje zasada, że różnica czasów lokalnych tego samego rodzaju w dwóch miejscach jest równa różnicy długości geograficznych (λ) tych miejsc, czyli:

$$T_1 - T_2 = \lambda_2 - \lambda_1$$

Możemy zapisać tę relację dla czasu średniego słonecznego dla Obserwatorium Astronomicznego Królowej Jadwigi w Rzepienniku Biskupim (OAKJ) i dla Greenwich:

$$T_{ss}^{OAKJ} - UT = 0 - \lambda^{OAKJ}$$

Stąd będzie:

$$\text{CSE (momentu zachodu Słońca w OAKJ)} = \lambda^{OAKJ} + 13^h + t_z^{OAKJ} - \Delta\alpha$$

Przyrost (spadek) dobowy tego czasu jest równy różnicy przyrostów t_z^{OAKJ} oraz $\Delta\alpha$. W tabeli 1, w kolumnach 4 i 5 mamy obie te wielkości dla interesującego nas ciągu dat. W pobliżu daty 13 grudnia widać, że obie wielkości systematycznie maleją z doby na dobę, jednak pod tą właśnie datą różnica spadków zmienia znak. Oznacza to w konsekwencji, że CSE zachodu odmieni trend spadkowy na wzrostowy z datą 13 grudnia. Widzimy to wyraźnie w ostatniej kolumnie tabeli. Przed 13 grudnia Słońce zachodziło z dnia na dzień coraz wcześniej. Po tej dacie zachody mają miejsce coraz to później (przyczucie dnia). Efekt ilościowo jest mały. Jeśli 13 grudnia Słońce zaszło w OAKJ o godzinie 15.9938898 (tj. o 15:59:38.0), to 14 grudnia zachód wystąpił o 15.9942770 (tj. o 15:59:39.4), czyli o prawie półtora sekundy później.

W tabeli 1 przedstawiono wyniki precyzyjnych obliczeń, wykonanych z wykorzystaniem programu w języku FORTRAN własnego autorstwa. Obliczenia wykonano dla roku 2024 (przestępnego) i dla obserwatora umieszczonego w OAKJ: ($\varphi = 49^\circ 47'$, $\lambda = -21^\circ 05'$). Wytłuszczono dane dla dat 13 i 22 grudnia. Dane w kolumnie drugiej pokazują, że najkrótszy dzień w roku 2024 miał miejsce 22 grudnia, czyli tak jak należało oczekiwać. Pod datą 13 grudnia znajdujemy najwcześniejszy zachód. Po tej dacie zachody występują coraz później. A cała ta rozbieżność i ułamek w stronę świętej Łucji są niczym innym, jak tylko naturalną konsekwencją wprowadzenia czasu średniego słonecznego. Gdybyśmy posługiwali się czasem prawdziwym słonecznym, data 13 grudnia nie byłaby niczym wyróżniona.

TABELA 1. W kolumnach od lewej: kolejny dzień grudnia 2024 roku, długość dnia w godzinach, deklinacja Słońca w stopniach, równanie czasu w godzinach, kąt godzinny zachodu Słońca (dla OAKJ) w godzinach, czas środkowoeuropejski zachodu Słońca (w OAKJ) w godzinach.

D	Dł. dnia	δ (Słońca)	$\Delta\alpha$	t_Z	CSE _z
10	8.2307901	-22.857996	0.1175336	4.115395	15.9978609
11	8.2120752	-22.947315	0.1103525	4.106038	15.9956846
12	8.1948929	-23.029112	0.1030857	4.097446	15.9943609
13	8.1792622	-23.103350	0.0957400	4.089631	15.9938898
14	8.1652012	-23.169992	0.0883222	4.082601	15.9942770
15	8.1527271	-23.229008	0.0808392	4.076364	15.9955235
16	8.1418552	-23.280354	0.0732984	4.070928	15.9976282
17	8.1325960	-23.324013	0.0657068	4.066298	16.0005913
18	8.1249657	-23.359962	0.0580715	4.062483	16.0044117
19	8.1189699	-23.388178	0.0504000	4.059485	16.0090847
20	8.1146173	-23.408644	0.0426990	4.057309	16.0146084
21	8.1119146	-23.421350	0.0349762	4.055957	16.0209808
22	8.1108646	-23.426285	0.0272389	4.055432	16.0281925
23	8.1114674	-23.423450	0.0194942	4.055734	16.0362377
24	8.1137257	-23.412838	0.0117495	4.056863	16.0451126
25	8.1176357	-23.394455	0.0040122	4.058818	16.0548058
26	8.1231937	-23.368301	-.0037104	4.061597	16.0653057
27	8.1303949	-23.334394	-.0114114	4.065197	16.0766087
28	8.1392288	-23.292749	-.0190830	4.069614	16.0886974
29	8.1496849	-23.243378	-.0267182	4.074842	16.1015606
30	8.1617556	-23.186308	-.0343100	4.080878	16.1151867
31	8.1754236	-23.121553	-.0418515	4.087712	16.1295624



Mgławice „Koński Łeb” i „Płomień” w Orionie. (fot. H. Drózdź)

W stronę Marsa – eksperyment MOXIE

Bogdan Wszolek

Obserwatorium Astronomiczne Królowej Jadwigi w Rzepienniku Biskupim

Wstęp

Pierwsze sukcesy ludzkości w zakresie podboju kosmosu, w tym urzeczywistnienie lotów załogowych na Księżyc, były traktowane przez entuzjastów jako wstęp do znacznie śmielszych przedsięwzięć w zakresie eksploracji kosmosmicznych. W szczególności oczekiwano, że ludzie postawią stopę na Marsie już w latach 80-tych zeszłego stulecia, bo dynamicznie rozwijane technologie kosmiczne miały już wtedy osiągnąć dostateczny poziom. Mars, który cztery wieki wcześniej uległ przenikliwości umysłu Johanneisa Keplera i pozwolił zdemaskować tajniki swoich ruchów, współcześnie również zdaje się poddawać zakusom Ziemiian.

Liczne udane bezzałogowe loty na Marsa ośmielają do planowania lotów załogowych, a nawet do tworzenia tam pierwszych osad ludzkich w odpowiednio przygotowanych habitatach. Wiedza astronomiczna o planecie, wzbogacana bezpośrednimi badaniami przy pomocy lądowników marsjańskich, jest kluczowa do wypracowania optymalnych rozwiązań dla realizacji marzeń o stworzeniu tam przyjaznego środowiska dla funkcjonowania człowieka.

Eksperyment MOXIE

Jednym z projektów obliczonych na redukcję kosztów związanych z funkcjonowaniem ludzi na Marsie jest MOXIE (ang. Mars Oxygen ISRU Experiment, gdzie z kolei ISRU znaczy In Situ Resource Utilization). Eksperyment został szczegółowo opisany w pracy Hoffmana i in. (2022). Niezależnie został przedstawiony m. in. podczas publicznego wykładu "Produkcja tlenu na Marsie – MOXIE i przyszłość ludzkiej eksploracji kosmosu",

wyłoszonego przez Jeffrey'a Hoffmana (prof. MIT i astronautę NASA) w Krakowie 14 września 2024 roku.

MOXIE jest pierwszą demonstracją możliwości otrzymywania tlenu cząsteczkowego na Marsie, gdzie atmosfera składa się w ok. 95 % z dwutlenku węgla. Tlen cząsteczkowy jest konieczny na Marsie do oddychania (w ilości ok. 4 g na osobę na minutę) oraz jako utleniacz paliwa rakietowego (w ilości ok. 30 ton na jeden powrót załogi 6-osobowej na Ziemię). Transport takich ilości tlenu z Ziemi na Marsa jest wprawdzie technologicznie możliwy, ale bardzo kosztowny. Ciśnienie atmosferyczne przy powierzchni Marsa, choć znikome (~ 5 to 10 mbar), to przy zastosowaniu odpowiednich technik zasysania i sprężania pozwala nagromadzić wymaganą ilość dwutlenku węgla dla skutecznego przeprowadzenia eksperymentu. Moduł MOXIE został zainstalowany na pokładzie łazika marsjańskiego Mars 2020 Perseverance. Podczas siedmiu uruchomień eksperymentu, na czas 1-1.5 godziny, otrzymano łącznie 49 gramów cząsteczkowego tlenu, tj. ilość zużywaną przez człowieka w czasie ok. 12 minut. Otrzymywany tlen za każdym razem uwalniano do atmosfery.

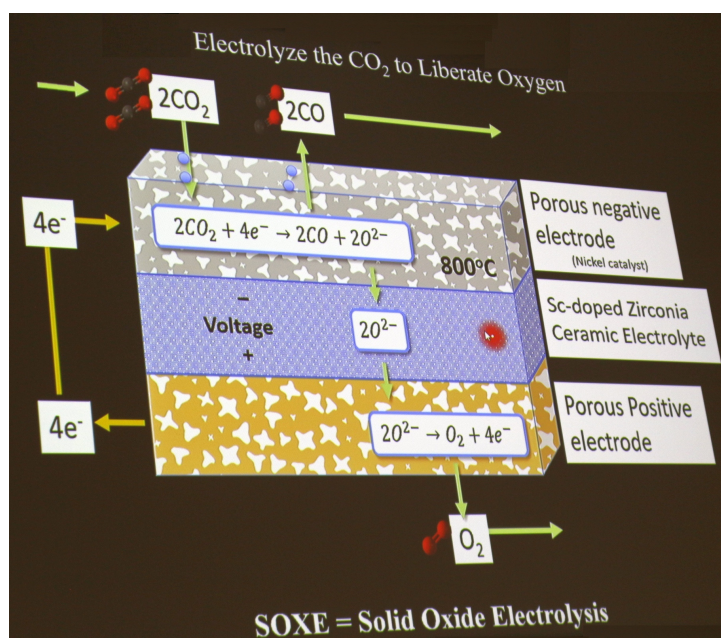


Profesor Jeffrey Hofman demonstruje moduł MOXIE. Gabaryty modułu można porównać do wielkości opakowania na obuwie.

Zdolności produkcyjne MOXIE choć nie były imponujące, to eksperyment dowiódł możliwości produkcji tlenu na Marsie z tamtejszych zasobów naturalnych, a także pozwolił określić zapotrzebowanie energetyczne i technologiczne dla przyszłej marsjańskiej fabryki tlenu na wielką skalę.

Niestety, fabryki takiej nie da się zasilić fotowoltaicznie. Konieczne będą atomowe źródła energii.

Proces otrzymywania tlenu z dwutlenku węgla w ramach MOXIE, metodą tzw. suchej elektrolizy, obrazuje poniższy schemat. Sprężony atmosferyczny CO_2 jest podgrzewany do temperatury $800\text{ }^\circ\text{C}$, optymalnej ze względu na wydajność elektrolizy. Przy odpowiednio dobranym napięciu między anodą i katodą zachodzi rozkład CO_2 na CO oraz O_2 . Z 55 gramów odpowiednio przefiltrowanej atmosfery marsjańskiej otrzymuje się w eksperymencie MOXIE podczas godziny 6 gramów O_2 . Dla uzyskania tak dobrego wyniku trzeba było zaimplementować odpowiednie materiały na anodę i katodę, zarówno ze względu na skład jak strukturę. Duża porowatość tych materiałów jest konieczna dla podniesienia sprawności elektrolizy.



Schemat procesu otrzymywania tlenu cząsteczkowego w ramach MOXIE.

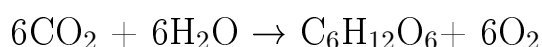
Krytycznym parametrem dla otrzymywanego tlenu jest jego czystość. Do oddychania jak i funkcjonowania silników rakietowych wymagana jest czystość tlenu cząsteczkowego powyżej 99.6%. MOXIE wyposażony został w czujniki O_2 oraz CO . Odpowiedni program komputerowy tak optymalizował przykładane napięcie między anodą i katodą, żeby otrzymać wymaganą czystość tlenu i jednocześnie żeby minimalizować niepożądaną reakcję rozpadu CO na C (sadza) i O . Węgiel nie tylko zanieczyszczałby otrzymywany tlen, ale znacząco przyspieszałby degradację istotnych elementów systemu. Tempo degradacji aparatury MOXIE w warunkach marsjańskich

nie zostało ustalone. Wiadomo tylko, że przy łącznym czasie pracy aparatury rzędu 10 godzin nie zauważono oznak degradacji. Idealnym rozwiązaniem byłoby urządzenie niedegradowalne pod żadnym względem albo samo regenerujące się.

Gęstość atmosfery marsjańskiej zależy od tamtejszej pory roku i oscyluje w granicach $\sim 0.013\text{--}0.022\text{ kg/m}^3$. Przebieg eksperymentu MOXIE rozłożony był po całym okresie sezonowych zmian gęstości atmosfery, co pozwoliło upewnić się, że aparatura nie traci na sprawności ze spadkiem gęstości atmosfery.

Eksperyment MOXIE, jako przeprowadzony *in situ*, pozwoli na dalsze doskonalenie systemów otrzymywania tlenu z dwutlenku węgla na Marsie. Zespół profesora Hoffmana, wzbogacony o wyniki eksperymentu MOXIE, poszukuje jeszcze doskonalszych rozwiązań technologicznych dla przyszłej produkcji tlenu na Marsie.

W kontekście opisanego sukcesu MOXIE warto wspomnieć o innym atrakcyjnym pomysle na wytwarzanie tlenu na Marsie, jakim jest dobrze znany proces fotosyntezy, tj. wytwarzanie związków organicznych z materii nieorganicznej, zachodzące w komórkach zawierających chlorofil lub bakteriochlorofil, przy udziale światła. Jest to jedna z najważniejszych naturalnych przemian biochemicznych na Ziemi, utrzymująca wysoki poziom tlenu w atmosferze. Do zajścia procesu fotosyntezy potrzebne są: CO_2 , H_2O oraz światło. Wszystko to jest na Marsie. Produktami reakcji są tlen oraz węglowodan (potencjalny produkt spożywczy i/lub energetyczny). Proces fotosyntezy opisuje uproszczony wzór:



Wydajność fotosyntezy jest znacząca. W warunkach ziemskich jedna duża sosna zaspokaja oddechowe zapotrzebowanie na tlen dla trzech osób.

Należy więc oczekiwać, że osoby przebywające w przyszłości na Marsie będą korzystać z kilku komplementarnych sposobów przystosowania lokalnych zasobów do własnych potrzeb.

Literatura

- [1] Hoffman J.A. et al., 2022, Mars Oxygen ISRU Experiment (MOXIE)—Preparing for human Mars exploration, Science Advances, 8, eabp8636

Materiały z czwartej konferencji

Meet the Space

Tarnów, 6 – 7 czerwca 2024



Herb Tarnowa

Komitety Naukowy

ks. prof. Michał Heller
prof. Olexandr Petrenko
dr hab. Andrzej Kotarba
prof. Piotr Strzelczyk
dr hab. Agnieszka Kuźmich
prof. Rafał Kurczab
dr inż. Michał Kisilewicz

Komitety Organizacyjny

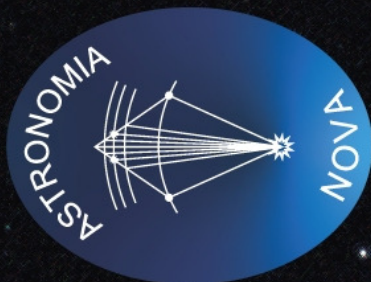
dr inż. Michał Kisilewicz
dr hab. Andrzej Kołodziej
dr Agata Kołodziejczyk
dr inż. Łukasz Mik
dr inż. Robert Wielgat
dr Bogdan Wszółek

Patronaty

POLSA Polska Agencja Kosmiczna
Prezydent Miasta Tarnowa

Konferencja Naukowa

MEET THE
SPACE 4



6-7 VI 24

Akademia Tarnowska,
ul. Mickiewicza 8

**AKADEMIA
TARNOWSKA**



PATRONAT PREZYDENTA
MIASTA TARNOWA



CENTRUM
TRANSFERU
TECHNOLOGII
Akademia Tarnowska



Plakat konferencyjny.

Prolog

(Bogdan Wszolek – prezes AN)

Jeśli uznać, że najwyższym powołaniem Człowieka jest pełne otwarcie się na sprawy nieba i konsekwentne dążenie do rozpoznania wszelkich jego tajemnic, to w żadnym razie nie wypada opóźniać realizacji tego powołania. I niechby dobra kulturowe i materialne wypracowane przez ludzkość służyły przede wszystkim rozwojowi społeczeństw w duchu czynnej otwartości na Kosmos.

I nie chodzi tu o to, żeby ludzi odciągać od ich codziennych działań. Wszelkie sprawności ludzkie mogą bowiem być przydatne dla realizacji kosmicznych celów. Wystarczy, że każdy będzie poszukiwał głębszego sensu w tym co robi i czuł się odpowiedzialny za to czemu w ostatecznym rozrachunku jego działalność służy. Bo może służyć dobrze pojętemu postępowi, a może też taki postęp hamować lub uniemożliwiać. Ogólnospołeczna czy ogólnoludzka solidarność we wspieraniu zdrowego postępu zaowocuje poprawą warunków codziennego bytowania oraz coraz śmielszymi działaniami na rzecz rozpoznawania kosmicznych uwarunkowań tego wszystkiego, co rozgrywa się w środowisku ziemskim.

Jeśli jakaś Kosmiczna Instancja powołała ludzkość do istnienia, to najpewniej uczyniła to w jakimś szlachetnym celu i ma wobec niej swoje oczekiwania. Człowiek jest zdolny te oczekiwania poprawnie odczytywać i potrafi im sprostać. Świadczy o tym choćby przykład kosmicznych dokonań, otwierających tzw. *Erę Kosmiczną*. Śledząc historyczny rozwój ludzkości daje się zauważyć, że rozwój kulturowy społeczeństw zawsze był powiązany z kontemplacją nieba. Można stąd wywieść, że w czasach współczesnych, kiedy człowiek potrafi już bezpośrednio szturmować niebo, działalność otwierająca się uczciwie na sprawy Kosmosu najpewniej rysuje się w oczekiwania Nadrzędnej Instancji wobec mieszkańców naszej planety.

Jest Tarnów wyróżnionym miejscem w Polsce i Europie, jeśli chodzi o odniesienia kosmiczne. Tu urodził się, wyrósł i działa Ksiądz Profesor Michał Heller, światowej sławy wybitny kosmolog, filozof, matematyk i teolog, który poprzez swoje książki i inne formy masowego oddziaływania nieustrudzenie stara się wzbudzać w ludziach tę „iskrę Bożą”, która jest zdolna otworzyć ich dla spraw nieba. Herb Tarnowa, Gwiazda i Księżyc, jednoznacznie nawiązuje do Kosmosu. W powiecie tarnowskim żyje i działa kilkoro profesjonalnych astronomów, funkcjonuje Obserwatorium

Astronomiczne Królowej Jadwigi, są organizowane międzynarodowe analogowe misje kosmiczne, wielu specjalistów podejmuje badania naukowe oraz wypracowuje rozwiązania technologiczne służebne eksploracji kosmicznej. Słynne tarnowskie zakłady mechaniczne i chemiczne, to również wielki potencjał dla problematyki kosmicznej. Organizacja w Akademii Tarnowskiej konferencji *Meet the Space* jest okazją dla integracji osób i instytucji, które upatrują swoją przyszłość w działaniach wspierających sektor kosmiczny. Intencją, bodajże wiodącą, organizatorów konferencji jest oddziaływanie na młodzież. Pokazanie jej, że kontynuacja zrywu kosmicznego ludzkości w ogromnym stopniu będzie zależeć od niej; od jej solidnego przygotowania i świadomości otwartej kosmicznie.

Duże znaczenie dla budowania kultury kosmicznej w danym środowisku ma przychylność władz samorządowych. Wielkie sprawy wymagają zgodnego działania wielu środowisk – intelektualnych, oświatowych, gospodarczych i politycznych. Podczas konferencji *Meet the Space* okazało się, że w Tarnowie można liczyć na solidarne zaangażowanie się wszystkich tych środowisk.

Pozwolę sobie w kontekście powyższego przywołać znamienne słowa, sprzed stu lat, wypowiedziane pod adresem Częstochowy przez księdza i astronoma, Bonewenturę Metlera. Wyryte w kamieniu, na szlaku pielgrzymkowym pod Jasną Górą, cierpliwie czekają na tych, którzy pozytywnie zareagują na wezwanie „Kosmicznej Pani”.

Quam Virgo Dilexit
Hic Urbem Ad Astra
Apellat Et Gentem
Buona Ventura!

(Tak bardzo Panna umiłowała to miasto, że aż ku gwiazdom je przynagła, ku lepszej przeznaczając przyszłości – tłum. własne). [Nie można wykluczyć, że Metler sformułował te słowa w reakcji na tę złotą gwiazdkę, która widnieje na czole ikony jasnogórskiej]

Może właśnie te (pozlacane) słowa sprawiły, że Częstochowa przestała być astronomiczną pustynią [1]. Wydała światowej sławy astronoma – Sławomira Rucińskiego, który zakotwiczył na uniwersytecie w Toronto i tam rozwinął zaawansowaną działalność na rzecz technik kosmicznych. Stamtąd też wspomaga swoim doświadczeniem „raczkujące” polskie programy kosmiczne. Staraniem piszącego te słowa w Częstochowie urządzono nowoczesne planetarium. Stało się ono cudownym centrum szerzenia wiedzy o Kosmosie. Pod jego kopułą w roku 2009 założono Stowarzyszenie

Astronomia Nova oraz Częstochowski Oddział Polskiego Towarzystwa Miłośników Astronomii im. ks. Bonawentury Metlera. Z tysięcy osób odwiedzających planetarium kilkoro młodzieży zdecydowało się kroczyć u boku Uranii i dzisiaj są już profesjonalnymi astronomami. Architekturę krajobrazu w Częstochowie ubogaciła ogromna antena satelitarna. Jeszcze silniej niż słowa Metlera, wzywa ona współczesnych ku gwiazdom.

A gdyby tak dziś tę poezję Metlerową wyeksponować w centrum Tarnowa, na jaką reakcję tego miasta można by liczyć?

[1] Ziemia Częstochowska, tom XXXIII, 2006, (red. B. Wszolek) [wersja elektroniczna dostępna na stronie www.astronomianova.org pod zakładką publikacje]

Wstęp do przyczynków konferencyjnych

Organizacji konferencji *Meet the Space* w Tarnowie podjęły się Akademia Tarnowska (AT) oraz Stowarzyszenie Astronomia Nova (AN). Wydarzenie spotkało się nie tylko z uznaniem władz rektorskich AT, ale też władz samorządowych. Otwarcie konferencji zaszczylicili swoją obecnością i wygłoszeniem stosownych przemówień: Wojewoda Małopolski Krzysztof Klęczar oraz Prezydent Tarnowa Jakub Kwaśny.



Od lewej: Wojewoda Małopolski Krzysztof Klęczar, J.M. Rektor AT
Małgorzata Kołpa oraz Prezydent Tarnowa Jakub Kwaśny.

Wykłady konferencyjne podzielono na cztery sesje tematyczne: (1) Technika raketowa, (2) Monitoring i obserwacja przestrzeni kosmicznej i okołozemskiej, (3) Załogowe loty kosmiczne, (4) Near space. Niezależnie, odbyły się autoprezentacje studenckich kół naukowych oraz firm i instytucji branżowych sektora kosmicznego.

Wygłoszono łącznie 36 referatów. Po stronie odbiorców konferencji byli w zdecydowanej większości młodzi ludzie: studenci Akademii Tarnowskiej i Akademii Górniczo-Hutniczej oraz ponad 500 uczniów szkół średnich z pięciu szkół tarnowskich: I, II i IV Liceum Ogólnokształcącego, Zespołu Szkół Mechaniczno-Elektrycznych oraz Zespołu Szkół Technicznych.

Na trasie dojścia do auli konferencyjnej prezentowały się na specjalnych stoiskach studenckie koła naukowe i inne podmioty sympatyzujące z tematyką konferencji. W auli na podium umieszczono portret Mirosława Hermaszewskiego, byłego honorowego członka AN, który czynnie występował na wcześniejszej edycji *Meet the Space*, zorganizowanej przed laty (w roku 2013) w Uniwersytecie Jagiellońskim. Gdyby żył, najpewniej uświetniłby swoją obecnością również tarnowską *Meet the Space*.

W auli na sztalugach urządzono również mini wystawę poświęconą pionierom podboju kosmosu. Zwiedzający wystawę mieli szansę zapalać chęć podążania przetartymi przez tych pionierów ścieżkami ku niebu.



Mirosław Hermaszewski (1941 - 2022).
Portret Kosmonauty namalowany przez Vladimira Nikolina w 2024 roku.

Artykuły pokonferencyjne

Autorzy prezentacji konferencyjnych:

Emilia Andres	Wiktoria Kujawa
Jakub Antosz	Adam Kulczycki
Dymitrij Bajew	Marta Kwiatkowska
Artur Banko	Agata Lada
Gabriela Bergiel	Jakub Lipiński
Anna Błąd	Agnieszka Lisowska-Lis
Witold Byrski	Wojciech Liwacz
Jakub Chruszcz	Michał Marek
Jan Chyczyński	Natalia Marszałek
Ewelina Dobosz	Kamila Niedźwiedź
Zuzanna Dybcio	Piotr Nowosielski
Lidia Dyląg	Mateusz Olszewski
Martyna Fröhlich	Mikołaj Ostrowski
Marta Gajewska	Wiesław Paszta
Mikołaj Gąbka	Olexandr Petrenko
Mariusz Gibiec	Arkadiusz Raj
Oliwia Grałek	Konrad Rotter
Karolina Greń	Karol Sałagan
Hanna Jarlaczyńska	Stanisław Sękara
Jacek Jasielski	Piotr Simajchel
Michał Kisilewicz	Jakub Smaga
Mateusz Koba	Martyna Sobczyk
Andrzej Kołodziej	Emilia Stacherczak
Agata Kołodziejczyk	Piotr Strzelczyk
Aleksander Kopyto	Jakub Suchecki
Adrian Kordos	Barbara Szaflarska
Damian Kordos	Piotr Szatkowski
Andrzej Kotarba	Vladimir Taftay
Zuzanna Kowal	Zuzanna Wesołowska
Hubert Kowalczyk	Robert Wielgat
Dominik Kozimoir	Bogdan Wszolek
Stanisław Kozłowski	Dominik Zdzeszyński
Agata Krakowska	Joanna Zontek-Wilkowska
Waldemar Krauze	Przemysław Żołądek
Ewa Krężel	Marta Żyłka
Amelia Krupa	Wojciech Żyłka



Uczestnicy konferencji (od lewej): Dmitrij Bajew, Olexandr Petrenko, Bogdan Wszolek i Vladimir Taftay.

Rakiety nośne, jako środki transportu dla kosmosu (i nie tylko)

Olexandr Petrenko¹, Vladimir Taftay², Dmitrij Bajew³

¹ Narodowy Uniwersytet w Dnieprze (DNU), Ukraina

² Stowarzyszenie „COSMOS”, Ukraina

³ Fundacja INTERMARIUM, Kraków

Wstęp

W ostatnich dekadach nastąpiła znacząca industrializacja przestrzeni kosmicznej. Technologie wynoszenia statków kosmicznych na orbitę okołoziemską są stale doskonalone, jak również i same te statki oraz satelity. Powstał też szereg nowych złożonych systemów komunikacji, nawigacji, teledetekcji kosmicznej i odbyło się wiele misji naukowo-badawczych. Można stwierdzić, iż przemysł rakietowy i kosmiczny z czasem zamienia się w branżę infrastrukturalną, działającą podobnie jak lotnictwo, motoryzacja, transport kolejowy i wodny, czy też telekomunikacja. A swój znaczący wkład w rozwój tej dziedziny wnieśli naukowcy i inżynierowie ukraińscy, pracując wcześniej w instytucjach ZSSR (projekty „Cyklon-3”, „SS-18 Satan” itp.), a potem już w niepodległej Ukrainie (projekty „Zenit-3SL”, „Sea Launch” itp.).

Funkcją rakiety nośnej jest wyniesienie ładunku (satelity, statku kosmicznego, urządzeń naukowych itp.) z powierzchni Ziemi na orbitę okołoziemską lub w głębsze kosmiczne regiony. Docelowe orbity ładunków są różne w zależności od rodzaju misji. Wyróżnia się: niskie orbity okołoziemskie (160-1000 km), orbity polarne (200-1000 km), orbity geostacjonarne (35800 km) i orbity synchroniczne ze Słońcem (600-800 km). Wymagane docelowe parametry orbit dla wynoszonych obiektów istotnie determinują parametry techniczne ракет i ich silników.

Prędkości kosmiczne (ucieczki)

Aby lepiej zrozumieć wymagania stawiane rakietom nośnym, warto przypomnieć z lekcji fizyki wartości pierwszej, drugiej i trzeciej prędkości kosmicznej. Pierwsza prędkość kosmiczna (7.9 km/s) to minimalna prędkość, z jaką satelita będzie poruszał się po orbicie kołowej wokół Ziemi. Druga prędkość kosmiczna (11.2 km/s) to minimalna prędkość statku kosmicznego wymagana do pokonania ziemskiej grawitacji. Natomiast trzecia prędkość kosmiczna (16.7 km/s) to minimalna prędkość statku kosmicznego wymagana do pokonania grawitacji Słońca. Kształt orbity wynoszonego w kosmos ładunku zależy od prędkości końcowej wynoszącej go rakiety. Dla pierwszej prędkości kosmicznej otrzymamy okołoziemską orbitę kołową. Dla prędkości z przedziału pomiędzy pierwszą i drugą prędkością kosmiczną uzyska się okołoziemskie orbity eliptyczne. Kształt paraboliczny orbity odpowiada drugiej prędkości kosmicznej, a kształt hiperboliczny trzeciej. Konieczną prędkość końcową rakiety, dla umieszczenia wynoszonego obiektu na odpowiedniej orbicie, możemy wstawić po lewej stronie wzoru Ciołkowskiego i uzyskać warunek na parametry rakiety. Wzór ten, w warunkach próżni i przy braku siły ciężenia przybiera postać:

$$v = w \ln(m_0/m),$$

gdzie: v jest prędkością idealną końcową rakiety, w to prędkość strumienia czynnika roboczego (gazów wylotowych) mierzona w układzie odniesienia związanym z rakieta (impuls właściwy), m_0 – masa początkowa rakiety z paliwem, m – masa końcowa rakiety, tj. bez paliwa.

Stosunek mas we wzorze Ciołkowskiego nazywany jest liczbą Ciołkowskiego i stanowi jeden z podstawowych parametrów rakiety.

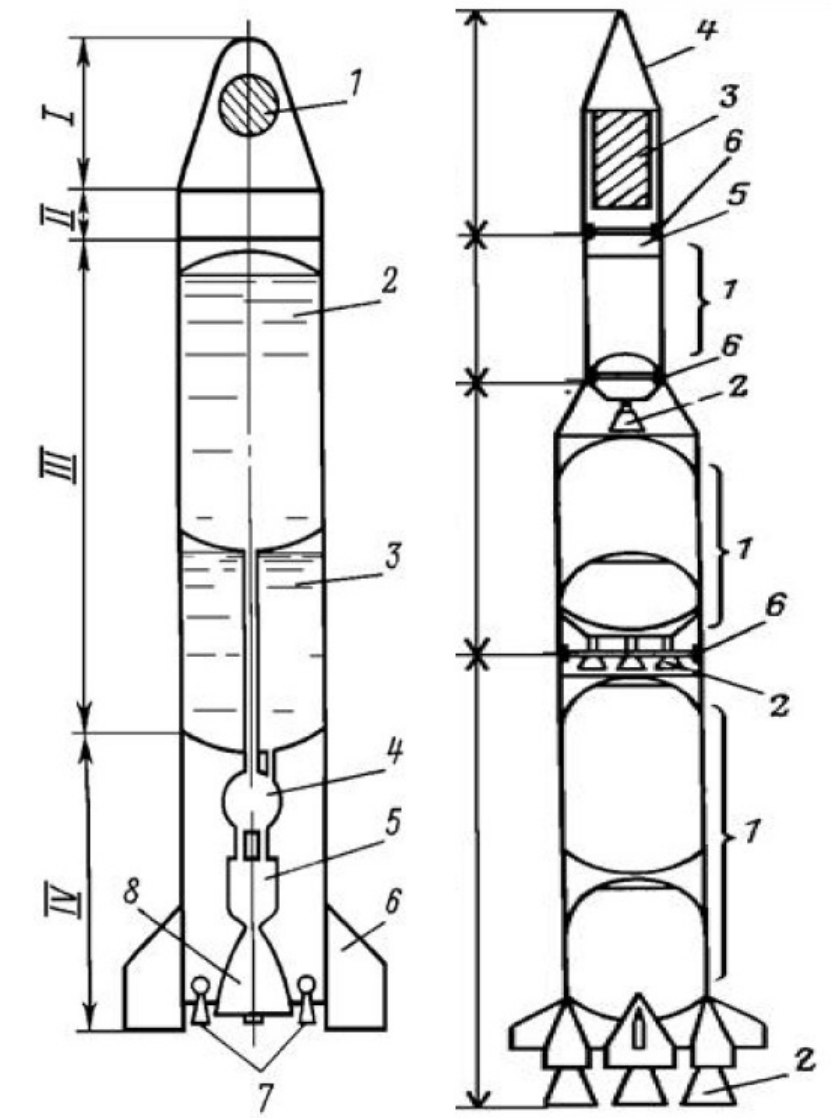
[Uwaga: W ruchu rzeczywistym rakiet musi pokonać zarówno opór powietrza jak i siłę ciężenia, co prowadzi do modyfikacji (idealnego) wzoru Ciołkowskiego.]

Etapy lotu rakiety nośnej

Wyróżnia się następujące etapy lotu rakiet nośnych: start pionowy, odwrócenie kierunku lotu, wyłączenie głównego silnika, oddzielenie pierwszego stopnia, włączenie silnika drugiego stopnia, oddzielenie owiewki, wyłączenie silnika drugiego stopnia, oddzielenie ładunku.

Konstrukcja ракет nośnych

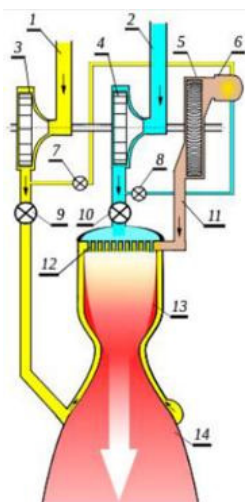
Rakiety można konstruować w wersji jedno- lub wielostopniowej. Rysunek 1 przedstawia typowe schematy jedno- i dwustopniowej rakiety na paliwo ciekłe.



RYСУNEK 1. Z lewej: schemat rakiety jedno-stopniowej: I – ładunek, II – przedział sterowania, III – paliwo oraz utleniacz, IV – silnik, 1 – ładunek (np. statek kosmiczny), 2 – zbiornik utleniacza, 3 – zbiornik paliwa, 4 – zespół turbopompy silnika, 5 – komora spalania silnika głównego, 6 – dynamiczne stabilizatory powietrzne, 7 – silniki sterujące, 8 – dysza silnika głównego. Z prawej: schemat rakiety dwu-stopniowej: 1 – zbiorniki paliwa, 2 – dysze, 3 – ładunek (np. statek kosmiczny), 4 – owiewka ładunku, 5 – przedział sterowania, 6 – mechanizm oddzielenia stopnia.

Konstrukcja napędu raketowego na paliwo ciekłe

Schemat ideowy konstrukcji ilustruje rysunek 2.



RYSUNEK 2. 1, 2 – przewody dla paliwa i utleniacza; 3, 4 – pompy paliwa i utleniacza; 5 – turbina; 6 – generator gazowy; 7, 8 – zawory paliwa i utleniacza do generatora; 9, 10 – główne zawory paliwa i utleniacza dla komory silnika; 11 – przewód gazu wyjściowego z generatora gazowego; 12 – głowica mieszania; 13 – komora spalania; 14 – dysza silnika.

Główne parametry silników raketowych na paliwo ciekłe i stałe

Wyróżnia się następujące podstawowe parametry silników raketowych: F – siła ciągu, M – masowe natężenie przepływu, I_{sp} – impuls właściwy, T_1 – temperatura w komorze, ϵ – współczynnik powierzchni dyszy, A_t – obszar gardła, A_e – obszar wylotu dyszy, P_1 – ciśnienie w komorze, P_e – ciśnienie wylotowe dyszy, V_e – prędkość gazu w obszarze dyszy.

Przykładowe charakterystyki rakiet nośnych

Rakieta Zenit-3SL – (Ukraina)

Liczba stopni – 3, długość – 59.6 m, średnica – 3.9 m, masa startowa – 462 200 kg, masa ładunku – 6 160 kg.

Silnik pierwszego stopnia rakiety Zenit-3SL (RD-171) charakteryzują parametry: ciąg – 8180 kN, impuls właściwy – 337 s, czas działania – 150 s, paliwo – kerozyna RG-1, utleniacz ciekły tlen. Silniki drugiego stopnia opisują następujące charakterystyki: ciąg silnika napędowego (RD-120) – 912 kN, ciąg silnika sterującego (RD-8) – 79.5 kN, impuls właściwy – 349 s, czas działania – 315 s, paliwo – kerozyna RG-1, utleniacz ciekły tlen.



RYSUNEK 3. Platforma morska i statek serwisowy do wodowania Zenit-3SL (z lewej) oraz rakieta Zenit-3SL (z prawej).



RYSUNEK 4. Wygląd silnika RD-170.

Rakieta Ariane-5 – (Francja/ESA)

Liczba stopni – 2, długość – 46-52 m, średnica – 5.4 m, masa startowa – 777 000 kg, masa ładunku (zależna od rodzaju orbity) – 6100-18000 kg. Pierwszy stopień rakiety jest napędzany przez silnik Vulcain 2 o parametrach: ciąg – 960 kN na poziomie morza i 1390 kN w próżni, impuls właściwy – 310 s (poziom morza) lub 432 s (w próżni), czas działania – 540 s, paliwo – ciekły wodór, utleniacz – ciekły tlen. Drugi stopień rakiety napędza silnik HM-7 o parametrach: ciąg – 67 kN, impuls właściwy – 446 s, czas działania – 945 s, paliwo – ciekły wodór, utleniacz – ciekły tlen. Start rakiety jest wspomagany przez dwa dodatkowe silniki na paliwo stałe o sile ciągu – 7080 kN i czasie działania – 140 s.

Uwagi końcowe

Informacje przedstawione w tym artykule stanowią ledwie namiastkę ogólnej wiedzy raketowej i są właściwie do pozyskania z ogólnodostępnych źródeł. O ile autorom wiadomo, na polskich uczelniach specjalistyczna wiedza

o rakietach nie jest przekazywana. Ukraina zaś ma długą tradycję kształcenia specjalistów raketowo-kosmicznych i duże doświadczenie produkcyjne w zakresie dużych rakiet nośnych. Liczni ukraińscy specjaliści z zakresu technik raketowych i kosmicznych w dobie obecnej utraciło możliwość pracy w swoim kraju i są gotowi kontynuować swoje prace za granicą, również w Polsce. Przy odrobinie woli politycznej możliwe byłoby szybkie wdrożenie polskich programów raketowych we współpracy z inżynierami ukraińskimi. Ukraińscy naukowcy w zakresie technik raketowych i kosmicznych, gdyby znaleźli posady w polskich uczelniach wyższych, dzielili by się swoją wiedzą ze studentami i przyczynili by się do ogólnego wzrostu kultury raketowo-kosmicznej w społeczeństwie.

Funkcjonowanie na terytorium danego kraju rozwiniętego przemysłu raketowego i kosmicznego, popartego wysokim poziomem kształcenia w tym zakresie na wyższych uczelniach, nie tylko podnosi prestiż państwa, ale także przyczynia się do ogólnego rozwoju nauki i gospodarki oraz zwiększa poziom bezpieczeństwa, co w sumie dodaje podmiotowości takiemu państwu, wzmacnia jego obronność i pozwala na prowadzenie bardziej niezależnej polityki międzynarodowej.

Uważamy za wyjątkowo aktualne i cenne włączenie potencjału naukowego i technicznego doświadczonych ukraińskich naukowców i inżynierów przemysłu raketowego i kosmicznego do przedsiębiorczości i szkolnictwa wyższego w Polsce. Dostrzegamy spory potencjał intelektualny i przemysłowy w Małopolsce, szczególnie w Tarnowie. Połączonymi siłami polskich i ukraińskich specjalistów i przedsiębiorców można byłoby z Tarnowa zrobić w niedługim czasie rodzaj „polskiego zagłębia raketowo-kosmicznego”.

Literatura

- [1] The Cambridge Encyclopedia of Space, edited by Michael Rycroft, Cambridge University Press, 1990.
- [2] George P. Sutton & Oscar Biblarz (2010). Rocket Propulsion Elements (8th ed.). Wiley Interscience. ISBN 9780470080245.
- [3] G.P. Sutton & D.M. Ross (1975). Rocket Propulsion Elements: An Introduction to the Engineering of Rockets (4th ed.). Wiley Interscience. ISBN 0-471-83836-5.
- [4] Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines, Dieter K. Huzel & David H. Huang, Rocketdyne Division of Rockwell International.
- [5] Space Mission Analysis and Design, 2nd Ed.; Wiley J. Larson & James R. Wertz (editors), Microcosm Inc., 1992.
- [6] The Illustrated Encyclopedia of Space Technology, Kenneth Gatland, Orion Books, 1989.
- [7] М.Н. Охочимский. Ракеты-носители космических аппаратов: учебное пособие/М.Н. Охочимский; Балт. Гос. Техн. ун-т. – СПб., 2016. – 58 с.
- [8] Основы техники ракетного полета. Феодосьев В.И. – М.: Наука, 1979, 496 стр.

Analiza możliwości wytwarzania zintegrowanej dyszy i komory silnika rakietowego na paliwo stałe

Michał Kisilewicz

Akademia Tarnowska

Streszczenie: W opracowaniu podjęto przedstawienie zagadnienia związanego z opracowaniem łatwej do wytworzenia zintegrowanej komory spalania z dyszą nadającą się do zastosowania w rakiecie napędzanej paliwem stałym. W tym celu poddano analizie wykonywalności dla różnych technologii wytwarzania powłoki ochronnej węgliku krzemu. Opracowanie zakończyło zaproponowanie technologii wytwarzania zintegrowanej komory spalania z dyszą o wyłożeniu z zagęszczonego tworzywa węgliku krzemu.

Abstract: This study investigates advanced manufacturing processes for developing silicon carbide (SiC) protective coatings for solid rocket components, specifically focusing on nozzles and combustion chambers. The research evaluates the viability of diverse SiC coating technologies and their application methods. Additionally, it presents novel technological approaches for producing durable SiC protective linings, designed to enhance the thermal and mechanical performance of rocket propulsion systems.

Możliwość opracowania prostej technologii wytwarzania, o stosunkowo niskiej cenie, jednostkowej komory spalania zintegrowanej z dyszą jest interesującym ze strony materiałowej oraz technologicznej zagadnieniem. Rozwiązaniem wyżej postawionego problemu może być modyfikacja komory spalania w postaci wyłożenia jej wewnętrznej części węglikiem krzemu (SiC). Węglik krzemu jest wyjątkowym materiałem ceramicznym, łączącym w sobie wysoką odporność termiczną z doskonałą wytrzymałością mechaniczną. Wykładzina z węgliku krzemu stanowić może kluczową rolę w ochronie komory spalania przed ekstremalnymi warunkami, jakie panują podczas pracy silnika. Należy zaznaczyć, że temperatura gazów powstających w procesie spalania paliwa stałego może przekraczać 3000 °C, a ciśnienie robocze sięga dziesiątek atmosfer.

Typowymi materiałami stosowanymi przy wytwarzaniu komór spalania silników wykorzystujących paliwo stałe są:

- metale np. stale wysokostopowe z dodatkami Cr, Ni, Mo cechujące się gęstościami $7700\text{--}8000\text{ kg/m}^3$, oraz wolfram, którego temperatura topnienia wynosi $3422\text{ }^\circ\text{C}$, a gęstość sięga 19300 kg/m^3 ,
- kompozyty zawierające fazę wzmacniającą w postaci włókien węglowych, szklanych, aramidowych, bazaltowych itd. w osnowie z wysokotemperaturowych typów żywic: epoksydowych, fenylowych, bisamidowych itd. Materiały kompozytowe posiadają niższą gęstość w stosunku do stali, ale ich odporność temperaturowa jest limitowana do $300\text{ }^\circ\text{C}$,
- struktury węglowe np. grafit lub struktury grafityzowane kompozytów CFRC (ang. Carbon Fiber Reinforced Composite) posiadają niską gęstość oraz wysoką odporność na szok termiczny. Cechują się również stosunkowo wysokim przewodnictwem cieplnym. Jednak grafit z racji warstwowej budowy posiada niską odporność na abrazyjne działanie produktów spalania paliwa stałego.

Rozwiązaniem problemu nadmiernego zużycia abrazyjnego może być zastosowanie powłoki ceramicznej. Pozwoli ona na wydłużenie czasu, oraz zachowanie stabilności pracy napędu rakietowego. Zidentyfikowany krytyczny punkt znajduje się w przewężeniu zwężki dyszy silnika. Jest to miejsce w którym należy zastosować materiał cechujący się dobrym przewodnictwem cieplnym oraz odporny na wysokie temperatury i abrazyjne działanie gazów wylotowych. W tym celu stosuje się tworzywa ceramiczne; najczęściej węgiel krzemu (SiC), azotek krzemu (Si_3N_4) oraz Al_2O_3 i ZrO_2 .

Dokładna analiza zastosowanych pokryć ceramicznych wykazuje, że materiał powinien posiadać jak największe wartości przewodnictwa cieplnego oraz temperatury pracy. Przy czym ze względu na dużą abrazję nie powinien posiadać fazy ciekłej.

Analiza parametrów wykazuje, że SiC posiada wysokie parametry mechaniczne oraz cechuje się brakiem fazy ciekłej. Dodatkowo posiada dużą odporność na utlenianie do temperatury $1600\text{ }^\circ\text{C}$ w stosunku do grafitu, który może utleniać się już w temperaturach $400\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$. Materiał ten posiada możliwość chłodzenia w wyniku sublimacji podobnie jak ma to miejsce w strukturach grafitowych.

Produkcja powłoki z SiC jest trudna ze względu na brak fazy ciekłej. Dlatego przez długi czas uważano ten materiał jako niespiekalny. W celu wytworzenia funkcjonalnej kształtki litego tworzywa trzeba zastosować wiedzę z zakresu inżynierii materiałowej. W tym celu istnieje kilka technologii wytwarzania poprzez:

TABELA 1. Parametry fizyczne wybranych substancji. W kolumnach podano: substancję (Sub.), temperaturę topnienia w °C (Tt), temperaturę rozkładu w °C (Tr), przewodnictwo cieplne (Pc) (W/m·K przy 25 °C), gęstość w kg/m³ (ρ) oraz współczynnik rozszerzalności (Wr) (10⁻⁶/K) 20-1000 °C.

Sub.	Tc	Tr	Pc	ρ	Wr
α -AL ₂ O ₃	2050	-	30-40	3970	7.5-8.0
ZrO ₂	2700	-	2-3	6050	10.0-10.5
Si ₃ N ₄	-	1900 ^a	25-35	3170	3.0-3.3
α -SiC	-	2700 ^b	45-450	3200	4.0-4.3
C (grafit)	-	3750 ^c	11-175	1900-2230 ^d	-1.0 do 1.0 ^e

^a Si₃N₄ rozkłada się przed osiągnięciem temperatury topnienia

^b SiC sublimuje

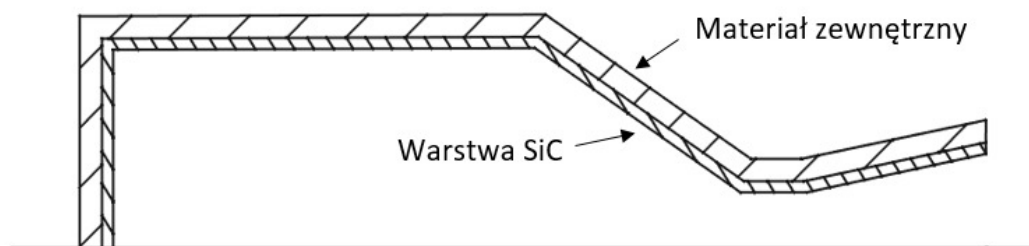
^c początek procesu sublimacji

^d w zależności od formy alotropowej

^e wzdłuż wiązań pi (kierunku włókien węglowych)

- zastosowanie aktywatorów procesu spiekania. Ten typ tworzywa, określamy mianem SSiC (sintered silicon carbide), ma wysokie parametry mechaniczne oraz gęstość bliską gęstości teoretycznej 3100-3190 kg/m³. Technologia ta umożliwia produkcję elementów o skomplikowanym kształcie w stosunkowo krótkim cyklu produkcyjnym. Wyroby z SSiC można kształtować za pomocą techniki prasowania (jednoosiowego, izostatycznego) oraz technik formowania z zawieszin. Formowanie z zawieszin umożliwia wytworzenie elementów o cienkich ściankach o zmiennej grubości,
- osadzanie chemicznie z fazy gazowej CVD SiC jest metodą dającą gęstość bliską teoretycznej 3200-3210 kg/m³. Przy temperaturach rzędu 1000-1200 °C umożliwia wytworzenie warstwy SiC o grubości 10 do 200 μ m. Ze względu na cenę substratów i czas nakładania powłoki proces ten nie nadaje się do nisko kosztowej produkcji silników rakietowych.

Innym przykładem aktualnie stosowanej technologii jest wykonanie kompozytu węglowego, który jest następnie poddany infiltracji parami lub ciekłym krzemem w celu utworzenia reakcyjnie wytworzonego SiC. Technologia produkcji powłoki z węgla krzemu SiSiC (ang. Silicon-Infiltrated Silicon Carbide) umożliwia pokrycie wewnętrznej powierzchni komory i dyszy warstwą o równomiernej grubości. Wadą infiltracji może być obecność wolnego krzemu w strukturze SiSiC, wypełniającego pory. Obecność nie przereagowanego krzemu może spowodować ograniczenie maksymalnej temperatury użytkowania do temperatury topnienia krzemu. Z tego powodu technologia ta, choć najłatwiejsza w implementacji, nie została uwzględniona w dalszym toku badawczym.



RYSUNEK 1. Schemat komory spalania z dyszą pokrytą od wewnątrz warstwą SiC.

Zakłada się, że zespół obudowy komory oraz dysza powinny mieć możliwie jak najmniejszą masę. Rozsądnym wydaje się jej budowa w oparciu o materiały węglowe, których gęstość wynosi $1900\text{--}2230\text{ kg/m}^3$ i jest niższa od materiału powłoki SiC, która oscyluje w zakresie $3000\text{--}3210\text{ kg/m}^3$.

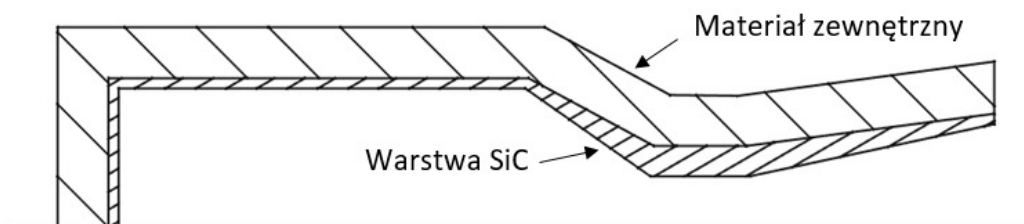
Analiza budowy komory silnika oraz dyszy pod kątem optymalizacji masy zespołu wykazuje, że warstwa węgla krzemu powinna charakteryzować się zmienną grubością. Warstwa może być cieńsza w części komory silnika natomiast powinna posiadać grubsza warstwę w zwężce dyszy.

Najczęściej stosowana zwężka Laval'a pozwala na osiągnięcie przepływów naddźwiękowych gazów wylotowych. Jej geometria jest elementem krytycznym, wpływającym na charakterystykę pracy napędu. W związku z wysokim ciśnieniem oraz temperaturą w zwężce, erozyjne usuwanie materiału z jej wnętrza należy traktować jako proces naturalny. W celu przeciwdziałania usuwaniu materiału poprzez działanie gazów o wysokiej temperaturze pod dużym ciśnieniem powierzchnia zwężki powinna posiadać niską chropowatość. Wytrzymała na erozję powłoka nie może być zbyt cienka gdyż może doprowadzić to do jej oderwania i odsłonięcia materiału obudowy silnika, co może doprowadzić do niekontrolowanej zmiany jej geometrii i tym samym zaburzyć wartość ciągu i/lub wektor ciągu. Zwiększenie grubości powłoki ceramicznej jest konieczne dla wyeliminowania możliwości uszkodzenia powłoki ceramicznej na powierzchni roboczej zwężki.

Powierzchnia zwężki powinna charakteryzować się wysoką twardością oraz niską chropowatością, co powinno przyczynić się do ograniczenia erozji powierzchni dyszy przez rozgrzane cząstki niespalonych pozostałości stałego paliwa.

Należy zwrócić uwagę, że wykonanie monolitycznej konstrukcji komory silnika oraz dyszy z wykorzystaniem materiału ceramicznego wymaga zastosowania grubych ścianek ze względu na niską odporność ceramiki na działanie naprężenia rozciągającego powstającego w trakcie spalania paliwa. W celu przeciwdziałania wpływowi naprężenia rozciągającego można

zwiększyć grubości ścianki, co jednak wpływa negatywnie na zwiększenie masy (różnica w gęstości pomiędzy C a SiC), oraz zwiększenie prawdopodobieństwa wystąpienia porowatości zamkniętej. Wraz ze wzrostem grubości ścianki wzrasta prawdopodobieństwo wystąpienia porowatości zamkniętej o wielkości krytycznej, która może inicjować mechanizm dekohezji adiabatycznej.



RYSUNEK 2. Schemat komory spalania z dyszą wykonaną z SiC i owiniętą wysokomodułowym włóknem węglowym.

Dobłą praktyką w celu zwiększenia odporności na obwodowe i podłużne naprężenia rozciągające jest zmniejszenie grubości ścianki wraz z zastosowaniem skompensowania ich m.in. za pomocą zewnętrznie przyłożonych naprężeń ściskających. Naprężenie ściskające może pochodzić m.in. od działania siły ściskającej wywieranej przez kompozyt bazujący na ciągłych wysokomodułowych włóknach węglowych zanurzonych w osnowie z żywicy o dużej odporności termicznej.

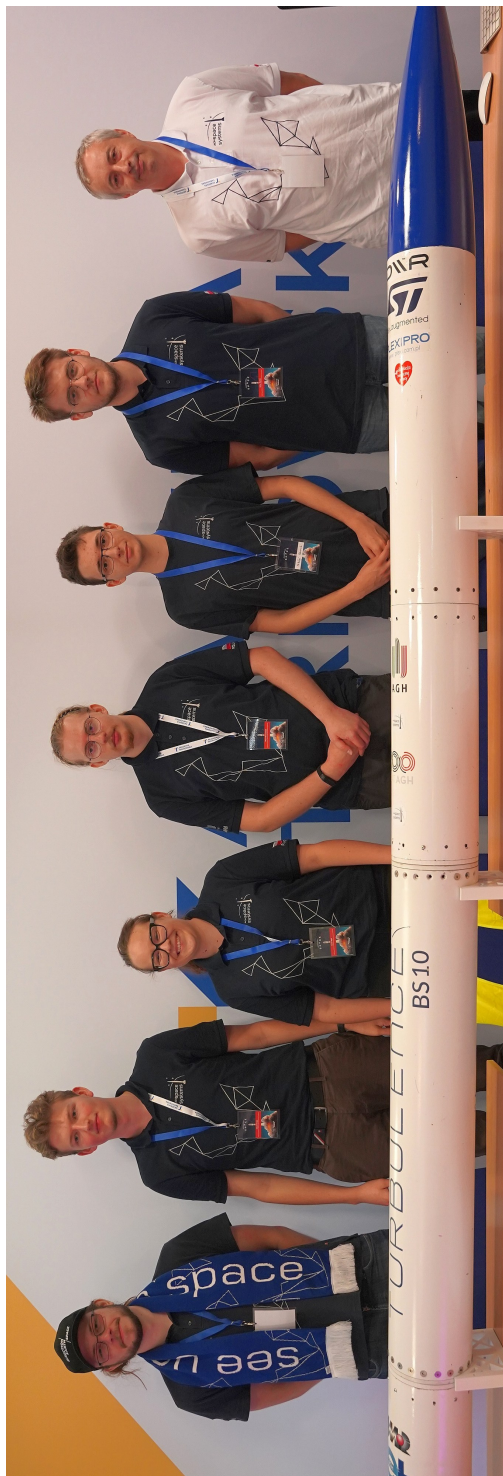
Podsumowanie

Wytworzenie zintegrowanej z dyszą komory spalania wyłożonej węglikiem krzemu jest możliwe, jeśli bazować na aktualnym stanie techniki, ale wymaga zastosowania zaawansowanych technologii wytwarzania.

W celu wytworzenia cienkościennych struktur ceramicznych bazujących na węgliku krzemu o zmiennej grubości, dających odporność na abrazję, przydatna może być technika formowania węglika krzemu z zawiesiny wodnej. Uformowane wyłożenie komory oraz dyszy silnika jest następnie pokrywane kompozytem o ciągłych wysokomodułowych włóknach węglowych w osnowie wysokotemperaturowej żywicy, które pozwoli zniwelować niską wartość odporności ceramiki na siły rozciągające.



Od lewej: Dominik Kozimor, Emilia Andres, Anna Bład, Wiktoria Kujała, Robert Wielgat i Michał Kisilewicz.



Stoisko sekcji rakietowej Koła Naukowego AGH Space Systems. Studenci prezentują swoją rakietę „Turbulencja” (na paliwo ciekłe). Od lewej: Mateusz Olszewski, Jakub Smaga, Anna Bład, Piotr Nowosielski, Mikołaj Ostrowski, Artur Banko i dr Mariusz Gibiec – opiekun Koła.

The chronicles of AGH Space Systems Rocketry Division

Zuzanna Wesołowska, Mariusz Gibiec

AGH University of Krakow

AGH Space Systems, established in 2014, has become a leading student research group in Poland, focusing on space technologies. This paper delves into the origins, milestones, and ongoing projects of the Rocketry Division, which has grown from a small team working on CanSats to a vibrant section comprising 60 active members and multiple innovative rockets. Additionally, this paper provides context by outlining the history of rocketry in Poland, with a focus on Kraków, and its role in inspiring AGH Space Systems. Through an analysis of notable projects of seven rockets, this study highlights the evolution of engineering practices, technical challenges, and the team's commitment to innovation.

Nomenclature

PTR = Polskie Towarzystwo Rakietowe, Polish Rocketry Association

LRE = Loty Rakiet Eksperymentalnych, Flights of Experimental Rockets

SAC = Spaceport America Cup

EuRoC = European Rocketry Challenge

Introduction

The pursuit of space exploration has captivated humanity for decades, and Poland is no exception. While the global space race was predominantly dominated by superpowers, Poland contributed significantly to rocketry and aerospace engineering through institutions and research groups. This legacy has inspired young engineers, including the members of AGH Space Systems, to further Poland's contributions to space exploration. Founded in 2014 at AGH University of Krakow, AGH Space Systems started modestly, building CanSats – miniaturized atmospheric probes. With time, the team expanded to tackle more complex aerospace challenges, including the

design and construction of hybrid and liquid-propellant rockets. This paper explores the development of the Rocketry Division and contextualizes its achievements within Poland's broader history of aerospace innovation.

The Genesis of AGH Space Systems and the Rocketry Division

Established in 2014 by seven visionary students at AGH University of Krakow, AGH Space Systems was formed with the initial goal of participating in international CanSat competitions. A defining moment for the group came in 2015, when their CanSat project secured first place at the prestigious CanSat Competition in the United States, marking a pivotal moment for the organization.

Today, AGH Space Systems is a thriving organization with more than 100 interdisciplinary members united by a shared passion for tackling complex challenges in aerospace engineering. With time, the team has expanded its scope to include the design and construction of advanced hybrid and liquid-propellant rockets. The Rocketry Division initially focused on learning from existing rocket systems, such as Carbonara, which was generously donated to the team by Polish Rocketry Association and primarily used for CanSat testing. It was through these early experiments with Carbonara that the team's passion for rocketry was ignited.

Origins and Foundational Years – From CanSat to Rocketry

AGH Space Systems' journey began with the CanSat project, a miniaturized atmospheric probe simulating planetary exploration. The team formed to compete in the 2015 international CanSat Competition, where they achieved first place against 60 global teams, earning nearly perfect scores. This remarkable success brought recognition and support from the university and private sponsors, catalyzing the organization's expansion into other domains, including rocketry.

The transition to rocketry began with testing subcomponents in collaboration with PTR. These tests laid the foundation for creating the Rocket Division in 2015. Early experiments focused on the Carbonara rocket platform allowed the team to gain initial experience in propulsion



FIGURE 1. CanSat Competition in Texas, USA (2015).

and subsystem integration. This endeavor motivated the development of the team's first proprietary rocket, Beta.

Key Projects and Milestones – The Learning Ground

Beta, AGH Space Systems' inaugural rocket, was developed in 2015 to introduce the team with hybrid propulsion, aerodynamics, and composite materials. It featured a hybrid engine using polypropylene and nitrous oxide, reaching altitudes up to 1.2 kilometers.



FIGURE 2. Beta's first flight at Drawsko Pomorskie.

Test flights in 2016 at Drawsko Pomorskie and Błędowska Desert provided critical insights despite challenges such as parachute and engine malfunctions.

Beta's development paved the way for future rockets, culminating in a third-place finish at the Apogee competition in 2019 and securing its place as a cornerstone in AGH Space Systems' journey.

Ambition Meets Challenge

Following the success of Beta, the Rocketry Division launched Bagieta a year later, with the aim of testing a larger hybrid engine. This ambitious initiative aimed to break the national amateur altitude record using high-regression fuel.



FIGURE 3. Diagram of Bagieta.

Despite rigorous preparations and a low-altitude test flight earlier, the full-scale mission faced challenges, including unstable flight caused by weather and a premature recovery deployment. Although Bagieta's remains were only partially recovered, the project offered invaluable lessons in rocket design, risk management, and decision-making under pressure, emphasizing that failure is a vital step in mastering rocketry.

Lessons from the Heat

Panda3 was designed for the prestigious Spaceport America Cup in New Mexico, where it debuted in June 2018. Although the flight was unable

to proceed due to extreme temperatures exceeding 40 °C, which were absorbed by the rocket's black body and caused the internal batteries to deplete, Panda3 still secured ninth place in its category.

The rocket's most significant flight occurred in 2019 during the Experimental Rocket Flights event in Drawsko Pomorskie, reaching an altitude of 3 kilometers. All subsystems, including propulsion, recovery, and telemetry, were thoroughly tested during this flight, providing valuable information for future projects. This venture inspired the team to further advance hybrid rocket technology and develop a new design, building on the valuable experience gained throughout the Panda3 project.

One key lesson, deeply ingrained in the team's legacy and passed down to current members, is to avoid painting rocket bodies black.



FIGURE 4. Panda at the 2018 SAC.

Pioneering Liquid Propulsion

The Turbulence project began in 2016 with the aim of developing Poland's first student-built liquid-propellant rocket engine, initially named LRE Zawisza. After over a year of testing and prototyping, a successful ignition of the engine was achieved in July 2017, marking a significant milestone. The project faced several challenges, leading to a simplified design where the final version was four times smaller than originally planned, and a complex cooling system was removed.

In October 2017, Turbulence was created with the goal of building the first Polish bipropellant rocket built by students, targeting an altitude of 9 kilometers. The first year of work included the creation of engineering models and integration of components, although some systems couldn't be



FIGURE 5. Turbulence at the 2018 SAC & 2024 EuRoC.

tested due to time constraints. Despite this, Turbulencja secured second place in the 2018 SAC.

After successful small-scale engine tests in 2018/2019 and further development of subsystems such as electronics and recovery, the project was withdrawn in 2019 to focus on hybrid rockets. It was revived in 2022 and continues to be an ongoing, evolving project.

Perseverance in Craftsmanship

PROtotype, the successor of Panda3, was designed for the 2019 SAC, where it earned the prestigious Technical Excellence Award, standing out among over 130 teams worldwide for its meticulous craftsmanship. Despite an unexpected structural issue during pre-launch preparations that limited the flight's altitude and partially affected the recovery system, the electronics and ignition systems performed flawlessly. This remarkable effort secured 2nd place in the 3 kilometers altitude category.



FIGURE 6. PROtotype at the 2019 SAC.

Sky is not the limit

Skylark was a continuation of the PROtotype project, designed for the 2020 SAC. Despite the cancellation of the physical event due to COVID-19, Skylark participated in the Virtual SAC 2021, securing 1st place in the 10k SRAD Hybrid/Liquid category. The rocket was also intended to compete in the EuRoC 2021, however, the flight was not conducted due to a failure with the ignition system. The rocket was successfully launched in



FIGURE 7. Skylark at the 2021 EuRoC.

2022 at LRE in Drawsko Pomorskie, Poland. However, it became apparent that the rocket had several design flaws, including structural issues such as damaged fins, cracked fuselage and cage, as well as engine failure due to a burnt combustion chamber. These setbacks led to a complete redesign

of the materials and mounting methods for future projects, ensuring more reliable performance in upcoming missions.

The Modern Standard

3-TTK is the latest hybrid rocket developed by AGH Space Systems, representing the culmination of years of iterative design and integration improvements. Built on lessons learned from previous projects, it featured innovative solutions and technologies, including a new modular design that streamlined assembly and integration. One of its main objectives was to participate in the SAC in 2022, however, due to weather conditions and insurance complications regarding hybrid rocket launches, 3-TTK was unable to launch.

Despite this, it was awarded 3rd place in the 10k SRAD Hybrid/Liquid category and earned the highest technical evaluation score in its category. In 2023, after further modifications, 3-TTK returned to the competition and placed 4th.



FIGURE 8. 3-TTK at the 2023 SAC.

Technical and Educational Impact

The Rocketry Division of AGH Space Systems has made significant contributions to the field of aerospace engineering, both in technical innovation and social impact. Since its establishment, the division has been actively involved in various humanitarian and educational initiatives, including participation in Szlachetna Paczka, Wielka Orkiestra Świątecznej Pomocy, and aid efforts for Ukraine. Moreover, the team organizes rocket workshops for children and conducts outreach activities in schools, inspiring the younger generation with the potential of space exploration and engineering.

Beyond its achievements in international competitions, the division places significant emphasis on scientific development, with a strong focus on research and innovation. The team regularly presents its findings at prominent aerospace conferences, contributing to the global body of knowledge in various areas. Notable publications include:

- **7th European Conference for Aerospace Sciences EUCASS 2017:** “Nitrous Oxide Application for Low-Thrust and Low-Cost Liquid Rocket Engine”, “Novel, High-Regression Rate Fuels for Hybrid Rocket Motors”
- **8th European Conference for Aerospace Sciences EUCASS 2019:** “Design and Development of a Nitrous Oxide/Alcohol Sounding Rocket Technology Demonstrator”, “Optimization of Composite Materials Using 3D Printed Cores”
- **AIAA Science and Technology 2019:** “Paraformaldehyde/epoxy-resin Based Composites as a Fuel for Hybrid Rocket Engines” (patented)
- **AIAA Propulsion and Energy 2019:** “Performance of Solid-State Emulsions of Isoamyl Alcohol in EVA-Stabilized Low-MW Polyethylene, Structured by Laser-Sintered Nylon Scaffolds as Fuels in N₂O Hybrid Rocket Engine”, “Investigation of the Effect of a Composite Material on Rocket Fin Flutter Speed”
- **AIAA Science and Technology 2021:** “Investigation of FDM-Printed Open-Framework-Reinforced Helical PEWAX Grains as a Robust, High-Regression Hybrid Rocket Fuel”
- **AIAA Science and Technology 2022:** “How to Turn One Small Experiment into a Giant Leap: Experiences on the Process of Hybrid Rocket Biological Payloads Design”
- **25th ESA Symposium on European Rocket & Balloon Programmes and Related Research 2022:** “Sounding Rocket Fins/Airframe Composite Materials – Theoretical and Experimental Evaluation

of Mechanical Properties”, “Launch, Recover, Evaluate – Presentation of a Custom, Multifunctional System Tracking High Altitude Balloons and Logging Various Flight Data”, “Design Process of Complex and Reliable Testing Equipment for Experimental Rocket Engines”, “How Stratospheric Balloons Can Help Us Adapt to Space Conditions – Evaluation of Subcosmic Environment’s Influence on Neuroblastoma and Fibroblast Cells”, “Design, Simulate, Launch, Repeat – Insights and Recommendations for Performing Stratospheric Research Using Lightweight High Altitude Balloons”, “Accelerate New Ideas with Sounding Rockets: The Story of the BeeGs Project”, “From SHREAMP to SHREAMP 2.0 – The Value of Iterative Approach and Lessons Learned During Rocket Payload Redesign Process”

- **AIAA Science and Technology 2023:** “Modal Testing and Analysis as Part of a Development Process of a Test Stand for Experimental Rocket Engines”
- **AIAA Science and Technology 2024:** “Development of a Distributed Embedded Apogee Prediction and Control System with Sensor Fusion for Sounding Rockets”
- **VIIth Space Resources Conference 2024:** “Screen-Based Electrostatic Method of Repelling Charged Regolith off of Solar Panels for Lunar Surface Applications”
- **26th ESA Symposium on European Rocket & Balloon Programmes and Related Research 2024:** “ZAWISZA4000 – Unveiling the Dynamic Beat of Turbulence Propulsion in Poland’s Pioneering Student Liquid Bi-Propellant Rocket”
- **Meet the Space 2024:** “Czy leci z nami pszczelarz? Czyli co plaster miodu robi w rakiecie”, “Stawianie czoła wyzwaniom – o trudnościach napotykanym w procesie rozwoju silników na paliwo ciekłe na przykładzie silnika Zawisza 4000”, “Komputery i rakiety. Rozwój stacji kontroli lotu AGH Space Systems”, “Podbijając Kosmos: Historia Sekcji Rakiet AGH Space Systems”

Conclusion

The Rocketry Division of AGH Space Systems embodies the spirit of innovation and perseverance. From its origins in CanSat competitions to developing cutting-edge rockets like Turbulence and 3-TTK, the team has contributed significantly to advancing student-led aerospace engineering in Poland. Their achievements, rooted in Kraków’s historical tradition of

scientific excellence, highlight the potential of student organizations to drive technological progress.

The journey, however, has been far from easy. Each milestone reached is a direct result of the determination and resourcefulness of the individuals behind the project, whose love for rocketry and engineering has fueled countless hours of work, problem-solving, and collaboration.

The unwavering dedication to innovation and excellence of the team guarantees that AGH Space Systems will remain a source of inspiration and a key contributor to Poland's expanding role in space exploration. None of this would have been achievable without the passion of its members, who form the heart and soul of every success.



FIGURE 9. Members of the team at the 2021 EuRoC.

Acknowledgments

The authors wish to thank the AGH University of Krakow for the continuous support, as well as private sponsors and the Polish Rocketry Society, especially Błażej and Kacper Zieliński, for their invaluable contributions. Gratitude is also extended to the members of AGH Space Systems, past and present, for their dedication to the pursuit of innovation in aerospace engineering, especially to the founders of the organisation: Adam Kurzak, Robert Betka, Tomasz Fuchs, Bartosz Moczala, Weronika Mrozińska, Bartosz Postulka, Jakub Rachucki, as well as to the members who have made the greatest contributions to the development of the group: Tomasz Palacz, Przemysław Drożdż, Agata Zwolak, and Michał Pyza. Furthermore, special thanks to Piotr Sławęcki, Jacek Zabiegło, Eliza Marzec and Radosław Korczyński for sharing the group's history with current members.



Uczestnicy czwartej konferencji *Meet the Space*.

Wykorzystanie kamer w misjach stratosferycznych

Jakub Antosz, Jakub Chruszcz

Studenckie Koło Naukowe Elektroników AMPER, Akademia Tarnowska

W okresie od 29 lipca 2023 roku do 8 czerwca 2024 roku Studenckie Koło Naukowe Elektroników "Amper" Akademii Tarnowskiej przeprowadziło pięć misji stratosferycznych, wykorzystując balony wypełnione helem do wyniesienia ładunków – eksperymentów – na wysokość powyżej 30000 m n.p.m. W dołączonych kapsułach znajdowały się różnorodne urządzenia, w tym aparatura pomiarowa do monitorowania parametrów takich jak temperatura oraz ciśnienie, radiosondy umożliwiające śledzenie balonu poprzez przesyłanie dokładnej lokalizacji drogą radiową, ładunki przygotowane we współpracy z innymi szkołami technicznymi i kamery rejestrujące przebieg lotu, które są głównym tematem tego artykułu.

Pierwszym urządzeniem wykorzystanym w projekcie była kamera sportowa 360° RICOH THETA SC2. Maksymalna rozdzielczość nagrywania filmów to 3840×1920 pikseli w 30 klatkach na sekundę. Rozdzielczość efektywna wynosi 12 MPx, a komunikacja następuje przez Wi-Fi i Bluetooth. Waga kamery to 102 gramy. Największe wady urządzenia:

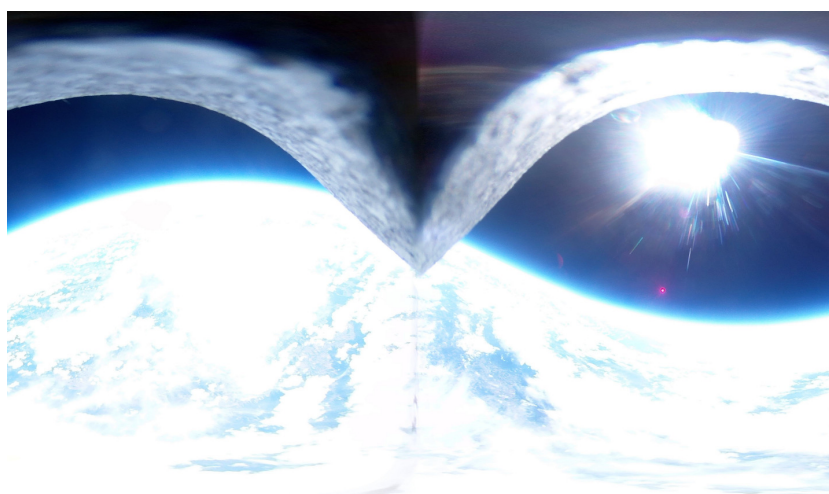
- Brak wodoodporności
- Brak ciągłego nagrywania (tylko filmy 3-minutowe bez możliwości zapętlania)
- Średni czas pracy baterii – 1 h przy wykonywaniu tylko zdjęć
- Maksymalny interwał to 1 zdjęcie co 7 sekund.

W dniu 29 lipca 2023 roku kamera w specjalnie zaprojektowanym styropianowym pojemniku została wyniesiona na wysokość 34.45 km n.p.m. podczas misji SZCZEPANIK 1. Wykonane zdjęcia były za jasne (Rys.1) – zbyt duża wartość ustawienia ISO (czułość matrycy kamery na światło).

Przy wysokich wartościach ISO matryca jest bardziej czuła na światło, co pozwala na robienie zdjęć w słabszych warunkach oświetleniowych.

Warto dodać, że zdjęcia niedoświetlone można rozjaśnić, ale „przepalonych” (zbyt jasnych) już nie można odzyskać. Kolejnym napotkanym problemem było wyłączenie się urządzenia około 60 minut po starcie (w początkowej fazie spadania balonu) w wyniku wyczerpania baterii.

Kamera została ponownie wysłana w stratosferę w dniu 23 września 2023 roku podczas misji SZCZEPANIK 2 na wysokość 27.44 km n.p.m. Po poprawnym ustawieniu współczynnika ISO zdjęcia były wyraźne i dobrze oświetlone (Rys.2). Podłączenie do power-banku pozwoliło na znaczne wydłużenie czasu pracy kamery, gdzie zarejestrowany został przebieg całej misji. Napotkanym problemem było to, że podczas przekraczania granicy chmur niektóre zdjęcia wykonywały się niepoprawnie i były błędnie zapisywane do pamięci. Było to prawdopodobnie spowodowane wilgocią, gdyż kamera nie jest wodoodporna.



RYSUNEK 1. Przykładowe zdjęcie ze stratosfery otrzymane z kamery sportowej 360° RICOH THETA SC2 w trakcie misji SZCZEPANIK 1.



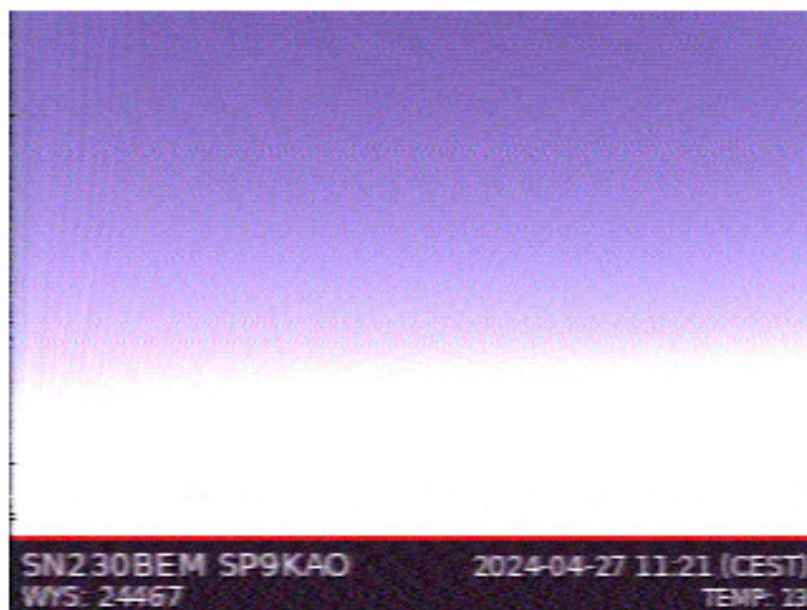
RYSUNEK 2. Przykładowe zdjęcie ze stratosfery otrzymane z kamery sportowej 360° RICOH THETA SC2 w trakcie misji SZCZEPANIK 2.

Kolejnym urządzeniem wykorzystanym w misjach była kamera sportowa GoPro HERO10. Do najważniejszych parametrów należała maksymalna rozdzielczość nagrywania filmów wynosząca 5312×2988 pikseli przy rozdzielczości efektywnej 23 MPx. Kąt widzenia wynosił 170° , a do dodatkowych funkcjonalności należały: cyfrowa stabilizacja obrazu, możliwość nakładania danych z GPS i Slow Motion. Waga urządzenia to 158 gramów.

Kamera została wykorzystana 27 kwietnia 2024 roku podczas misji BEM 1, gdzie została wyniesiona na wysokość 32.83 km n.p.m. Umieszczona była w rogu ładunku, którego formę stanowiła pianka montażowa. Pomimo wyeksponowania soczewki urządzenia na zewnątrz kapsuły, kamera wyłączyła się po 7 minutach z powodu przegrzania. Jest to główna wada sprzętu tego producenta. Kamera zdołała jedynie zarejestrować film z pierwszych minut lotu (<https://www.youtube.com/watch?v=QmAkGV4KumQ>). Ponowne wykorzystanie urządzenia miało miejsce w dniu 8 czerwca 2024 roku, gdy podczas misji – BEM 2, zostało ono wyniesione na wysokość 34.2 km n.p.m. Całkowite wyeksponowanie kamery przez przytwierdzenie jej do specjalnej podstawy wydrukowanej technologią 3D na górze ładunku, pozwoliło na wystarczające schłodzenie i nagranie 2.5 godziny materiału podczas wznoszenia balonu (https://www.youtube.com/watch?v=A_5KLgQ4ndc).

Ostatnim rejestratorem wykorzystanym w misjach była Raspberry Pi Camera V2.1 8MPx, której najważniejszymi parametrami była maksymalna rozdzielczość wykonywania zdjęć, wynosząca 3280×2464 piksele przy rozdzielczości efektywnej 8 MPx. Komunikacja następowała przez interfejs CSI, a dodatkowym atutem był wbudowany filtr podczerwieni.

Kamera była częścią systemu Slow-Scan TeleVision Live. System, który rejestrował na żywo obrazy z kamery a następnie przetwarzał za pomocą mikrokomputera Raspberry Pi Zero na sygnał audio. Następnie sygnał audio był wysyłany przez nadajnik drogą radiową do stacji naziemnych. Dodatkowo, na zdjęcia był nałożony znak krótkofalarski, godzina oraz odczytane z czujnika temperatura zewnętrzna i przybliżona wysokość (Rys.3). Urządzenie było umieszczone w ładunku podczas misji BEM 1, gdzie zdołało wykonywać zdjęcia podczas całego lotu. Problemem były zbyt jasne zdjęcia, na których można było dostrzec niebieskie zarysy stratosfery. Brakowało zewnętrznego filtra UV nałożonego na obiektyw, a kamera była skierowana w niebo zamiast pod kątem w stronę powierzchni Ziemi. Pomimo tego, udało się przetestować samo działanie systemu oraz jakość nadawania wykonanej anteny.



RYSUNEK 3. Przykładowe zdjęcie ze stratosfery z dodatkowymi informacjami zarejestrowane kamerą Raspberry Pi Camera V2.1 8MPx w ramach systemu SSTV podczas misji BEM 1.

W pięciu misjach stratosferycznych Studenckiego Koła Naukowego Elektroników AMPER wykorzystano trzy rodzaje kamer, które monitorowały przebieg lotu. Misje pozwoliły na udoskonalenie techniki rejestracji obrazów w stratosferze. Plany kolejnych eksperymentów obejmują poprawienie jakości zdjęć uzyskanych z kamery SSTV oraz wykonanie lepszej jakości zdjęć powierzchni Ziemi.

Monitorowanie lotów balonów stratosferycznych

Jacek Jasielski, Robert Wielgat

Akademia Tarnowska

Streszczenie: W artykule dokonano przeglądu współczesnych metod monitorowania lotów balonów stratosferycznych zarówno od strony sprzętowej jak i programowej w Polsce i na świecie. Przedstawiono ogólną charakterystykę najczęściej wykorzystywanych radiosond meteorologicznych RS41 i M20. Dokonano przeglądu oprogramowania wykorzystywanego w systemach naziemnego śledzenia radiosond stratosferycznych. Zostały również krótko opisane misje stratosferyczne przeprowadzane przez Studenckie Koło Naukowe Elektroników AMPER działające przy Katedrze Elektroniki, Telekomunikacji i Mechatroniki Akademii Tarnowskiej.

Wprowadzenie

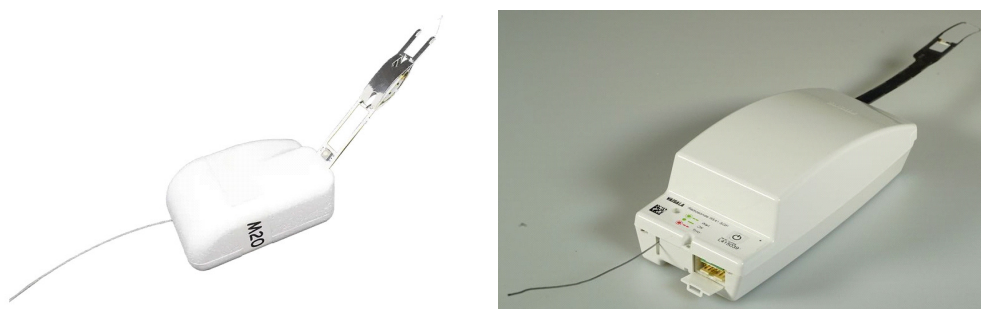
Obecnie na świecie jest regularnie wysyłana duża liczba radiosond meteorologicznych mierzących podstawowe parametry atmosfery ziemskiej, dokładniej troposfery i stratosfery w ramach tzw. radiosondażu. Na podstawie zbieranych danych są tworzone bieżące prognozy pogody do różnych celów, jak również są tworzone coraz dokładniejsze modele atmosfery ziemskiej. Radiosondaż prowadzony jest z wielu ośrodków w Europie jak i na całym świecie. Niektóre z nich, takie jak: Poprad (Słowacja), Prostějov i Praga (Czechy) oraz Lindenberg i Greifswald (Niemcy) są położone blisko granicy polskiej. W Polsce balony radiosondażowe wysyłane są m.in. z ośrodków w Legionowie, Wrocławiu, Łebie i Tarnowie.

Celem lotu pojedynczej radiosondy jest zebranie podstawowych danych meteorologicznych (temperatura, wilgotność, ciśnienie) w lokalizacji odczytanej z odbiornika GNSS (Global Navigation Satellite Systems) oraz wyznaczenie na podstawie jego wskazań prędkości i kierunku wiatru. Radiosondy są wynoszone za pomocą balonów stratosferycznych na wysokość

do ok. 35 km, po czym, po pęknięciu powłoki balonu, opadają na ziemię (cały czas mierząc parametry i przysyłając dane telemetryczne).

Rodzaje i budowa radiosond meteorologicznych

Spśród różnych typów radiosond stratosferycznych dwie są najczęściej spotykane: Meteomodem M20 i Vaisala RS41 (Rys. 1). Radiosondy zawierają w swojej konstrukcji mikrokontroler sterujący (najczęściej rodziny STM32), układ transmisji radiowej (Radiosondy RS41 używają układu SI4032, natomiast M20 układu ADF7012), moduł GNSS (np. GPS) oraz zestaw czujników do pomiaru: temperatury, wilgotności i ciśnienia. Wspomniane sondy M20 i RS41SG wyliczają ciśnienie z równania barometrycznego na podstawie zmierzonej temperatury i wysokości odczytanej z czujnika GNSS. Rzadziej można spotkać radiosondy z dodatkowym modułem do pomiaru stężenia ozonu w atmosferze. W Polsce takie radiosondy są wysyłane tylko z ośrodka w Legionowie.



RYSUNEK 1. Po lewej: Radiosonda typu Meteomodem M20. Po prawej: Radiosonda typu Vaisala RS41.

Ostatnio wiele jednostek edukacyjnych takich jak szkoły, uczelnie, jak również wielu amatorów, wysyła balonowe misje stratosferyczne w celu prowadzenia różnych badań [1]. Obowiązkowym wyposażeniem jest radiosonda umożliwiająca śledzenie trasy lotu i odnalezienie ładunku. W ładunku często znajdują się kamery rejestrujące lot, urządzenie SSTV do przesyłania obrazów online lub oprzyrządowanie pozwalające przeprowadzić eksperymenty w górnych warstwach atmosfery. Radiosonda amatorska nadaje w paśmie krótkofalarskim, przez co do jej wysłania jest niezbędne posiadanie pozwolenia radiowego. Najczęściej w amatorskich misjach stratosferycznych jest używana przeprogramowana radiosonda meteorologiczna RS41. Można również użyć radiosondy M20, którą w kwietniu 2024 r. udało się przeprogramować naukowcom z Akademii Tarnowskiej. W Internecie można również znaleźć projekty w postaci projektu PCB oraz kodów źródłowych programów prostych radiosond, np. seria projektów PecanPico

[2]. Dość powszechnie wykorzystuje się również bibliotekę Arduino Radio-lib [3], która pozwala na szybkie oprogramowanie sond z transmisją RTTY i 4FSK/Horus.

Zestawienie przykładowego sprzętu amatorskiego jest pokazane w tabeli 1. Tabela 1 przedstawia sprzęt wysłany w 2023 i 2024 roku przez Studenckie Koło Naukowe Elektroników AMPER działające przy Katedrze Elektroniki, Telekomunikacji i Mechatroniki Akademii Tarnowskiej w ramach 5 misji stratosferycznych: SZCZEPANIK 1, SZCZEPANIK 2, SZCZEPANIK 3, BEM 1 i BEM 2 z różnym oprzyrządowaniem.

TABELA 1. Zestawienie sprzętu wysłanego w ramach misji stratosferycznych Akademii Tarnowskiej w latach 2023-2024.

Misja	Data startu	Oprzyrządowanie
SZCZEPANIK 1	29.07.2023	Radiosonda RS41, kamera 360, lokalizator GSM
SZCZEPANIK 2	23.09.2023	Radiosonda RS41, kamera 360, lokalizator GSM, rejestrator danych z czujnikami temperatury, wilgotności i ciśnienia, detektor Geigera, nadajnik SSTV, oraz ładunek Zespołu Szkół Technicznych w Tarnowie
SZCZEPANIK 3	29.09.2023	Dwie radiosondy RS41, lokalizator GSM, rejestrator danych z czujnikami temperatury, wilgotności i ciśnienia, nadajnik SSTV, oraz ładunek Zespołu Szkół Mechaniczno-Elektrycznych w Tarnowie
BEM 1	27.04.2024	Dwie radiosondy RS41, kamerę GOPRO, lokalizator GSM, rejestrator danych z czujnikami temperatury, wilgotności i ciśnienia, detektor Geigera, nadajnik SSTV oraz ładunek Zespołu Szkół Technicznych i Branżowych w Brzesku (dwa smartfony z aplikacją CREDO Science i ciastko)
BEM 2	08.06.2024	Dwie radiosondy RS41, radiosonda M20, kamera GoPro, ładunek I Liceum Ogólnokształcącego im. Kazimierza Brodzińskiego w Tarnowie (Prototyp satelity CanSat)

Dokładniejsze informacje na temat misji SZEPANIK 1, 2 i 3 można znaleźć w literaturze [4].

Systemy naziemnego śledzenia radiosond stratosferycznych

Do amatorskiego odebrania i zdekodowania sygnału radiosond meteorologicznych konieczna jest stacja naziemna. Najczęściej spotyka się 2 rodzaje stacji naziemnych zbudowanych w oparciu o:

- komputer PC lub minikomputer Raspbery Pi oraz moduł SDR (Software Defined Radio)

- mikrokontroler ESP32 i moduł LoRa

Pierwszy typ stacji naziemnej jest obsługiwany przez dedykowane oprogramowanie SDR++ [5] lub spdxl [6], a drugi za pomocą oprogramowania MySondyGO [7] lub rdzTTGOsonde [8]. Na Rys. 2 przedstawiono powszechnie spotykane typy modułów SDR. W dalszej części rozdziału dokładniej scharakteryzowano każdy system oprogramowania.



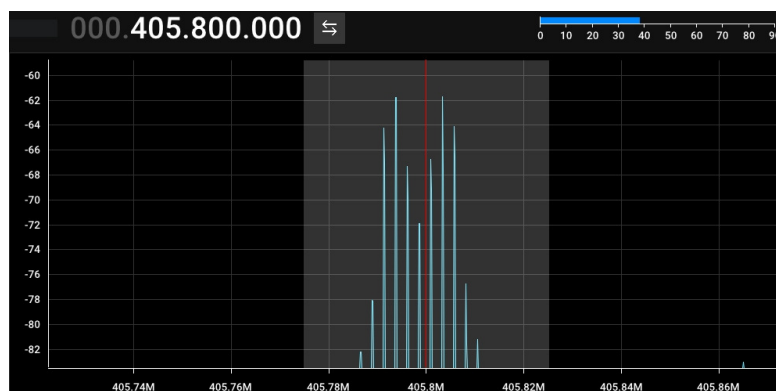
RYСУNEK 2. Popularne urządzenia SDR pozwalające na odbiór sygnału radiosond.

SDR++

SDR++ to proste w użyciu wieloplatformowe oprogramowanie SDR o otwartym kodzie źródłowym. Ważniejsze cechy:

- szerokie wsparcie sprzętowe (zarówno poprzez bibliotekę SoapySDR jak i dedykowane moduły),
- wieloplatformowość (Windows, Linux, MacOS i BSD),
- modułowa konstrukcja (łatwo można napisać własne wtyczki),
- instalacja – prosta (nie wymaga instalacji),
- konfiguracja – średnio trudna,
- możliwość zainstalowania wtyczki do dekodowania transmisji radiosond meteorologicznych.

Na rysunku 3 przedstawiono fragment zrzutu ekranu z programu SDR++ ze zdekodowanym za pomocą dodatkowej wtyczki „Radiosonde Decoder” sygnałem radiosondy M20.



RYSUNEK 3. Fragment zrzutu ekranu z programu ze zdekodowanym sygnałem radiosondy M20.

spdxl

spdxl jest oprogramowaniem na minikomputery Raspberry Pi pozwalającym na śledzenie radiosond meteorologicznych. Program cechuje się możliwością śledzenia wielu radiosond za pomocą przeglądarki internetowej. Cechuje się również dość trudnym procesem instalacji i konfiguracji, która wymaga edycji plików oraz znajomości specyficznych parametrów radiosond. Przykładowo radiosonda M20 nie jest automatycznie konfigurowana po instalacji programu i wymaga wprowadzenia poprawnych ustawień, które nie są opisane w zamieszczonym na stronie WWW poradniku instalacji [6].

Na Rys. 4 jest przedstawione główne okno programu spdxl, a na Rys. 5 okno konfiguracji radiosond w programie.

Sonde Control Panel 82.115.74.19 static-74-19.is.net.pl

MAPA

SONDY

PROCESY

SDR WF

CONFIG

SDR #1 freq

SDR #2 freq

SDR #3 freq

SDR #4 freq

OLED

Name	Latitude	Longitude	Altitude	Speed km/h(m/s)	Climb Dir	Freq	Lat frame	Dist[km]	links
402201339	50.02472	20.94835	14729	12 (3.40)	-11.00	10	405.800	02 5:24:51	2.78
geo KXY SKP aprs.fi Google QSM									

© SP9SKP mod by SQ7BR

RYSUNEK 4. Okno główne programu spdxl. Obsługa programu odbywa się w oknie przeglądarki zalogowanej do Raspberry.

Program spdxl posiada stosunkowo przyjazny interfejs użytkownika, za pomocą którego można lokalizować radiosondy na mapie (Rys. 6)

MySondy GO

System MySondy GO składa się z dwóch modułów: na mikrokontroler ESP32 z modułem LoRa dekodujący sygnał nadawany przez radiosondy

Sonde Control Panel 82.115.74.19 static-74-19.is.net.pl

MAPA

SONDY

PROCESY

SDR WF

CONFIG

SDR #1 freq.

SDR #2 freq.

SDR #3 freq.

SDR #4 freq.

OLED

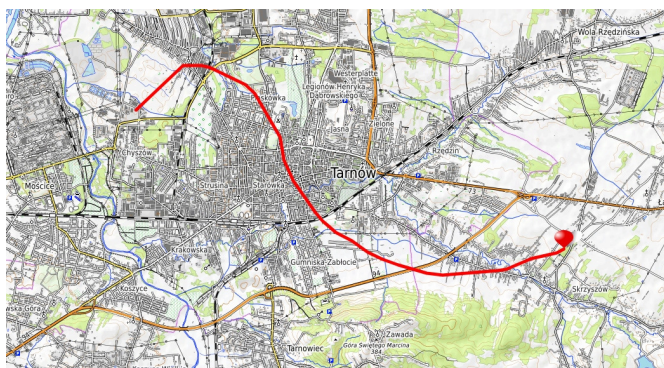
PPM:

GAIN:

No	En.	Mod.	Frequency	AFC [kHz]	AFC offs [Hz]	Squelch	Lowpass	IF width	Comment
1	☐	FM	404.000	10	0	0	60	12000	
2	☐	FM	404.100	10	0	0	60	12000	Norderney
3	☐	FM	404.340	10	0	0	60	12000	
4	☒	FM	404.500	10	0	0	60	12000	Legionowo
5	☐	FM	404.600	10	0	0	60	12000	Leba
6	☐	FM	404.700	10	0	0	60	12000	Meinigen
7	☐	FM	404.800	10	0	0	60	12000	San_Pietro
8	☐	FM	404.900	10	0	0	60	12000	Kummersbruck
9	☒	FM	405.100	10	0	0	60	12000	Lindenberg
10	☐	FM	405.300	10	0	0	60	12000	Zagreb
11	☐	FM	405.700	10	0	0	60	12000	Bergen
12	☐	FM	405.800	10	0	0	60	12000	Lindenberg2
13	☒	FM	405.800	2	-6500	0	0	24000	Tarnów_M20

403.000

RYSUNEK 5. Okno konfiguracji radiosond w programie spdxl.

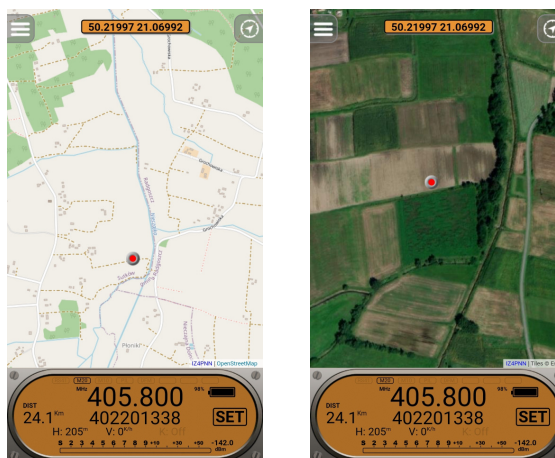


RYSUNEK 6. Mapa przelotu balonu na interfejsie użytkownika programu spdxl.

i opcjonalnie wyświetlający koordynaty na wyświetlaczu OLED oraz aplikacji na telefon (Rys. 7). Aplikacja pokazuje lokalizację radiosondy na mapie (na której widoczna jest również lokalizacja użytkownika), wyświetla jej współrzędne oraz pozwala na konfigurację systemu. Urządzenia łączą się za pomocą Bluetooth. System pozwala na odbiór tylko jednej radiosondy, jej typ i częstotliwość nadawania jest ustawiana za pomocą telefonu. Cechuje się łatwym procesem instalacji – jest dostępny plik .bin do mikrokontrolera, program do jego wgrania z opisem oraz plik .apk na telefon. Konfiguracja programu jest łatwa w przypadku preferowanego sprzętu, który działa praktycznie od razu. Natomiast sprzęt DIY wymaga wprowadzenia poprawnych ustawień.

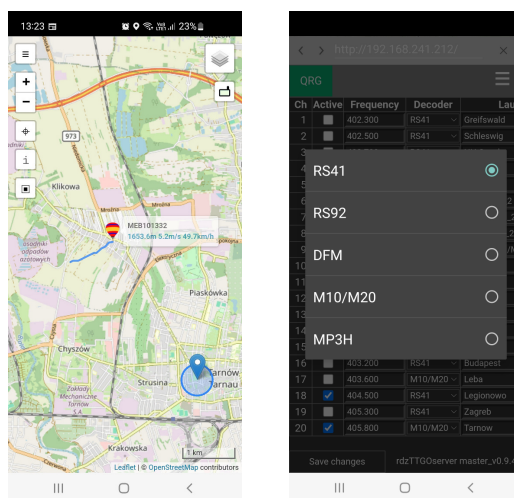
rdzTTGOsonde

Podobnie jak w przypadku oprogramowania MySondy GO, system rdzTTGOsonde składa się z dwóch modułów: na mikrokontroler ESP32 z modulem LoRa dekodującym i wyświetlającym koordynaty (do tego niezbędny



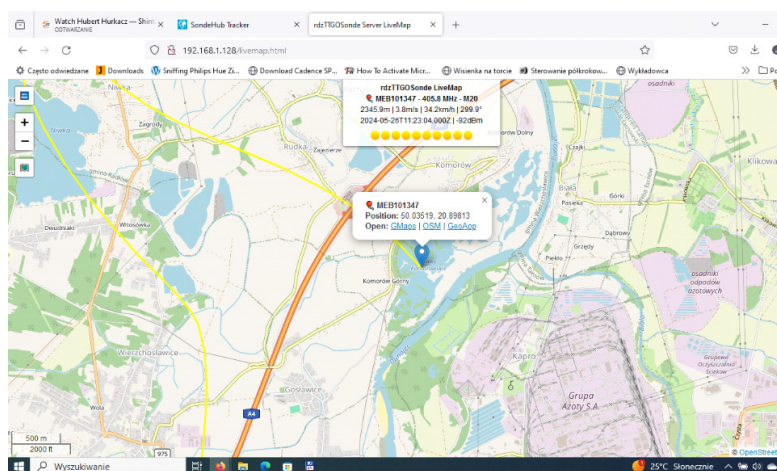
RYSUNEK 7. Widok uruchomionego programu MySondy GO na ekranie smartfona z systemem Android.

jest odpowiedni wyświetlacz) oraz aplikacji na telefon (Rys. 8). Aplikacja pokazuje lokalizację radiosondy na mapie oraz pozwala na konfigurację systemu. Dodatkowo jest możliwa obsługa za pomocą przeglądarki (Rys. 9). Urządzenia łączą się za pomocą sieci WiFi. W odróżnieniu od systemu MySondy GO oprogramowanie rdzTTGOsonde pozwala na konfigurację wielu radiosond. Proces instalacji programu jest analogiczny jak w przypadku MySondy GO natomiast konfiguracja jest bardziej złożona (Podobnie jak w poprzednim przypadku dla preferowanych urządzeń urządzenie działa od razu).



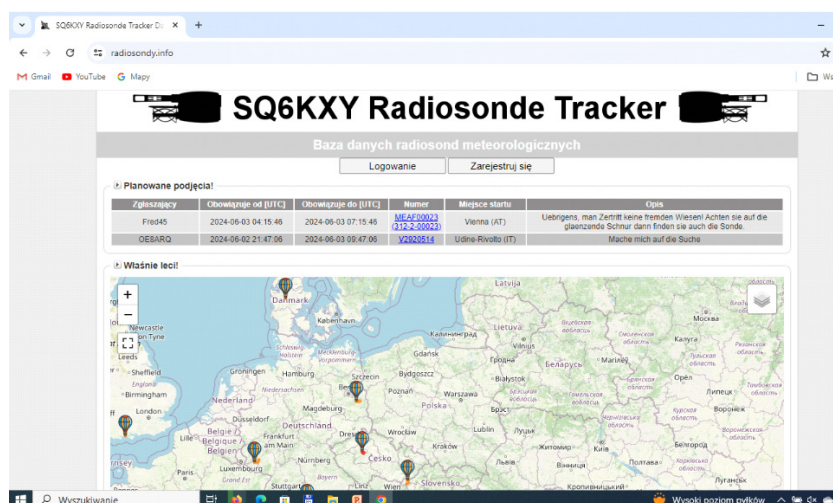
RYSUNEK 8. Widok uruchomionego programu rdzTTGOsonde na ekranie smartfona z systemem Android.

Radiosondy można również śledzić nie posiadając dedykowanego do tego celu sprzętu. Umożliwiają to dwa serwisy internetowe Radisondy.info (Rys. 10) oraz SondeHub.org (Rys. 11). Serwisy pozwalają znaleźć informacje zarówno o aktualnie lecących sondach, jak i sondach, które zakończyły już swój lot. Oba serwisy umożliwiają również sprawdzenie predykcji



RYSUNEK 9. Widok uruchomionego programu rdzTTGOsonde w oknie przeglądarki internetowej.

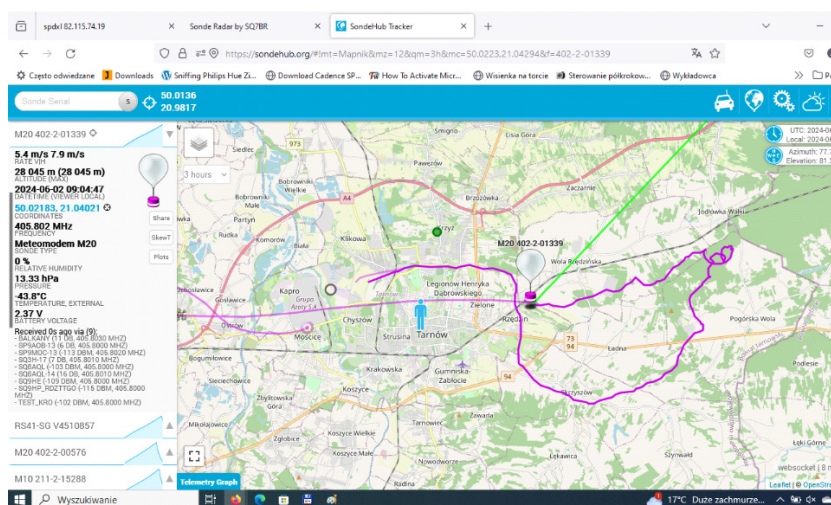
tras przelotu do 7 dni naprzód. Gdy ostatnia odebrana za pomocą wspomnianych serwisów ramka sygnału radiosondy jest na niewielkiej wysokości nad poziomem gruntu, zazwyczaj łatwo jest odnaleźć urządzenie, pod warunkiem, że nie wyląduje w trudnym terenie np. na polu kukurydzy czy w gęstym zbożu.



RYSUNEK 10. Strona główna serwisu RadioSondy [9].

Odbiór transmisji radiosond amatorskich

Do dekodowania transmisji radiosond amatorskich używa się odbiorników SDR, programu SDRSharp lub SRR++ i zewnętrznego programu dekodującego (najczęściej używany to Horus-gui pozwalający na dekodowania transmisji modulowanych częstotliwościowo). Dane lokalizacyjne i ew. telemetryczne przesyłane są jedną z dostępnych metod transmisji:



RYSUNEK 11. Strona główna serwisu SondeHub [10].

- APRS,
- RTTY,
- Horus.

Odbiór radiosond amatorskich wymaga znacznie większych umiejętności. Do poprawnego zdekodowania oprócz częstotliwości transmisji (niektóre balony wykorzystują niestandardowe częstotliwości) trzeba znać prędkość transmisji (Baudrate) oraz odstęp częstotliwości pomiędzy podnośnymi. Ostatnio można spotkać urządzenia wykorzystujące standard LoRa, dla którego kody źródłowe do dekodera na procesor ESP32 [11] można znaleźć w Internecie.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono możliwości śledzenia radiosond meteorologicznych i amatorskich za pomocą powszechnie dostępnego sprzętu oraz oprogramowania. Relatywna łatwość zdobycia wiedzy na temat sposobu przeprowadzenia misji stratosferycznych oraz ich stosunkowo niewielkie koszty sprawiają, że grono osób organizujących tego typu misje stale się powiększa. Prowadzi to, do tworzenia coraz doskonalszego sprzętu i oprogramowania dedykowanego do pracy w stratosferze, gdzie panują warunki pod pewnymi względami zbliżone do warunków bliskiej przestrzeni kosmicznej. Przeprowadzane misje przyczyniają się również do coraz lepszego zbadania atmosfery ziemskiej i bliskiego kosmosu.

Literatura

- [1] Global Space Balloon Challenge – <https://spacesystems.agh.edu.pl/projekty/load/global-space-baloon-challenge/>
- [2] Tracker Pecan Pico 10 – <https://github.com/DL7AD/pecanpico10>
- [3] Biblioteka RadioLib – <https://github.com/jgromes/RadioLib>
- [4] Antosz J. i in., 2023, Misje stratosferyczne Akad. Tarnowskiej Część 1: sprzęt i oprogramowanie, Science, Technology and Innovation, 18 (3-4), 30-45
- [5] SDR++ – <https://www.sdrpp.org/>
- [6] spdxl – <https://github.com/sp9skp/spdxl>
- [7] MySONdy GO – <https://mysondy.altervista.org/mysondygo.php>
- [8] rdzTTGOsonde – https://github.com/dl9rdz/rdz_ttgo_sonde
- [9] Portal Radiosondy – <https://radiosondy.info/>
- [10] Portal SondeHub – <https://sondehub.org/#!mt=Mapnik&mz=12&qm=3h&mc=50.09747,20.90218>
- [11] TBTracker-RX – <https://github.com/RoelKroes/TBTracker-RX>

Zwiększanie świadomości sytuacyjnej w przestrzeni kosmicznej dzięki systemom optycznym o bardzo szerokim polu widzenia

Przemysław Żołądek, Arkadiusz Raj, Marta Kwiatkowska, Jakub Lipiński, Jakub Suchecki, Stanisław Kozłowski

Cilium Engineering, Toruń

Streszczenie: W niniejszej pracy przedstawiono stan prac nad optycznymi systemami przeglądowymi OmniSky oraz OpticalFence. Pierwszy z systemów przeznaczony jest do monitorowania ilości drobnych fragmentów okrążających Ziemię na niskich orbitach. Poprzez obserwacje zjawisk deorbitacji możliwa jest weryfikacja istniejących obecnie modeli rozkładu masy takich odłamków. System ten jest w fazie rozwojowej. Drugi z projektów, OpticalFence, przeznaczony jest do obserwacji obiektów o rozmiarach powyżej 0.4m na orbitach LEO i HLEO, jest to system przeznaczony do obserwacji przeglądowych, pozwalający wykrywać i monitorować obiekty o nieznanym wcześniej efemerydach. Aktualnie pracują trzy systemy wyprodukowane dla Polskiej Agencji Kosmicznej oraz jeden system będący własnością Cilium Engineering. Przedstawiona została budowa urządzeń i zasada działania sieci oraz pierwsze rezultaty.

Wstęp

Lata dwudzieste XXI wieku dla bliskiej przestrzeni kosmicznej zapiszą się w znaczący sposób. Liczba obiektów wysyłanych na orbitę o rzędy wielkości przekracza to co obserwowane było przez pierwsze kilkadziesiąt lat podboju kosmosu. Wraz z rozwojem i wdrożeniem telekomunikacyjnych superkonstelacji satelitarnych, takich jak Starlink czy OneWeb, zyskujemy powszechny i globalny dostęp do Internetu. Ceną tej technologicznej rewolucji jest jednak coraz większy tłok w otaczającej nas przestrzeni kosmicznej. Według raportu Europejskiej Agencji Kosmicznej [1] do grudnia 2023 roku wystrzelono ponad 6500 rakiet nośnych różnego rodzaju.

Rakiety te wyniosły na orbitę 16900 satelitów z czego do czasów nam obecnych dotrwało ich 11500 (część zdeorbitowała wskutek stopniowego obniżania się perygeum, co jest typowe dla najniższych orbit). Działających satelitów jest 9000 co oznacza że 2500 obiektów uległo wcześniej awarii. Katalog NORAD w większości jednak wypełniają obiekty mniejsze – stopnie rakiet nośnych, boostery, osłony aerodynamiczne a w wielu wypadkach też szczątki pochodzące z kolizji satelitów czy też intencjonalnych prób ich niszczenia. Takich różnego rodzaju obiektów, o rozmiarze powyżej 10 centymetrów, jest aż 35000 i są to obiekty śledzone, objęte jako taką kontrolą. Co do obiektów mniejszych, to możliwości wydajnej detekcji kończą się i posilkować należy się modelami. Według modelu MASTER [2] wokół Ziemi krąży około miliona obiektów o rozmiarach w granicach od 1 do 10 centymetrów (wgłębiając się bardziej w model można zauważyć że są to głównie obiekty o rozmiarze od 1 do 2 centymetrów). Nawet tak niepozorne obiekty poruszające się z pierwszą prędkością kosmiczną lub szybciej są niezwykle niebezpieczne. Przykładowo, pocisk karabinowy niesie energię kinetyczną 150 razy mniejszą niż znajdujący się na orbicie odłamek o porównywalnej masie. Modele opisujące rozkład masowy i ilość takich obiektów opierają się na pewnych założeniach i powinny być weryfikowane obserwacyjnie. Jednocześnie istnieje potrzeba ciągłego doskonalenia technik obserwacyjnych w celu śledzenia obiektów mogących w jakiś sposób zagrażać aktywnym satelitom czy też grożącym niekontrolowaną deorbitacją. Bliska przestrzeń kosmiczna staje się bardzo ruchliwym miejscem, wymagającym pewnej kontroli i pełnego rozumienia zachodzących tam zjawisk. Działania mające na celu tego typu monitoring ujęte zostały jako Space Surveillance and Tracking (w skrócie SST). Rozwój naziemnej detekcji w ramach SST swoją dynamiką podąża za obserwowanym wzrostem ilości obiektów na orbicie. Również w Polsce dziedzina ta jest aktywnie rozwijana. W dalszej części artykułu przedstawione zostaną systemy działające w ramach SST, projektowane w Polsce przez firmę Cilium Engineering. Optyczne obserwacje satelitów prowadzone były jak dotąd z wykorzystaniem dedykowanych teleskopów o dość ograniczonym polu widzenia. Plan obserwacji zakładał pomiary pozycyjne konkretnych obiektów odnajdywanych z użyciem uprzednio wyliczonej efemerydy. Tego typu obserwacje, choć bardzo precyzyjne, ze względów czysto praktycznych mogły pokryć bardzo niewielką część populacji obiektów. Masowe obserwacje obiektów o rozmiarach centymetrowych i większych są domeną kosztownych, zaawansowanych systemów radarowych. Systemy optyczne opracowywane przez Cilium Engineering otwierają nową drogę do obserwacji sztucznych satelitów – z wykorzystaniem bardzo czułych kamer

CMOS, z użyciem szerokokątnych obiektywów. Po raz pierwszy na dużą skalę możliwe stały się przeglądowe obserwacje obiektów znajdujących się na orbitach LEO i HLEO.

Omnisky

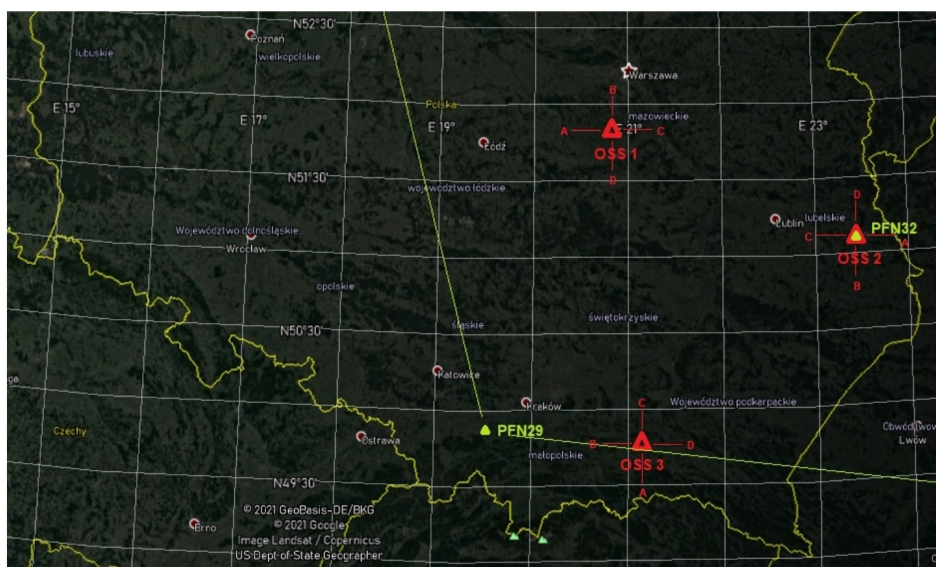
Początkiem budowy systemów o bardzo szerokim polu widzenia był w Polsce rok 2018, kiedy to podjęto prace projektowe nad systemem pozwalającym monitorować niebo w poszukiwaniu śladów deorbitacji sztucznych satelitów Ziemi. Obserwacje miały dotyczyć w szczególności deorbitacji obiektów mniejszych niż 10 centymetrów dla których nie istnieją dokładne efemerydy pozwalające przewidzieć miejsce możliwej deorbitacji. Również dla obiektów większych istnieje duża niepewność miejsca w którym obiekt wejdzie w gęste warstwy atmosfery. Obecność licznych i tanich stacji monitorujących niebo może okazać się bardzo pomocna. Jeszcze innym istotnym zadaniem, wskazanym przez Europejską Agencję Kosmiczną która finansuje projekt, jest obserwacja różnego rodzaju kosmicznych śmieci o rozmiarach 1-2 centymetrów. Liczebność takich obiektów nie jest do końca znana i wymaga obserwacyjnego potwierdzenia. Projekt zrealizowano dla ESA przy współpracy z firmą Sybilla Technologies oraz we współpracy z Centrum Astronomicznym im Mikołaja Kopernika PAN.

OmniSky składa się z sieci samodzielnych bezobsługowych stacji obserwacyjnych. Stacje te obserwują bardzo duży wspólny obszar atmosfery działając bardzo podobnie do typowej sieci bolidowej. Same deorbitacje niewielkich obiektów LEO są zresztą dość podobne do meteorów, z tą różnicą że prędkości kątowe są tu znacząco mniejsze niż prędkości nawet najwolniejszych meteorów. Mamy tu znacznie spokojniejszy i dłużej trwający proces ablacji, jednocześnie też, ze względu na znacznie niższą energię do wywołania świecenia, potrzebna jest większa masa niż w przypadku meteorów. Skalując jasności meteorów o niskim współczynniku ablacji (typu I) i biorąc pod uwagę różnicę prędkości dla obiektów o rozmiarze 1-2 centymetrów uzyskujemy jasność około 5-6 magnitudo.

Każda ze stacji składa się z szafy zawierającej osprzęt oraz z głowicy z czterema kamerami o polu widzenia 90 stopni. Kamery ustawione są w taki sposób aby objąć obserwacjami prawie cały nieboskłon – cztery pola skierowane są na wschód, zachód, północ i południe. Jedynie obszar bezpośrednio w otoczeniu zenitu stanowi pole martwe. Konstrukcja jest modułowa i łatwa w modyfikacjach. Obraz obserwowany jest za pomocą

kamer CMOS o wysokiej czułości, detekcja przeprowadzana jest na komputerach (w pierwszej fazie projektu na komputerach jednopłytkowych z procesorami *arm*, w nowej rozwijanej aktualnie wersji z jednym komputerem przemysłowym). Obserwacje są wstępnie redukowane do postaci, która nie powodując utraty danych znacząco zmniejsza ich objętość, ułatwiając transmisję do serwisu chmurowego. Tu warto zaznaczyć że OmniSky opracowany został z myślą o pracy w miejscach o słabej infrastrukturze. W przypadku gdy nie jest dostępne łącze szerokopasmowe możliwe jest wykorzystanie dostępnej na danym obszarze sieci GSM.

Centralnym elementem sieci jest serwis chmurowy zbierający dane ze stacji i poddający je analizie. Poszczególne detekcje łączone są w pary i testowane pod względem geometrycznym. W przypadku gdy testy potwierdzą, że dwie lub więcej stacji zaobserwowało ten sam obiekt, dane przekazywane są do kodu wyznaczającego położenie obiektu i jego końcowe obserwowane elementy orbitalne. Możliwe jest jednoczesne przetwarzanie obserwacji wielu obiektów, nawet w przypadku gdy pojawiają się one jednocześnie na tych samych kamerach. Dla obszaru znajdującego się pomiędzy stacjami spodziewana jest precyzja wyznaczania pozycji na poziomie 50 metrów.



RYSUNEK 1. Rozmieszczenie stacji obserwacyjnych systemu OmniSky.

W chwili gdy powstaje ten artykuł, w Polsce rozmieszczone są 3 stacje systemu OmniSky. Pierwsza stacja oznaczona jako OSS1 zainstalowana została w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym PAN w Belsku, w Zakładzie Fizyki Atmosfery. Druga ze stacji umieszczona została w stacji obserwacyjnej Polskiej Sieci Bolidowej (PFN) w Chełmie. Stacja trzecia znajduje się w Obserwatorium Astronomicznym Królowej Jadwigi w Rzepienniku Biskupim. Wszystkie 3 stacje tworzą sieć o kształcie zbliżonym do

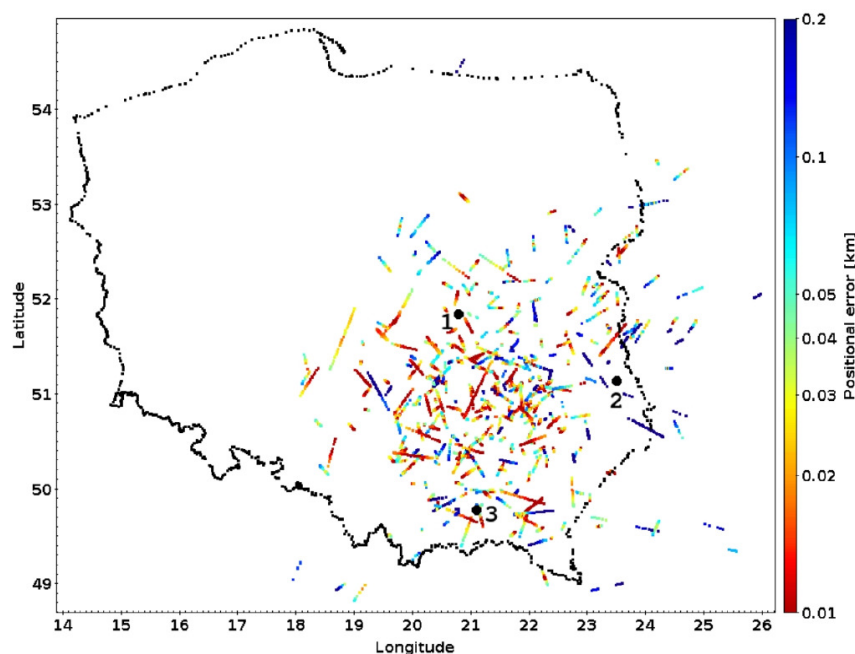
trójkąta równobocznego o boku 200 km (rys. 1). Tego typu rozmieszczenie stacji zapewnia obserwację odpowiednio dużej wspólnej przestrzeni, przy zachowaniu wymaganej dokładności 50 m, i pozwala pokryć teren z wykorzystaniem optymalnej liczby stacji. Powstała w ten sposób komórka sieci obserwacyjnej pozwala kontrolować niebo nad $1/4$ powierzchni Polski. W pierwszej fazie projektu osiągnięto zasięg około $+3$ magnitudo napotykając na barierę wydajnościową związaną z przetwarzaniem danych na komputerach jednopłytkowych. Biorąc pod uwagę, że nawet dla najdrobniejszych obiektów o rozmiarze 1-2 centymetrów spodziewamy się 2.2 detekcji rocznie (dla sieci 3 stacji), to jak na ten moment przy ograniczonym zasięgu nie udało się zarejestrować zjawiska deorbitacji.



RYSUNEK 2. Stacja obserwacyjna systemu OmniSky OSS2 Chełm.

Rejestrowana jest natomiast dość duża ilość meteorów, w szczególności tych wolniejszych (algorytmy detekcji zoptymalizowane są do wykrywania obiektów o niewielkiej prędkości katowej). Biorąc pod uwagę dość dobrą precyzję i bardzo szerokie pole widzenia, można uznać że i w tym zastosowaniu OmniSky może przynieść dość wymierne efekty. Trajektorie meteorów zaobserwowanych w ciągu kilku pierwszych miesięcy pracy systemu przedstawiono na rysunku 3.

Pierwsze testy wskazały na potrzebę dokonania kilku poprawek do istniejących stacji. Osiągnięcie pełnego zasięgu możliwe będzie po zastosowaniu bardziej wydajnych komputerów przemysłowych. Modernizacja stacji oraz serwisu chmurowego jest przedmiotem kolejnego projektu Europejskiej Agencji Kosmicznej i jest realizowane we współpracy międzynarodowej.



RYSUNEK 3. Trajektorie meteorów zarejestrowane przez system OmniSky w okresie od lutego do września 2021 roku wraz z precyzją wyznaczenia pozycji.

OpticalFence

Obecnie flagowym systemem VWFOV (Very Wide Field of View) opracowanym przez Cilium Engineering jest OpticalFence. System ten, podobnie jak OmniSky, jest dalekim krewnym klasycznych sieci bolidowych. Tym razem jednak jest to sieć detektorów przeznaczonych do detekcji satelitów znajdujących się na orbitach LEO i HLEO, stąd też napotykamy tu nieco inne wymagania co do sprzętu obserwacyjnego, jak też mamy do czynienia z dość specyficznym rozmieszczeniem samych stacji obserwacyjnych.

OpticalFence, podobnie jak OmniSky, to sieć autonomicznych i bezobsługowych stacji obserwacyjnych, połączona w całość serwisem chmurowym przetwarzającym dane. OpticalFence przeznaczony jest do obserwacji przeglądowych, a więc nie jest ukierunkowany na obserwacje konkretnych satelitów. Jest w stanie śledzić wszelkie obiekty pojawiające się w polu widzenia stacji a ich identyfikacja i wyznaczenie pozycji czy też orbity odbywa się w serwisie chmurowym. W ten sposób możliwa jest obserwacja obiektów nieznanych, nie objętych śledzeniem.

Sieć

Obiekty obserwowane są na orbicie LEO/HLEO w momencie gdy są one oświetlone przez Słońce, czyli w czasie gdy nie znajdują się w cieniu Ziemi. W większości przypadków oznacza to że mogą być one obserwowane wieczorem po zachodzie Słońca i rano przez wschodem Słońca. Optical-Fence w swoim podstawowym trybie działa z wykorzystaniem triangulacji, a więc obiekt musi być obserwowany co najmniej z dwóch stacji. Biorąc pod uwagę ten wymóg należy zapewnić jednakowe warunki detekcji dla obu stacji; przelatujący satelita w obu stacjach powinien mieć podobną jasność i podobny kąt fazowy. Najbardziej optymalne wydaje się więc ustawienie pól widzenia w kierunku północ-południe co dla obu stacji daje zbliżone do siebie kąty fazowe i daje gwarancję że w obu stacjach położenie cienia Ziemi będzie w przybliżeniu podobne. Aby spełnić powyższy wymóg i osiągnąć dobrą skuteczność, przy jednoczesnym zachowaniu niskich kosztów, należy tu zastosować pionowe pole widzenia, pozwalające na obserwacje od okolic horyzontu aż do zenitu. Tego typu wąskie pionowe pole widzenia wymaga precyzyjnego ustawienia w ramach sieci; obszary kontrolowane przez stacje muszą pokrywać się, inaczej mówiąc stacje powinny być skierowane wprost na siebie. Kolejnym ważnym czynnikiem jest geometria obserwacji. Przy wyznaczaniu pozycji ważne jest aby kierunki widzenia nie przecinały się pod zbyt małymi lub pod zbyt ostrymi kątami gdyż skutkuje to powstawaniem znaczących błędów przy wyznaczaniu położenia. Typowa odległość między stacjami wynosi 1600 kilometrów, pozwala to na objęcie obserwacjami zakresu wysokości od około 500 do 2000 kilometrów. W przypadku orbit niższych, gdzie kąty przecięcia kierunków przestają być optymalne, wskazane jest zmniejszenie odległości. W praktyce, bardzo dobrym rozwiązaniem jest system 4 stacji rozmieszczonych w 3 lokalizacjach. Stacje skrajne współpracują ze sobą na bazie 1600 kilometrów. W dodatkowej lokalizacji pośrodku znajdują się natomiast dwie dodatkowe stacje, pozwalające na prawidłowe pokrycie zakresu wysokości od 200 do około 1000 kilometrów.

Stacje

Stacje OpticalFence, podobnie jak w przypadku OmniSky składają się z szafy zawierającej osprzęt oraz głowicy obserwacyjnej (rys. 4). Ze względu na specyficzne wymogi dotyczące pola widzenia głowica zawiera 6 kamer ustawionych jedna nad drugą. Głowica posiada możliwość precyzyjnej regulacji, wyposażona jest też w przesłone zabezpieczającą kamery przed

światłem słonecznym w ciągu dnia. Wewnątrz szafy znajdują się komputery przemysłowe, elementy systemu zasilania, watchdog, urządzenia sieciowe a także klimatyzator pozwalający na pracę przy wysokich temperaturach otoczenia. Stacje posiadają anteny i odbiorniki GPS potrzebne do wyzwalania klatek (kamera zapisuje obraz w ściśle określonych momentach, czas obserwacji znany jest z precyzją 0.00001 sekundy). Urządzenie nie wymaga obsługi innej niż okresowego czyszczenia okien optycznych. Komunikacja może odbywać się za pomocą stałego łącza internetowego lub za pośrednictwem sieci GSM w przypadku lokalizacji o słabej infrastrukturze. Urządzenie ma około 150 cm wysokości, daje się łatwo transportować a instalacja ogranicza się do przygotowania twardego podłoża, podłączenia do sieci elektrycznej i internetowej.



RYSUNEK 4. Dwie stacje systemu OpticalFence w jednej lokalizacji, środkowy element sieci przeznaczony do obserwacji satelitów na niskich orbitach.

Przetwarzanie danych

Dla obiektów przechodzących przez wspólny obserwowany obszar atmosfery wykonywane są obserwacje z dwóch różnych stacji. W praktyce obserwacje wykonywane są dla każdego obiektu znajdującego się w polu widzenia, obiekt taki może znajdować się na linii widzenia za obszarem (dla odległych satelitów) lub przed obszarem (dla bardzo niskich orbit w bezpośredniej bliskości stacji), ale tylko dla obiektów wchodzących we wspólny

obszar istnieje możliwość wykonania obserwacji triangulacyjnej. Kamery systemu OpticalFence wyzwalane są z częstotliwością 5 Hz. Dla każdej klatki, jeszcze na etapie wstępnej redukcji (na stacji OF), wyznaczana jest pozycja obiektu w układzie azymutalnym. Seria klatek wraz z wyznaczonymi pozycjami i czasem tworzy tzw. *tracklet* czyli zapis pojedynczego przelotu w polu widzenia kamery. Tracklety zapisywane są jako pliki FITS [3] i w tej postaci (mocno zredukowanej) przekazywane są do serwisu chmurowego. W serwisie chmurowym dane te łączone są ze sobą najpierw w filtrze czasowym a następnie w filtrze geometrycznym. Identyfikowane są tracklety odnoszące się do tych samych przelotów obserwowanych z różnych stacji. Tracklety które przechodzą filtrowanie kierowane są do obliczeń 3D, pozwalających na określenie współrzędnych kartezjańskich (a z nich współrzędnych geograficznych i wysokości) dla każdego obserwowanego punktu. Składając dwa odpowiadające sobie tracklety uzyskujemy w rezultacie ciąg punktów 3D wraz z przyporządkowanym czasem obserwacji, co w praktyce oznacza, że otrzymujemy tu wektor stanu a to umożliwia wyznaczenie wstępnej orbity obserwowanego obiektu. Na podstawie położenia i czasu rejestracji dokonywana jest identyfikacja obiektu, przydzielany jest numer NORAD, a w przypadku gdy identyfikacja kończy się niepowodzeniem przydzielany jest tymczasowy numer katalogowy. Efektem obliczeń są wpisy do bazy danych oraz pliki TDM (Tracking Data Message) [4] zawierające współrzędne równikowe oraz odległość obiektu, podobnie jak ma to miejsce w przypadku danych radarowych. Dla obiektów obserwowanych poza wspólnym polem (obserwacje 2D) przeprowadzana jest identyfikacja na podstawie współrzędnych niebieskich i czasu. Powstający w tym wypadku TDM zawiera dane kątowe, podobnie jak w przypadku obserwacji teleskopowych.

Istniejące sieci

Aktualnie istnieją dwie sieci wykorzystujące stacje OpticalFence. Pierwszą z nich jest system OpticalFence zbudowany dla Polskiej Agencji Kosmicznej (PAK) działający obecnie na trzech kontynentach. System działający dla PAK składa się z 3 podsystemów zorganizowanych według zasad opisanych powyżej. W każdym z trzech podsystemów rozmieszczono po 4 kamery w 3 lokalizacjach, co pozwala na skuteczną obserwację zarówno obiektów HLEO jak i tych najniższej krążących, zbliżających się do deorbitacji. Jako pierwszy uruchomiono system europejski, gdzie trzy stacje i dwie lokalizacje umieszczono w Polsce (między innymi do roku 2024 w Obserwatorium Królowej Jadwigi w Rzepienniku Biskupim) a stację

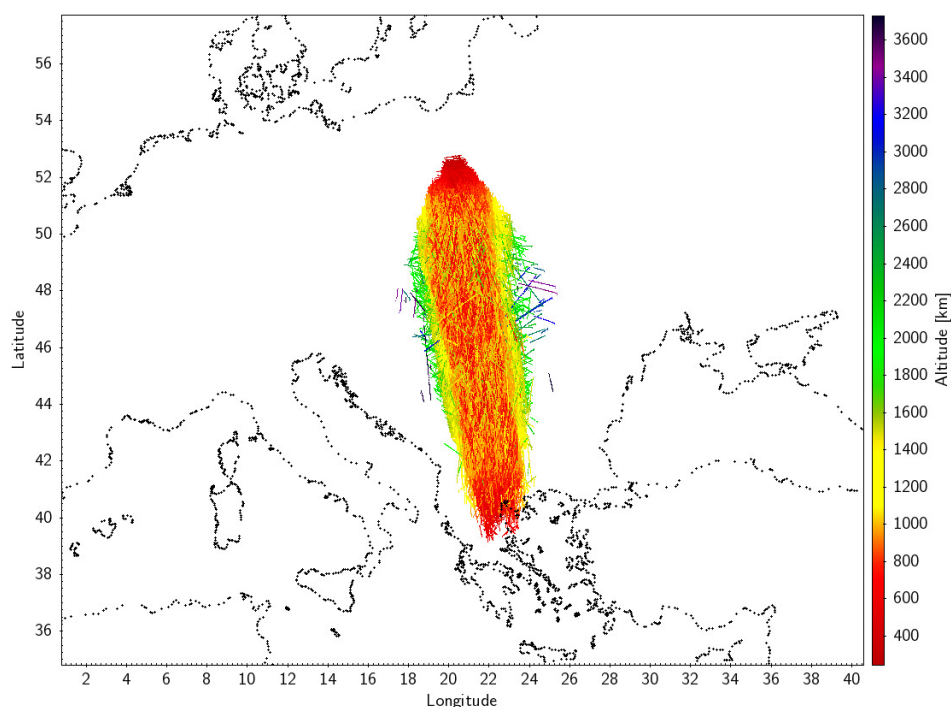
skrajną południową umieszczono w Grecji na półwyspie Peloponez. Kolejne podsieci uruchomiono jesienią 2022 roku, sieć afrykańska rozmieszczona została w zachodniej części RPA oraz Namibii, a sieć australijska rozmieszczona została we wschodniej części tego kontynentu. W każdym przypadku udało się zachować nieomal południkowy kierunek obserwacji, współliniowość oraz odległości zgodne z teoretycznymi założeniami.

Druga sieć – OpticNode, będąca własnością Cilium Engineering, zbudowana została w oparciu o dwie stacje rozmieszczone w odległości około 1600 kilometrów. Pierwsza z nich zlokalizowana została w zachodniej Polsce, druga ze stacji współdzieli lokalizację z południową stacją systemu europejskiego PAK i jest zlokalizowana w Grecji.

Wyniki obserwacji

Przykładowe wyniki obserwacji przedstawione zostaną dla systemu europejskiego OpticalFence. Od kwietnia 2022 do sierpnia 2024 system europejski zaobserwował 67590 trajektorii satelitarnych. System ten jest jednym z najwydajniejszych, a wynika to między innymi z położenia na umiarkowanych szerokościach geograficznych, gdzie cień Ziemi przez znaczną część roku położony jest nisko nad południowym horyzontem i możliwe są obserwacje obiektów przez znaczną część nocy (dla orbit wysokich nawet przez całą noc). Na rysunku 5 przedstawiono wszystkie trajektorie obserwowane przez europejską część OpticalFence. Widoczny jest tu wspólny obserwowany obszar atmosfery w postaci podłużnej, rozciągniętej południkowo struktury otaczającej linię łączącą poszczególne stacje obserwacyjne. Na rysunku 6 przedstawiony został przekrój pionowy, na osi x naniesiono szerokość geograficzną obserwowanych punktów, na osi y naniesiono wysokości. Satelity obserwowane są w projektowo założonym zakresie od 200 do 2000 kilometrów. W praktyce obserwowane są też wyżej, nawet do wysokości 4000 kilometrów, w tym wypadku jednak wspólny obszar obserwowany staje się dość mały. Warto zaznaczyć że jest to przekrój przez obserwacje triangulacyjne, 3D. W przypadku satelitów niesparowanych jedynym ograniczeniem jest zasięg gwiazdowy kamer wynoszący około +11 magnitudo i tu możliwe są obserwacje większych satelitów na orbitach MEO.

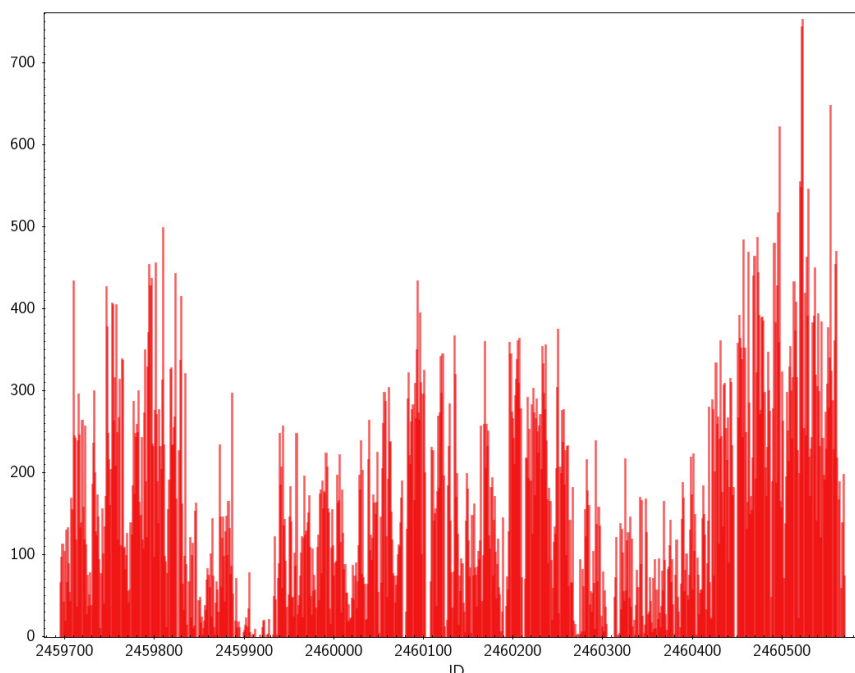
Jeżeli chodzi o precyzję, próby kalibracji systemu z wykorzystaniem efemeryd dla satelitów Starlink pokazują całkowite błędy położenia na poziomie dochodzącym do 40-50 metrów (w residuach poszczególnych osi na poziomie 20-30 metrów).



RYSUNEK 5. Trajektorie satelitów zaobserwowane przez europejską część sieci OpticalFence w latach 2022-2024.

Statystyki

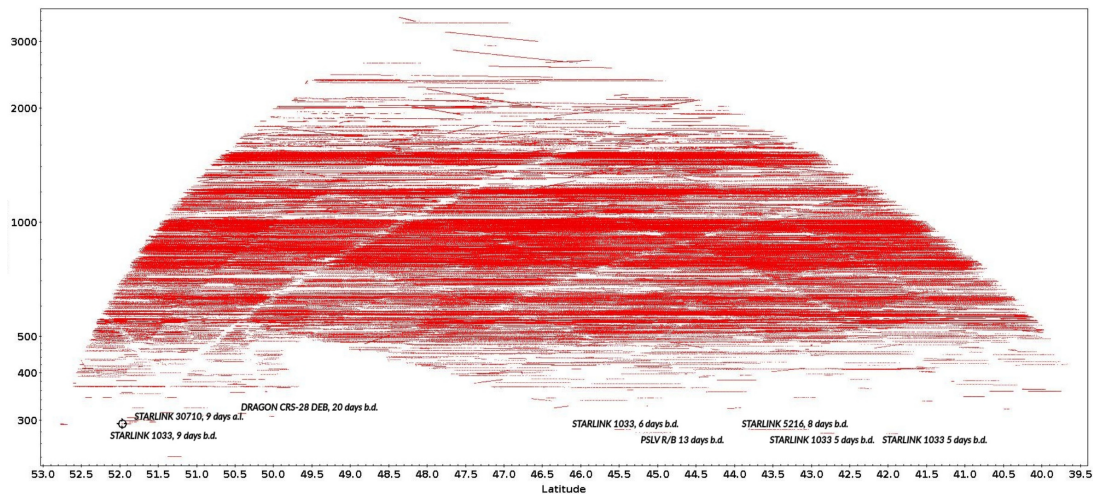
Statystyki przedstawione poniżej powstały na podstawie danych pochodzących z trzech systemów sieci OF PAK dla okresu pomiędzy 26 kwietnia 2022 a 16 września 2024. W tym okresie czasu zaobserwowano 131726 indywidualnych przelotów satelitów. Dobowe ilości obserwowanych przelotów zaprezentowano na rysunku 6. W latach 2022-2023 cała sieć dostarczała około 300-400 trajektorii na dobę, w roku 2024 ilość ta wzrosła do 400-500 trajektorii. Najdłuższy zapis trajektorii liczył 375 punktów, co odpowiada 75 sekundom obserwacji. Typowy przelot to zapis o długości od 30 do 100 punktów. Długość przelotu jest mocno zależna od wysokości i odległości obserwowanego satelity. Dla obiektów na wysokich orbitach mamy mniejszą prędkość kątową i dłuższy czas przebywania obiektu w polu widzenia, dla orbit niskich przeloty są dość krótkie. Biorąc pod uwagę że w określonym wyżej okresie stacje zarejestrowały 5826680 indywidualnych punktów 3D w 131726 przelotach, uzyskujemy średnią 44 punkty na przelot. Jeżeli chodzi o wysokości, to system europejski jest w stanie obserwować obiekty na wysokości dochodzącej do 4000 kilometrów. W przypadku dwóch pozostałych systemów, wysokości detekcji sporadycznie dochodzą do 6000 kilometrów, przy czym w większości są to obserwacje dużych obiektów, takich jak człony rakiet nośnych na wysokich orbitach eliptycznych.



RYSUNEK 6. Dobowe ilości obserwowanych przelotów satelitów w latach 2022-2024.

Interesująco wygląda dobowe pokrycie obserwacjami dla różnych podsieci. W systemie europejskim istnieje dość duża zmienność w ciągu roku, związana z różnym położeniem cienia Ziemi. Dobowe pokrycie obserwacjami zmienia się w cyklu rocznym głównie za sprawą sieci europejskiej, która w miesiącach zimowych obserwuje satelity w dwóch oknach obserwacyjnych – wieczornym i porannym, a w miesiącach letnich obserwuje satelity przez całą noc. Dla systemu afrykańskiego i australijskiego dostępne są wyłącznie dwa okna obserwacyjne. Ze względu jednak na znaczną różnicę w długości geograficznej, system australijski dostarcza dane w czasie gdy w stacjach europejskich i afrykańskich mamy już dzień. Ze względu na możliwość obserwacji przez znaczną część nocy system europejski jest najwydajniejszy; z ogólnej liczby 131726 trajektorii aż 67590 pochodzi z Europy. Dla systemu afrykańskiego zarejestrowano 39109 trajektorii, a dla systemu australijskiego 25027. Po co więc budować sieci w obszarach międzyzwrotnikowych? Odpowiedź jest prosta – chodzi tu o pełne pokrycie zakresu inklinacji orbitalnych. Dla dowolnego obserwatora wartością ograniczającą możliwość obserwacji satelitów o danej inklinacji będzie szerokość geograficzna obserwatora. O ile dla pojedynczego obserwatora nie jest to ścisłe ograniczenie, o tyle dla systemu, w którym obiekt musi znaleźć się między dwoma stacjami, czynnikiem ograniczającym będzie szerokość geograficzna stacji bliższej równikowi. W ten sposób podsystemy australijski i afrykański, mimo że mniej wydajne, dostarczają danych unikatowych w skali całej sieci.

W ramach wyników warto też zwrócić uwagę na bardzo niskie przeloty wiążące się z nadchodzącą deorbitacją (rys. 7). Przeloty takie rejestrowane są głównie na wewnętrznych parach stacji (stacja północna i stacja środkowa lub stacja środkowa i stacja południowa). W danych znajdujemy między innymi ciąg obserwacji satelity Starlink 1033, gdzie obiekt ten został zaobserwowany na 9, 6 i dwukrotnie na 5 dni przed deorbitacją, która nastąpiła 8 października 2023 roku. Obserwowano też Starlinka 30710 na 9 dni przed deorbitacją, czy też Starlinka 5216 na 8 dni przed deorbitacją. Obserwacji tych dokonywano na wysokościach poniżej 300 kilometrów.



RYSUNEK 7. Przekrój szerokość geograficzna – wysokość dla europejskiej części sieci OpticalFence. Zaznaczono obiekty zaobserwowane na kilka dni przed deorbitacją.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono stan prac nad rozwojem optycznych sieci przeglądowych o bardzo szerokim polu widzenia. Jest to dziedzina nowatorska, uzupełniająca dotychczas stosowane techniki obserwacji satelitów. Od roku 2018, kiedy to nakreślano pewne kierunki działań do roku 2020, kiedy to doszło do pierwszego praktycznego wdrożenia, udało się stworzyć praktycznie działające systemy przeznaczone do obserwacji bliskiej przestrzeni kosmicznej. Aktualnie system OpticalFence użytkowany jest przez PAK, istnieje też zainteresowanie systemem wśród odbiorców komercyjnych. Koszt budowy tego typu urządzeń jest stosunkowo niewielki, znacznie mniejszy niż w przypadku dedykowanych teleskopów i zupełnie nieporównywalny z kosztami systemów radarowych. Modułowa konstrukcja umożliwia łatwe modyfikacje w sytuacji gdy dostępne staną się bardziej wydajne komputery czy też czulsze kamery. Te samodzielne, odporne na warunki środowiskowe autonomiczne obserwatoria nie wymagają niczego

więcej jak doprowadzenia energii elektrycznej, są więc bardzo łatwe w instalacji. Jak wskazują symulacje, wydajność tego typu sieci jest wprost proporcjonalna do ilości rozmieszczonych systemów, przez co bardzo wskazane jest rozmieszczanie kolejnych tego typu urządzeń w obserwatoriach na całym świecie. Dywersyfikacja długości geograficznej pozwoli z czasem na pełne dobowe pokrycie obserwacjami. Rozmieszczanie stacji na różnych szerokościach geograficznych pozwoli objąć obserwacjami rozmaite populacje obiektów, od tych o bardzo niskiej inklinacji aż po orbity biegunowe.

Literatura

- [1] ESA Space Environment Report 2024, https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/ESA_Space_Environment_Report_2024
- [2] Horstmann A. i in., 2020, Enhancement of S/C Fragmentation and Environment Evolution Models, ESA contract No. 4000115973/15/D/SR
- [3] Wells D.C. i in., 1981, FITS: A Flexible Image Transport System , Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 44, 363-370
- [4] CCSDS The Consultative Committee for Space Data Systems, Tracking Data Message Blue Book, Recommended Standard Issue 2, Washington DC USA, 2020

Wpływ nieważkości na organizm człowieka i technologie wspierające aktywność fizyczną astronautów na ISS

Marta Żyłka¹, Wojciech Żyłka^{2,3}

¹ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Inżynierii Lotniczej i Kosmicznej

² Uniwersytet Rzeszowski, Kolegium Nauk Przyrodniczych, Instytut Inżynierii Materiałowej

³ Akademia Tarnowska, Wydział Politechniczny, Katedra Elektroniki Telekomunikacji i Mechatroniki

Streszczenie: Artykuł przedstawia zagadnienia związane z wpływem braku grawitacji na ludzki organizm. W stanie nieważkości mięśnie i kości astronautów ulegają osłabieniu, co skutkuje m.in. redukcją masy mięśniowej, spadkiem gęstości kości oraz zmianami w funkcjonowaniu układu krążenia. Te czynniki mają znaczący wpływ na zdrowie oraz sprawność fizyczną, szczególnie w przypadku długotrwałych misji kosmicznych. Zaprezentowano urządzenia do ćwiczeń fizycznych wykorzystywane przez astronautów na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS), które pomagają przeciwdziałać negatywnym skutkom stanu nieważkości. Sprzęt ten jest kluczowy dla utrzymania kondycji fizycznej astronautów i umożliwia im wykonywanie codziennych ćwiczeń w warunkach kosmicznych.

Zmiany fizjologiczne w mikrograwitacji, wpływ podróży kosmicznych na organizm człowieka

Loty kosmiczne znacząco wpływają na układ naczyniowy centralnego układu nerwowego i dynamikę płynu mózgowo-rdzeniowego. Ciało musi przystosować się do mikrograwitacji i promieniowania [1]. W początkowej fazie pobytu w mikrograwitacji, astronauta doświadczają przesunięcia płynów ustrojowych ku górze, co prowadzi do obrzęku twarzy oraz dyskomfortu w okolicach zatok [2]. Ponadto mogą występować zaburzenia układu

przedsionkowego, co powoduje objawy kosmicznej choroby lokomocyjnej, takie jak: mdłości i zawroty głowy, ból głowy, zaburzenia koncentracji, utrata apetytu, dolegliwości żołądka. Objawy te pojawiają się w ciągu kilku minut do kilku godzin od rozpoczęcia misji [2, 3].

Mikrograwitacja negatywnie wpływa na układ sercowo-naczyniowy, prowadząc do zmniejszenia masy mięśnia sercowego oraz obniżenia maksymalnego poboru tlenu. Spadki te wynikają zarówno z braku obciążeń fizycznych, jak i zmniejszenia objętości osocza oraz liczby krwinek czerwonych [4, 5].

Astronauci na ISS tracili od 1 do 1.2% BMD (bone mineral density) miesięcznie, co zwiększa ryzyko osteoporozy. Po sześciomiesięcznym pobycie w kosmosie utrata masy kostnej wynosiła około 7%, a ryzyko złamań osteoporotycznych wzrosło 2-3 razy. Po powrocie na Ziemię, powrót do normy gęstości kości może zająć od kilku miesięcy do kilku lat [4]. Dodatkowo, zmiany w chrząstkach stawowych, które odżywiają się na zasadzie dyfuzji, mogą prowadzić do ich osłabienia i zmniejszenia grubości [6].

Długotrwałe loty w mikrograwitacji prowadzą do znacznej utraty masy i siły mięśni. Badania MRI (t.j. metodą rezonansu magnetycznego) wykazały zmniejszenie objętości różnych grup mięśniowych, a powrót do normy po misji trwa od 30 do 60 dni [7, 8].

Negatywny wpływ środowiska kosmicznego na układ sercowo-naczyniowy polega głównie na zmniejszonej tolerancji wysiłku i sprawności fizycznej. Największym zagrożeniem dla ludzkiego organizmu są jednak nietolerancja ortostatyczna i zaburzenia rytmu elektrycznego serca wynikające ze zmiany pola grawitacyjnego [9]. Podczas lotu kosmicznego znacznie zmniejsza się krążąca objętość krwi, co prowadzi do zmniejszenia objętości wyrzutowej serca, ciśnienia krwi i kompensacyjnego wzrostu częstości pracy serca. Szacuje się, że tolerancja wysiłku astronauty jest równa wydajności osoby prowadzącej siedzący tryb życia [10].

Urządzenia do aktywności fizycznej na stacji kosmicznej

Aktywność fizyczna odgrywa kluczową rolę w utrzymaniu zdrowia astronautów podczas długotrwałych misji w przestrzeni kosmicznej. W warunkach mikrograwitacji, takich jak te panujące na ISS, brak grawitacji wpływa negatywnie na układ mięśniowo-szkieletowy, prowadząc do utraty masy mięśniowej oraz gęstości kości [11]. Aby przeciwdziałać tym niekorzystnym

skutkom, na ISS wprowadzono zaawansowane urządzenia do ćwiczeń, które umożliwiają astronautom prowadzenie skutecznego treningu.

Pierwszym nowoczesnym urządzeniem treningowym na ISS był zestaw IRED (The Interim Resistance Exercise Device), zaprojektowany do ćwiczeń siłowych opartych na sprężystości. Jego wadą była niemożność pełnej symulacji grawitacji 1g, ponieważ brakowało bezwładności i stałej siły. Wykorzystano w nim podciśnienie w cylindrach z tłokami, co pozwalało na uzyskanie maksymalnego obciążenia do około 272 kg [12].

W latach 2009-2010 na ISS wprowadzono ARED (Advanced Resistive Exercise Device), nowoczesne urządzenie do ćwiczeń oporowych, które oferuje regulowane obciążenie do 272 kg. ARED jest bardziej wytrzymałe niż jego poprzednik IRED, a dzięki cylindrom próżniowym i systemowi koła zamachowego symuluje ćwiczenia z wolnymi ciężarami w warunkach ziemskiej grawitacji. Urządzenie dostosowuje się do indywidualnych potrzeb astronautów i umożliwia wybór ćwiczeń poprzez ekran dotykowy [13, 14].

Bieżnia z systemem izolacji i wibracji, znana jako TVIS (Treadmill with Vibration Isolation and Stabilization), to urządzenie, które umożliwia astronautom ćwiczenia aerobowe w warunkach mikrogravitacji. Posiada system redukcji drgań, co pozwala na symulację biegania zbliżoną do warunków ziemskich. Astronauci są przypinani do bieżni za pomocą uprząży, co kompensuje brak grawitacji. TVIS pomaga w utrzymaniu kondycji sercowo-naczyniowej oraz zapobiega utracie masy mięśniowej i kostnej podczas długotrwałych misji. Urządzenie to było używane do momentu wprowadzenia nowocześniejszych bieżni, takich jak T2 i COLBERT. Ćwiczenia na cykloergometrze lub bieżni z systemem izolacji i wibracji (TVIS) przyniosły ulgę w objawach u 85% astronautów, co było związane z samym ruchem podczas ćwiczeń lub kompresyjnym obciążeniem uprząży TVIS [15, 16].

Astronauci na ISS korzystają z różnych urządzeń treningowych, w tym bieżni (T2, COLBERT) oraz ergometrów rowerowych (CEVIS). ARED pozwala na trening wszystkich grup mięśniowych, co pomaga utrzymać masę mięśniową i kostną podczas długotrwałych misji kosmicznych. Bieżnia T2 symuluje 70% ciężaru ciała astronauty, a CEVIS, sterowany komputerowo, monitoruje parametry ćwiczeń, takie jak tętno i obciążenie [12, 17, 18]. Mimo intensywnych ćwiczeń astronauta mogą stracić do 15% masy mięśniowej podczas długich misji [19, 20], a bieżnia COLBERT, z prędkością od 4.8 do 20 km/h, pomaga w utrzymaniu zdrowia sercowo-naczyniowego i masy kostnej [17, 21, 22].

Cele przeciwdziałań w lotach kosmicznych obejmują minimalizację negatywnych skutków zdrowotnych i ryzyk zdrowotnych w dłuższej perspektywie, poprawę wydajności podczas lotu oraz optymalizację regeneracji po powrocie na Ziemię. Urazy w trakcie lotu mogą wpłynąć na zdolność do przeprowadzania spacerów kosmicznych (EVA) oraz ewakuacji z pojazdu. Specjalistyczny proces rehabilitacji po locie obejmuje trening elastyczności, kondycję sercowo-naczyniową, ćwiczenia oporowe oraz masaże [22]. Rehabilitacja po locie wiąże się z ograniczeniami w zakresie zginania kręgosłupa, ponieważ jest to uznawane za czynnik ryzyka wystąpienia przepukliny dyskowej po powrocie na Ziemię [23, 24].

Wnioski

Loty kosmiczne mają znaczący wpływ na zdrowie astronautów, zwłaszcza w kontekście układu sercowo-naczyniowego, mięśniowo-szkieletowego oraz ogólnej kondycji fizycznej.

W warunkach mikrogravitacji, organizm ludzki doświadcza wielu wyzwań, takich jak utrata masy kostnej i mięśniowej oraz problemy z równowagą i orientacją. Dlatego kluczowe jest wprowadzenie odpowiednich programów aktywności fizycznej, które mogą skutecznie przeciwdziałać tym negatywnym skutkom. Dzięki nowoczesnym urządzeniom treningowym, astronauta może utrzymać zdrowie i sprawność, co jest niezbędne do realizacji długotrwałych misji w przestrzeni kosmicznej oraz bezpiecznego powrotu na Ziemię. Przemyślane programy rehabilitacji po powrocie również odgrywają kluczową rolę w przywracaniu astronautów do pełnej sprawności.

Literatura

- [1] Sayed A.H., Hargens A.R., 2022, Cardiovascular Physiology and Fluid Shifts in Space, In: Michael A.P. et al. (eds) Spaceflight and the Central Nervous System, Springer
- [2] Barratt M.R., Baker E.S., Pool S.L.(eds), 2019, Principles of Clinical Medicine for Space Flight, Springer
- [3] Golding J. F., 2016, Motion sickness: Handbook of clinical neurology, 137, 371-390
- [4] Seedhouse E., 2011, Trailblazing Medicine. Sustaining Explorers During Interplanetary Missions, Springer
- [5] Kahn J., Liverman C.T., McCoy M.A., 2014, Health Standards for Long Duration and Exploration Spaceflight, The National Academies Press, Washington, D.C.
- [6] Schneider S., 2016, Exercise in Space, A Holistic Approach for the Benefit of Human Health on Earth, Springer
- [7] Clarke A.H. 2017, Vestibulo-Oculomotor Research in Space, Springer

- [8] Hilbig R. et al., 2017, *Sensory motor and Behavioral Research in Space*, Springer
- [9] Romero E., Francisco D., 2020, The NASA human system risk mitigation process for space exploration, *Acta Astronaut.* 175, 606–615
- [10] Convertino V. A., 2005, Consequences of cardiovascular adaptation to spaceflight: implications for the use of pharmacological countermeasures, *Gravit. Space. Biol. Bull.*, 18, 59–69
- [11] Sibonga J. D. et al., 2024, Human Research Program, Risk of bone fracture due to spaceflight-induced changes to bone
- [12] Thornton W., Bonato F., 2017, *The Human Body and Weightlessness, Operational Effects, Problems and Countermeasures*, Springer Nature
- [13] Evidence Report: Risk of Impaired Performance Due to Reduced Muscle Mass, Strength, and Endurance Human Research Program Human Health Countermeasures Element Approved for Public Release: March 9, 2015, NASA Johnson Space Center Houston, Texas
- [14] Fregly B.J, Fregly C.D, Kim B.T., 2015, Computational Prediction of Muscle Moments During ARED Squat Exercise on the International Space Station, *Journal of Biomechanical Engineering*, 137
- [15] Kerstman E. L. et al., 2012, Space adaptation back pain: a retrospective study, *Aviat. Space Environ. Med.* 83, 2–7
- [16] O’Conor D. K. et al., 2020, Crew-friendly countermeasures against musculoskeletal injuries in aviation and spaceflight, *Frontiers in physiology*, 11, 837
- [17] <https://nasa.tumblr.com/post/136706596374/exercising-in-space> [dostęp: 13.11.2024]
- [18] Lee S.M.C. et al., 2019, Physical Performance, Countermeasures, and Postflight Reconditioning, In: Barratt M.R. et al. (eds), *Principles of Clinical Medicine for Space Flight*, Springer
- [19] English K. et al., 2008, (January 1) Reliability of Strength Testing using the Advanced Resistive Exercise Device and Free Weights, NASA Technical Report
- [20] LeBlanc A. et al., 2000, Bone mineral and lean tissue loss after long duration space flight *J. Musculoskelet, Neuronal Interact.*, 157-160
- [21] Korth D.W., 2015, Exercise countermeasure hardware evolution on ISS: the first decade, *Aerosp. Med. Hum. Perform.*, 86(12), A7-13
- [22] Żyłka M., Żyłka W., Klukowski K., 2023, Technical Solutions Enabling the Physical Training of Astronauts During Long-Term Stays at Space Stations, *Advances in Science and Technology, Research Journal*, 17(4)
- [23] Scheuring R. A., 2016, *Sports Injuries and Space Injuries: Prevention and Treatment*, Houston, TX: NASA EPDC
- [24] Belavy D. L. et al., 2016, Disc herniations in astronauts: What causes them, and what does it tell us about herniation on earth?, *European Spine J.*, 25, 144



Marta Żyłka



Wojciech Żyłka

Transfer technologii kosmicznych do ziemskich zastosowań

Natalia Marszałek, Marta Żyłka

Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa,
Katedra Inżynierii Lotniczej i Kosmicznej

Wstęp

Pierwszym znaczącym wydarzeniem, które zapoczątkowało ludzką aktywność w kosmosie, było wystrzelenie sztucznego satelity *Sputnik 1* w 1957 roku. Wydarzenie to rozpoczęło erę bezzałogowych lotów kosmicznych, a kosmiczny wyścig pomiędzy dwoma mocarstwami – Związkiem Radzieckim i Stanami Zjednoczonymi, napędził rozwój sektora kosmicznego, co w krótkim czasie zaowocowało załogowymi lotami kosmicznymi oraz lądowaniem człowieka na Księżycu w 1969 roku. Ten historyczny moment rozpoczął nową erę w dziedzinie badań kosmicznych. Realizowane przez człowieka programy kosmiczne, nie wszystkie zakończone sukcesem, przyczyniły się do osiągnięcia obecnego poziomu rozwoju zarówno nauki jak i techniki, co umożliwia optymistyczne spoglądanie w przyszłość i planowanie lotów księżycowych jak i międzyplanetarnych.

Pierwsze sztuczne satelity, zaprojektowane do badania środowiska kosmicznego, wniosły kluczową wiedzę i możliwości rozwoju obszarów takich jak telekomunikacja satelitarna, pozycjonowanie globalne czy prognozowanie pogody. Wiedza jaką człowiek zdobył dzięki eksploracji kosmosu, wywiera niezwykle istotny wpływ na każdą sferę życia na Ziemi i przekłada się na wiele dziedzin, poczynwszy od technologii aż po medycynę.

Odkrywanie kosmosu jest przedsięwzięciem globalnym a opracowywane przez naukowe konsorcja rozwiązania niosą za sobą nowe możliwości rozwiązywania problemów. Już od wczesnych dni lotów kosmicznych, eksploracja kosmosu skutecznie napędzała rozwój nauki oraz technologii, np.

w zakresie nowych materiałów, systemów napędowych, systemów komunikacji. Wysokie koszty startów rakiet nośnych, przyczyniły się do opracowania nowych lżejszych konstrukcji i materiałów oraz mniejszych komputerów pokładowych o wysokiej wydajności i niezawodności.

Istotną rolę w szeroko rozumianej eksploracji kosmosu bez wątpienia odgrywa współpraca międzynarodowa. Przykładem może być Międzynarodowa Stacja Kosmiczna (ISS – *International Space Station*). ISS wspiera badania z zakresu nauk przyrodniczych oraz fizycznych, a także rozwija badania i technologie w celu rozwiązania problemów związanych z długotrwałym przebywaniem w środowisku pozbawionym grawitacji, które znajdują wiele zastosowań na Ziemi.

Transfer technologii kosmicznych

Technologie kosmiczne znajdują zastosowanie w różnych dziedzinach, takich jak medycyna, energetyka, transport, a nawet rolnictwo. NASA (z ang. *National Aeronautics and Space Administration*), ESA (z ang. *European Space Agency*) oraz inne światowe agencje kosmiczne realizują programy transferu technologii, które pomagają przenieść innowacyjne rozwiązania z „kosmosu na Ziemię”, czyli na rynek komercyjny. Badania kosmiczne (rozwój inżynierii kosmicznej) koncentrują się na rozwijaniu technologii oraz procesów do poziomu, który zapewni prawidłowe funkcjonowanie w wymagającym środowisku jakim jest przestrzeń kosmiczna. Do ekstremalnych warunków tam panujących, należy zaliczyć znaczne gradienty temperatury, próżnię, zanieczyszczenia pyłem kosmicznym czy promieniowanie kosmiczne. Dodatkowo, instrumenty pracujące w przestrzeni kosmicznej narażone są na: kolizję z kosmicznymi śmieciami, silne burze magnetyczne czy strumienie wiatru słonecznego [1]. Wspólną cechą, jaka charakteryzuje technologie rozwijane dla przemysłu kosmicznego, jest przede wszystkim niska masa, duża wytrzymałość, niezawodność, odporność na temperaturę, promieniowanie oraz korozję [1].

ESA posiada Biuro Programu Transferu Technologii (z ang. *TTPO – Technology Transfer Programme Office*) założone w 1990 roku, którego zadaniem jest ukazanie korzyści płynących z Europejskiego Programu Kosmicznego, w celu ułatwienia transferu technologii oraz komercjalizację technologii, opracowanych pierwotnie na potrzeby realizowanych programów kosmicznych [2]. ESA wyszczególnia kilka kategorii, na które można

podzielić technologie kosmiczne. Są to m.in.: materiały, sprzęt i oprogramowanie, automatyka i robotyka, elektronika, czujniki, optyka, urządzenia zasilające i energetyczne, komunikacja [2].

W całej Europie powstają Centra Inkubacji Przedsiębiorczości ESA BIC (ESA Business Incubation Centres) oraz sieć brokerów technologicznych ESA. W Polsce ESA BIC posiada dwa centra inkubacji, jedno z siedzibą w Warszawie, drugie w Rzeszowie. W ramach trwania programu ESA BIC Poland planowane jest wsparcie 35 start-upów [3].

Niemiecka Agencja Kosmiczna (DLR – z niem. *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*) również wnosi istotny wkład w proces transferu technologii, poprzez promowanie transferu wiedzy i technologii jak również poprzez współpracę z przemysłem. Partnerzy rynkowi wykorzystują wiedzę i know-how wypracowaną przez DLR, dzięki czemu powstają nowe produkty, projekty i usługi [4].

NASA udostępnia na swojej stronie [5] portfolio patentów z kategorii takich jak napęd, lotnictwo, robotyka, medycyna i biomedycyna, układy mechaniczne, materiały i powłoki, instrumentacja, czujniki, wytwarzanie energii, oprogramowanie i inne.

Główną ideą łączącą wszystkie programy transferu technologii, realizowane przez światowe agencje kosmiczne, jest przeniesienie zaawansowanych technologii, opracowanych pierwotnie dla potrzeb eksploracji kosmosu, do zastosowań cywilnych i komercyjnych. Niektóre podmioty, już na etapie rozwoju danej technologii, analizują jakie może ona wnieść korzyści do życia codziennego.

Przykłady transferu technologii

Transfer technologii z przestrzeni kosmicznej na Ziemię przynosi szereg istotnych korzyści w różnych dziedzinach życia. Takimi przykładami są np.: ulepszone panele słoneczne, implantowane (wszczepialne) monitory serca, terapia nowotworowa, urządzenia bezprzewodowe, materiały stosowane w budowie współczesnych silników turbinowych, kamery używane we współczesnych telefonach komórkowych, kompaktowe systemy oczyszczania wody, globalne systemy poszukiwawczo-ratownicze czy technologie biomedyczne [6]. Technologie opracowane na potrzeby eksploracji kosmosu, np. egzoskielety opracowane na bazie kosmicznych systemów robotycznych, wspierają osoby z niepełnosprawnościami, czy innowacyjne struktury pneumatyczne w budownictwie, mają ogromny potencjał w zastosowaniach ziemskich.

Wpływ transferu technologii na rozwój medycyny

Warunki panujące w przestrzeni kosmicznej, np. stan nieważkości, powodują że człowiek musi się zmierzyć z szeregiem nowych wyzwań. Doprowadziło to do postępu technologicznego i naukowego w różnych dziedzinach, w tym również w medycynie. Badania prowadzone na ISS skupiają się na fizjologicznych i biologicznych skutkach przebywania człowieka w przestrzeni kosmicznej, takich jak utrata masy mięśniowej i kostnej, zmniejszona odporność, wolniejsze gojenie się ran i gorsza sprawność poznawcza [6]. Badania te pomagają również w zapewnieniu lepszej opieki zdrowotnej społeczeństwu na Ziemi.

Czujniki i instrumenty opracowane na potrzeby badań odległych zakątków Wszechświata mogą być dostosowane również do potrzeb współczesnej medycyny, przykładowo technologie wykrywania i obrazowania wykorzystywane do diagnozowania chorób, takie jak system wczesnego wykrywania raka skóry MELDOQ (*Melanoma Recognition, Documentation and Quality Assurance System*) [7]. System ten zawiera algorytm SIM (*Scaling Index Method*), który pierwotnie stosowany był do wykrywania słabych źródeł promieniowania rentgenowskiego i pomógł przeanalizować ich strukturę w sposób ilościowy (np. sygnały rentgenowskie pochodzące z obiektów takich jak supernowe czy czarne dziury). System do wykrywania nowotworu skóry, wykorzystuje komputer do precyzyjnej analizy powiększonego fragmentu skóry i potrafi dostrzec nawet niewielkie różnice w kolorze, dzięki czemu możliwe jest wykrycie nieregularnego wzrostu komórek, związanego ze złośliwym nowotworem skóry – czerniakiem [7].

Stopy z pamięcią kształtu (SMA – *shape memory alloy*) posiadają zdolność do zapamiętywania swojego kształtu, a pod wpływem temperatury powracają do swojej pierwotnej postaci. Program kosmiczny opracował SMA do zastosowania jako lekkie siłowniki sterowane temperaturą. Te unikalne cechy sprawiły, że SMA znalazło zastosowanie również w medycynie, w szczególności w ortopedii, gdzie wspiera proces gojenia się złamanych kości. Materiał ten stosuje się również w sprężynach ortodontycznych, a dzięki swoim właściwościom pozwala on na precyzyjne przykładanie do zębów sił o relatywnie niedużych wartościach, które posiadają stałą w czasie wartość. Takie podejście zapewnia lepsze rezultaty w porównaniu z tradycyjnymi metodami, pozwalając na 2.5-krotnie szybsze przesuwanie zębów do pożądaných pozycji [7].

Miniaturyzacja instrumentów pozwala na wykonywanie wielu badań i drobnych zabiegów bez konieczności otwierania pacjenta. Zastosowanie

endoskopów przynosi znaczne korzyści w diagnozowaniu pacjentów, wymaga jednak stosowania technik dokładnego obrazowania. Dzięki programowi transferu technologii ESA, niemiecka firma produkująca endoskopy medyczne i przemysłowe, zastosowała w swoich produktach powłokę „*Plasmocer*”, która była używana w kamerach zamontowanych na sztucznych satelitach należących do ESA oraz Rosji. Badania wykazały, że powłoka ta poprawiła jakość optyczną endoskopów, redukując rozpraszanie światła o ok. 20% [7].

Pneumatyka w transferze technologii kosmicznych

Transfer technologii z kosmosu na Ziemię stanowi fundament innowacyjnych rozwiązań w wielu branżach, w tym także w pneumatyce. Program transferu technologii ma ogromny potencjał, szczególnie w budownictwie mieszkaniowym. Transfer technologii kosmicznych do zastosowań ziemskich, zwłaszcza w kontekście systemów pneumatycznych, może przyczynić się do rozwoju innowacyjnych rozwiązań w sektorze budownictwa i inżynierii, oferując oszczędności kosztów, zwiększoną trwałość oraz skrócony czas realizacji projektów [8]. Rozwijane są i badane koncepcje pneumatycznych, automatycznie rozkładających się struktur kosmicznych [9,10]. Zwiększające się zainteresowanie wśród społeczności zajmującej się projektowaniem systemów kosmicznych wynika z ich potencjału do tworzenia ekonomicznych, lekkich i łatwych w transporcie systemów, które jednocześnie oferują wysoką niezawodność i możliwość składowania w bardzo kompaktowej formie. Na przestrzeni lat przeprowadzono wiele badań i rozwinięto różne technologie w tej dziedzinie [11]. Obecnie, struktury z usztywnionych pneumatycznie kompozytów (RPC – *Rigidified Pneumatic Composites*) znajdują się na czele postępów technologicznych. Badania dotyczące technologii RPC koncentrują się głównie na projektowaniu struktur kosmicznych [12,13]. Technologie, takie jak struktury RPC, które są lekkie i wytrzymałe, mogą znacząco przyspieszyć budowę domów, obniżając koszty i zwiększając efektywność. Po rozłożeniu pneumatycznym, RPC utwardzają się, tworząc stabilne konstrukcje, które mogą być stosowane w różnych formach, takich jak panele, kolumny czy kratownice. Dzięki ich trwałości, niskim kosztom produkcji i możliwości szybkiej budowy, technologie te mogą zrewolucjonizować budownictwo mieszkaniowe, oferując zrównoważone i ekonomiczne rozwiązania [8].

Pneumatyczne struktury membranowe, dzięki swojej elastyczności i kompaktowemu rozmiarowi, znalazły szerokie zastosowanie zarówno w przestrzeni kosmicznej, jak i na Ziemi. Umożliwiają one szybkie i efektywne tworzenie dużych osłon, co jest szczególnie istotne w przypadku zdalnych i nieprzyjaznych lokalizacji, gdzie czas montażu jest kluczowy, na przykład po katastrofach naturalnych. Tego typu elementy mają potencjał zarówno w długoterminowych misjach kosmicznych, jak i jako schronienia dla ofiar katastrof na ziemi. Niektóre elementy statków kosmicznych, przykładowo tunele przejściowe czy dodatkowe moduły, były już wykonane w technologii nadmuchiwanej. Nadmuchiwane struktury są wykorzystywane przez wojsko jako namioty, hangary czy schrony [14].

Technologie filtracji wody

Systemy opracowane przez NASA do oczyszczania wody na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej znalazły zastosowanie w miejscach dotkniętych klęskami żywiołowymi oraz w krajach rozwijających się, poprawiając dostęp do czystej wody pitnej. Przykładem są rozwiązania pierwotnie zaprojektowane do podtrzymywania życia w warunkach mikrogravitacji. Technologie te są wykorzystywane w systemach filtracji wody, separacji gazów oraz uzdatniania wody, co przekłada się na efektywniejsze zarządzanie zasobami wodnymi na naszej planecie. Współczesne badania pokazują, że osiągnięcia kosmiczne, na przykład systemy odzysku wody, nie tylko wspierają eksplorację kosmosu, ale także przyczyniają się do rozwoju zrównoważonych rozwiązań w codziennym życiu. Transfer tych technologii podkreśla znaczenie współpracy międzysektorowej oraz innowacji w rozwiązywaniu globalnych wyzwań [15].

Materiały przyszłości

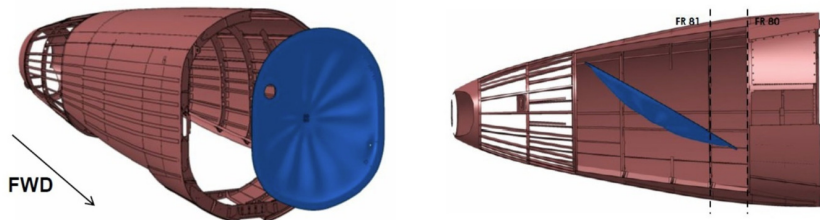
Materiały inteligentne, na przykład polimery z pamięcią kształtu (SMP – *shape memory polymer*) i kompozyty (SMPC – *shape memory polymer composite*) opracowane do zastosowań w przestrzeni kosmicznej są wykorzystywane w medycynie, robotyce i elektronice, gdzie ich unikalne właściwości pozwalają na tworzenie samodzielnych struktur i urządzeń [16].

Stosowane w przemyśle techniki produkcji, przykładowo druk 3D i 4D, które pierwotnie rozwijano dla przemysłu kosmicznego, znajdują zastosowanie w wytwarzaniu skomplikowanych komponentów w motoryzacji,

budownictwie oraz w branży lotniczej, co przyczynia się do zmniejszenia kosztów oraz ilości powstających odpadów [17-24].

Obiecującym kierunkiem jest również transfer technologii kosmicznych do sektora lotniczego. Eksploracja kosmosu, choć wydaje się tematem odległym, jest źródłem niezwykle zaawansowanych rozwiązań, które znajdują również zastosowanie w konstrukcjach współczesnych samolotów. Ekstremalne warunki panujące w przestrzeni kosmicznej, wymagają opracowania materiałów i technologii o wysokiej wytrzymałości, odporności na znaczne gradienty temperatury oraz o niskiej masie. Cechy te sprawiają, że są one idealne do zastosowania w konstrukcji samolotów, gdzie liczy się każdy gram masy oraz kwestie bezpieczeństwa.

Za przykład może posłużyć zaadaptowana wersja kompozytowej przegrody, zabezpieczającej sztuczne satelity wynoszone przez rakiety nośne Ariane 5, która została przetestowana na pokładzie samolotów należących do Airbus Defence&Space (rys.1). Przegroda zamontowana w przedziale ogonowym, pełniłaby funkcję zapory ogniowej chroniącej pasażerów w przypadku zapalenia się silnika pomocniczego APU (ang. *Auxiliary Power Unit*). Transfer tego rozwiązania przynosi wiele korzyści, wśród których wymienia się [25, 26]:



RYСУNEK 1. Montaż przegrody w kadłubie samolotu Airbus [25]

- uproszczenie procesu montażu (zastąpienie konstrukcji wieloelementowej jedną częścią),
- 60% redukcję kosztów pracy montażowej dzięki szybszemu i płynniejszemu procesowi montażu,
- redukcję masy o 30% w porównaniu do bazowego rozwiązania w postaci tytanowej ściany ogniowej samolotu,
- uproszczenie łańcucha dostaw,
- skrócenie czasu produkcji, szybszy proces montażowy samolotów pozwala Airbusowi realizować więcej zamówień.

Przewiduje się, że wdrożenie tego rozwiązania w samolotach firmy Airbus pozwoli firmie zaoszczędzić kilka milionów Euro.

Podsumowanie

Transfer technologii z przestrzeni kosmicznej na Ziemię przynosi wymierne korzyści w wielu dziedzinach życia. Programy transferu technologii ułatwiają wprowadzenie nowatorskich rozwiązań na rynek komercyjny, co przyczynia się do poprawy jakości życia oraz efektywności przemysłowej. Eksploracja kosmosu odgrywa kluczową rolę w rozwoju nauki i technologii. W miarę jak rządy i agencje współpracują przy realizacji złożonych misji kosmicznych, wspólnie osiągają postęp, który przekłada się na rozwiązania dla globalnych wyzwań, np. takich jak zmiany klimatyczne czy kryzysy humanitarne.

W kontekście wyzwań globalnych, takich jak dostęp do czystej wody, energetyka czy zdrowie publiczne, innowacje oparte na technologiach kosmicznych mają potencjał do zmiany oblicza wielu branż oraz poprawy jakości życia ludzi na całym świecie.

Jednym z najbardziej ambitnych wyzwań do którego zmierza ludzkość, są niewątpliwie misje załogowe na Księżyc oraz Marsa. Zakłada się, że wykorzystanie uzupełniających się umiejętności zarówno ludzi jak i systemów robotycznych, pozwoli ludzkości osiągnąć zamierzone cele. Najwcześniejsze systemy kosmiczne opierały się na sprawdzonych technologiach rozwijanych przez człowieka i wykorzystywanych w codziennych zastosowaniach. Bez wątpienia, programy kosmiczne przyczyniły się do znacznego rozwoju tych technologii. Przemysł kosmiczny z pewnością pobudził rozwój branży komputerowej, czego skutkiem jest produkcja komputerów o niewielkich rozmiarach, zdolnych do szybkiego przetwarzania dużej ilości danych [7].

Nie da się jednoznacznie stwierdzić kierunku transferu technologii oraz ocenić rezultatów jakie dana technologia wniesie w codzienne życie. Lista przykładów opisujących jak transfer technologii kosmicznych wpływa na nasze codzienne życie, jest bardzo długa. Pamiętać jednak należy, że transfer technologii z sektora kosmicznego jest procesem złożonym i niesie za sobą szereg wyzwań. Na początkowym etapie konieczne jest szczegółowe studium wykonalności przeniesienia technologii z sektora kosmicznego do innych aplikacji, dostosowanie do odpowiednich standardów i dalszy rozwój transferowanej technologii. Pomimo że działalność badawczo-rozwojowa w sektorze kosmicznym wykazuje szeroki potencjał aplikacyjny, należy mieć na uwadze, że wyniki tych badań w wielu przypadkach są jeszcze dalekie od komercjalizacji i wymagają dalszych prac badawczo-rozwojowych w celu dostosowania produktu do potrzeb końcowego odbiorcy.

Literatura

- [1] Wachowicz M., Bury M., 2017, Space technology transfer problems in the context of protecting the space heritage, *Space Policy*, 42, 66-69
- [2] https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Technology_Business_Opportunities/Technology_Transfer_Programme
- [3] <https://esabic.pl/about/>
- [4] <https://www.dlr.de/en/research-and-transfer/innovation-and-transfer>
- [5] <https://technology.nasa.gov/patents>
- [6] Benefits stemming from space exploration, September 2013, [benefits-stemming-from-space-exploration-2013-tagged.pdf](#)
- [7] Down to Earth: Everyday Uses for European Space Technology, European Space Agency, 2001, www.esa.int/esapub/br/br175/br175.pdf
- [8] Van Dessel S., 2001, Rigidified Pneumatic Composites: Use Of Space Technologies To Build The Next Generation Of American Homes
- [9] Freeland R. et al., 1993, Validation of a Unique Concept for a Low-Cost, Lightweight Space-Deployable Antenna Structure, presented at the 44th Congress of the International Astronautical Federation, Graz, Austria
- [10] Jenkins C., Marken D., 1998, Surface Precision of Inflatable Membrane, *Journal of Solar Engineering* 120, 298-305
- [11] Cassapakis C., Thomas M., 1995, Inflatable Structures Technology Development Overview, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Paper No. AIAA 95-3738
- [12] Bernasconi M., 1990, Inflatable, Space-Rigidized Support Structures, *Acta Astronautica* 22, 145-153
- [13] Cadogan C., Mikulas M., 1998, Inflatable Space Structures: A new paradigm for space structure design, *Proceedings of the 49th International Astronautical Congress* Sept 28-Oct 2, Melbourne, Australia
- [14] Bell L., 2008, Pneumatic membrane structures for space and terrestrial applications. In *Earth & Space 2008: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*, 1-8
- [15] Bernardo P. et al., 2021, Membrane technologies for space engineering, *Journal of Membrane Science*, 626, 119177
- [16] Patadiya J. Et al., 2021, Additive manufacturing of shape memory polymer composites for futuristic technology, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(44), 15885-15912
- [17] Korde J. M., Kandasubramanian B., 2019, Fundamentals and Effects of Biomimicking Stimuli-Responsive Polymers for Engineering Functions. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 58(23), 9709-9757
- [18] Padole M. et al., 2021, Three-Dimensional Printing of Molluscan Shell Inspired Architectures via Fused Deposition Modeling. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 28, 46356
- [19] Jayalakshmi C. G. et al., 2020, High Temperature Composite Materials for Electromagnetic Applications through a Cost Effective Manufacturing Process; Resin Film Infusion, *Mater. Today Proc.*, 33, 2217-2222
- [20] Yadav R. et al., 2018, Biomimicking of Hierarchical Molluscan Shell Structure Via Layer by Layer 3D Printing. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 57(32), 10832-10840
- [21] Goh G. D. et al., 2017, Additive Manufacturing in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): Challenges and Potential, *Aerosp. Sci. Technol.* 63, 140-151

- [22] Dunham, S. et al., 2018, Applications of 3D Printing. In 3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine; Academic Press, 61-78
- [23] Jadhav V. D. et al., 2021, Polycarbonate Nanocomposites for High Impact Applications. In Handbook of Consumer Nanoproducts; Springer, 1-25
- [24] Nayana V., Balasubramanian K., 2020, Advanced Polymeric Composites via Commingling for Critical Engineering Applications, Polym. Test., 91 (March), 106774
- [25] https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Ariane_5_bulkhead_design_assessed_for_Airbus_airliners
- [26] <https://space-economy.esa.int/article/122/esa-technology-transfer-success-story-using-space-heritage-to-enhance-next-generation-aircraft>

10 lat warsztatów rakietowych w Rzepienniku

Agata Kołodziejczyk¹, Kamila Niedźwiedź², Bogdan Wszolek³

¹Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

²Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

³Obserwatorium Astronomiczne Królowej Jadwigi w Rzepienniku Biskupim

„Profesor Kordylewski był niezłomny, nie wątpił w powodzenie, a w każdym razie nie ujawniał żadnych wątpliwości, chociaż znane mu były wszystkie realia. W tym pamiętnym dniu 10 października 1958 roku jechał z nami na Pustynię Błędowską z promienną twarzą. Podjął się prowadzenia obserwacji na jednym z punktów pomiarowych. Czy to nie jego wiara i entuzjazm sprawiły, że ziściła się nam szansa owych 35%, że próba się powiodła?”

Jacek Walczewski w swoim artykule „Docent Kordylewski i fenomen entuzjazmu” [1]

Wstęp

W 1956 roku doc. Kazimierz Kordylewski założył Krakowski Oddział Polskiego Towarzystwa Astronautycznego (PTA). Jedną z sekcji Oddziału była poświęcona rakietom. Kordylewski miał znajomych w Niemczech, którzy udostępniłi mu unikalne materiały dotyczące technik rakietowych. Wnikliwe studium tych materiałów przez członków Sekcji Rakietowej (głównie inżynierów z AGH) zaowocowało pierwszymi eksperymentami z silnikami rakietowymi, pod nadzorem bardzo wtedy młodego kierownika Sekcji, Jacka Walczewskiego. Zaplecza eksperymentalnego i mechanicznego dla budowy ракет dostarczył Kazimierz Kordylewski, który kierował Zakładem Aparatów Naukowych Narodowego Instytutu Astronomicznego (w 1951 roku przejętego przez Uniwersytet Jagielloński). Krakowskie rakietnictwo wyrastało z pasji ludzi zawodowo mocno zakotwiczonych w najlepszych krakowskich uczelniach wyższych, UJ i AGH. Kordylewski marzył, żeby polskie rakiety latały w kosmos, Walczewski zaprzęgał je do badań atmosfery. Rakiety *Meteor* wzlatywały na wysokość około 100 km.

Na początku lat 70-tych eksperymenty rakietowe w grupie Walczewskiego zamarły. Walczewski miał wtedy czterdzieści lat. Kilkunastoletni

zryw raketowy w Krakowie sięgnął maksimum swoich możliwości. Roman-tyka jednak pozostała i młodzi krakowscy miłośnicy raketnictwa przez de-kady eksperymentowali pokątnie. Te eksperymenty, bez stosownego prze-wodnictwa profesjonalnego, doprowadziły do tragedii. Młody astronom z UJ, dr Tomasz Kobak, przypłacił życiem swoje raketowe pasje w 2004 roku.



Pionierzy raketnictwa w Małopolsce. Z lewej Kazimierz Kordylewski (1903-1981), z prawej Jacek Walczewski (1931-2013).



Tomasz Kobak (1973 – 2004).

W roku 2010 zawiązało się Polskie Towarzystwo Rakietowe (PTR), które jest wiodącym kontynuatorem wcześniejszych krakowskich tradycji raketowych. W roku 2014 w Akademii Górniczo Hutniczej powstało stu-denckie koło naukowe AGH Space Systems, w którym wyodrębniono sekcję raketową. Wspólnymi siłami PTR i AGH Space Systems małopolskie raketnictwo rozwija się i ma ambicje wnet prześcignąć sukcesy Walczewskiego.

W roku 2014 temat polskiego raketnictwa zawitał również w Obser-watorium Astronomicznym Królowej Jadwigi w Rzepienniku Biskupim

(OAKJ). 2 sierpnia 2014 roku zorganizowano tam pierwsze sympozjum rakietowe, połączone z warsztatami i pokazami rakietowymi [2]. Warsztaty rakietowe to dość nietypowa forma edukacji, mało powszechna, wręcz ekskluzywna. Chociaż jest to modelarstwo, to jednak uwzględnia elementy pirotechniczne i stąd jest skrajnie niebezpieczne. Warsztaty rakietowe w Rzepienniku stały się unikalne w skali świata pod względem poziomu zaawansowania. Należą do najdłużej cyklicznie organizowanych tego typu aktywności. Od 2014 roku szkoli się w Rzepienniku rocznie kilku/kilkunastu rakietowców. Warsztaty organizowane są cyklicznie w sierpniu, w okresie aktywności Perseidów. Tak się złożyło, że sierpniowy termin przywołuje też pamięć o Tomku Kobaku, który zginął tragicznie podczas testowania silnika rakietowego właśnie w sierpniu.

Bibliotekę w OAKJ wyposażono w sporą ilość książek traktujących o rakietach. Publikacje obejmują tak zachodnie jak i wschodnie osiągnięcia w zakresie rakiet. Na miejscu mogą z nich korzystać wszyscy zainteresowani technikami rakietowymi, w tym studenci, instruktorzy i ambitni uczestnicy warsztatów. Zapewne niebawem będą w Rzepienniku nabywać potrzebną wiedzę i doświadczenie również studenci podejmujący problematykę rakietową w ramach swoich prac dyplomowych. Odnotowano już jeden przypadek tego rodzaju: pchor Artur Kłosiński z Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, obronił z wyróżnieniem swoją pracę dyplomową, wykonaną w oparciu o warsztatowe doświadczenia uzyskane w Rzepienniku.

Zanim ruszyły warsztaty

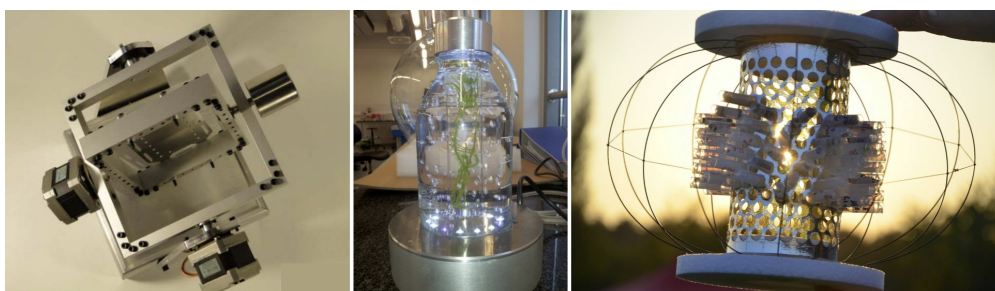
Agata Kołodziejczyk z AN nawiązała pierwszy kontakt z PTR w listopadzie 2012 roku w Warszawie, podczas konferencji *SpaceUP Poland*. Okazało się, że wielu członków założonego w lutym 2010 roku PTR pochodzi z Krakowa. Nic więc dziwnego, że tuż po konferencji w Warszawie podjęto krakowskie spotkania, które odbywały się w warsztacie firmy *Aerolife* Kacpra Zielińskiego w Nowej Hucie. Wspólnie obmyślano tam rozwiązania na potrzeby eksperymentów planowanych przez Agatę Kołodziejczyk: wirówkę RPM (ang. Random Positioning Machine) do symulacji mikrograwitacji, glonolampę do oczyszczania powietrza w szczelnych zamieszkałych pomieszczeniach oraz ultralekkie kapsuły do eksperymentów biologicznych w stratosferze.

Głównym wykonawcą prototypów był najmłodszy w grupie, Kacper Zieliński. Jego talent i młodzieńcza pasja do tworzenia niestandardowych

konstrukcji zachwycali od początku. Wszystko co wychodziło z jego rąk, po prostu działało. W sprytnych i niebanalnych rozwiązaniach pomagali mu dr Adam Matusiewicz (chemik), późniejszy Prezes PTR, oraz Andrzej Chwastek, najstarszy w grupie, specjalista naukowo-techniczny wyrobów chemicznych. W latach późniejszych dołączyli Bartosz Moczala i Wojciech Deszczyński. Rolą Agaty Kołodziejczyk, która wnet wstąpiła w szeregi PTR, było głównie zamawianie coraz wymyślniejszych urządzeń do realizacji projektów astrobiologicznych.



Agata Kołodziejczyk



Pierwsze wspólne projekty Agaty Kołodziejczyk z PTR: wirówka RPM, glonolampa i kapsuła stratosferyczna.

Koledzy w PTR byli nadzwyczaj wydajni przy rozwiązywaniu problemów. Ich olbrzymia kreatywność i pomysłowość sprawiały, że człowiek z przyjemnością wsłuchiwał się w tę grę myśli i słów przekuwanych we frezowanie, lutowanie i szlifowanie. Fizykę czuli z zamkniętymi oczyma. Na pytanie, jak to robią, odpowiadali najuczciwiej, jak umieli, że “potrzeba było wiele konstrukcji wysadzić w powietrze, aby nauczyć się robić je niezawodnie”. I chyba to jest największą tajemnicą i istotą konstrukcji rakiet.

To nie są zwykłe projekty techniczne. Kto raz sam zbuduje lotną rakietę od początku do końca, ten będzie zdolny zbudować właściwie wszystko!

Warsztaty raketowe w Rzepienniku

Skoro technika budowy modeli rakiet została opanowana przez Kacpra Zielińskiego do perfekcji, to dlaczego nie podzielić się jego doświadczeniem ze światem? I tak, na styku PTR, AN i OAKJ, uzgodniono, że dobrze byłoby zorganizować w Rzepienniku warsztaty raketowe dla nowicjuszy. Doszło do ważnego spotkania w OAKJ w dniach 2-3 sierpnia 2014 roku, mającego bardziej charakter konferencyjny i dyskusyjny, aniżeli typowo warsztatowy. Część warsztatowa obejmowała ćwiczenia z programem *Open Rocket* do modelowania rakiet. Wtedy z Rzepiennika poszybowały ku niebu dwie pierwsze rakiety, ale wykonane w Krakowie. Warsztaty z prawdziwego zdarzenia, podczas których uczestnicy wykonali pod nadzorem instruktorów lotne modele rakiet, odbyły się w OAKJ w 2015 roku [3]. Należy uznać, że były to pierwsze pełne warsztaty raketowe w Rzepienniku. Osiem perfekcyjnie wykonanych wtedy rakiet, bezbłędnie zachowało się w locie. Ekscytujące chwile prawdy, znaczące początek „ery kosmicznej w Rzepienniku”, miały miejsce 13 sierpnia 2015 roku. Warto nadmienić, że wcześniej, bo 7 i 8 czerwca 2015, podczas 3-dniowego otwarcia OAKJ, poszły w niebo modele rakiet przygotowane przez PTR na tę okoliczność. Jedna ciągnęła za sobą czerwoną wstążkę, symbol oficjalnego otwarcia OAKJ. Druga rakietka o nazwie Anihilacja, latająca na pułap ok. 300 m, została odpalona przez samego kosmonautę Mirosława Hermaszewskiego. Miał tylko nacisnąć czerwony guzik. Jak to po dłuższym namyśle zrobił, przeraził się autentycznie zaistniałym zjawiskiem! Kosmonauta przyglądał się startom rakiet z wielką powagą, jakby widział w nich przedsmak tego, co tu będzie się dziać w przyszłości. Przeprowadzono też wtedy mini warsztaty dla dzieci. Składane z gotowych elementów raketki tekturowe z dużym impetem szybowały w górę, dostarczając wiele radości dzieciom, ich opiekunom i pozostałym obserwatorom.

Warsztaty raketowe w Rzepienniku przybrały charakter wydarzenia cyklicznego, z rytmem rocznym. Z roku na rok stają się coraz ambitniejsze. Powstało już w Rzepienniku ponad 100 egzemplarzy lotnych modeli rakiet. Poza krajowymi uczestnikami, w warsztatach brali udział też studenci zagraniczni (m.in. z USA, Francji, Indii).

Przy rosnącym zainteresowaniu warsztatami doskonalili się w Rzepienniku konieczną dla ich prowadzenia infrastrukturę. Jeśli pierwszych osiem

warsztatów prowadzono na dość ograniczonych przestrzeniach OAKJ albo w zwykłej wiejskiej stodole, to już ostatnie dwa warsztaty odbyły się w nowym kompleksie, budowanym jako habitat dla przeprowadzania analogowych misji kosmicznych. Obiekt ma sporą powierzchnię mieszkalno socjalną oraz duże przewiewne (co ważne dla uniknięcia zatruć chemikaliami) pomieszczenie robocze. Przy dobrej pogodzie można też stanowiska robocze urządzać pod gołym niebem. Habitat jest zlokalizowany w odludnym miejscu, na rozległej, wolnej od zarośli polanie, z której można swobodnie odpalać modele rakiet, o ile nie latają one zbyt wysoko.

Sformalizowano też obsługę administracyjno finansową warsztatów. Prowadzi ją od pewnego czasu prywatna firma Agaty Kołodziejczyk i Mateusza Harasymczuka *Analog Astronaut Training Center* (AATC).

Opis procesu powstawania modelu lotnego rakiety

Ze względu na ograniczony czas trwania warsztatów (7-10 dni), ich uczestnicy nie wykonują wszystkiego samodzielnie. Niektóre, czasochłonne i wymagające najwyższej precyzji wykonania na stosownych obrabiarkach, elementy rakiet są wcześniej przygotowane przez instruktorów. Silniczki do modeli rakiet też są (jak dotąd) dostarczane przez organizatorów jako gotowe.



Studentka z Indii oraz studenci Wojskowej Akademii Technicznej podczas warsztatów raketowych w Rzepienniku.

Konstruowanie rakiety zaczyna się od wykonania materiału kompozytowego na stateczniki, który potrzebuje około dnia czasu na związanie. W tym celu nasącza się włókno węglowe żywicą epoksydową, dzięki czemu materiał uzyskuje dużą wytrzymałość mechaniczną i termiczną. Oczekując na gotowość kompozytu węglowego, dopracowuje się projekt rakiety w programie *Open Rocket*. Wprowadza się do niego wszystkie parametry

konstrukcji, począwszy od wymiarów głowicy, średnicy i długości korpusu, aż po kształt oraz wymiary stateczników. Wyszczególnia się zawarte w rakiecie przedziały elektroniki, przegrody, pierścienie centrujące, łączniki, system odzysku rakiety, rodzaj i parametry silnika oraz inne elementy, które zamierza się w niej umieścić. Po tym etapie przechodzi się do impregnacji kartonowych rur, mających tworzyć korpus rakiety, aby zmniejszyć wpływ czynników zewnętrznych na jej żywotność oraz polepszyć trwałość w zmiennych warunkach atmosferycznych.

Kolejnym elementem, wymagającym dłuższego, przynajmniej jednej godziny, czasu na utwardzenie, jest głowica. Do specjalnie przygotowanej przez Kacpra Zielińskiego silikonowej formy każdy z uczestników wlewa kolejno żywicę odlewniczą (poliuretanową) oraz pianę poliuretanową z dodatkiem mikrobalonów szklanych i wybranego barwnika. W oczekiwaniu na utwardzenie się materiałów zaczyna się sklejać konstrukcję na elektronikę, z wcześniej wyciętych elementów ze sklejk brzoźowej. Umieszcza się w niej układ wyzwalań spadochronu, odpowiedzialny za uruchomienie systemu odzysku. Urządzenie wykrywa zmianę kierunku pola magnetycznego, spowodowaną odwróceniem się rakiety w dół, po osiągnięciu apogeum lotu. Spadochron musi charakteryzować się dużą wytrzymałością. W tym celu wykorzystywano materiał typu *Rip-stop* z nylonu wzmocnionego włóknem ułożonym w kratkę, zapewniającym odporność na zrywanie. Z kawałka materiału wycina się kształt ośmiokąta foremnego. Przygotowuje się do niego odmierzone odcinki nylonowych linek nośnych. Czasę spadochronu obszywa się dookoła na maszynie do szycia, przyszywa się linki, następnie wykrawa się na środku materiału otwór zapewniający stabilizację opadania rakiety.

Po przetestowaniu spadochronu, składa się go i mocuje elastyczną liną do korpusu modelu. Na tym etapie prac, za pomocą żywicy, mocowany jest kosz z elektroniką do spodu głowicy. Kompozyt na stateczniki zyskuje gotowość do dalszej pracy. Z programu *Open Rocket* zbiera się określone wcześniej, na etapie projektowania, wymiary stateczników. Przenosi się ich kształt na płytki z karbonu, i następnie wycina stateczniki wyrzynarką. Wycięte elementy są cierpliwie szlifowane, dla nadania im jednakowego rozmiaru i kształtu. Tu trzeba odpowiednio zaokrąglić wszystkie ostre krawędzie stateczników dla uzyskania możliwie największej opływowości konstrukcji podczas lotu.

Następnie przykleja się do pierścieni centrujących kosz na silnik i gotowe stateczniki, po czym całość wkleja się w dolną część korpusu. Silikonem

zasklepia się wolne przestrzenie między statecznikami a korpusem rakiety. Upřednio zaimpregnowaną raketę szpachluje się, w celu uzyskania idealnie gładkiej powierzchni. Tak przygotowany korpus napyla się podkładem, który po wyschnięciu znów się szlifuje. Rakieta staje się gotowa do ostatecznej koloryzacji i ozdabiania, a dla uczestników warsztatów jest to kolejna możliwość zabłyśnięcia kreatywnością. Lakier nakłada się cienkimi warstwami napylaczem aż do pełnego pokrycia przygotowanej powierzchni. Korpus pozostawia się do całkowitego wyschnięcia, unikając bezpośredniej ekspozycji na światło słoneczne ze względu na ryzyko wykrzywienia konstrukcji w czasie wysychania. Pomalowane i wyschnięte korpusy są już gotowe na test – zarówno spadochronu jak i systemu jego wyzwiania. Sprawdza się czy czas spadochronu się rozkłada w odpowiedni sposób oraz czy obydwie części rakiety rozdzielają się prawidłowo podczas wybuchu mikro-ładunku, umieszczonego w górnej części korpusu.



Uczestnicy warsztatów na stanowisku startowym w Rzepienniku (2023) ze swoimi raketami w oczekiwaniu na „chwile prawdy”. Pierwsza z lewej – współautorka niniejszego artykułu (KN) ze swoją raketą.

Silniki mocuje się w dolnej części rakiety, w specjalnie posklejanym i poskręcanym śrubami koszu. Przez wiele lat PTR zdobywało silniki na warsztaty raketowe z tzw. odzysku od marynarki wojennej. Lataliśmy na *Ikarusach* i na *Kometach*, czyli silnikach służących do wystrzeliwania flar alarmowych na morzu. W czasie ostatnich dwóch lat silniki sprowadzane były z Ameryki.

W najbliższej przyszłości planuje się poszerzyć zakres warsztatów o wykonywanie przez uczestników własnych, bezpiecznych, silniczków raketowych, może wielokrotnego użytku. Miejsce przystosowane do testowania takich i innych silników raketowych czeka gotowe w OAKJ.

Instruktorzy warsztatów

Instruktorami warsztatów raketowych w Rzepienniku są od samego początku osoby z Polskiego Towarzystwa Rakietowego (PTR): Kacper Zieliński i Andrzej Chwastek. Ostatnio dołączył do nich Wojciech Deszczyński. Kacper Zieliński opracował projekt hamowni silników raketowych, który został zrealizowany w OAKJ już w listopadzie 2015 roku [3]. Hamownia powstała dla bezpiecznego przeprowadzania testów silników raketowych i znajduje narastające z roku na rok zastosowanie. W szczególności, studenci koła AGH Space Systems często tu testują swoje silniki.

Kacper Zieliński jest duszą warsztatów. To on tworzy kolejne projekty rakiet i planuje kolejne kroki ich wykonania. To jego głowa w tym, żeby było bezpiecznie i żeby wszystkie rakiety poleciały w górę i z sukcesem wylądowały. Na co dzień Kacper buduje profesjonalne rakiety w firmie *Space Forest* w Gdyni. W najbliższym czasie konstruowana przez niego (i jego kolegów) rakietka *PERUN* będzie wynosić ponad linię Karmana małe satelity dla Europejskiej Agencji Kosmicznej.



Kacper Zieliński z wykonanym przez siebie silnikiem raketowym oraz test silnika na hamowni w Rzepienniku.

Andrzej Chwastek, doświadczony chemik, wielki pasjonata wszystkiego co się tyczy rakiet. Najstarszy z instruktorów, ale duszę ma młodzieńczą, przez co łatwo łapie kontakt z otoczeniem i zdobywa wszechstronną sympatię. Jego rola na warsztatach jest wielofunkcyjna. Prezentuje wykłady o historii polskich rakiet, dzieli się wiedzą techniczną z zakresu chemii i materiałów, wspiera Kacpra na każdym kroku i pilnuje, żeby wszyscy

uczestnicy nadążali za przodującymi. Andrzej, wspólnie z Bartoszem Moczalą, wymyślił i wdrożył system elektroniczny, niezbędny do prawidłowego wyrzucenia spadochronu i bezpiecznego lądowania rakiety.



Andrzej Chwastek instruuje studentkę jak używać maszyny do szycia.

Wojciech Deszczyński, najmłodszy, prezentujący wiedzę, a przede wszystkim praktykę, z zakresu pirotechnicznego. Wojtek pojawił się pierwszy raz na warsztatach, lata temu, jako uczestnik. Potem zaczął przyjeżdżać dla towarzystwa, aż w końcu przyjął się jako opiekun/instruktor. Warsztaty z Wojtkiem oznaczały jedno: będzie głośno, gorąco i bardzo wybuchowo. Wojtek z zamiłowania do pirotechniki tworzył samodzielnie coraz mocniejsze rakiety, latające na wysokość 5 km i wyżej. Założył sklep z materiałami wybuchowymi i zaczął organizować oficjalnie profesjonalne pokazy pirotechniczne. Podczas warsztatów, z wielkim entuzjazmem prezentował swoje nowe petardy, fajerwerki i efekty specjalne.



Wojciech Deszczyński ze swoją rakieta oraz jedna z jego kontrolowanych detonacji w OAKJ.

W otulinie warsztatów

Podobnie jak Wojtek Deszczyński, wiele osób, uczestników wcześniejszych warsztatów w Rzepienniku, zaczęło przyjeżdżać na warsztaty już nie tylko dla ewentualnego zbudowania kolejnej rakiety, ale przede wszystkim aby spędzić kawałek rozśpiewanych wakacji pod gwiazdami, w niezwykle towarzyskim towarzystwie fantastów kosmicznych. Warsztaty raketowe to nie tylko dobra okazja do obcowania z inteligentnymi ludźmi i wspólnej praktyki, ale również okazja do przeprowadzania nieustających, i czasem bardzo poważnych, interdyscyplinarnych dysput naukowych, obracających się wokół istotnych obszarów dotyczących rakiet. Wszyscy chętnie dzielą się z pozostałymi swoją wiedzą i doświadczeniem. Ze śpiewem ptaków i koncertami świerszczy płyną ku niebu z rzepiennickiej krainy wyrafinowane terminy wyższej fizyki i matematyki. Daje się słyszeć nazwiska Newtona, Ciołkowskiego, Banacha, Bernoulliego. Korolowa, Głuszki, von Brauna i inne. Jakby z urzędu, Jacek Walczewski jest przywoływany najczęściej.

Andrzej Chwastek, jak na dobrego chemika przystało, jest doświadczonym piwowarem. Degustacja jego piwnych specjałów jest nieodłącznym elementem warsztatów. Czyniona zwykle wieczorem i przy ognisku integruje warsztatowców i wyzwala śpiew i prawdziwą radość. A mrugające gwiazdy, nad głowami wspólnie biesiadujących, niejednemu pomagają rozmarzyć się kosmicznie.

Uwagi końcowe

Zasadniczo, cztery podmioty są obecnie bezpośrednio zaangażowane w organizację warsztatów raketowych w Rzepienniku, a także innych aktywności szerzących tam wiedzę o rakietach. Są to: PTR, OAKJ, AN i AATC. Instruktorzy, jako osoby merytoryczne w temacie budowy modeli rakiet, są zrzeszeni w PTR. AN zajmuje się głównie dokumentowaniem warsztatów na łamach swoich periodyków – wcześniej w *Częstochowskim Kalendarzu Astronomicznym* [2-6], a potem w *Annales Astronomiae Novae* [7-12]. Organizuje też w OAKJ sesje raketowe. Temat organizacji warsztatów raketowych w AN obsługuje jednoosobowo dr Agata Kołodziejczyk. OAKJ przez wiele lat udzielało stosownej przestrzeni dla realizacji warsztatów i innych aktywności raketowych. Aktualnie jego rola sprowadza się głównie do udostępniania hamowni dla testowania silników. AATC bierze na siebie obsługę organizacyjną i finansową warsztatów.

Chętnych do odbycia warsztatów raketowych nigdy nie brakuje, a starty rakiet z każdym rokiem są coraz bardziej imponujące. Wielu uczestników, po zbudowaniu pierwszych konstrukcji w Rzepienniku, rozwija swoje pasje w sektorze kosmicznym. Wojciech Deszczyński, dla przykładu, zdobył licencję na loty powyżej 100 km nad Ziemię i wystrzelił w kosmos rakietę budowaną w międzynarodowym zespole w Stanach Zjednoczonych. W 2026 roku z terytorium Polski wystrzelona w kosmos rakietą PERUN zapoczątkuje historyczny okres dostępu naszego kraju do przestrzeni na orbicie bez zagranicznych pośredników. Takie plany i działania były niemożliwe w czasach przeszłych. Dlatego uczestnicy opuszczający warsztaty w Rzepienniku z cennym trofeum w postaci modelu własnoręcznie wykonanej rakiety, nie otrzymują dyplomu uczestnictwa, ale przepustkę do wstąpienia w szeregi PTR, zdobycia licencji na posiadanie silników raketowych i przede wszystkim zielone światło na starty górnolotnych marzeń.

Literatura

(wskazane pozycje książkowe [2-12] zawierają dokumentację o wszystkich odbytych do 2024 roku warsztatach raketowych w Rzepienniku)

- [1] Kazimierz Kordylewski jako człowiek i astronom, 2020, (B. Wszolek i A. Kuźmich ed.), Wydawnictwo AN, Kraków
- [2] Częstochowski Kalendarz Astronomiczny na rok 2015 (CKA15), (B. Wszolek i A. Kuźmich ed.), Wyd. AJD w Częstochowie
- [3] CKA16, (B. Wszolek i A. Kuźmich ed.), Wyd. AJD w Częstochowie
- [4] CKA17, (B. Wszolek i A. Kuźmich ed.), Wyd. AJD w Częstochowie
- [5] CKA18, (B. Wszolek i A. Kuźmich ed.), Wyd. AJD w Częstochowie
- [6] CKA19 (B. Wszolek i A. Kuźmich ed.), Wyd. AJD w Częstochowie
- [7] Annales Astronomiae Novae (AAN), (B. Wszolek i A. Kuźmich ed.), Wyd. AN, tom 1
- [8] AAN2, (B. Wszolek i A. Kuźmich ed.), Wyd. AN, tom 2
- [9] AAN3, (B. Wszolek i A. Kuźmich ed.), Wyd. AN, tom 3
- [10] AAN4, (B. Wszolek i A. Kuźmich ed.), Wyd. AN, tom 4
- [11] AAN5, (B. Wszolek i A. Kuźmich ed.), Wyd. AN, tom 5
- [12] AAN6, (B. Wszolek i A. Kuźmich ed.), Wyd. AN, tom 6 (niniejszy)

Wszystkie wymienione powyżej pozycje mają swoje elektroniczne wersje, dostępne na stronie www.astronomianova.org pod zakładką Publikacje.

“Grażyna” Sounding Rocket Mission Control Software

**Hubert Kowalczyk, Dominik Kozimor, Adam Kulczyc-
ki, Hanna Jarlaczyńska, Jan Chyczyński**

Akademia Górniczo Hutnicza w Krakowie, Koło Naukowe AGH Space Systems

Introduction

The testing and operation of experimental sounding rockets demand seamless coordination among diverse mechanical, electrical, and human components. To facilitate reliable telemetry acquisition, enable precise command issuance to individual subsystems, and supervise both the creation and execution of complex operational sequences in a secure and user-friendly manner, the initial version of the Grażyna Mission Control Software has been developed by the AGH Space Systems student research group in 2019. Since its inception, the application has become an indispensable tool for the Rocket section, playing a critical role during all steps of rocket development, including cold flow and hot fire tests of various hybrid and liquid propellant rocket engines, leading up to successful rocket launches at international competitions.

The Grażyna application is entirely implemented in Python and utilizes the Kivy framework to design and manage its graphical user interface (GUI). Its functionality is organized into multiple tabs, each tailored to provide relevant information and control options to the user. The current version incorporates a range of features, including but not limited to: calibration and manual operation of electronic devices, the creation and deployment of custom sequences for advanced testing procedures, real-time telemetry monitoring, and emergency response functionality for aborting operations in critical situations. These capabilities make Grażyna a pivotal element in the success of AGH Space Systems’ rocket development campaigns.

Hardware tab

Hardware control tab is the centerpiece of the whole Grażyna application. Here launch operators can view all of hardware telemetry data as well as issue commands to individual devices present in the rocket or in its ground facilities. The application supports a wide range of common hardware components used during rocket missions such as: actuators, sensors, igniters, recovery control modules (including parachute launch control) and more. Thanks to the extensible code infrastructure used in Grażyna, our team can rapidly develop support for new types of devices, all in order to provide our users with functional, stable and intuitive control interface for any kind of subsystem. All hardware control elements present in the hardware tab are created using a common code foundation, thanks to this approach we can easily provide complex functionalities in relatively small timeframes. This way developing synchronization control, device arming and other functionalities can be as simple as importing an appropriate class by the programmer during development.

Maintaining consistency with the state of rocket hardware and ground facilities is one of key factors contributing to a successful mission. On the other hand, complex distributed systems like ours often require granular control over what kind of data is propagated to the infrastructure, sometimes demanding only a partial update of configuration values. Because of these constraints our team has developed a simple synchronization mechanism, allowing operators to synchronize rocket configuration at will for each individual subsystem. This approach greatly simplifies complex rocket hardware setup operations, letting ground teams approach device control with surgical precision.

System safety is crucial during rocket mission development and execution, but achieving it can be challenging, especially in a system that needs to work in various conditions and environments. Our rocket launches often take place in locations where having a full mission control room is impossible. Thus we need to be able to safely control all rocket systems using laptops, equipped only with touchscreens or touchpads. Such input devices can be imprecise, leading to inadvertent clicking and executing other commands than intended. With risks such as these in mind, our team has developed a selective arming system for all rocket subsystems supporting active control capabilities. Each device control element is equipped with a button allowing users to arm and disarm that device at will. When the device is armed, the button displays an icon showing an open padlock, all control elements for this device become clickable and can be used for

command sending. On the other hand, when the device is disarmed, the arming button will display a closed padlock, all control inputs for this device will be greyed out and not clickable, preventing the user from issuing an erroneous command.

Taking the idea of safety even further our team has introduced consistent color coding to the user interface elements of the hardware tab. Specific colors are used to signify information about application state. Our team makes use of the following colors: white color means lack of operation attempt, green color stands for operation success and red for failure. Using this simple scheme the application can convey ideas in a straightforward and intuitive way about its state to the ground control operators.

Communication tab

Communication tab serves as the main way of inspecting rocket infrastructure communication traffic. Here our ground control operators can analyze in detail the communication flow between their mission control software instance and other parts of rocket communication infrastructure. Users can see the configuration of their active connection, including data useful for debugging purposes such as number of bytes awaiting processing and general statistics regarding communication frames transferred since connection start. The most important element of the communication tab is its frame logging component, displaying all frames sent uplink and downlink during connection lifetime. Ground operators can filter this data based on their preferences, choosing between frames based on their action field and hardware subsystem device ID.

In order to effectively service rocket missions of any magnitude undertaken by the Rocket Section, our team has developed a scalable and modular software infrastructure approach. Its foundation is built upon a custom communication protocol developed as a joint venture between the software and electronic teams. Our communication protocol relies on a custom frame structure. Having in mind the goal of achieving maximal communication performance, we have decided to partition frame fields on the bit level. This way we were able to reduce the frame size to only 14 bytes, while maintaining expansion possibilities with surplus values remaining for each field.

Each communication frame is composed of the following fields:

- Header – Unique value signifying the begging of a frame

- Destination – ID of destination board handling hardware devices
- Priority – Either HIGH or LOW, determines whether frame should be processed first in the buffer
- Action – determines general type of command being sent, available options are: FEED, SERVICE, ACK, NACK, HEARTBEAT, REQUEST, RESPONSE, SCHEDULE, SACK, SNACK
- Source – ID of source board handling hardware devices
- Device type – defines what type of device frame is addressed to, for example: Actuator, Sensor
- Device id – identification number of device the frame is addressed to
- Data type – type of data being sent to the destination device, options are: NO_DATA, UINT32, UINT16, UINT8, INT32, INT16, INT8, FLOAT, INT16X2, UINT16INT16
- Operation – device specific type of command being sent, for example: Actuator open command, Parachute deploy command.
- Payload – field used to store additional operation data sent to another device, ex.: Actuator target position
- CRC Checksum – used to verify the integrity of whole frame

Our communication infrastructure provides a common transport definition interface, thanks to this we can easily implement support for various transport mediums in our applications. Two primary methods of communication are: TCP sockets and Serial Ports. For smaller projects a direct serial port connection to rocket hardware is sufficient. For complex infrastructure deployment scenarios, involving multiple mission control operators or distributed rocket hardware, our team has developed a communication proxy solution. In such configurations, whole rocket hardware infrastructure connects to the proxy server, which is a frame size-aware TCP server with predefined connection endpoints, each dedicated to specific parts of our infrastructure. Software applications and tools connect to the software dedicated endpoint, while hardware devices connect to the hardware endpoint. This way we can easily recognize the type of client connected to the proxy and forward frames between them based on this information. Separation of clients based on their types is important in regard to additional functionalities our proxy offers. Specifically, sometimes we need to forward frames to other clients of the same type. Such operations are used by software clients in order to provide synchronization information to other mission control software instances and maintain synchronization among them. We call it frame mirroring, enabling it for all types of clients would be computationally wasteful, since hardware clients generate lots of frames that do not partake in synchronization operations

(ex.: sensor value feed). At the same time, software clients send relatively few frames, mostly related to issuing control commands, which need to be mirrored to other mission control software instances for proper operation synchronization. Proxy server itself is written in Rust programming language, using Tokio asynchronous runtime. We chose these technologies in order to obtain not only high performance required to properly serve big mission control infrastructure deployments, but also to provide utmost stability during proxy's operation. With this approach we can serve thousands of clients simultaneously on both endpoints while maintaining high data throughput.

Hydro visualization

This tab provides an intuitive, interactive visualization of the rocket's hydraulics system and fueling station. A system was inspired by the solutions in use by organizations such as NASA in their ground control centers. The view is in accordance with official hydraulics diagram conventions, ensuring clarity and easy interpretation, even for users with minimal experience.

The diagram displays key components like valves, sensors, quick-connect couplings, and fill tanks. Each element updates in real time: sensors show live values, and valves indicate their current state with color coding. If the valve is entirely of single color it means that its state is known. If the valve is of mixed colors, for example red-gray, it means that the ground has not received acknowledgement but its last state was "closed".

At the center is a detailed pressure vessel widget that tracks its internal piston's position, offering crucial insight into one of the most critical aspects of the system.

By combining monitoring and control into a single interface, this tab allows operators to quickly assess the system's state, perform necessary actions like operating valves, and resolve issues without navigating multiple tabs. This tool offers a simple and efficient solution for the users, which is critical in scenarios of rocket engine and hydraulics development.

Sequence tab

Tab responsible for editing, configuring and sending sequences that are sent to the ground station electronics. Each sequence is displayed as a list

of steps, showing all the necessary informations about each step, namely:

- Device – type of a device that this step is for, for example a Dynamixel actuator.
- Name – device’s name, for example Dynamixel named MAIN FUEL is responsible for opening the main fuel’s valve.
- Operation – what action is to be taken, like opening/closing the valve.
- Start after – how many milliseconds after starting the previous step should this action be carried out.
- Payload – used when sending additional information, like actuator target position.

Users can load sequences from a file, edit them and create new ones. Once configured, a sequence can be sent to the ground station electronics. When the sequence is received and all the checksums are confirmed it can be launched by the operator.

Logger tab

The Logger tab serves as a critical interface for monitoring and reviewing detailed log information related to the operation of our application itself. This feature significantly enhances the diagnostic capabilities of Grażyna, allowing users to efficiently identify and resolve potential issues, such as connectivity failures between the application and hardware components. The tab also includes functionality to adjust the “log level”, enabling users to filter and display specific categories of logs, such as warnings or general informational messages. This ensures that relevant data is accessible based on the user’s needs, streamlining both real-time monitoring and post-operation debugging processes.

Testing and development methodology:

The Rocket software team puts great care into our development and testing methodologies, having any kind of runtime errors in our tools during production scenarios is utterly unacceptable. In order to prevent such situations, we have incorporated extensive testing routines into our development procedures. Each code change requires extensive testing of the whole application to be approved for merging into the mainline codebase. Such testing is done with the help of our test suite, a group of documents describing what kind of tests and in what way should be performed to deem the

application as stable and operational. Before each application build release, we go over the whole test suite and verify that the application is still functional in all ways specified by it, even regarding functionalities that weren't modified since last release. Our test suite is continuously extended in order to include additions of new application functionalities and project requirements.

Mission Control software builds are shipped in advance of big project milestones to the electronics team and ground control operators in order to further make sure that even if an issue wasn't caught during software testing, the software can be further validated by its end users, and any potential problems can be fixed by the software team with ample time to spare.

Summary

The Grażyna Mission Control Software, developed by AGH Space Systems Rocket Software team, is an essential tool for telemetry acquisition, subsystem control, and sequence management during rocket engine testing and launches. With features like real-time hardware monitoring, custom communication protocol, hydraulic system visualization, and detailed logging, it ensures precision and safety in mission-critical operations. Balancing user-friendliness with sophisticated functionality, Grażyna has become an indispensable solution during AGH Space Systems' rocket development endeavors.



Młodzież tarnowskich szkół średnich podczas konferencji.

Is there a beekeeper flying with us? Or what does the honeycomb do in a rocket ...

Emilia Andres, Wiktoria Kujawa

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Koło Naukowe AGH Space Systems

Composite materials are widely used in modern industry so in the aerospace sector. Thanks to their unique properties it perfectly suits hard flight conditions including great forces and light mass requirements. But what really composite material is and how do we use them in our rocket aerostructure?

Composites are materials containing at least two phases with different properties that combined together give new or better characteristics relative to these materials separately. There are many subtypes of composites such as particle composite (e.g chipboard), fiber or laminar composite. Most common type used in our parts is laminate. Laminates characterize that reinforcement component is placed in layers among liner that combine layers together.

Properties that are most often listed in favor of composite materials are:

- High mechanical strength
- Low mass
- High Young modulus
- Great chemical and corrosion endurance
- Ability to shape in room temperature

In students rockets frequently used materials are carbon/glass/aramid fibers in the polymer warp – such as epoxy resin. Sometimes ceramic composites (SiC , ZrO_2 , Al_2O_3) are also applied in more advanced designs. In some cases the sandwich composites are also used. This kind of composite is made from two skins (carbon fiber – epoxy resin, glass fiber – epoxy resin etc.) attached to a lightweight core. The core material provides stiffness of composite with overall low weight. The polystyrene, polyurethane

foams, aramid or aluminum honeycomb are most common core materials. To get additional strength, honeycomb can be filled with other foams or resin fillers like micro-balloons. This type of filling is especially useful in the areas where holes are to be drilled later.

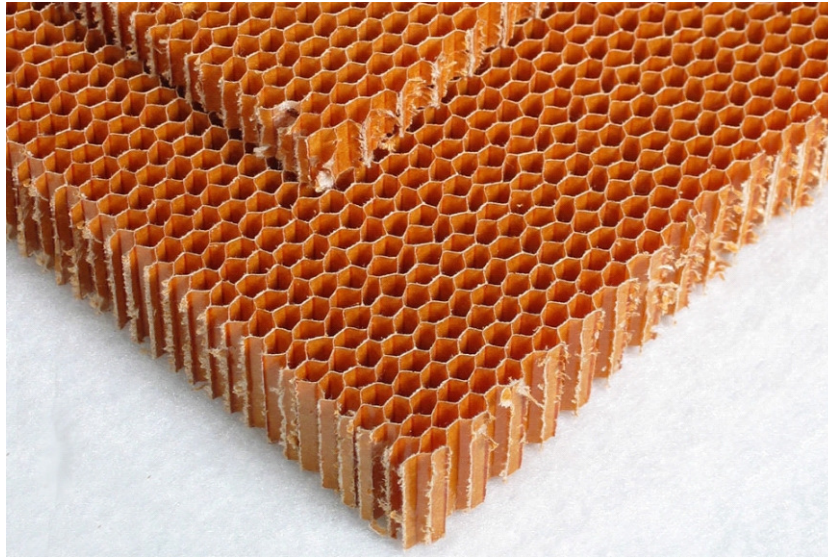


FIGURE 1. Honeycomb spacer – here comes the title!

The parts of our rockets are made from different composites. The variety of materials can be seen in the Turbulence rocket. The nose cone is made from glass fiber and epoxy resin. The recovery fuselage design assumes the same material, but has inner reinforcement ensured by a hybrid carbon-aramid fiber/epoxy resin composite. Since carbon fiber does not transmit radio waves, the electronics and payload segment is also made from glass fiber/epoxy resin. An aramid honeycomb had been added to make this part a sandwich composite. The tail cone and fins are made from carbon fiber. Inside the tailcone, there are two carbon frames attached to the foam core. The last composite part in this rocket is an ablative liner that protects the outer rocket structure from hot gases produced in the combustion chamber.

There are several methods of manufacturing composite parts of student rockets. The easiest one consists of laying pre-soaked fiber layers on the mandrel with mylar film on the bottom which prevents fibers from sticking. Then, the whole element is wrapped in stretch film and cured. This method allows the manufacture of fuselages, but with the different shape of core it is possible to make other parts like tail cone or nose cone. To make flat elements, like rocket fins, the best option is resin infusion. It consists of dry stacking layers of fibres inside the mould and vacuum packing the whole assembly. Then the resin is introduced to the mould, where it is drawn by the vacuum.

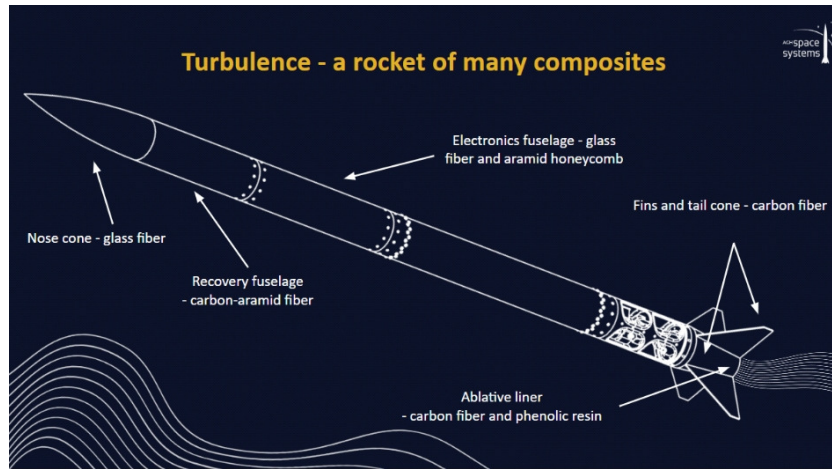


FIGURE 2. Diagram showing composite parts of our liquid engine rocket.

Manufacturing composite materials seems to be easy, but there are some important lessons we discovered during making a rocket. First of all, the materials from which the mandrel is usually made, can differ in their thermal expansion. Therefore, it is easier to take off the fuselage after curing from the aluminum mandrel than from iron mandrel. It is also important to remember about the pot life of resin. During the infusion process, the resin that has started to cure, may not flow through the whole element.

Even though manufacturing composite materials is often problematic, we are constantly trying to improve the process. Developing our skills allows us to produce increasingly complex and durable rocket parts.



FIGURE 3. Hand made electronics fuselage. Team members winding subsequent layers around an aluminium tube that works as a mould. Honeycomb and micro-balloons (white regions) are shown.



Mgławica M42 w Orionie. (fot. H. Drózdź)

Studium radaru pasywnego do śledzenia lotu rakiety i utrzymania łączności

Aleksander Kopyto

Akademia Górniczo-Hutnicza, AGH Space Systems, AGH Skylink

Streszczenie: Niniejszy artykuł przedstawia koncepcję i implementację systemu radiowego naprowadzania naziemnych anten komunikacyjnych na rakietę w locie, bazującego na pomiarze różnicy faz sygnałów odbieranych przez zestawy anten. Opisano zarówno aspekty sprzętowe urządzenia, jak i wybrane zagadnienia związane z oprogramowaniem, które umożliwia precyzyjne wyznaczanie położenia rakiety w czasie rzeczywistym.

Wstęp

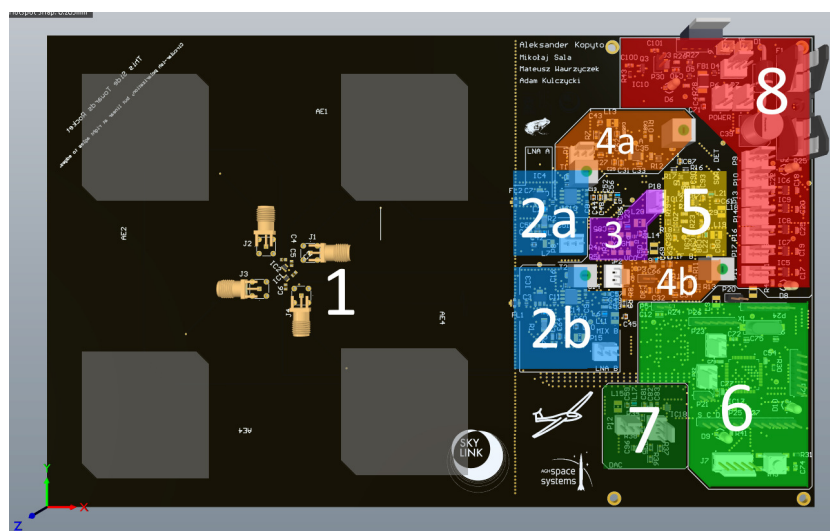
Prowadzenie łączności z rakietą podczas jej lotu stanowi złożone wyzwanie, zwłaszcza gdy wymagana jest ciągła, autonomiczna i precyzyjna obserwacja jej położenia w przestrzeni. Jednym z podejść jest zaprogramowanie trajektorii naprowadzania anten na podstawie symulacji lotu. Znane są również metody śledzenia optycznego – bazujące na analizie obrazu z kamer – oraz systemy korzystające z danych z żyroskopu i akcelerometru zamontowanych w rakiecie, przesyłanych na bieżąco do stacji naziemnej.

Niestety wszystkie wymienione techniki obarczone są pewnymi ograniczeniami: symulacje mogą odbiegać od realnej trajektorii, śledzenie optyczne jest utrudnione w warunkach zachmurzenia, a utrata łącza telemetrycznego może uniemożliwić dalszą transmisję danych z układów inercyjnych rakiety.

Na tym tle wyróżniają się radiowe metody śledzenia, w szczególności rozwiązania bazujące na zasadzie radaru pasywnego. W takim układzie wykorzystuje się źródło sygnału (tzw. *beacon*) umieszczone w rakiecie oraz odbiornik wyposażony w układ wielu anten, które umożliwiają pomiar różnic fazy odbieranych fal. Na tej podstawie można wyznaczyć kierunek

nadejścia sygnału (DoA) i w sposób ciągły podążać za rakietą, utrzymując stabilne połączenie radiowe.

Opisany zostanie opracowany przez autora radar pasywny pracujący w paśmie ISM 2.4 GHz. Urządzenie wymaga źródła sygnału umieszczonego w obiekcie śledzonym (tutaj rakiecie), o mocy nadawczej 30 dBm dla zasięgu ponad 10 km, idealnie wyposażonego w antenę o polaryzacji kołowej, lecz ze względu na dostateczną polaryzację kołową zespołu anten, ta właściwość nie jest wymagana. Dodatkowo, aby radar mógł przeprowadzać automatyczne nastrajanie się na częstotliwość nadajnika należy wprowadzić modulację sygnałem znacznikowym. W naszym wypadku jest to 1 kHz sinus i FM z wąskim pasmem odchylenia $\pm 9\text{kHz}$.



RYSUNEK 1. Model komputerowy 3D płytki drukowanej radaru z zaznaczonymi sekcjami.

Zespół anten

Zespół anten składa się z czterech anten typu „Corner Truncated Microstrip Patch” zestrojonych na częstotliwość pracy układu 2.45 GHz z minimalnym SWR 3. Posiadają one charakterystykę dookolną, zbliżoną do sferycznej, z maksymalnym wzmocnieniem 8 dB. Ważny jest brak zera w osi prostopadłej do płaszczyzny anten, oraz polaryzacja kołowa. Autor zauważył jedną wadę tych anten, mianowicie w wynikach symulacji ukazuje się nagły wzrost stosunku osiowego polaryzacji anteny ($Z < 10\text{ dB}$ do ponad 30 dB, tworząc swoistą asymptotę). Z reguły jest on na przecięciu pionowej płaszczyzny i sfery stanowiącej wykres stosunku osiowego. Jego położenie zależy od miejsca doprowadzenia sygnału i rozmiaru

przycięcia w rogach anteny. Wadę można pokonać stosując antenę o polaryzacji kołowej, o tym samym zwrocie, w nadajniku *beacon* w pojeździe śledzonym. Anteny znajdują się na stronie płytki przeciwnej tej, na której znajdują się elementy i tory radiowe. Redukuje to możliwość wzbudzenia układu i poprawia czułość. Od strony elementów znajduje się para przełączników półprzewodnikowych w.cz. Pozwalają na wybór pary anten z wszystkich czterech, gdyż mamy tylko dwa tory sygnałowe. Wybór następuje pomiędzy antenami z przeciwległych kątów zespołu. Pozwala to na łącznie 4 kombinacje do pomiaru, po dwa na prostopadłe do siebie osie (oznaczone Y i X). Układ jest opisany w sekcji 6-tej. Dwukrotny pomiar jest dokładniejszy, a dwie osie pozwalają na określenie kąta przestrzennego śledzonego źródła sygnału.

Tory wysokiej częstotliwości

Układ składa się z ceramicznego filtra pasmowego, wzmacniacza niskoszumowego i mieszacza. Pierwszy element jest standardowym filtrem przeznaczonym na pasmo ISM wykorzystywane przez system. Wzmacniacz niskoszumowy zwiększa czułość układu wzmacniając sygnał przed wysokoszumowym elementem jakim jest mieszacz. Zastosowany IAM-81008 jest mieszaczem aktywnym, co pozwala na wysterowanie go z słabego źródła sygnału, jakim jest oscylator lokalny, bez stosowania jakichkolwiek wzmacniaczy po drodze. W całym torze w.cz. prowadząc ścieżki zadbane o taką samą długość obu torów, gdyż na tych częstotliwościach bardzo łatwo wprowadzić błąd fazy. 1 mm różnicy długości ścieżek na zastosowanym podłożu powoduje 5 stopni różnicy fazy.

Oscylator lokalny

Zastosowano oscylator sterowany napięciowo (VCO) YSGM252710, jego szeroki zakres przestrajania (120 MHz/V) wymaga układu rezystorów na wyjściu użytego DAC, aby uzyskać krok rzędu 2 kHz i przestrajanie 2.4-2.45 GHz. Stabilność temperaturowa wynosi 430 kHz/K, co wymaga zewnętrznej stabilizacji temperaturowej. Pomiar temperatury wykonywany jest termistorem a jej stabilizacja grzałką kontrolowaną metodą pętli PID przez mikroprocesor, oba podzespoły umieszczone są na obudowie VCO i sprzężone z nią termicznie pastą silikonową. Sygnał z generatora trafia na rozgałęźnik rezystorowy i zasila oba mieszacze.

Tory pośredniej częstotliwości

Większa część przetwarzania sygnału odbywa się na częstotliwości pośredniej, gdyż ryzyko wzbudzenia układu pod wpływem dużego wzmocnienia toru (łącznie ok. 108 dB) jest niższe. Błędy fazy spowodowane rozrzutem parametrów elementów oraz prowadzeniem ścieżek stają się znikome. Tor p.cz. składa się z wejściowego filtra kwarcowego o paśmie 20 kHz, dopasowanego przez transformator p.cz. Parametry takiego filtra są bardzo ściśle kontrolowane przez producentów i mimo, że jego charakterystyka fazowa nie jest płaska, to mały rozrzut parametrów nie powinien spowodować poważnego błędu fazy. Sygnał jest wzmacniany i demodulowany przez NJM2549. Jest to układ pośredniej częstotliwości do odbiorników FM i systemów radarowych o bogatych funkcjonalnościach: wzmacniacz z ogranicznikiem amplitudy zapewnia stały sygnał wyjściowy, niezależny od mocy sygnału odbieranego. Detektor kwadraturowy FM pozwala na demodulację sygnału, co jest wykorzystywane do automatycznego znajdowania częstotliwości celu.

Detektor

Amplituda sygnału na wyjściu sygnału p.cz. wynosi ok. 0.4 V. Nie wystarczy to do wysterowania detektora, którym jest bramka logiczna NAND wymagająca poziomów TTL. Stosujemy więc stopień wzmacniająco-kształtujący na pojedynczym tranzystorze BFP720P. Ważne jest zastosowanie tranzystora o możliwie wysokiej f_T , gdyż krytyczne jest uzyskanie na wyjściu sygnału TTL o możliwie krótkim czasie narastania, w przeciwnym wypadku narażamy się na stany nieustalone na wyjściu detektora, wprowadzające błędy pomiaru kąta sygnału. Przy pomiarze kąta korzystamy z właściwości fal elektromagnetycznych, na zasadzie interferometrii falowej. Pomijając wyprowadzenia, kąt sygnału padającego na oś wyznaczoną przez środki wybranej pary anten możemy wyliczyć z uśrednionego (filtr dolnoprzepustowy) napięcia wyjściowego bramki:

$$\alpha \text{ lub } \beta = \arcsin\left(2 \cdot \left(1 - \frac{V_{out}}{U_{OH}}\right)\right) + \Delta\Phi_{err}$$

gdzie,

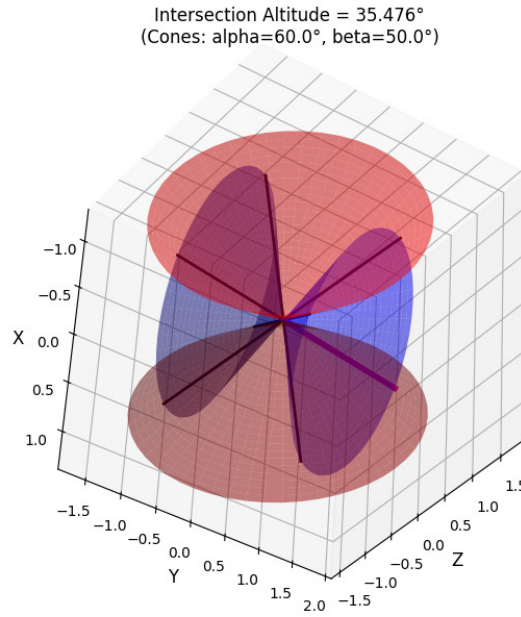
α lub β – kąt względem osi X lub Y,

V_{out} – uśrednione napięcie wyjściowe,

U_{OH} – napięcie wyjściowe bramki w stanie wysokim,

$\Delta\Phi_{err}$ – stały błąd fazy między torami, zmierzony w trakcie kalibracji.

Gdy obliczymy wartość kąta sygnału padającego z obu par anten, prostopadłych do siebie, możemy z tych wartości uzyskać kąty wysokości i azymutu. Śledzenie celu odbywa się w układzie współrzędnych horyzontalnych. Zdefiniujemy dwie płaszczyzny stanowiące obrót półprostej zaczepionej we wspólnym wierzchołku obu par, pod kątem równym α lub β , odpowiednim danej parze, wokół osi, na której znajduje się dana para. Uzyskujemy w ten sposób układ dwóch par stożków o osiach prostopadłych do siebie i stycznych w wierzchołku, które określają płaszczyzny na których może się znajdować śledzony cel.



RYSUNEK 2. Styk stożków oznaczony na czarno oznacza proste na której może znajdować się cel.

Miejsca wzajemnego przecięcia stożków wyznaczają proste, na których może znajdować się śledzony cel. Przyjmujemy założenie, że cel znajduje się w I oktancie, gdzie $x, y, z > 0$ (na rys.2 linia pogrubiona na fioletowo). Wektor wyznaczający prostą ma współrzędne:

$$x = \cos(\alpha), \quad y = \cos(\beta), \quad z = 1 - \cos^2(\alpha) - \cos^2(\beta).$$

Jako, że między osiami wobec których mamy kąty α i β jest kąt prosty:

$$\varphi = \arctg(x/y) = \arctg(\cos(\alpha)/\cos(\beta)),$$

gdzie φ to azymut określony na płaszczyźnie XY.

Kąt wysokości (elewacji) θ określamy z trójkąta prostokątnego wyznaczonego przez wcześniej wspomniany wektor:

$$\theta = \arctg(z/\sqrt{x^2 + y^2}) = \arctg\left(\frac{\sqrt{1 - \cos^2(\alpha) - \cos^2(\beta)}}{\sqrt{\cos^2(\alpha) + \cos^2(\beta)}}\right), \text{ lub}$$

$$\theta = \arcsin(z) = \arcsin(1 - \cos^2(\alpha) - \cos^2(\beta)).$$

Dodatkowo, musi być spełniony warunek $\cos^2(\alpha) + \cos^2(\beta) \leq 1$, w przeciwnym wypadku nie ma miejsca wzajemne przecięcie stożków i nie istnieje rzeczywista para kątów azymutu i elewacji która odpowiada tej parze α i β . Oznacza to błąd pomiaru.

Dla $\cos^2(\alpha) + \cos^2(\beta) = 1$ następuje styk stożków i cel znajduje się na płaszczyźnie XY.

System mikroprocesorowy

Urządzeniem steruje mikrokontroler STM32F446RET6. Z jego zasobów wykorzystujemy dwa zegary (jeden do PWM silników). Pseudokod programu:

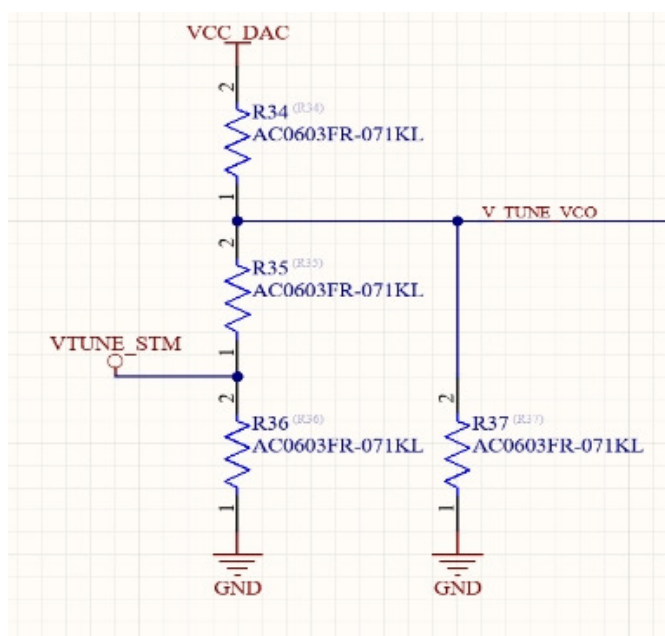
- Włącz stabilizatory liniowe zasilające wszystkie sekcje układu, z wyjątkiem stabilizatora mikroprocesora, który pozostaje na stałe włączony.
- Zmierz temperaturę wewnątrz mikroprocesora i na oscylatorze.
- Włącz grzałkę i nagrzej oscylator lokalny do temperatury pracy 25 stopni, większej od początkowej.
- Po nagrzeniu skanuje pasmo, przechodząc przez pełen zakres wybranego DAC, na pojedynczej antenie, na torze A:
 - Mierzy siłę sygnału odbieranego (RSSI)
 - Jeśli większa niż wartość napięcia odpowiadająca -50 dB, to:
 - Wykonaj 128 próbek zdemodulowanego sygnału audio z częstotliwością próbkowania 10 kHz.
 - Na uzyskanej tablicy wykonaj rzeczywistą transformatę Fouriera.
 - Sprawdź czy amplituda składowej o częstotliwości ~ 1 kHz jest dwukrotnie większa od średniej wartości amplitud składowych.
 - Jeśli tak, zapisz w tablicy kandydatów: przybliżoną częstotliwość odbieranego sygnału, nastawienie DAC, temperaturę VCO, amplitudę składowej 1 kHz, średnią wartość amplitud składowych.
 - W każdym wypadku wypisz te dane za pomocą `printf()`
 - Zwiększ nastawienie wyjścia DAC o jeden krok.
- Po wykonaniu skanowania ustaw DAC na wartość, dla której wystąpił największy stosunek amplitudy składowej do średniej.

- Główna pętla programu. Przełączaj stany logiczne przełączników anten w następującym układzie:

Antena	1 2 3 4
Para 1	1 1 0 0
Para 2	0 1 1 0
Para 3	0 0 1 1
Para 4	1 0 0 1

- Dla każdego ustawienia zmierz i zapisz: wartość detektora, siłę sygnału RSSI dla obu torów, częstotliwość sygnału p.cz.
- Po przejściu przez wszystkie 4 pary na podstawie zmierzonych wartości kątów sygnału padającego na osie X i Y, wyliczamy azymut i kąt nachylenia źródła sygnału.
- Wyjścia PWM sterujące serwomechanizmami nastawiane są na wartości wypełnienia odpowiadające tym kątom.
- Wyjście demodulatora FM i napięcie na termistorze jest mierzone przez 10 ms. Obie wartości zapisane do tablicy o długości 128 z krokiem czasowym 100 ms.
- Na podstawie tego, korzystając z pętli PID ustawiane jest wypełnienie PWM sterującego grzałką, stabilizując temperaturę.
- Dane zmierzone w pętli i obliczone kąty są wypisywane funkcją `printf()`.

Przetwornik DAC sterujący oscylatorem lokalnym



RYSUNEK 3. Układ rezystorów do zmiany zakresu napięć DAC. Wartości elementów są przykładowe.

Przewidziano możliwość użycia 12-bitowego DAC z mikrokontrolera lub zewnętrznego 14-bitowego układu. Przełączanie odbywa się zworką. Użycie zewnętrznego DAC zwiększa dokładność strojenia i zmniejsza szумы pochodzące z mikrokontrolera. Aby zwiększyć dokładność kosztem węższego zakresu przestrajania zastosowano układ rezystorowy. Z odpowiednią kombinacją wartości można uzyskać pożądaný zakres 1.2-1.5 V i krok 73 uV dla 12 bit lub 13 uV dla 14 bit, co pozwala na odpowiedni zakres przestrajania odbiornika.

Zasilanie

Urządzenie jest zasilane z pary akumulatorów litowo-jonowych w połączeniu szeregowym o łącznym napięciu 7.4 V. Każda sekcja jest zasilana osobno przez własny niskoszumny stabilizator liniowy o napięciu wyjściowym 3.3 V LDK220M33R. Każdy regulator posiada wejście cyfrowe „enable” pozwalające na reset lub wyłączenie poszczególnych sekcji z poziomu oprogramowania. Mimo niskiej wydajności energetycznej, wprowadzenie w ich miejsce przetwornic impulsowych wprowadziłoby trudne do eliminacji zakłócenia. Dodatkowo, każdy układ scalony w sekcji posiada osobny filtr zasilania, zapewniający wysokie tłumienie zarówno dla odbieranych w.cz., jak i p.cz. oraz zegara mikrokontrolera. Zastosowanie filtrów blokujących wszystkie zakresy częstotliwości występujące w urządzeniu powoduje, że zakłócenia nie mają możliwości przemieszczać się po liniach zasilania, co mogłoby powodować spadek czułości i wzbudzenia systemu. Podobny system zasilania zastosowano z dobrym skutkiem w transceiverze ICOM IC-9700. Wyjątkiem jest zasilanie serwo mechanizmów, które posiadają osobny regulator o napięciu wyjściowym 4.8 V. Na wyjściu każdego regulatora liniowego znajduje się zworka, która może zostać wyciągnięta w celu wyłączenia danej sekcji, lub zastąpiona rezystorem w celu pomiaru poboru prądu i diagnozy pracy.

The impact of cosmic radiation on the operation of electronic systems

Andrzej Kołodziej, Robert Wielgat

Akademia Tarnowska, Katedra Elektroniki, Telekomunikacji i Mechatroniki

Many applications require the use of electronic components and devices made of special materials, and their design is based on special solutions that make them resistant to difficult working conditions. In this respect, however, no environment on Earth can match space. The conditions there are not only deadly to humans, but can also damage or even completely destroy electronic equipment on spacecraft. The presentation shows the troublesome factors to which electronic systems are exposed when transported into extraterrestrial space, as well as ways to protect electronic equipment from these factors [1-3].

First of all, the impact of cosmic radiation on electronic systems and devices located at different heights above the earth's surface is significant. In space, we can distinguish proton and electron streams and galactic cosmic electromagnetic radiation, in which the most important is solar radiation, which has three components: a) constant electromagnetic radiation, b) solar wind (a stream of photons, electrons, protons, helium ions and a small amount of heavier ions), c) mass ejections, generating localized streams of particles with much higher energies than the solar wind and radiation belts. The latter are an accumulation of particles trapped in the magnetic field of the planets.

There are two natural radiation belts around the Earth, the so-called Van Allen belts: the inner one, which extends from 0.2 to 2 Earth radii (approx. 1000 km to 12000 km) from its surface and contains electrons (with energy of approx. 0.5 MeV) and protons (with energy of around 100 MeV), and the outer one, at distances from over 2 to 10 Earth radii (from 13000 km to 64000 km) from its surface, containing mainly high-energy electrons (with energy of 0.1-10 MeV). The inner belt is closest to the Earth's surface near the coast of Brazil at a distance of about 350 km.

This is the so-called South Atlantic anomaly.

The interactions depend mainly on the type of particle and its energy. High-energy particles that strongly interact with nuclei cause damage to the semiconductor, change doping, etc., contributing to the degradation of the element and ultimately its destruction [3]. This effect is called Total Ionising Dose (TID). Accelerated electrons, in turn, hitting the semiconductor can cause its ionisation, which affects its operation and can induce interference in the form of voltage spikes or short-circuiting ionisation. This can lead to the system damage of the Single-Event Effect (SEE) type.

An example is the failure of the EFM32 on-board computer microcontroller during the PW-Sat2 mission due to radiation, which is known in the literature [4].

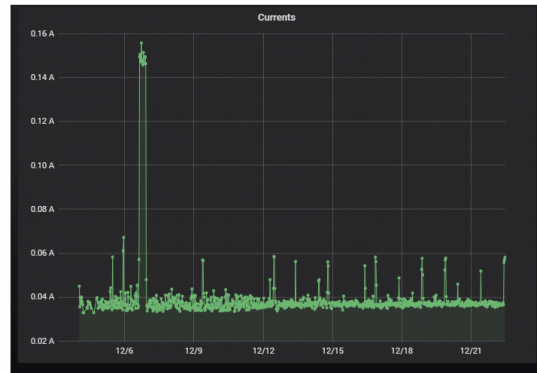


FIGURE 1. Current consumption during a radiation pulse (single event latch-up) acting on the on-board computer microcontroller (EFM32) during the PW-Sat2 mission was over 100 mA higher than in the normal operating state [4].

Table 1 provides basic information on the most important parameters of the Earth's atmosphere layers. These parameters determine the threats to electronic systems remaining at different distances from the ground [2].

TABLE 1. Composition and main parameters of the Earth's atmosphere.

Layer of atmosphere	Altitude range [kilometers above sea level]	Temperature [K]	Pressure [Pa]	Composition of the atmosphere
Troposphere	0 ... 8 (above poles) 0 ... 18 (above equator)	c.a. 288 ... 213	10^5 ... $2 \cdot 10^4$	N_2 , O_2 , Ar
Stratosphere	12 ... 50	213 ... 273	$2 \cdot 10^4$... 10^2	N_2 , O_2 , O_3 , CO_2 , Ar
Mesosphere	50 ... 80	273 ... 193	10^2 ... 10^1	N_2 , O_2 , CH_4 , Ar
Thermosphere	80 ... 500	193 c.a. 1000	10^1 ... 10^{-2}	N_2 , N, O, O^+ , H
Metasphere	500 ... 1500	120 c.a. 2000	10^{-2} .. $2 \cdot 10^{-8}$	O, O^+ , H_2 , H^+
Protonosphere	1500 ... c.a. 15000	1.5 ... 5000	$2 \cdot 10^{-8}$.. 10^{-10}	H, H^+ , He^{++}
Outer space	above 15000	c.a. 0	Below 10^{-10}	vacuum

Due to the reduced pressure to the range from 10^{-3} Pa to 10 hPa in electronic systems in space, phenomena causing short-circuit ionization

between different potential points become important. This phenomenon is presented in Fig. 2.

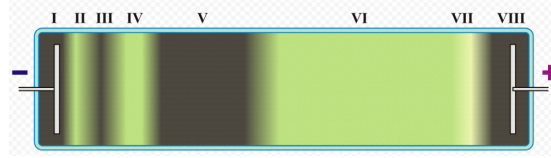


FIGURE 2. The entire potential drop occurs in the area between the cathode (-) and the cathode dark space (III), which is why this part of the voltage applied to the tube is called the cathode potential drop. In the negative glow (IV), the potential does not change, the electric field intensity is zero. In the Faraday dark space (V), as well as the positive column (VI), the potential increases slightly. The most important phenomena necessary to sustain a glow discharge occur in the cathode part.

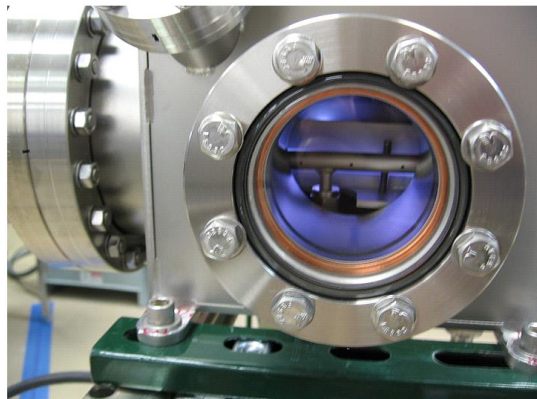


FIGURE 3. Example of a vacuum chamber. Visible ionization due to poorly shielded electrodes.

There are two types of effects of radiation on semiconductor devices. The first is the short-term transient single event effects (SEE), which is random, immediate disruptions caused by the passage of a single particle and the effects of larger radiation doses. The second causes permanent deterioration of the device parameters, which accumulates over time due to chronic exposure to radiation, ultimately leading to failure. Two types of phenomena are distinguished in this category: total ionizing dose (TID) and displacement damage dose (DDD). TID is characterized by the energy absorbed by a unit of mass of the irradiated material. It is expressed in Gy [1], [3].

SEE is classified as destructive and non-destructive. The latter cause noticeable events or a change in the output state or data, but do not damage or destroy the circuit element itself affected by the radiation. In logic and analog systems without memory, such a disturbance is transient and self-recovers, and the circuit functionality returns to normal after a short time after the excess charge is removed.

When an SEE occurs in a sequential digital circuit, memory, or analog circuit with memory (for example, a sample-and-hold circuit), the charge disruption caused by radiation can change the state of the data. Subsequent writes to the device will clear the erroneous state, but until that happens, the erroneous data can cause system failures if the corrupted state is read and used in other circuits. This category includes, among others, SEEs of the following types: single event transients (SET), single event upsets (SEU), single event functional interrupts (SEFI), single event latchups (SEL). Destructive SEEs also cause noticeably erroneous output states or data errors, but in this case the circuit element itself is also damaged or destroyed.

Modifications in the semiconductor structure production process are not always possible, because the basic procedures are usually optimized for the production equipment and the target components parameters. Nevertheless, such attempts are made. An example is replacing the standard substrate with a substrate of higher conductivity – the use of a heavily doped material significantly reduces susceptibility to SEE phenomena. This method works well in CMOS structures, but not necessarily in BiCMOS.

The second group of techniques involves introducing changes to the design of semiconductor structures. An example is increasing the dimensions of transistors, which will provide a larger current to compensate for the charge generated by radiation. Another solution involves using dual physically separated transistors controlling state cells. This prevents SEU events. Naturally, such a design significantly increases the area and power consumption. One of the most effective methods of dealing with data errors is to use additional circuits to detect and correct these errors. A redundant approach is also effective, in which key functional blocks are duplicated and the state of their outputs is compared with each other in order to quickly detect anomalies. It is also mandatory to duplicate the sensors.

References

- [1] Edmonds L. D., Barnes C. E., Sheick L. Z., 2000, An Introduction to Space Radiation Effects on Microelectronics, JPL Publication 00-06, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, U.S., (<https://parts.jpl.nasa.gov/pdf/JPL00-62.pdf>)
- [2] Kikoin I.K., 1976, Tablicy Fizičeskich Veličin, Atomizdat, Moskwa
- [3] Kołodziej A., Krewniak P., 1998, Radiation Damage of Amorphous and Microcrystalline Silicon Image Sensor Structure; MRS Fall Meeting, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., 487, 381
- [4] Strona internetowa projektu PW-Sat2, <https://pw-sat.pl> [dostęp: 31.12.2024]

Ogniwa fotowoltaiczne (PV) i ogniwa paliwowe (FC) w zasilaniu pojazdów kosmicznych

Agnieszka Lisowska-Lis

Akademia Tarnowska, Katedra Elektrotechniki

Abstrakt: Technologie odnawialnych źródeł energii takie jak ogniwa fotowoltaiczne i ogniwa paliwowe PEM (od ang. *Proton Exchange Membrane*) były opracowywane oraz przetestowane na potrzeby misji kosmicznych. Później znalazły zastosowania w instalacjach cywilnych. Fotowoltaika znajduje zastosowanie w zasilaniu małych oraz dużych pojazdów kosmicznych. Ogniwa paliwowe PEM nie tylko zasilają pojazdy kosmiczne ale też znalazły dodatkowe zastosowanie jako generator wody na potrzeby misji kosmicznej. Przedstawiono zasady działania ogniw PV oraz ogniw paliwowych (PEM) stosowanych w wybranych misjach kosmicznych. Przedstawiono też ograniczenia ich zastosowania w tego typu pojazdach.

Ogniwa fotowoltaiczne

Ogniwa fotowoltaiczne nie są właściwie ogniwami a generatorami energii elektrycznej. Stanowią źródło napięciowo-prądowe gdyż zarówno napięcie jak i prąd generowany w ogniwie fotowoltaicznym ulega wahaniom w zależności od natężenia nasłonecznienia i w zależności od rezystancji obciążenia, czyli rezystancji odbiornika. Ogniwo fotowoltaiczne (PV) zamienia pasmo promieniowania elektromagnetycznego ze światła słonecznego na energię elektryczną. Najczęściej stosowanym materiałem ogniw jest krzem. W wyniku domieszkowania krzemu otrzymujemy materiał, który może mieć nadmiar lub niedobór elektronów. Nanosząc kolejno poszczególne materiały otrzymujemy warstwę n (negative) i warstwę p (positive) z nadmiarem „dziur”. Cienkowarstwowa dioda krzemowa jest pojedynczym ogniwem a w wyniku oddziaływania wysokoenergetycznych fotonów światła pojawia się efekt fotowoltaiczny i napięcie na diodzie. W przypadku

włączenia ogniwa w obwód elektryczny rozpoczyna się ruch ładunków elektrycznych i płynie prąd. Pojedyncze ogniwa PV łączone są szeregowo by zwiększyć napięcie wyjściowe, oraz równolegle by zwiększyć prąd wyjściowy. Tak tworzone są baterie ogniw fotowoltaicznych. Baterie ogniw PV łączone są modułowo by uzyskać generator czyli elektrownię fotowoltaiczną. Zasilanie napięciem (prądem) zmiennym uzyskujemy poprzez zastosowanie układów tyrystorowych i odpowiednią modulację napięcia. Na wyjściu falownika nie otrzymamy przebiegu czysto sinusoidalnego lecz przybliżony do sinusoidy przebieg napięcia zmiennego [1-4].

Rozwój ogniw fotowoltaicznych jest bardzo dynamiczny w ostatnich latach, stosowane są różnorodne materiały, modyfikowane układy warstw i elementów wspomagających efektywność pracy ogniw PV (np. soczewkowanie, profilowanie powierzchni, chłodzenie modułów, zastosowanie diody by-pass chroniącej przed uszkodzeniem przy zacieleniu, modyfikacje konstrukcji np. half-cut). Wszystko to wpływa na poprawę sprawności ogniw, poprawę bezpieczeństwa ich pracy ale też i spadek cen materiałów czy gotowych do montażu modułów [5]. To jednak nie jest przedmiotem tego opracowania. Mimo że sama technologia ogniw fotowoltaicznych i zjawisko fotoelektryczne jest znane od ponad 100 lat, to rozwój i zastosowanie ich w energetyce zapoczątkowane zostało w trakcie misji kosmicznych NASA w latach pięćdziesiątych XX wieku [1, 2].

Aktualnie ogniwa fotowoltaiczne zasilają satelity wielu państw dostarczając sygnały telekomunikacyjne oraz prowadzące obserwacje i pomiary. Sygnał komunikacji sieciowej i komórkowej od 2013 roku przesyłają np. urządzenia firmy O3b Networks (każdy 700 kg). O3b Networks Ltd. było dostawcą usług komunikacji sieciowej budującym i obsługującym flotę satelitów na średniej orbicie okołoziemskiej (MEO), której głównym przeznaczeniem było zapewnienie komunikacji głosowej i danych operatorom komórkowym i dostawcom usług internetowych. O3b Networks stało się spółką zależną w całości należącą do SES w 2016 r., a nazwa operatora została następnie porzucona na rzecz SES Networks, oddziału SES. Same satelity, obecnie będące częścią floty SES, nadal używają nazwy O3b. Istnieje wiele niewielkich firm czy start up-ów które budują małe i dość tanie satelity na potrzeby dużych firm. Takim przykładem jest np. Skybox założone w 2009 roku przez kilku studentów. W roku 2014 r. firma ta zbudowała 180 satelitów, każdy ważący 100 kg na potrzeby Google, (Rys. 1, Rys. 2) [6, 7].

SkyBox dla Google Earth pozwalał w 2014 roku na obserwację powierzchni globu niemalże w czasie rzeczywistym z dość dużą dokładnością



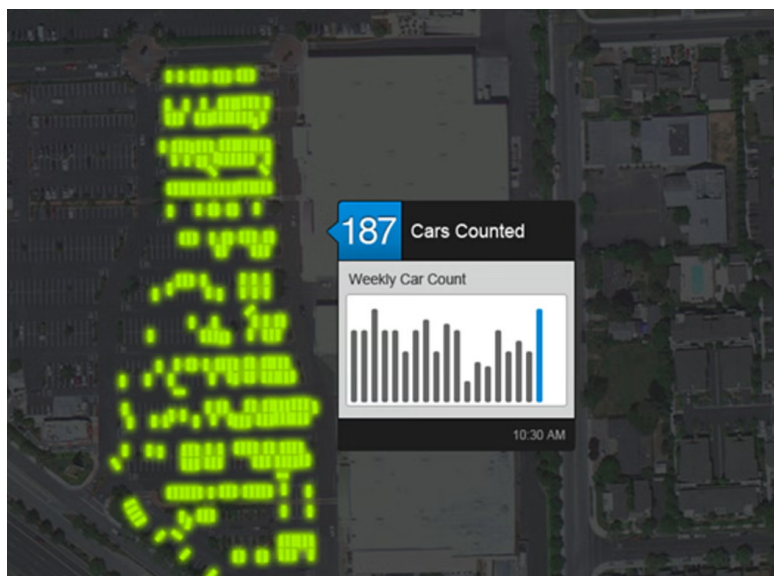
RYSUNEK 1. Satelity wyprodukowane przez Skybox dla Google Earth, w laboratorium na Ziemi przed wysłaniem na orbitę. Widoczne ogniwa fotowoltaiczne złożone do transportu. (fot. M. McDonald [6])



RYSUNEK 2. Satelita SkyBox dla Google Earth na orbicie. Ogniwa fotowoltaiczne są rozłożone i zasilają urządzenia satelity. [autor: UrtheCast, [7]]

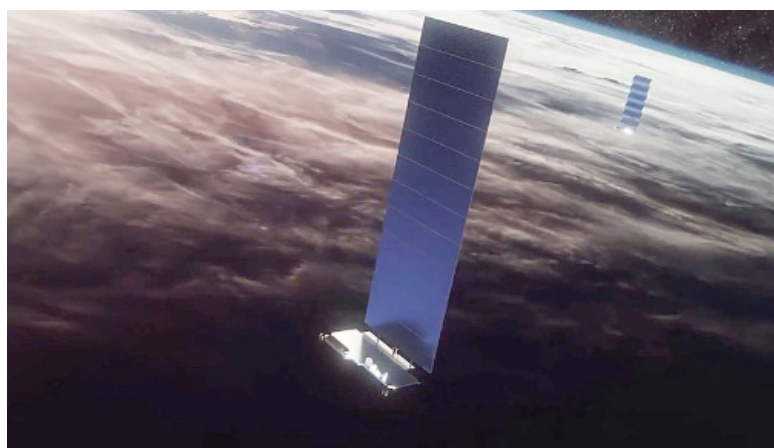
i co ważne, w użyciu cywilnym. Na zdjęciu 3. widoczny jest obraz z satelity Google Earth z 2014 roku, gdzie algorytm analizując zdjęcia powierzchni pozwalał zaobserwować liczbę samochodów parkujących na danym parkingu w ciągu tygodnia [7].

Aktualnie Google Earth wykorzystuje już bardziej zaawansowane techniki satelitarne, lecz sposoby zasilania satelitów są podobne. Obecnie w 2023-2025 roku największą flotę satelitów prawdopodobnie stanowi Starlink firmy SpaceX (5000 satelitów w 2023 r.). Z danych dostępnych w Internecie z dnia 09.09.2024 roku flotę Starlink stanowiło 3283 pracujących



RYSUNEK 3. Obraz z satelity SkyBox dla Google Earth z 2014 roku. Analiza zdjęcia pozwalała zaobserwować liczbę samochodów parkujących na danym parkingu w ciągu tygodnia [7].

w 12 grupach (Rys. 4). Liczebność satelitów w grupach wahała się od 23 do 1410 urządzeń [8].



RYSUNEK 4. Wizualizacja satelity Starlink firmy SpaceX z widocznym modulem fotowoltaicznym do zasilania urządzenia [9].

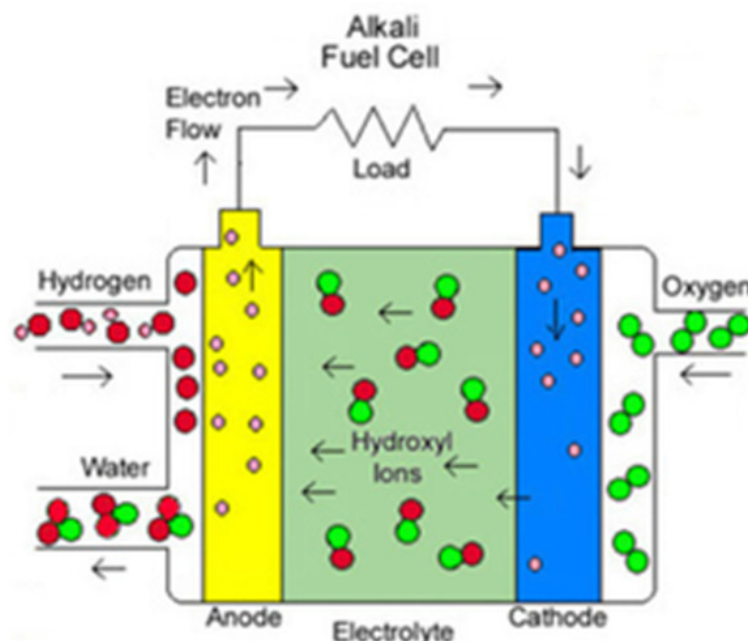
Ogniwa paliwowe w zasilaniu statków kosmicznych

Ogniwa paliwowe stanowią grupę ogniw galwanicznych. Ogniwa paliwowe dostarczają energii elektrycznej zużywając paliwo. Ogniwo jest stabilnym źródłem napięcia stałego. Paliwem zużywanym przez ogniwa może być wodór, metanol, etanol, metan, biogaz, biomasa, benzyna, hydrazyna (paliwo rakietowe) i inne substancje (w tym wykorzystane uprzednio w procesie reformingu do produkcji metanu itp.). Ogniwa paliwowe różnią

się konstrukcją, materiałem z którego jest wykonany elektrolit, temperaturą pracy. Mogą być wykorzystane do zasilania małych urządzeń mobilnych, środków transportu ale też do zasilania dużych jednostek energetyki zawodowej. Pracują jednostki o mocy rzędu kW, a nawet prototypowe układy o mocy MW, do zasilania energetyki przemysłowej (np. w USA i Japonii) [1-4, 10, 11].

Termin "ogniwo paliwowe" został po raz pierwszy użyty przez Charlesa Langer'a i Ludwiga Monda w 1889 roku, w opracowaniu dotyczącym ogniwa paliwowego wykorzystującego jako paliwo gaz węglowy. Używali elektrod wykonanych z cienkiej, perforowanej platyny i mieli wiele trudności z płynnymi elektrolitami. Udało im się uzyskać prąd sześciu amperów z 0.092903 m^2 powierzchni elektrody przy napięciu 0.73 V. W latach 1932-59 Francis Bacon (ówczesny profesor inżynierii z Cambridge) zmodyfikował stary wynalazek Monda i Langer'a, opracowując pierwsze alkaliczne ogniwo paliwowe (w skrócie AFC czyli *Alkali Fuel Cells*). Dopiero w 1959 r. Bacon zademonstrował praktyczny system ogniw paliwowych o mocy 5 kW do zasilania spawarki. Mniej więcej w tym samym czasie Harry Karl Ihrig we współpracy z Siłami Powietrznymi USA zamontował zmodyfikowane ogniwo Bacona o mocy 15 kW w ciągniku rolniczym Allis-Chalmers. System ten wykorzystywał wodorotlenek potasu jako elektrolit oraz sprężony wodór i tlen jako reagenty. Ihrig opracował następnie inne pojazdy zasilane ogniwami paliwowymi, w tym wózek widłowy, wózek golfowy i łódź podwodną. W latach 1955-1958 W. Thomas Grubb, chemik pracujący dla General Electric Company (GE), zmodyfikował projekt ogniwa paliwowego i zastosował jako elektrolit membranę jonowymienną z sulfonowanego polistyrenu. Trzy lata później w tej samej firmie inny chemik, Leonard Niedrach, opracował sposób osadzania platyny na membranie, która służyła jako katalizator niezbędnych reakcji utleniania wodoru i redukcji tlenu. Rozwiązanie stało się znane jako "ogniwo paliwowe Grubba-Niedracha" [1, 2, 12].

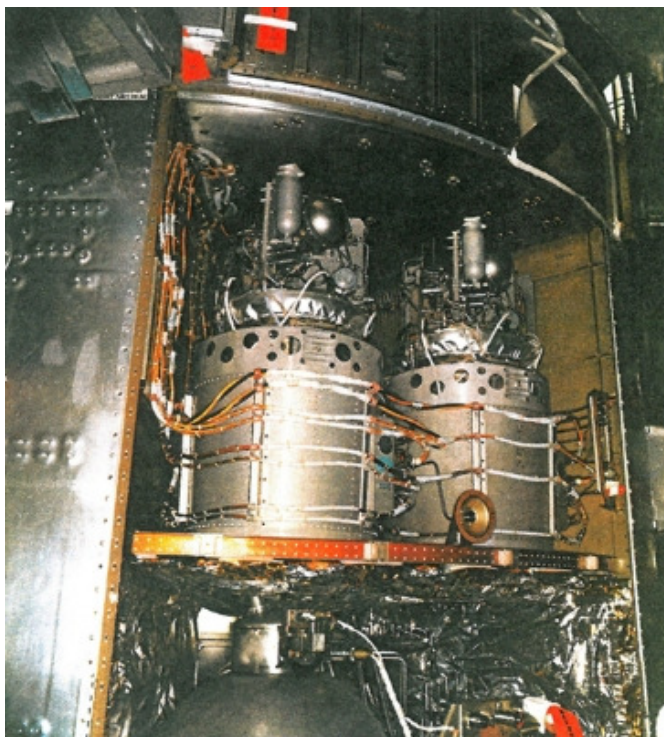
Alkaliczne ogniwa paliwowe (*Alkali Fuel Cells*) najczęściej działają na sprężony wodór i tlen. Na ogół używają wodnego roztworu wodorotlenku potasu (KOH) jako elektrolitu. Ich sprawność wynosi około 70%, a temperatura pracy to od 150 °C do 200 °C. Moc wyjściowa ogniwa wynosi od kilkuset W do 100 kW. Ogniwa alkaliczne zostały użyte w statku kosmicznym Apollo, aby zapewnić zarówno energię elektryczną, jak i wodę pitną. Wymagają jednak czystego paliwa wodorowego, a ich platynowe katalizatory elektrodowe są drogie. Niestety, mogą przeciekać (jak każdy pojemnik wypełniony cieczą). Schemat ogniwa AFC przedstawiono na rysunku 5.



RYSUNEK 5. Schemat alkalicznego ogniwa paliwowego (Alkali Fuel Cells). Wodór na anodzie ulega katalitycznemu rozpadowi na proton i elektron. Elektrony wytwarzają siłę elektromotoryczną w obwodzie elektrycznym. Tlen dostarczany jest na katodę ogniwa. Ulega katalitycznemu rozpadowi a powstające jony hydroksylowe wędrują przez elektrolit w kierunku anody. Elektrolit stanowi wodny roztwór wodorotlenku potasu (KOH). Na anodzie jony tlenu reagują z jonami wodoru i powstaje woda. Para wodna jako efekt spalania jest usuwana z procesu [11].

Ogniwa paliwowe skonstruowane w latach 1950-tych nie znalazły praktycznego zastosowania aż do momentu, w którym Stany Zjednoczone zdecydowały się wykorzystać ogniwa z membranami polimerowymi. Ogniwa wykorzystano jako źródło elektryczności i wody w pojazdach kosmicznych. W ogniwa paliwowe zostały wyposażone takie statki jak np. Gemini 5, statki w programie Apollo, w tym pechowy Apollo 13, oraz stacja orbitalna Skylab [12-15].

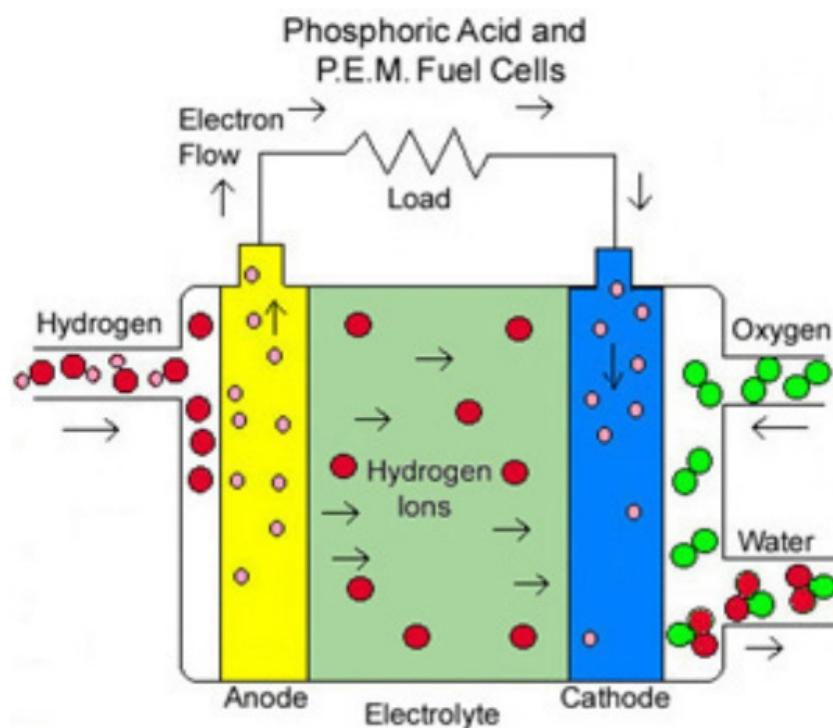
Do produkcji ogniw paliwowych stosowano w latach 1960- i 1970-tych wówczas niezwykle drogie materiały, a do ich działania były potrzebne bardzo wysokie temperatury oraz tlen i wodór o niskim poziomie zanieczyszczenia. Koszt ich wytworzenia sięgał wówczas 100 tysięcy dolarów za kilowat, jednak zdecydowano się na ich użycie, gdyż wodór i tlen wykorzystywano jako paliwo i dzięki temu na statkach kosmicznych były dostępne w dużych ilościach. Dodatkowym atutem ogniw była produkcja wody pitnej na potrzeby załóg. Firma International Fuel Cells (IFC, później UTC Power) opracowała ogniwo AFC o mocy 1.5 kW, które miało być wykorzystywane w misjach kosmicznych Apollo. Następnie firma IFC opracowała ogniwo AFC o mocy 12 kW, wykorzystywane do zasilania pokładowego podczas wszystkich lotów promów kosmicznych. Największą wadą tych



RYSUNEK 6. Ogniwa paliwowe na pokładzie jednego ze statków wykorzystanych w programie kosmicznym Apollo [14].

ogniów była obecność żrącego wodorotlenku potasu w elektrolicie. Żrąca ciecz mogła uszkodzić obudowę, poparzyć członków załogi i stanowiła duże zagrożenie w czasie lotu dla wyposażenia pojazdu.

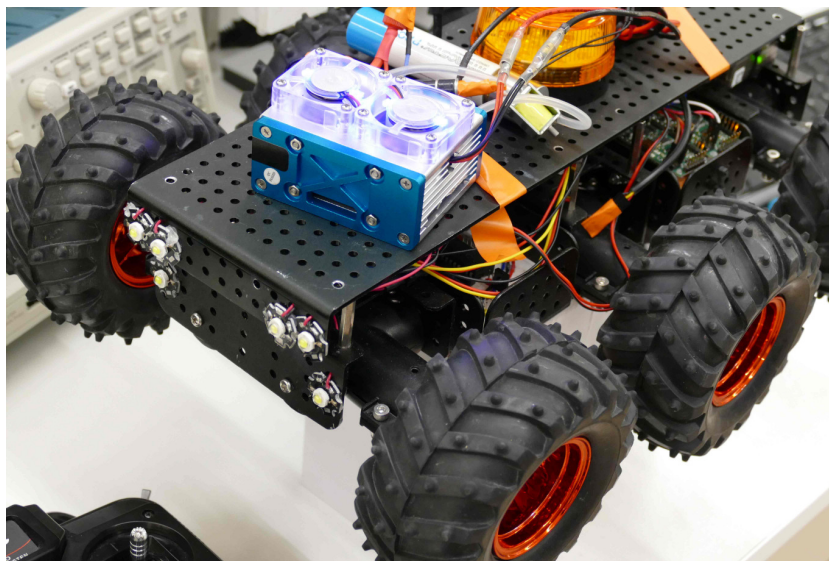
Firma General Motors w 1966 opracowała pierwszy pojazd drogowy napędzany ogniwami paliwowymi. Był to Chevrolet Electrovan, który miał ogniwo paliwowe z membraną polimerową (PEM czyli Polymer Electrolyte Membrane – Fuel Cell, czasem też opisane jako Proton Exchange Membrane – FC) firmy Union Carbide. Pojazd miał zasięg prawie 200 km i osiągał prędkość 100 km/h. Miał tylko dwa miejsca siedzące, ponieważ stos ogniw paliwowych oraz duże zbiorniki wodoru i tlenu zajmowały tylną część furgonetki. Zbudowano tylko jeden egzemplarz, a projekt uznano za nieopłacalny. Ważnym osiągnięciem w rozwoju ogniw tego typu było opracowanie przez Walthera Grota z firmy DuPont w latach 1967-69 nafionu. Ten polimer zrewolucjonizował technikę ogniw paliwowych. Jest to syntetyczny kopolimer tetrafluoroetenu (monomeru teflonu) i perfluorowanego eteru oligowinyloвого zakończonego silnie kwasową resztą sulfonową. Nafion najczęściej formowany jest w postaci cienkiej folii i wykorzystywany jako membrana przewodząca protony (tzw. jonomer). Jednocześnie materiał ten nie przewodzi elektronów lub anionów. Ogniwa paliwowe typu PEM do zastosowań kosmicznych opracowywano w NASA w programie



RYSUNEK 7. Schemat ogniwa paliwowego z membraną polimerową (PEM czyli Polymer Electrolyte Membrane - Fuel Cell). Wodór na anodzie ulega katalitycznemu rozpadowi na proton i elektron. Elektrony wytwarzają siłę elektromotoryczną w obwodzie elektrycznym. Protony wędrują w kierunku katody przez polimerowy elektrolit. Tlen dostarczany jest na katodę ogniwa. Na katodzie katalizowana jest reakcja wiązania wodoru z tlenem i powstaje woda. Para wodna jako efekt spalania jest usuwana z procesu [11].

STS Space Shuttle w latach 1972-2011. Pierwszy lot wahadłowca Columbia odbył się dopiero w 1981 roku. Moc ogniów wynosiła 12 kW (średnio 7 kW). Typ zastosowanych ogniów to polymer electrolyte membrane (PEM) – czyli zastosowano stałe elektrolity polimerowe z membrany z nafionu (perfluorosulfonic acid ionomer/jonomer kwasu perfluorosulfonowego). Ten typ elektrolitu przewodził protony (jony H^+). Określono je jako ogniwa „przyszłości”. Ich sprawność była 8 razy większa niż ogniów typu AFC (z misji Apollo). Miały aż trzy zastosowania. Zapewniały załogom statków energię elektryczną do zasilania układów oraz ciepło i wodę do picia. Jeśli chodzi o konstrukcję ogniwa paliwowego to największą zaletą elektrolitu z polimeru była duża elastyczność i lekkość materiału, całkowity brak cieczy która mogłaby wycieknąć z ogniwa i całkowity brak substancji żrących czy trujących. Elektrolit z membrany polimerowej pozwalał na temperaturę pracy 50-100 °C (są to zatem ogniwa niskotemperaturowe). Mają średnią sprawność (50-70%) i małe moce (100 W - 500 kW). Paliwem jest wodór lub wodór z reformingu. Katalizator w ogniwie to platyna, co wpływa na jego wyższą cenę. Obecnie ten typ, po okresie zastosowań tylko kosmicznych, coraz częściej znajduje zastosowanie w wielu technologiach

cywilnych, w tym w telekomunikacji, napędach (Rys. 8), do zasilania jako rozproszone lub awaryjne źródła energii [12-15].



RYSUNEK 8. Ogniwo paliwowe z membraną polimerową PEM 20W zasilające model łazika. Katedra elektrotechniki Akademii Tarnowskiej, 2017.

Technologia ogniw paliwowych PEM zasilanych wodorem przenika do powszechnych zastosowań. We wrześniu 2020 roku na całym świecie zarejestrowanych było około 20 tys. samochodów wodorowych. Jak wynika z raportu serwisu Gospodarka, około 50% floty wodorowej jeździ w Stanach Zjednoczonych (większość w Kalifornii), 25% w Japonii, 11% w Unii Europejskiej i 8% w Korei Południowej. W Polsce w 2020 roku liczba samochodów napędzanych wodorem wzrosła z siedmiu (sztuk) w kwietniu do 53 w maju – Grupa Polsat zakupiła kilkadziesiąt aut do swojej floty. 1 czerwca 2021 r. Polsat uruchomił w warszawskiej siedzibie pierwszą w kraju stację tankowania wodoru. Wodorowe autobusy produkowane w Polsce przez firmę Solaris jeżdżą w miastach na naszym kontynencie, m. in. 13 autobusów w Urbino we Włoszech a 12 zamówił Frankfurt w Niemczech. W Polsce na razie odbyły się jedynie testowe przejazdy m.in. w Gdańsku, Gdyni, Krakowie i Poznaniu. O dofinansowanie rozwoju miejskiej floty wodorowej wystąpiły w 2021 roku do NFOŚiGW Poznań, Włocławek i Chełm. Lublin z kolei planuje zakupić autobus zasilany wodorem wraz z instalacją do tankowania [16]. W Polsce od 2023 pracuje też jedna lokomotywa z napędem wodorowym w oparciu o ogniwa PEM. Jest to lokomotywa firmy PESA w Bydgoszczy (Rys. 9.).

Odmianą ogniw typu PEM są ogniwa rewersyjne. Modyfikacja polega na tym, że w jednym urządzeniu mamy elektrolizer i ogniwo. Jeśli ogniwo jest podłączone do napięcia to pracuje jako elektrolizer. Rozkłada



RYSUNEK 9. Lokomotywa firmy PESA w Bydgoszczy zasilana wodorem (7-12-2024). (fot. B. Zacher, K. Smosna, K. Lasota).

katalitycznie wodę na gazowy wodór i gazowy tlen. To samo urządzenie może następnie pracować jako właściwe ogniwo paliwowe. W wyniku reakcji katalitycznych w ogniwie będzie zużywany wodór i tlen, a ogniwo będzie dostarczało wody i energii elektrycznej, oraz dodatkowo ciepła [2, 3, 11]. Ogniwa PEM i ogniwa rewersyjne stosowane były przez NASA nadal w latach 2000-nych w misjach księżycowych i marsjańskich. Są elementem systemu magazynowania energii oraz zasilania rezerwowego. System magazynowania energii opracowano w NASA w 1980 roku na potrzeby misji na Księżyc i na Marsa. Podstawą zasilania pojazdów kosmicznych w tych misjach jest system przedstawiony schematycznie na Rys. 10, składający się z: a) ogniw paliwowych, b) elektrolizera, c) elektrowni fotowoltaicznej, d) magazynu wodoru i tlenu (jako magazynu energii). Jeśli jest dostępna energia słoneczna to pracuje elektrownia zbudowana z ogniw fotowoltaicznych (Solar Array – PV). Energia z ogniw fotowoltaicznych (Solar Array – PV) zasila elektrolizer. Zużywana jest woda a produkowany wodór jest przechowywany. Przy braku energii słonecznej zasilanie pojazdu przejmuje ogniwo paliwowe z elektrolitem polimerowym PEM – FC. Ogniwo paliwowe zużywa wodór i produkuje energię elektryczną [17].

Misje kosmiczne zasilane ogniwami fotowoltaicznymi i ogniwami paliwowymi rozpoczęte kilkanaście lat temu nadal trwają.

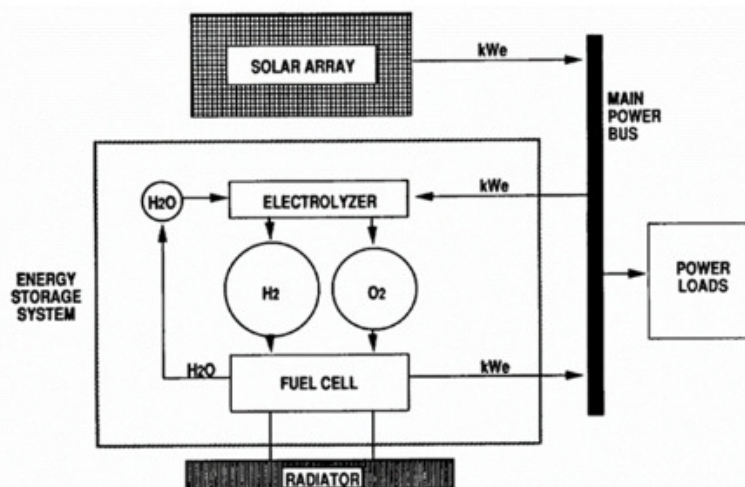


FIGURE 1: REGENERATIVE FUEL CELL SYSTEM SCHEMATIC

RYSUNEK 10. System zasilania pojazdów misji księżycowych i marsjańskich opracowany w 1989 w NASA. Składa się z: a) ogniw paliwowych (Fuel Cell), b) elektrolizera (Electrolyzer), c) elektrowni fotowoltaicznej (Solar Array), d) magazynu wodoru i tlenu (jako magazynu energii – Energy Storage System) [17].

Literatura

- [1] Andrzej Czerwiński, „Akumulatory, baterie, ogniwa” WKŁ Warszawa 2013.
- [2] Józef Paska, „Technologie rozproszonych źródeł energii”. COSiW SEP, INPE zeszyt 38 Bełchatów; 12, 2011.
- [3] Józef Paska, „Wybrane aspekty wykorzystania rozproszonych źródeł energii”. COSiW SEP, INPE zeszyt 46 Bełchatów; 12, 2013.
- [4] Witold M. Lewandowski, Ewa Klugmann-Radziemska „Proekologiczne odnawialne źródła energii – kompendium”. WN PWN – Warszawa, 2017.
- [5] Bogdan Szymański, „Instalacje fotowoltaiczne – teoria i praktyka od pomysłu do realizacji.” GLOBENERGIA Sp. Z o.o., Kraków 2023.
- [6] fotografia: Matt McDonald. Tekla S. Perry, „Google and Satellite-Imaging Startup Skybox Go From Neighbors to Family Google’s \$500 million purchase of Skybox will give the search giant faster updates of map images and a path to worldwide Internet access.” IEEE Spectrum. 11 Jun 2014, <https://spectrum.ieee.org/google-and-satelliteimaging-startup-skybox-go-from-neighbors-to-family>
- [7] fotofotografia: UrtheCast. Jean Kumagai, „9 Earth-Imaging Start-ups to Watch A tech boom will shake up commercial satellite imaging.” IEEE Spectrum. 28 Mar 2014, <https://spectrum.ieee.org/9-earthimaging-startups-to-watch>
- [8] Starlink – SpaceX satellite internet service. Dostęp: 6.01.2025, <https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink>
- [9] Wizualizacja udostępniona przez firmę Starlink. Juan Antonio Pascual Estapé. Las tormentas solares han destruido más de 200 satélites de Starlink en dos meses. Computer-hoy. 20 sep. 2023, <https://computerhoy.20minutos.es/internet/tormentas-solares-han-destruido-200-satelites-starlink-dos-meses-1307772>
- [10] Katalog firmy Horizonfuelcell , dostęp 06.12.2025, https://www.horizonfuelcell.com/_files/ugd/3dfa4c_2d19882acf3843fe8cae351183a2d93a.pdf
- [11] „Fuel Cells” – materiały szkoleniowe firmy Horizon Educational 2020 (CD).

- [12] Ogniwa paliwowe – kalendarium. Serwis E-MłodyTechnik, dostęp 07.12.2024, <https://mlodytechnik.pl/eksperymenty-i-zadania-szkolne/wynalazczosc/30876-ogniwa-paliwowe>
- [13] Report of Apollo 13 Review Board - 1970-06-15. <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/static/history/afj/ap13fj/pdf-hr/01-report-of-apollo13-review-board.pdf>
- [14] Andy Saunders, „Apollo 13 – Service Module Damage: A Photographic Analysis” Apollo Flight Journal, <https://www.nasa.gov/history/afj/ap13fj/a13-sm-damage.html>
- [15] Lista misji NASA. Dostępne 07.01.2025, https://pl.wikipedia.org/wiki/Lista_misji_NASA
- [16] Zielony wodór: szansa na zeroemisyjną gospodarkę. Magazyn ciepła systemowego z dn 08-07-2021, <https://magazynieplsystemowego.pl/rynek/zielony-wodor-szansa-na-zeroemisyjna-gospodarke/>
- [17] Marvin Warshay and Paul R. Prokopius, The Fuel Cell in Space – Today and Tomorrow. NASA Technical Memorandum 102366, Fuel Cell Symposium by the Royal Institution London, Great Britain, September 18-21, 1989

Badanie zjawisk akustycznych generowanych przez wejścia atmosferyczne obiektów kosmicznych

Piotr M. Strzelczyk¹, Adrian Kordos¹, Damian Kordos²

¹ Katedra Inżynierii Lotniczej i Kosmicznej, Politechnika Rzeszowska

² Katedra Awioniki i Systemów Sterowania, Politechnika Rzeszowska

Streszczenie: W pracy zostały przedstawione badania podjęte przez nasz zespół dotyczące detekcji śladów fal uderzeniowych generowanych wejściami atmosferycznymi meteoroidów i tzw. śmieci kosmicznych. W ramach prowadzonych prac został skonstruowany zestaw mikrobarometryczny do rejestracji przebiegów akustycznych o niskich częstotliwościach. System ten będzie rozbudowywany i docelowo wzbogacony o radiolokator pasywny. Przeprowadzone zostały obserwacje mające na celu sprawdzenie czułości aparatury oraz wyboru korzystnej lokalizacji z uwagi na poziom tła akustycznego. Jako źródła sygnałów wykorzystano roje meteorów: Geminidy, Kwadrantydy i Eta Kwadrantydy.

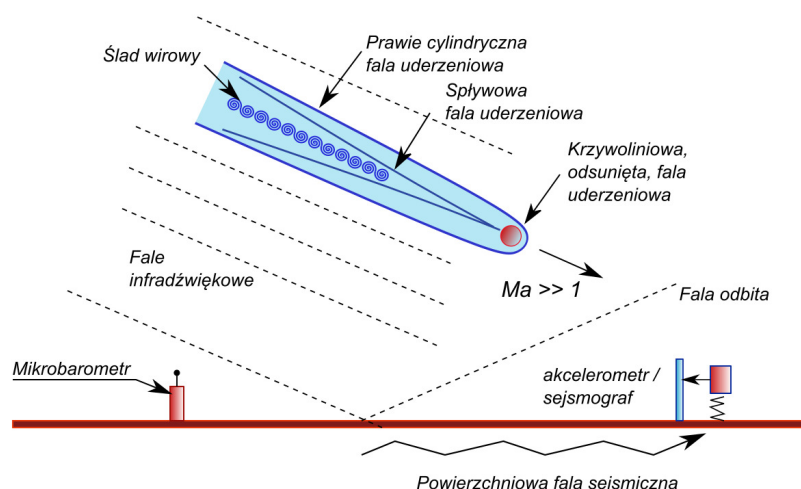
Wprowadzenie

Zakres prędkości meteoroidów podczas wejścia w atmosferę wynosi 12...72 km/s, co odpowiada liczbom Macha $Ma = 43 \dots 257$, dla prędkości dźwięku $a = 280$ m/s, na wysokości geopotencjalnej $H = 95$ km w pobliżu wysokości tzw. linii von Kármána. Najszybsze obiekty wykonane przez człowieka osiągnęły ok. $Ma = 40$, np. lądowniki sond kometarnych „Stardust”, czy „Hayabusa” [1].

Średnia częstotliwość wejść w atmosferę meteoroidów o średnicy poniżej 10 m wynosi ok. 1 na godzinę. Ciała o średnicy ok. 20 m wchodzą do atmosfery z częstotliwością 1 na 50 ... 100 lat. Typowy zakres wielkości meteoroidów to 1-10 mm, a średnia masa materii naturalnej wchodzącej w atmosferę ziemską to ok. 100 ton/dobę [2-4].

Gdy warunki atmosferyczne nie pozwalają dokonać obserwacji wizualnych, fotograficznych lub wideo, można przeprowadzić obserwacje radiowe i akustyczne [5-7]. W tych przypadkach rejestracji meteorów można dokonać w warunkach światła dziennego. Jest to możliwe dzięki temu, że długie fale akustyczne, infradźwięki, wykazują mniejsze rozproszenie na kropelkach wody lub kryształkach lodu w powietrzu w porównaniu z wyższymi częstotliwościami, jednakowoż na skutek stratyfikacji termicznej atmosfery kanał propagacji sygnału nie jest prostoliniowy [8, 9].

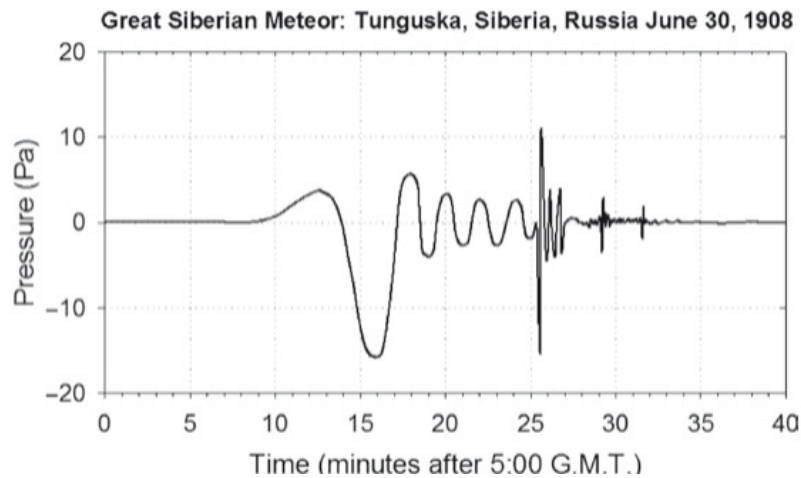
W przepływie hipersonicznym, przednia fala uderzeniowa obejmuje przód ciała, a z tyłu tworzy się prawie cylindryczna warstwa uderzeniowa. To samo dotyczy fali spływowej. Rezultatem jest prawie cylindryczna powierzchnia fali uderzeniowej w śladzie aerodynamicznym meteoroidu. Przy dużych odległościach ślad może być traktowany jako liniowe źródło dźwięku: hipersoniczna fala uderzeniowa zmienia się w falę infradźwiękową. Przebieg czasowy sygnału infradźwiękowego dla meteoru jest bardzo podobny do fali N, obserwowanej w przypadku gromu dźwiękowego generowanego przez samolot naddźwiękowy (np. [9]).



RYSUNEK 1. Hipersoniczna fala uderzeniowa wywołana wejściem atmosferycznym obiektu kosmicznego. Schemat.

Możliwy jest więc do prowadzenia monitoring środowiska okołoziemskiego poprzez detekcję meteorów oraz efektów towarzyszących wejściom w atmosferę statków kosmicznych i śmieci kosmicznych. Nadto możliwe jest badanie zjawisk meteorologicznych np: turbulencji czystego nieba, burz, trąb powietrznych, śladów aerodynamicznych samolotów. Tą drogą można nawet podjąć próby detekcji hipotetycznych, słabo oddziałujących masywnych cząstek: WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles), takich jak np. aksjony [10].

Najbardziej znanymi zdarzeniami meteorowymi, które zostawiły wyraźny ślad aeroakustyczny były: Podkamienna Tunguzka (1908), eksplozja atmosferyczna Moravka (2003), impakt Neuschwanstein (2004), impakt Carnacas (2007), impakt Indonezja (2009), Czelabińsk (2013), Kijów (2023), Riebeck (2024), impakt szczątków planetoidy 2024 BX1.



RYSUNEK 2. Barogram ze zdarzenia w okolicach Podkamiennej Tunguzkiej, 30 czerwca 1908. [11]

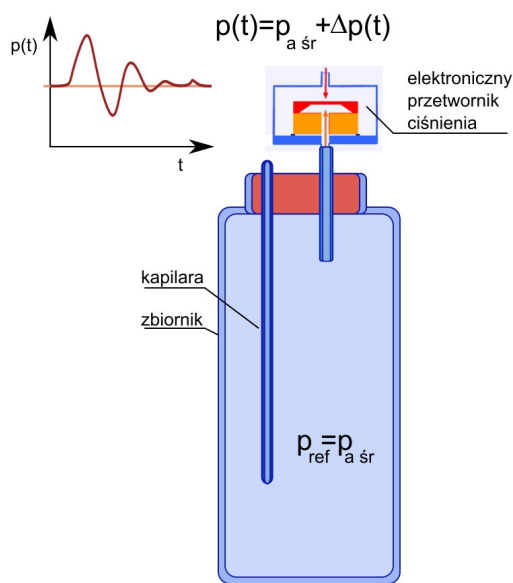
System pomiarowy

W ramach prowadzonych prac został skonstruowany zestaw mikrobarometryczny do rejestracji przebiegów akustycznych o niskich częstotliwościach. System ten będzie rozbudowywany i docelowo wzbogacony o radiolokator pasywny. Głównym elementem układu pomiarowego jest przepływowy przetwornik ciśnienia z zakresem pomiarowym ± 125 Pa.

Ponieważ dokonujemy pomiaru różnicowego, przetwornik ciśnienia połączony jest jednym króćcem z otwartą przestrzenią, drugim do zbiornika referencyjnego. Zbiornik referencyjny ma formę naczynia Dewara, w celu redukcji oddziaływań akustycznych i termicznych na jego zawartość. Zbiornik jest również umieszczony w rurowej otulinie ze spienionego polietylenu, aby poprawić jego izolację termiczną. Wnętrze zbiornika połączone jest długą kapilarą (igła punkcyjna), w celu uśredniania ciśnienia w zbiorniku w trakcie pomiaru.

Zestaw mikrobarometryczny uzupełnia mikrokontroler i moduł radiowy WiFi, umożliwiający w terenie otwartym na komunikację z komputerem na dystansach do maksimum 150 m. Schemat mikrobarometru przedstawia Rys. 3.

Bazę pomiarową zorganizowano w formie trójkąta o dwóch ramionach rzędu 100 m, a to ze względu na prędkość dźwięku w powietrzu, która przy ziemi w warunkach normalnych ma wartość $a = 340$ m/s. Istotne jest bowiem otrzymanie wyraźnej różnicy w czasie przybycia sygnału pomiędzy poszczególnymi detektorami. Różnica w czasie przybycia pozwala na wyznaczenie kierunku nadejścia tego sygnału, zaś czas trwania zjawiska pozwala na oszacowanie energii zjawiska.



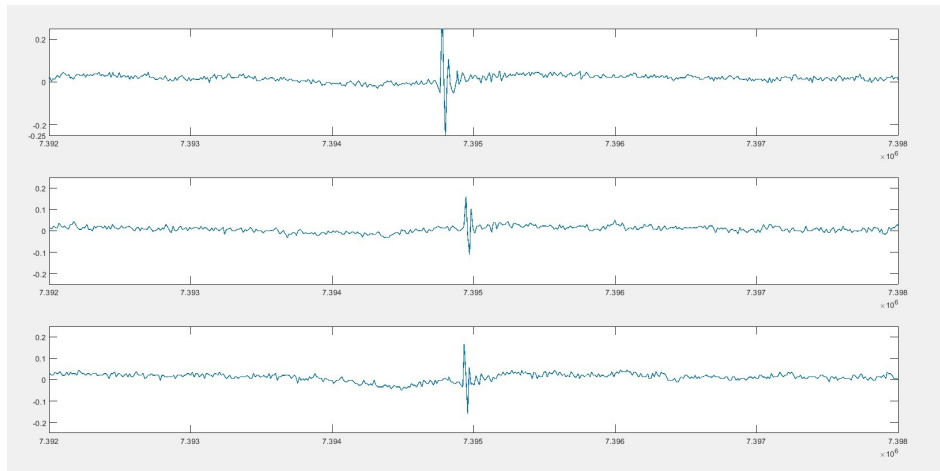
RYSUNEK 3. Schemat mikrobarometru konstrukcji autorów.

Przykłady rejestracji meteorów

Przeprowadzone zostały obserwacje mające na celu sprawdzenie czułości aparatury oraz poprawności wyboru lokalizacji (z uwagi na poziom naturalnego i antropogenicznego tła akustycznego). Jako źródła sygnałów wykorzystano roje meteorów: Geminidy, Kwadrantydy i Eta Kwadrantydy.

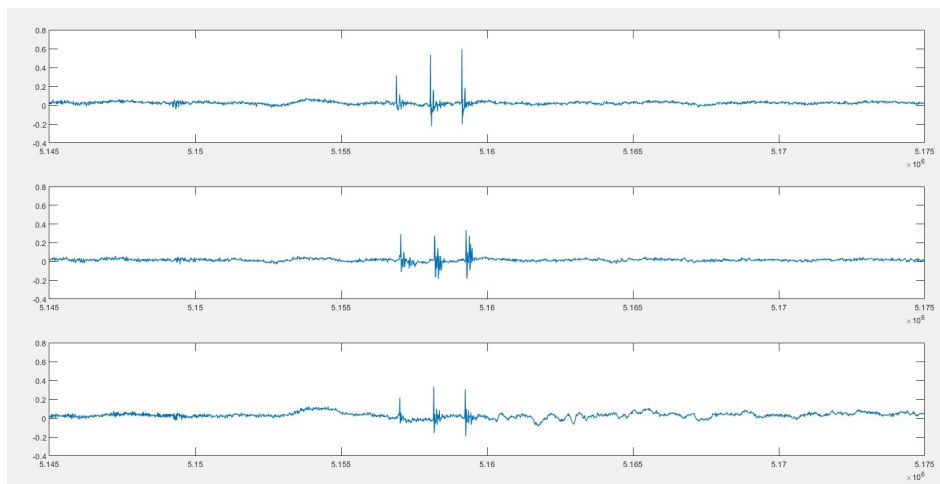
Niżej przedstawione zostały wybrane przykłady rejestracji sygnałów pochodzenia meteorowego. Na Rys. 4. przedstawiono przykładowy mikrobarogram przedstawiający falę N od wejścia atmosferycznego.

Ponieważ jedno z ramion bazy pomiarowej było zorientowane w kierunku E-W a drugie N-S, fala przybyła najpierw do przetwornika wyeksponowanego na południe, a następnie niemal równocześnie do czujnika wschodniego i zachodniego, pozwala to wstępnie stwierdzić, że przylot nastąpił z kierunku południowego. Oczywiście potrzebne byłyby tu korekty



RYSUNEK 4. Mikro-barogram z 14 grudnia 2023 r. Miejsce obserwacji, Rzeszów-Słocina.

ze względu na wiatry przyziemne i geostroficzne. Znaczna amplituda ciśnienia sugeruje dość duży meteoroid. Według [12] jest to zjawisko Klasy II.



RYSUNEK 5. Rejestracja trypletu z 14 grudnia 2024 r.
Godzina 21:11 (19:56 + 5145 s) CET.

Inny ciekawy przykład pokazany jest na Rys. 5. Jest to dość zagadkowy wykres przedstawiający prawie równoczesne sygnały, dla wszystkich trzech kanałów pomiarowych. Wskazuje to na trzy źródła poruszające się razem, przybywające z północnego wschodu. Być może jest to obraz akustyczny obiektu, który uległ fragmentacji.

Uwagi końcowe

Przeprowadzone dotąd prace pokazują na spory potencjał badawczy tej metody badań. Tym bardziej, że jest to zagadnienie w Polsce szerzej nie

znane. Ponadto pierwsze obserwacje dało się przeprowadzić w niesprzyjających warunkach atmosferycznych: marzący deszcz i śniego-deszcz. Dalsze prace będą wiodły w kierunku rozbudowy bazy danych obserwacyjnych oraz sposobu ich analizy. Przewiduje się zastosowanie korelacji sygnałów w celu umożliwienia precyzyjnego określania różnic w czasie przybycia fali, triangulacyjnego określenia kierunku przybycia sygnału i wyznaczenia przybliżonego położenia obiektu, metodą całkowania wstecz po czasie. Analiza dopplerowska powinna pozwolić na obliczenie prędkości względem topocentrum.

Przewiduje się rozbudowę systemu o kolejne mikrobarometry, a w przyszłości wsparcie systemu koherentnym radarem pasywnym na pasmo krótkofalowe 6 m.

Literatura

- [1] Yamamoto M. i in. 2011, Detection of Acoustic/Infrasonic/Seismic Waves Generated by Hypersonic Re-Entry of the HAYABUSA Capsule and Fragmented Parts of the Spacecraft, Publ. Astron. Soc. Japan 63, 971-978
- [2] Cooke W.J. (red.), 2011, Meteoroids: The Smallest Solar System Bodies, NASA/CP-2011-216469
- [3] Love S.G., Brownlee D.E., 1993, A direct measurement of the terrestrial mass accretion rate of cosmic dust, Science, 262, 550-553
- [4] Mathews J.D. i in. 2001, The micrometeoroid mass flux into the upper atmosphere: Arecibo results and a comparison with prior estimates, Geophysical Research Letters (American Geophysical Union), Vol. 28, Iss: 10
- [5] McKinley D.W.R., 1961, Meteor Science and Engineering, McGraw-Hill, New York
- [6] Zgrablić G. i in. 2002, Instrumental recording of electrophonic sounds from Leonid fireballs, J. of Geophysical Research, Vol. 107, No. A7, 10.1029/2001ja000310
- [7] Fielding J., ZS5JF, 2016, Amateur Radioastronomy, Radio Society of Great Britain, Bedford
- [8] Liszka L.J., 2008, Listening to Meteors, IFR Sc. Rep. No. 295, Umel
- [9] Tarnogrodzki A., 2003, Dynamika Gazów, WKiŁ Warszawa, 120-126
- [10] Budker D. i in. 2022, Infrasonic, Acoustic and Seismic Waves Produced by the Axion Quark Nuggets, Symmetry, 14, 459
- [11] Revelle D.O. i in., Entry dynamics and acoustics/infrasonic/seismic analysis for the Neuschwanstein meteorite fall, Meteoritics & Planetary Science 39, Nr 10, pp.1605-1626
- [12] Silber E.A., 2013, Infrasound as a scientific tool to study meteors, IMC Poznań 22-23 sierpień

Wpływ ekstremalnych warunków stratosferycznych na skład chemiczny ciasta w aspekcie niekonwencjonalnego transportu żywności

Agata Lada, Michał Marek, Dominik Zdzieszński,
Piotr Simajchel

Akademia Tarnowska, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Katedra Chemii

Streszczenie: Problem transportu żywności przez stratosferę bez użycia specjalistycznych pojemników ochronnych stał się impulsem do przeprowadzenia badań, które mogą przyczynić się do lepszego zrozumienia tego zagadnienia. Przedmiotem analizy był kawałek ciasta składający się z warstw biszkoptu, kremu, bezy oraz liści mięty. Umieszczenie go na około dwie godziny w stratosferze było możliwe dzięki wysłaniu balonu stratosferycznego podczas misji „BEM1” zorganizowanej przez Wydział Politechniczny Akademii Tarnowskiej w dniu 27.04.2024 r. Po przechwyceniu balonu wraz z ładunkiem niezwłocznie przystąpiono do badań laboratoryjnych w celu oceny stopnia degradacji białek w badanej próbce ciasta. W tym celu wykonano oznaczenie azotu metodą Kjeldahla [1]. Aby określić stopień dehydratacji badanej żywności, przeprowadzono analizę wilgoci metodą suszarkowo-wagową. Spektroskopia w podczerwieni (FTIR) posłużyła do rejestracji widm poszczególnych warstw ciasta, które następnie porównano z widmami próbki kontrolnej. Wyniki badań stały się podstawą do dyskusji na temat transportu żywności przez stratosferę.

Wprowadzenie

Rozwój technologii kosmicznych w ciągu ostatnich ośmiu dekad otworzył nowe możliwości badawcze, umożliwiając analizę oraz lepsze poznanie warunków panujących poza Ziemią. Stratosfera, która jest warstwą atmosfery ziemskiej nad troposferą, rozciąga się od jej dolnej granicy na wysokości od 8 do 16 km, aż do górnej granicy ok. 50 km [2]. Stanowi ona również nowe środowisko do prowadzenia badań z uwagi na niskie ciśnienie i temperatury oraz zwiększoną ekspozycję na promieniowanie, umożliwiając pozyskanie danych dotyczących wpływu ekspozycji badanych próbek

na ekstremalne warunki. W niniejszym badaniu przeanalizowano wpływ warunków stratosferycznych na wysokości 32 km na strukturę chemiczną ciasta, ze szczególnym uwzględnieniem zawartości białka i wody oraz liczebności mikroorganizmów.

W tym celu zastosowano cztery metody analityczne: metodę wagową do oznaczania wilgotności, metodę Kjeldahla do analizy zawartości białka, spektroskopię w podczerwieni FTIR (ang. Fourier-Transform Infrared Spectroscopy) do kompleksowej oceny składu chemicznego próbek oraz analizę mikrobiologiczną do wyznaczenia ogólnej liczby mikroorganizmów w badanych ciastach.

Warunki eksperymentu

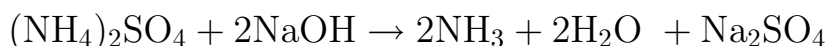
Badany kawałek ciasta został zapakowany w pojemnik wykonany w całości ze spienionego polistyrenu (styropianu) o grubości ścianek ok. 5 cm. Krawędzie pojemnika na styku ścianek zostały zabezpieczone taśmą izolacyjną. Ładunek wysłany do stratosfery po 1 godzinie i 40 minutach osiągnął wysokość 32831 m. Na osiągniętej wysokości rejestrator danych wyposażony w czujniki temperatury, wilgotności i ciśnienia zarejestrował temperaturę zewnętrzną na poziomie -2.7°C , temperaturę wewnątrz sondy wynoszącą 21°C , ciśnienie atmosferyczne 11.9 hPa oraz wilgotność 0 %. Próbką była wystawiona na warunki stratosferyczne przez 1 godzinę i 15 minut [3]. Wszystkie opisane analizy przeprowadzono w ciągu 5 godzin od momentu pozyskania próbki po lądowaniu sondy.

Metody badawcze i materiały

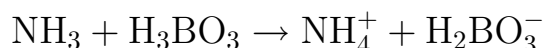
Próbkę badawczą stanowił kawałek ciasta, przygotowany na potrzeby badania, składający się z warstw biszkoptu, kremu, bezy oraz liści mięty. Każda z tych czterech warstw ciasta została zbadana metodą FTIR, natomiast wilgotność, zawartość białka oraz liczba mikroorganizmów zostały oznaczone jedynie dla warstwy biszkoptu. Oznaczanie wilgotności w próbkach żywności przy użyciu metody wagowej to podstawowa technika stosowana do oceny zawartości wody w materiałach organicznych. Metoda opiera się na zmianie masy próbki po jej uprzednim wysuszeniu w suszarce laboratoryjnej, a utracona masa jest wykorzystywana do obliczenia zawartości wilgoci w badanej próbce [4].

Metoda Kjeldahla, opisana w normie PN-75/A-04018, wykorzystywana jest do oznaczenia zawartości białka i opiera się na przeprowadzeniu organicznych związków azotu w próbce do siarczynu(VI) amonu $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$ w obecności stężonego kwasu siarkowego(VI) (H_2SO_4) oraz katalizatora.

W wyniku przeprowadzonego procesu mineralizacji następuje uwolnienie azotu w formie amoniaku (NH_3). Po zakończeniu mineralizacji, otrzymany roztwór jest alkalizowany wodorotlenkiem sodu (NaOH). W wyniku tego procesu amoniak zostaje uwolniony z siarczanu amonu. Uwolniony amoniak ulega destylacji wraz z parą wodną i jest przenoszony bezpośrednio do roztworu kwasu borowego (H_3BO_3), zawierającego wskaźnik Tashiro, gdzie zostaje związany. Reakcja alkalizacji przebiega zgodnie z równaniem:



Po uwolnieniu i przeniesieniu do roztworu kwasu borowego, gazowy amoniak reaguje z cząsteczkami kwasu borowego, w wyniku czego dochodzi do utworzenia kationów amonowych i anionów diwodoroboranowych (V) zgodnie z reakcją:



Ostatni etap analizy polega na miareczkowaniu otrzymanego roztworu mianowanym roztworem kwasu solnego (HCl), co pozwala na oznaczenie ilości azotu w badanej próbce. Zawartość azotu jest przeliczana na zawartość białka w próbce przy zastosowaniu odpowiedniego współczynnika przeliczeniowego, specyficznego dla danego produktu żywnościowego i określonego w normie [1], [5].

Analiza ogólnej liczby mikroorganizmów w produktach żywnościowych jest najczęściej stosowaną techniką oceny liczebności drobnoustrojów w żywności. Metoda polega na przygotowaniu szeregu rozcieńczeń, a następnie wykonaniu posiewów mikrobiologicznych na agarze wzbogaconym w szalce Petriego. Przygotowane szalki są pozostawione do inkubacji, gdzie mikroorganizmy rosnąc, tworzą odrębne kolonie, które następnie są zliczane [6]. Pomimo prostych założeń, metoda ta posiada ograniczenia, ponieważ nie informuje o rodzajach drobnoustrojów, które mogą rozwijać się w żywności oraz umożliwia tylko wzrost organizmom tlenowym [7].

Analiza widmowa w podczerwieni metodą FTIR jest powszechnie stosowaną techniką analityczną w badaniach żywności, umożliwiającą identyfikację oraz ilościową analizę związków organicznych i nieorganicznych na podstawie ich unikalnych pasm w widmach absorpcyjnych. Wykorzystanie tej metody w przemyśle umożliwia szybkie oraz nieniszczące próbki pomiaru, co czyni ją cennym narzędziem podczas kontroli jakości [8].

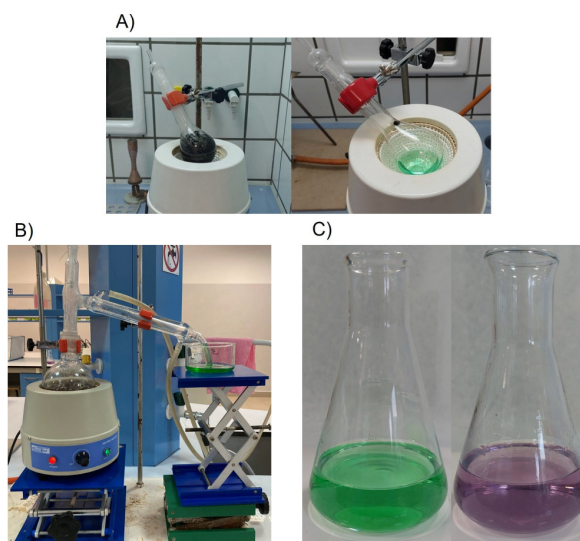
Procedura wykonania analiz

Analiza wilgoci

Próbki biszkoptu o masie około 5 g odważono na wadze analitycznej (RADWAG AS 220.R2 PLUS), a następnie umieszczono w suszarce laboratoryjnej (ZALMED SML 48/250/) i suszono w temperaturze 105 °C przez 60 minut. Po zakończeniu suszenia próbki ostudzono do temperatury pokojowej w eksykatorze przez 30 minut, aby zapobiec pochłanianiu wilgoci. Następnie ponownie zważono próbki, a różnica mas przed i po wysuszeniu posłużyła do obliczenia zawartości wody w badanej próbce biszkoptu.

Oznaczanie azotu metodą Kjeldahla

Na wadze analitycznej odważono 1.5 g próbki biszkoptu i przeniesiono do kolby Kjeldahla. Do kolby dodano 0.35 g CuSO_4 oraz 8.5 g K_2SO_4 , a następnie ostrożnie dodano 18 cm³ stężonego H_2SO_4 . Kolbę umieszczono pod wyciągiem laboratoryjnym w płaszczu grzeijnym, ustawiając ją pod kątem 30-45° względem statywu. Zawartość kolby stopniowo ogrzewano i mieszano, aby zapobiec intensywnemu pienieniu. Kolbę ogrzewano przez 60 minut od momentu uzyskania klarownego roztworu. Po zakończeniu mineralizacji kolbę pozostawiono do ostygnięcia do temperatury pokojowej, a następnie zawartość przeniesiono do kolby destylacyjnej i rozcieńczono 200 cm³ wody destylowanej. Do rozcieńczonego roztworu dodano 50 cm³ 33 % roztworu wodnego NaOH w celu alkalizacji mieszaniny. Następnie do kolby destylacyjnej dodano kilka kropel oleju parafinowego w celu ograniczenia pienienia i rozpoczęto destylację. Jako odbieralnik zastosowano krystalizator, do którego uprzednio odmierzone 25 cm³ 2 % roztworu wodnego H_3BO_3 oraz 8 kropli wskaźnika Tashiro. Krystalizator umieszczono pod chłodnicą zwrotną tak, aby końcówka rurki chłodnicy była zanurzona w przygotowanym roztworze kwasu borowego i wskaźnika. Destylację prowadzono do momentu ustania wydzielania gazowego amoniaku. Na końcu procesu destylacji opłukano zewnętrzne oraz wewnętrzne ścianki rurki chłodnicy niewielką ilością wody destylowanej. Zawartość krystalizatora przeniesiono do kolby stożkowej i miareczkowano mianowanym wodnym roztworem HCl o stężeniu 0.1 mol/dm³ do uzyskania roztworu o barwie różowofioletowej. Na podstawie zużytej objętości roztworu HCl obliczono zawartość azotu w próbce, a następnie określono procentową zawartość białka w badanym materiale za pomocą odpowiedniego współczynnika przeliczeniowego dla produktów zbożowych. Na Rysunku 1. przedstawiono poszczególne etapy wykonywania opisanego oznaczenia.



RYSUNEK 1. Poszczególne etapy oznaczenia: (A) mineralizacja próbek w kolbach Kjeldahla, (B) proces destylacji, (C) wygląd próbki przed miareczkowaniem (po lewej) i w punkcie końcowym miareczkowania (po prawej).

Analiza FTIR

Analizę widmową w podczerwieni przeprowadzono przy użyciu spektrometru Nicolet iS5, wyposażonego w przystawkę do pomiarów odbiciowych ATR (ang. Attenuated Total Reflection) (selenek cynku). Do analizy pobrano niewielkie fragmenty próbek biszkoptu, kremu, bezy oraz mięty i każdą próbkę umieszczono bezpośrednio na przystawce ATR i docisnięto. Widma IR rejestrowano w zakresie $4000\text{--}650\text{ cm}^{-1}$, przy zastosowaniu 16 skanów i rozdzielczości 2 cm^{-1} , analizę przeprowadzono w temperaturze pokojowej.

Badania mikrobiologiczne

Do oznaczenia ogólnej liczby mikroorganizmów w badanych próbkach pobrano 1 g próbki biszkoptu, którą zawieszono w 9 cm^3 jałowej wody i dokładnie wymieszano w celu uzyskania jednorodnego roztworu. Uzyskany roztwór poddano szeregowemu rozcieńczeniu, każdorazowo przenosząc 1 cm^3 zawiesiny do 9 cm^3 jałowej wody, co pozwoliło uzyskać końcowe rozcieńczenia $1:1000$ (10^{-3}) i $1:10000$ (10^{-4}) względem pierwszego.

Z końcowych rozcieńczeń pobrano po 1 cm^3 zawiesiny i wykonano posiew wgłębny na agarze wzbogaconym. Szalki Petriego inkubowano w cieplarni w temperaturze $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ przez 48 godzin. Po zakończeniu inkubacji zliczono wyrosnięte kolonie mikroorganizmów.

Wyniki i dyskusja

Otrzymane wyniki umożliwiają ocenę zmian w składzie chemicznym badanych próbek, ze szczególnym uwzględnieniem wilgotności, zawartości białka, analizy widmowej w podczerwieni oraz liczby mikroorganizmów. W Tabeli 1. zaprezentowano wyniki uzyskane podczas oznaczania wilgotności próbek metodą wagową. Wilgotność próbek (W) została obliczona z wykorzystaniem wzoru:

$$W = \frac{m_0 - m_1}{m_0} [\%]$$

gdzie: m_0 to masa próbki przed wysuszeniem, a m_1 to masa próbki po wysuszeniu do stałej masy.

TABELA 1. Wyniki wilgotności próbek.

Próbka	m_0 [g]	m_1 [g]	Zawartość wody [g]	Wilgotność [%]
Kontrolna	6.3331	4.9740	1.3591	21.46 ± 0.01
Wysłana	4.9763	4.0556	0.9207	18.50 ± 0.01

Analiza wilgotności metodą suszarkowo-wagową wykazała, że próbka kontrolna biszkoptu charakteryzowała się początkową zawartością wody wynoszącą 21.46 %, podczas gdy próbka poddana ekspozycji w stratosferze wykazała istotny spadek wilgotności do poziomu 18.50 %. Oznacza to redukcję zawartości wody o 2.96 punktu procentowego, co wskazuje na istotne odwodnienie próbki w trakcie ekspozycji na warunki atmosferyczne.

Zmiana ta jest w pełni zgodna z przewidywanym wpływem warunków panujących w stratosferze. Na wysokości 32831 m odnotowano bardzo niską wartość wilgotności względnej, wynoszącą 0 %, oraz ekstremalne różnice temperatur, które mogły prowadzić do intensyfikacji procesów sublimacji i parowania wody z próbki. Warto zauważyć, że mimo zabezpieczenia próbki w pojemniku ze spienionego polistyrenu, wymiana masy i ciepła między wnętrzem pojemnika a otoczeniem mogła zachodzić w sposób wystarczający, aby doprowadzić do obserwowanego spadku wilgotności. Wpływ niskiego ciśnienia w stratosferze mógł dodatkowo przyczynić się do ułatwienia procesu parowania wody.

W Tabeli 2. przedstawiono wyniki oznaczania azotu metodą Kjeldahla w warstwie biszkoptowej. Zostały one również przeliczone na zawartość białka w próbce. Procentową zawartość azotu w badanym produkcie (X_1) obliczono na podstawie zależności [1]:

$$X_1 = \frac{(a - b) \cdot n \cdot 1.4}{m} [\%]$$

gdzie: a to objętość mianowanego roztworu kwasu solnego zużytego do miareczkowania w próbie właściwej, b to objętość mianowanego roztworu kwasu solnego zużytego do miareczkowania ślepej próby, n to miano użytego kwasu solnego, m to masa badanej próbki, a 1.4 to ilość azotu, której odpowiada 1 cm³ roztworu wodnego 1 mol/dm³ kwasu solnego. Procentową zawartość azotu w badanej próbce, w przeliczeniu na suchą masę (X_2) obliczono według wzoru [1]:

$$X_2 = \frac{X_1 \cdot 100}{100 - W} [\%]$$

gdzie: X_1 to zawartość azotu obliczona według poprzedniego wzoru, natomiast W to wilgotność próbki. Wyznaczenie procentowej zawartości białka uzyskano poprzez pomnożenie uzyskanego wyniku X_2 przez odpowiedni współczynnik przeliczeniowy dla białka (5.70 dla produktów pszennych), przyjęty dla poszczególnych produktów żywnościowych w normie.

Na podstawie przedstawionych wyników można zaobserwować różnice w zawartości białka między próbkami kontrolnymi a tymi poddanymi ekspozycji na warunki stratosferyczne. Średnia zawartość białka w próbkach kontrolnych wynosiła 9.39 %, natomiast w próbkach wysłanych do stratosfery była niższa i wyniosła 7.89 %. Przyczyną tego zjawiska mogło być odwodnienie próbki, zaobserwowane podczas analizy wilgotności metodą wagowo-suszarkową, co mogło prowadzić do denaturacji białek. Ekspozycja na promieniowanie UV była ograniczona ze względu na fakt, iż próbka badawcza znajdowała się w zamkniętym pojemniku. Dlatego też czynnik ten nie powinien istotnie wpłynąć na zmiany w strukturze wewnętrznej białek.

TABELA 2. Wyniki analizy metodą Kjeldahla.

Próbka	Masa m [g]	Objętość titranta V [cm ³]	X_1 [%]	X_2 [%]	Zawartość białka [%]	Średnia zawartość białka [%]
Ślepa	0.4813	0.10	—	—	—	—
Kontrolna 1	1.5157	14.2	1.31	1.66	9.48	9.39
Kontrolna 2	1.5026	13.8	1.28	1.63	9.28	
Badawcza 1	1.5072	12.1	1.12	1.37	7.82	7.89
Badawcza 2	1.5048	12.3	1.14	1.40	7.96	

Dzięki zastosowaniu spektroskopii FTIR zarejestrowano widma przedstawione na Rysunku 2. Ich analiza umożliwiła dokładną ocenę zmian strukturalnych zachodzących w poszczególnych warstwach ciasta poddanych ekstremalnym warunkom stratosferycznym. Najbardziej wyraźne zmiany zaobserwowano w zakresie pasm odpowiadających obecności wody (3200-3500 cm⁻¹), wiązań amidowych w białkach (~1650 cm⁻¹), a także w regionie charakterystycznym dla drgań rozciągających grup karbonylowych

(C=O) ($\sim 1700\text{ cm}^{-1}$).

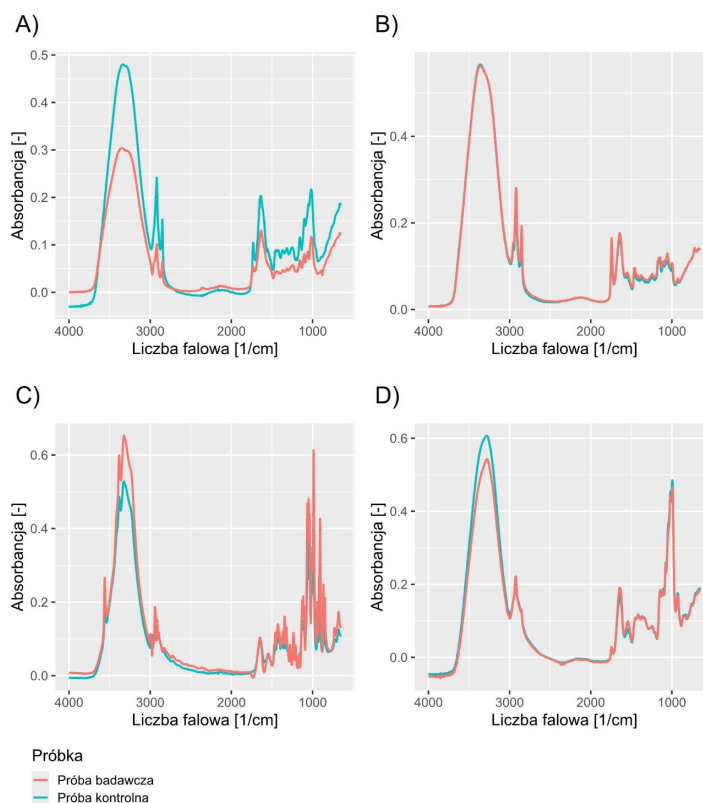
W przypadku liści mięty (Rysunek 2A) zmniejszenie intensywności pasma hydroksylowego sugeruje częściową degradację związków fenolowych oraz odparowanie lotnych składników olejków eterycznych. Jest to istotne, ponieważ olejki eteryczne odpowiadają za właściwości sensoryczne i antyoksydacyjne mięty. Ich utlenianie pod wpływem czynników zewnętrznych może prowadzić do obniżenia aktywności biologicznej związków aromatycznych oraz zmniejszenia stabilności chemicznej produktu [9].

Warstwa kremu (Rysunek 2B), zawierająca głównie białka, tłuszcze i cukry, wykazała znaczące zmiany w widmach FTIR po ekspozycji na warunki stratosferyczne. Spadek intensywności pasma przy 3300 cm^{-1} oraz osłabienie pasma amidowego przy 1650 cm^{-1} sugeruje częściową denaturację białek, co może prowadzić do zmiany tekstury kremu. Jednocześnie, wzrost intensywności pasma karbonylowego w okolicach 1700 cm^{-1} wskazuje na utlenianie lipidów, co może negatywnie wpływać na smak i trwałość przechowywanej żywności. Tego typu reakcje są charakterystyczne dla produktów bogatych w tłuszcze, które pod wpływem niskiej temperatury oraz ciśnienia ulegają degradacji, prowadząc do powstawania niepożądanych produktów [10].

Analiza bezy (Rysunek 2C), będącej w dużej mierze mieszaniną cukrów i białek jaj, wykazała istotne zmiany w zakresie pasma hydroksylowego oraz pasm związanych z drganiami C–O w polisacharydach. Obserwowane zmniejszenie intensywności pasm w przedziale $900\text{--}1150\text{ cm}^{-1}$ sugeruje możliwość krystalizacji sacharozy oraz rozkładu cukrów prostych, co mogło wpłynąć na zmianę tekstury bezy. W szczególności, pod wpływem niskiej wilgotności i temperatury mogły zachodzić procesy prowadzące do zwiększonej kruchości struktury cukrowej. Dodatkowo, możliwe uszkodzenia białek jaj w wyniku działania niskich temperatur mogą skutkować zmianami w zdolności do tworzenia piany i stabilizacji emulsji [11].

Biszkopt (Rysunek 2D), składający się głównie z białek i skrobi, wykazał zmiany wskazujące na utratę wody oraz modyfikacje strukturalne polisacharydów. Obniżenie intensywności pasma przy 3300 cm^{-1} potwierdza znaczny stopień dehydratacji, co zgadza się z wynikami analizy wilgotności, gdzie odnotowano spadek zawartości wody w próbce wysłanej do stratosfery. Zmiany w pasmach polisacharydów ($\sim 1000\text{--}1150\text{ cm}^{-1}$) sugerują częściową retrogradację skrobi, proces polegający na reorganizacji jej struktury pod wpływem ekstremalnych warunków. Retrogradacja skrobi wpływa na teksturę i przyswajalność produktu, co może mieć istotne znaczenie w kontekście transportu i długoterminowego przechowywania żywności w warunkach o zmiennej wilgotności [12].

W przypadku analizy mikrobiologicznej, próbki wysiane w rozcieńczeniach 10^{-3} oraz 10^{-4} nie wykazały wzrostu mikroorganizmów, co sugeruje



RYSUNEK 2. Widma IR zarejestrowane dla poszczególnych części badanej próbki ciasta. (A) liście mięty, (B) warstwa kremu, (C) beza, (D) biszkopt.

konieczność powtórzenia badania z zastosowaniem mniejszych rozcieńczeń zawiesiny próbki.

Podsumowanie

Uzyskane wyniki dostarczają informacji o zmianach biochemicznych zachodzących w produktach spożywczych pod wpływem warunków stratosferycznych. Żywność transportowana przez stratosferę w prowizorycznych pojemnikach jest narażona na ekstremalnie niekorzystne warunki tam panujące. Po analizie wyników można jednoznacznie stwierdzić, że spadek wilgotności próbki biszkoptu po ekspozycji (z 21.46 % do 18.50 %) jest konsekwencją niskiej wilgotności względnej (0 %) i obniżonego ciśnienia atmosferycznego w stratosferze, sprzyjających procesom sublimacji i parowania wody. Analiza zawartości białka metodą Kjeldahla wykazała spadek jego zawartości w próbce badawczej, co wskazuje na degradację białek głównie pod wpływem ekstremalnych warunków temperaturowych. Spektroskopia FTIR potwierdziła zmiany w strukturze białek i lipidów, w tym osłabienie pasma amidowego ($\sim 1650\text{ cm}^{-1}$) oraz wzrost intensywności pasma karbonylowego ($\sim 1700\text{ cm}^{-1}$), co również sugeruje denaturację białek i procesy oksydacyjne w lipidach. Wyniki badania mikrobiologicznego pokazały, że warunki stratosferyczne mogą hamować aktywność biologiczną

drobnoustrojów. Aby zbadać szerzej ten aspekt, należałoby zbadać próbkę, która przebywała w stratosferze przez dłuższy czas, a także zastosować mniejsze rozcieńczenia zawiesiny próbki.

Przeprowadzone badania i uzyskane wyniki koncentrują się na możliwości degradacji kluczowych składników żywności, co może mieć istotne znaczenie dla przyszłych badań nad jej transportem i przechowywaniem w ekstremalnych warunkach atmosferycznych, takich jak stratosfera czy przestrzeń kosmiczna. Bez wątpienia dalsze, szerzej zakrojone badania w tym obszarze wyznaczą kierunki opracowania bardziej efektywnych strategii przechowywania żywności.

Podziękowania

Przeprowadzenie opisanych w tym artykule badań nie byłoby możliwe dzięki uprzejmości i pomocy studentów i wykładowców Wydziału Politechnicznego Akademii Tarnowskiej, zrzeszonych w Kole Naukowym Elektroników AMPER. Dziękujemy dr inż. Robertowi Wielgatowi za pomoc w dostarczeniu badanej próbki do laboratorium po lądowaniu sondy. Serdeczne podziękowania kierujemy do Pana dr hab. Rafała Kurczaba, prof. AT, za cenne wskazówki i wsparcie podczas przygotowywania niniejszego artykułu.

Literatura

- [1] PN-75/A-04018:1975: Produkty rolniczo-żywnościowe. Oznaczanie azotu metodą Kjeldahla i przeliczanie na białko.
- [2] Yiğit E., Garcia R. R., 2018, Meteorology, Dynamic (Stratosphere), w: Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, (Elsevier)
- [3] Udostępniono 06.09.2024. Pobrano: Payload SP5GFN, Grafana v2 SondeHub, dostęp: <https://grafana.v2.sondehub.org/d/HJgOZLq7k/basic?var>
- [4] Nielsen S. S., 2010, Determination of Moisture Content, w: Springer, Boston, MA, s. 17
- [5] Goyal K. i in., 2022, Kjeldahl Method, w: Advanced Techniques of Analytical Chemistry, 1, 105, (Bentham Science Publishers)
- [6] Betts R., de Blackburn C.W., 2009, Detecting pathogens in food, w: Foodborne Pathogens, s. 17
- [7] Brackett R.E., 1993, Microbial Quality, w: Postharvest Handling, s. 125, (Elsevier)
- [8] Van de Voort F.R., 1992, Fourier transform infrared spectroscopy applied to food analysis, Food Research International, 25(5), s. 397
- [9] Turek C., Stintzing F.C., 2013, Stability of Essential Oils: A Review, Comprehensive, Reviews in Food Science and Food Safety, 12(1), s. 40
- [10] Dąbrowska M., Zielińska A., Nowak I., 2015, Produkty utleniania lipidów jako potencjalny problem zdrowotny oraz analityczny, Chemik, 69(2), s. 89
- [11] Farshchi A. i in., 2025, The effect of surface chemistry on the caking behaviour of sucrose crystals, Journal of Food Engineering, 389, 112386
- [12] Gambuś H., Gumul D., 2003, Retrogradacja skrobi wyizolowanej z niedojrzałych ziarniaków zbóż, Żywność. Nauka. Technologia. Jakość, 2(35), s. 27

Streszczenia wykładów nie ujętych w artykułach pokonferencyjnych

Stabilność obiektów latających i stabilność wahadła odwróconego

Witold Byrski

Akademia Tarnowska, Wydział Politechniczny, Katedra Automatyki i Robotyki, Polska

Pojęcie stabilnego zachowania się systemów dynamicznych ma mocne podstawy teoretyczne w matematycznej teorii stabilności specjalnych rozwiązań równania różniczkowego modelującego ten system. Te specjalne rozwiązania nazywają się punktami równowagi modelu. Równanie modelowe określa relację pomiędzy interesującą projektanta nieznaną funkcją wyjścia zmieniającą się w czasie (np. kąt pochylenia samolotu) i jej kolejnymi pochodnymi, a funkcją sterującą. Ostatecznie rozwiązanie takiego równania zależy od warunków początkowych (wektor liczbowy) i od kształtu sterowania (funkcja czasu). Najbardziej interesujące dla projektanta z punktu widzenia stabilności jest zachowanie się w czasie rozwiązań sąsiadujących z punktami równowagi, które nazywane są też punktami pracy ustalonej systemu. W punktach równowagi wszystkie zmienne procesowe są ustalone (tworzą wektor liczbowy) i pozostają niezmiennie względem czasu (wszystkie ich pochodne się zerują). Takie punkty, mogą być stabilne, tzn. „przyciągać” wszystkie inne rozwiązania z otaczających je warunków początkowych, co oznacza, że po pewnym czasie obiekt wytrącony z tego punktu samodzielnie do niego wraca. Punkty równowagi niestabilne „odpychają” od siebie wszystkie rozwiązania z sąsiednich warunków początkowych, co oznacza, że obiekt pracujący w takim punkcie po opuszczeniu tego punktu już do niego samodzielnie nie może wrócić. Praca systemów przemysłowych i innych obiektów w tych punktach równowagi jest zawsze monitorowana i sterowana przez systemy automatyki. W przypadku punktów równowagi stabilnej systemy automatyki mają za zadanie tylko polepszenie jakości samo-stabilizacji np. jej przyspieszenie. W przypadku pracy systemu w punkcie równowagi niestabilnej, systemy automatyki mają już bardziej

odpowiedzialne zadanie, wypracowania sterowania stabilizującego, czyli aktywnej reakcji na odchyłki systemu w celu uniemożliwienia systemowi opuszczenia tego punktu. W prezentacji zajęto się obiektami latającymi przedstawiając poglądowo zagadnienie stabilności w locie poziomym i pionowym samolotów i rakiet. Przedstawiono analogię takich zachowań na przykładzie najprostszego systemu mechanicznego posiadającego zarówno stabilne jak i niestabilne punkty równowagi. Takim systemem w jednym wymiarze jest wahadło swobodnie zawieszone w polu grawitacyjnym, które może przyjmować położenia stabilne (wahadło proste) i niestabilne (wahadło odwrócone). Zachowanie takiego wahadła umieszczonego dodatkowo na przesuwanym wózku (obiekt dynamiczny czwartego rzędu) znajduje uzasadnienie w rozwiązaniach jego matematycznego modelu i pokazuje możliwości aktywnej stabilizacji takiego układu w jego niestabilnym punkcie równowagi.

W obiektach latających, ze względu na trójwymiarową przestrzeń (osie roll, pitch, yaw) i wzajemne sprzężenia zmiennych modelowych opisujących odchyłki, algorytmy komputerowego sterowania nadążnego i stabilizującego muszą być jeszcze bardziej zaawansowane. W referacie omówiono możliwości zastosowania ciągu wektorowanego w napędach dzisiejszych samolotów bojowych i rakiet oraz niezwyklej zwrotności pocisków raketowych z takim ciągiem, który umożliwia im uzyskiwanie przyspieszeń 60 g.

Stawianie czoła wyzwaniom – o trudnościach napotykanych podczas rozwoju silników na paliwa ciekłe na przykładzie silnika Zawisza4000

Artur Banko, Piotr Nowosielski, Mikołaj Ostrowski

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, AGH Space Systems

Podczas prezentacji omówione zostaną wyzwania jakie członkowie Koła Naukowego AGH Space Systems napotkali podczas prac nad silnikami na paliwo ciekłe z serii Zawisza. Autorzy zaprezentują flagowy projekt Zawisza4000 oraz zbudowane wcześniej silniki na paliwa hybrydowe oraz ciekłe. Podane zostaną zalety silników na paliwo ciekłe, porównany zostanie ten typ silników do silników o innych typach napędów, poruszone zostaną problemy, z jakimi należy się zmierzyć, projektując i testując silnik napędzany

ciekłymi materiałami pędnymi. Autorzy przedstawia, w jakim stopniu doświadczenie z silnikami hybrydowymi pomogło uczestnikom projektu oraz które problemy okazały się być czymś nowym. Następnie zaprezentowane będą działania, dzięki którym udało się rozwiązać poszczególne przeszkody, oraz plany na przyszłość.

Projekt BIOLOGEN, czyli jak produkować tlen z bioluminescencyjnych glonów na potrzeby przyszłych misji kosmicznych

Anna Błąd, Jakub Smaga, Konrad Rotter, Wojciech Liwacz, Mateusz Olszewski, Karolina Greń, Emilia Stacherczak, Zuzanna Dybcio

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, AGH Space Systems

Referat zakłada przedstawienie projektu BIOLOGEN, prowadzonego w ramach pracy koła naukowego AGH Space Systems. Problematyka eksperymentu zakłada sprawdzenie ilościowej produkcji tlenu oraz światła przez bioluminescencyjne glony z rodziny *Pyrocistis*. Poruszone zostaną dylematy związane ze wstępnym etapem badań, takie jak dobór testowanych gatunków glonów, sposób utrzymania ich w dobrym stanie oraz jego monitorowanie. W związku z konkursem „Direction: Space” projekt będzie zgodny z wymogami technicznymi typu ECSS i przygotowany pod kątem przyszłego wyniesienia na orbitę okołozemską, na Międzynarodową Stację Kosmiczną, gdzie zostanie zbadana żywotność glonów, produkcja tlenu i światła w nieprzyjaznych warunkach mikrogravitacji. Konieczne będzie założenie hodowli danego gatunku glonów, zaprojektowanie odpowiedniego sprzętu do monitorowania badanych parametrów, a w przyszłości – przeprowadzenie testów pozwalających wysłać eksperyment w kosmos. W referacie zostaną przedstawione korzyści z badania glonów pod kątem misji kosmicznych oraz możliwe zastosowania i nadzieje, jakie wiążą się z wykorzystaniem glonów.

Przezroczyste gleby jako sposób na badanie rozwoju roślin w przestrzeni kosmicznej

Piotr Szatkowski¹, Martyna Fröhlich¹, Oliwia Grałek¹, Martyna Sobczyk², Zuzanna Kowal², Michał Kisilewicz³

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki

² Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

³ Akademia Tarnowska, Centrum Transferu Technologii

Dobór gatunków roślin możliwych do wzrostu w przestrzeni kosmicznej o największym potencjale wytwarzania plonów o wysokiej wartości rynkowej w wymagających warunkach można przeprowadzić poprzez fenotypowanie systemów korzeniowych. Informacje zdobyte na drodze fenotypowania są cenne dla genetyki, gdyż na ich podstawie można projektować nowe odmiany roślin o określonych właściwościach. Liczne problemy techniczne towarzyszące fenotypowaniu stwarzają konieczność opracowania metod nieniszczącej i jednocześnie dynamicznej charakterystyki cech korzeni. Fenotypowanie systemu korzeniowego w przestrzeni kosmicznej może być przeprowadzone w mediach innych niż gleba. Takie rozwiązanie jest interesujące ze względu na możliwości jakie stwarza – warunki panujące w hodowli mogą być ściśle kontrolowane pod względem zasobności w substancje odżywcze, wodę czy mikroorganizmy. Do badania odpowiedzi systemu korzeniowego na modyfikacje biotycznych i abiotycznych warunków środowiska wykorzystywane są stałe matryce żelowe, takie jak: guma gellan czy agar. Zaletą tego typu podłoży jest ich przepuszczalność światła, która umożliwia trójwymiarową obserwację systemu korzeniowego. Do pomiaru wielkości, architektury i innych strukturalnych cech korzeni i pędów roślin rosnących na podłożach żelowych można wykorzystać skanery i kamery, co gwarantuje wysoką przepustowość. Pozwala to także na pominięcie etapów zaburzających naturalny proces rozwojowy rośliny badanej w standardowych warunkach. Etapy te obejmują: usuwanie z gleby, mycie, suszenie i ponowne sadzenie w glebie po skończeniu obserwacji.

Hydrożelowe układy do leczenia ran z systemem transportu substancji czynnych

Piotr Szatkowski¹, Martyna Sobczyk², Zuzanna Kowal², Martyna Fröhlich¹, Oliwia Grałek¹, Michał Kisilewicz³, Agata Krakowska⁴, Joanna Zontek-Wilkowska¹

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki

² Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

³ Akademia Tarnowska, Centrum Transferu Technologii

⁴ Uniwersytet Jagielloński, Collegium Medium, Wydział Farmaceutyczny, Katedra Chemii Nieorganicznej i Analityki Farmaceutycznej

Tematem badań jest projekt oraz wykonanie opatrunku hydrożelowego o potencjalnym zastosowaniu jako opatrunku na trudno gojące się rany, a następnie zbadanie jego podstawowych właściwości w zależności od występujących substancji czynnych w warunkach o ograniczonej migracji spowodowanej niskim przepływem jonów przez brak grawitacji w przestrzeni kosmicznej. Obecnie opatrunki hydrożelowe są stosowane w celu ochrony rany, mogą zawierać substancje przyspieszające proces gojenia się rany. Takie opatrunki nie są jednak w sposób kontrolowany dostarczać informacji dotyczących stanu rany, zwłaszcza w warunkach ograniczonego dostępu do wykwalifikowanego personelu medycznego w przestrzeni kosmicznej. Nowoczesne opatrunki hydrożelowe z czujnikami jonowymi, mogą dostarczać informacje o stanie gojenia rany, z uwzględnieniem pH rany czy poziomu stanu zapalnego. Dzięki czujnikom można ograniczyć zbyt częstą zmianę opatrunku i monitorować proces gojenia się ran. Celem badań było zaprojektowanie i wytworzenie hydrożeli o potencjalnym zastosowaniu jako opatrunki na rany w warunkach specjalnych, takich jak przestrzeń kosmiczna, a następnie zbadanie ich podstawowych właściwości w zależności od występujących substancji czynnych. Pierwszym etapem pracy był projekt opatrunku hydrożelowego. Drugim etapem było wytworzenie warstw opatrunku. Opatrunek składał się z pięciu warstw: pierwsza oraz trzecia warstwa to hydrożele, które modyfikowano witaminą C, druga oraz czwarta warstwa to hydrożel z gazą oraz nanorurkami, piąta warstwa była podłożem konstrukcyjnym zawierającym jedną warstwę gazy oraz folię usztywniającą. Trzecim etapem pracy było wykonanie badań

dla wytworzonych opatrunków. Przeprowadzono obserwację mikrostruktury warstw opatrunku, przebadano właściwości mechaniczne, przeprowadzono symulację zachowania się wybranych opatrunków w warunkach środowiska rany.

Ciemna strona światła – nocny spacer z satelitą po Polsce

Andrzej Z. Kotarba

Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk, Warszawa

Najważniejszym wyróżnikiem nocy jest w środowisku naturalnym brak światła słonecznego, mrok, ciemność. Warunki te nie występują jednak zawsze i wszędzie. Aktywność człowieka wprowadziła do nocnego świata światło „sztuczne”. Współcześnie emitują je różnego rodzaju instalacje oświetleniowe zasilane prądem elektrycznym. Nadmiar antropogenicznego światła nocą zaburza naturalne rytmy okołodobowe roślin i zwierząt. Stanowi istotne zagrożenie dla ludzkiego zdrowia.

Na przestrzeni lat światło stało się kolejną formą zanieczyszczenia środowiska. Stopień skażenia środowiska światłem można ocenić ilościowo, dokonując pomiarów fotometrycznych lub radiometrycznych. W wystąpieniu przedstawione zostały wyniki dwóch takich pomiarów, wykonanych dla obszaru całej Polski. Pierwsze badanie obejmowało pomiar radiometryczny wykonany za pomocą instrumentu Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) satelity Suomi-NPP. Obserwacje satelitarne objęły lata 2012-2022, dzięki czemu możliwe było nie tylko określenie aktualnego stanu zanieczyszczenia światłem w Polsce, ale również zdiagnozowanie kierunku zmian. Badania wykazały, że rok 2022 był „najjaśniejszym” od czasu rozpoczęcia obserwacji VIIRS: w porównaniu z dekadą 2012-2021, w roku 2022 z terytorium naszego kraju wysłano w kosmos o 6% światła więcej; pojaśniała blisko jedna czwarta powierzchni kraju (w niektórych województwach niemal połowa ich obszaru).

Drugie badanie koncentrowało się na jasności (luminancji) nocnego nieba, a konkretnie sztucznym pojaśnieniu nieboskłonu przez sztuczne światło, które z powierzchni Ziemi wędruje przez atmosferę w kosmos. Analiza wykorzystwała dane modelowe zasilone obserwacjami VIIRS i skalibrowane naziemnymi pomiarami fotometrycznymi. Wyniki badań pokazały, że

naturalnie ciemne nocne niebo nad Polską w roku 2022 nie występowało wcale. Najbliższe naturalnemu było nad Bieszczadami, gdzie na skutek zanieczyszczenia światłem pojaśniało tylko o 8%. Najbardziej zdegradowane przez sztuczne światło okazało się niebo nad centrum Warszawy, gdzie było o 6329% jaśniejsze, niż w warunkach nocy naturalnej. Nad większością Warszawy, ale też Krakowa, Gdańska, Łodzi, Poznania, Lublina, niebo było permanentnie tak jasne, że warunki prawdziwej nocy faktycznie nigdy tam nie występowały. Ludzkie oczy nie miały szans przejść w typowy dla nocy tryb widzenia (skotopowy).

Obydwie analizy pokazały, że zanieczyszczenie światłem w Polsce występuje powszechnie i nasila się. W obliczu braku jakichkolwiek działań samorządowych lub rządowych, mogących ograniczyć zanieczyszczenie światłem, należy oczekiwać, że trend ten się utrzyma. Konsekwencją będzie dalsza degradacja środowiska naturalnego i pogorszenie się dobrostanu Polak i Polek.

Symulacje misji kosmicznych w kierunku astronautyki komercyjnej

Agata Kołodziejczyk

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Centrum Technologii Kosmicznych

Do początku 2024 roku w przestrzeń kosmiczną poleciało ponad 600 astronautów. Reprezentują wyselekcjonowaną i wysoko wyszkoloną grupę ludzi. Astronauci nie są reprezentatywną grupą całej populacji, która charakteryzuje się większym zróżnicowaniem kulturowym i edukacyjnym. Rosnący komercyjny dostęp do przestrzeni kosmicznej, redukcja kosztów lotów, a także rozwój zautomatyzowanych technologii i systemów podtrzymywania życia otwierają nowe perspektywy przed różnymi przedstawicielami ludzkości, w tym także osobami niepełnosprawnymi.

Powołane w 2016 roku Centrum Szkolenia Astronautów Analogowych (AATC) stale zwiększa liczbę organizowanych analogowych symulacji kosmicznych dla osób chcących szkolić się i latać w kosmos.

Wystąpienie podsumowuje wiedzę zdobytą podczas ponad 80 zorganizowanych misji analogowych oraz charakteryzuje metody i narzędzia wdrożone do szkolenia różnorodnych grup ludzi w środowisku symulującym stację kosmiczną. Obejmuje główne elementy projektu symulacji misji, krytyczne dla bezpieczeństwa załogi. Połączono kilka technologii z biologią, aby kształtować symulację życia na statku kosmicznym oraz zrozumieć poziom i tempo zmian wywołanych przez środowisko sztucznie stworzone w izolowanej przestrzeni. Bogatym źródłem danych było monitorowanie podstawowych parametrów fizjologicznych wraz z badaniami poznawczymi, analizą komunikacji i raportami generowanymi przez załogę. Uzyskane wyniki poddano analizie, porównując kilka załóg.



Dr Agata Kołodziejczyk prezentująca skafandry kosmiczne.

Właściwości radioprotekcyjne celulozy bakteryjnej pochodzącej z kombuchy

Agata Kołodziejczyk

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Centrum Technologii Kosmicznych

Organizmy żywe są stale narażone na kosmiczne, ziemskie i wewnętrzne źródła promieniowania. W rezultacie rozwinęły one naturalne mechanizmy radioprotekcyjne. Jednak w niektórych przypadkach mechanizmy te mogą nie wystarczać. Podwyższone dawki i długotrwałe narażenie na promieniowanie, na przykład podczas radioterapii lub w ekstremalnych warunkach, takich jak lot kosmiczny, mogą powodować uszkodzenie DNA i zwiększać

liczebność reaktywnych form tlenu, co może wpływać na przebieg procesów biologicznych. W przeciwieństwie do składników syntetycznych, naturalnie wytwarzane materiały radioprotekcyjne charakteryzują się dobrą biokompatybilnością i łatwo poddają się recyklingowi. Prezentacja przedstawia wyniki badań właściwości radioprotekcyjnych biofilmu hydrożelowego wytwarzanego przez konsorcjum drobnoustrojów kombuchy. Właściwości chroniące przed promieniowaniem celulozy bakteryjnej (KBC) kombuchy zbadano przy użyciu kwantów gamma o energiach w zakresie od 122 do 1408 keV i źródła neutronów AmBe. Natywna forma KBC zawiera ponad 80% wody. Aby zwiększyć radioprotekcję biofilmu kombuchy, przetestowano składniki metaliczne (K, Fe, Mxenes) i dodatki biologiczne. *Rhodobacter sphaeroides* i *Synechocystis* sp. Do pożywek hodowlanych dodano PCC6803, które są odporne na stres oksydacyjny. Skład chemiczny otrzymanych filmów KBC mierzono metodą FTIR. Właściwości fizyczne scharakteryzowano za pomocą mikroskopii. Suszone opaski na rękę KBC poddane obróbce końcowej zbadano pod kątem parametrów absorpcji w celu poprawy ekranowania ochronnego. Na podstawie uzyskanych wyników obliczono możliwe poziomy radioprotekcji dla różnych typów i postaci celulozy bakteryjnej. Badania te zachęcają do stosowania celulozy bakteryjnej w gospodarce o obiegu zamkniętym na potrzeby przyszłych procesów bioregeneracyjnych.

Monitoring hałasu na stacjach kosmicznych

Karol Sałagan

SVANTEK Sp. z o.o., Warszawa

Prezentacja dotyczy firmy Svantek Sp. z o.o. oraz jej znaczących osiągnięć w dziedzinie aparatury pomiarowej do pomiarów poziomu dźwięku w przestrzeni kosmicznej. Od 2016 roku urządzenia firmy Svantek z powodzeniem działają na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS), a od 2021 roku również na chińskiej stacji kosmicznej Tiangong. Obecnie firma uczestniczy w projekcie Wireless Acoustics dla Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA), kontynuując swoją misję dostarczania zaawansowanych technologii pomiarowych w ekstremalnych warunkach kosmosu.

Zautomatyzowany system akwaponiczny

Agata Kołodziejczyk¹, Mikołaj Gąbka²

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Centrum Technologii Kosmicznych

² Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Studenckie Koło Naukowe AstroBio

Badania przedstawiają koncepcję modułowego zautomatyzowanego systemu akwaponicznego. Zakres prac obejmował zaprojektowanie modułowego, ekonomicznego systemu akwaponicznego dla środowisk zamkniętych, umożliwiającego uprawę różnego rodzaju roślin na terenach, gdzie nie jest możliwy wzrost w glebie. Proces rozpoczął się od fazy burzy mózgów i konceptualizacji, podczas której ustalono wymagania systemowe. W fazie rozwojowej zdefiniowano niezbędne parametry środowiskowe, jakie system musi zapewniać do uprawy wybranych gatunków roślin oraz uruchomiono odpowiednie pojemniki sprzyjające prawidłowemu wzrostowi i rozwojowi systemu korzeniowego. Jednocześnie przeprowadzono analizę dostępnych na rynku czujników pod kątem ich możliwości monitorowania parametrów środowiskowych mających bezpośredni wpływ na wzrost i rozwój roślin uprawnych. Następnie wykonano modelowanie CAD, zgodnie z założeniami wstępnymi. Ostatecznie opracowano koncepcję i projekt automatyki. Koncepcja obejmuje zaawansowany system monitorowania wzrostu korzeni.

BIOSTRAT 2.0 – odkrywanie możliwości komunikacji LAB-ON-CHIP

Agata Kołodziejczyk¹, Gabriela Bergiel²

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Centrum Technologii Kosmicznych

² Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Studenckie Koło Naukowe AstroBio

Stratosfera oferuje wyjątkowe warunki: temperatura w tej warstwie zmienia się od -60°C do -15°C , a promieniowanie UV jest znacznie silniejsze.

Niska zawartość wody i intensywne nasłonecznienie są trudne i kosztowne do odtworzenia na Ziemi. Balony na dużych wysokościach są doskonałymi narzędziami do badania tego środowiska i oferują opłacalną platformę do przeprowadzania innowacyjnych eksperymentów. Ułatwiają także opracowanie rozwiązań, które znajdą zastosowanie w eksploracji głębokiego kosmosu i misjach długoterminowych. To główne motywacje stojące za rozwojem projektu BioStrat. Do tej pory przeprowadzono sześć misji stratosferycznych, najwyższa z nich osiągnęła wysokość 35 469 m. Eksperymenty obejmowały zobrazowanie obszarów miejskich i wiejskich za pomocą narzędzia AgroCam, testowanie systemów telemetrycznych w czasie rzeczywistym oraz systemu pneumatycznego z użyciem drożdży i glukozy. Tegoroczna edycja skupia się na dalszym rozwoju platformy *lab-on-chip* umożliwiającej prowadzenie eksperymentów biologicznych w warunkach stratosferycznych oraz udoskonaleniu modułu komunikacyjnego. Łącze w dół oferowane przez typowe rozwiązania jest niezwykle ograniczone, co w większości przypadków uniemożliwia śledzenie eksperymentów podczas lotu.

Dane są zwykle gromadzone na kartach SD znajdujących się w ładunku, co wiąże się z ryzykiem ich utraty, jeśli ładunek nie zostanie pomyślnie odzyskany. Dlatego niezwykle istotne jest zbadanie możliwości technologii LoRaWAN w zakresie komunikacji pomiędzy kilkoma HAB-ami oraz nawiązania połączenia ze stacją naziemną.

Potencjał wzrostu roślin na podłożach na bazie regolitu

Agata Kołodziejczyk¹, Lidia Dyląg², Barbara Szaflarska²

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Centrum Technologii Kosmicznych

² Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Studenckie Koło Naukowe AstroBio

Jednym z warunków powstania osiedli ludzkich na Marsie lub Księżycu jest niezależność od Ziemi, co obejmuje produkcję żywności. Powierzchnie obu ciał niebieskich są jałowe i nie są w stanie utrzymać plonów ani gleby ziemskiej. W celu zbadania potencjału gleby regolitopodobnej pobrano próbki z różnych miejsc na Ziemi: Etny, Dahabu i Arktyki i podzielono je na fazy stałe oraz ekstrakty. Następnie na próbki zmieszane z podłożem

agarowym wysiano nasiona rzodkiewki i zaopatrzono je w niewielką ilość nawozu. Nasiona rosły przez pięć dni, po czym rośliny zebrano i zmierzono. Zaobserwowany wzrost roślin zachęca do dalszych badań nad wykorzystaniem regolitów lądowych do uprawy żywności i do głębszego przyjrzenia się ich interakcjom z różnymi typami roślin. Eksperyment odbył się w Analog Astronaut Training Center (AATC) podczas tygodniowych misji analogowych Demeter i Athena.



Studenci AGH z Kola AstroBio prezentują obszary swoich aktywności. Od lewej: Lidia Dyląg, Stanisław Sękara, Marta Gajewska, Mikołaj Gąbka, Ewelina Dobosz i Mateusz Koba.

Projektowanie i testowanie pasywnego czujnika czystości mikrobiologicznej na żywice w izolacji

Agata Kołodziejczyk¹, Ewelina Dobosz²

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Centrum Technologii Kosmicznych

² Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Studenckie Koło Naukowe AstroBio

Mikroorganizmy są wszechobecne na powierzchni Ziemi, a wiele z nich jest nieszkodliwych dla ludzi. Jednak niektóre patogeny mogą powodować poważne choroby. Niestety, ze względu na ich mikroskopijne rozmiary, nie są widoczne gołym okiem, co prowadzi do braku świadomości ich obecności w gospodarstwie domowym środowiska. Osoby żyjące w izolacji, które

mogą mieć ograniczony dostęp do środków dezynfekcyjnych lub sprzątania, są szczególnie podatne na działanie potencjalnie szkodliwych mikroorganizmów. Prezentowany projekt miał na celu rozwiązanie powyższych problemów poprzez opracowanie czujnika do wykrywania mikrobiologicznego zanieczyszczenia powietrza w pomieszczeniach mieszkalnych. W ramach projektu omówiono metodę hodowli mikroorganizmów. Komora inkubacyjna stanowi obiecujące i przyjazne dla użytkownika rozwiązanie do przyszłych zastosowań.

Wpływ roztworu nanocząstek srebra na wzrost grzybni *Pleurotus ostreatus* w siedzibie astronautów

Agata Kołodziejczyk¹, Stanisław Sękara²

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Centrum Technologii Kosmicznych

² Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Studenckie Koło Naukowe AstroBio

Grzyby odgrywają znaczącą rolę w krążeniu materii ze względu na ich zdolność do rozkładania złożonych substancji na proste związki. Infrastruktura ścisłej izolacji, taka jak Międzynarodowa Stacja Kosmiczna czy habitaty do symulacji misji, zmuszone są do opracowywania skutecznych rozwiązań w zakresie gospodarki odpadami, aby wygenerować jak najmniej substancji zapasowych. Postawiono hipotezę, że grzybnia *Pleurotus ostreatus* wzbogacona AgNP może zostać uwzględniona jako sterownik układu recyrkulacji materii organicznej. Celem doświadczenia było zbadanie wpływu AgNP na wzrost grzybni *P. ostreatus* w warunkach siedliskowych oraz określenie, czy AgNP mogą zapobiegać atakom kultur grzybni *P. ostreatus* na patogeny. Na pokładzie habitatu w Rzepienniku Strzyżewskim założono uprawę grzybni *P. ostreatus*. Szalki Petriego wypełniono podłożem hodowlanym na bazie agaru i roztworami AgNPs o różnych stężeniach. W grupie kontrolnej stosowano wodę destylowaną. Każdą płytkę protografowano co 24 godziny i analizowano za pomocą przeglądarki MatLab Image Viewer. Różnice pomiędzy sposobami leczenia zbadano statystycznie. Zastosowanie AgNP nie ujawniło widocznej toksyczności wobec grzybni. AgNP były w stanie zapobiec rozwojowi patogenów podczas hodowli *P. ostreatus*. *P. ostreatus* wykazał potencjał hodowlany w warunkach Analog Habitat. Po

zebraniu odpowiedniej ilości można go również wykorzystać jako wspomniany już system recyrkulacji materii organicznej. System mógł mieć zwiększoną wydajność ze względu na AgNP służące jako substancje przeciwdrobnoustrojowe.

Testowanie inteligentnego czujnika do kontroli zdrowia miesięczkowego w przestrzeni

Agata Kołodziejczyk¹, Marta Gajewska²

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Centrum Technologii Kosmicznych

² Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Studenckie Koło Naukowe AstroBio

Zarządzanie zdrowiem menstruacyjnym często staje przed wyzwaniami ze względu na piętno społeczne i ograniczony dostęp do bezpiecznych, nieinwazyjnych rozwiązań w zakresie monitorowania. W prezentowanym badaniu analizowano innowacyjne metody monitorowania zdrowia menstruacyjnego, zainspirowane wyjątkowymi potrzebami misji kosmicznych, podczas których kobiety wymagają kontrolowania miesiączki w izolacji i w potencjalnie zagrożonych warunkach higienicznych. Projekt skupia się na zaprojektowaniu inteligentnego kubka menstruacyjnego zdolnego do pomiaru objętości krwi menstruacyjnej i obecności skrzepów. W ramach badania przeprowadzona została kompleksowa analiza nieinwazyjnych technik monitorowania zdrowia menstruacyjnego. Po serii prób z różnymi konfiguracjami czujników (przy użyciu arkusza przewodzącego Adafruit i materiału MXene) najdokładniejszym rozwiązaniem okazał się inteligentny system kubeczków menstruacyjnych. Konstrukcja zawiera elastyczne, drukowane czujniki bezpośrednio na misce, eliminując potrzebę stosowania procedur inwazyjnych. Badanie to pokazuje potencjał inteligentnego kubeczka menstruacyjnego w monitorowaniu zdrowia menstruacyjnego. Elastyczna technologia czujników stanowi obiecujące rozwiązanie nie tylko dla podróżników kosmicznych, ale także dla kobiet na Ziemi, które poszukują wygodniejszego i opartego na danych podejścia do zarządzania swoimi miesiączkami.

Konstrukcja nieinwazyjnego czujnika pomiaru stężenia witaminy D z zastosowaniem modelowania predykcyjnego w warunkach izolacji w czasie symulacji misji kosmicznych

Agata Kołodziejczyk¹, Mateusz Koba²

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Centrum Technologii Kosmicznych

² Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Studenckie Koło Naukowe AstroBio

Witamina D jest jedną z najważniejszych substancji znajdujących się w organizmie człowieka, ponieważ jest odpowiedzialna za poprawne funkcjonowanie układu kostnego. Kontrolowanie i łatwy monitoring stężenia witaminy D w organizmie są ważne dla utrzymania zdrowia i zapobiegania wielu dolegliwościom związanym z jej niedoborem. Jeżeli każda osoba, która jest przez długi czas odizolowana od światła słonecznego, posiadałaby małe osobiste urządzenie do pomiaru stężenia witaminy D, wiele problemów związanych z wykonywaniem testu zostałoby rozwiązanych. Również dla osób, które na co dzień nie doświadczają braku dostatecznej ilości promieni słonecznych takie rozwiązanie byłoby atrakcyjne ze względu na łatwość użycia oraz mały rozmiar czujnika, a co za tym idzie, osoby te chętniej i częściej by się badały.

W ramach prezentowanego projektu zastosowana została metoda nieinwazyjnego pomiaru stężenia witaminy D w ludzkim organizmie przy użyciu zewnętrznego urządzenia. Urządzenie mierzy impedancję elektryczną ludzkiego ciała i, bazując na jej wartości oraz wykorzystując model predykcyjny wyznaczony podczas symulowanych badań na plastrach kombuchy, oblicza przybliżone stężenie witaminy D. Pomiar bioimpedancji odbywa się przy pomocy zewnętrznych elektrod przyklejonych do przedramienia, a więc test jest całkowicie nieinwazyjny. Uznaje się, że ciągły dostęp do informacji na temat stężenia witaminy D pozwoli na poprawne jej dawkowanie i zapobieganie niedoborom. Zaprezentowane rozwiązanie jest nie tylko znacznie tańsze w porównaniu z tradycyjnymi procedurami, ale również nie wymaga medycznego doświadczenia i wykształcenia. Urządzenie zaprojektowano z myślą o astronautach analogowych biorących udział w symulacjach misji kosmicznych na Ziemi, jak również o astronautach przebywających na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej.

Aplikacja do treningu kognitywnego analogowych astronautów

Agata Kołodziejczyk¹, Ewa Kreżel²

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Centrum Technologii Kosmicznych

² Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Studenckie Koło Naukowe AstroBio

Pomiar wydajności kognitywnej pomaga stwierdzić, jak efektywnie pracuje mózg. Podczas analogowych misji kosmicznych, czyli symulacji środowiska i procedur realizowanych w kosmosie, zachowanie jasności umysłu jest wymagane ponieważ astronauta nigdy nie będą wiedzieć, z jakimi trudnościami przyjdzie im się zmierzyć. Przeprowadzanie eksperymentów, wykonywanie pomiarów i zbieranie różnych danych może stać się przytłaczające, zwłaszcza podczas przedłużającej się izolacji. Z tego powodu analogowi astronauta, czyli osoby wykonujące zadania analogicznie jak prawdziwi astronauta, muszą mieć łatwo dostępne narzędzia umożliwiające ćwiczenia pamięci, koncentracji i ogólnych zdolności kognitywnych. Prezentowany projekt inżynierski obejmuje wszystkie niezbędne aspekty do implementacji odpowiednich testów do treningu kognitywnego analogowych astronautów. Testy są opracowane tak, aby stymulować astronautów, ale nie przeciążać ich. Cały proces szkoleniowy zawiera ćwiczenie analitycznego, przestrzennego i numerycznego myślenia.

Z Żuromina ku gwiazdom – łączność z Międzynarodową Stacją Kosmiczną ISS (International Space Station)

Wiesław Paszta

Polski Związek Krótkofalowców, znak: SQ5ABG

Żuromin to około dziewięć tysięcy miasto na północnym Mazowszu. Uczniowie jednego z miejscowych zespołów szkół mogli – jako 9 placówka w Polsce i 199 na świecie – zadać pytania kosmonautom pracującym na stacji kosmicznej ISS. Wydarzenie poprzedziły ponad dwuletnie przygotowania.

W 1996 roku ARISS rozpoczęło prace nad przygotowaniem sprzętu radioamatorskiego i umieszczeniem go na stacji orbitalnej. W 1999 roku w kosmosie połączono pierwsze moduły stacji wyprodukowane w Rosji i USA. Na początku listopada 2000 roku w ramach 1. Ekspedycji na MSK, na stacji zamieszkała pierwsza załoga. Udana próba nawiązania łączności przy użyciu radioamatorskiego sprzętu ze stacji kosmicznej ze stacjami naziemnymi na świecie rozpoczęto 13 listopada 2000 roku. Próby te trwały kilka dni. W dniu 21 grudnia 2000 roku przeprowadzono pierwszą, wcześniej zaplanowaną szkolną łączność ARISS.

Księżycowa nostalgia – łączność amatorska z wykorzystaniem odbicia od powierzchni Księżyca

Waldemar Krauze

Polski Związek Krótkofalowców, Członek Zarządu Oddziału Terenowego w Tarnowie, znak: SP5GFN

Celem wystąpienia jest zapoznanie z łącznością przy wykorzystaniu naturalnego satelity Ziemi.

Radiokomunikacja amatorska z wykorzystaniem geostacjonarnego satelity Qatar Oscar 100

Wiesław Paszta

Polski Związek Krótkofalowców, znak: SQ5ABG

Celem wystąpienia jest zapoznanie studentów Akademii Tarnowskiej z jedną z metod prowadzenia łączności amatorskich, w tym wypadku z wykorzystaniem geostacjonarnego satelity Qatar Oscar 100. Omówiono sprzęt i metody potrzebne do tego typu łączności. Zasygnalizowano trudności techniczne, które można napotkać, oraz sposoby ich przełamywania.

Podziękowania

Jako organizatorzy MTS-4 wyrażamy wdzięczność wszystkim, którzy włączyli się w uświetnienie konferencji.

Dziękujemy patronom honorowym: Polskiej Agencji Kosmicznej oraz Prezydentowi Tarnowa. Wyrażamy wdzięczność władzom lokalnym i wojewódzkim, a w szczególności Wojewodzie Małopolskiemu – Panu Krzysztofowi Klęczarowi i Prezydentowi Tarnowa – Panu Jakubowi Kwaśnemu.

Dziękujemy Pani Annie Urbaś – Dyrektor Wydziału Rozwoju Gospodarczego w Urzędzie Miasta Tarnowa.

Na szczególne podziękowanie zasługują Władze i pracownicy Akademii Tarnowskiej:

Jej Magnificencja prof. Małgorzata Kołpa,
Prorektor ds Nauki i Rozwoju dr hab. Rafał Kurczab,
Dyrektor Centrum Transferu dr inż. Michał Kisilewicz,
Kierownik Katedry Elektroniki, Telekomunikacji i Mechatroniki dr inż. Robert Wielgat,
Kierownik Działu Obsługi Informatycznej mgr inż. Marek Niedziela,
Kierownik Biura Promocji mgr Piotr Kopa

oraz

mgr Lidia Matuszewska (przygotowanie materiałów konferencyjnych)

mgr Piotr Boruch (obsługa fotograficzna konferencji)

mgr Marta Marcinkiewicz (promocja wydarzenia)

mgr Małgorzata Lipowicz – (obsługa administracyjna)

mgr Milena Bugaj (obsługa informatyczna)

inż. Marcin Zaucha (obsługa informatyczna)

Adam Janiga (przygotowanie identyfikacji wizualnej wydarzenia).

Wielką wdzięczność adresujemy do osób, które włączyły się czynnie w organizację konferencji i w jej przebieg z ramienia Stowarzyszenia *Astronomia Nova*. Prezesa AN (*spiritus movens* konferencji), dr. Bogdana Wszółka, wspomagali merytorycznie i organizacyjnie: prof. Piotr Strzelczyk, prof. Olexandr Petrenko, dr hab. Agnieszka Kuźmich, dr Agata Kołodziejczyk, dr Stanisław Kozłowski, mgr Klaudia Beściak i mgr Magdalena Wszółek.

Dalsze wyrazy wdzięczności kierujemy pod adresem osób tematycznie zaangażowanych w przebieg konferencji, t.j. wykładowców. Ich udział najbardziej przyczynił się do zabezpieczenia wysokiego poziomu naukowego MTS-4.

Szczególne podziękowanie kierujemy do opiekunów i studentów Kół Naukowych: tarnowskich – Amper i Ozon, krakowskich – AGH Space Systems i Astrobio (AGH). Studenci nie tylko licznie wystąpili podczas konferencji ze swoimi komunikatami, ale zorganizowali też piękne stoiska tematyczne.

Dziękujemy dyrekcjom tarnowskich szkół za umożliwienie młodzieży udziału w konferencji. Samej zaś młodzieży dziękujemy za przykładowe zachowanie się podczas konferencji. Życzymy jej rosnącej fascynacji tematyką kosmiczną.



Dr hab. Agnieszka Kuźmich w roli przewodniczącej sesji oraz
mgr Klaudia Beściak w charakterze rejestratorki uczestników konferencji.



Wykładowcy. U góry dr hab. Andrzej Kotarba, u dołu studenci AGH, Lidia Dyląg i Dominik Kozimor.

Materiały z sesji poświęconej 70-tej rocznicy śmierci
prof. Tadeusza Banachiewicza
Kraków, 15 listopada 2024



Tadeusz Banachiewicz w Warszawie (1936 r.).

Obserwacyjne inicjatywy Tadeusza Banachiewicza

Jerzy M. Kreiner

Obserwatorium Astronomiczne UKEN na Suhorze

Profesor Tadeusz Banachiewicz (1882-1954), wieloletni dyrektor Obserwatorium Krakowskiego, jest szeroko znany jako twórca krakowianów i propagator ich zastosowań. Jego uczniowie podkreślali, że Profesor oprócz zainteresowań teoretycznych, wielką wagę przywiązywał do roli obserwacji astronomicznych, będąc głęboko przekonany, że obserwacje są fundamentem całej wiedzy o Wszechświecie. Często trawestował znaną maksymę Kartezjusza *cogito ergo sum* jako *observo ergo sum*. Znacząca część jego spuścizny naukowej obejmuje oprócz badań teoretycznych również wyniki obserwacji, które prowadził przez niemal całe życie. To dzięki jego inicjatywie w 1922 r. powstała w Beskidzie Myślenickim na Łysinie (późniejsza nazwa: Lubomir) Stacja Zamiejska Obserwatorium Krakowskiego¹, a w 1953 r. podjął starania nad przystosowaniem dawnego austriackiego Fortu Skała na Bielanach pod przyszłe Obserwatorium Astronomiczne, które otwarto w 1964 r. w czasie obchodów Jubileuszu 600-lecia Uniwersytetu Jagiellońskiego.

Pierwsze obserwacje

Tadeusz Banachiewicz rozpoczął studia na Uniwersytecie Warszawskim w 1900 roku. Bardzo interesował się zjawiskami na niebie i już w 1901 roku jako student prowadził systematyczne obserwacje głównie zakryć gwiazd przez Księżyc, których celem było badanie ruchu Księżyca. Obserwacje nie wymagały skomplikowanej aparatury, gdyż prowadzono je w sposób wizualny tzw. metodą „oko-ucho”, mając do dyspozycji jedynie lunetę i chronometr. Obserwator śledząc gwiazdę, którą za chwilę miał zakryć Księżyc, wsłuchiwał się w $\frac{1}{2}$ sekundowe „tykania” chronometru i starał się zapamiętać moment, kiedy pomiędzy kolejnymi tyknięciami obserwowana gwiazda

¹J. M. Kreiner *Zamiejska Stacja Obserwatorium Krakowskiego w latach 1922-1944* „Annales Astronomiae Novae” vol. 4, p. 147 (2023).

nagle „zgasła”, a następnie odnotowywał wskazanie chronometru. W sprzyjających warunkach wprawny obserwator moment zakrycia gwiazdy mógł określić z dokładnością ± 0.1 sekundy, przy czym obserwacje, w których błąd wynosił nawet 1.5 sekundy również miały znaczenie naukowe. Oczywiście, przy obserwacjach niezbędna była znajomość dokładnego czasu i dlatego każdorazowo wyznaczano poprawkę wskazań chronometru. Ponadto konieczna była także znajomość współrzędnych geograficznych miejsca obserwacji.



Observatorium Warszawskie ok. 1925 roku (NAC).

Zjawiska zakryć (i odkryć) nie są zbyt częste, gdyż Księżyc, w zależności od przyjętych kryteriów, w ciągu roku zakrywa od 50 do 150 jaśniejszych gwiazd. Jednak brak pogody i inne obiektywne trudności sprawiają, że doświadczony obserwator odnotowuje w ciągu roku nie więcej niż około 30 zjawisk.

Tadeusz Banachiewicz obserwując we wrześniu 1903 r. zjawiska w układzie tzw. galileuszowych księżyców Jowisza dostrzegł, że wkrótce może dojść do rzadkiego zjawiska zakrycia przez tarczę planety stosunkowo jasnej gwiazdy $BD-6^{\circ}6191$ (6.5 mag) w gwiazdozbiorze Wodnika. Z własnej inicjatywy podjął niezbędne obliczenia i wysłał pilny telegram do ówczesnie najbardziej znanego i najstarszego czasopisma naukowego „Astronomische Nachrichten” (AN 163, No 3903, 239). W telegramie podał nazwę gwiazdy oraz przewidywany moment zjawiska, czyli tzw. efemerydę.

Banachiewicz zaobserwował zakrycie gwiazdy przez Jowisza, a po około dwóch godzinach odnotował również pojawienie się tej gwiazdy zza tarczy planety. Tę ostatnią obserwację wykonał w obserwatorium astronomicznym Jędrzejewicza, znajdującym się wówczas na dziedzińcu szkoły inżynierskiej Hipolita Wawelberga i Stanisława Rotwanda przy ulicy Mokotowskiej w Warszawie. Wyniki obserwacji m. in. pozwoliły Hermannowi



Tadeusz Banachiewicz (siedzący) z kolegami w okresie studiów w Warszawie (1904).

O. Struvemu (1854-1920), wówczas dyrektorowi obserwatorium w Berlinie, na poprawienie wartości średnicy równikowej Jowisza². W trakcie obserwacji Banachiewicz dodatkowo stwierdził, że zakrywana gwiazda wykazuje zmiany jasności, o czym również poinformował w krótkiej notatce (podpisanej jako student!) i opublikowanej we wspomnianym już czasopiśmie (AN 163, No 3909, 335, 1903). Na podstawie jego odkrycia gwiazda została włączona do katalogu gwiazd podejrzanych o zmienność (*New Catalogue of Suspected Variable Stars*) jako NSV 14515. Według danych tego katalogu jej jasność zmienia się w granicach od 5.7 do 7.4 mag. W latach 1928-29 obserwacje wizualne gwiazdy prowadzili pracownicy Obserwatorium Krakowskiego: Janusz Pagaczewski (49 obserwacji w Uhercach w latach 1928-29), oraz Róża Szafraniec (7 obserwacji w Krakowie w latach 1948-49)³. Typ zmienności gwiazdy do chwili obecnej nie jest znany.

Zakrycia gwiazd przez planety i ich księżyce

Zjawiskami zakryć gwiazd przez ciała Układu Planetarnego (oprócz Księżyca) Tadeusz Banachiewicz interesował się również w następnych latach podkreślając, że obserwacje te mogą mieć znaczenie nie tylko astrometryczne, ale również istotne w badaniach atmosfer planet. Zwracał uwagę,

²J. Mietelski *Tadeusz Banachiewicz i jego krakowianie* „Prace Komisji Historii Nauki PAU” t. IV, s. 5 (2002).

³R. Szafraniec, *Krakowskie obserwacje gwiazd zmiennych* „Acta Astr. Suppl.” t. 3-6 (1959-1963).

że zanim planeta zakryje gwiazdę, a także w chwili jej odkrycia, przez bardzo krótki czas światło gwiazdy prześwieca przez gazową atmosferę planety, co może przynieść informacje o warunkach w niej panujących. Niestety te zjawiska zachodzą bardzo rzadko, a ponadto, zakrycia mogą nastąpić w ciągu dnia, lub być dostrzeżone wyłącznie z trudno dostępnych rejonów świata (oceany, pustynie, obszary podbiegunowe etc.), nie wspominając o podstawowym warunku, jakim jest bezchmurna pogoda w trakcie obserwacji. Dlatego, szczególnie istotne są obliczenia wskazujące miejsce i czas, w którym można spodziewać się, że dojdzie do zakrycia gwiazdy przez planetę, a niekiedy również przez jej naturalnego satelitę.

Banachiewicz korzystając z własnej metody obliczeń⁴ zainicjował publikowanie efemeryd tych zjawisk we wspomnianym już czasopiśmie „Astronomische Nachrichten”⁵. W 1906 r. zwrócił uwagę, że 7 maja nastąpi bardzo ciasna koniunkcja Saturna i jego księżyców z jasną gwiazdą $8^3 h Aquarii$ (5.5 mag) (AN 171, No 4085, 49) przy czym nie wykluczone, że księżyc Saturna – Dione przysłoni gwiazdę. Jak obliczył, niestety w Warszawie będą mało sprzyjające warunki obserwacji, gdyż zjawisko nastąpi krótko przed wschodem Słońca.

W 1908 r. przewidział, że 21 maja nastąpi zakrycie gwiazdy $BD + 19^\circ 2095$ (AN 177, No 4245, 343) przez Jowisza, wskazując, że obserwacje tego zjawiska mogą mieć znaczenie w przy określeniu rozmiarów tarczy planety. Wyniki obserwacji przeprowadzonych w kilku miejscach na świecie przedyskutował w artykułach, które ukazały się w AN (182, No 4368, 393, 1909) oraz we „Wszechświecie” (no 37, 588, 1909).

W 1909 r. opublikował informację (AN 180, no 4300, 61), że w tym roku w Warszawie co prawda nie będzie można obserwować żadnego zakrycia jaśniejszej gwiazdy przez planety, ale dodał, że w wąskim pasie przebiegającym przez Antarktydę nastąpi zakrycie księżyca Marsa – Deimosa przez gwiazdę z katalogu Bradleya *No 2333*. Zaobserwowanie zjawiska, trwającego zaledwie kilka dziesiątych części sekundy, dawało szansę na wyznaczenie średnicy tego niewielkiego księżyca Marsa.

W 1910 r. Banachiewicz doniósł o możliwej koniunkcji Urana i gwiazdy $BD - 21^\circ 5564$ (AN 184, No 4402, 173). Dobre warunki obserwacji były tylko w Australii i na Dalekim Wschodzie, ale jak zaznaczył, wysoce pożądane byłyby obserwacje fotograficzne w innych miejscach dla pełnej analizy tego zjawiska.

⁴J. Mietelski *Tadeusz Banachiewicz i jego krakowiany* „Prace Komisji Historii Nauki PAU” t. IV, s. 5 (2002).

⁵J. M. Kreiner, E. Piotrowska *Bibliografia prac profesora Tadeusza Banachiewicza* „Prace Komisji Historii Nauki” t. VII s. 328 (2005).

Kontynuując cykl komunikatów dotyczących zakryć gwiazd przez planety, Banachiewicz przewidział zakrycie jasnej gwiazdy zmiennej η *Geminorum* (3.1 - 3.9 mag) przez Wenus, które miało nastąpić 26 lipca 1910 (AN 185, No 4429, 211). Spodziewano się korzystnych warunków obserwacji, gdyż zjawisko mogło być obserwowane w Europie Środkowej i następowało tuż przed lub bezpośrednio po wschodzie Słońca. Gwiazda była zakrywana przez oświetloną Słońcem półkulę planety, a pojawiała się zza jej ciemnej strony. Przewidywany czas trwania zakrycia gwiazdy wynosił ok. 3 minuty. W wysłanym wcześniej telegramie (AN 183, No 4383, 239, 1910) Banachiewicz zwrócił uwagę, że obserwacje tego zakrycia mogą dostarczyć informacji o spłaszczeniu Wenus wynikającym z jej obrotu.

W kolejnej pracy Banachiewicza (AN 187 No 4465, 7, 1911) znajdujemy informację o trzech bardzo bliskich koniunkcjach Marsa z jasnymi gwiazdami, jakie nastąpią w 1911 r. oraz o zakryciu w dniu 13 sierpnia 1911 r. gwiazdy δ *Librae* (BD – 12°4042) (6.5 mag) przez Jowisza i jednego z jego księżyców – Ganimedesa. Z inicjatywy Tadeusza Banachiewicza obserwacje tego rzadkiego zjawiska podjęły obserwatoria w wielu miejscach na świecie, a także w prywatnym obserwatorium Władysława Szaniawskiego w Przegalinach. Tutaj jednak w obserwacjach istotnie przeszkodziło zachmurzenie nieba. Natomiast zakrycie gwiazdy przez Ganimedesa zaobserwowano m in. w Rio de Janeiro, w Cordobie (Argentyna) oraz w jezuickim obserwatorium Zô-Sè pod Szanghajem. Niestety w Australii, gdzie spodziewano się najlepszych warunków obserwacji pogoda była niesprzyjająca⁶.

Chociaż z oczywistych względów Tadeusz Banachiewicz nie mógł osobiście uczestniczyć w obserwacjach zakryć gwiazd przez planety, nie do przecenienia była jego inicjatywa podjęcia tych obserwacji w wielu obserwatoriach na świecie.

Obserwacje astronomiczne w Kazaniu. Przyjazd do Krakowa

W latach 1910-1915 Banachiewicz na zaproszenie profesora Dymitra I. Dubiago (1849-1918) pracował w Obserwatorium im. Engelhardta w pobliżu Kazania. W tym czasie zgromadził bardzo dużą liczbę heliometrycznych obserwacji Księżyca (znanych jako *kazański szereg Banachiewicza*), które miały na celu wyznaczenie parametrów ruchu obrotowego i libracji naszego naturalnego satelity. Do obserwacji wymagających wielkiego kunsztu

⁶T. Banachiewicz *Zakrycie gwiazdy przez Jowisza i jego III satelitę w d. 13 sierpnia r.b.* „Wszechświat” nr 38, s. 605 oraz nr 43, s. 687 (1911).

i staranności był dobrze przygotowany, gdyż wcześniej (w 1904 r.) na Uniwersytecie Warszawskim przedstawił pracę dyplomową *Badania stałych redukcyjnych heliometru Rapsolda Obserwatorium Pułkowskiego*. Wyniki obserwacji wykonanych w Kazaniu zyskały najwyższe uznanie i jeszcze kilkadziesiąt lat później ich ponowne opracowanie było m. in. podstawą szczegółowych badań nad libracją fizyczną Księżyca⁷. Zgromadzenie tak dużego materiału obserwacyjnego sprawiło, że zyskał opinię nie tylko znakomitego teoretyka, ale również wytrawnego i doświadczonego obserwatora. W Obserwatorium Engelhardta Banachiewicz wykonywał także liczne obserwacje komet i planetoid⁸.

Z końcem 1915 roku Banachiewicz przeniósł się do Dorpatu (obecnie Tartu w Estonii), gdzie wkrótce otrzymał nominację na stanowisko profesora i dyrektora tamtejszego Obserwatorium Astronomicznego. Jednak wskutek zmian politycznych, które w 1918 r. spowodowały zamknięcie Uniwersytetu, Banachiewicz zdecydował się na powrót do Polski. Początkowo zatrzymał się w Warszawie, gdzie przez kilka miesięcy pracował jako zastępca profesora geodezji na Politechnice Warszawskiej. Jednak w marcu 1919 r. przybył do Krakowa, gdyż Uniwersytet Jagielloński zaproponował mu objęcie stanowiska dyrektora Obserwatorium Astronomicznego, nieobsadzonego po śmierci Maurycego Piusa Rudzkiego (1862-1916).

Obserwatorium Krakowskie po I wojnie światowej

Wiosną 1919 r. personel Obserwatorium składał się zaledwie z dwóch pracowników naukowych: adiunkta dr. Władysława Dziwulskiego (1878-1962), pełniącego funkcję tymczasowego kierownika oraz Stanisława Szeligowskiego (1887-1966), zajmującego się głównie obserwacjami meteorologicznymi. Jesienią 1919 r. Dziwulski przeniósł się do Wilna, gdzie otrzymał stanowisko profesora, a po kilku miesiącach pracę w Wilnie na stanowisku adiunkta podjął również Szeligowski. Po roku 1919 do grona pracowników Obserwatorium Krakowskiego dołączyli: Józef Witkowski (1892-1976), Jan Gadomski (1889-1966), Lucjan Orkisz (1899-1973) i nieco później Eugeniusz Rybka (1898-1988).

Niezwykle skromne wyposażenie instrumentalne⁹ Obserwatorium stanowiły: ustawiona równikowo luneta Merza (bez mechanizmu zegarowego) o średnicy obiektywu 110 mm i ogniskowej 199 cm, tzw. szukacz komet Steinheila z obiektywem o średnicy 134 mm i ogniskowej 137 cm, kilka

⁷J. Mietelski *The Moon's Physical Libration from the Observations of T. Banachiewicz* „Acta Astr.” 18 No 1 (1968).

⁸J. M. Kreiner *Tadeusz Banachiewicz- obserwator* Archiwum Nauki PAN i PAU „W służbie nauki” nr 21, s. 21 (2012).

⁹T. Banachiewicz „Rocznik Astronomiczny Obserwatorium Krakowskiego” t. V s. 116 (1928).

drobniejszych instrumentów oraz dwa chronometry. Dopiero w 1923 roku dzięki osobistym kontaktom Banachiewiczowi udało się „na krótki czas” wypożyczyć z Harvard College Observatory lunetę z obiektywem 203 mm i ogniskowej 285 cm, która zresztą do chwili obecnej znajduje się w Krakowie. Luneta (zwana później „Amerykanką”) miała monturę paralaktyczną, ale początkowo była pozbawiona mechanizmu zegarowego. Ustawiono ją w kopule wschodniej na specjalnie wzniesionym filarze.



Obserwatorium Krakowskie w latach trzydziestych XX wieku.

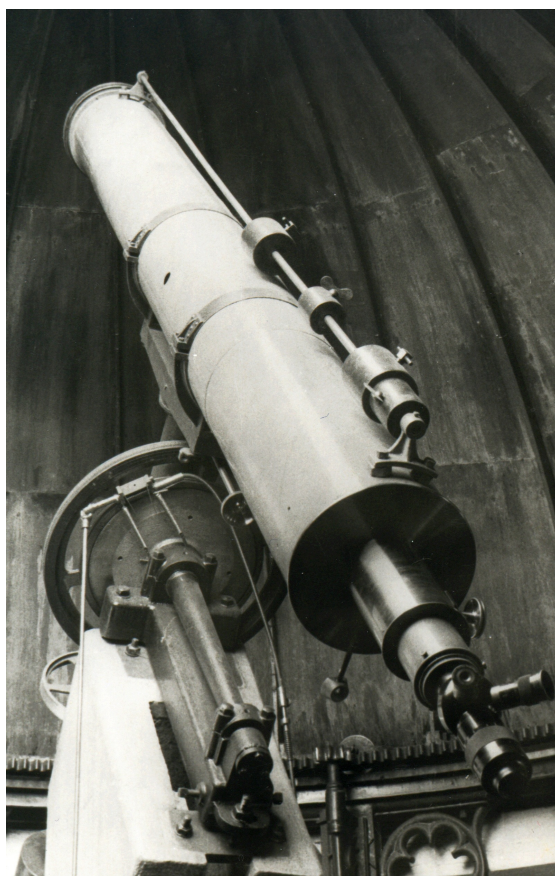
Budynek przy ul Kopernika nr 25 (wg ówczesnej numeracji) wymagał pilnego remontu, m. in. nie było światła elektrycznego, które doprowadzono dopiero w 1921 r. Ogrzewanie zapewniały piece węglowe, a wydobywający się z kominów dym, szczególnie zimą, dodatkowo utrudniał obserwacje, w których przeszkadzały także liczne światła okolicznej miejskiej zabudowy.

W tych trudnych warunkach, podstawowym zadaniem, które postawił przed sobą Banachiewicz było podjęcie takich programów obserwacyjnych (w myśl wspomnianej na wstępie dewizy: *observo ergo sum*), które, przynajmniej na początku, nie wymagałyby kosztownej aparatury i byłyby dostosowane do istniejącego wyposażenia instrumentalnego.

Krakowskie obserwacje zakryć gwiazd przez Księżyc

Jednym z pierwszych programów rozpoczętych w Krakowie po dłuższej przerwie były obserwacje zakryć gwiazd przez Księżyc, wykonywane wcześniej przez Banachiewicza w Warszawie, a później w Obserwatorium Engelhardta w Kazaniu. Pierwszą „krakowską” obserwację wykonał Banachiewicz 23 października 1920 r. i kontynuował je aż do 1953 r., w tym

również podczas II wojny światowej, odnotowując łącznie ponad 250 momentów zakryć i odkryć. Zachęceni przez Dyrektora, obserwacje zakryć prowadzili praktycznie wszyscy astronomowie zatrudnieni w Obserwatorium aż do lat 70. XX w. Dużym ułatwieniem dla obserwatorów były publikowane z inicjatywy Banachiewicza efemerydy tych zjawisk dla kilku miast w Polsce. Ukazywały się one „Dodatku Międzynarodowym” do „Rocznika Astronomicznego Obserwatorium Krakowskiego”¹⁰ począwszy od numeru szóstego. Pierwsze efemerydy 95 zakryć, które mogły być obserwowane w 1928 r. dla Poznania, Krakowa, Warszawy, Lwowa i Wilna obliczył Lucjan Orkisz. Pracę tę kontynuował w latach następnych.



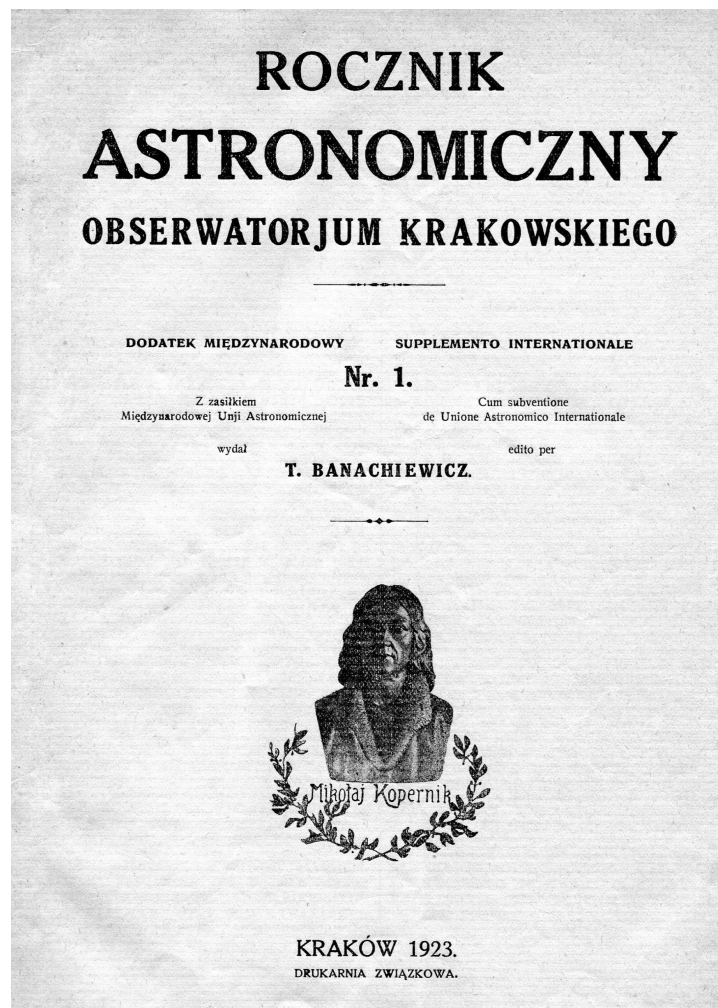
Refraktor harwardzki w Obserwatorium Krakowskim.

Gwiazdy zmienne zaćmieniowe

Wiodącym programem badawczym zainicjowanym w 1920 r. przez Banachiewicza były obserwacje gwiazd zmiennych, głównie zaćmieniowych, czyli układów podwójnych w których dochodzi do periodycznego zakrywania jednej gwiazdy przez drugą. W okresie międzywojennym były to niemal wyłącznie obserwacje wizualne, wykonywane zmodyfikowaną metodą Argelandera. Nie wymagały one żadnej specjalistycznej aparatury, a jedynie

¹⁰W literaturze spotyka się skróconą nazwę „SAC” (*Supplemento ad Annuario Cracoviense*)

lunety oraz chronometru, dla odnotowania czasu obserwacji z dokładnością przynajmniej jednej minuty. Sama obserwacja była bardzo prosta i polegała na ocenie (w umownych stopniach) różnicy jasności badanej gwiazdy zmiennej i nieznacznie jaśniejszej gwiazdy w polu widzenia lunety oraz analogicznego porównania zmiennej z gwiazdą nieco mniej jasną. Znając katalogowe jasności obu gwiazd porównywanych ze zmienną, obliczano jasność gwiazdy zmiennej. Przy pewnym doświadczeniu obserwatora błąd wyznaczonej tą metodą jasności gwiazdy zmiennej był rzędu ± 0.1 *magnitudo*, co było wielkością porównywalną z dokładnością ówczesnych obserwacji fotograficznych.



Strona tytułowa dodatku międzynarodowego „SAC” (*Supplemento ad Annuario Cracoviense*).

Celem serii obserwacji danej gwiazdy zaćmieniowej było wyznaczenie momentu jej minimum jasności. To z kolei, przy kilku zaobserwowanych minimach umożliwiało obliczenie aktualnego okresu orbitalnego danego układu podwójnego, a w dłuższej skali czasowej śledzenia ewentualnych zmian tego okresu.

Zainicjowany przez Banachiewicza program wizualnych obserwacji gwiazd podwójnych był kontynuowany do lat 60. XX w., gdy zastąpiły go obserwacje fotoelektryczne. W Krakowie, oraz na Stacji Zamiejskiej na Łysinie-/Lubomirze, w latach 1920-1950 dokonano łącznie ponad 11 tysięcy ocen jasności, które przygotowała do druku Róża Szafraniec¹¹ (1910-2001). Obserwacje kilku gwiazd zaćmieniowych (m. in. *RW Tauri*), były wykonane również przez Tadeusza Banachiewicza.

W przygotowywaniu programu obserwacji niezwykle pomocne były tzw. efemerydy minimów, czyli przewidywanych momentów, kiedy dana gwiazda będzie w minimum jasności. Obliczanie efemeryd zainicjował Banachiewicz i publikował je we wspomnianym powyżej „Dodatku Międzynarodowym” do „Rocznika” (SAC). Pierwszy numer tego wydawnictwa zawierał efemerydy 31 gwiazd obliczone dla drugiego półrocza 1923 r., przy czym, jak pisze Banachiewicz, *wybrane zostały gwiazdy najbardziej dostępne dla osób posiadających niewielkie lunety, a więc gwiazdy najjaśniejsze i o największej amplitudzie blasku*. W kolejnych numerach liczba gwiazd systematycznie wrastała. „Dodatek” nr 17 na rok 1939 zawierał efemerydy już dla 453 gwiazd.

Począwszy od numeru trzeciego „Dodatku” tablice z efemerydami na dany rok przygotowywał w głównej mierze Kazimierz Kordylewski (1903-1981), dbając, aby przyjęta do obliczeń wartość okresu zmian jasności była poprawna. Dokładność efemeryd była sprawdzana na bieżąco przez porównywanie momentów minimów uzyskanych z obserwacji z momentami przewidywanymi przez „Dodatek”, a w miarę potrzeby Kazimierz Kordylewski korygował wartości okresów przy kolejnych obliczeniach efemeryd. „Dodatek” wkrótce zdobył uznanie wśród licznych obserwatorów zagranicznych oraz pozytywną opinię Międzynarodowej Unii Astronomicznej (IAU), która doceniając celowość jego wydawania przeznaczała corocznie dla Obserwatorium Krakowskiego skromną dotację.

Całkowite zaćmienia Słońca

Kolejnym programem naukowym zainicjowanym w Krakowie przez Banachiewicza były obserwacje całkowitych zaćmień Słońca¹². Tadeusz Banachiewicz zainteresował się tymi zjawiskami po stwierdzeniu, że 29 czerwca 1927 r. pas całkowitości będzie przebiegał m. in. przez północne rejony Szwecji, a więc stosunkowo blisko Polski. Dla obserwacji zaćmienia opracował (przy współudziale inż. Stanisława Struzika) projekt specjalnej kamery

¹¹R. Szafraniec *Krakowskie obserwacje gwiazd zmiennych* „Acta Astr. Suppl. t. 3-6, PWN, 1959-1963, PWN.

¹²J. M. Kreiner *Polskie obserwacje zaćmień Słońca* „Prace Komisji Historii Nauki PAU” t. II, s. 75, Kraków, 2000.

filmowej¹³, która mogłaby sfilmować przebieg zjawiska przy równoczesnej rejestracji czasu. Wykonania takiej kamery, którą nazwał „*chronokinematografem*” podjęła się Fabryka Maszyn i Odlewnia „Krawczyk i Ska” w Zawierciu, a próbne obserwacje oryginalną aparaturą przeprowadził w Krakowie Kazimierz Kordylewski (1903-1981).



Tadeusz Banachiewicz przy chronokinematografie (Laponia, 1927).

Ostatecznie Banachiewicz zdecydował, że dla pełnej kontroli wyników obserwacje będą wykonywane niezależnie trzema chronokinematografami. Na miejsca obserwacji w Laponii Szwedzkiej wybrano:

- Porjus ($\lambda=19^{\circ}49'$, $\varphi = 66^{\circ}57'$), gdzie pomiarów dokonywali T. Banachiewicz oraz S. Struzik,
- Jokkmokk ($\lambda=19^{\circ}51'$, $\varphi=66^{\circ}36'$), obserwatorzy: K. Kordylewski, E. Stenz, S. Szeligowski,
- Skällarim ($\lambda= 20^{\circ}15'$, $\varphi= 66^{\circ}31'$), obserwatorzy: S. Andruszewski, E. Rybka.

Jednym z głównych zadań ekspedycji zaćmieniowej był precyzyjny pomiar czasu II i III kontaktu (początku i końca fazy całkowitej zaćmienia) celem wyznaczenia względnych położeń Słońca i Księżyca, a także pomiar średnic kątowych obu tych ciał niebieskich. Uzyskany materiał obserwacyjny, przede wszystkim ze stacji w Jokkmokk, został starannie opracowany przez Kazimierza Kordylewskiego, który na tej podstawie w 1932 r. uzyskał doktorat w Uniwersytecie Jagiellońskim¹⁴.

Chronokinematografy użyto także do obserwacji całkowitego zaćmienia Słońca 31 sierpnia 1932 r. w Stanach Zjednoczonych. Ze względu na

¹³J. M. Kreiner *Chronokinematografy w obserwacjach zaćmień Słońca* [w] *Polscy twórcy aparatury naukowej*, Monografie Komisji Historii Nauki PAU, s. 119. Kraków 2006.

¹⁴K. Kordylewski *Polska wyprawa do Laponii Szwedzkiej dla obserwacji całkowitego zaćmienia Słońca z 29-go czerwca 1927 roku*, „Acta Astr.” ser b t. I, s. 133, 1932.

znaczące koszty podróży zdecydowano się na obserwacje w dwóch lokalizacjach: w Bayley's Hill ($\lambda = -70^{\circ}56'$, $\varphi = 42^{\circ}51'$) w pobliżu Amesbury gdzie udali się T. Banachiewicz i J. Witkowski oraz w Camp Katahdin w pobliżu South Portland, gdzie zaćmienie mieli filmować astronomowie amerykańscy pod kierunkiem prof. Charlesa H. Smileya (1903-1977), ucznia i współpracownika prof. Banachiewicza. Jednak w tej lokalizacji niebo było zachmurzone.

Bardzo dobre warunki obserwacji całkowitego zaćmienia Słońca nastąpiły 19 czerwca 1936 r., gdyż pas całkowitości w znacznej części przebiegał przez rejony łatwo dostępne – począwszy od Grecji, przez całą Azję aż do Japonii. Banachiewicz zdecydował o wyborze czterech miejsc obserwacyjnych: w Keratea w pobliżu Aten, gdzie oprócz niego obserwacje prowadzili Stefan Piotrowski oraz Włodzimierz Zonn, na wyspie Chios (Kazimierz Kordylewski i Eugeniusz Rybka), w Omsku na Syberii (Józef Witkowski, Fryderyk Koebeke, Edward Stenz) oraz w Tsubetsu w Japonii, dokąd udał się Tadeusz Olczak. W Japonii niestety nie dopisała pogoda. Do obserwacji, użyto zmodyfikowanych chronokinematografów, montując elektryczny przesuw taśmy filmowej oraz neonówki dla rejestracji czasu.

Komety i inne obserwacje

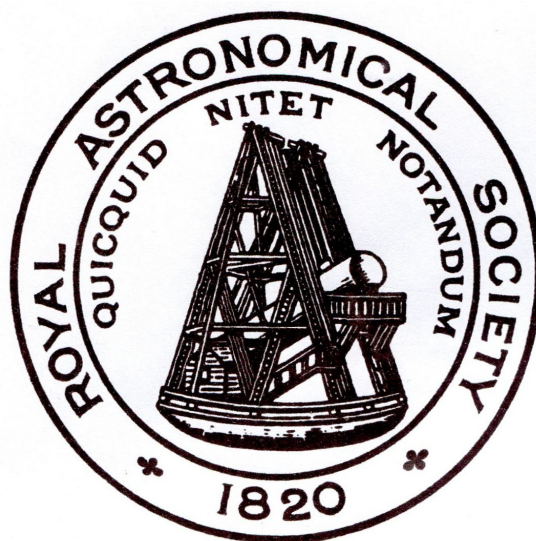
Oprócz wymienionych powyżej trzech głównych programów naukowych, Obserwatorium Krakowskie mogło poszczycić się również innymi osiągnięciami obserwacyjnymi. Po uruchomieniu Stacji Zamiejskiej na Łysinie, Banachiewicz wprowadził do programu obserwacji również poszukiwania komet. W 1925 r. Stacja odnotowała znaczny rozgłos, gdy wspomniany powyżej Lucjan Orkisz odkrył pierwszą w XX w. „polską” kometa nazwaną później *C/1925 G1 Orkisz*. Równocześnie w Krakowie poszukiwania nowych komet rozpoczął Antoni Wilk (1876-1940). Jego obserwacje wkrótce przyniosły rezultat, gdyż łącznie odkrył (lub był współodkrywcą) kolejnych czterech komet: *C/1925 V1 Peltier-Wilk*, *C/1929 Y1 Wilk*, *C/1930 F1 Wilk*, oraz *C1937 D1 Wilk-Peltier*. Ponadto, Władysław Lis (1911-1980), zatrudniony na Stacji Zamiejskiej na Lubomirze był współodkrywcą kolejnej komety (*C/1936 O1 Kaho-Kozik-Lis*). Komety były obserwowane wizualnie, mikrometrem wyznaczano ich pozycje.

Banachiewicz zwracał uwagę, aby obserwatorzy odnotowywali również inne zjawiska na niebie: przeloty bolidów, zorzę polarną, światło zodiakalne, a nawet niecodzienne zjawiska atmosferyczne. Niektóre z tych doniesień opisywał w formie popularnej, aby zainteresować astronomią szerokie grono czytelników. Jeszcze jako student przebywając w 1903 r. w Zakopanem dostrzegł nieznaną kometa (*C/1903 M1 Borrelly*) 4 wielkości gwiazdowej,

którą jednak nieco wcześniej odkrył astronom francuski Alphonse Louis Borrelly i jego nazwisko figuruje w nazwie komety¹⁵.

Po wielu latach, w trakcie jednego z ostatnich wywiadów („Przekrój” No 461 z dn. 7 lutego 1954) w rozmowie ze Stanisławem Pagaczewskim Tadeusz Banachiewicz wspominał: *Przez długie lata swego istnienia Obserwatorium było – rzecz można – tylko konsumentem dorobku nauki międzynarodowej, nie biorąc poważniejszego udziału w pracach z dziedziny astronomii obserwacyjnej. W ostatnich 30 latach uległo to zmianie. Z roli konsumentów przeszliśmy do roli „producentów” i to mimo skromnych środków materialnych oraz zbyt małej ilości astronomów. Naszą specjalnością są obserwacje gwiazd zmiennych (zmieniających blask) i komet. Warto przypomnieć, że szczycimy się odkryciem wszystkich sześciu „polskich” komet poczynwszy od roku 1925, kiedy to po raz pierwszy nazwisko polskiego astronoma, Lucjana Orkisa, zostało związane z nowoodkrytą kometa.*

Tadeusz Banachiewicz oprócz wielu odznaczeń i wyróżnień, został również w 1946 r. wybrany członkiem brytyjskiego Royal Astronomical Society, którego dewizą jest „QUICQUID NITET NOTANDUM” (ang. *whatever shines should be observed*) co w wolnym przekładzie brzmi: „Cokolwiek świeci należy obserwować” Tej dewizie Banachiewicz był wierny przez całe życie.



Logo Royal Astronomical Society.

¹⁵T. Banachiewicz *Kometa Orkisa (1925c)* „Rocznik Astronomiczny Obserwatorium Krakowskiego” t. IV, 177 (1925).



Portret Tadeusza Banachiewicza namalowany przez Marię Przyborską.

O trwałym dorobku Tadeusza Banachiewicza

Alex Schwarzenberg-Czerny

Centrum Astronomiczne im. M. Kopernika w Warszawie

Kariera Tadeusza Banachiewicza w skrócie

Istnieje szereg wyczerpujących biografii prof. Tadeusza Banachiewicza i obszerna bibliografia jego publikacji, jedne i drugie przy niemałym udziale prof. Jerzego Kreinera ([9] i [14]). Do tych i podobnych źródeł odsyłam zainteresowanego czytelnika. Zakres niniejszego artykułu przedstawia w miarę dokładnie treść wykładu w Obserwatorium Astronomicznym UJ w 70 rocznicę śmierci prof. Banachiewicza. W druku i w przygotowaniu znajdują się dwa inne o podobnej tematyce, ale albo bardzo popularny pozbawiony matematyki ale bogato ilustrowany, albo bardziej szczegółowy niż tutaj. Poniżej elementy biografii Tadeusza Banachiewicza przywołuję tylko na tyle na ile jest to niezbędne dla zrozumienia jak na jego działalność patrzyli współcześni i uczniowie.

- 1904 Dyplom wydziału Matematyczno Fizycznego Uniwersytetu Warszawskiego
- 1906 Roczny staż w Getyndze u Karla Schwarzschilda
- 1908 Staż w Pułkowie i asystentura na Uniwersytecie Warszawskim
- 1910-15 Asystent w Obs. Engelharda w Kazaniu (libracja Księżyca heliometrem, zakrycia)
- 1915-18 Dorpat (Docent, krótko prof. i dyrektor, prace o wyznaczaniu orbit)
- 1918 Docent geodezji na Politechnice Warszawskiej
- 1919-54 Prof. UJ, dyrektor Obserwatorium UJ, prof. AGH
- 1922 Pierwszy wykład o macierzach/krakowianach
- 1925 Założył i redagował „Acta Astronomica”
- 1930 Wczesna orbita Plutona [16]
- 1932-38 Vice prezes Międzynarodowej Unii Astronomicznej

1938 Publikacja prac o LU i $R^T R$

1938-52 Prezes komisji 17 Międzynarodowej Unii Astronomicznej (Księżyc, parametry libracji)

1939-45 Trzy miesiące w obozie koncentracyjnym w Sachsenhausen, potem ograniczona praca naukowa, delegacje do Uniwersytetów w Krakowie, Warszawie i Lwowie (okupant tolerował prace meteorologiczne i geofizyczne)

1953 Członek założyciel PAN, „Rachunek Krakowianowy” [4]

1954 Zmarł 17 listopada, spoczywa w panteonie narodowym „na Skałce” w Krakowie.

W oczach współczesnych

Teoria orbit

Podstawowym polem działalności prof. Banachiewicza (dalej TB) była dynamika ciał Układu Słonecznego. Mógł on się opierać na dobrym wykształceniu w metodach analitycznych i dynamicznych zdobytym m.in. na stażu w Getyndze u Karla Schwarzschilda. W tym zakresie jego najważniejszym osiągnięciem było nowoczesne sformułowanie metody Olbersa dla wyznaczenia orbit komet z 3 obserwacji oraz wykazanie istnienia w pewnych przypadkach niejednoznaczności rozwiązań Olbersa w tej metodzie (w 1915 r., [17]). Zagadnienie Olbersa to silnie nieliniowy problem mieszający prawa dynamiki i geometrię analityczną obrotów. W najprostszym przypadku, w.g. Laplace i Gaussa redukuje się on do rozwiązania wielomianu 8-stopnia. Innym osiągnięciem w tej dziedzinie było wykazanie przez TB rozbieżności szeregów Gylden-Brendla wtedy stosowanych dla perturbacji planetarnych planetoid, i zaproponowanie własnej lepszej metody.

Wczesna orbita Plutona (1930)

Stosując swoje macierzowe algorytmy obliczeń orbit TB na podstawie nielicznych ogłoszonych obserwacji uzyskał dość dobrą orbitę kołową, która posłużyła mu do odszukania dawniejszych zdjęć tej planety. Pozwoliło mu to wykorzystać fotografię otrzymaną w Obserwatorium Lowella i reprodukowaną w Illustrated London News bez podania daty i czasu ekspozycji oraz zdjęcie uzyskane 27 stycznia 1927 r. w Obserwatorium Uccle pod Brukselą, a także skorygować błędy innych opublikowanych już obserwacji. Na podstawie tak rozszerzonego materiału obliczył on wspólnie z prof.

Ch. Smileyem z Brown University, USA, bawiącym na studiach w Obserwatorium Krakowskim, orbitę eliptyczną ustalającą planetarny charakter Plutona. Przyszłość wykazała, że było to najlepsze ze wszystkich ogłoszonych wówczas rozwiązań.

Warto tu za redakcją [16] przytoczyć dosłowny opis tych prac: „W Cyrkularzu Krakowskim nr. 26 (także IAU Circ 296) Prof. T. Banachiewicz zamieścił pełny opis prac w Krakowie dotyczących orbity Plutona. Warto pamiętać, że z pomocą obliczonych tam efemeryd odkryto obraz Plutona na płycie otrzymanej w Uccle 27 Stycznia 1927 r., a ten z kolei pozwolił na znalezienie jego obrazów z Mount Wilson w 1919 r. oraz z Yerkes w 1921 i 1927 r. Poszczególne obserwacje Plutona z 1930 r. są obarczone odchyleniami sięgającymi 3'' co tłumaczy duże błędy poprzednio publikowanych orbit. Prof. Banachiewicz pokazał, że korzystając z dużej ilości obserwacji z 1930 r. można otrzymać równie dobrą orbitę Plutona jak ta otrzymana z pomocą tej z Mount Wilson i podobnych.”

Księżyc i zakrycia gwiazd

Teoria libracji Księżyca stworzona na podstawie własnych obserwacji i metodę TB i dzięki pracy współpracowników K. Kozieła (1949 r.) i J. Mieltskiego dała wyniki o precyzji nie osiągniętej aż do lotu Lunar Orbitera:

TABELA 1. Porównanie opisu libracji Księżyca w oparciu o prace TB i wyniki Lunar Orbiter:

źródło	f	I
TB/Kozieł	0.628 ± 0.019	$1^{\circ}32'37'' \pm 10.9''$
LLR i LO	0.63714 ± 0.00009	$1^{\circ}32'33.6'' \pm 0.2''$

Jedną z pierwszych publikacji młodego TB była efemeryda zakrycia BD $-6^{\circ}6191$ przez Jowisza (1903 r!) i 6G Lib przez Ganimedesa w sierpniu 1911 r. Ta ostatnia, pozwoliła na wyznaczenie średnicy tego księżyca. Banachiewicz opracował długą serię obserwacji pozycyjnych Graczowa w Engelhard uzyskując pozycje gwiazd i nową tablicę refrakcji.

Obserwacje i instrumenty

Talent organizacyjny TB ujawnił się przez organizację długotrwałych projektów badawczych dobrze dobranych do możliwości. Jeszcze w Kazaniu

zebrał 5-letnią serię obserwacji Księżyca, za pomocą pomiarów pozycji krateru Mossing A heliometrem, ówczynie jednym z najlepszych instrumentów do tego celu, która później posłużyła do stworzenia teorii libracji. Jego program obserwacji gwiazd zaćmieniowych jest kontynuowany do dziś, wspierał systematyczne poszukiwania komet, a sam udoskonalał metody wyznaczania ich orbit – C/1925 G1 (Orkisz), C/1925 V1 (Wilk-Peltier), C/1929 Y1 (Wilk), C/1930 F1 (Wilk), P/1937 D1 (Wilk), C/1936 O1 (Kaho-Kozik-Lis). Kontynuował zaawansowany program obserwacji geofizycznych, zapoczątkowany przez poprzednika, Maurycego Rudzkiego, pioniera światowej geofizyki, jednak dane były wysyłane do opracowania gdzie indziej. Organizował liczne ekspedycje grawimetryczne, geomagnetyczne, geodezyjne i na zaćmienia Słońca (Laponia 29. VI. 1927 r., Stany Zjednoczone 30. VIII. 1932 r. oraz Grecja, Syberia, Japonia 19. VI. 1936 r.). Stworzył obserwatoria na górze Lubomir w Beskidach (1922 r.) i Forcie Skała w Krakowie (1952 r.). Gdy środki na to pozwalały wzbogacał ich wyposażenie w teleskopy i pierwszy radioteleskop krakowski. Do obserwacji zaćmień zaprojektował i przeprowadził budowę chrono-cinematografu – zaawansowanego jak na te czasy instrumentu łączącego teleskop z kamerą filmową 16 klatek/s i chronografem precyzyjnie rejestrującym momenty ekspozycji.

Działalność organizatorska

W warunkach młodego państwa szeroki zakres zainteresowań i zdolności organizacyjne TB były bezcenne. Obowiązki dyrektora obserwatorium pełnił już w Dorpacie (Tartu), najpierw jako p/o, a w 1918 powołany formalnie. Poza wspomnianą działalnością w Krakowie, w 1922 r. był współzałożycielem Międzynarodowej Unii Astronomicznej, jej vice-prezesem w latach 1932-38 oraz, po docenieniu prac o libracji, prezesem Komisji 17 MUA d/s Księżyca, w latach 1938-52. Założył dwa czasopisma fachowe kontynuowane do dziś: „Rocznik Astronomiczny OAUJ” oraz „Acta Astronomica” (1925 r.). Na początku wojny, wraz z resztą profesury UJ przez 3 miesiące był więźniem Sachsenhausen, wracając, na rękach wyniósł współwięźnia i pracownika A. Wilka. Mimo to, gdy z powodu pomiarów geofizycznych przydatnych dla Wehrmachtu, okupant zezwolił na ograniczoną działalność obserwatoriów, TB podjął współpracę jako nieoficjalny szef polskich pracowników i chroniąc OAUJ przed wywózką. Przesłuchany po wojnie TB został oczyszczony z zarzutu kolaboracji, w odróżnieniu od prof. Czochralskiego (choć potajemnie współpracował z AK). W uznaniu zasług astronomicznych nazwę Banachiewicz otrzymał bardzo zniszczony

70 km krater w pobliżu wschodniego skraju tarczy Księżyca oraz planetoida 1286 Banachiewicza, wydłużona planetoida o średnicy 22 km w głównym pasie (1287 Lorcia odkrywcy z Uccle nazwali zdrobniałym imieniem żony Banachiewicza). W tym kontekście warto przypomnieć płk. Edwarda Godlewskiego, który razem z Adamem Kardynałem Sapiełą uchronił Kraków przed powstaniem, w przeciwieństwie do gen. Bór-Komorowskiego, formalnie zdrajcy stanu bo ignorował dyspozycje rządu emigracyjnego, który w Warszawie doprowadził do takiej hekatombi jak razem Hiroshima i Nagasaki.

Dzisiaj: Wynalazca/pionier nowoczesnych algorytmów w naukach ścisłych

Wynalazca i pionier informatyki

Jeszcze w Kazaniu TB zetknął się z możliwościami mechanicznych kalkulatorów. Zauważył, że skoro można nimi było obliczać iloczyny skalarne bez zapisu wyników pośrednich to świetnie się nadają do obliczeń z pomocą macierzy. Przez wiele lat jako jeden z pionierów wprowadzał nowoczesne algorytmy macierzowe w naukach ścisłych: astronomii, geodezji, algebrze numerycznej. Systematyczna konwersja obrotów do wzorów kartezjańskich pozwoliła unikać zapisu pośrednich kątów i ich funkcji z tablic. Dotyczyło to zamiany układów współrzędnych, poligonometrii sferycznej, numerycznego całkowania równań różniczkowych. Niejako antycypując pojawienie się komputerów jego algorytmy dają się wprost programować. Kierując się wygodą rachunków mechanicznych, wzory macierzowe zapisywał jako *krakowiany*, tak by mnożyć kolumna przez kolumnę. Teraz dla komputerów już jest to nieistotne przedstawienie indeksów, ale współcześni doceniali wygodę krakowianów ([13], bibliografia w [4], *Nautical Almanach* też czasem ich używał), z zastrzeżeniem *Theory by matrices ... calculations by cracovians*, [12]. Oto porównanie zapisów w.g. [4]:

Krakowiany	Macierze
$A \circ B$	$\Leftrightarrow B^T \times A$
$A \circ IB = A \circ (I \circ B)$	$\Leftrightarrow B \times A$
A_{ki}	$\Leftrightarrow A_{ik}$

Do macierzy kwadratowych stosują się te same działania jak do liczb całkowitych (czyli bez powszechnego dzielenia), stanowią algebraiczny *pierścień*. Natomiast zarówno mnożenie krakowianów jak i macierzy z transpozycją nie jest łączne zatem nie stanowią one pierścienia. Różnica między nimi to tylko sposób zapisu.

Przełomowa praca o czynnikach trójkątnych macierzy

Opublikowana w 1938 r. przez Banachiewicza praca [1] o rozkładzie macierzy na czynniki trójkątne LU i $R^T R$ zawiera nowy algorytm macierzowy, dziś w erze komputerów i AI jeden z najważniejszych. *Méthode de résolution numérique des équations linéaires ...* [1] przedstawia rozkład na czynniki trójkątne LU , po raz pierwszy, i $R^T R$, *niezależnie* od Choleskiego [5], odpowiednio dla macierzy nie-symetrycznej i symetrycznej. W tym kontekście *twierdzenie, że krakowiany to inny rachunek, a nie tylko inny zapis macierzy obniża rangę odkrycia Banachiewicza w oczach świata!!!* Rozkład LU jest jednym z podstawowych i najczęściej używanych algorytmów numerycznych (częściej niż ONP Łukasiewicza). Dla pierwszej prawej strony równań liniowych wymaga $\mathcal{O}(N^3)$ operacji jak eliminacja Gaussa, ale dla pozostałych już tylko $\mathcal{O}(N^2)$. Natomiast rozkład $R^T R$ jest optymalnym algorytmem w *metodzie najmniejszych kwadratów* (MNK) o ile równania normalne są dobrze określone, $\det(A^T A) \sim 1$.

Ta praca została opublikowana po francusku w mało znanym Biuletynie PAU wskutek komedii omyłek ze strony jej autora jak i zawodowych matematyków. Główne polskie pisma matematyczne *odmówiły* druku, bo (i) TB *wbrew oczywistości** upierał się, że krakowiany to nie zaledwie alternatywny zapis macierzy lecz nowy rachunek algebraiczny, ale (ii) *mimo** W. Sierpiński i inni matematycy przeoczyli, że ta praca zawiera wyprowadzenie *nowej zależności algebraicznej* $A = LU$ i (iii) teoretykom obytym z macierzami o rozmiarze $n \lesssim 5$ zabrakło wyobraźni, że raptem za parę lat komputery będą liczyć macierze dla $n \gg 100$, gdzie ekonomia obliczeń jest krytyczna, a rozkładem macierzy i jego stabilnością zajmą się takie tuzy jak von Neumann i Turing, [18] i [19].

Wskutek powyższego Anglosasi i *polskie* podręczniki przypisują LU Crout'owi [6] i Dwyer'owi [10] lub wręcz Doolittle [8], który o macierzach nie słyszał. Przy tym jednak Dwyer [11] uczciwie zaznaczył, że „It appears that Gauss and Doolittle applied the method [of elimination] only to symmetric equations. More recent authors, for example, Aitken, Banachiewicz, Dwyer, and Crout ... have emphasized the use of the method, or

variations of it, in connection with non-symmetric problems ... Banachiewicz ... saw the point ... that the basic problem is really one of matrix factorization, or “decomposition” as he called it.”

Warto wyniki TB z 1938 r. przedstawić w konwencjonalnym zapisie macierzowym. Jego równania (1.1-bis) i (1.2) przyjmują następującą formę:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} \circ IA' &= \mathbf{0} \Leftrightarrow A' \times \mathbf{x}' = \mathbf{0} \\ A' &= G' \circ H \Leftrightarrow A' = H^T \times G' \end{aligned}$$

gdzie $'$ oznacza rozszerzone czynniki $A' = (A|\mathbf{1})$, $G' = (G|\mathbf{y})$ dla $H^T \mathbf{y} = \mathbf{1}$, a $\mathbf{x}' = (\mathbf{x}^T | -1)^T$ i dla przejrzystości trzymamy się współczesnej konwencji: macierze dużymi literami, a wektory małymi wytłuszczone. Istotnie $A' \mathbf{x}' = H^T G' \mathbf{x}' = H^T (G | H^{-T} \mathbf{1}) \mathbf{x}' = (H^T G | \mathbf{1}) \mathbf{x}' = A \mathbf{x} - \mathbf{1} = \mathbf{0}$. W odróżnieniu od obecnej konwencji LU tutaj druga macierz trójkątna rozkładu czyli G' ma jednostkową przekątną. Tradycyjny zapis można uzyskać po transpozycji $B' = (A')^T = (H^T G')^T = (G')^T H = L' U$ kładąc $L' = G'^T$ i $U = H$. Czyli

$$B = LU$$

i macierz L ma jednostkową przekątną.

Rozkład $R^T R$ Choleskiego-Banachiewicza

$R^T R$ jest naturalną konsekwencją LU TB dla macierzy symetrycznej A , bowiem:

$A = A^T = LD^{1/2}D^{-1/2}U = (LD^{1/2})(D^{-1/2}U) = (D^{-1/2}U)^T(D^{-1/2}U) = R^T R$, gdzie $D^{1/2}$ jest macierzą diagonalną z pierwiastkami wyrazów przekątnej U , a z symetrii A wynika, że czynniki $(LD^{1/2})$ i $(D^{-1/2}U)$ o identycznej przekątnej muszą być wzajemną transpozycją. Aczkolwiek [5] opublikował opis metody Choleskiego, ówczesne popularne podręczniki (np. [15] i [20]) nie wspominają o niej, a jeszcze w dopisku do pracy [3] wydawca AJ płacze eliminację Gaussa z $R^T R$ pisząc: „The author was apparently not familiar with the method of solving normal equations by W. de Sitter, Ann.Cape Obs. 12 part 1, Appendix 161-173, 1915. De Sitter scheme appears to be essentially as brief as Banachiewicz’s.”) Ten powszechny brak świadomości o Choleskim uprawdopodobnia, że TB odkrył $R^T R$ niezależnie.

Znaną wadą metody najmniejszych kwadratów (MNK) z użyciem rozkładu $R^T R$ jest wrażliwość na zaokrąglenia dla macierzy prawie osobliwych (ortogonalne obroty Givensa lub SVD są lepsze). Natomiast niedocenioną zaletą $R^T R$ w MNK jest to, że w przypadku iteracji zalecanych

nawet w liniowym przypadku (tzw. poprawianie różniczkowe rozwiązania) jest to najprostszy i ekonomiczny algorytm dający rozwiązanie w zakresie precyzji maszynowej, nawet gdy same czynniki $R^T R$ są niedokładne. Ta ostatnia wada jedynie ogranicza obszar zbieżności dla pierwszych przybliżeń, ale zbieżne rozwiązanie jest równie dokładne jak z użyciem metod Givensa czy SVD. Prawie osobliwość przy której $R^T R$ zawodzi oznacza też prawie nieskończone elipsoidy błędów i jest wadą problemu, której Givens/SVD nie usuwają. Tej uwagi brak w podręcznikach metod numerycznych.

Dygresja na temat $R^T R$ w MNK

Oryginalnym wkładem Banachiewicza do $R^T R$ jest zauważenie, że w rozwiązaniu równań *normalnych* jeśli $(A|l)^T(A|l) = R^T R$ to ostatnia kolumna R^{-1} zawiera niewiadome, a ostatni element diagonalny $R_{N+1,N+1}$ to suma kwadratów odchylek. Choć nie oszczędza to obliczeń, stanowi eleganckie sformułowanie rozwiązania. Nieliniowa MNK (NMNK) polega na zastosowaniu obciętego szeregu Taylora funkcji wektorowej $\mathbf{f}$:

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_0 + \delta\mathbf{x}) \approx \mathbf{f}(\mathbf{x}_0) + (\partial\mathbf{f}/\partial\mathbf{x})\delta\mathbf{x}$$

Po takim przybliżeniu mamy problem liniowej MNK na $\delta\mathbf{x}$:

$$(\partial\mathbf{f}/\partial\mathbf{x})\delta\mathbf{x} = \mathbf{l} - \mathbf{f}_0 = \mathbf{v}, \quad \min_{\delta\mathbf{x}} = \|\mathbf{v}\|^2.$$

Iteracje rozwiązania $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \delta\mathbf{x}$ o ile są zbieżne, $\|\delta\mathbf{x}\|_{\mathbf{n}} < \|\delta\mathbf{x}\|_{\mathbf{n}-1}$, dają dokładne $\mathbf{x}_{\infty}$ na tyle na ile pozwala dokładność $\mathbf{l} - \mathbf{f}(\mathbf{x})$. Dokładność macierzy $(\partial\mathbf{f}/\partial\mathbf{x})$ i jej odwracania ogranicza obszar wartości początkowych $\mathbf{x}_0$ i szybkość zbieżności, ale bez wpływu na precyzję rozwiązania. Czasem można pominąć ponowne obliczenia $(\partial\mathbf{f}/\partial\mathbf{x})$ przyspieszając iteracje metodą δ^2 Aitkena. Nawet w LMNK warto podstawić $\mathbf{x}_0 = \mathbf{0}$ i $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = A\mathbf{x}$ do NMNK i wykonać 2 iteracje, co odpowiada zalecanemu *różniczkowemu poprawianiu rozwiązania*. Jeśli brak zbieżności/prawie osobliwość to z kolejnych wierszy A przez obroty Givensa można niezależnie od metody Ch.-B. obliczyć R , a dalej jak dla Ch.-B. Zbędne jest przechowanie całego A , a koszt Givensa $2mn^2$, jest 4x większy, ale po kilku iteracjach można wrócić do metody $R^T R$. W tym sensie metoda Ch.-B. jest nadal aktualna i dokładna.

Uczniowie Banachiewicza i Dziewulskiego twórcami polskiej astrofizyki

Oprócz wynalezienia rozkładu LU o światowym znaczeniu w metodach numerycznych, dla Polski zasługą Tadeusza Banachiewicza w Krakowie i jego rówieśnika Władysława Dziewulskiego we Wilnie było stworzenie podstaw do rozwoju w naszym kraju współczesnej astrofizyki, poprzez wykształcenie uczniów którzy przerosli swych mistrzów. Stefan Piotrowski w Krakowie stworzył podstawy teorii atmosfer gwiazd, niezależnie od Subramahnyana Chandrasekchara za Oceanem, a już po wojnie warszawski ośrodek astrofizyki teoretycznej. Wilhelmina Iwanowska we Wilnie zbudowała pierwszy w Polsce spektrograf i korzystając z niego, także w zagranicznych obserwatoriach, była w stanie odkryć populacje gwiazd w Drodze Mlecznej, czego za oceanem dokonał Walter Baade. Po wojnie wraz ze swoim mistrzem przyczyniła się do rozwoju astrofizyki obserwacyjnej w Toruniu. Z powodu wojny ci uczniowie nie byli w stanie propagować swoich osiągnięć, ale po wojnie zostały one dostrzeżone na forum międzynarodowym. Zaraz po wojnie SP otrzymał stypendium w Harvardzie, a później WI została wybrana wiceprezesem MUA.

Literatura

- [1] Banachiewicz T., 1938, *Méthode de résolution numérique des équations linéaires, du calcul des déterminants et des inverses, et de réduction des formes quadratiques*, Bull. Acad. Pol. Ser. A. No. 10-12, p. 393-404
- [2] Banachiewicz T., 1938b, *Principes d'une nouvelle technique de la méthode des moindres carrés*, Bull. Acad. Pol. Ser. A. No. 3-5, p134 (in Polish); C. R. Mens. Cl. Math. Nat. Acad. Pol. No 4, p3 (in French)
- [3] Banachiewicz T., 1942, AJ 50, 38
- [4] Banachiewicz T., 1959, *Rachunek Krakowianowy*, Warsaw, PWN (in Polish)
- [5] Benoit E., 1924, *Note sur une méthode de résolution des équations normales provenant de l'application de la méthode des moindres carrés à un système d'équations linéaires en nombre inférieur à celui des inconnues (Procédé du Commandant Cholesky)*. Bulletin Géodésique 2, 66-67 (in French)
- [6] Crout P.D., 1941, Trans. Amer. Inst. Elec. Engineers 60, 1235.
- [7] de Sitter W., 1915, Ann. Cape Obs. 12, part 1, Appendix p161.
- [8] Doolittle M. H., 1881, *Method employed in this office in the solution of normal equations and in the adjustment of a triangulation in Report of the Superintendent US Coast and Geodetic Survey (for 1878)*, Appendix 8, paper 3, p. 115.
- [9] Dworak T.Z., Kreiner J. M., 1985, *Tadeusz Banachiewicz – Twórca Krakowianów*, Warszawa, Wydawnictwo PAN.
- [10] Dwyer P.S., 1945, J. Amer. Statist. Assoc. 40, 493.
- [11] Dwyer P.S., 1951, *Linear Computations*, Hoboken NJ, John Wiley.
- [12] Jensen H., 1944, *An attempt at a systematic classification of some methods for the solution of normal equations*, Meddelelse 18, Geodætisk Institut, Copenhagen.

- [13] Kopal Z., 1959, *Close binary systems*, Hoboken, N.J., John Wiley & Sons.
- [14] Kreiner J.M., Piotrowska E., 2005, *Bibliografia prac profesora Tadeusza Banachiewicza*, Prace Komisji Historii Nauki PAU 7, 327.
- [15] Mineur H., 1938, *Technique de la methode des moindres carres*, Paris, Gauthier-Villars.
- [16] Nature (Ed.), 1930, *News: Our Astronomical Column News*, Nature 126, 3178.
- [17] Stracke G., 1929, *Bahnbestimmung der Planeten und Kometen*, Teil 13, Berlin.
- [18] Turing A. M., 1948, *Rounding-off errors in matrix processes*, Quart. J. Mech. Appl. Math., 1, 287-308.
- [19] von Neumann J., Goldstine H. H., 1947 *Numerical inverting of matrices of high order*, Bull. Amer. Math. Soc., 53, 1021-1099.
- [20] Whittaker E. T., Robinson G., 1932, *The calculus of observations; a treatise on numerical mathematics* (2nd ed.), London & Glasgow, Blackie & Son.

Profesor Tadeusz Banachiewicz jako prekursor nowoczesnych metod optymalizacji bibliotek numerycznych

Maciej Paszyński

Wydział Informatyki, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wprowadzenie

Jest mi niezmiernie przyjemnie przedstawić tezę, iż prof. Tadeusz Banachiewicz był pierwszym w historii badaczem, który odkrył metody optymalizacji obliczeń naukowych, powszechnie stosowane w czasach dzisiejszych w bibliotekach numerycznych takich jak GotoBLAS [1,2], FLAME [3,4,5], LAPACK [6], czy ITXGEMM [7], wykorzystywanych w obliczeniach naukowych na świecie.

W celu udowodnienia mojej tezy, wykażę najpierw, iż prof. Banachiewicz tworząc tak zwany rachunek Krakowianowy [8], tak naprawdę pracował z mnożeniem tradycyjnych macierzy, z których jedna została transponowana w celu przyspieszenia obliczeń.

Innymi słowy, postuluję tutaj być może kontrowersyjną tezę, iż wprowadzenie osobnej nazwy „rachunek Krakowianowy” jest mylący. Krakowiany to takie same byty jak macierze, w moim przekonaniu nie należy ich nazywać inaczej. Prof. Banachiewicz wprowadził jedynie nowy sposób mnożenia macierzy zwany operatorem mnożenia Krakowianowego $k(A, B) = A^T B$, w którym to transponujemy pierwszą macierz przed wykonaniem tradycyjnego iloczynu macierzy.

Spostrzeżenie iż rachunek Krakowianowy tak naprawdę operuje na zwykłych macierzach, dodaje większego znaczenia odkryciom profesora Tadeusza Banachiewicza. Można wówczas słusznie postulować, iż był on

nie tylko pierwszym odkrywcą algorytmu LU faktoryzacji macierzy [9]¹, ale również pierwszym odkrywcą nowoczesnych metod optymalizacji bibliotek numerycznych (pracujących na zwykłych macierzach).

Mając to na uwadze, należy zauważyć, iż wprowadzenie operatora mnożenia Krakowianowego, był to pierwszy udokumentowany w historii sposób optymalizacji przesyłania danych z pamięci RAM komputera (w chwili wprowadzenia metody mnożenia Krakowianowego, w poprzednim wieku, tą „pamięć RAM” reprezentowała kartka papieru) a pamięcią podręczną procesora (w poprzednim wieku tą „pamięcią podręczną procesora” był umysł osoby przemnażającej macierze za pomocą operatora mnożenia Krakowianowego). Dzięki zaproponowaniu takiego sposobu mnożenia macierzy, mnożenie jest „wygodniejsze”, a z punktu widzenia nowoczesnych architektur komputerowych, pozwala znacznie przyspieszyć kody obliczeniowe. Jak pokażę w dalszej części pracy, idea ta jest powszechnie używana na świecie przy wytwarzaniu bibliotek numerycznych służących do obliczeń naukowych.

Krakowiany i mnożenie macierzy

Dla ustalenia uwagi, założmy, że pracujemy z dwoma macierzami A, B . Ze względów historycznych macierze te nazywane są Krakowianami, jednak, w moim przekonaniu, nazwa ta jest myląca, i nie powinna być używana. Oznaczmy przez $k(A, B)$ operację, którą nazwiemy operacją mnożenia Krakowianowego. Jest ona zdefiniowana w sposób następujący. Dla macierzy A o n wierszach i m kolumnach, i dla macierzy B o n wierszach i l kolumnach, $k(A, B)$ zwraca macierz o rozmiarze m wierszy i l kolumn, taką że

$$\{k(A, B)\}_{i=1, \dots, m}^{j=1, \dots, l} = \sum_{p=1, \dots, n} A_{pi} B_{pj} = \sum_{p=1, \dots, n} A_{ip}^T B_{pj} = \{A^T B\}_{i=1, \dots, m}^{j=1, \dots, l} \quad (1)$$

Na przykład, dla $n = m = l = 2$, mamy

$$k(A, B) = k\left(\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}\right) = \begin{bmatrix} a_{11}b_{11} + a_{21}b_{21} & a_{11}b_{12} + a_{21}b_{22} \\ a_{12}b_{11} + a_{22}b_{21} & a_{12}b_{12} + a_{22}b_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Klasyczne mnożenie macierzy odpowiada mnożeniu Krakowianowemu dla przypadku transponowania pierwszej macierzy.

¹LU faktoryzacja znajduje się na drugim miejscu rankingu najczęściej używanych algorytmów nauk obliczeniowych na świecie [10]

$$A^T B = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} \\ a_{12} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}b_{11} + a_{21}b_{21} & a_{11}b_{12} + a_{21}b_{22} \\ a_{12}b_{11} + a_{22}b_{21} & a_{12}b_{12} + a_{22}b_{22} \end{bmatrix} = k(A, B) \quad (3)$$

Innymi słowy, jeśli potrzebujemy przemnożyć dwie macierze A i B , to możemy zrobić to klasycznie, mnożąc AB , lub transponować macierz A i użyć mnożenia Krakowianowego.

Wyjaśnijmy teraz na przykładzie, dlaczego mnożenie macierzy za pomocą operatora mnożenia Krakowianowego jest „wygodniejsze” i powoduje „przyspieszenie obliczeń”. Porównajmy na przykładzie dwóch macierzy o rozmiarze 2 wierszy i 2 kolumn, mnożenie klasyczne i mnożenie za pomocą mnożenia Krakowianowego. Klasyczny iloczyn macierzy zdefiniowany jest następująco

$$AB = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 & 6 \\ 7 & 8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 \\ 7 \end{bmatrix} \right) & \left(\begin{bmatrix} 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 6 \\ 8 \end{bmatrix} \right) \\ \left(\begin{bmatrix} 3 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 \\ 7 \end{bmatrix} \right) & \left(\begin{bmatrix} 3 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 6 \\ 8 \end{bmatrix} \right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 * 5 + 2 * 7 & 1 * 6 + 2 * 8 \\ 3 * 5 + 4 * 7 & 3 * 6 + 4 * 8 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Mnożenie klasyczne wymaga uważnego czytania wierszy i kolumn, „skakania” wzrokiem po różnych fragmentach macierzy A i B .

Ten sam wynik uzyskać można za pomocą mnożenia Krakowianowego po transponowaniu pierwszej macierzy.

$$AB = k(A^T, B) = k \left(\begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 2 & 4 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 5 & 6 \\ 7 & 8 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} k \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 & 6 \end{bmatrix} \right) \\ k \left(\begin{bmatrix} 3 \\ 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 & 6 \end{bmatrix} \right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$= \begin{bmatrix} k \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 \\ 7 \end{bmatrix} \right) & k \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 6 \\ 8 \end{bmatrix} \right) \\ k \left(\begin{bmatrix} 3 \\ 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 \\ 7 \end{bmatrix} \right) & k \left(\begin{bmatrix} 3 \\ 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 6 \\ 8 \end{bmatrix} \right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 * 5 + 2 * 7 & 1 * 6 + 2 * 8 \\ 3 * 5 + 4 * 7 & 3 * 6 + 4 * 8 \end{bmatrix} \quad (6)$$

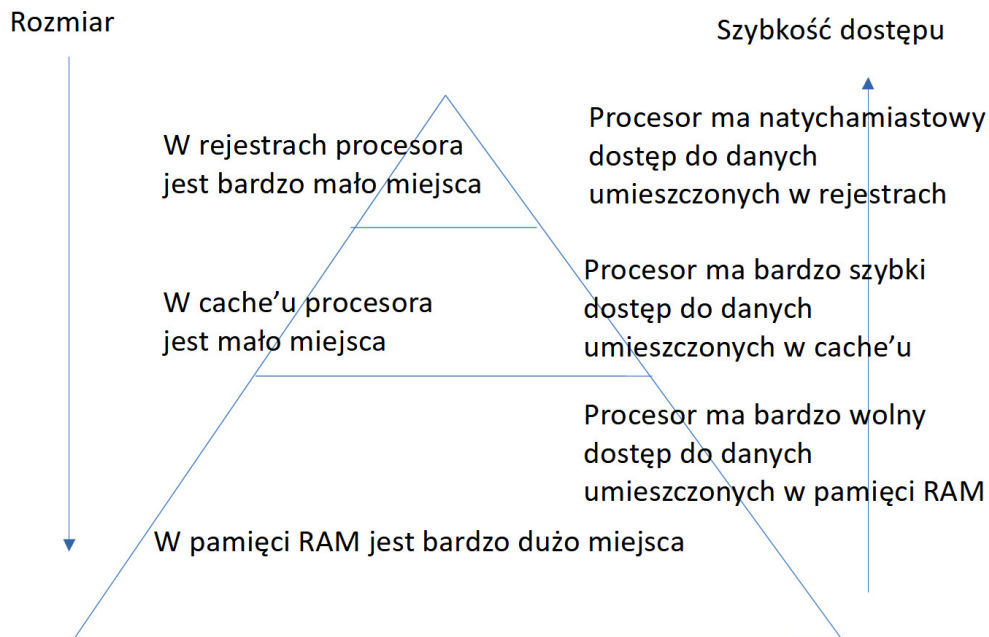
Mnożenie za pomocą operatora Krakowianowego jest wygodniejsze. Przemnażamy zawsze dwie kolumny zapisane obok siebie, mnożąc liczby które

znajdują się obok siebie. Nie musimy „skakać” wzrokiem po różnych wierszach i kolumnach macierzy A i B .

Optymalizacja transferów pamięci w nowoczesnych bibliotekach numerycznych

W uproszczeniu, architektura nowoczesnego procesora przedstawiona jest na rysunku 1. Dane potrzebne do obliczeń przechowywane są w pamięci Random Access Memory (RAM). Pamięć ta jest obszerna, natomiast procesor nie ma bezpośredniego dostępu do pamięci RAM. Żeby wykonać obliczenia, musi on najpierw zająć przesłania danych z pamięci RAM do cache’u. Nowoczesne procesory mają po kilka poziomów cache’a. W naszym uproszczonym przykładzie, zakładamy że mamy jeden poziom cache’a. W celu wykonania obliczenia, np. pomnożenia lub dodania dwóch liczb, są one przesyłane z cache’a do rejestrów procesora. Procesor taktowany jest zegarem, i w jednym cyklu procesor wykonuje jedno obliczenie (mnożenie lub dodawanie). Oczywiście mnożenie liczb jest bardziej kosztowne niż dodawanie, ale z pomocą przychodzą tutaj algorytmy takie jak algorytm Karatsuby [11], który pozwala wykonywać efektywnie mnożenia dwóch liczb w jednym cyklu pracy procesora. Przesyłanie danych pomiędzy pamięcią RAM, a procesorem możliwe jest za pomocą transferów pamięci, które obejmują bloki określonego rozmiaru. Z tego też powodu, jeśli macierz przechowywana jest w pamięci „kolumnami” a konieczne jest przesłanie „wiersza” z pamięci RAM do cache’a procesora oraz liczba wierszy macierzy jest większa (lub równa) rozmiarowi bloku, który przesyłany jest w jednym kroku z RAMu do cache’a, wówczas przesłanie jednego wiersza zajmuje wiele transferów pamięci. Co innego przesłanie kolumny macierzy, której ułożenie w pamięci jest zgodne z uporządkowaniem komórek pamięci. Dla przykładu, w procesorach Intel, przesłanie jednego bloku danych z RAMu do cache’a zajmuje dwa rzędy więcej cykli procesora niż wykonanie obliczeń (mniej więcej 100 cykli na jeden transfer pamięci).

W praktyce oznacza to, że jeżeli nie zaprojektujemy dobrze przesyłania danych pomiędzy RAMem a cache’em wówczas procesor większość czasu spędzał będzie na oczekiwaniu na dane zamiast na obliczeniach. W przypadku mnożenia macierzy istnieje wiele sposobów podzielenia danych i przesyłania ich pomiędzy RAMem a cache’em procesora. Są one opisane na przykład w rozdziałach 5.3 (podrozdziały 5.3.1-5.3.4) oraz w rozdziale 5.4 (w którym to opisane jest jak różne dzielenie i układanie w pamięci fragmentów macierzy przyspiesza czas obliczeń) [12].



RYSUNEK 1. Uproszczony schemat dostępu do danych w nowoczesnych procesorach.

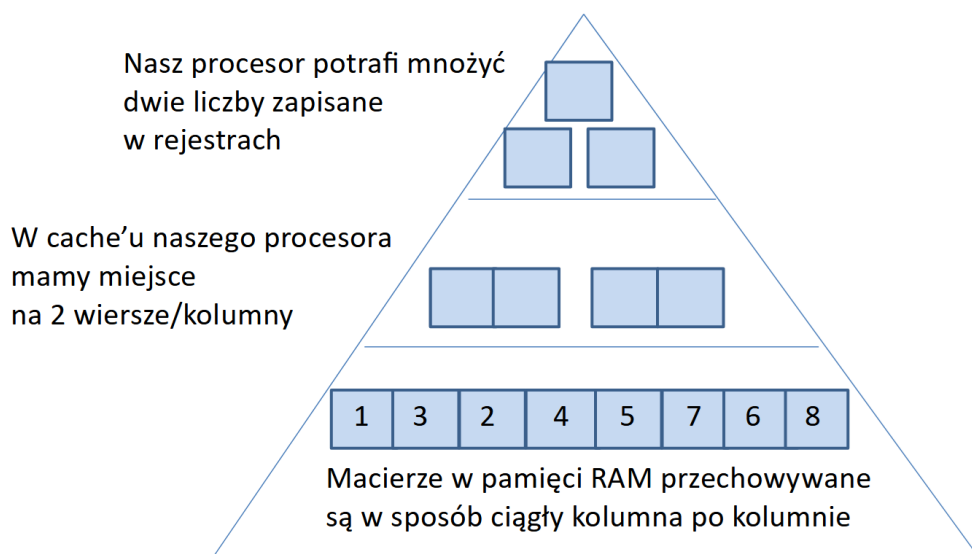
W celu zilustrowania tego zagadnienia w kontekście odkrycia operatora mnożenia Krakowianowego przez prof. Tadeusza Banachiewicza, porównajmy koszt obliczeniowy tradycyjnego mnożenia macierzy, z kosztem obliczeniowym mnożenia macierzy za pomocą operatora mnożenia Krakowianowego.

Mnożenie macierzy za pomocą metody klasycznej

Zakładamy, że nasz procesor potrafi w swoim rejestrze mnożyć lub dodawać dwie liczby. Posiada więc trzy rejestry, dwa w których przechowywane są liczby do mnożenia / dodawania, oraz trzeci, w którym zapisuje się wynik. Po wykonaniu obliczenia, wynik przesyłany jest z powrotem do pamięci RAM w specjalnie w tym celu przygotowane miejsce.

Zakładamy również, że nasz procesor posiada cache, w którym umieścić można dwa wiersze lub kolumny mnożonych macierzy.

Architektura naszego procesora przedstawiona jest na rysunku 2. W pamięci RAM generujemy macierz A oraz macierz B . Macierze przechowywane są w pamięci kolumna po kolumnie. Zakładamy, że mechanizm przesyłania danych z pamięci RAM do cache'a procesora potrafi przesłać ciągłą sekwencję danych z pamięci RAM o rozmiarze długości jednej kolumny macierzy (w naszym prostym przykładzie dwie kolejne liczby).



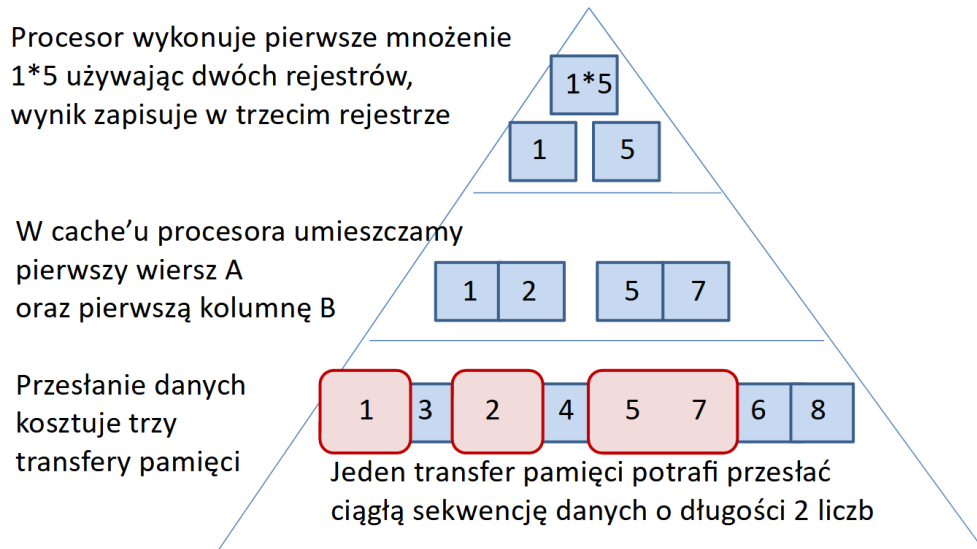
RYSUNEK 2. Klasyczne mnożenie macierzy $AB = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 & 6 \\ 7 & 8 \end{bmatrix}$.

Obliczenie mnożenia macierzy metodą klasyczną rozpoczyna się od przesłania pierwszego wiersza macierzy A oraz pierwszej kolumny macierzy B . Z uwagi na fakt iż macierz przechowywana jest w pamięci kolumna po kolumnie, potrzebujemy dwóch transferów pamięci żeby przesłać wiersz macierzy A . Dzieje się tak dlatego, ponieważ wiersz macierzy nie jest przechowywany w sposób ciągły. Możliwe jest również przesłanie całej kolumny macierzy B w jednym transferze danych. Jest to zilustrowane na rysunku 3. Procesor przenosi z cache'a do rejestru liczby, przemnaża je oraz dodaje do wyniku. Jest to zilustrowane na rysunkach 3-4. Wynik tej operacji, liczba $1 * 5 + 2 * 7 = 19$ to pierwszy element wynikowej macierzy. Jest on przesyłany z powrotem z rejestrów do cache'a procesora (i tutaj przy okazji nadpisuje nam zawartość cache'a) a następnie z cache'a do pamięci RAM.

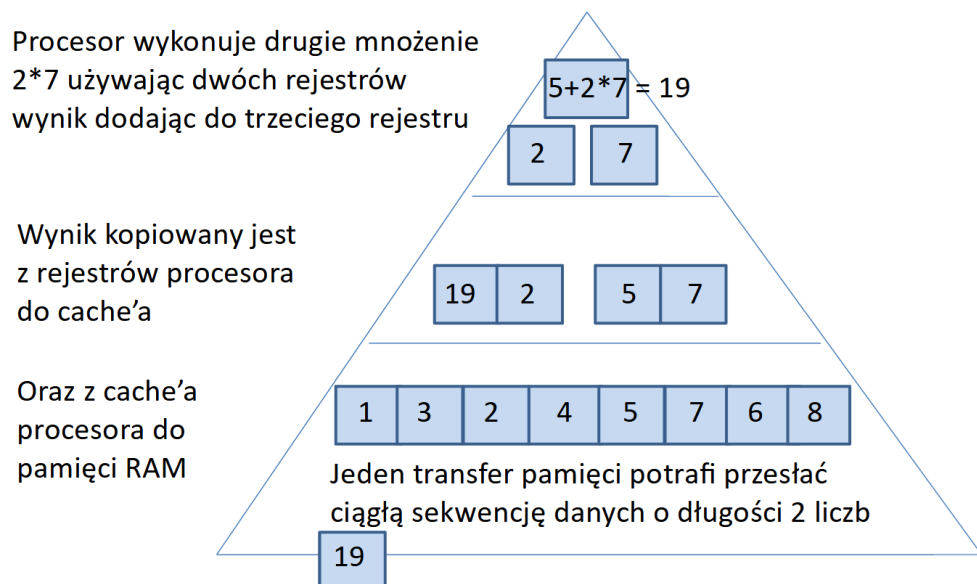
Obliczenie nasze jest kontynuowane, co przedstawiono na rysunku 5. Teraz, chcemy przemnożyć pierwszy wiersz macierzy A , i przesyłamy go do cache'a za pomocą dwóch transferów pamięci. Przesyłamy też drugą kolumnę macierzy B z RAMu do cache'a. Obliczenie jest kontynuowane. Kolejne kroki naszego obliczenia opisano na rysunkach 5-7.

Mnożenie dwóch macierzy o rozmiarze dwóch wierszy / kolumn wymaga wykonania 8 mnożeń i 4 dodawań (operacje te nazywamy flopsami²). Każde dodawanie / mnożenie zajmuje jeden cykl zegara procesora. Liczba flopsów nie zależy od kolejności wykonywania operacji oraz od sposobu

²[flops] floating-point operations, liczba operacji zmiennie-przecinkowych wykonywanych przez algorytm, nie mylić z [FLOPS] liczbą operacji zmiennie-przecinkowych na sekundę, która jest miarą prędkości programu uruchamianego na konkretnym procesorze



RYSUNEK 3. Klasyczne mnożenie macierzy. Pierwsze trzy transfery pamięci. Do cache'a procesora przesyłany jest pierwszy wiersz macierzy A , za pomocą dwóch transferów, fragment pierwszej kolumny 1 oraz drugi transfer, fragment drugiej kolumny 2. Dodatkowo, trzeci transfer pamięci przesyła pierwszą kolumnę macierzy B . Do rejestrów procesora trafia pierwsza para liczb do przemnożenia $1 * 5$.

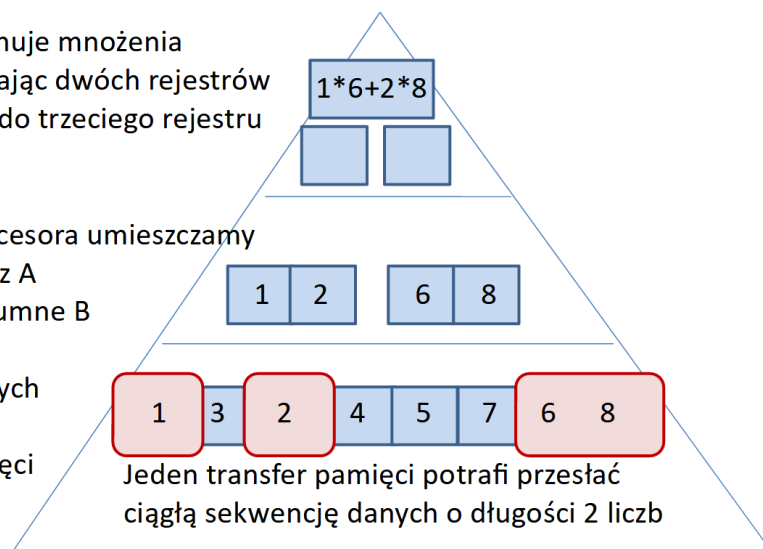


RYSUNEK 4. Klasyczne mnożenie macierzy. Do rejestrów procesora trafia druga para liczb do przemnożenia $2 * 7$. Wynik dodawany jest do wyniku poprzedniego mnożenia $1 * 5 + 2 * 7$. Wynik 19 przesyłany jest z rejestrów do cache'a oraz z cache'a do pamięci RAM.

Procesor wykonuje mnożenia
 $1*6$ i $2*8$ używając dwóch rejestrów
 wynik dodając do trzeciego rejestru

W cache'u procesora umieszczamy
 pierwszy wiersz A
 oraz drugą kolumnę B

Przesłanie danych
 kosztuje trzy
 transfery pamięci

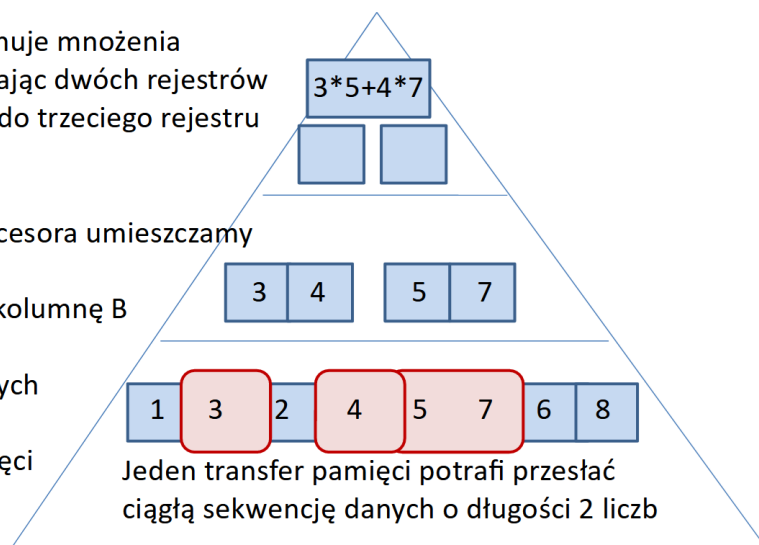


RYSUNEK 5. Klasyczne mnożenie macierzy. Do cache'a procesora przesyłany jest pierwszy wiersz macierzy A (za pomocą dwóch transferów) oraz druga kolumna macierzy B . Do rejestrów procesora trafia pierwsza para liczb do przemnożenia $1 * 6$. Wynik umieszczany jest w trzecim rejestrze. Następnie do rejestrów procesora trafia druga para liczb $2 * 8$. Wynik dodawany jest do trzeciego rejestru. Następnie wynik nadpisuje cache oraz trafia do pamięci RAM.

Procesor wykonuje mnożenia
 $3*5$ i $4*7$ używając dwóch rejestrów
 wynik dodając do trzeciego rejestru

W cache'u procesora umieszczamy
 drugi wiersz A
 oraz pierwszą kolumnę B

Przesłanie danych
 kosztuje trzy
 transfery pamięci



RYSUNEK 6. Klasyczne mnożenie macierzy. Do cache'a procesora przesyłany jest drugi wiersz macierzy A za pomocą dwóch transferów pamięci. Pierwszy transfer przesyła fragment pierwszej kolumny 3, drugi transfer przesyła fragment drugiej kolumny 4. Do cache'a procesora przesyłana jest pierwsza kolumna macierzy B . Do rejestrów procesora trafia pierwsza para liczb do przemnożenia $3 * 5$. Wynik umieszczany jest w trzecim rejestrze. Następnie do rejestrów procesora trafia druga para liczb $4 * 7$. Wynik dodawany jest do trzeciego rejestru. Następnie wynik nadpisuje cache oraz trafia do pamięci RAM.

w jaki podzielimy dane (macierz). Jest więc taka sama dla mnożenia klasycznego oraz z wykorzystaniem operatora mnożenia Krakowianowego.

Klasyczne mnożenie macierzy na naszym przykładowym procesorze wymaga obliczenia czterech mnożeń wierszy przez kolumnę. Ściągnięcie każdego wiersza macierzy A to dwa transfery pamięci, ściągnięcie każdej kolumny macierzy B to jeden transfer pamięci. Dodatkowo potrzebujemy cztery transfery pamięci na przesłanie wyniku z cache'a do RAMu. Wszystko to zajmuje $4 * 3 + 4 = 16$ transferów pamięci (operacje te nazywamy memopsami³). Zakładając że koszt 100 flopsów = 1 memops (że transfery pamięci są dwa rzędy wielkości droższe), koszt klasycznego mnożenia dwóch macierzy o rozmiarze dwóch wierszy / kolumn to 1612 cykli pracy zegara (16 transferów pamięci - memopsów - o koszcie 100 cykli każdy, oraz 12 flopsów).

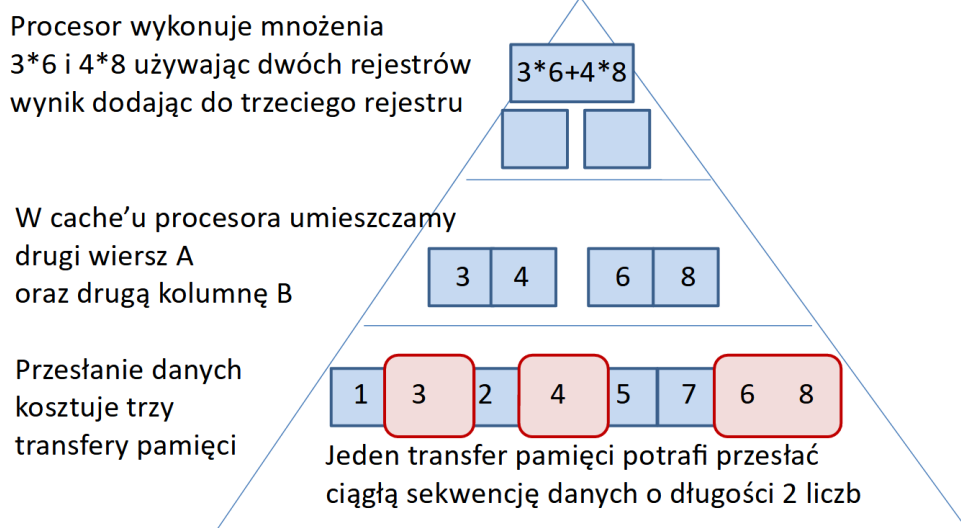
W ogólnym przypadku, przyjmując że obie macierze mają N wierszy oraz N kolumn ($n = m = l = N$) oraz, że procesor potrafi przesłać N danych w jednym memopsie, poukładanych w sposób ciągły w pamięci, pokazać można, że klasyczny algorytm wymaga policzenia N^2 mnożeń wierszy przez kolumny. Każde przesłanie wierszy macierzy A kosztuje N transferów pamięci (przesyłamy wiersz podzielony na N kawałków) oraz każdy przesł kolumny B wymaga jednego transferu. Dodatkowo potrzebujemy N^2 transferów pamięci na odesłanie wyniku z cache'a do RAMu. W sumie mamy $N^2(N + 2)$ transferów pamięci (memopsów), oraz $N^2(N + N - 1)$ flopsów (dla każdej liczby wyniku wykonujemy N mnożeń oraz $N - 1$ dodawań). Sumaryczny koszt (zakładając, że 1 memops to 100 flopsów) to $N^2(N + 2)[memops] + N^2(N + N - 1)[flops] = 100N^3 + 200N^2 + 2N^3 - N^2[flops] = 102N^3 + 199N^2$.

Mnożenie macierzy za pomocą operatora Krakowianowego

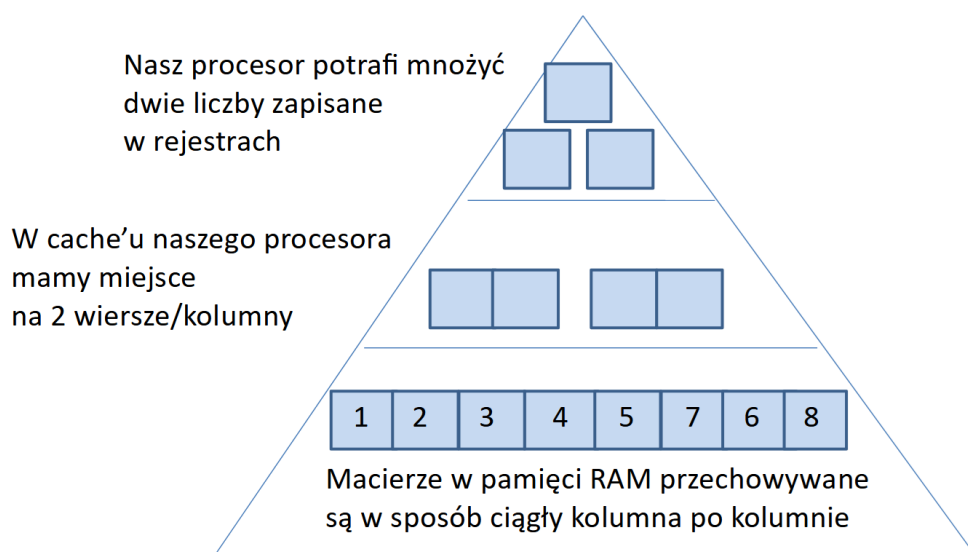
Dla porównania, przeprowadźmy mnożenie macierzy wykorzystując operator mnożenia Krakowianowego. Teraz, w pamięci RAM generujemy macierz A^T oraz macierz B , patrz rysunek 8.

W pierwszym kroku obliczenia, za pomocą dwóch transferów, z pamięci RAM do cache'a procesora przesyłamy pierwszą kolumnę macierzy A^T oraz pierwszą kolumnę macierzy B . W rejestrze procesora wykonujemy pierwsze obliczenia $1 * 5 + 2 * 7$. Jest to przedstawione na rysunku 9. Wynik, wędrując poprzez cache (nadpisując cache) trafia z powrotem do pamięci RAM.

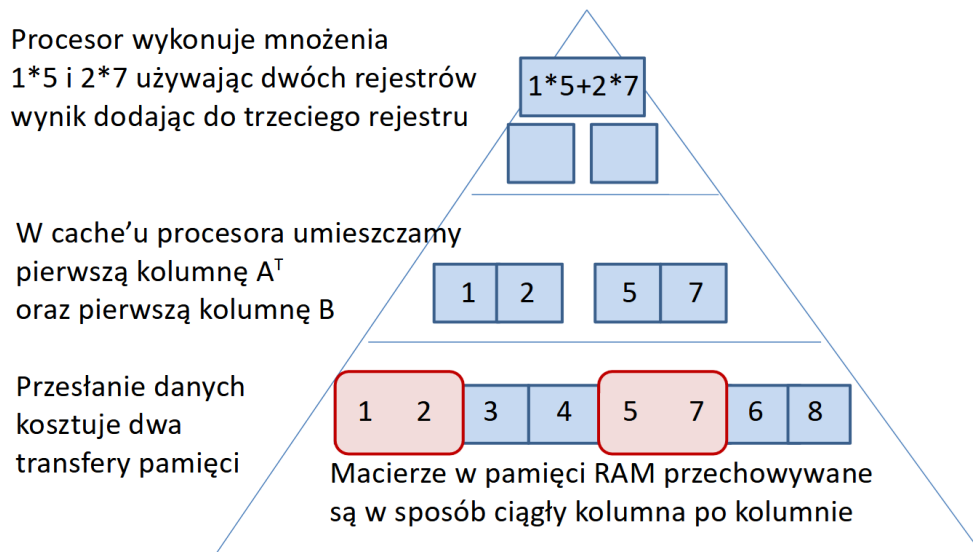
³[memops] memory operations, przesłanie danych z pamięci RAM do cache'a procesora lub z cache'a do pamięci RAM



RYSUNEK 7. Klasyczne mnożenie macierzy. Do cache'a procesora przesyłany jest drugi wiersz macierzy A (za pomocą dwóch transferów) oraz druga kolumna macierzy B (za pomocą jednego transferu). Do rejestrów procesora trafia pierwsza para liczb do przemnożenia $3 * 6$. Wynik umieszczany jest w trzecim rejestrze. Następnie do rejestrów procesora trafia druga para liczb do przemnożenia $4 * 8$. Wynik dodawany jest do trzeciego rejestru. Następnie wynik nadpisuje cache oraz trafia do pamięci RAM.



RYSUNEK 8. Mnożenie operatorem Krakowianowym $AB = k(A^T, B) = k\left(\begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 2 & 4 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 5 & 6 \\ 7 & 8 \end{bmatrix}\right)$.

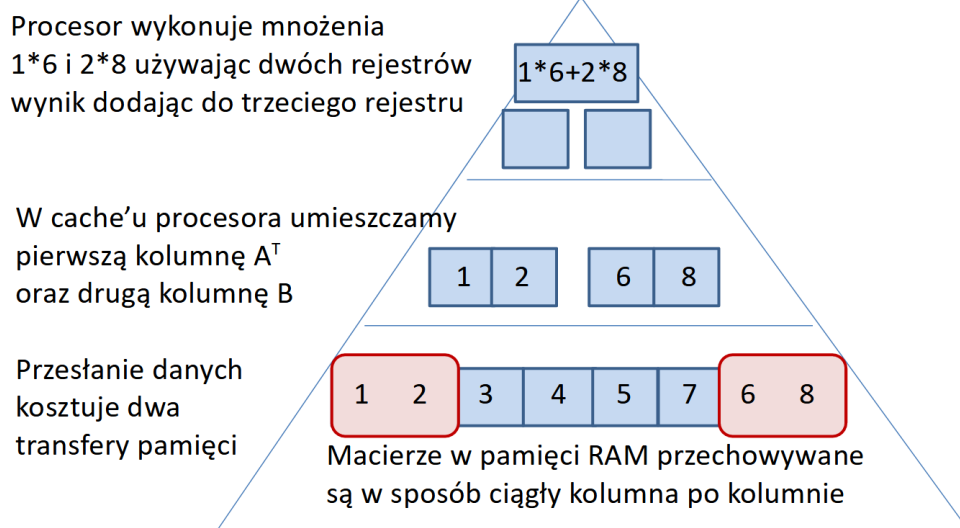


RYSUNEK 9. Mnożenie operatorem Krakowianowym. Pierwsze dwa transfery pamięci. Do cache'a procesora przesyłana jest pierwsza kolumna macierzy A^T , czyli 1, 2. Dodatkowo, do cache'a procesora przesyłana jest pierwsza kolumna macierzy B, czyli 5, 7. W rejestrach procesora wykonywane są dwa mnożenia i jedno dodawanie $1 * 5 + 2 * 7$. Wynik nadpisując cache trafia z powrotem do pamięci RAM.

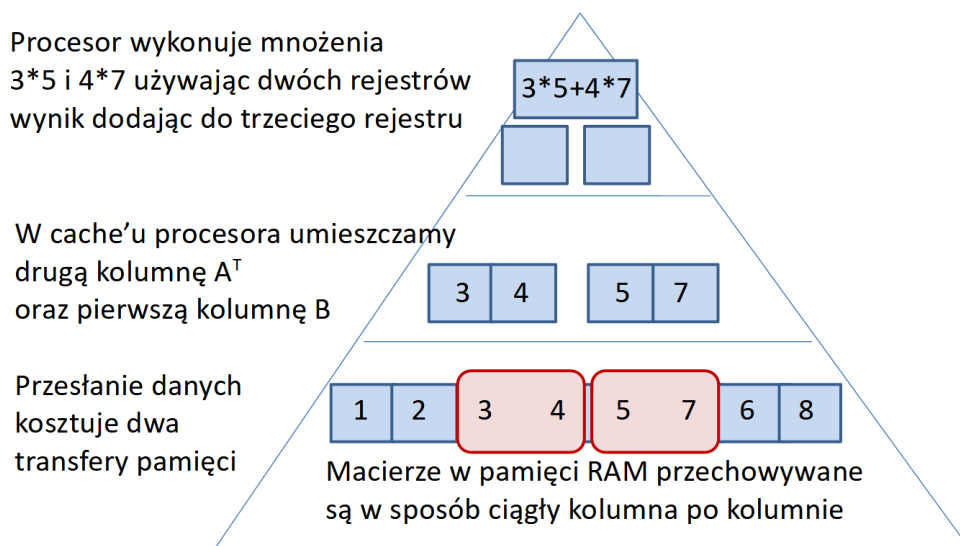
W kolejnych krokach, przesyłamy pierwszą kolumnę macierzy A^T (jeden transfer) oraz drugą kolumnę macierzy B (rysunek 10, jeden transfer) i wykonujemy mnożenie kolumn. Następnie przesyłamy drugą kolumnę macierzy A^T (jeden transfer) i ponownie pierwszą kolumnę macierzy B (jeden transfer). W rejestrze mnożymy drugą kolumnę A^T z pierwszą kolumną B (patrz rysunek 11).

W ostatnim kroku, do cache'a przesyłamy drugą kolumnę macierzy A^T (jeden transfer) oraz drugą kolumnę macierzy B (jeden transfer, rysunek 12) i wykonujemy mnożenie w rejestrze drugiej kolumny A^T z drugą kolumną B. Liczba flopsów jest taka sama i wynosi 12 (ponieważ nie zmieniliśmy algorytmu mnożenia, a jedynie sposób przesyłania danych). Mamy natomiast jedynie $8+4=12$ transferów pamięci (8 z RAMu do cache'a i 4 z cache'a do RAMu). Zakładając, że koszt 100 flopsów = 1 memops, koszt mnożenia dwóch macierzy o rozmiarze dwóch wierszy / kolumn to 1212 cykli pracy zegara (8 transferów pamięci oraz 12 flopsów).

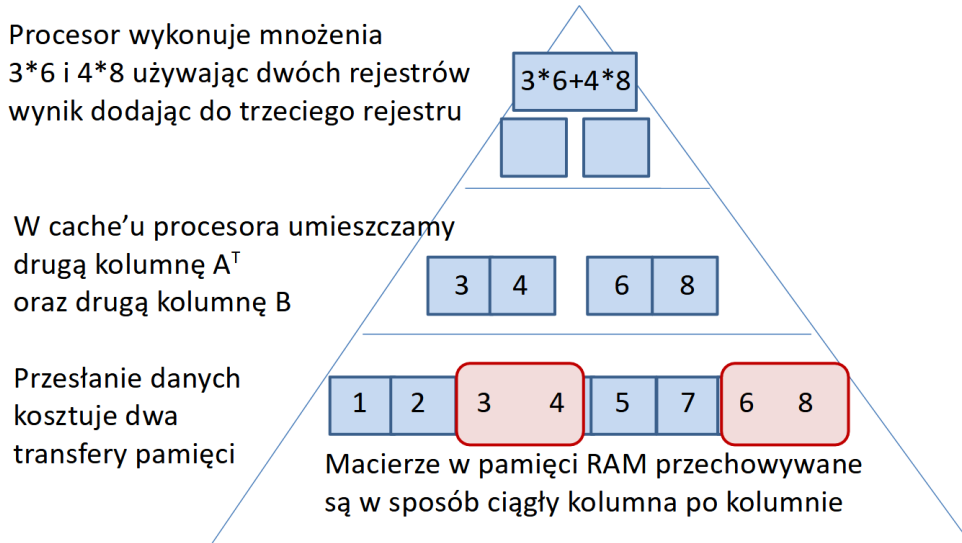
W ogólnym przypadku, kiedy mnożymy dwie macierze o rozmiarze $N \times N$ za pomocą operatora mnożenia Krakowianowego, wykonujemy N^2 mnożeń kolumn. Przesłanie każdej kolumny to jeden transfer pamięci. Kosztuje nas to w sumie $2N^2$ transferów pamięci (do każdego mnożenia potrzebujemy dwóch kolumn). Dodatkowo potrzebujemy N^2 transferów pamięci na odesłanie wyniku z cache'a do RAMu. Liczba flopsów jest taka



RYSUNEK 10. Mnożenie operatorem Krakowianowym. Kolejne transfery pamięci. Do cache'a procesora przesyłana pierwsza kolumna macierzy A^T oraz druga kolumna macierzy B . W rejestrach procesora wykonywane są dwa mnożenia i jedno dodawanie $1 * 6 + 2 * 8$. Wynik nadpisując cache trafia z powrotem do pamięci RAM.



RYSUNEK 11. Mnożenie operatorem Krakowianowym. Kolejne dwa transfery pamięci. Do cache'a procesora przesyłana jest druga kolumna macierzy A^T , czyli 3,4. Dodatkowo, do cache'a procesora przesyłana jest pierwsza kolumna macierzy B , czyli 5,7. W rejestrach procesora wykonywane są dwa mnożenia i jedno dodawanie $3 * 5 + 4 * 7$.



RYSUNEK 12. Mnożenie operatorem Krakowianowym. Ostatni transfer pamięci. Do cache'a procesora przesyłana jest druga kolumna macierzy B, czyli 6, 8. W rejestrach procesora wykonywane są dwa mnożenia i jedno dodawanie $3*6 + 4*8$.

sama jak dla klasycznego mnożenia i wynosi $N^2(N + N - 1)$. Sumaryczny koszt (zakładając, że 1 memops to 100 flopsów) to $(3N^2)[memops] + N^2(N + N - 1)[flops] = 3N^3 + 200N^2 - N^2[flops]$.

Podsumowanie

Metoda mnożenia za pomocą operatora Krakowianowego pozwala zredukować koszt obliczeniowy mnożenia macierzy $N^2(N + 2)[memops] + N^2(N + N - 1)[flops]$ (klasyczne mnożenie) do $(3N^2)[memops] + N^2(N + N - 1)[flops]$ (mnożenia za pomocą operatora Krakowianowego). Zakładając, że koszt pojedynczego transferu z RAMu do cache'a wynosi C cykli zegara (C flopsów), przyspieszenie oszacować można obliczając granicę

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N^2(N+2)C + N^2(N+N-1)}{(3N^2)C + N^2(N+N-1)} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N^3C + 2N^2C + 2N^3 - N^2}{3N^2C + 2N^3 - N^2} =$$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{C + \frac{2}{N}C + 2 - \frac{1}{N}}{\frac{3}{N}C + 2 - \frac{1}{N}} = \frac{C+2}{2}$$

Zakładamy tutaj, że procesor potrafi dokonać pojedynczego transferu pamięci pojedynczej kolumny macierzy. Jeśli założymy, że jeden transfer pamięci zajmuje około 100 cykli pracy procesora, wówczas przyspieszenie wynosi $\frac{102}{2} = 51$. Możemy wtedy powiedzieć, że mnożenie macierzy za pomocą operatora Krakowianowego przyspieszy czas obliczeń 51 razy. Co oznacza przyspieszenie 51 razy? Szybkość mnożenia macierzy przekłada się

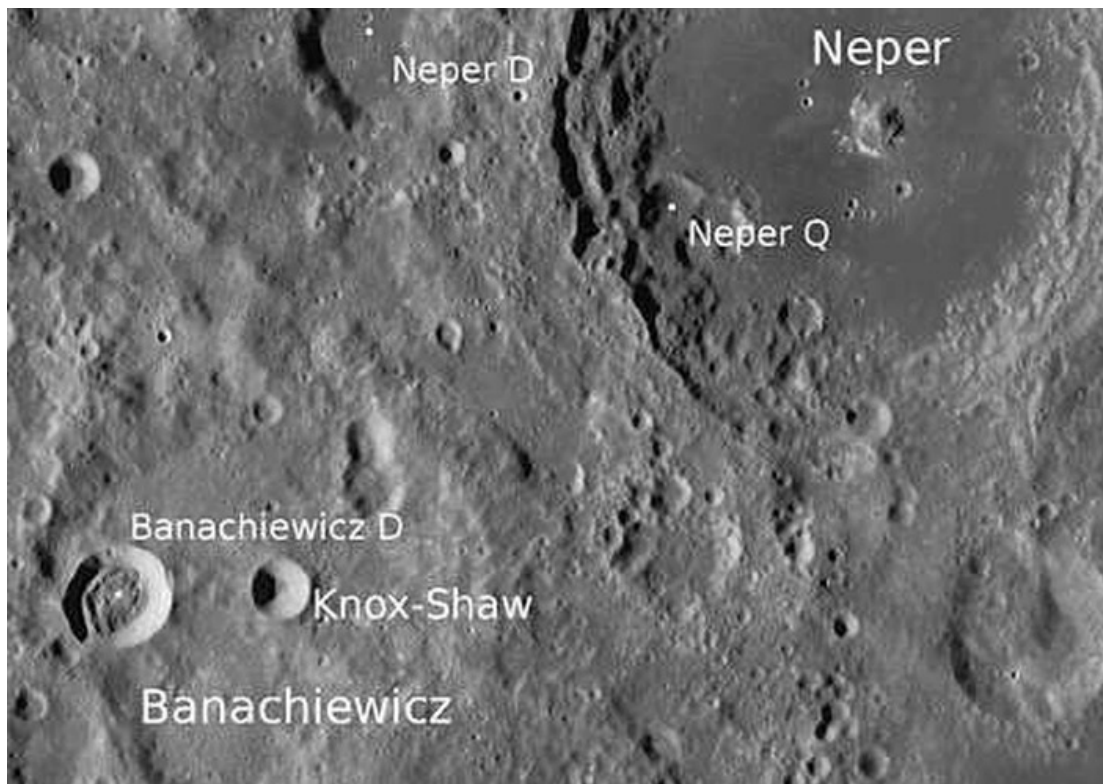
bezpośrednio na czas działania algorytmów takich jak rozwiązywanie układów równań, odwracanie macierzy, czy obliczanie wyznacznika [16]. Złożoność obliczeniowa tych algorytmów jest taka sama jak złożoność mnożenia macierzy, dla problemów opisanych macierzami gęstymi. Oznacza to, iż podmiana klasycznego mnożenia na mnożenie za pomocą operatora Krakowianowego przyspieszy na przykład rozwiązywanie układu równań 51 razy, czyli np. z 51 minut do 1 minuty.

Oczywiście, istnieją bardziej zaawansowane metody dzielenia i przesyłania fragmentów macierzy tak żeby ich mnożenie wykonywane było szybciej. Są one przedstawione na przykład w opracowaniu [13]. Niemniej jednak, z historycznego punktu widzenia, idea mnożenia macierzy za pomocą operatora Krakowianowego jest pierwszym odkryciem pozwalającym na przyspieszanie obliczeń macierzowych w duchu nowoczesnych algorytmów algebry liniowej. Miałem przyjemność napisać o odkryciu prof. Banachiewicza do prof. Roberta van de Geijn [15], przesyłając mu link do strony wikipedii opisującej rachunek Krakowianowy [14]. Odpisał on „Very interesting read. Of course, we do something slightly more complicated than transposing, but I see your point” (Bardzo interesująca lektura. Oczywiście robimy coś nieco bardziej skomplikowanego niż transpozycja, ale rozumiem twój punkt widzenia).

Literatura

- [1] Kazushige Goto, Robert van de Geijn, Anatomy of High-Performance Matrix Multiplication. *ACM Transactions on Mathematical Software*. 34 (3) (2008)
- [2] Kazushige Goto, Robert A. van de Geijn, High-performance implementation of the level-3 BLAS, *ACM Transactions on Mathematical Software*. 35 (1) (2008)
- [3] John A. Gunnels, Greg M. Henry, and Robert A. van de Geijn. Formal Linear Algebra Methods Environment (FLAME): Overview. FLAME WorkingNote #1 CS-TR-00-28, Department of Computer Sciences, The University of Texas at Austin, Nov. 2000
- [4] Robert A. van de Geijn, Enrique S. Quintana-Ortí, The Science of Programming Matrix Computations, www.lulu.com, 2008
- [5] Field G. Van Zee, libflame: The Complete Reference, www.lulu.com, 2009
- [6] Robert A. van de Geijn, Using LAPACK, MIT Press, April 1997, ISBN 0-262-72026-4, 224 pp.
- [7] John A. Gunnels, Greg M. Henry, and Robert A. van de Geijn, A Family of High-Performance Matrix Algorithms, International Conference on Computational Science - 2001, Part I, Lecture Notes in Computer Science 2073, pp. 51-60, Springer, 2001
- [8] Tadeusz Banachiewicz, Rachunek Krakowianowy, PWN, Warszawa (1959)
- [9] Tadeusz Banachiewicz, Méthode de résolution numérique des équations linéaires, Bulletin de l'Académie Polonaise des Sciences. Série des Sciences Mathématiques, Astronomiques et Physiques (1938) 393–404.

- [10] The Top 10 Algorithms in Applied Mathematics, <https://nhigham.com/2016/03/29/the-top-10-algorithms-in-applied-mathematics/>
- [11] Donald Knuth, The Art of Computer Programming. v.2. Addison-Wesley Publication Company (1969) 724 pp.
- [12] Margaret E. Myers, Pierce M. van de Geijn, Robert A. van de Geijn, Linear Algebra: Foundations to Frontiers - Notes to LAFF with MATLAB - Fall 2020 Edition
- [13] <https://github.com/flame/how-to-optimize-gemm/wiki>
- [14] <https://en.wikipedia.org/wiki/Cracovian>
- [15] Osobista korespondencja z prof. Robertem van de Geijnem, 2020-02-11
- [16] https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_complexity_of_mathematical_operations



Krater Banachiewicz na Księżycu.



Na spotkanie Perseidom w Obserwatorium Królowej Jadwigi (sierpień 2023).
(fot. W. Milanow)

Część trzecia

(naukowa)



Uroczyste promocje habilitacyjne Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego, 13 czerwca 2024, aula Collegium Maius. Pierwszy rząd: dr hab. Aleksandra Wrońska, dr hab. Ambra Nanni, dr hab. Agnieszka Kuźmich, dr hab. Dorota Koziel-Wierzbowska, dr hab. Tomasz Urbańczyk, dr hab. Adam Wojciechowski, dr hab. Malgorzata Skurzok, drugi rząd: prof. dr hab. Wojciech Gawlik, prof. dr hab. Paweł Moskal, prof. dr hab. Jarosław Koperski, prof. dr hab. Andrzej Magiera, prof. dr hab. Agnieszka Pollo, trzeci rząd: bulawowy, prof. dr hab. Krzysztof Chyży, prof. dr hab. Jacek Golak, prof. dr hab. Jarosław Górniak, prof. dr hab. Ewa Gudowska-Nowak, prof. dr hab. Stanisław Zoła, dr hab. Marek Jamroz, bulawowy. (fot. K. Magda)

On the morphological similarity of matter distribution in complex systems: from micromechanical (granular) to the scale of the Universe

Oleg Gerasymov¹, Larysa Kudashkina²

¹ Odessa National Mechnikov University

² Odessa National Maritime University

The study of matter distribution in systems with irregular density is a fundamental problem of physics, which affects both the micro-level (granular materials) and the mega-level (the structure of the Universe). The essence of the problem lies in describing the morphology of systems where the density is distributed irregularly and exhibits a complex hierarchical structure (Fig. 1). Direct (accurate) measurement of absolute density values in such systems is often impossible (the density field, strictly speaking, is not defined). In connection with the above, it is necessary to develop alternative methods and introduce the controlled parameters required for quantitatively describing mass distributions in such systems.

In the studies we conducted, we pay attention to some visual structural similarities between the topological characteristics of cosmological objects (such as, for example, the large-scale structure of the Universe) and the structure of micromechanical (granular) systems. These systems, showing outwardly similar features in their morphological structure, differ significantly in their physical nature. An idea arises: to apply methods developed and tested in the theory of describing structures observed in micromechanical systems on a laboratory scale for parametrization of observations of more complex systems (for example, the Universe).

As already mentioned, in addition to external similarity, these systems are united by a common problem: the absence of a correct definition of the substance (matter) density field, which prevents the usage of classical

analysis methods and leads to the need to develop new approaches. Therefore, our main goal is to develop universal alternative methods that will allow us to describe the distribution of matter in systems with a discrete distribution of matter on various scales.

Using analogies between the distribution of matter in the Universe and micromechanical (granular) systems allows us to identify a conditional structural hierarchy in the distribution of matter. For example, threads and voids in the large-scale structure of the Universe are morphologically similar to the characteristic structures observed in granular systems (for example, during thread-like clustering). The latter may, among other things, indicate some common features in the mechanisms of formation of such structures.

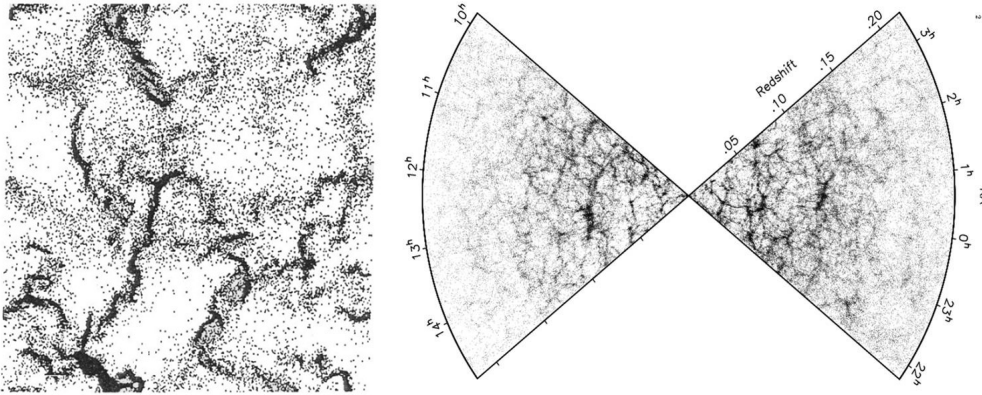


FIGURE 1. Left: A typical configuration of 40 000 non-elastically colliding particles, showing clustering in two dimensions. The system starts with a spatially uniform distribution of initial velocities and allows developing without further investment of energy [8]. Right: 2dF Galaxy Redshift Survey [1].

The following methods are considered for their description:

1. Euler's method of structural invariants.
2. The stereological method of equivalent two-dimensional sections of deterministic distributions and their extrapolation to three-dimensional distributions. The stereological method helps to relate two-dimensional sections obtained from observation data to three-dimensional prototypes.
3. Scaling supplemented by the mean-field model.
4. Kinetics of distribution evolution. To study the processes of matter distribution, an order parameter is used (for example, based on the Euler-Poincaré invariants), which helps to construct phase diagrams and take into account the time hierarchies of relaxation of intermediate states.

5. A method using the Dirichlet problem and the Mises transform in multi-scale analysis, linking surface characteristics with volume structures at both macro- and mega-scales.

Global parameters that can be determined by the image without any restrictive hypotheses about structure can simply be expressed by a characteristic topological quantity called the Euler-Poincaré property. We can divide space into segments and then use the Euler-Poincaré inverse to analyze the topological properties of these segments. The relationship between characteristic parameters is expressed in this case by the formula:

$$\chi = N_1 - N_2 + N_3,$$

where N_1 – number of large galaxy clusters or super clusters; N_2 – void-type structures; N_3 – boundaries of large structures.

By analyzing the topological properties, it is possible to detect the presence of threads and voids in the distribution of galaxies. The shape of the clusters, their boundaries and relative position can also be analyzed.

Topological properties may change over time, which may indicate dynamic processes of merging or forming new structures [5, 6].

Euler-Poincaré characteristics are also suitable for the analysis of more complex topological structures, such as waves, which also occur in both granular materials and the Universe.

The stereological methods are used to extract three-dimensional information from two-dimensional sections that constitute the object of observation.

The key parameter for describing the density of granulated systems is the packing parameter (compactization). It is defined as

$$\eta = k\pi\sigma\rho,$$

where ρ – density of the material, σ – the characteristic size of the granules (for example, cross section), k – scaling parameter. For example, as a packing parameter for a local area of the Universe, you can select a value η in the form:

$$\eta = \frac{S}{\sigma Z},$$

where S – area of the local cluster being observed, Z – the number of clusters in the observation window. By considering both expressions together, you can get a power law as [4]

$$S(k) = k^\alpha.$$

Note that the local density depends on the topological characteristics of the system, as well as on the scale k , which is determined taking into account the features of the object.

The power law (scaling) allows us to compare data obtained at different scales, from local clusters to the large-scale structure of the Universe. For example, when bulk solids are compacted, such a parameter as compactization tends to saturate, which is characterized by its maximum value. Thus, it can be considered as an order parameter that determines not only local structuring, but also the kinetics of the distribution of matter in the system [2,9].

Similar processes can be observed in cosmology. For example, the compactization of local clusters of galaxies can achieve saturation as a result of gravitational interaction and formation of stable structures.

The order parameter is used to study the evolution of the distribution of matter, which helps to construct phase diagrams and to investigate the time hierarchies of relaxation of intermediate states.

Order parameters help us to identify symmetries and phases in distributions, which allows us to describe the evolution of structures over time and find the predominant configurations at different scales. Such order parameters allow to separate ordered and unordered phases of the distribution of matter and to evaluate the influence of these phases on the evolution of the system.

Calculating such parameters for different areas of the system or at different stages of evolution of the system, we can observe transitions between phases.

When you need to examine data that has different levels of complexity and different scales, the multi-scale analysis method is useful. It helps to explore how the structural elements interact and change at different levels.

For example, the Dirichlet problem can be used to determine the concentration level and describe the boundaries between regions with different densities of matter. The application of Mises transformation allows to link characteristics at a microscopic level with macroscopic scale, which allows analysis of complex structures. The visible distribution of super galaxies in the Universe can be considered as a kind of «microstructure». The consistent solution of boundary problems at each scale allows not only to estimate the mass distribution, but also to identify correlations at different levels of observation.

Consider a simple problem of modeling the large-scale structure of the Universe. Suppose we have observations of the mass distribution in the form of super clusters of galaxies, separated by large voids. Step 1. Solve the Laplace equation in each region between voids with known boundary conditions on the boundaries of these regions. This will allow calculating the mass distribution within the regions based on known data at the boundaries. Step 2. Using the Mises transformation, we link the volumetric properties (mass distribution) with the surface properties at the edges of the voids (for example, their shapes and sizes). This will allow an assessment of how the surface properties of voids affect the mass distribution in neighboring areas.

For a granular system, the situation is similar. Let us have a particle system in a form that is surrounded by a surface with known boundary conditions. Step 1. Solve the Laplace equation inside a granular system with deterministically set boundary conditions on the surface. Step 2. The Mises transformation helps to link the found properties of volume (pressure or density) with surface characteristics, which allows to find particle distribution inside the disk [7].

An example of the application of the Dirichlet problem and the Mises transformation to granular systems and to the structure of the Universe is shown in Fig. 2. For the initial approximation the function was used

$$\Phi(x, y) = \sin(\pi x)\sin(\pi y).$$

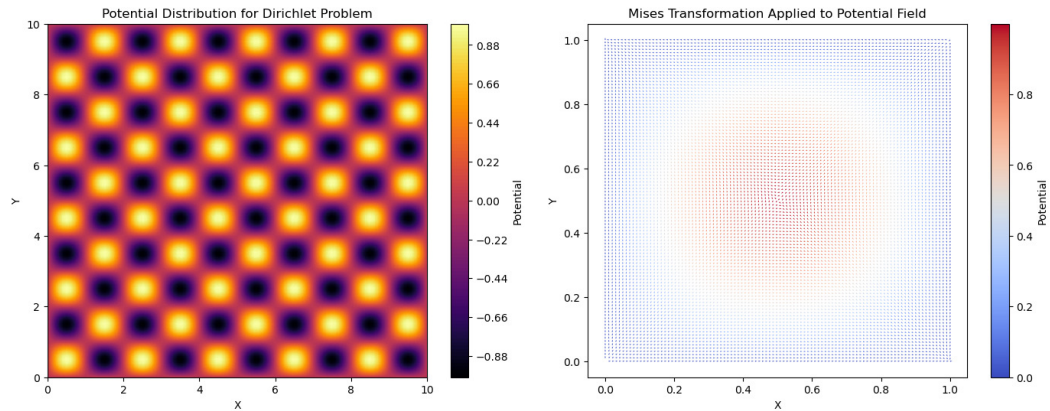


FIGURE 2. Left: The example of a two-dimensional Dirichlet problem for a square area. Right: Visualization of normalized potential gradients after applying the Mises transformation, showing the directions and magnitudes of potential changes at each point.

Figure 2 gives a graphical representation of the two-dimensional distribution of potential for the physical system in the framework of the solution of the Dirichlet problem. The relationship between surface and volume

characteristics is shown, which applies both to the large-scale structure of the Universe and to the meso-scale granular system. The graph shows the distribution of the conditional «gravitational potential» in a large-scale structure of the Universe or the conditional «tension potential» in granulated material.

The present «volumetric distribution» requires consideration of a three-dimensional problem, where potential is defined in a three-dimensional space. In this case, we visualized the two-dimensional field and its properties on the surface.

Further, we can classify different types of structures based on their topology. Using the Euler-Poincaré invariants, we can distinguish different types of clusters and voids at each level. This result can be integrated into a unified picture of the structure of the Universe. By comparing the obtained estimates of density and topology at different levels, we can identify patterns in the formation of large structures, as well as understand how small elements (individual galaxies) interact with larger ones (clusters, filaments).

We have perhaps come to the next question of our research, which also emphasizes a certain difference between the Universe and granular systems. Images of the large-scale structure of the Universe, such as filaments and voids, are reconstructed based on catalogs of galaxies' positions, their red shifts and distributions obtained from individual data, as well as by estimating the influence of these structures on the relic radiation. In fact, in the Universe we can observe large-scale structures based on their small components (galaxies). In granular systems, “large-scale” clustering is formally observed immediately, but the so-called “intermediate” states are difficult to determine, which complicates the description of the structuring kinetics. Such differences can be assumed to be due to the nature of interactions in systems, for example, the presence of long-acting interactions between objects in the Universe and their absence in granulated materials. In the Universe, structuring processes go from small to large, due to the competition of gravity and the expansion of space. In micromechanical systems, local interactions are predominant: collisions, friction, compaction [3]. They do not have a «global» mechanism that would bind small particles in the structures of «intermediate» states.

However, although we do not see obvious “intermediate” structures in granular systems, this does not mean that they do not exist. Perhaps they are too unstable and quickly combine into larger clusters. The results of studies of bi-disperse granular systems can serve as the basis for such

conclusions. They allow us to identify the above-mentioned intermediate structures in the form of basic specific states with an overwhelming predominance of one of the components, and the transition areas between them [10, 11]. The results obtained open prospects for expansion and mutual complementarity of universal methods for studying the structure of multi-scale objects.

Here are some results that were obtained by the methods reviewed.

1. An analogy was found between the geometry of mass distribution in the large-scale structure of the Universe and the morphology of granular materials.
2. The methodology of stereological analysis is presented, allowing evaluating properties of materials and structures with complex morphology based on Euler-Poincaré invariants. The results obtained allow carrying out a scale-invariant classification of observed mass distributions in the plane of observation. We classify the observed filamentary structures in terms of values χ , distributing them by types:
 - a) «Simple threads» ($\chi \geq 0$) - relatively linear and continuous structures.
 - b) «Complex threads» ($\chi < 0$) - complex structures with ramifications and connections that can describe more «grid» areas of the Universe.
3. Using the Euler-Poincaré invariants and the order parameter, it is possible to track topological changes in systems such as granular materials and the structure of the Universe. This allows one to construct phase diagrams and study the dynamics of transitions between different structured states of the system, as well as to study the time hierarchy of relaxation of these states.
4. The application of the Dirichlet problem together with Mises transformation allows us to establish that 1) there is a certain state that corresponds to the given parameters in the distribution of masses and elements in the area of interest; 2) only a certain configuration or organization of matter is stable and corresponds to the given characteristics of the source and sink.

Thus, an approach to the development of universal scale-invariant methods for analyzing the distribution of matter in discrete systems is outlined. For example, topological analysis of structure (clustering, voids) can be carried out universally for systems structured at different scales. The application of multi-scale analysis, together with compactization calculation, allows studying in detail compactization, local density, and symmetry, as

well as structural changes at different scales.

References

- [1] Colless M. et al., 2003, arXiv:astrophysics/0306581
- [2] Gerasimov O.I. et al., 2005, Ukr. J. Phys., 50, 6, 623
- [3] Gerasymov O.I., 2015, Physics of Granular Materials TES, Odesa, 264p. ISBN: 978-617-7054-82-4
- [4] Gerasymov O.I., Kudashkina L.S., 2022, AApTr, 33, 1, 11 <https://doi.org/10.17184eac.6466>
- [5] Gerasymov O.I., Kudashkina L.S., 2023, OAP, 36, 9 <https://doi.org/10.18524/1810-4215.2023.36.290808>
- [6] Gerasymov O.I., Kudashkina L.S., 2024a, AApTr, 34, 1, 3 <https://doi.org/10.17184/eac.8361>
- [7] Gerasymov O.I., Kudashkina L.S., 2024b, AApTr, 34, 4 (in pres.)
- [8] Goldhirsch I., Zanetti G., 1993, Physical Review Letters, 70, 11, 1619
- [9] Vandewalle N., Lumay G., Gerasimov O., Ludewig F., 2007, European Phys. J., 22, 3, 241
- [10] Gerasymov O., 2024, E3S Web of Conf., 477, Intern. Conf. on Smart Technol. and Appl. Res.
- [11] Pillitteri S., Lumay G., Opsomer E. and Vandewalle N., 2019, Sci Rep. 9, 7281 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43519-6>

Badanie własności AGN-ów aktywnych radiowo z uwzględnieniem ich morfologii

Dorota Koziel-Wierzbowska

Obserwatorium Astronomiczne, Uniwersytet Jagielloński

Autoreferat habilitacyjny

Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego:

H1. *FR II radio galaxies in the Sloan Digital Sky Survey: observational facts*

Autorzy: Koziel-Wierzbowska, D. i Stasińska G.

Publikacja: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 415, 1013pp (2011)

H2. *CGCG 292-057 – a radio galaxy with merger-modulated radio activity*

Autorzy: Koziel-Wierzbowska, D.; Jamrozy, M.; Zoła, S.; Stachowski, G.; Kuźmich, A.

Publikacja: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 422, 1546 (2012).

H3. *What Distinguishes the Host Galaxies of Radio-loud; Radio-quiet AGNs?*

Autorzy: Koziel-Wierzbowska, D.; Vale Asari, N.; Stasińska, G.; Sikora, M.; Goettems, E.I.; Wójtowicz, A.

Publikacja: ApJ, 846, 42 (2017).

H4. *Radio Sources Associated with Optical Galaxies; Having Unresolved or Extended Morphologies (ROGUE). I. A Catalog of SDSS Galaxies with FIRST Core Identifications*

Autorzy: Koziel-Wierzbowska, D.; Goyal, A.; Żywucka, N.

Publikacja: ApJSS, 247, 53 (2021).

H5. *Identifying Radio-active Galactic Nuclei among Radio-emitting Galaxies*

Autorzy: Koziel-Wierzbowska, D.; Vale Asari, N.; Stasińska, G.; Herpich, F.R.; Sikora, M.; Żywucka, N.; Goyal, A.

Publikacja: ApJ, 910, 64 (2021).

Omówienie celu naukowego ww prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Wprowadzenie

Za główne źródło energii aktywnego jądra galaktyki (z ang. active galactic nucleus, AGN) uważa się akrecję na supermasywną czarną dziurę. Może się ona manifestować na różne sposoby i z różną mocą w całym przedziale widma elektromagnetycznego. W zakresie UV/optycznym/IR o istnieniu AGN-u może świadczyć istnienie potęgowego (lub łamanego potęgowego) continuum powstałego w dysku akrecyjnym i re-emitowanego przez chłodny materiał w zakresie IR, lub/i linii emisyjnych wzbudzonych w chmurach gazu przechodzących przez stożek promieniowania jonizującego emitowanego z AGN-u. Gorąca korona znajdująca się powyżej dysku akrecyjnego może być odpowiedzialna za rozpraszanie w odwrotnym efekcie Comptona fotonów do energii z zakresu rentgenowskiego. W zakresie tym obserwowane są także rentgenowskie linie fluorescencyjne żelaza. Dżety radiowe, czyli skolimowane strugi cząstek relatywistycznych, mogą emitować promieniowanie w pełnym zakresie widma EM poprzez procesy synchrotronowe oraz odwrotny efekt Comptona.

Wyróżnioną klasą AGN-ów są radiogalaktyki oraz radiokwazary, w których dżety ekspandujące w ogromne płaty i pióropusze, można obserwować na falach radiowych (zobacz np. [44, 7]). Obiekty te mogą tworzyć struktury o przeróżnych kształtach zaczynając od zwartych, nawet punktowych, do dużych (w rozciągłości kątowej i liniowej) i skomplikowanych tworów. Jak się szacuje, przynajmniej 10% AGN-ów jest powiązane ze źródłami radiowymi zasilanymi przez dżety (zobacz np. [27]). Jednakże, AGN-y mają bardzo zróżnicowane efektywności produkcji dżetów wynikające, jak się uważa, z szerokiego zakresu wartości spinu centralnej czarnej dziury i/lub strumienia pola magnetycznego [8].

Tak jak w przypadku klasyfikacji morfologicznej galaktyk, gdzie rozkład gwiazd i materii międzygwiazdowej związany jest z własnościami fizycznymi galaktyki, wygląd struktury radiowej jest związany z własnościami fizycznymi AGN-u oraz otaczającego go ośrodka. Jest ona wynikiem wzajemnego oddziaływania dżetu relatywistycznych cząstek najpierw z ośrodkiem międzygwiazdowym, potem z ośrodkiem międzygalaktycznym (zobacz np. [42]). W tym kontekście klasyfikacja morfologiczna może nieść informacje tak o centralnym jądrze i dżecie, jak i o ośrodku, w którym on propaguje. Ponieważ obserwujemy trójwymiarowe struktury rzutowane na sferę niebieską, elementem modyfikującym kształt jest projekcja.

W tym kontekście prezentowana tutaj seria artykułów dotyczy badania radiogalaktyk, ale w odniesieniu do ich morfologii. Pierwsza publikacja dotyczy badania radiogalaktyk o klasycznych strukturach FR II [20]. Druga publikacja dotyczy źródeł o niestandardowych morfologiach na podstawie źródła CGCG292-057. W trzecim artykule wraz ze współautorami przebadalam różnice pomiędzy radiowo głośnymi i radiowo cichymi galaktykami w poszukiwaniu przyczyny różnej efektywności produkcji dżetów. W kolejnej publikacji prezentuję katalog radiogalaktyk z dostępnymi klasyfikacjami morfologicznymi galaktyk macierzystych i struktur radiowych. Natomiast w ostatnim artykule proponuję proste i skuteczne metody oddzielenia emisji radiowej powiązanej z procesami powstawania gwiazd od tej powiązanej z dżetami.

We wszystkich prezentowanych poniżej publikacjach miałam znaczący wkład poczynsz od określenia celów naukowych, poprzez określenie metody badawczej, zaangażowanie w przeprowadzone badania i porównania oraz ich weryfikację, analizy, przygotowanie manuskryptów, publikację oraz późniejszą korespondencję. Szczegółowy swój wkład jak i pozostałych współautorów do każdej publikacji podaję za każdym razem na końcu opisu wyników naukowych.

Opis głównych wyników w osiągnięciach naukowych [H1-H5]

[H1]

Tradycyjnie źródła radiowe dzielone są na dwie główne klasy morfologiczne: radioźródła typu Fanaroff-Riley I oraz Fanaroff-Riley II (lub w skrócie FRI i FR II za Fanaroff i Riley, którzy w 1974 roku zaproponowali powyższy podział). Źródła z obydwu klas różnią się rozkładem jasności wzdłuż wypływów: źródła FRI są jaśniejsze przy centrum natomiast źródła FR II są jaśniejsze na końcach. W literaturze klasa źródeł FR II jest traktowana jako znacznie lepiej zdefiniowana niż klasa FRI w odniesieniu do morfologii radiowej oraz rozmiaru, oraz jest znacznie bardziej zróżnicowana pod względem własności optycznych. Z tego powodu źródła FR II stanowią dobry cel badań nad zrozumieniem zależności pomiędzy aktywnością radiową i optyczną, i dlatego wybraliśmy je jako przedmiot badań w pracy „FR II radio galaxies in the Sloan Digital Sky Survey: observational facts” autorstwa Koziel-Wierzbowska i Stasińska [30]. W tej publikacji wyselekcjonowaliśmy próbkę galaktyk FR II poprzez identyfikację źródeł radiowych z katalogów the Cambridge Radio Catalogues (3C, 4C, 5C, 6C, 7C, 8C i 9C) i gigantycznych radioźródeł z prac [24] i [39] z główną próbką galaktyk ze Sloan Digital Sky Survey (SDSS) DR7 [1]. Dla tak wybranych

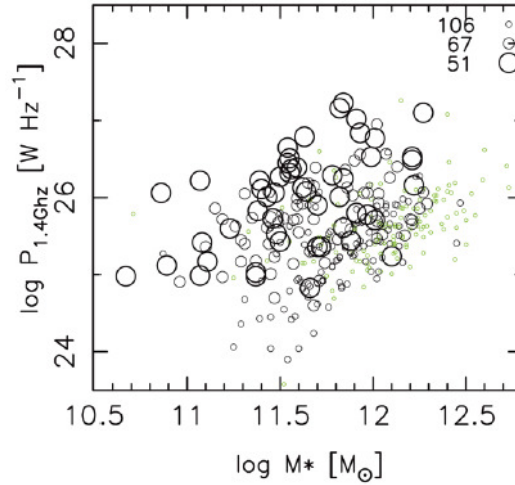
radiogalaktyk przeprowadziliśmy klasyfikację morfologiczną opartą na mapach radiowych z przeglądów NOAO VLA Sky Survey (NVSS, [16]) oraz Faint Images and the Radio Sky at Twenty-cm (FIRST, [4]), i ostatecznie otrzymaliśmy listę 401 radiogalaktyk typu FR II. Dla tych galaktyk korzystając z katalogu NVSS wyznaczyliśmy strumień radiowy na 1.4 GHz, zmierzaliśmy rozmiary struktury radiowej korzystając z map FIRST lub NVSS, jeśli mapy FIRST nie były dostępne. Z przeglądu SDSS zebraliśmy fotometryczne oraz spektroskopowe dane, oraz z bazy danych Starlight (<http://www.starlight.ufsc.br>, np. [11-13]) parametry fizyczne jak gwiazdowa masa galaktyk, M^* , wieki populacji gwiazdowych, strumienie linii emisyjnych, jak i dyspersję prędkości, które dalej użyliśmy do oszacowania mas czarnych dziur, M_{BH} .

Radiogalaktyki FR II w naszej próbce mają przesunięcia ku czerwieni z przedziału 0.045 oraz 0.6, i zrzutowany rozmiar liniowy w skalach od galaktycznych (15 kpc) do gigantycznych (2080 kpc).

Korzystając z tak utworzonej próbki zbadaliśmy zależność między jasnością optycznych linii emisyjnych a jasnością radiową, $P_{1.4}$. Zależność ta zgłaszana była pierwotnie przez Rawlingsa [45]. Do tego zadania użyliśmy powszechnie używanej linii [OIII]5007 oraz linii $H\alpha$, ale argumentowaliśmy, że jasność linii $H\alpha$, $L_{H\alpha}$, jest lepszym estymatorem całkowitej energii wyemitowanej w liniach niż linia [OIII] ponieważ nie zależy ona od stopnia jonizacji. W przypadku obu linii potwierdziliśmy istnienie silnej korelacji między jasnością linii oraz jasnością radiową (współczynnik korelacji Pearsona $R = 0.66$ dla linii [OIII] oraz $R = 0.72$ dla $H\alpha$) co wskazuje na zależność pomiędzy aktywnością AGN-u oraz mocą radiową w galaktykach FR II ze zdetektowanymi liniami emisyjnymi.

Zbadaliśmy także zależność pomiędzy mocą radiową znormalizowaną przez masę czarnej dziury a tempem akrecji wyrażonym przez parametr Eddingtona estymowany przez $L_{H\alpha}/M_{\text{BH}}$ [26]. Te dwie wielkości są także silnie skorelowane. Sprawdziliśmy także rozkład parametru Eddingtona w płaszczyźnie $P_{1.4}$ vs M^* (zobacz Rys. 1) i znaleźliśmy, że dla danej masy galaktyki najsilniejsze radiogalaktyki FR II mają także największe wartości parametru Eddingtona, natomiast dla danej jasności radiowej, parametr Eddingtona maleje z rosnącą masą galaktyki.

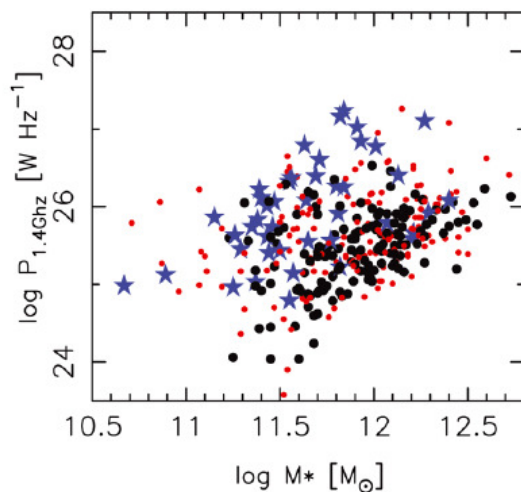
Jasne plamy w miejscach, gdzie relatywistyczne dżety oddziałują z ośrodkiem nazywane są gorącymi plamami (definicja podana m.in. w [22]). Jednakże te struktury nie są obserwowane we wszystkich źródłach FR II. Często rozdzielczość map radiowych nie pozwala na rozdzielenie gorących plam od płatów radiowych, ale także gorące plamy mogą nie być już widoczne



RYSUNEK 1. Zależność pomiędzy $P_{1.4}$ GHz i masą galaktyki M^* radiogalaktyk FR II. Rozmiar symboli odpowiada wartości parametru Eddingtona $L_{H\alpha}/M_{BH}$. Duże kółka: $\log L_{H\alpha}/M_{BH} > -0.8$; kółka o średnim rozmiarze: $\log L_{H\alpha}/M_{BH}$ pomiędzy -1.5 a -0.8 ; małe czarne kółka: $\log L_{H\alpha}/M_{BH} < -1.5$; bardzo małe zielone kółka: $H\alpha$ nie zdetektowana [30].

w reliktach radiowych, czyli źródłach, w których centralna aktywność już ustała [25, 40]. Możemy zatem przypuszczać, że obecność gorących plam może być związana z pewnymi własnościami AGN-u. W tym kontekście ponownie przeanalizowaliśmy diagramy $P_{1.4}$ vs M^* (zobacz Rys. 2) oraz $P_{1.4}/M_{BH}$, ale oznaczając źródła z gorącymi plamami oraz bez gorących plam. Pokazaliśmy w ten sposób, że dla danej masy galaktyki jasność radiowa oraz stosunek $P_{1.4}/M_{BH}$ źródeł FR II z gorącymi plamami mają systematycznie większe wartości niż te w pozostałych źródłach. Pokazaliśmy zatem, że obecność gorących plam jest związana z wyższą efektywnością radiową AGN-u.

Pokazaliśmy, że te galaktyki FR II, które można przedstawić na klasycznym diagramie BPT [3] lub podobnych diagramach, mieszczą się w obszarze charakteryzowanym przez twarde promieniowanie jonizujące, gdzie udział gorących gwiazd we wzbudzeniu jest niewielki lub żaden. Jest to spodziewany wynik, gdyż wiadomo, że radiogalaktyki są na ogół identyfikowane z masywnymi galaktykami eliptycznymi z bardzo niskimi tempami powstawania gwiazd. W porównaniu z galaktykami macierzystymi AGN-ów znalezionych w próbie galaktyk SDSS, wśród radiogalaktyk występuje znacznie większy odsetek obiektów o bardzo twardym polu promieniowania jonizującego i dużym parametrze jonizacji. Istnieje jednak kilka obiektów, które leżą blisko linii podziału pomiędzy czystymi galaktykami gwiazdotwórczymi a galaktykami macierzystymi AGN-ów. Jest to a priori zaskakujące, ponieważ nic nie wskazuje na to, by w tych obiektach obecnie

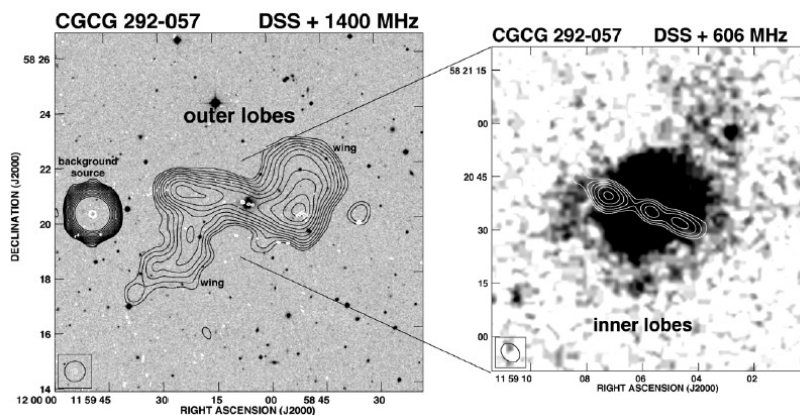


RYSUNEK 2. Rozkład radioźródeł FR II z gorącymi plamami w płaszczyźnie ($P_{1.4\text{GHz}}$, M^*). Gwiazdki: obiekty z gorącymi plamami; duże punkty: obiekty bez gorących plam; małe punkty: obiekty, dla których klasyfikacja nie była możliwa [30].

powstawały gwiazdy. Sugerujemy, że obiekty te są jonizowane przez raczej miękkie pole promieniowania w porównaniu z resztą źródeł FR II.

Badając własności linii emisyjnych radioźródeł FR II znaleźliśmy trzy galaktyki z podwójnymi profilami linii. Takie profile są często interpretowane jako manifestacja istnienia podwójnych supermasywnych czarnych dziur. Ułamek źródeł FR II z podwójnymi profilami linii w badanej próbie nie był duży, zatem poszukiwania podwójnych profili kontynuowano w 2022 roku ze studentką, Agatą Szkodzińską, która wykorzystała większą próbkę radiogalaktyk typu FR II. Wśród 730 radiogalaktyk FR II z widmami z SDSS DR7 Szkodzińska znalazła kolejne trzy radiogalaktyki z podwójnymi profilami linii oraz dodatkowo trzy źródła z wyjątkowo szerokimi liniami. Badania te zostały podsumowane w pracy licencjackiej pani Szkodzińskiej i będą kontynuowane w pracy magisterskiej.

W projekcie tym użyliśmy publicznie dostępnych danych radiowych i optycznych, aby zbadać własności radiogalaktyk FR II. Chociaż klasa ta jest uważana za dobrze zdefiniowaną i zawierającą najbardziej energetyczne źródła to, jak pokazaliśmy, radiogalaktyki FR II mogą mieć jasności radiowe z szerokiego zakresu wartości. Znaleźliśmy, że galaktyki FR II pokazują continuum własności w zależności od parametru Eddingtona, a źródła z gorącymi plamami mają największe wartości $P_{1.4}/M_{\text{BH}}$. Pokazaliśmy także, że radiogalaktyki FR II tworzą niejednorodną grupę pod względem własności linii emisyjnych. Pokazaliśmy także, że struktury FR II znajdowane są w galaktykach eliptycznych, preferencyjnie w tych o największych masach.



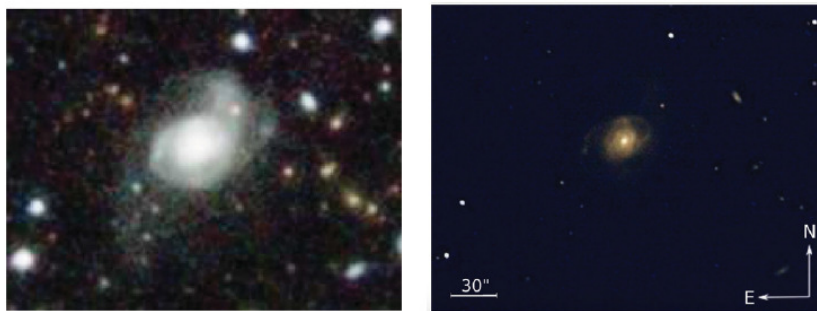
RYSUNEK 3. Mapy CGCG 292-057 na 1400 MHz z przeglądu VLA. Po lewej: mapa konturowa całej struktury z przeglądu NVSS (czarny) i FIRST (biały) nałożone na optyczny obraz z DSS. Po prawej: konturowa mapa struktury wewnętrznej pochodząca z przeglądu GMRT na 606 MHz nałożona na obraz DSS [31].

W projekcie tym byłam inicjatorem badań i głównym wykonawcą. Mój wkład do niniejszego artykułu polegał na zdefiniowaniu celów naukowych, selekcji próbki, przygotowaniu danych radiowych, klasyfikacja morfologiczna, przygotowanie wszystkich wykresów, analiza danych optycznych oraz radiowych, znaczny udział w dyskusji oraz przygotowaniu tekstu publikacji. Byłam także autorem korespondencyjnym. Współautorka, Grażyna Stasińska miała wkład w klasyfikację morfologiczną, analizę danych z bazy Starlight i linii emisyjnych, dyskusję oraz przygotowanie manuskryptu.

[H2]

Nie wszystkie struktury radiowe mogą być opisane jednym z typów Fanaroff i Riley. Wśród dodatkowych klas radioźródeł można wymienić radiogalaktyki podwójno-podwójne [51] charakteryzujące się dwiema parami współliniowych dżetów, czy struktury X-shaped [37, 9]), w których dwie pary lobów są ustawione względem siebie pod pewnym kątem. Są to klasy, które do tej pory używane były jako niezależne. W 2012 roku ogłosiliśmy odkrycie źródła, które posiada jednak obydwie te charakterystyki. Struktura radiowa zidentyfikowana przez nas z galaktyką CGCG 292-057 posiada zewnętrzną strukturę typu X-shaped, oraz posiada ślady powtarzającej się aktywności w formie wewnętrznej struktury podwójno-podwójnej (Rys. 3). Dodatkowo, CGCG 292-057 jest galaktyką post-merger. Taka kombinacja cech sprawia, że jest to unikatowy i wyjątkowy cel badań aktywności dżetowej w AGN-ach.

Badania optycznej galaktyki macierzystej rozpoczęliśmy od analizy obrazów i widm z przeglądu SDSS. Przeanalizowaliśmy wartość tzw. współczynnika koncentracji definiowanego jako stosunek promieni zawierających



RYSUNEK 4. Kolorowe obrazy CGCG 292-057 uzyskane (po lewej) 60-cm teleskopem w Obserwatorium na Suhorze i (po prawej) 2 m teleskopem LCOGT. Obydwa obrazy mają tę samą skalę i orientację [31].

90 oraz 50 procent światła w filtrze r [52, 53], i używanego jako wskaźnik typu morfologicznego. Wartość jaką uzyskaliśmy, równą 2.81, umiejscawia CGCG 292-057 na pograniczu pomiędzy galaktykami eliptycznymi i spiralnymi (Strateva i in. 2001 jako wartość graniczną podaje 2.83, [53]). Dlatego, zaplanowaliśmy własne obserwacje optyczne przy użyciu dwóch teleskopów: 60 cm teleskopu w Obserwatorium Uniwersytetu Pedagogicznego na Suhorze, oraz 2 m teleskopu Faulknes Telescope North w Las Cumbres Observatory Global Telescope (LCOGT). Otrzymane obrazy zostały poprawione na ślady promieniowania kosmicznego oraz złożone w obraz kolorowy. Obraz z Obserwatorium na Suhorze, który wykonany był z gorszą zdolnością rozdzielczą, ale z lepszą czułością pokazuje rozciągniętą strukturę przypominającą ramiona spiralne, oraz słaby ogon gwiazd i gazu rozciągający się na odległość 1 minuty łuku (ok. 60kpc) od centrum. Obrazy z LCOGT wykonane z lepszą zdolnością rozdzielczą pokazują zaburzoną strukturę w centrum galaktyki. Obydwa obrazy pokazują, że CGCG292-057 nie może być uznana za niezaburzoną galaktykę spiralną, ale za merger, lub galaktykę już po zlaniu się oddziałujących galaktyk (Rys. 4).

Dalej użyliśmy dostępnych w przeglądzie SDSS widm by zbadać własności linii emisyjnych oraz populacji gwiazdowych CGCG 292-057. Aperтура SDSS odpowiadająca 3 sekundom łuku próbowała 3.1 kpc centralnych regionów galaktyki. Co ciekawe, linie emisyjne widoczne w galaktyce CGCG292-057 pokazują podwójne profile co może świadczyć o istnieniu w tym systemie podwójnej supermasywnej czarnej dziury. Bazując na tym postulujemy, że CGCG292-057 jest w stadium po zlaniu się oddziałujących galaktyk, w którym jednak supermasywne czarne dziury jeszcze się nie połączyły. Wykorzystując dyspersję prędkości z przeglądu SDSS (242.6 km/s) oraz zależność Tremaine i in. (2002) [55] wyznaczyliśmy masę czarnej dziury (lub pary czarnych dziur) na $\log(M_{\text{BH}}/M_{\odot}) = 8.47$.

Struktura radiowa CGCG292-057 była przez nas badana na podstawie

archiwalnych danych radiowych z przeglądów NVSS, FIRST, oraz WENSS [46], oraz dedykowanych obserwacji Giant Metrewave Radio Telescope (GMRT). Rozciąga, zewnętrzna struktura jest dobrze zobrazowana w przeglądach NVSS i WENSS i pokazuje kształt X. Struktura podwójno-podwójna jest widoczna na mapach FIRST, gdzie widoczne są trzy piki emisji, z których centralny pokrywa się z centrum galaktyki macierzystej. Struktura wewnętrzna została użyta do wyznaczenia inklinacji źródła. Na podstawie asymetrii tej struktury wyznaczono kąt inklinacji na równy 79 stopni. Ustawienie osi dżetów z osiami galaktyki macierzystej było tematem kilku prac. W silnych radiogalaktykach występuje pewne preferencyjne ustawienie osi dżetów wzdłuż mniejszej osi galaktyki. Jednakże, Saripalli i Subrahmanyan (2009) zauważyli, że w źródłach X-shaped nachylenie osi dżetów do głównej osi galaktyki wynosi ok. 50 stopni [50].

Na podstawie danych z NVSS i WENSS uzyskano mapy indeksu widmowego CGCG292-057 pomiędzy obserwacjami na 327 MHz oraz 1400 MHz. Pokazują one, że widmo wypłaszcza się idąc od centrum na zewnątrz struktur. Jednakże indeks widmowy w skrzydłach jest jedynie trochę stromszy co jest zaskakujące z tego powodu, że według modeli, w których struktura X-shaped powstała hydrodynamicznie, lub poprzez reorientację dżetu skrzydła powinny być starsze. W tym wypadku indeks widmowy jest porównywalny do tego, który mielibyśmy w przypadku istnienia dwóch niezależnych AGN-ów [35, 36]. Użyliśmy także danych polaryzacyjnych z NVSS do zbadania własności struktury CGCG292-057. Cała struktura jest spolaryzowana w stopniu ok. 19% co jest typową wartością dla źródeł X-shaped [17].

Istnienie CGCG292-057 oraz hipoteza Chiaberge i in. (2015), że radiowo głośne AGN-y powstają poprzez mergery [10], zainspirowała nas do zbadania profili jasności galaktyk macierzystych radioźródeł o różnych morfologiach. Z Anną Wójtowicz badałyśmy obrazy z Hubble Space Telescope (HST) galaktyk macierzystych źródeł X-shaped, podwójno-podwójnych oraz FR II w poszukiwaniu śladów oddziaływań. Wyniki te w 2017 roku zostały zawarte w pracy magisterskiej pani Anny Wójtowicz i pokazywały, że frakcja śladów interakcji w źródłach X-shaped oraz podwójno-podwójnych jest większa niż w klasycznych źródłach FR II. Badania te są obecnie kontynuowane z większymi i lepiej zdefiniowanymi próbkami radioźródeł o różnych morfologiach.

W niniejszym projekcie byłam inicjatorem badań oraz ich głównym wykonawcą. Jestem odkrywcą źródła, zebrałam optyczne i radiowe dane archiwalne, zaplanowałam obserwacje optyczne, analizowałam widma SDSS,

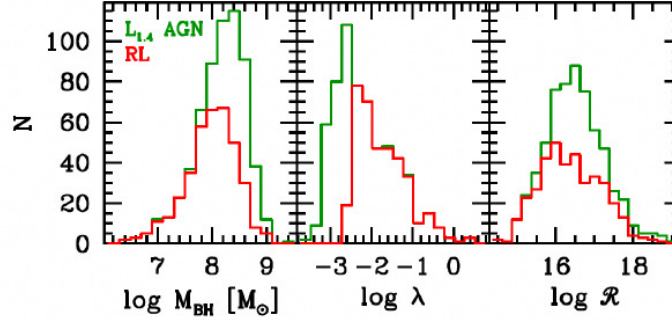
analizowałam dostępne dane radiowe oraz badałam strukturę morfologiczną CGCG 292-057. Miałam znaczący wkład w dyskusję przeprowadzoną ze wszystkimi współautorami oraz przygotowanie manuskryptu. Byłam także autorem korespondencyjnym. Marek Jamrozy przygotował analizę danych polarymetrycznych oraz przeprowadził redukcję danych z GMRT. Stanisław Zoła oraz Grzegorz Stachowski włączyli się w przeprowadzenie obserwacji optycznych natomiast Agnieszka Kuźmich włączyła się w złożenie obserwacji z różnych filtrów optycznych i przygotowanie obrazu kolorowego.

[H3]

Większość aktywnych jąder galaktycznych nie jest aktywna radiowo, tj. nie wytwarza relatywistycznych dżetów radiowych. Z drugiej strony, nie wszystkie klasyczne radiogalaktyki z rozciągłymi strukturami mają linie emisyjne w widmach optycznych [23], co świadczy o tym, że pomimo obserwowanej zależności między jasnością radiową i jasnością linii emisyjnych, aktywność radiowa i optyczna AGN-u nie są ze sobą wprost związane (np. [6]). W 2017 roku opublikowaliśmy artykuł, w którym przedstawiliśmy własne badania dotyczące różnic we własnościach galaktyk macierzystych radiowo głośnych oraz radiowo cichych AGN-ów [32].

W pracy tej skoncentrowaliśmy się na AGN-ach typu 2, tj. zasłoniętych przez torus, z współczynnikiem Eddingtona, λ , będącym stosunkiem jasności bolometrycznej AGN-u wyznaczonej na podstawie jasności linii $H\alpha$ do jasności Eddingtona, większym od 0.003. Wzięcie pod uwagę tylko zasłoniętych AGN-ów pozwoliło nam uniknąć zanieczyszczenia widma optycznego przez potęgowe kontinuum, natomiast limit $\lambda > 0.003$ gwarantuje eliminację z próbki AGN-ów z nieefektywną radiacyjnie akrecją, dla których zależność między jasnością bolometryczną a jasnością linii $H\alpha$ może się różnić.

W niniejszym projekcie starannie wyselekcjonowaliśmy galaktyki na podstawie jakości ich widma optycznego oraz pozycji na diagramie BPT. Usunęliśmy z próbki galaktyki „w spoczynku”, tj. takie, w których emisja w liniach może być produkowana przez gorące, mało masywne, wyewoluowane gwiazdy [14]. Po zastosowaniu selekcji optycznej pierwotna próbka zmniejszyła się z ponad 900000 obiektów do 19286 galaktyk. Porównaliśmy tę próbkę z katalogiem Best i Heckman (2012) [5] zawierającym 18286 radiogalaktyk wyselekcjonowanych z przeglądu SDSS i radiowych katalogów NVSS i FIRST. Best i Heckman w swoim katalogu [5] podzielili obiekty radiowe na AGN-y oraz galaktyki tworzące gwiazdy bazując na



RYSUNEK 5. Histogramy pokazujące masę czarnej dziury, współczynnik Eddingtona oraz radiogłośność R . Radioźródła z próbki [5] sklasyfikowane jako AGNy (próbka L1.4 AGN) są wykreślone w kolorze zielonym, próbka RL badana w niniejszym artykule jest pokazana kolorem czerwonym [32].

szeregu różnych kryteriów. W naszym projekcie wzięliśmy pod uwagę tylko te obiekty, które autorzy sklasyfikowali jako AGN-y. Ograniczając listę do obiektów z $\lambda > 0.003$ otrzymaliśmy próbkę 376 radiowo głośnych (z ang. radio-loud, RL) galaktyk. Wybraliśmy także próbkę porównania galaktyk radiowo cichych (z ang. radio-quiet, RQ) opierając się na parametrze R zdefiniowanym jako logarytm stosunku jasności $L_{1.4}/L_{H\alpha}$. W próbce porównania znalazło się 10918 galaktyk RQ mających $R < 15.8$.

W opublikowanym artykule zaznaczyliśmy (Rys. 5), że wybierając tylko źródła z akrecją efektywną radiacyjnie (co było zasadne z punktu widzenia założeń projektu) znacznie ograniczyliśmy badaną próbkę, gdyż większość radiowo głośnych źródeł o dużych masach czarnej dziury i dużym parametrze radiogłośności R ma małe wartości λ .

Dane optyczne użyte w projekcie zostały pobrane z bazy Starlight, natomiast dane radiowe pobrano z katalogu [5], oraz katalogów FIRST i NVSS.

Porównanie galaktyk RL i RQ na diagramach BPT i WHAN [14] pokazało, że w obu próbkach panują bardzo podobne warunki jonizacji. Pokazaliśmy także, że w naszych próbkach podobnie jak w poprzednich badaniach (np. [21, 29]) masa galaktyki, M^* , i masa czarnej dziury, M_{BH} , są ze sobą ściśle skorelowane. Jednakże, rozkłady tak M^* jak i M_{BH} w galaktykach RL i RQ są inne, dlatego postanowiliśmy sparować obiekty z tych próbek w masie czarnej dziury. A ponieważ dla danej wartości M_{BH} λ może się różnić o dwa rzędy wielkości, postanowiliśmy sparować galaktyki także w λ . Dlatego, aby zbadać co różni radiowo głośne i radiowo ciche galaktyki o podobnych własnościach AGN-u, zastosowaliśmy metodę parowania w M_{BH} i λ . Dodatkowo, aby upewnić się, że klasyfikacja morfologiczna w obu próbkach będzie tak samo obciążona, galaktyki zostały sparowane

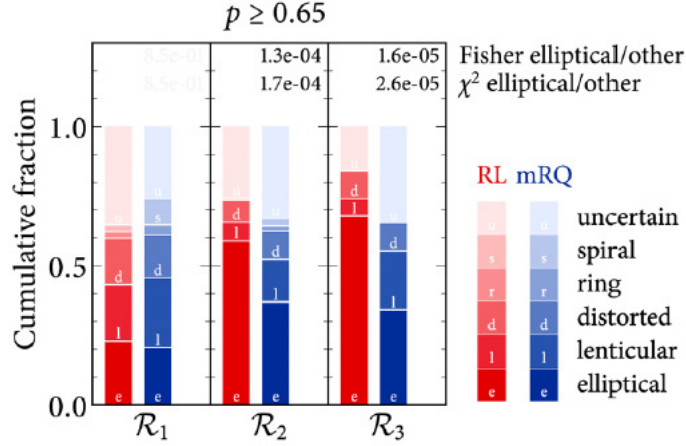
także w przesunięciu ku czerwieni. Przeprowadziliśmy porównanie własności galaktyk RL i do trzech ich najbliższych odpowiedników z RQ galaktyk.

Przeprowadziliśmy porównanie galaktyk RL i ich odpowiedników w RQ galaktykach w trzech przedziałach wartości R . Galaktyki w przedziale o wartościach radiogłośności poniżej 15.8 (odpowiadającej wartości 10 w klasycznej definicji podanej przez Kellermann, [28]) są zwyczajowo traktowane jako radiowo ciche. W naszej procedurze z próbki galaktyk RL usunęliśmy wszystkie galaktyki, które w katalogu [5] zostały sklasyfikowane jako produkujące gwiazdy, dlatego emisja radiowa naszych źródeł RL z $R < 15.8$ jest zdominowana prawdopodobnie przez wiatry z dysków akrecyjnych (np. [58]). Galaktyki RL z $R > 16.8$ odpowiadają najbardziej radiowo głośnym obiektom, często o morfologii FR II.

Wśród parametrów fizycznych galaktyki macierzystej AGN-u, które porównaliśmy w obu próbkach znalazły się masa galaktyki, M^* , kolor (u-r), współczynnik koncentracji, CI, stosunek osi galaktyki macierzystej, b/a , ekstynkcja mgławicowa, AV, stosunek linii [OIII]/ $H\beta$, oraz szerokość półłukowa linii [OIII]. Z tych parametrów tylko M^* oraz (u-r) są nierozróżnialne w obu próbkach. Wynik dla masy galaktyki jest zrozumiały, gdyż przeprowadziliśmy parowanie galaktyk w masie czarnej dziury, która jak pokazaliśmy, jest skorelowana z masą galaktyki. Jednakże, podkreślimy, że M^* rośnie z rosnącą wartością parametru R . Co warto podkreślić, chociaż ogólnie kolor (u-r) różni się w próbkach RQ i RL, to gdy porównamy własności sparowanych przez nas źródeł, różnica ta nie jest już widoczna.

Co także jest interesujące, wartość współczynnika CI dla obiektów RL z $R > 15.8$ jest systematycznie większa niż dla sparowanych źródeł RQ. Podobny wniosek można wyciągnąć dla stosunku osi b/a . Wynik ten sugeruje, że galaktyki RQ i RL mogą się różnić pod względem morfologii galaktyki macierzystej, przy czym galaktyki macierzyste źródeł radiowo głośnych są bardziej eliptyczne. Zauważyliśmy także różnicę w wartości FWHM linii [OIII] gdzie galaktyki RL mają te wartości systematycznie większe oraz szerokość ta rośnie z malejącą wartością R . W przedziale R o najniższych wartościach różnica w AV nie jest znacząca, ale rośnie z rosnącą wartością R .

Mając dane dotyczące linii emisyjnych sprawdziliśmy także, która z linii [OIII] czy $H\alpha$ lepiej estymuje jasność bolometryczną AGN-u. Linia [OIII] jest powszechnie używana jako najjaśniejsza linia w widmie. Jest ona także obserwowana w zakresie optycznym do większych wartości przesunięcia ku czerwieni. Jednakże, część emisji w linii [OIII] może pochodzić z regionów



RYSUNEK 6. Zbiorcze histogramy dla galaktyk RL (odcienie czerwonego) i RQ (odcienie niebieskiego), które sklasyfikowaliśmy jako eliptyczne, soczewkowate, zaburzone, pierścieniowe oraz spiralne, w trzech przedziałach radiogłośności [32].

HII, i zależęć od warunków jonizacji i metaliczności. Z drugiej strony, także jasność linii $H\alpha$ może być zaburzona przez emisję z regionów HII, ale pozostałe parametry nie mają na nią wpływu. Zatem sprawdziliśmy czy używając jasności bolometrycznej AGN-u, parametru Eddingtona, oraz radiogłośności wyznaczonych w oparciu o jasność linii [OIII] możemy powtórzyć nasze wyniki i faktycznie uzyskaliśmy zgodne wyniki.

Nasze porównania powtórzyliśmy także dla „czystych” próbek, z których wyrzucone zostały wszystkie galaktyki leżące na diagramie BPT blisko linii dzielącej galaktyki tworzące gwiazdy i AGN-y. W tych „czystych” próbkach różnica w szerokości linii [OIII] zachowana została tylko dla przedziału R z najmniejszymi wartościami co świadczy o tym, że nasza hipoteza, że emisja radiowa RL galaktyk jest związana z wiatrem z dysku lub słabo skolimowanymi dżetami, a poszerzenie linii wynika z deponowania części energii wypływu w ośrodek w regionie powstawania wąskich linii emisyjnych. Jednakże, wartości współczynnika CI oraz b/a dla galaktyk RL i sparowanych galaktyk RQ są nadal różne co pokazuje, że różnica między morfologiami optycznymi tych źródeł sparowanych w parametrach AGN-u jest istotna.

Bazując na wynikach pokazujących różnicę w CI i b/a między galaktykami RL i RQ postanowiliśmy przeprowadzić wizualną klasyfikację morfologiczną galaktyk RL i najlepiej dopasowanej do nich w parametrach AGN-u galaktyki RQ. Przyjęty przez nas schemat klasyfikacji zawierał pięć klas morfologicznych: galaktyki eliptyczne, zaburzone, spiralne, soczewkowate oraz pierścieniowe, oraz określenia możliwych śladów oddziaływania: główne oraz drobne zderzenia, ogon, prawdopodobna interakcja,

oraz brak śladów oddziaływania. Każdy obraz z SDSS został sklasyfikowany przez sześć osób, a galaktyka otrzymała konkretną klasyfikację, gdy przynajmniej cztery osoby były zgodne w swojej ocenie. W pozostałych przypadkach klasyfikacja galaktyki była oznaczana jako niepewna. Zauważyliśmy, że w dwóch przedziałach z $R > 15.8$ frakcja galaktyk eliptycznych była większa w grupie radiogalaktyk RL niż wśród radiogalaktyk RQ (Rys. 6) co potwierdza wyniki uzyskane na podstawie CI i b/a . Co jednak podkreślaliśmy, radiogalaktyki z małą wartością CI nie są galaktykami spiralnymi, ale są albo galaktykami soczewkowatymi albo zaburzonymi. Co podkreślaliśmy także frakcja galaktyk eliptycznych w grupie galaktyk RL rośnie z rosnącą radiogłośnością. Podobne wyniki uzyskaliśmy na podstawie danych z Galaxy ZOO 1, natomiast te dane nie były dostępne dla wszystkich galaktyk w naszych próbkach.

Przeciwie do wyników Chiaberge i in. (2015) [10] nie widzieliśmy żadnej systematycznej różnicy pomiędzy galaktykami RL i RQ gdy braliśmy pod uwagę ślady oddziaływania między galaktykami. Jednak, nie możemy wykluczyć, że aktywność wielu radiowo głośnych galaktyk jest wzbudzana poprzez zderzenia z mniejszymi galaktykami, które są znacznie trudniejsze do wykrycia.

Wyniki badań przedstawione w niniejszym artykule pokazują, że efektywność produkcji dżetów nie jest zdeterminowana tylko parametrem Eddingtona i masą czarnej dziury. Różna efektywność produkcji dżetów jest zdeterminowana także przez ilość pola magnetycznego skumulowanego w AGN-ie i/lub przez spin czarnej dziury, co wynika z mechanizmu produkcji dżetów (mechanizm Blandforda – Znajka).

W projekcie tym byłam inicjatorem badań oraz głównym wykonawcą, przygotowałam dane radiowe, zorganizowałam klasyfikację morfologiczną galaktyk, brałam udział w przygotowaniu tekstu i byłam autorem korespondencyjnym. Natalia Vale Asari wykonała parowanie radiowo głośnych oraz radiowo cichych galaktyk, przygotowała diagramy, brała udział w dyskusji oraz powstaniu części tekstu. Grażyna Stasińska przeanalizowała wyniki pod kątem dodatku do jasności linii emisyjnych pochodzącego od regionów HII oraz uczestniczyła w dyskusji i powstawaniu tekstu. Marek Sikora brał udział w interpretacji teoretycznej wyników a Anna Wójtowicz i Elisa Goettems brały udział w klasyfikacji morfologicznej galaktyk.

[H4]

Pracując z katalogiem [5] radiogalaktyk z przeglądu SDSS zdaliśmy sobie sprawę, że może on pomijać wiele słabych zwartych jak i rozciągniętych

radioźródeł. Duża liczba zwartych źródeł w porównaniu z rozciągniętymi radioźródłami stwarza potrzebę uzyskania statystycznie znaczących próbek tych obiektów. Z tego powodu zdecydowaliśmy się przeprowadzić selekcję radiogalaktyk z wykorzystaniem spektroskopowego katalogu galaktyk SDSS oraz radiowych przeglądów NVSS i FIRST. W głównym katalogu, opublikowanym i włączonym do niniejszej serii jako [H4], radioźródeł zidentyfikowanych z galaktykami optycznymi i mających zwarte lub rozciągnięte morfologie (z ang. Radio sources associated with Optical Galaxies and having Unresolved or Extended morphologies, ROGUE) I [33] zawarte są radioźródła posiadające identyfikację w SDSS DR7, oraz mające centralny komponent z katalogu FIRST w odległości nie większej niż 3 sekundy łuku od pozycji optycznej galaktyki. Obecnie są przygotowywane dwa rozszerzenia tego katalogu: katalog radioźródeł bez centralnej detekcji w FIRST (ROGUE II), oraz katalog radioźródeł zidentyfikowanych z kwazarami z przeglądu SDSS DR7 (ROGUE III). Motywacją do stworzenia kolejnego katalogu opartego na przeglądach SDSS i FIRST/NVSS była chęć posiadania listy radioźródeł z: (1) spektroskopowo wyznaczonym przesunięciem ku czerwieni, (2) dobrej jakości widmem optycznym, (3) niskim limitem gęstości strumienia radiowego, (4) zmierzonym strumieniem radiowym, (5) klasyfikacją morfologiczną galaktyki macierzystej oraz struktury radiowej. Katalog ROGUE I ma te same ograniczenia jak użyte do jego utworzenia katalogi optyczny i radiowe, jednakże, może być wykorzystany do utworzenia statystycznie kompletnej próbki radioźródeł.

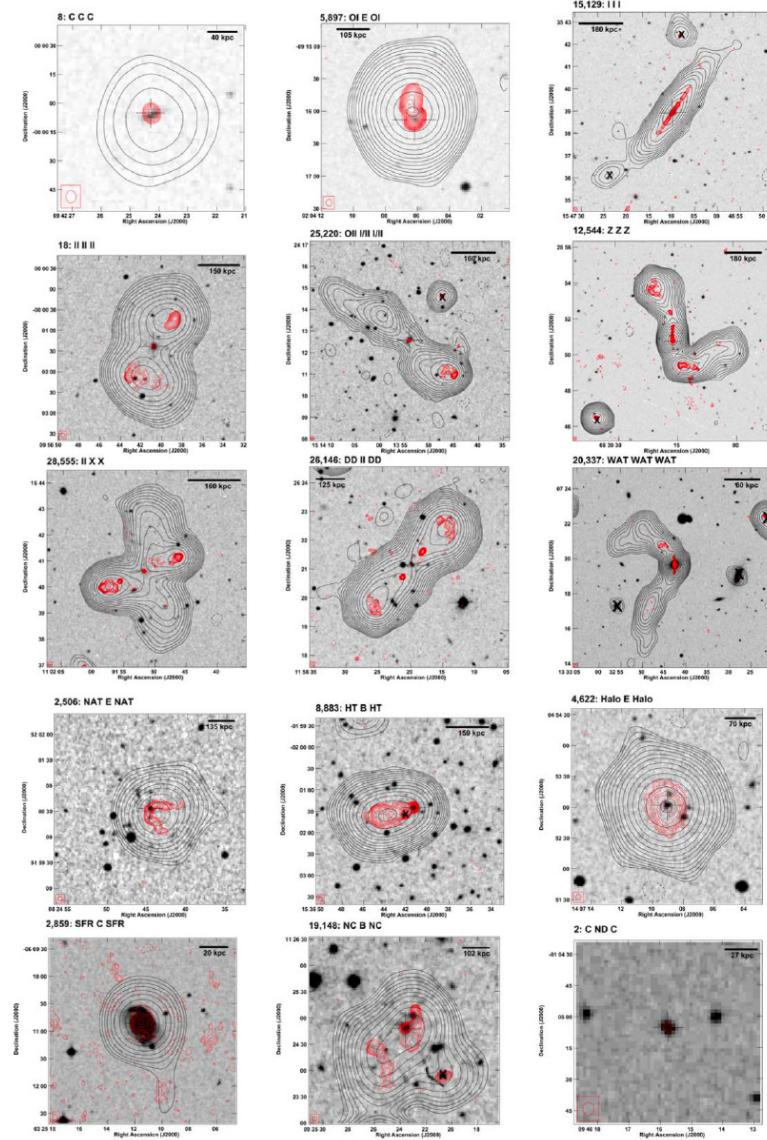
W erze dużych przeglądów radiowych jak nadchodząca SKA lub jej poprzednicy jak MeerKAT, LOFAR czy ASKAP, wizualna inspekcja map radiowych może nie być wykonalna. Katalog ROGUE jest wykonany przez ludzi, poprzez wizualną klasyfikację źródeł. Może być on jednak wykorzystany jako próbka do uczenia algorytmów do automatycznej identyfikacji i klasyfikacji źródeł.

Selekcję i klasyfikację źródeł przeprowadziliśmy w następujących krokach:

- (a) Selekcja optycznej próbki macierzystej z przeglądu SDSS z Main Galaxy Sample [54], oraz z Red Galaxy Sample [19] poprzez wybór galaktyk z dobrą jakością widm optycznych. Po odrzuceniu powtarzających się obserwacji z SDSS DR7, otrzymaliśmy listę 662531 galaktyk.
- (b) Porównanie pozycji optycznych z SDSS z pozycją radiową detekcji w katalogu FIRST dopuszczając różnicę maksymalnie 3 sekund łuku.

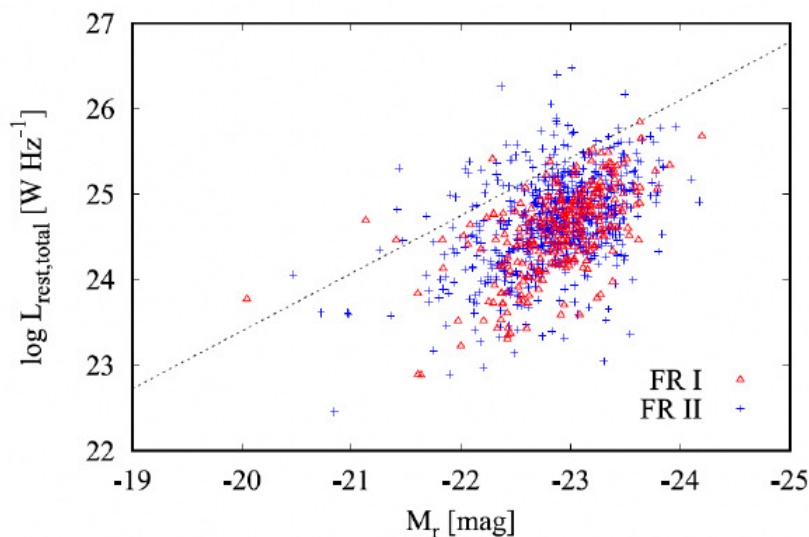
- (c) Przygotowanie obrazów optycznych z nałożonymi konturami radiowymi z rozmiarem kątowym odpowiadającym rozmiarowi liniowemu 1 Mpc w odległości galaktyki macierzystej dla 32616 galaktyk z identyfikacjami z FIRST.
- (d) Klasyfikacja wszystkich wyselekcjonowanych tak radioźródeł bazując osobno na mapach FIRST i NVSS. Użyliśmy kilku klas radiowych: zwarte, wydłużone (pojedyncza detekcja ale nie punktowa), FRI, FRII, hybrydowy (każdy płat o innej morfologii FR), jednostronne FRI, jednostronne FRII, Z-shaped, X-shaped, podwójnopodwójne, tzw. wide-angle tail (WAT), tzw. narrow-angle tail (NAT), head-tail, halo, region formowania gwiazd, niejasne, połączone. Ze względu na różnicę w rozdzielczości i czułości przeglądów NVSS i FIRST, końcowa klasyfikacja na 1.4 GHz była oparta na kombinacji klasyfikacji z obydwu przeglądów (przykładowe źródła pokazane na Rys 7).
- (e) Klasyfikacja optyczna galaktyk macierzystych oparta na kolorowych obrazach z SDSS o rozmiarze 120 sekund łuku. Użyliśmy klas galaktyk eliptycznych, soczewkowatych, spiralnych, zaburzonych, pierścieniowych, zderzających się (merger), oraz gdy obserwowano nie centrum galaktyki ale regiony formowania się gwiazd lub inne części galaktyki oznaczaliśmy je odpowiednio jako regiony formowania się gwiazd lub widma niecentralne.
- (f) Wyznaczenie strumienia radiowego w oparciu o pomiary z katalogów FIRST i NVSS. Pomiary zostały przeprowadzone osobno dla katalogu FIRST i NVSS, a potem obydwa pomiary zostały użyte do określenia, który pomiar lepiej estymuje całkowity strumień źródła na 1.4 GHz. Strumień centralnego komponentu z FIRST został użyty do oszacowania strumienia jądra radiowego.
- (g) Obliczenie absolutnej jasności optycznej używając widomej jasności SDSS w filtrze r.

W wyniku tej selekcji zidentyfikowaliśmy 32616 radioźródeł. Był to największy katalog, zidentyfikowanych, połączonych i wizualnie sklasyfikowanych radioźródeł. Co jest warte podkreślenia, tworząc katalog ROGUE zidentyfikowaliśmy wszystkie detekcje z katalogów FIRST i NVSS, które razem tworzą fizycznie związane źródło. Zadanie to jest wymagające i czasochłonne, ale identyfikacja manualna ma w tym względzie przewagę nad identyfikacją automatyczną, która nie zawsze daje poprawne wyniki.



RYSUNEK 7. Przykłady morfologii radiowych przypisanych źródłom z katalogu ROGUE I. Kontury radiowe z przeglądu FIRST pokazane są w kolorze czerwonym, a z przeglądu NVSS w kolorze czarnym. W tle widoczny jest optyczny obrazek z DSS [33].

Ważnym wynikiem naszej klasyfikacji jest to, że większość źródeł z katalogu ROGUE, dokładnie 29237 galaktyk, ma morfologię zwartą lub tylko nieznacznie rozciąglą. Kolejne 2503 obiekty mają morfologię rozciąglą. Pozostałe 876 źródeł zostało zidentyfikowane jako obszary powstawania gwiazd, obiekty połączone (z innym leżącym blisko na sferze niebieskiej źródłem), albo niezdetektowane (galaktyka optyczna i zidentyfikowana emisja radiowa nie są fizycznie związane). W grupie źródeł rozciąglących największą grupę ($\sim 77\%$) stanowią źródła o morfologiach FR. Źródła o wygiętej strukturze tworzą grupę 20% rozciąglących źródeł, a źródła podwójno-podwójne, X-shaped, Z-shaped stanowią $\sim 3\%$. Liczby te zawierają łącznie źródła o pewnej i niepewnej klasyfikacji.



RYSUNEK 8. Rozkład jasności radiowej na częstotliwości 1.4 GHz vs. jasność absolutna, M_r dla źródeł FR I (269 źródeł; czerwone trójkąty) i FR II (730 źródeł; niebieskie krzyże) z katalogu ROGUE I [33].

W kontekście klasyfikacji morfologicznej galaktyki macierzystej większość galaktyk to galaktyki eliptyczne ($\sim 60\%$), galaktyki spiralne stanowią ok. 16%, zaburzone $\sim 12\%$ a soczewkowate $\sim 7\%$. Pozostałe $\sim 5\%$ to galaktyki zderzające się, pierścieniowe, oddziałujące oraz z poprzeczką.

W próbie ROGUE I około 2% radiogalaktyk z rozciągniętą strukturą radiową jest zidentyfikowana z galaktykami spiralnymi, zaburzonymi lub soczewkowatymi. Jak się można było spodziewać pozostałe radiogalaktyki rozciągnięte są zidentyfikowane z galaktykami eliptycznymi.

Porównując jasności radiowe rozciągniętych radiogalaktyk z różnymi morfologiami FR zauważyliśmy, że jasności źródeł FR I i FR II na 1.4 GHz w naszej próbie są porównywalne (Rys. 8). Jest to dość zaskakujący wynik, gdyż galaktyki FR II są uważane za jaśniejsze. Diagram Ledlowa-Owena [38] dla radioźródeł FR I i FR II z katalogu ROGUE pokazuje, że większość źródeł FR II znajduje się poniżej oryginalnej linii dzielącej te dwie klasy obiektów, tj. są to głównie źródła słabe radiowo. Jest to interesujący wynik, zgodny z wynikami uzyskanymi w przeglądzie LOFAR [42] i pokazujący, że w przeglądach o niskim poziomie detekcji radiowej populacja źródeł FR II o małych jasnościach jest znacząca.

Dokładna klasyfikacja radioźródeł pozwoliła na identyfikację nowych obiektów jak gigantyczne radioźródła lub źródeł z nieklasycznymi morfologiami jak X-lub Z-shaped czy galaktyki podwójno-podwójne. W przeglądach tak już dobrze przebadanych jak NVSS i FIRST byliśmy w stanie

zidentyfikować 33 nowe gigantyczne radiogalaktyki i dodatkowych 22 kandydatów na „giganty”, 4 nowe źródła podwójno-podwójne i kolejnych 12 kandydatów, 3 potwierdzone i 6 kandydatów na źródła X-shaped, oraz 18 potwierdzonych i 7 kandydatów na źródła Z-shaped.

W projekcie ROGUE jestem pomysłodawcą, organizatorem prac i głównym wykonawcą. Do moich zadań należało przygotowanie listy optycznych galaktyk, weryfikacja identyfikacji automatycznej, ustalenie schematów klasyfikacji, generowanie map radiowych, przeprowadzenie części klasyfikacji i łącznie z Natalią Żywucką jej weryfikacja, przygotowanie statystyk, porównań z innymi katalogami i przygotowanie manuskryptu. Jestem także autorem korespondencyjnym. Arti Goyal brała udział w ustalaniu ostatecznego schematu klasyfikacji radiowej, identyfikacji automatycznej źródeł radiowych z FIRST z galaktykami optycznymi oraz uczestniczyła w niektórych etapach klasyfikacji. Natalia Żywucka brała udział w klasyfikacji radiowej i optycznej źródeł, generowaniu wykresów i tworzeniu list nowych źródeł. Obie współautorki brały udział w dyskusji i tworzeniu części tekstu.

[H5]

Jednym z bardziej wymagających zadań w analizie i badaniu dużych katalogów źródeł radiowych jest podział tych źródeł na te zasilane przez AGN oraz te z emisją radiową związaną z obszarami powstawania gwiazd. Podczas gdy galaktyki z rozciągniętą strukturą są niezaprzeczalnie zasilane przez AGN, tak w radioźródłach o zwartej strukturze pytanie o źródło emisji radiowej nie jest trywialne. Katalog ROGUE został opublikowany bez wskazania źródła emisji radiowej poszczególnych obiektów. W wielu publikacjach (jak np. [5, 49]) do rozdzielenia emisji radiowej pochodzącej z tych dwóch procesów używano kombinacji różnych kryteriów. Celem niniejszej pracy było znalezienie prostej metody do rozróżnienia emisji radiowej pochodzącej od AGN-u od tej związanej z aktywnością gwiazdotwórczą. Zaproponowaliśmy więc dwie metody, które mogą być stosowane niezależnie od siebie w zależności od dostępności danych.

Podstawą pierwszej metody jest dobrze znana korelacja pomiędzy jasnością radiową a jasnością w dalekiej podczerwieni odkryta dla normalnych galaktyk z aktywnością gwiazdotwórczą (np. [15, 56]). Emisja radiowa w tych galaktykach zawiera emisję swobodno-swobodną z regionów HII oraz z promieniowania synchrotronowego z pozostałości po supernowych zatem niesie informację o populacjach gwiazdowych młodszych niż ok. 108

lat. Z drugiej strony emisja w dalekiej podczerwieni mierzy jasność bolometryczną masywnych gwiazd re-emitowaną przez pył międzygwiazdowy. Stąd oczekuje się, że obserwowana emisja w zakresie radiowym i dalekiej podczerwieni będą ze sobą ściśle połączone. Niestety, brak jest danych w dalekiej podczerwieni wystarczająco głębokich i dostępnych dla dużego fragmentu nieba, które można by było użyć do charakterystyki galaktyk ROGUE. Jednakże, istnieją przeglądy w średniej podczerwieni jak AKARI [43] czy WISE [57], które można użyć do tego celu. Rosario i in. (2013) [47] użyli danych z WISE aby pokazać, że dla AGN-ów wyselekcjonowanych z SDSS, i posiadających linie emisyjne, diagram jasność W3 versus jasność na 1.4 GHz ma dwie gałęzie. Wymienieni autorzy wskazali, że diagram taki może być użyty jako narzędzie do badania procesów gwiazdotwórczych i procesów akrecji w AGN-ach. Diagram ten został także użyty przez Mingo i in. (2016) [41] do badania własności gwiazdotwórczych w próbce AGN-ów wyselekcjonowanych z danych radiowych i rentgenowskich.

Wraz z współautorami zaproponowaliśmy jeszcze prostszą wersję tego diagramu, który nazwaliśmy diagramem MIRAD (z ang. MID-infrared vs RADio), w którym wykorzystaliśmy gęstość strumienia w paśmie W3 oraz radiowym 1.4 GHz. Na diagramie tym widać dwie rodziny obiektów z galaktykami formującymi gwiazdy na górnej gałęzi. Sprawdziliśmy kilka kryteriów podziału AGN-ów radiowych i galaktyk formujących gwiazdy, ale ponieważ żaden z nich nie był bardziej odpowiedni od innych przyjęliśmy najprostszą linię tj. $F_{W3} = F_{1.4GHz}$. Co ciekawe, to samo kryterium rozdziela radiowo głośne oraz radiowo ciche AGN-y w próbce AGN-ów wyselekcjonowanych z katalogu Swift/BAT [48]. Wśród 23294 galaktyk z ROGUE I, które mają użyteczne dane w przeglądzie WISE, 10995 jest radiowymi AGN-ami. Ponieważ katalog ROGUE zawiera bliskie galaktyki (przesunięcie ku czerwieni $< \sim 0.5$) używamy tego diagramu w płaszczyźnie gęstości strumienia. Jednakże, dla próbek z większego zakresu odległości może być użyta wersja z jasnościami po zastosowaniu do nich korekcji K.

Alternatywnym diagramem, który zbadaliśmy oraz proponujemy do separowania galaktyk formujących gwiazdy AGN-ów radiowych jest używany już poprzednio diagram $D_n(4000)$ vs $L_{1.4}/M^*$ (DLM). Może on być używany z galaktykami ROGUE I gdyż dla wszystkich galaktyk z tego katalogu dostępne są wartości $D_n(4000)$ oraz M^* z bazy Starlight. Może on być także używany do obiektów, dla których pomiary W3 nie są dostępne. Dla tego diagramu proponujemy linię, która jest jak najbardziej kompatybilna z podziałem na diagramie MIRAD. Do jej znalezienia użyliśmy kryterium jakości [2], który jest iloczynem frakcji galaktyk zaklasyfikowanych

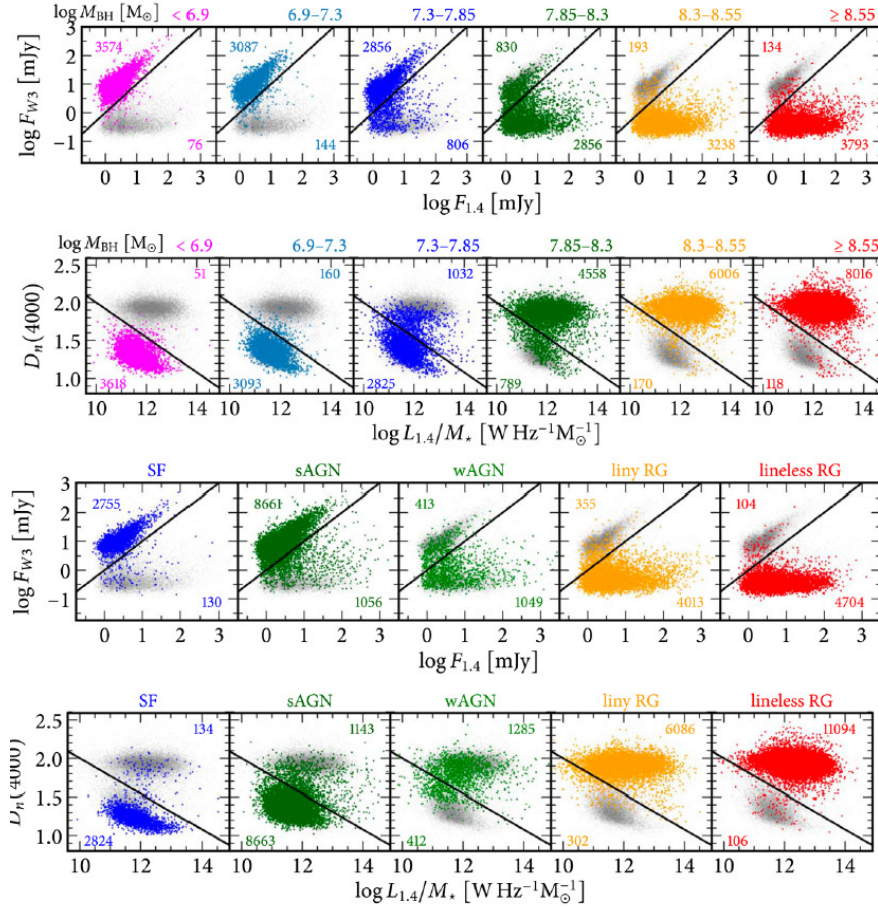
jako formujące gwiazdy w diagramie MIRAD, które są tak samo zaklasyfikowane w diagramie DLM, C_{SF} , frakcji galaktyk sklasyfikowanych jako formujące gwiazdy w diagramie DLM i tak samo sklasyfikowane w diagramie MIRAD, R_{SF} , oraz kompletności C_{AGN} oraz wiarygodności R_{AGN} podobnie zdefiniowanych, ale dla AGN-ów radiowych, $P = C_{\text{SF}}R_{\text{SF}}C_{\text{AGN}}R_{\text{AGN}}$. Także tutaj użyliśmy źródeł FRI i FRII oraz galaktyk formujących gwiazdy z diagramu BPT by zdefiniować podział, oraz zaproponowaliśmy linię $D_n(4000) = -0.23 L_{1.4}/M^* + 4.3$, która daje największą wartość P .

W katalogu ROGUE I najbardziej ograniczone są dane z przeglądu WISE i gęstości strumienia w W3. Wiele radiowych AGN-ów ma W3 poniżej limitu detekcji WISE i nie może być sklasyfikowanych z użyciem diagramu MIRAD. W ROGUE stosunek liczby radiowych AGN-ów do galaktyk formujących gwiazdy wynosi 1.61 dla podziału przy użyciu diagramu DLM, oraz 0.89 gdy użyje się do tego celu diagramu MIRAD. Pokazuje to, że przez ograniczenia obserwacyjne diagram MIRAD podaje zafałszowane całkowite ilości AGN-ów radiowych wśród radiowo zdetektowanych galaktyk.

Używając diagramów MIRAD oraz DLM zademonstrowaliśmy zmianę frakcji radiowych AGN-ów z rosnącą masą czarnej dziury [18]. Obydwa diagramy wskazują, że radiowe AGN-y znajdują się preferencyjnie w galaktykach z czarnymi dziurami o masach większych niż $M^{7.8} M_{\odot}$ co jest zgodne z wcześniejszymi badaniami pokazującymi, że ilość radiowo głośnych AGN-ów rośnie gwałtownie w galaktykach z masami czarnych dziur masywniejszymi niż około $10^8 M_{\odot}$.

Używając diagramów MIRAD i DLM pokazaliśmy także jakie morfologie optyczne mają galaktyki macierzyste tych dwóch klas emiterów radiowych. Pokazaliśmy, że znakomita większość radiowych AGN-ów to galaktyki eliptyczne. Galaktyki późniejszych typów morfologicznych lokują się na górnej gałęzi na diagramie MIRAD. Galaktyki ze śladami oddziaływania także leżą głównie na górnej gałęzi co pokazuje, że ich emisja jest związana z procesami gwiazdotwórczymi. Jednakże, około 13% tych galaktyk leży na dolnej gałęzi co jest zgodne z hipotezą, że znaczna część radiowych AGN-ów jest identyfikowana z galaktykami mergerami (np. [10]).

Diagramy MIRAD i DLA mogą być użyte do zbadania źródła emisji radiowej w pięciu kategoriach galaktyk zdefiniowanych w pracy [14] czyli galaktykami formującymi gwiazdy, silne AGN-y (optyczne), słabe AGN-y, galaktyki „w spoczynku” z liniami emisyjnymi, oraz galaktyki „w spoczynku” bez linii emisyjnych. Jak można oczekiwać w galaktykach formujących gwiazdy emisja radiowa prawie w każdym wypadku pochodzi z procesów



RYSUNEK 9. Diagramy MIRAD i DLM w przedziałach masy czarnej dziury (dwa górne panele) oraz z różnymi klasyfikacjami widmowymi z diagramu WHAN (dwa dolne panele). Wszystkie źródła z próbki ROGUE I-WISE pokazane są jako szare punkty. Liczby na diagramach pokazują ilości obiektów w poszczególnych rejonach [34].

gwiazdotwórczych. Także w znacznej części silnych AGN-ów optycznych emisja radiowa pochodzi z procesów gwiazdotwórczych, a jedynie około 11% tych obiektów to radiowe AGN-y. Natomiast populacja radiowych AGN-ów dominuje wśród słabych AGN-ów optycznych a ich ilość jest jeszcze większa wśród galaktyk „w spoczynku”.

W tej publikacji pokazaliśmy, że istnieją proste metody odsiania galaktyk formujących gwiazdy od radiowych AGN-ów w katalogach radioźródeł. Użycie tylko jednej metody znacznie ułatwia zrozumienie i ocenienie zafałszowań wprowadzonych przez selekcję w próbce. Używając dwóch narzędzi, które mogą być używane niezależnie od siebie i są tak samo efektywne, pokazujemy, że w próbce wyselekcjonowanej z katalogu spektroskopowego SDSS i przeglądów radiowych NVSS/FIRST, radiowe AGN-y są głównie znajdowane w galaktykach z najmasywniejszymi czarnymi dziurami, są zidentyfikowane z galaktykami eliptycznymi i są głównie słabymi optycznie

AGN-ami lub galaktykami, które przestały formować gwiazdy i są jonizowane przez fotony z gorących, mało masywnych i wyewoluowanych gwiazd, a emisja w $H\alpha$ nie estymuje jasności bolometrycznej AGN-u.

W niniejszej publikacji byłam pomysłodawcą projektu i użycia diagramu MIRAD do rozdzielania obiektów z różnym źródłem emisji radiowej. Mój wkład polegał także na zbadaniu rozkładu obiektów o różnych własnościach na diagramach DLM i MIRAD, jak masa czarnej dziury, morfologie radiowe i optyczne. Brałam dominujący udział w dyskusji wyników oraz powstawaniu manuskryptu. Byłam także autorem korespondencyjnym. Natalia Vale Asari włączyła się poprzez zaproponowanie metody znajdowania najlepszej separacji obiektów na obu diagramach, analizę danych oraz dyskusję i napisanie części tekstu. Grażyna Stasińska proponowała użycie diagramu DLM w uzupełnieniu do diagramu MIRAD, brała udział w dyskusji oraz powstaniu tekstu. Fabio Herpich włączył się poprzez przygotowanie danych W3 co także opisał w manuskrypcie. Marek Sikora brał udział w dyskusji i interpretacji teoretycznej. Natalia Żywucka brała udział w kompletowaniu literatury oraz Arti Goyal włączyła się do dyskusji wyników projektu.

Podsumowanie

Przedstawiłam pięć publikacji, w których wraz ze współautorami zajmowałam się analizą wieloczęstotliwościowych danych AGN-ów aktywnych radiowo. W naszych badaniach użyliśmy szeregu różnych metod i dużych próbek obiektów by przetestować znane jak i zaproponowane przez nas hipotezy dotyczące AGN-ów, głównie z dżetami radiowymi, oraz zbadać własności galaktyk macierzystych i linii emisyjnych w radioźródłach o różnych morfologiach radiowych. Dodatkowo, zaprezentowaliśmy listy obiektów radiowych, które są już dostępne publicznie, i które mogą być użyte do dalszych badań radiogalaktyk.

Wyniki mogę podsumować jako:

- (a) Pokazałam, że radiogalaktyki FR II mogą mieć jasności radiowe z szerokiego zakresu wartości. Znalazłam, że galaktyki FR II pokazują continuum własności w zależności od parametru Eddingtona, a źródła z gorącymi plamami mają największe wartości $P_{1.4}/M_{\text{BH}}$. Pokazałam także, że radiogalaktyki FR II tworzą niejednorodną grupę pod względem własności linii emisyjnych oraz że struktury FR II znajdowane są w galaktykach eliptycznych, preferencyjnie w tych o największych masach.

- (b) Zaprezentowałam nowo odkryte radioźródło CGCG292-057 mające własności źródła podwójno-podwójnego, co jest oznaką wznowienia aktywności radiowej źródła, oraz źródła o morfologii X-shaped, co jest wynikiem przeorientowania dżetu. Dodatkowo radioźródło to jest zidentyfikowane z galaktyką wykazującą oznaki przebitego zderzenia co może tłumaczyć skomplikowaną strukturę radiową źródła.
- (c) Pokazałam, że radiowo głośne i radiowo ciche galaktyki sparowane we własnościach AGN-u różnią się typem morfologicznym co świadczy o tym, że efektywność produkcji dżetów nie jest zdeterminowana tylko parametrem Eddingtona i masą czarnej dziury. Różna efektywność produkcji dżetów jest zdeterminowana także przez ilość pola magnetycznego skumulowanego w AGN-ie i/lub przez spin czarnej dziury.
- (d) Zaprezentowałam katalog radiogalaktyk z optycznego przeglądu SDSS i radiowych przeglądów FIRST i NVSS, które mają znane spektroskopowe przesunięcia ku czerwieni, wyznaczone gęstości strumienia na częstotliwości 1.4 GHz oraz przypisane optyczne i radiowe klasyfikacje morfologiczne.
- (e) Przedstawiłam dwie metody separacji radioźródeł o różnym pochodzeniu emisji radiowej. Pokazałam także, że radiowe AGN-y identyfikowane są głównie z galaktykami eliptycznymi o czarnych dziurach bardziej masywnymi niż $10^{7.8} M_{\odot}$. Dodatkowo pokazałam jakie są źródła emisji radiowej w słabych i silnych optycznych AGN-ach.

Literatura

- [1] Abazajian K. N. i in. 2009, ApJS, 182, 543
- [2] Baldry, I. K., Glazebrook, K., Brinkmann, J. i in. 2004, ApJ, 600, 681
- [3] Baldwin J. A., Phillips M. M., Terlevich R. 1981, PASP, 93, 5
- [4] Becker R. H., White R. L., Helfand D. J. 1995, ApJ, 450, 559
- [5] Best, P. N., & Heckman, T. M. 2012, MNRAS, 421, 1569
- [6] Best P. N., Kauffmann G., Heckman T. M., Ivezić Z. 2005, MNRAS, 362, 9
- [7] Blandford, R., Meier, D., & Readhead, A. 2019, ARA&A, 57, 467
- [8] Blandford, R. D., & Znajek, R. L. 1977, MNRAS, 179, 433
- [9] Cheung C. C. 2007, AJ, 133, 2097
- [10] Chiaberge, M., Gilli, R., Lotz, J. M., & Norman, C. 2015, ApJ, 806, 147
- [11] Cid Fernandes R., Mateus A., Sodre L., Stasinska G., Gomes J. M. 2005, MNRAS, 358, 363
- [12] Cid Fernandes R. i in. 2009, Rev. Mex. Astron. Astrofis., 35, 127
- [13] Cid Fernandes R., Stasinska G., Schlickmann M. S., Mateus A., Vale Asari N., Schoenell W., Sodre L. 2010, MNRAS, 403, 1036

-
- [14] Cid Fernandes, R., Stasińska, G., Mateus, A., & Vale Asari, N. 2011, MNRAS, 413, 1687
- [15] Condon, J. J. 1992, ARA&A, 30, 575
- [16] Condon J. J., Cotton W. D., Greisen E. W., Yin Q. F., Perley R. A., Taylor G. B., Broderick J. J., 1998, AJ, 115, 1693
- [17] Dennett-Thorpe J., Scheuer P. A. G., Laing R. A., Bridle A. H., Pooley G., G., Reich W. 2002, MNRAS, 330, 609
- [18] Dunlop, J. S., McLure, R. J., Kukula, M. J., i in. 2003, MNRAS, 340, 1095
- [19] Eisenstein, D. J., Annis, J., Gunn, J. E. i in. 2001, AJ, 122, 2267
- [20] Fanaroff, B. L., & Riley, J. M. 1974, MNRAS, 167, 31P
- [21] Ferrarese, L., & Merritt, D. 2000, ApJL, 539, L9
- [22] Hardcastle M. J., Alexander P., Pooley G. G., Riley J. M. 1998, MNRAS, 296, 445
- [23] Hine R. G., Longair M. S. 1979, MNRAS, 188, 111
- [24] Janda K., 2006, MSc Dissertation, Jagiellonian University, Krakow
- [25] Kaiser C. R., Schoenmakers A. P., Rottgering H. J. A., 2000, MNRAS, 315, 381
- [26] Kauffmann G., & Heckman T. M. 2009, MNRAS, 397, 135
- [27] Kellermann K.I., Condon J.J., Kimball A.E., Perley R.A., Ivezić, Z. 2016, ApJ, 831, 168
- [28] Kellermann K. I., Sramek R., Schmidt M., Shaffer D. B., Green R. 1989, AJ, 98, 1195
- [29] Kormendy, J., & Ho, L. C. 2013, ARA&A, 51, 511
- [30] Koziel-Wierzbowska, D., & Stasińska, G. 2011, MNRAS, 415, 1013
- [31] Koziel-Wierzbowska, D., Jamrozy M., Zola S., Stachowski G., Kuźmich A., 2012, MNRAS, 422, 1546
- [32] Koziel-Wierzbowska, D., Vale Asari, N., Stasińska, G. i in. 2017, ApJ, 846, 42
- [33] Koziel-Wierzbowska, D., Goyal, A., & Żywucka, N. 2020, ApJS, 247, 53
- [34] Koziel-Wierzbowska, D., Vale Asari, N., Stasińska, G. i in. 2021, ApJ, 910, 64
- [35] Lal D. V., Rao A. P., 2005, MNRAS, 356, 232
- [36] Lal D. V., Rao A. P., 2007, MNRAS, 374, 1085
- [37] Leahy J. P., Parma P., 1992, in Roland J., Sol H., Pelletier G., eds, Extragalactic Radio Sources. Cambridge Univ. Press, Cambridge, p. 307
- [38] Ledlow, M. J., & Owen, F. N. 1996, AJ, 112, 9
- [39] Machalski, J., Koziel-Wierzbowska, D., Jamrozy, M., 2007, Acta Astron., 57, 227
- [40] Marecki A., & Swoboda B. 2011, A&A, 525, A6
- [41] Mingo, B., Watson, M. G., Rosen, S. R. i in. 2016, MNRAS, 462, 2631
- [42] Mingo, B., Croston, J. H., Hardcastle, M. J. i in. 2019, MNRAS, 488, 2701
- [43] Murakami, H., Baba, H., Barthel, P. i in. 2007, PASJ, 59, S369
- [44] Padovani, P., Alexander, D. M., Assef, R. J. i in. 2017, A&ARv, 25, 2
- [45] Rawlings S., Saunders R., Eales S. A., Mackay C. D., 1989, MNRAS, 240, 701
- [46] Rengelink R. B., Tang Y., de Bruyn A. G., Miley G. K., Bremer M. N., Rottgering H. J. A., Bremer M. A. R. 1997, A&AS, 124, 259
- [47] Rosario, D. J., Burtscher, L., Davies, R. i in. 2013, ApJ, 778, 94
- [48] Rusinek, K., Sikora, M., Koziel-Wierzbowska, D., & Gupta, M. 2020, ApJ, 900, 125
- [49] Sabater, J., Best, P. N., Hardcastle, M. J. i in. 2019, A&A, 622, A17

- [50] Saripalli L., Subrahmanyan R. 2009, ApJ, 695, 156
- [51] Schoenmakers A. P., de Bruyn A. G., Rottgering H. J. A., van der Laan H., Kaiser C. R. 2000, MNRAS, 315, 371
- [52] Shimasaku K. i in. 2001, AJ, 122, 1238
- [53] Strateva I. i in. 2001, AJ, 122, 1861
- [54] Strauss, M. A., Weinberg, D. H., Lupton, R. H. i in. 2002, AJ, 124, 1810
- [55] Tremaine S. i in. 2002, ApJ, 574, 740
- [56] Wang, L., Gao, F., Duncan, K. J. i in. 2019, A&A, 631, A109
- [57] Wright, E. L., Eisenhardt, P. R. M., Mainzer, A. K. i in. 2010, AJ, 140, 1868
- [58] Zakamska, N. L., Lampayan, K., Petric, A. i in. 2016, MNRAS, 455, 4191

* * *

Laudacja

Stanisław Zoła

Obserwatorium Astronomiczne, Uniwersytet Jagielloński

Magnificencjo!

Szanowna Pani Dziekan!

Szanowni Panowie Przewodniczący Rad Dyscyplin Astronomii i Fizyki!

Droga Doroto!

Szanowni Państwo!

Przypadł mi zaszczyt i prawdziwa przyjemność przedstawić Państwu sylwetkę Pani Doktor Doroty Koziel-Wierzbowskiej, której 16-go maja tego roku Rada Dyscypliny Astronomia Uniwersytetu Jagiellońskiego nadała stopień doktora habilitowanego.

Dorota Koziel-Wierzbowska rozpoczęła studia fizyki w 1996 roku na Uniwersytecie Pedagogicznym w Krakowie, ale od samego początku interesowała ją astronomia. Zarówno stopień licencjata jak i magistra otrzymała za prace o tej tematyce, wykonane pod kierunkiem profesora Jerzego Kreinera, kierownika Katedry Astronomii UP. Studia kontynuowała na kierunku astronomii już na Uniwersytecie Jagiellońskim, otrzymując w 2003 roku stopień magistra astronomii, badając pod moim kierunkiem składniki ciasnych układów podwójnych gwiazd.

Studia doktoranckie również odbyła w Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Jagiellońskiego. W tym czasie zmieniła obszar zainteresowań z astronomii gwiazdowej na astronomię pozagalaktyczną. Rozprawę doktorską zatytułowaną „Spektroskopia optyczna gigantycznych radio-galaktyk” Dorota Koziel-Wierzbowska napisała pod kierunkiem Profesora Jerzego Machalskiego, obecnego na dzisiejszej uroczystości, a doktorat obroniła w 2008 roku. Jej rozprawa została wyróżniona przez Radę Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej naszej Alma Mater.

Karierę naukową Dorota Koziel-Wierzbowska od początku związała z Uniwersytetem Jagiellońskim, po doktoracie pracując w Obserwatorium Astronomicznym najpierw na etacie asystenta naukowo dydaktycznego, a w 2012 roku awansowała na etat adiunkta i na tym etacie jest zatrudniona do dziś.

Dorota Koziel-Wierzbowska jest świetnym naukowcem. Poznałem ją jeszcze w czasie jej studiów na Uniwersytecie Pedagogicznym. W badania naukowe była zaangażowana już od tego czasu. Jest bardzo sumienna w każdej pracy którą wykonuje, nie boi się także prowadzenia projektów wymagających bardzo długiej perspektywy czasowej. Wykonywała obserwacje optyczne wielu klas obiektów astronomicznych, od niewielkich ciał Układu Słonecznego poprzez gwiazdy pulsujące, układy gwiazd podwójnych, aż po odległe kwazary. Z czasem te ostatnie najbardziej ją urzekły i prawie im się wyłącznie poświęciła, badając cykle aktywności galaktyk aktywnych oraz zachodzące w nich procesy fizyczne. Wykorzystuje do tego celu obserwacje w kilku zakresach widma elektromagnetycznego, własne i zgromadzone w archiwach. Badala morfologię największych radio-galaktyk, pochodzenie emisji radiowej oraz zmienności jasności w części widzialnej. Odkryła wcześniej nie znane znaczne zróżnicowanie własności tych obiektów. Jest naukowcem o bardzo wysokiej renomie w środowisku międzynarodowym. Przejawia się to w zaproszeniach na konferencje, do recenzowania prac naukowych w najlepszych czasopismach astronomicznych oraz otrzymywaniem czasu na instrumentach światowej klasy, zarówno radioteleskopach jak i teleskopach optycznych.

Dorota Koziel-Wierzbowska posiada nieprzeciętny talent organizacyjny. Wykazała się świetną pracą współorganizując 3 konferencje międzynarodowe i jedną krajową. Wymienię przy tej okazji tę największą: Dorota Koziel-Wierzbowska przewodniczyła Komitetowi Organizacyjnemu Kongresu Europejskiego Towarzystwa Astronomicznego, który miał miejsce w Krakowie latem 2023 roku i zgromadził ponad 1500 uczestników z całego świata. Brała jednocześnie udział w pracach Komitetu Naukowego tej

konferencji. Jej talent pokazuje się także w czasie prac organizacyjnych instytutu, w tym związanych z dydaktyką, np. angażując się w tworzenie programu nauczania na kierunku astronomia.

Dorota jest sekretarzem Zakładu Astronomii Gwiazdowej i Pozagalaktycznej, była przedstawicielką w Radzie Naukowej Obserwatorium Astronomicznego oraz Rady Wydziału. Należy do Europejskiego Towarzystwa Astronomicznego i Polskiego Towarzystwa Astronomicznego, w którym pełni funkcję członkini Komisji Rewizyjnej.

Dorotę Koziel-Wierzbowską cechuje niezwykła życzliwość i uczynność dla współpracowników i studentów. Te cechy w połączeniu z talentem dydaktycznym, owocują uznaniem i bardzo wysokimi ocenami jej zajęć przez studentów, a w 2017 roku została wyróżniona za tę działalność nagrodą JM Rektora UJ.

Dorota Koziel-Wierzbowska to także wyróżniająca się popularyzator-ka astronomii. Wielokrotnie uczestniczyła w jury olimpiad i konkursów astronomicznych, publikowała prace popularnonaukowe, a także wygłaszała wykłady popularnonaukowe na festiwalach nauki i w szkołach województwa małopolskiego.

Droga Doroto: szczerze gratuluję osiągnięć!

Badanie własności gigantycznych radioźródeł oraz ich galaktyk macierzystych

Agnieszka Kuźmich

Obserwatorium Astronomiczne, Uniwersytet Jagielloński

Autoreferat habilitacyjny

Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego:

(IF - impact factor, LC - liczba cytowań, P_{MNiSW} - punkty MNiSW; stan na 09.2023)

H1. Kuźmich A., Jamrozy M., Bronarska K., Janda-Boczar K., Saikia D. J.,
An Updated Catalog of Giant Radio Sources,
2018, Astrophysical Journal Supplement, 238, 9
IF=9.2, LC=46, $P_{\text{MNiSW}}=200$

H2. Kuźmich A., Jamrozy M.,
Giant radio quasars: sample and basic properties,
2022, Astrophysical Journal Supplement, 253, 25
IF=9.2, LC=15, $P_{\text{MNiSW}}=200$

H3. Kuźmich A., Sethi S., Jamrozy M.,
Giant radio quasars: composite optical spectra,
2022, Astrophysical Journal, 922, 52
IF=5.521, LC=4, $P_{\text{MNiSW}}=140$

H4. Kuźmich A., Czerny B., Wildy C.,
Stellar populations in hosts of giant radio galaxies and their neighbouring galaxies,
2019, Astronomy & Astrophysics, 624, 91
IF=6.24, LC=10, $P_{\text{MNiSW}}=140$

H5. Kuźmich A., Jamrozy M., Kozieł-Wierzbowska D., Weżgowiec M.,
Optical and radio properties of extragalactic radio sources with recurrent jet activity,
2017, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 471, 3806
IF=5.235, LC=32, $P_{\text{MNiSW}}=140$

H6. Kuźmich A., Goyal A. Zola S., Jamrozy M. Drozd M., Ogloza W., Siwak M., Reichart D. E., Kouprianov V. V., Caton D. B.,

Optical Variability of Eight FR II-type Quasars with 13 yr Photometric Light Curves, 2022, Astrophysical Journal Supplement, 263, 16

IF=9.2, LC=0, P_{MNiSW}=200

Omówienie celu naukowego ww prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Prace, które wchodzą w skład osiągnięcia naukowego podsumowują najważniejsze badania naukowe prowadzone przeze mnie po uzyskaniu stopnia doktora. Jak uzasadniam poniżej, z jednej strony stanowią one spójną całość jeśli chodzi o badania własności gigantycznych radioźródeł oraz ich galaktyk macierzystych, a z drugiej strony ilustrują różnorodną metodologię badań stosowaną przeze mnie w podejściu do podjętego zagadnienia naukowego. Obejmują one szeroko pojętą analizę danych (archiwalnych oraz otrzymanych w dedykowanych obserwacjach), jak również modelowanie danych obserwacyjnych w celu uzyskania parametrów charakteryzujących galaktyki macierzyste gigantycznych radioźródeł. Głównym celem przyświecającym moim badaniom było znalezienie takich własności gigantycznych radioźródeł, które by odróżniały je od innych obiektów tworzących rozległe struktury radiowe.

We Wszechświecie obserwujemy wiele typów galaktyk, które cechują się różnymi własnościami. W szczególności, możemy wyróżnić tzw. klasę galaktyk aktywnych, w których centrum znajduje się supermasywna czarna dziura oraz dysk akrecyjny, poprzez który materia opada na czarną dziurę. Procesowi akrecji towarzyszy uwalnianie się ogromnej energii, przez co jasność centralnego „aktywnego” jądra galaktycznego (ang. Active Galactic Nuclei; AGN) w większości przypadków dominuje nad całą galaktyką. Niewielka część AGNów ($\sim 15\text{-}20\%$; [1]) jest obiektami radioowo głośnymi w znaczeniu, że stosunek strumienia radiowego (na 5 GHz; $F_{5\text{GHz}}$) do strumienia optycznego w filtrze B (F_B) jest $F_{5\text{GHz}}/F_B \geq 10$ [2]. W obiektach tych część energii grawitacyjnej rotującej czarnej dziury jest przekazywana naładowanym cząstkom, które są wyrzucane w dwóch przeciwnych współosiowych kierunkach z bardzo dużymi (relatywistycznymi) prędkościami. Wyrzuty te formują cienkie strugi (dżety), a one z kolei zasilają w materię i pole magnetyczne rozległe obszary (tzw. płaty, loby) promieniowania synchrotronowego, które powiększają się z czasem [3]. Struktury radiowe mogą osiągać bardzo duże rozmiary i propagować się na

odległości rzędu megaparseków od galaktyki macierzystej. Takie galaktyki nazwano gigantycznymi radiogalaktykami lub radiokwazarami (w zależności od rodzaju obiektu, który je generuje; dalej nazywane radioźródłami). Za umowną granicę podziału pomiędzy „zwykłymi” radioźródłami a gigantami uznaje się rozmiar struktury radiowej równy 0.7 Mpc (przy założeniu stałej kosmologicznej $H = 71 \text{ km/s/Mpc}$ oraz $\Omega_M = 0.27$). Jest to dosyć rzadka cecha AGNów. Szacuje się, że tylko $\sim 6\%$ radioźródeł posiada tak duże rozmiary, choć w ostatnich latach liczba znanych obiektów tego rodzaju wzrosła dziesięciokrotnie dzięki nowym przeglądom radiowym nieba takich jak LOFAR [4] oraz przeglądom spektroskopowym. Niezależnie jednak od tego, gigantyczne struktury radiowe są rzadką cechą na tle całej populacji radioźródeł. Z tego powodu kluczowe jest zrozumienie dlaczego powstają tak duże struktury i jakie czynniki temu sprzyjają. Dotychczasowe badania nie przyniosły jednoznacznych wyników. Jako główne czynniki mogące mieć wpływ na formowanie się dużych struktur radiowych rozważano zarówno czynniki zewnętrzne takie jak własności ośrodka, w którym ewoluują radioźródła, jak również własności wewnętrzne centralnych AGNów, gdzie swój początek mają dżety radiowe. Do czynników zewnętrznych można zaliczyć małą gęstość ośrodka [5, 6, 7, 8]. W takich warunkach dżet radiowy może się łatwiej propagować na duże odległości od galaktyki macierzystej. Powyższe prace pokazały, że gęstość ośrodka wokół gigantów jest o mniej więcej rząd wielkości mniejsza niż w przypadku mniejszych radioźródeł, niemniej jednak od czasu tamtych badań znaleziono wiele gigantów znajdujących się w centrach gromad galaktyk (np. [9, 10]) oraz na dużych przesunięciach ku czerwieni (np. [11]). Zatem mała gęstość ośrodka, w którym propagują się dżety radiowe nie jest wystarczająca do tego by wytłumaczyć powstawanie gigantów.

Jako jedną z możliwych przyczyn występowania gigantów rozważa się również zaawansowany wiek tych obiektów. Badania (np. [8, 12]) pokazują, że faktycznie giganty są starymi obiektami. Szacuje się, że ich wiek dynamiczny jest rzędu $\sim 10^7$ lat. Nie może jednak to być jedyny i najważniejszy czynnik, który by tłumaczył występowanie gigantów. Wiele mniejszych radioźródeł jest równie stara, a mimo to nie posiada tak dużych struktur radiowych. Również część gigantów ma stosunkowo małe wieki dynamiczne (np. [13]).

Kolejnym, dyskutowanym w literaturze, czynnikiem mogącym przyczyniać się do powstawania gigantycznych struktur radiowych jest wznawianie aktywności radiowej. Jest to proces, w którym po fazie generowania dżetów w pobliżu czarnej dziury następuje faza „uśpienia” aktywności radiowej na pewien czas (rzędu kilku milionów lat). Po tej fazie aktywność

radiowa jest ponownie wznawiana. Aktywna galaktyka może kilkakrotnie przechodzić przez następujące po sobie fazy aktywności i „uśpiania”. Skutkuje to tym, że dżety pierwszego cyklu rozchodzą się w „pierwotnym” ośrodku międzygwiazdowym i międzygalaktycznym, natomiast te pochodzące z późniejszej fazy (ew. późniejszych faz) propagują się już w środowisku znacząco zmodyfikowanym na skutek wcześniejszego oddziaływania relatywistycznej plazmy radiowej z otaczającą materią. Propagacja dżetu w zmodyfikowanym ośrodku może zatem być szybsza, co pozwala na to aby radioźródło osiągnęło większe rozmiary w krótszym czasie.

Kolejnym badanym czynnikiem mogącym odpowiadać za duże rozmiary gigantów jest bardzo „wydajne” aktywne jądro galaktyczne zdolne do generowania wyjątkowo silnych wyrzutów materii w postaci dżetów radiowych. Sam proces generowania dżetów nie jest jeszcze do końca poznany, niemniej jednak jest ściśle powiązany z własnościami centralnego AGNu. Dotychczasowe badania, w których wyznaczano moc dżetów w gigantycznych radioźródłach pokazały, że ich wartości nie są wysokie, a w porównaniu z mniejszymi radioźródłami, są nawet niższe (np. [14]). Również masy czarnych dziur, tempo akrecji oraz spin czarnej dziury są podobne zarówno w gigantach jak i mniejszych radioźródłach (np. [15, 16, 14]).

Pomimo wielu badań nad gigantami, które były dotychczas prowadzone, w dalszym ciągu nie ma pewności co do tego, jakie warunki musi spełniać AGN (lub jego otoczenie) aby powstały gigantyczne struktury radiowe. Coraz częściej spotyka się w literaturze stwierdzenie, że kombinacja kilku różnych czynników może prowadzić do powstawania tak dużych struktur radiowych.

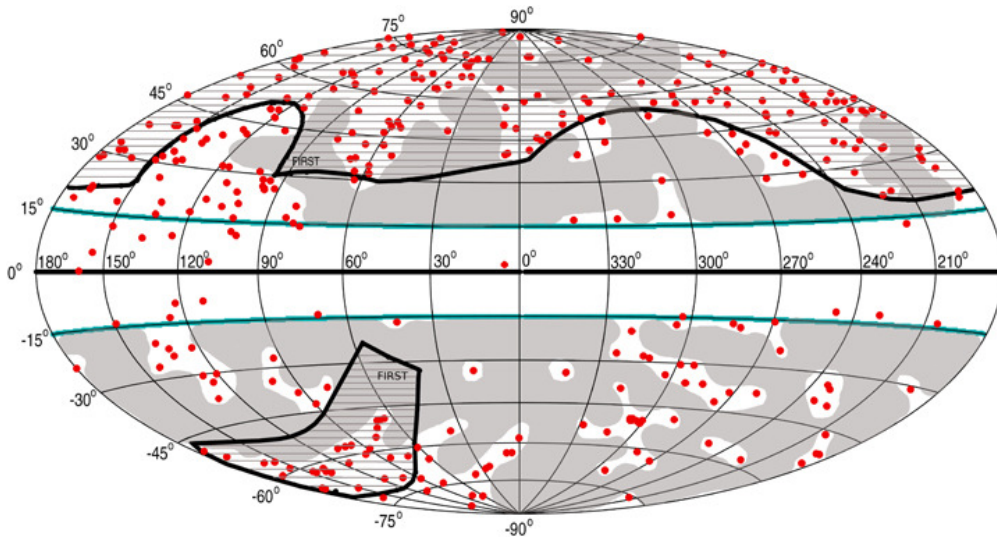
Z uwagi na fakt, że gigantyczne rozmiary struktur radiowych są cechą obserwowaną w dziedzinie radiowej, większość grup badawczych prowadziła swoje badania w tym zakresie. Bardzo niewiele prac dotyczy szukania pewnych specyficznych własności tych obiektów w innych zakresach widma elektromagnetycznego. Prace, które są moim autorstwem są jedynym dostępnym w literaturze wielowątkowym studium m. in. nad własnościami gigantów w dziedzinie optycznej.

Jednym z głównych aspektów prowadzenia tego typu badań jest przeprowadzanie analiz na dużej i jednorodnej próbce obiektów. Początkowo analizy własności gigantów opierały się albo na badaniu pojedynczych obiektów albo dotyczyły małych próbek, dla których dostępne były jednorodne dane w badanym zakresie długości fali. Z tego względu, kluczowe było stworzenie dużej próbki gigantów, dla której różnego rodzaju podstawowe wartości byłyby policzone/zmierzone w jednorodny sposób. Taka

próbka została zaprezentowana przeze mnie w pracy **H1**. Skatalogowane zostały w niej wszystkie znane (do 2018 roku) gigantyczne radioźródła. W tamtym czasie było to 349 potwierdzonych gigantów (zarówno kwazarów jak i galaktyk). Dla wszystkich obiektów zawartych w katalogu podane zostały rozmiary struktur radiowych, strumienie oraz moce radiowe na 1.4 GHz, przesunięcie ku czerwieni oraz jasność galaktyki macierzystej w filtrze r. To co należy podkreślić, to fakt, że wszystkie mierzone parametry zostały wyznaczone w jednolity sposób. Ma to szczególne znaczenie np. przy wyznaczaniu rozmiaru radioźródła (co zostało pokazane w późniejszej pracy **H2**).

Praca **H1** zawiera nie tylko katalog gigantycznych radioźródeł, ale również został w niej oszacowany dolny limit na liczbę gigantów. W środowisku naukowym funkcjonował wówczas pogląd, że giganty są bardzo szczególnymi obiektami z uwagi na ich małą liczbę. Oszacowanie przyniosło wynik co najmniej 2000 obiektów, czyli prawie sześciokrotnie więcej niż wówczas znano. Do wyznaczenia liczby gigantów wykorzystałam ich rozkład na sferze niebieskiej (Rys. 1). Sfera niebieska została podzielona na fragmenty o równej powierzchni, a następnie w każdym z fragmentów zliczone zostały obiekty. W oparciu o liczbę źródeł w najgęstszym obszarze ekstrapolowałam ich liczbę na całą sferę niebieską. Powyższe oszacowanie wykonane zostało na podstawie danych radiowych z przeglądów VLA (NVSS; [17], oraz FIRST; [18]) z tego powodu nie zostały uwzględnione obiekty o niskiej jasności powierzchniowej – poniżej czułości przeglądu NVSS. Na podstawie rozkładu gigantycznych radioźródeł na sferze niebieskiej wyszczególniłam również obszary nieba, w których nie znaleziono żadnych obiektów tego rodzaju. Ich brak, w dużej mierze, wynikał z braku pokrycia tych regionów przez przeglądy optyczne oraz radiowe, niemniej jednak zidentyfikowałam również kilka „pustych” obszarów, dla których były dostępne dane optyczne i radiowe. Są to obszary, w których na podstawie dobrze dostępnych danych, powinniśmy znaleźć sporą liczbę nowych obiektów. Oprócz wyżej poruszonych aspektów praca **H1** była pierwszym pewnego rodzaju studium statystycznym gigantów. W pracy przedstawiłam rozkłady przesunięć ku czerwieni, mocy radiowych i rozmiarów. Ciekawym i dość istotnym wynikiem okazało się skorelowanie położenia gigantów z danymi o pustkach w wielkoskalowej strukturze Wszechświata. Okazało się, że na 91 gigantów, które znajdują się w obszarze pokrytym przez katalog kosmicznych pustek (Cosmic Voids Catalogue, [19]) tylko jeden gigant GRG J1355+2923 znajduje się w pustce. Była to istotna przesłanka za tym, że mała gęstość galaktyk wokół gigantów (często uważana jako miara gęstości ośrodka) nie ma większego wpływu na powstawanie wielkoskalowych

struktur radiowych.

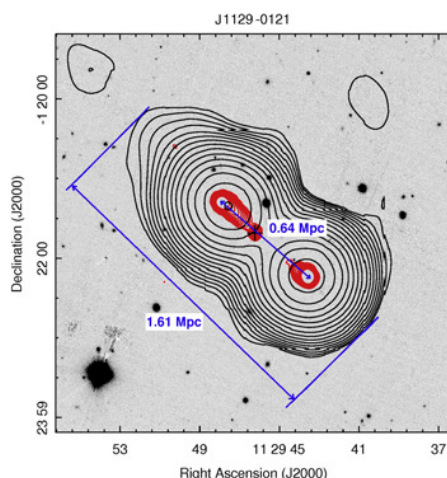


RYSUNEK 1. Rozkład gigantycznych radioźródeł na sferze niebieskiej we współrzędnych galaktycznych. Niebieskie linie na szerokościach galaktycznych $b = \pm 15^\circ$ wyznaczają płaszczyznę Galaktyki gdzie występuje znaczna ekstynkcja. Na szaro zaznaczono obszary poza dyskiem galaktycznym, gdzie nie zostały zidentyfikowane żadne gigantyczne radioźródła (stan na 2018 r). Regiony sfery niebieskiej pokryte przez przegląd radiowy FIRST są oddzielone grubą czarną linią oraz zostały zakreskowane.

Drugą pracą zawierającą katalog gigantycznych radioźródeł, a dokładnie gigantycznych radiokwazarów, była praca **H2**. Mając na uwadze wnioski z pracy **H1**, t.j., że duża część gigantów, która mogłaby być zidentyfikowana w oparciu o już istniejące przeglądy radiowe i optyczne, z jakichś powodów nie została odkryta, postanowiłam przeszukać przegląd radiowy NVSS i skorelować go z przeglądem optycznym SDSS [20]. W rezultacie zidentyfikowałam 272 gigantyczne kwazary z czego 174 było nowo odkrytymi źródłami (w tym 70 obiektów na przesunięciach ku czerwieni $z > 1$). Tym samym potroiło to liczbę wcześniej znanych gigantycznych radiokwazarów. Znalezienie tak dużej liczby nowych gigantów było pewnym zaskoczeniem, gdyż w oparciu o te same dane wiele zespołów poszukiwało już gigantów używając różnych metod, w tym również automatycznych. W przypadku pracy **H2** do poszukiwania gigantów wykorzystałam najprostszą metodę, czyli wizualne rozpoznawanie dużych, rozciągniętych struktur na mapach radiowych i korelowanie ich z danymi optycznymi. Uzyskany wynik pokazuje, że algorytmy, których używa się do automatycznego rozpoznawania tego typu obiektów wymagają jeszcze dopracowania. Sam katalog może zatem stanowić przykładową próbkę obiektów do testowania automatycznych metod rozpoznawania rozciągniętych radioźródeł.

W pracy **H2** pokazałam również, że różne konwencje pomiaru rozmiaru radioźródła powodują znaczne różnice w mierzonych rozmiarach – nawet

rzędu 1 Mpc (Rys. 2)! Na przykład, największe rozmiary otrzymuje się mierząc struktury radiowe w oparciu o rozmiar do poziomu sygnału radiowego równego 3σ na mapach o małej rozdzielczości. W przypadku braku lepszych danych jest to jedyna możliwość pomiaru, niemniej jednak należy mieć na uwadze, że jest to pomiar zawyżony w stosunku do rozmiaru mierzonego od gorącej plamy w jednym lobie do gorącej plamy w drugim lobie.



RYSUNEK 2. Radiokwazar J1129-0121 ($z = 0.726$). Czarne kontury radiowe z NVSS oraz czerwone kontury z FIRST zostały naniesione na mapę optyczną w filtrze r z przeglądu Pan-STARRS. Rysunek przedstawia różnicę pomiędzy pomiarami rozmiaru radioźródła w oparciu o różne metody. W pracy [14] autorzy zmierzili radioźródło JJ1129-0121 jako maksymalny rozmiar struktur radiowych na poziomie 3σ na mapach NVSS otrzymując $D = 1.61$ Mpc. W przypadku użycia konwencji pomiaru od gorącej plamy do gorącej plamy uzyskamy rozmiar $D = 0.64$ Mpc.

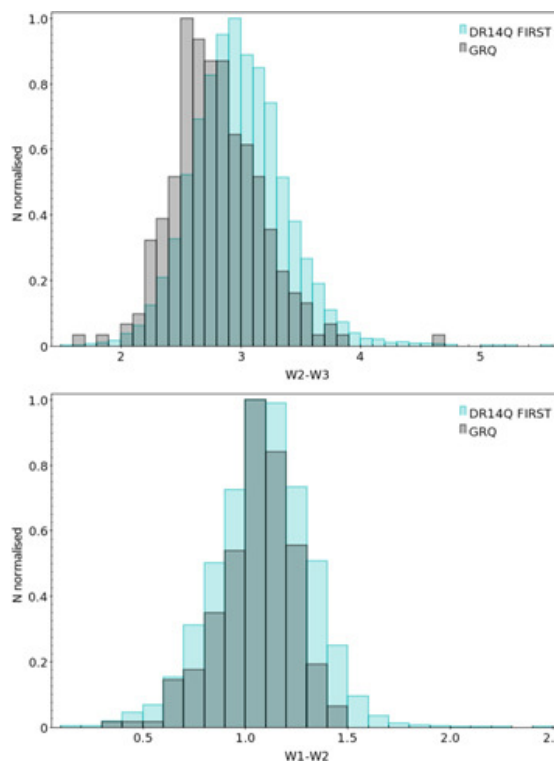
Kolejnym ważnym aspektem pracy **H2** było przeanalizowanie różnych własności radiowych, optycznych i podczerwonych gigantycznych radiokwazarów oraz porównanie ich z własnościami kwazarów o mniejszych rozmiarach struktur radiowych. Do najważniejszych wyników pracy można zaliczyć znalezienie znaczącej korelacji pomiędzy jasnością linii emisyjnej [OIII] oraz całkowitą jasnością radiową na 1.4 GHz, zarówno dla gigantycznych kwazarów (współczynnik korelacji $C = 0.71$) jak i mniejszych radiokwazarów ($C = 0.61$). Otrzymana korelacja jest silniejsza dla próbek rozważanych w pracy **H2** niż dla próbek radiokwazarów, które można znaleźć w literaturze. Występowanie znaczącej korelacji świadczy o ścisłym związku pomiędzy mocą promieniowania radiowego/mocą dżetów a jonizującym promieniowaniem, które powoduje powstawanie wąskich linii widmowych w obłokach znajdujących się w pobliżu czarnej dziury (tzw. ang. narrow line region, NLR). Kolejnym ciekawym wynikiem było sprawdzenie położenia gigantycznych kwazarów na płaszczyźnie Eigenwektora 1 (EV1). Eigenwektor pozwala na prześledzenie fundamentalnych korelacji

między różnymi liniami widmowymi. W pracy **H2** badałam zależność między szerokością połówkową linii $H\beta$ (4862 Å) a stosunkiem szerokości równoważnej linii żelaza Fe (4435-4685 Å) oraz linii $H\beta$. Położenie obiektu – kwazara na tak zdefiniowanej płaszczyźnie EV1 wyznacza tzw. ciąg główny kwazarów. Przypuszcza się, że obiekty o $\text{FWHM } H\beta < 4000$ km/s są obiektami o geometrycznie grubym dysku akrecyjnym zdominowanym przez wiatr (populacja A), natomiast obiekty o $\text{FWHM } H\beta > 4000$ km/s są obiektami o geometrycznie cienkim dysku akrecyjnym i małym tempie akrecji materii na czarną dziurę (populacja B). Zdecydowana większość gigantycznych radiokwazarów należy do populacji B (91%), podobnie jak radiokwazary o mniejszych rozmiarach (83%), co świadczy o małych tempach akrecji materii na czarną dziurę (są to wyewoluowane obiekty o dużych masach czarnych dziur i małych tempach akrecji). Są również wśród gigantów obiekty należące do tzw. ekstremalnej populacji A o bardzo wysokim tempie akrecji. Są to kwazary, które wymagają dokładnego zbadania z uwagi na ich ekstremalne wartości parametrów linii widmowych.

Otrzymane rezultaty analizy własności linii spektralnych przeprowadzonych przeze mnie w pracy **H2** nie wykazały jednak znaczących różnic między gigantycznymi radiokwazarami a kwazarami o mniejszych strukturach radiowych, wskazując na bardzo podobne ich własności spektralne.

Kolejnym ciekawym rezultatem pracy **H2** było zbadanie położenia gigantycznych radiokwazarów na diagramie kolor-kolor w dziedzinie podczerwonej ($3.4 \mu\text{m} - 4.6 \mu\text{m}$ vs $4.6 \mu\text{m} - 12 \mu\text{m}$), oraz porównanie go z położeniem mniejszych radiokwazarów oraz kwazarów z katalogu SDSS, które posiadają jądra radiowe zarejestrowane w przeglądzie FIRST. O ile rozkład koloru $3.4 \mu\text{m} - 4.6 \mu\text{m}$ jest podobny dla wszystkich próbek, to rozkład koloru $4.6 \mu\text{m} - 12 \mu\text{m}$ jest zdecydowanie różny dla gigantów i radiokwazarów o mniejszych strukturach radiowych oraz dla próbki kwazarów z SDSS (Rys. 3). Giganty mają mniejsze wartości koloru $4.6 \mu\text{m} - 12 \mu\text{m}$, co może świadczyć o różnicach w budowie torusa pyłowego wokół dysku akrecyjnego, jak również o mniejszym tempie formowania gwiazd w obiektach o rozciągniętych strukturach radiowych.

Jeden z wyników pracy **H2** (tzn. brak znaczących różnic we własnościach linii spektralnych między gigantycznymi radiokwazarami a kwazarami o mniejszych strukturach radiowych) skłonił mnie do zastosowania trochę innego podejścia do analizy ich własności spektralnych. Przedstawiłam je w pracy **H3**, gdzie wykonałam tzw. optyczne widma kompozytowe dla próbki gigantów oraz mniejszych radiokwazarów z pracy **H2**. Takie



RYSUNEK 3. Znormalizowany rozkład koloru $4.6 \mu\text{m} - 12 \mu\text{m}$ (W2 - W3; u góry) oraz $3.4 \mu\text{m} - 4.6 \mu\text{m}$ (W1 - W2; na dole) dla próbki gigantycznych radiokwazarów oraz próbki kwazarów z przeglądu SDSS (DR14Q FIRST).

widma tworzy się poprzez odpowiednie uśrednienie wielu widm obiektów tej samej klasy, w celu uwydatnienia pewnych ich cech i własności. Powstałe widmo ma bardzo wysoki poziom sygnału do szumu przez co kształt kontinuum, jak również słabe linie widmowe, niewidoczne w pojedynczych widmach, stają się bardziej uwydatnione, a tym samym możliwe do analizowania. Celem wykonania widma kompozytowego dla gigantycznych radiokwazarów była chęć znalezienia specyficznych cech ich aktywnych jąder galaktycznych. W pracy **H3** pokazałam, że kontinuum widmowe dla gigantycznych kwazarów jest bardziej płaskie (widma są bardziej „czerwone”) niż w przypadku mniejszych radiokwazarów, jak również innych próbek kwazarów, których kompozytowe widma były dostępne w literaturze. Bardziej „czerwone” widma mogą być skutkiem wewnętrznego poczerwienienia kwazarów na skutek ekstynkcji. Poczerwienienie jest tym większe im większy jest kąt pod jakim obserwujemy obiekt. W przypadku próbek kwazarów o rozciągniętych strukturach radiowych na wartość nachylenia kontinuum mogą mieć wpływ efekty selekcji takich obiektów. Znacznie łatwiej bowiem zidentyfikować bardzo duże radioźródło kiedy jego dżety i loby radiowe leżą w płaszczyźnie nieba (czyli częściej znajdujemy obiekty o większej wewnętrznej ekstynkcji). Zatem bardziej czerwone widma gigantycznych radiokwazarów najprawdopodobniej są związane z efektem

ich orientacji względem obserwatora. Tą tezę potwierdzają kolejne wyniki pracy **H3**. Miarą orientacji radioźródła względem obserwatora może być stosunek emisji radiowej jądra do emisji radiowej łobów (ang. core-to-lobe ratio, R). Im większa jego wartość tym bardziej dżety radiowe pokrywają się z linią widzenia. Zarówno dla próbki gigantycznych radiokwazarów, jak i kwazarów o mniejszych strukturach radiowych, widoczny jest wzrost nachylenia kontinuum widmowego wraz ze wzrostem parametru R . W pracy **H3** badane były jeszcze zależności pomiędzy nachyleniem kontinuum widmowego a mocą radiową jądra i całkowitą mocą radiową. Dla gigantycznych radiokwazarów widoczny jest wzrost nachylenia widma optycznego (bardziej niebieskie widmo) wraz ze wzrostem mocy radiowej. Z jednej strony jest to wynik zgodny z przewidywaniami teoretycznymi, w których produkcja dżetów jest ściśle związana z rotacją (spinem) czarnej dziury. Im większy spin tym więcej emisji UV z dysku i tym bardziej strome widmo optyczne. Z drugiej strony wiadomo, że gigantyczne radioźródła w swoich jądrach mają supermasywne czarne dziury o małych wartościach spinu. W dodatku niektóre modele magnetohydrodynamiczne dysków akrecyjnych (np. [21]) pokazują, że spin czarnej dziury nie musi być głównym czynnikiem odpowiedzialnym za produkcję dżetów radiowych. Stąd też otrzymana zależność pomiędzy nachyleniem widma optycznego a mocą radiową dla gigantów może mieć zupełnie inne źródło.

Zakres optyczny emisji kontinuum w AGN-ach jest małą częścią emisji kontinuum obserwowanej w całym zakresie widma elektromagnetycznego. W pracy **H3** udało mi się wykonać modelowanie widmowego rozkładu energii (ang. spectral energy distribution, SED), obejmującego zakres od dalekiego ultrafioletu po promieniowanie radiowe, jedynie dla dwóch gigantycznych radiokwazarów. W efekcie modelowania, otrzymałam podstawowe parametry centralnych AGN-ów takie jak np. jasności dysku akrecyjnego, jasności pyłu, inklinacje i in., dzięki którym możliwe jest globalne prześledzenie ich własności. Wartości parametrów otrzymane na podstawie modelowania SED są zgodne z wynikami analizy nachyleń widm w zakresie optycznym, jednak mała ilość źródeł, dla których możliwe było wykonanie modelowania SED, nie pozwoliła na wyciągnięcie wniosków odnośnie całej populacji gigantycznych radiokwazarów.

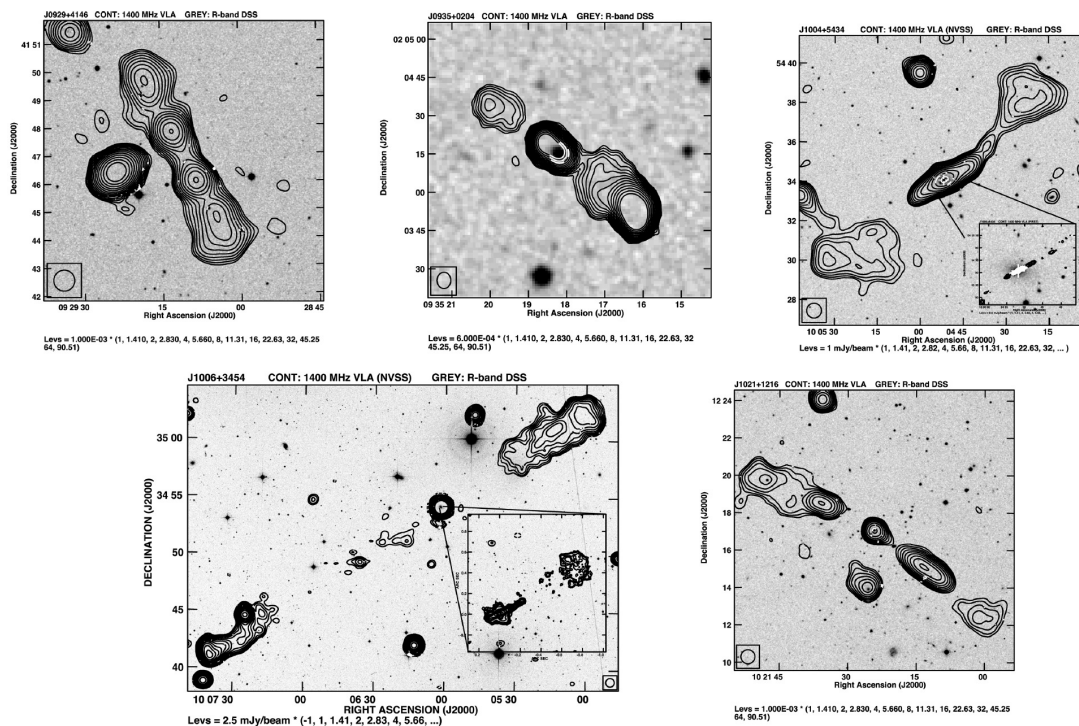
Kolejną pracą, w której zajmuję się badaniem własności gigantycznych radioźródeł, jest praca **H4**. Jej celem było zbadanie składu populacji gwiazdowych w galaktykach macierzystych gigantycznych radiogalaktyk oraz w galaktykach leżących w ich sąsiedztwie. Taka metodyka badań miała na celu sprawdzenie jaki wpływ na powstawanie wielkoskalowych

struktur radiowych ma historia formowania się ich galaktyk macierzystych, również w kontekście ewolucji w grupach czy gromadach galaktyk. Do zbadania składu populacji gwiazdowych w galaktykach wykorzystałam program STARLIGHT [22], który dopasowuje kontinuum gwiazdowe do widma galaktyki poprzez złożenie widm gwiazd o różnym wieku i metaliczności. W rezultacie otrzymujemy informację z jakich gwiazd składa się badana galaktyka. W wyniku przeprowadzonych analiz okazało się, że zarówno galaktyki macierzyste gigantów jak i galaktyki tworzące mniejsze struktury radiowe są zdominowane przez stare populacje gwiazdowe ($t^* > 10^{10}$ lat). To co jednak odróżnia galaktyki macierzyste gigantów od galaktyk ich mniejszych odpowiedników, to większa ilość populacji gwiazdowych o średnim wieku ($t^* \sim 10^9$ lat). Świadczy to o tym, że na pewnym etapie ewolucji tych galaktyk wystąpiły warunki, które spowodowały nasilenie się procesów gwiazdotwórczych. Co ciekawe, podobną tendencję widać w galaktykach znajdujących się w otoczeniu gigantycznych radiogalaktyk. Galaktyki znajdujące się w promieniu ~ 1.5 Mpc od gigantycznej radiogalaktyki również posiadają większą ilość populacji gwiazdowych o średnim wieku, w porównaniu do odpowiadających im galaktyk znajdujących się wokół mniejszych radiogalaktyk. Otrzymany wynik świadczy o tym, że mogły wystąpić globalne (w obrębie grupy galaktyk) warunki, które spowodowały powstawanie nowych gwiazd. Jak wiadomo, gwiazdy tworzą się wtedy gdy w galaktyce jest duża ilość zimnego gazu. Może on być dostarczony do galaktyki np. na skutek zlewania się galaktyk (tzw. merger galaktyk) lub w postaci strumienia zimnego gazu spadającego na galaktykę z przestrzeni międzygalaktycznej bądź też znajdującego się w filamentach wielkoskalowej struktury Wszechświata. Zimny gaz spływający do centrum galaktyki zasila również dysk akrecyjny w materię, która może być efektywnie akreowana na supermasywną czarną dziurę. Dzięki temu galaktyka może być dłużej aktywna, a co za tym idzie, może dłużej produkować dzęty radiowe. Na podstawie otrzymanych wyników można zatem wnioskować, że gigantyczne struktury radiowe powstają na skutek dłuższej aktywności centralnych galaktyk, jak również dłuższego czasu, w którym aktywne jądra produkują dzęty radiowe. Innym aspektem pracy **H4** było sprawdzenie w jaki sposób dzęty radiowe gigantycznych radiogalaktyk są usytuowane względem otaczających je galaktyk. W badaniach prowadzonych przez różnych naukowców postulowano, że gigantyczne radioźródła zawdzięczają swoje ogromne rozmiary temu, że ich dzęty radiowe rozchodzą się prostopadle do filamentów wielkoskalowej struktury Wszechświata, w kierunkach o mniejszej gęstości galaktyk. Na podstawie analizy próbki obiektów wykorzystanej w pracy **H4** można było stwierdzić, że taka

orientacja gigantycznych radioźródeł nie jest regułą. Okazało się, że w niektórych przypadkach dżety radiowe są zorientowane w kierunku gęstszych regionów o znacznej ilości pobliskich galaktyk. Świadczy to o tym, że gęstość ośrodka, rozumiana przez ilość galaktyk w jednostce objętości, może mieć jedynie drugorzędne znaczenie w powstawaniu gigantycznych struktur radiowych.

Praca **H5** poświęcona była badaniu obiektów, w których obserwuje się powtarzającą się aktywność radiową. Uwidacznia się ona poprzez obecność dwóch (lub więcej) par lobów radiowych (Rys. 4). Tak jak było to już wspomniane na początku, powtarzająca się aktywność radiowa jest rozważana jako jeden z czynników prowadzących do powstawania gigantycznych struktur radiowych, bowiem znaczna część restartujących obiektów to radioźródła gigantyczne. Z tego względu, kluczowe jest lepsze poznanie tego typu obiektów. W pracy **H5** umieściłam pierwszy katalog obiektów restartujących, zawierający zarówno znane wówczas obiekty, jak również nowo odkryte, dla których były przeprowadzone dedykowane obserwacje spektroskopowe. W próbie znalazły się 74 radioźródła restartujące, z czego 20 posiada gigantyczne struktury radiowe. Celem pracy było zbadanie własności optycznych, radiowych i podczerwonych tego typu obiektów oraz porównanie ich z własnościami obiektów, które nie wykazują wielokrotnej aktywności radiowej. W wyniku przeprowadzonych analiz można było stwierdzić, że masy czarnych dziur w restartujących galaktykach są porównywalne z masami typowych (nierestartujących) radiogalaktyk, natomiast masy gwiazdowe są mniejsze. Dodatkowo restartujące galaktyki posiadają większą ilość młodych gwiazd. Ponadto analiza indeksu koncentracji, który jest parametrem pomocnym w określeniu morfologii galaktyki, pokazała, że galaktyki restartujące mają bardziej zaburzoną morfologię. Obydwie te własności – większa ilość młodszych gwiazd oraz zaburzona morfologia – świadczą o częstszych procesach mergingu w przeszłości galaktyk restartujących. Ciekawym wynikiem było znalezienie 14 obiektów, w których wewnętrzne loby radiowe mają większą moc radiową na 1.4 GHz niż zewnętrzne loby. Jak się przypuszcza, jest to skutkiem bardziej wydajnej emisji radiowej we wczesnej fazie powstawania wewnętrznych lobów, gdy przechodzą one przez gęsty ośrodek międzygwiazdowy wewnątrz galaktyki. W oparciu o dane podczerwone z katalogu Wide-Field Infrared Survey Explorer (WISE) sprawdziłam również położenie obiektów restartujących na diagramie kolor-kolor ($3.4\ \mu\text{m}$ - $4.6\ \mu\text{m}$ vs $4.6\ \mu\text{m}$ - $12\ \mu\text{m}$). Przeważająca część z nich (67%) znajduje się w obszarze, w którym występują galaktyki spiralne. Również, dla większości badanych obiektów można

stwierdzić, że emisja w podczerwieni pochodzi od gwiazd i ośrodka międzygwiazdowego, a wkład od centralnego AGNu jest stosunkowo mały.



RYSUNEK 4. Wybrane z pracy H5 mapy radiowe obiektów z powtarzającą się aktywnością radiową.

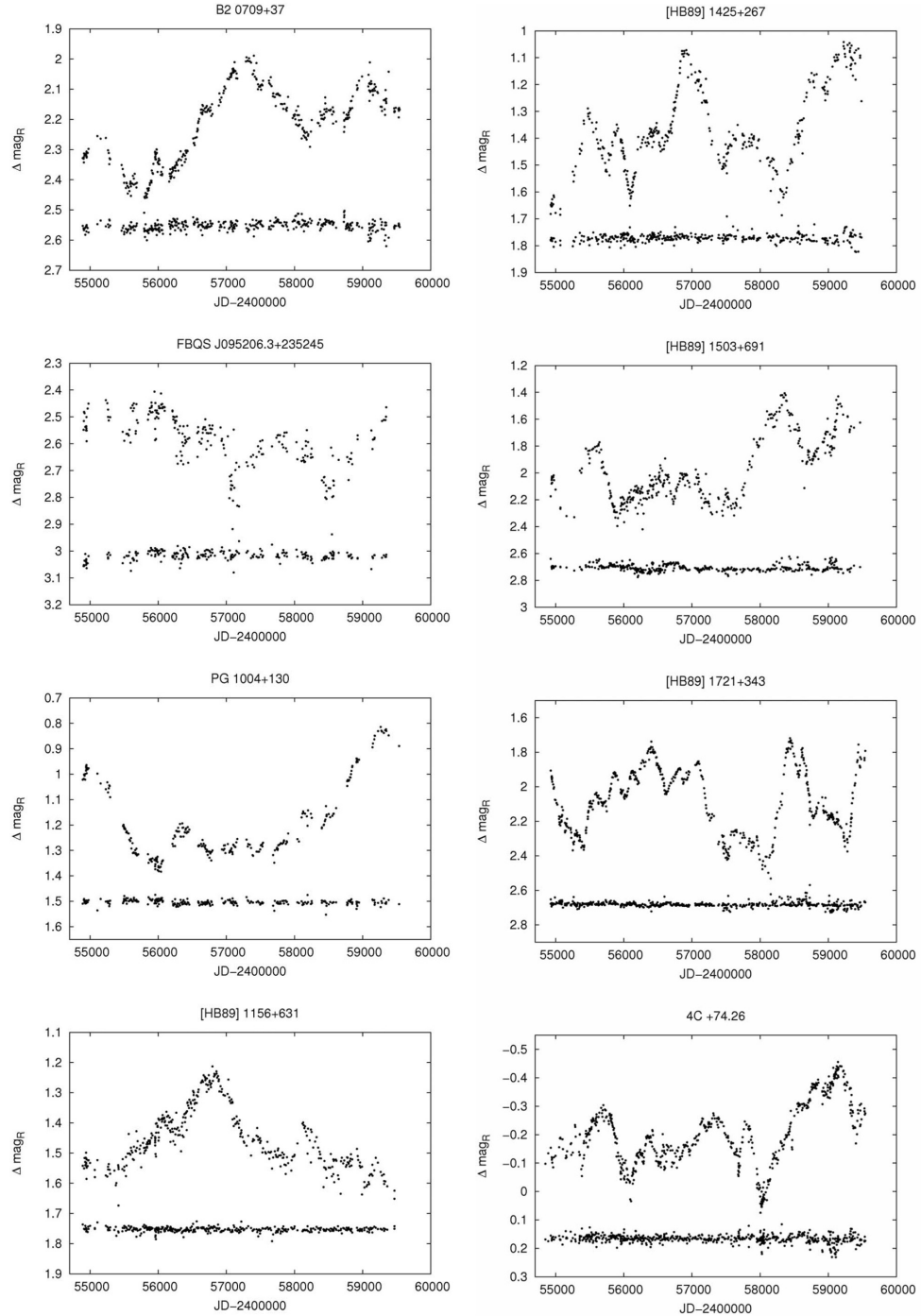
Jeszcze innym aspektem badań własności gigantycznych radioźródeł była analiza zmienności optycznej ich galaktyk macierzystych, którą przedstawiłam w pracy **H6**. W próbie obiektów, która była badana w pracy znalazło się pięć gigantycznych radiokwazarów oraz trzy radiokwazary o mniejszych rozmiarach. W wyniku obserwacji prowadzonych regularnie od roku 2009 roku udało się uzyskać unikatowe (jak na obserwacje zmienności kwazarów) krzywe zmian blasku obejmujące trzynastoletni okres monitoringu, przy średniej częstotliwości wykonywanych obserwacji 2/3 razy w miesiącu (Rys. 5.). Wszystkie z badanych kwazarów wykazują zmienności o amplitudzie od 0.44 mag do 0.97 mag w trzynastoletniej skali czasowej. Otrzymane krzywe zmian blasku posłużyły do zbadania charakterystycznych skal czasowych zmienności obserwowanych kwazarów oraz do znalezienia procesu fizycznego odpowiedzialnego za obserwowany charakter zmienności. W celu uzyskania tych informacji użyłam niezależnie dwóch statystycznych metod: tzw. analizy funkcji struktury (FS), która mierzy jak silnie zmienia się obserwowany strumień w różnych przedziałach czasowych, oraz analizy PSD (ang. power spectral density analysis), która wykorzystuje metodę dekompozycji Fouriera, gdzie krzywa zmian blasku jest reprezentowana przez kombinację sygnałów sinusoidalnych o losowych

fazach i amplitudach, które odpowiadają różnym skalom czasowym zmienności źródła. Nachylenie i kształt obydwu funkcji świadczy o charakterze zmienności. Na podstawie otrzymanych nachyleń FS oraz PSD najbardziej prawdopodobnym procesem, który mógł by być odpowiedzialny za zmienność badanych kwazarów są niestabilności dysku akrecyjnego, a charakter zmienności można opisać jako „czerwony szum” czy też proces błędzenia przypadkowego (damped random-walk process). Analizy krzywych zmian blasku również pokazały, że charakterystyczne skale czasowe zmienności tego typu obiektów są znacznie dłuższe niż dotychczasowy czas monitoringu. Mogą one sięgać kilkuset a nawet milionów lat, co przy użyciu konwencjonalnych metod obserwacyjnych pojedynczych obiektów nie jest możliwe do zrealizowania.

Ciekawym, choć nie do końca zrozumiałym, wynikiem otrzymanym w pracy jest silna antykorelacja pomiędzy rozmiarem struktur radiowych a nachyleniem funkcji PSD (współczynnik korelacji równy 0.86). Antykorelacja może wskazywać na pewien związek pomiędzy rozmiarem radioźródła a naturą zmienności, jednak opiera się ona o dane tylko ośmiu obiektów, przez co do jej potwierdzenia potrzebne są dalsze badania większej próbki obiektów.

Podsumowując opisane wyżej osiągnięcia, w swoich pracach zamieściłam 3 katalogi radiogalaktyk: ogólny katalog gigantycznych radioźródeł zidentyfikowanych przed końcem 2018 roku; katalog gigantycznych radiokwazarów, w którym 2/3 obiektów było nowo odkrytymi przeze mnie źródłami oraz pierwszy katalog radioźródeł restartujących. Dla źródeł z każdej z próbek badałam własności optyczne, radiowe oraz podczerwone. Wykonałam również szereg analiz, jak np: analizę składu populacji gwiazdowych w galaktykach macierzystych gigantycznych radiogalaktyk oraz w galaktykach z ich najbliższego otoczenia; analizę krzywych zmian blasku ośmiu radiokwazarów, modelowanie widmowego rozkładu energii dla dwóch gigantycznych radiokwazarów, analizę widma kompozytowego gigantycznych radiokwazarów, analizę położenia gigantów na płaszczyźnie EV1 i in. Tym samym moje badania są jedynym dostępnym w literaturze wielowątkowym studium m. in. nad własnościami gigantów w dziedzinie optycznej.

W wyniku powyższych analiz można stwierdzić, że własności optyczne gigantycznych radioźródeł są bardzo podobne do własności optycznych mniejszych obiektów. Znacząca różnica pomiędzy gigantami a mniejszymi radioźródłami jest jednak widoczna w składzie populacji gwiazdowych



RYSUNEK 5. Krzywe zmian jasności ośmiu gigantycznych radiokwazarów. Zmienność kwazarów została zobrazowana jako relatywna różnica jasności Δmag_R w filtrze R pomiędzy kwazarem a gwiazdą porównania o stałej jasności. W dolnej części każdego z wykresów umieszczona została Δmag_R pomiędzy gwiazdą porównania a gwiazdą kontrolną.

w ich galaktykach macierzystych. W galaktykach macierzystych gigantycznych radiogalaktyk obserwujemy większą ilość gwiazd o średnim wieku w porównaniu z galaktykami o mniejszych rozmiarach struktur radiowych. Podobna zależność jest obserwowana w galaktykach leżących w ich pobliżu.

Świadczyć to może o wystąpieniu pewnych globalnych warunków (w obrębie grupy/gromady), które spowodowały powstawanie nowych gwiazd na pewnym etapie ewolucji galaktyk. Jak było to opisane wyżej, wnioskiem płynącym z analizy populacji gwiazdowych galaktyk macierzystych gigantycznych radioźródeł jest przypuszczenie, że gigantyczne struktury radiowe powstają na skutek dłuższego trwania aktywności centralnych galaktyk, jak również dłuższego czasu, w którym aktywne jądra produkują dzęty radiowe.

Znacząca różnica pomiędzy gigantami a mniejszymi radioźródłami jest również widoczna w wartości koloru $4.6\ \mu\text{m} - 12\ \mu\text{m}$ w dziedzinie podczerwonej. Giganty mają mniejsze wartości koloru. Świadczyć to może o różnicach w budowie torusa pyłowego wokół dysku akrecyjnego, jak również o mniejszym tempie formowania gwiazd w obiektach o rozciągniętych strukturach radiowych.

Analiza widmowego rozkładu energii dla gigantycznych radiokwazarów, pokazała że jest ona bardzo wartościowym i przydatnym narzędziem do badania i zrozumienia obserwowanych własności obiektu. Tym samym, przeprowadzone badania dla dwóch radiokwazarów skłoniły mnie do zajęcia się tym zagadnieniem w szerszym zakresie. W najbliższej przyszłości chciałabym się skupić na przeprowadzeniu analizy widmowego rozkładu energii dla dużej próbki gigantycznych radioźródeł. Przeprowadzenie takiej analizy dla dużej próbki obiektów jest jednak dosyć problematyczne z uwagi na potrzebę zgromadzenia danych na różnych długościach fali dla każdego z nich. W przypadku gigantów, wieloczęstotliwościowe dane są dostępne dla niewielkiej liczby obiektów dlatego obiecujący jest fakt, że dzięki nowym przeglądom radiowym na niskich częstotliwościach (takich jak LOFAR) identyfikacja gigantów jest znacznie prostsza. Przekłada się to na coraz większą ilość zidentyfikowanych obiektów tego typu, a tym samym na możliwość skompletowania statystycznie istotnej próbki, dla której będą dostępne wieloczęstotliwościowe dane. Z tego też względu planuję dołączyć do grupy LOFAR-owej zajmującej się badaniem i poszukiwaniem gigantycznych radioźródeł. Przypuszczam, że taka współpraca przyspieszy nie tylko zaplanowane przeze mnie badania, ale również zaowocuje wieloma ciekawymi projektami w przyszłości.

Przedstawione publikacje mają znaczący wkład w poszerzenie wiedzy o gigantycznych radioźródłach, co potwierdza się sporym zainteresowaniem moimi pracami w świecie naukowym. Cztery publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego są cytowane co najmniej dziesięciokrotnie, przy czym liczba cytowań jednej z nich jest bliska 50. W dowód uznania

dla uzyskanych przeze mnie wyników, kilkakrotnie byłam zapraszana do wygłoszenia referatu na międzynarodowych konferencjach, jak również do dołączenia do zespołu edytorów czasopism w roli eksperta oraz recenzenta.

Inne osiągnięcia naukowe

Podczas mojej wieloletniej aktywności naukowej zajmowałam się również badaniem międzygwiazdowych pasm rozmytych (MPR). Do dziś nie jest wyjaśnione jakie molekuly (nośniki) są odpowiedzialne za występowanie tych pasm absorpcyjnych w widmach gwiazd poczerwienionych. Z drugiej strony liczba proponowanych MPR stale się powiększa, sięgając obecnie kilkuset. Wśród MPR występuje wiele bardzo słabych struktur, co do których istnieje duże ryzyko, iż mogły one zostać błędnie sklasyfikowane jako struktury pochodzenia międzygwiazdowego. Moje analizy miały na celu sprawdzenie, czy któreś z tych słabych struktur nie mają pochodzenia telurycznego. W moich badaniach miałam do dyspozycji widma echelle paru gwiazd, w kierunku których obserwuje się MPR. Poprzez odpowiednie analizy oraz porównanie widma gwiazdy z laboratoryjnymi widmami jakie dają podstawowe molekuly znajdujące się w atmosferze ziemskiej (tj. H_2O , O_2 , CO_2 , CO) wiele linii absorpcyjnych uważanych dotychczas za MPR zakwalifikowałam jako teluryczne. Drugim aspektem badań nad MPR była próba wyodrębnienia tak zwanych rodzin spektroskopowych, czyli linii międzygwiazdowych pochodzących od tego samego nośnika. Wstępne wyniki zostały opublikowane jako przyczynki pokonferencyjne: [23]; *Interstellar spectral features and telluric absorption lines* oraz [24]; *Search for Spectroscopic Families Among Diffuse Interstellar Bands*. Publikacja w recenzowanym czasopiśmie jest na etapie przygotowań.

Kolejnym osiągnięciem było zaproponowanie kandydata na najdalsze znane gigantyczne radioźródło. Jest nim gigantyczny radiokwazar J1145-0033 o przesunięciu ku czerwieni $z = 2.055$. Praca dotycząca obiektu została opublikowana w 2011 roku. Przez wiele lat uważano, że gigantyczne radioźródła nie mogą występować na przesunięciach ku czerwieni większych od $z = 1$ gdyż na $z > 1$ gęstość ośrodka jest na tyle duża, że zatrzymuje ekspansję dżetów radiowych. Dzięki obserwacjom radiowym na coraz niższych częstotliwościach możliwe jest poszukiwanie coraz dalszych radioźródeł. W szczególności dalekie gigantyczne radioźródła są bardzo interesującymi obiektami z uwagi na możliwość badania ewolucji ośrodka międzygalaktycznego. Radioźródło J1145-0033 jest bardzo szczególnym obiektem. Oprócz tego, że jest gigantem o rozmiarze $D = 1.34$ Mpc, w jego

widmie optycznym występują wysoko zjonizowane szerokie linie absorpcyjne będące najprawdopodobniej wynikiem bardzo szybkiego wypływu gazu podczas procesów akrecji materii na czarną dziurę. Radiokwazar J1145-0033 został zaproponowany tylko jako kandydat na najdalsze gigantyczne radioźródło gdyż jego struktura radiowa na częstotliwości 1.4 GHz nie do końca jest wyraźna (połączenia jądra radiowego z gorącymi plamami są zaledwie na poziomie 3σ). Po opublikowaniu pracy aplikowałam o czas obserwacyjny na EVLA na niższej częstotliwości w celu potwierdzenia czy obserwowana struktura radiowa przedstawia jeden obiekt czy też jest wynikiem przypadkowego ułożenia w jednej linii trzech źródeł punktowych. Obserwacje zostały wykonane, jednak jak do tej pory otrzymane dane nie dały jednoznacznych wyników. Obecnie, dzięki pracy **H2** znane jest osiem gigantycznych kwazarów o przesunięciach ku czerwieni $z > 2$.

Literatura

- [1] Urry i Padovani, 1995, PASP, 107, 803
- [2] Kellermann i in. 1989, AJ, 98, 119
- [3] Scheuer, 1974, MNRAS, 166, 513
- [4] Shimwell i in. 2022, A&A, 659, 1
- [5] Schoenmakers i in. 2000, A&AS, 146, 293
- [6] Lara i in. 2000, A&A, 356, 63
- [7] Subrahmanyan i in. 2008, ApJ, 677, 63
- [8] Mack i in. 1998, A&A, 329, 431
- [9] Komberg i Pashchenko, 2009, Astronomy Reports, 53, 1086
- [10] Dabhade i in. 2020, A&A, 635, A5
- [11] Kuźmich i in. 2021, ApJS, 253, 25
- [12] Machalski i in. 2009, MNRAS, 395, 812
- [13] Machalski i in. 2021, ApJS, 255, 22
- [14] Dabhade i in. 2020, A&A, 642, A153
- [15] Kuźmich i Jamrozy, 2012, MNRAS, 426, 851
- [16] Mahato i in. 2022, A&A, 660, A59
- [17] Condon i in. 1998, AJ, 115, 1693
- [18] Becker i in. 1995, ApJ, 450, 559
- [19] Mao i in. 2017, ApJ, 835, 161
- [20] Albareti i in. 2017, ApJS, 233, 25
- [21] Mościbrodzka i in. 2016, A&A, 596, 13
- [22] Cid Fernandes i in. 2005, MNRAS, 358, 363
- [23] Kuźmich i Wszolek, 2012, AASP, 2, 34
- [24] Wszolek i Kuźmich, 2010, OAP, 23, 152



Dr hab. Agnieszka Kuźmicz z Prof. Markiem Jamrozem.
(fot. A. Kołodziejczyk)

* * *

Laudacja

Marek Jamrozy

Obserwatorium Astronomiczne, Uniwersytet Jagielloński

Magnificencjo Rektorze,
Dziekani,
Pani Doktor,
Dostojni Goście,
Panie i Panowie!

Kraków 13 czerwca 2024r.

Jest dziś dla mnie zaszczytem pełnienie roli laudatora wobec Pani doktor Agnieszki Kuźmicz, której Rada Dyscypliny Astronomia Uniwersytetu Jagiellońskiego, uchwałą z dnia 14 marca 2024 roku nadała jednomyślnie stopień doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych,

w dyscyplinie astronomia. Dwa tygodnie wcześniej, 28 lutego bieżącego roku Komisja habilitacyjna pod przewodnictwem prof. Piotra Życkiego z Centrum Astronomicznego im. Mikołaja Kopernika PAN w Warszawie, również jednomyślnie, wyraziła pozytywną opinię w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego za osiągnięcie naukowe, na które składa się 6 publikacji pod tytułem: „Badanie własności gigantycznych radioźródeł oraz ich galaktyk macierzystych”.

Gigantyczne radiogalaktyki to największe pojedyncze obiekty we Wszechświecie. Osiągają rozmiary nawet 5 Mpc. Znamy je, intensywnie badamy od lat 70-tych minionego stulecia i właściwie do dziś szukamy odpowiedzi na pytanie: co jest przyczyną ich gigantyczności? Pani Kuźmich zajmowała się poszukiwaniem charakterystycznych własności, odróżniających owe kolosy od zwykłych, standardowych radioźródeł.

Jedna z jej publikacji pt. „An Updated Catalog of Giant Radio Sources”, zawierająca katalog liczący aż 350 gigantów, opublikowana została w 2018 r., w ApJS (200 pkt. ministerialnych) posiada już 51 cytowań. Lektura i opublikowane w tej pracy wyniki – niczym w soczewce – uwidaczniają najlepsze cechy każdego naukowego charakteru, a także osobowości Pani Kuźmich, tj. jej nieprzeciętną pracowitość, inteligencję, samodzielność, dociekliwość i determinację.

Prócz wymienionych wyżej zagadnień dotyczących astrofizyki pozagalaktycznej Pani Kuźmich zajmowała się również badaniami ośrodka międzygwiazdowego w naszej Galaktyce, a w szczególności badaniem międzygwiazdowych pasm rozmytych (ang. DIB). Pomimo odkrycia w optyce, podczerwieni i ultrafiolecie już około 500 DIBów – od 102 lat (odkrywczyni Mary Lea Heger 1922 r.) – nie jest jasne jakie molekuly są odpowiedzialne za występowanie tych struktur.

Pragnę w tym miejscu dodać, że Pani Kuźmich była również pomysłodawcą oraz zrealizowała wiele ciekawych projektów obserwacyjnych. Jeden z nich, dotyczył 13-letniego badania zmienności optycznej ośmiu radiokwazarów. Praca została opublikowana w ApJS w 2023 r. (za 200 pkt.).

Ponadto, doktor habilitowana A. Kuźmich wielokrotnie (~ 14) w drodze konkursu otrzymywała czas obserwacyjny na największych teleskopach optycznych i radiowych na świecie. Były to m.in.: SALT, Subaru, Calar Alto-3.5m, GMRT, VLA oraz LOFAR. Swoje badania Pani Kuźmich prowadziła w ramach kilku grantów Narodowego Centrum Nauki, m.in. kierowała grantami PRELUDIUM i FUGA.

Główna bohaterka mojej wypowiedzi była współorganizatorem 19 fachowych konferencji o zasięgu krajowym oraz międzynarodowym.

Pani Kuźmicz jest cenionym dydaktykiem. Prowadzi zajęcia w Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Jagiellońskiego, m. in. z „Podstaw astronomii”, „Współczesnych metod obserwacji w astrofizyce”. Jest współautorem podręcznika akademickiego „Elementy astronomii dla geografów” (2009). Obecnie jest również promotorem pomocniczym pracy doktorskiej mgr Sagara Sethi.

Muszę jeszcze dodać, że Pani Agnieszka to osoba dynamiczna, chętnie angażująca się w różnego rodzaju przedsięwzięcia o charakterze popularyzatorskim: wygłasza prelekcje, prowadzi warsztaty, konkursy, działa w Stowarzyszeniu Astronomia Nova, jest autorką licznych publikacji popularno-naukowych (44 artykuły). Otrzymała 4 granty ministerialne na działalność upowszechniającą naukę. Była i jest redaktorem szeregu periodyków astronomicznych, np. „Częstochowskiego Kalendarza Astronomicznego” (2013-2019), „Annales Astronomiae Novae” (2020-2024) oraz wielu wydań okolicznościowych, np. „Człowiek i Wszechświat” (2011), „Kazimierz Kordylewski jako człowiek i astronom” (2020), „Towards Mysteries of the Cosmos with Johannes Kepler on the 450th Anniversary of His Birth” (2022).

Dziś, z czego bardzo się cieszymy, Pani dr hab. Agnieszka Kuźmicz jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym w OAUI.

A teraz tylko tytułem przypomnienia: Pani Agnieszka Kuźmicz w 2008 roku otrzymała tytuł magistra astronomii na Wydziale FAIS UJ. 6 lat później w 2014 roku uzyskała stopień doktora nauk fizycznych w zakresie astronomii. W latach 2016-2019 odbyła staż podoktorski w Centrum Fizyki Teoretycznej PAN w Warszawie.

Pani Kuźmicz jest żoną pana Artura oraz mamą: Michała i Rafała. Pani Agnieszka zd. Wszółek urodziła się w Jabłonce jako druga córka, z trojga dzieci Magdaleny i Bogdana – wykształconych astronomów, którzy zapewne zarazili ją swoją pasją i dziś – o czym jestem głęboko przekonany – są bardzo dumni z osiągnięć córki. Serdecznie Państwu gratuluję. Pani doktor habilitowana wraz z Rodzicami prowadzi – również z sukcesami – Obserwatorium Astronomiczne Królowej Jadwigi w Rzepienniku Biskupim.

Szanowna Pani Agnieszko – w tym wyjątkowym dla Pani i nas tu zebranych dniu – proszę przyjąć moje najserdeczniejsze gratulacje!



Od lewej: Prof. Krzysztof Chyży, Prof. Marek Jamroz, Rafał Kuźmicz, Artur Kuźmicz, Dr hab. Agnieszka Kuźmicz, Dr Agata Kołodziejczyk, Michał Kuźmicz, Prof. Stanisław Zoła, Prof. Agnieszka Pollo, Prof. Marian Soida, Dr Bogdan Wszolek.
(*fot. M. Wszolek*)

ISSN 2719-3616