

Andrzej Kułak

Nikola Tesla - samotny pionier badań pól ELF



Dwerniczek - 2008

**(w niewielkim stopniu zmieniona wersja wykładu wygłoszonego w Warszawie
21 listopada 2007 na konferencji Stowarzyszenia Elektryków Polskich)**

Tło historyczne odkryć pól ELF - powstawanie energetyki AC

1882 - N. Tesla - koncepcja wirującego pola magnetycznego

1881 - transformator rezonansowy Tesli

1882 - pierwszy silnik indukcyjny AC

1887 - początek współpracy z G. Westinghase

1887 - początek „wojny prądów DC z AC”

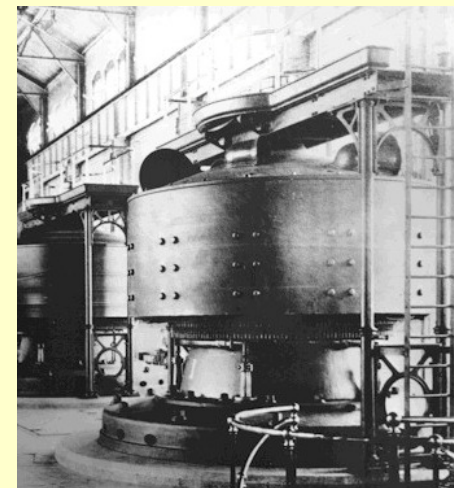
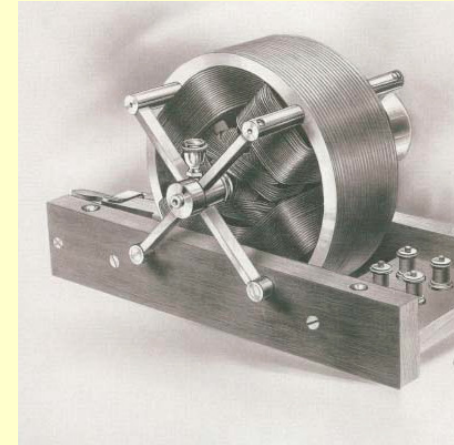
1889 - koncepcja transmisji energii AC na duże odległości

1890 - T. Edison - krzesło elektryczne AC

1893 - N. Tesla - pokaz prądu trójfazowego w Chicago

1895 - otwarcie elektrowni Niagara - 25 Hz / 200 kW

2005 - wyłączenie ostatniej instalacji DC na Manhattanie



Tło historyczne badań pól - powstanie radiotechniki

1861 - J. C. Maxwell - koncepcja prądu przesunięcia

1864 - J. C. Maxwell - teoria pola elektromagnetycznego

1879 - D. E. Huges - przypadkowe odkrycie fal EM

1879 - H. L. Helmholtz - konkurs na prąd przesunięcia

1887 - H. R. Hertz - pierwszy eksperyment EM - 10 m

1892 - O. Lodge - zastosowanie koherera - 80 m

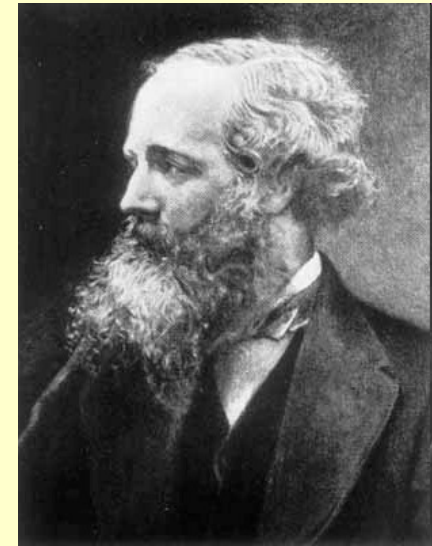
1893 - N. Tesla - pokaz łączności w Filadelfii

1895 - A. Popow - odbiornik trzasków burzowych

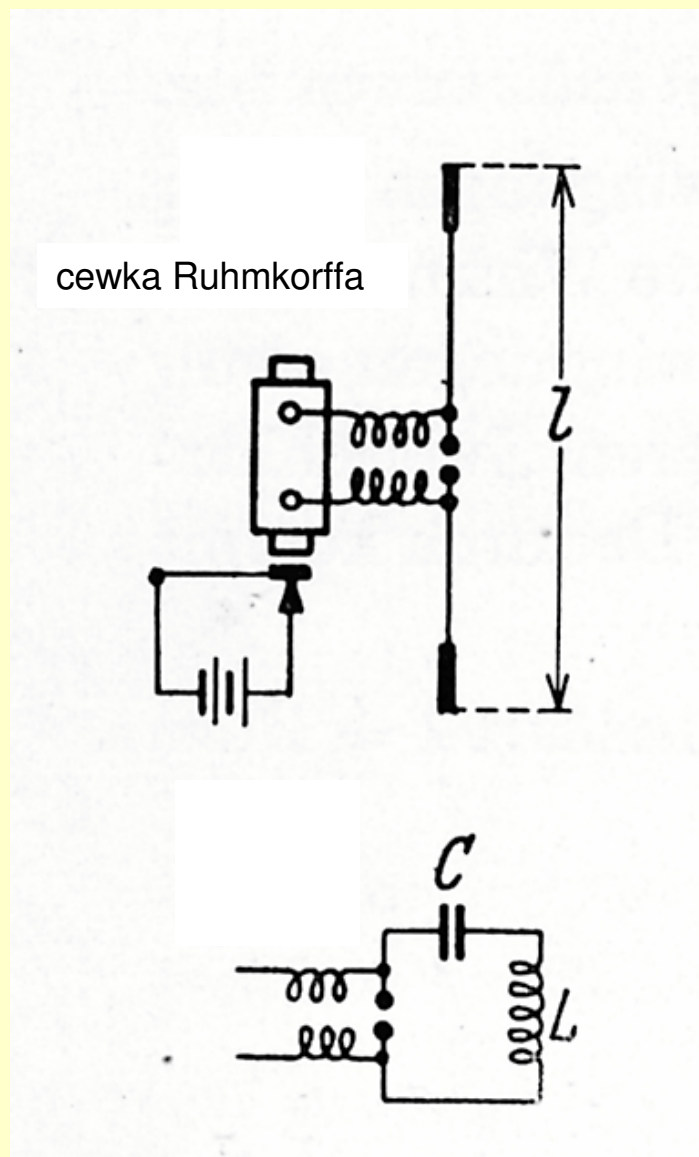
- G. Marconi - łączność radiowa - 1 800 m

1896 - A. Popow - publiczny pokaz 250 m - Petersburg

- G. Marconi - publiczny pokaz 1000 m - Londyn

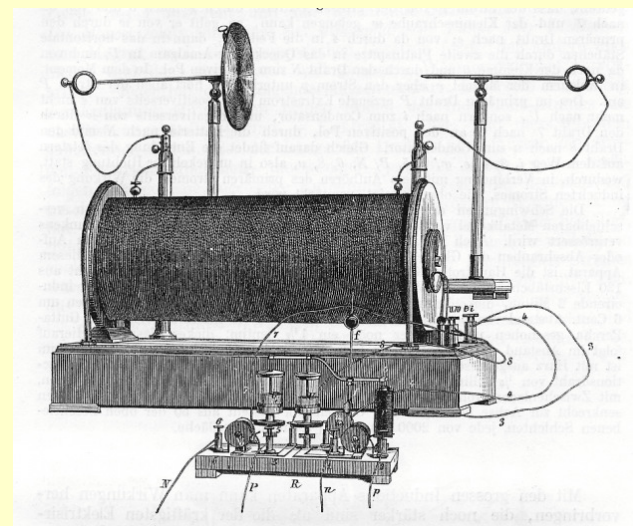


Eksperymenty H. Hertza - 1887 - 1888



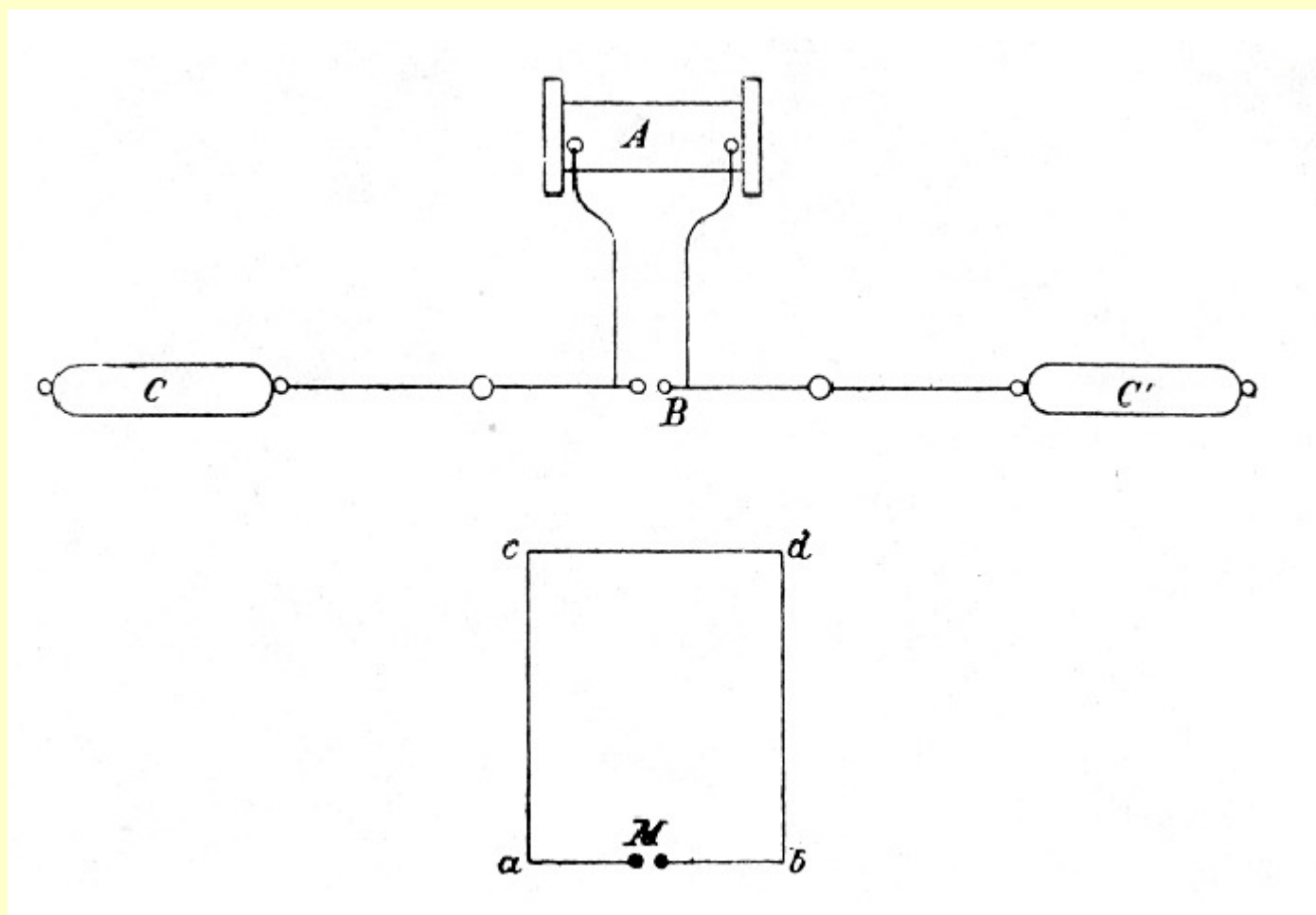
**Hertz opracował
układ
będący podstawą dalszych
eksperymentów**

cewka Ruhmkorffa (1850)

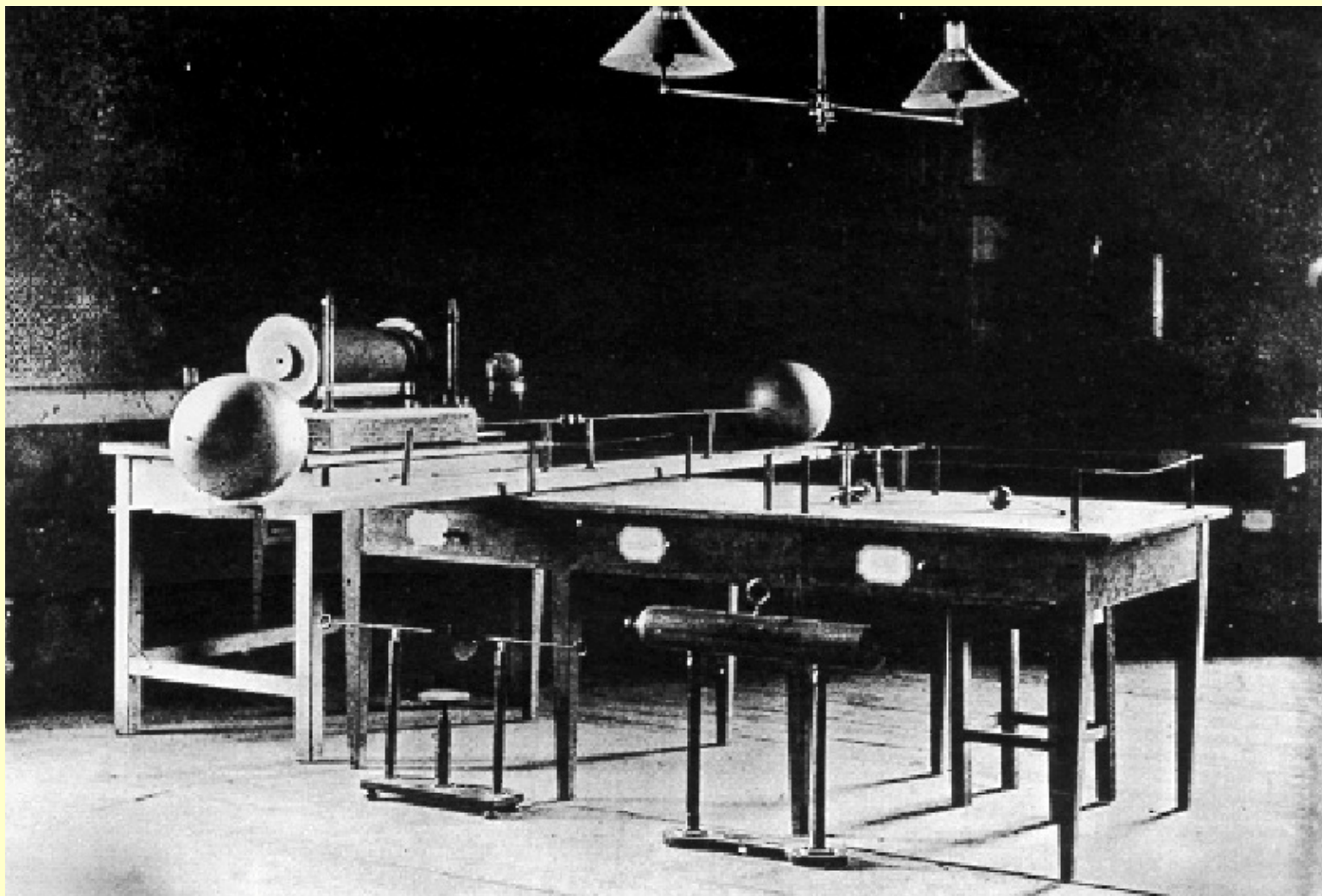


Eksperyment Hertza - 1887

$$f \approx 50 \text{ MHz}, l = 10 \text{ m}$$



Eksperyment Hertza - 1887



laboratorium Uniwersytetu w Karlsruhe

H. Hertz - strefy pola EM wokół anteny - 1887

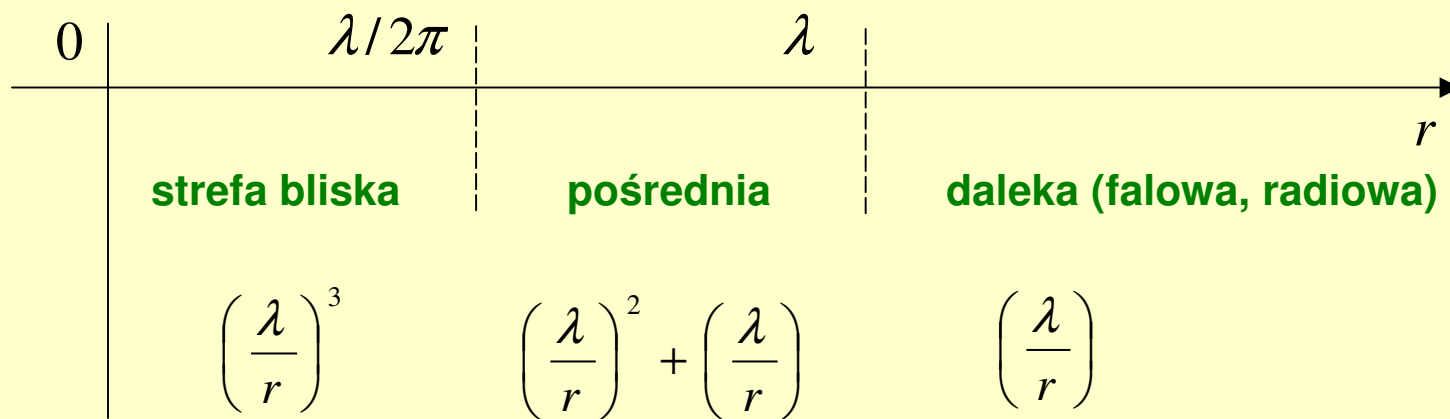
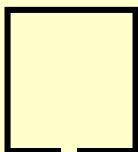
dipol elektryczny



$$E \propto \left(\frac{\lambda}{r}\right)^3 + \left(\frac{\lambda}{r}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{r}\right)$$

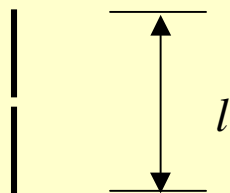
$$H \propto \left(\frac{\lambda}{r}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{r}\right)$$

dipol magnetyczny



H. Hertz - anteny rezonansowe - 1887

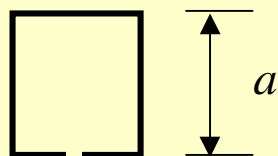
dipol elektryczny



$$l = \frac{\lambda}{2}$$

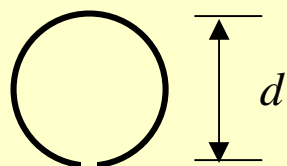
dipol półfalowy

dipol magnetyczny



$$l = 4 \cdot a = \lambda$$

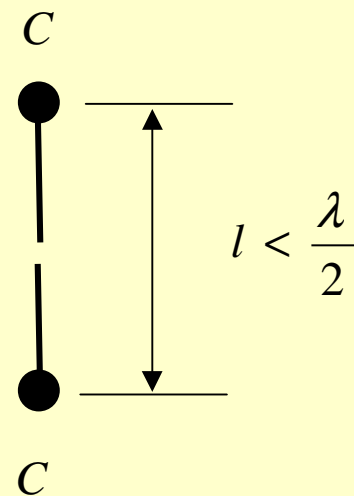
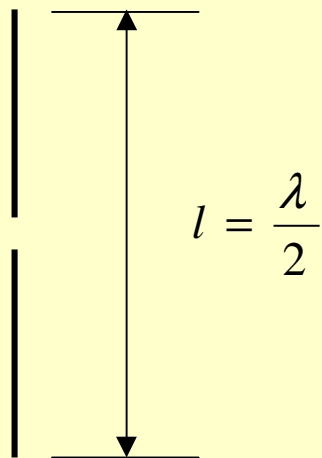
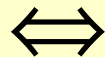
rezonansowa antena pętlowa



$$l = \pi \cdot d = \lambda$$

H. Hertz - skracanie anten - 1887

rezonansowe anteny równoważne

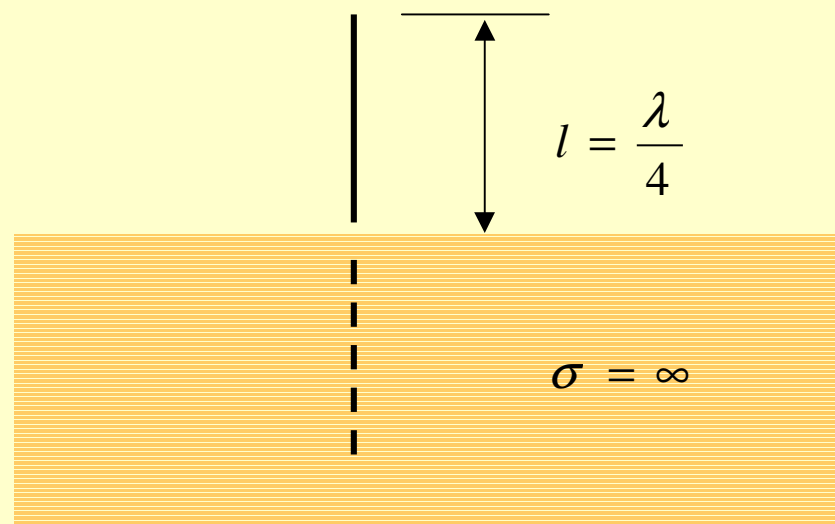
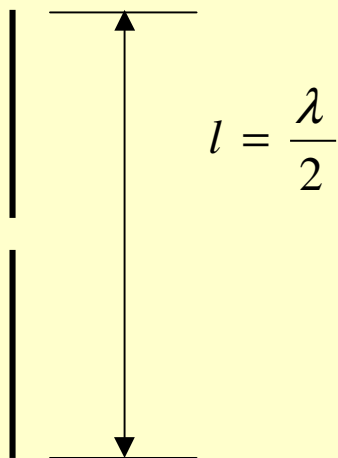


M. Abraham, A. E. Blondel - teoria uziemienia - 1898

1893 - N. Tesla

1895 - G. Marconi

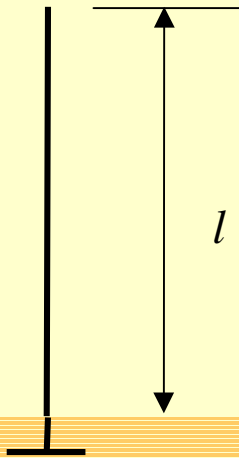
} odkrycie uziemienia



rezonansowe anteny równoważne

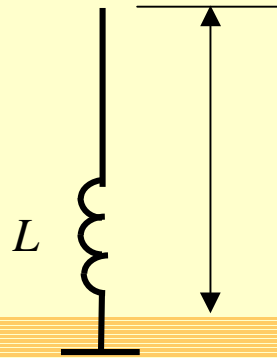
O. Lodge - cewka skracająca - 1894

$$l = \frac{\lambda}{4}$$



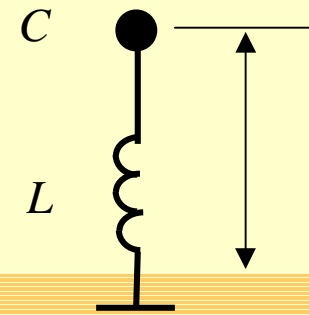
Abraham

$$l < \frac{\lambda}{4}$$



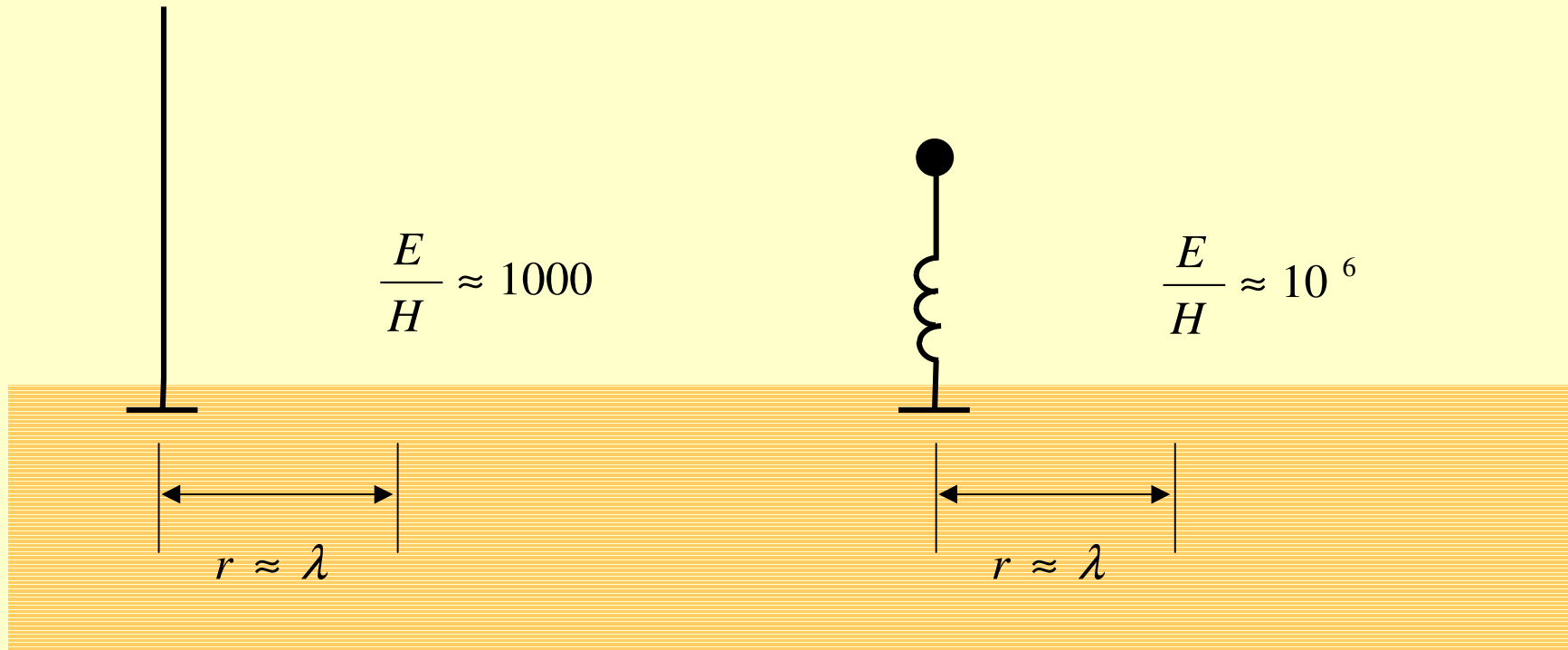
Abraham + Lodge

$$l < \frac{\lambda}{4}$$



Abraham + Lodge + Hertz

Własności anten krótkich



antena „zimna”

duża sprawność energetyczna

duża efektywność w strefie falowej

antena „gorąca”

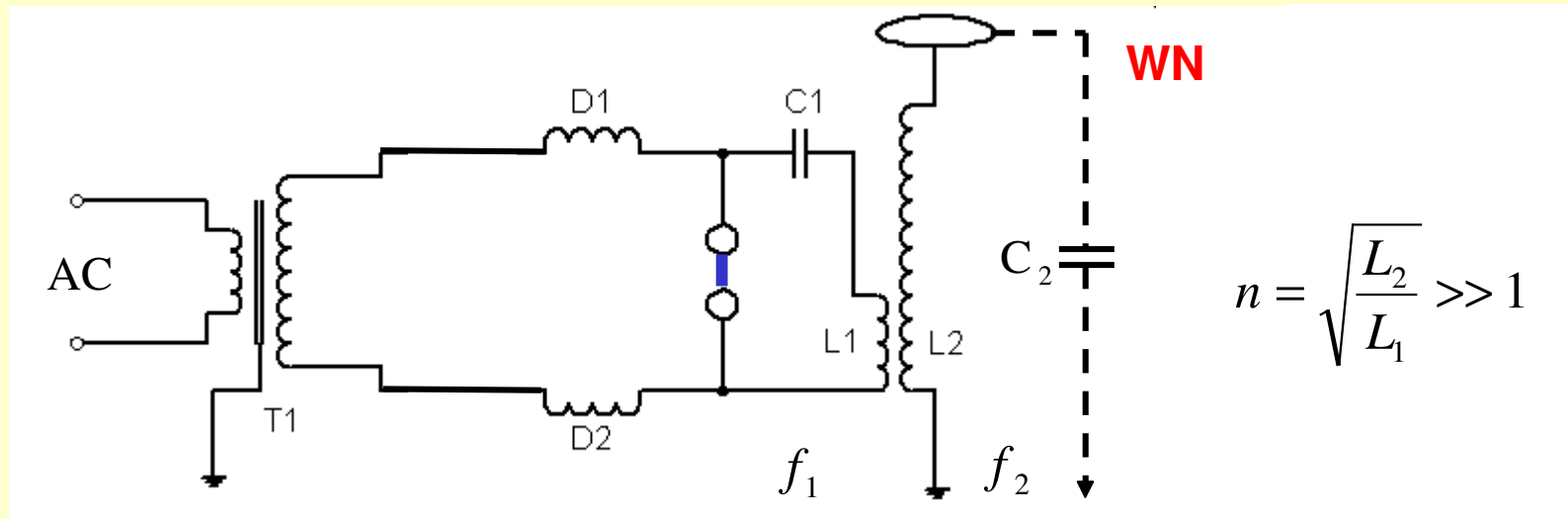
mała sprawność energetyczna

mała efektywność w strefie falowej

Eksperymenty N. Tesli - transformator rezonansowy - 1890

1 stopień transformacji napięć

2 stopień transformacji napięć (rezonansowy)



obwód pierwotny

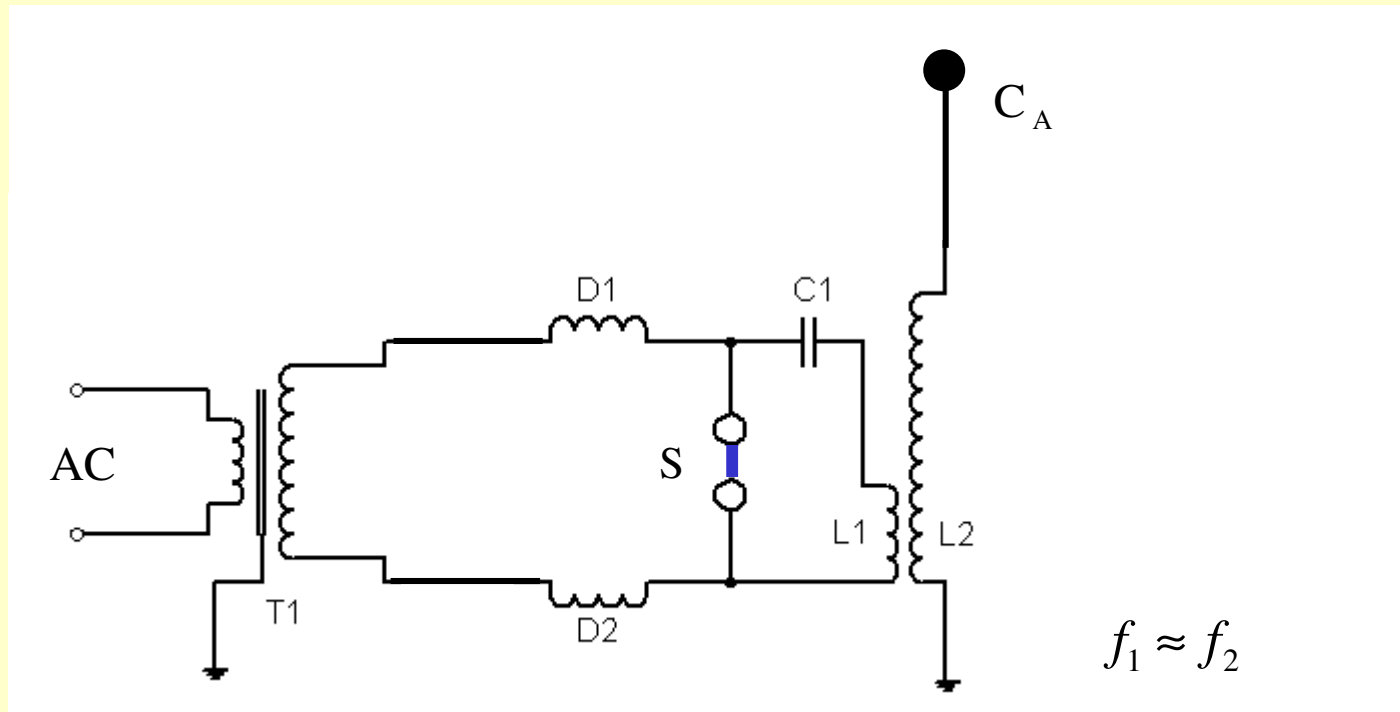
obwód wtórny

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}}$$

cewka Ruhmkorffa
zostaje zastąpiona
transformatorem AC

zostaje dodany
wtórny obwód
rezonansowy

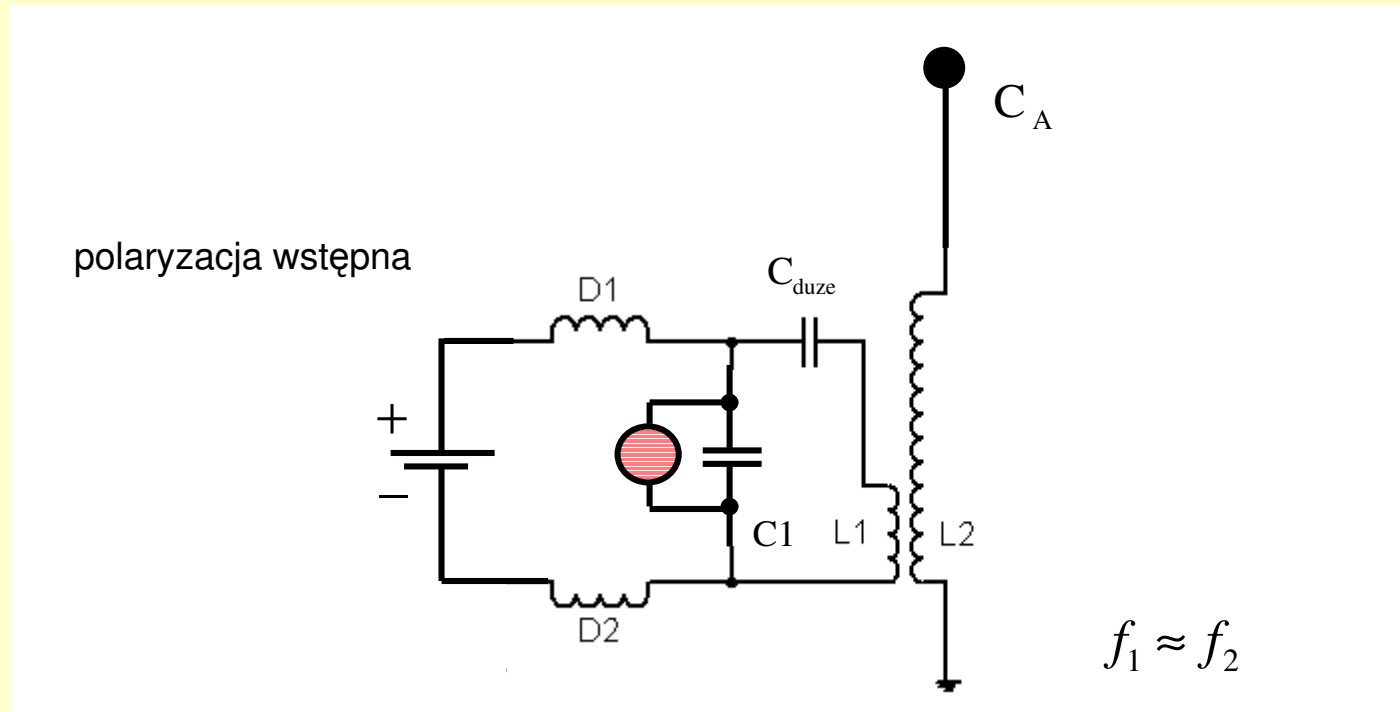
Nadajnik radiowy N. Tesli - 1893



zalety: niskie częstotliwości nadawania (100 kHz - 1MHz)
 krótka antena rezonansowa o dużej impedancji
 w strefie bliskiej $E \gg H$, silne pola w odległościach $r < \lambda$

wady: mała sprawność energetyczna
 układ wytwarza pola a nie fale, słabe wyniki w strefie dalekiej

Odbiornik radiowy N. Tesli - 1893



zalety:

- antena czuła na składową E
- łatwy odbiór w odległościach $r < \lambda$
- duża selektywność
- łatwy odbiór telegrafii

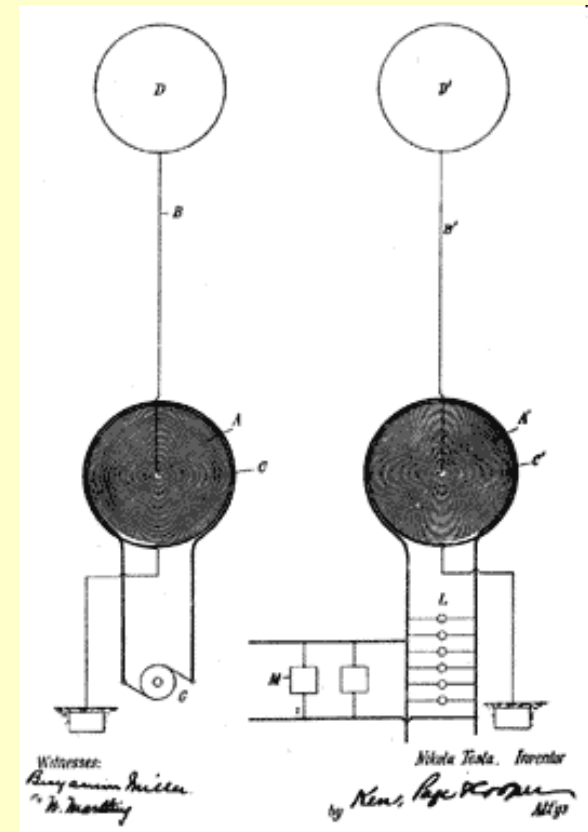
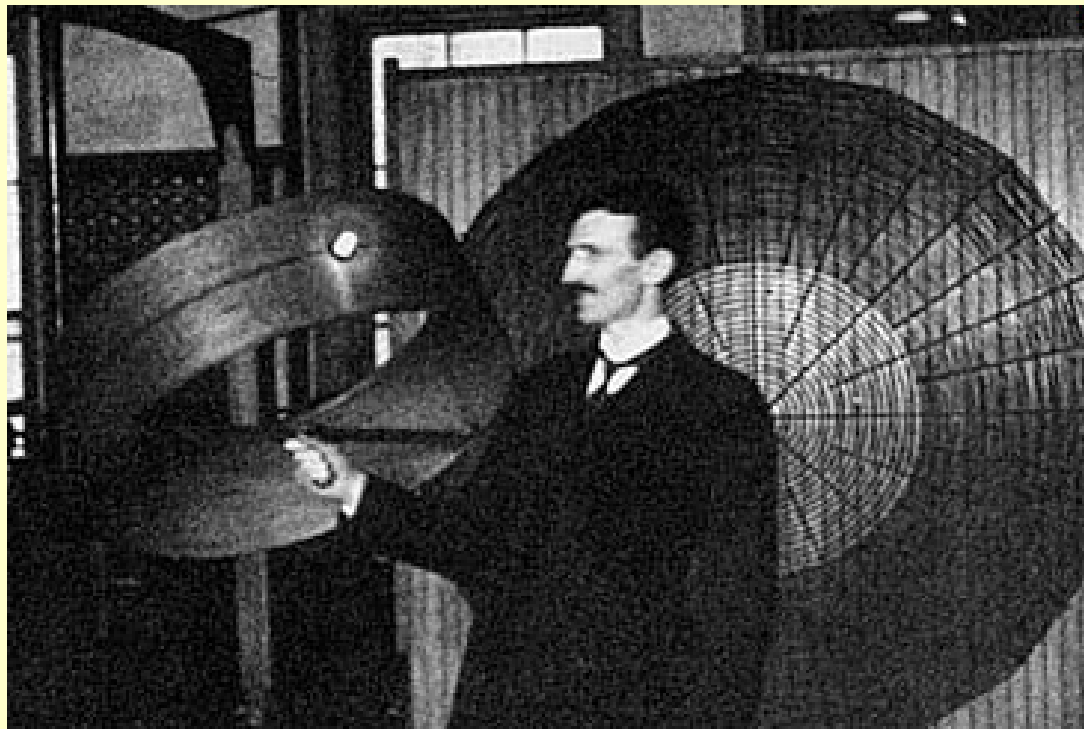
wady:

- mała czułość detektora

Publiczne pokazy radiowe Tesli

1893 - Franklin Institute - Filadelfia

1899 - Houston Street Laboratory

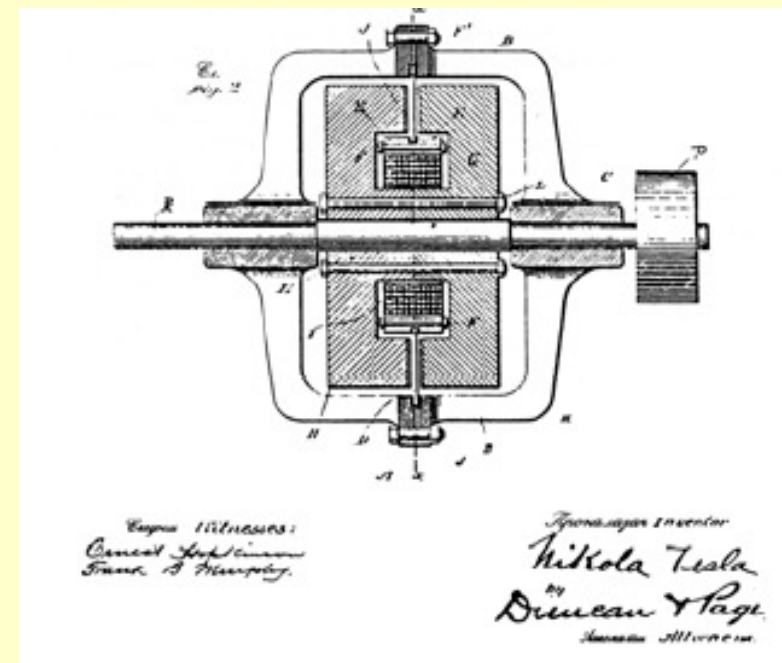
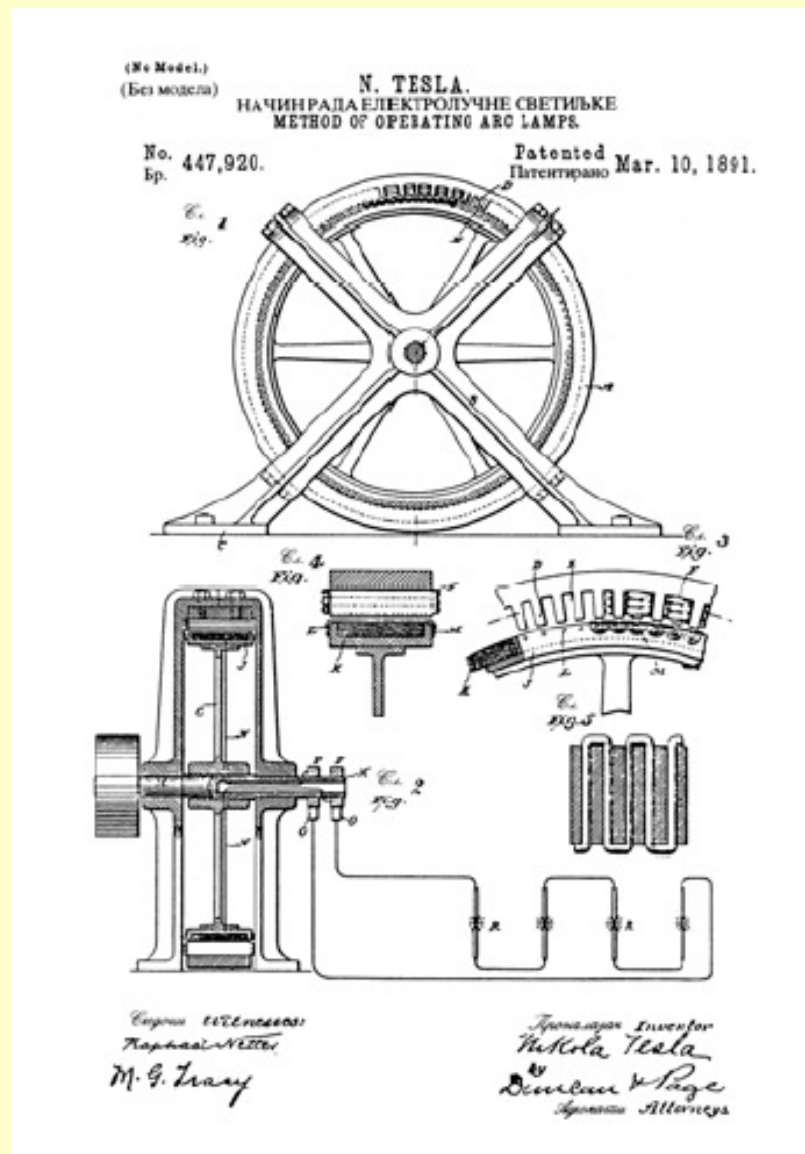


1900 - US patent 555 190

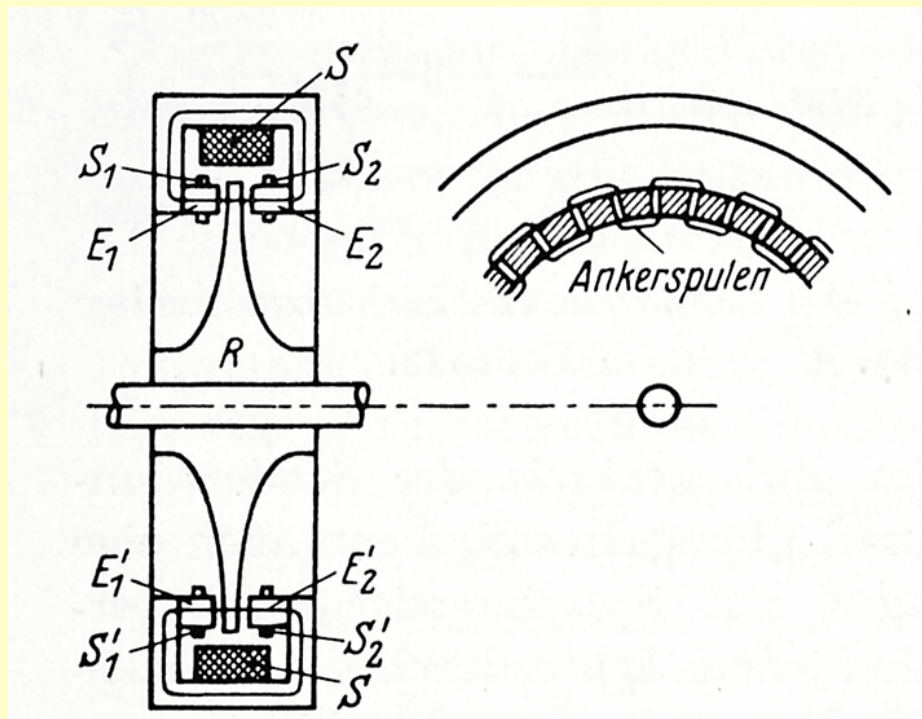
Inne patenty radiowe N. Tesli

1891 - US patent 447 920

prądnicą 400 polowa - 15 kHz



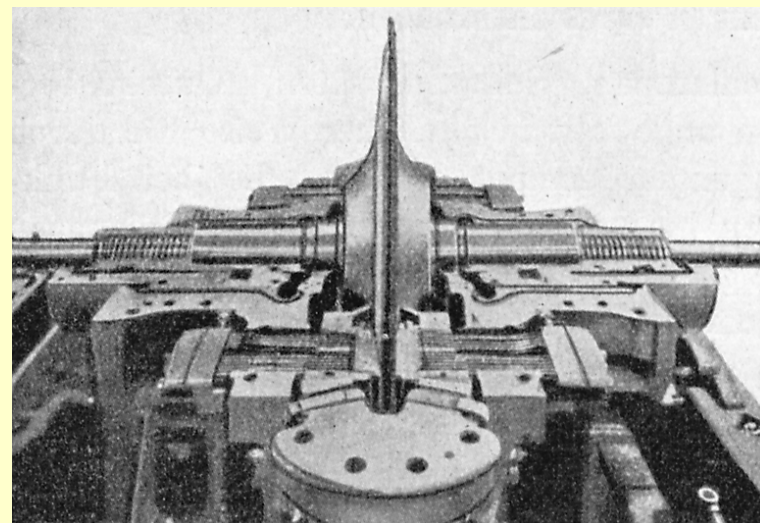
Rozwój prądnic w. cz.



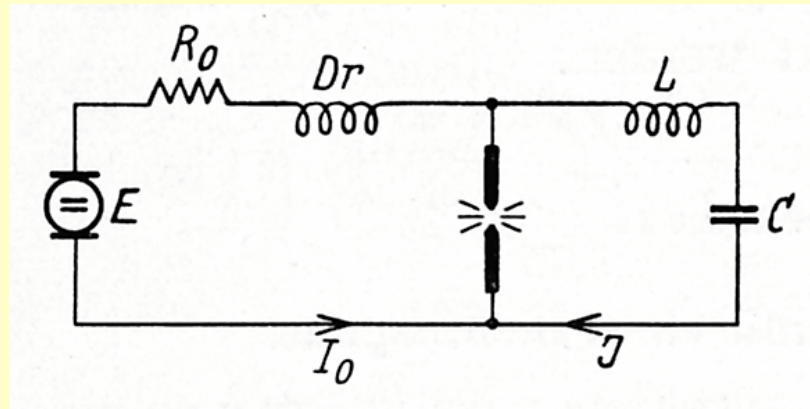
1899 - N. Tesla - 30 kHz

Dwerniczek - 2008

1915 - Aleksanderson - 200 kW



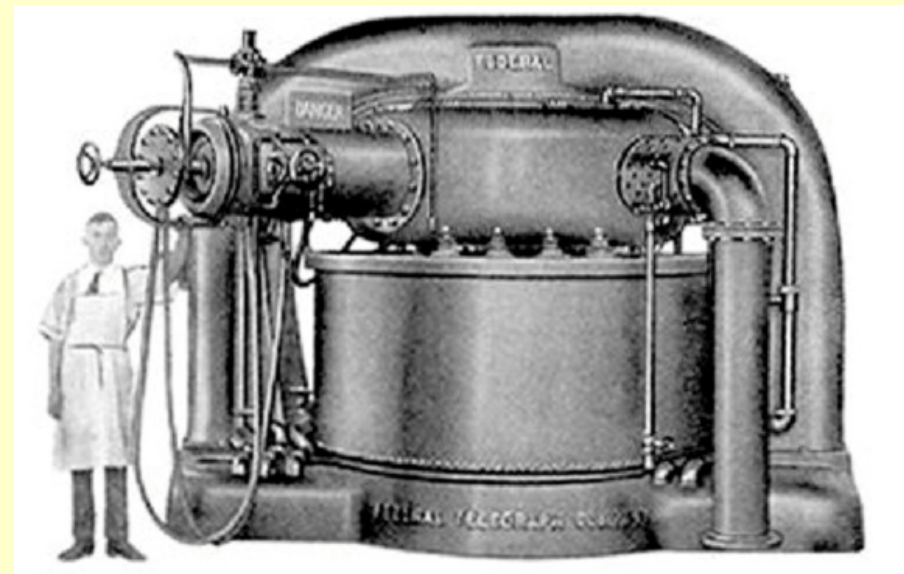
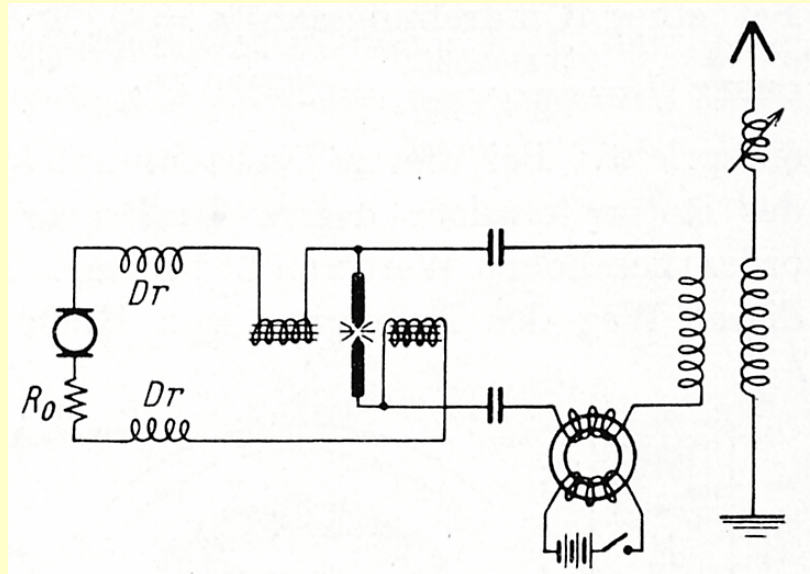
Inne rozwiązania nadawcze epoki - łuk z ujemną opornością różniczkową



1900 - W. Dündel - ujemna oporność łuku

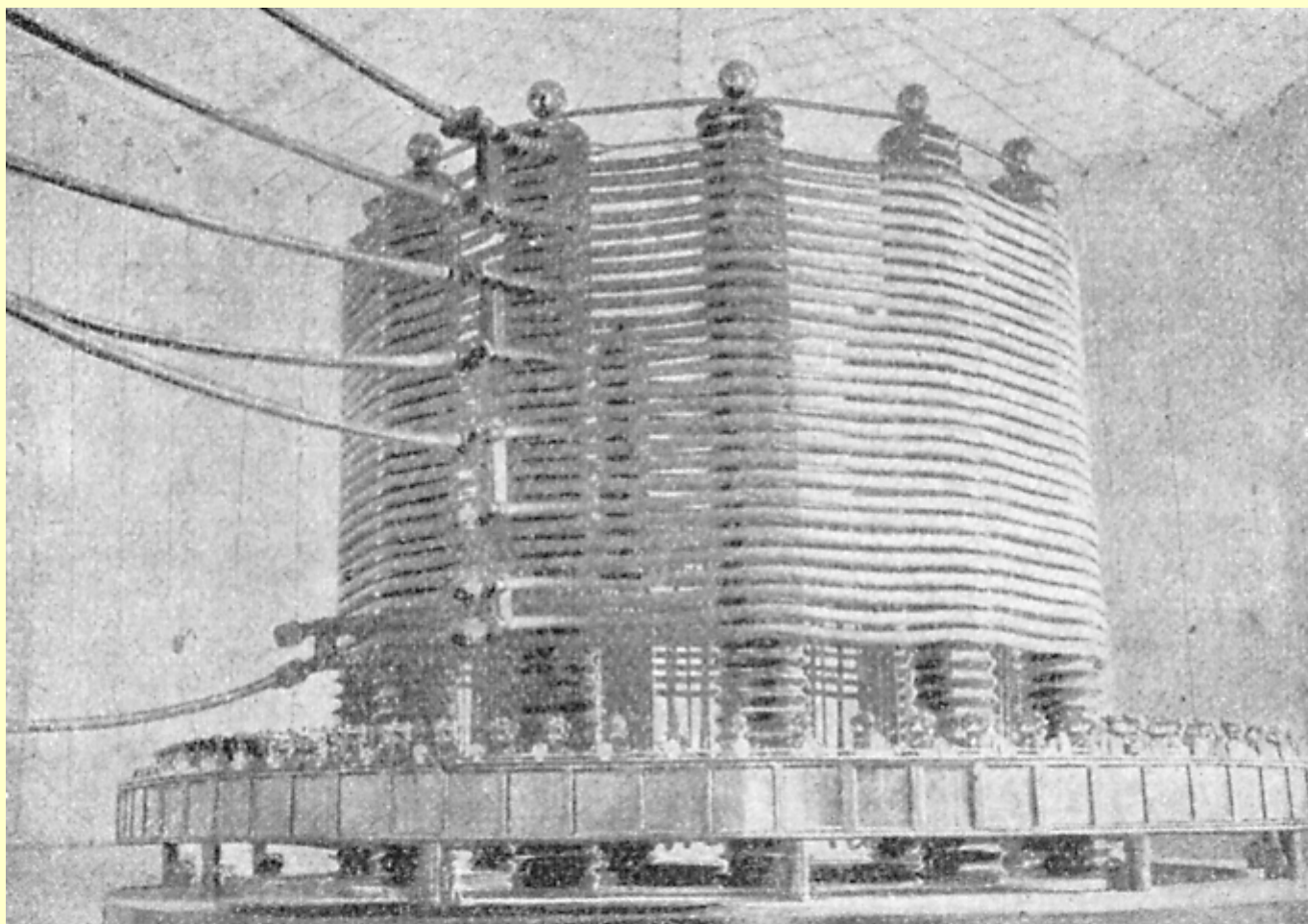
1903 - V. Poulsen - nadajnik użytkowy

1910 - 2.5 MW



Wczesne układy nadawcze - nadajniki Poulsena

1910 - cewka antenowa nadajnika LF wielkiej mocy



Ważniejsze artykuły N. Tesli na tematy radiowe

Phenomena of Alternating Currents of Very High Frequency,

Electrical World, Feb. 21, 1891

**Experiments with Alternate Currents of Very High Frequency and Their
Application to Methods of Artificial Illumination,**

AIEE, Columbia College, N.Y., May 20, 1891

Experiments with Alternate Currents of High Potential and High Frequency,

IEE Address, London, February 1892

On the Dissipation of the Electrical Energy of the Hertz Resonator,

Electrical Engineer, Dec. 21, 1892

World System of Wireless Transmission of Energy,

Telegraph and Telegraph Age, October 16, 1927

Eksperymenty radiowe Tesli - wnioski

rozwiązania Tesli:

1891 - 1899

umiejętne wykorzystanie zjawisk rezonansowych

gorące anteny - rozwiązania działające poprawnie w strefie bliskiej

możliwość generacji i odbioru fal długich i bardzo długich

docenienie roli uziemienia

brak koncepcji budowy czułych detektorów

zamiast „techniki słabych prądów” - „podejście energetyczne”

alternatywne rozwiązania:

1892 - O. Lodge - zastosowanie koherera - 300 MHz / 80 m

1895 - G. Marconi - udoskonalenie koherera - 50 MHz / 1800 m

1901 - G. Marconi - udoskonalenie anten - 25 kW / 800 kHz / 3 500 km

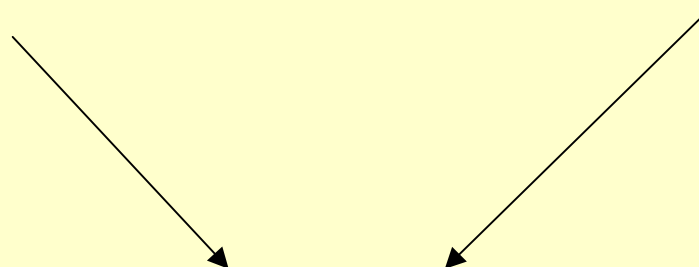
1902 - G. Marconi - wynalazek wzmacniacza magnetomechanicznego

Idea przesyłania energii na odległość - geneza koncepcji - 1897

pomysł jednoczy dwie pasje techniczne Tesli

energia tylko w postaci AC

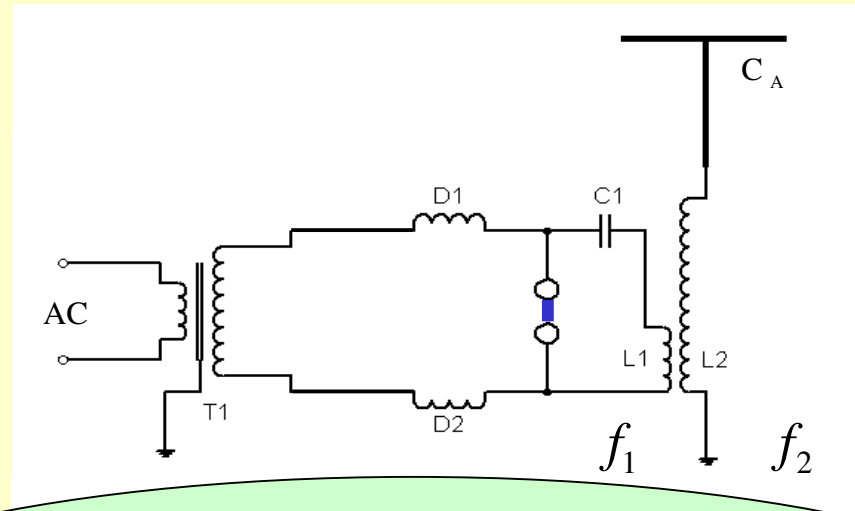
rezonansowe gorące anteny radiowe



radiowy system przesyłania energii na odległość

AC → ELF

Przesyłanie energii na odległość - istota pomysłu



f_{Ziemi}

trzeci rezonans - rezonans Ziemi

$$f_1 \approx f_2 \approx f_{Ziemi}$$

Przesyłanie energii na odległość - rezonans Ziemi

jaka jest częstotliwość rezonansowa Ziemi ? **Tesla:** $f_{Ziemi} \approx 6$ [Hz]

(1) Ziemia jako kula przewodząca

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \approx 6.6 \text{ [Hz]}$$

(2) czas obiegu pola wokół Ziemi (jonosfera O. Heviside - 1901)

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2\pi \cdot a} \approx 7.5 \text{ [Hz]}$$

(3) rezonator Ziemia - jonosfera (W.O. Schumann - 1952)

$$f = \frac{c}{2\pi \cdot a} \sqrt{n(n+1)} \approx 10.6 \text{ [Hz]}$$

(4) zmierzona częstotliwość 1 rezonansu Schumanna (Balser, Wagner - 1960)

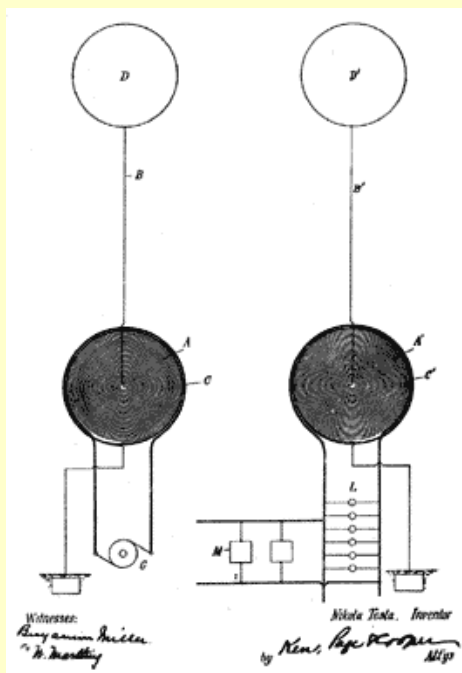
$$f \approx 7.8 \text{ [Hz]}$$

Przesyłanie energii na odległość - patenty

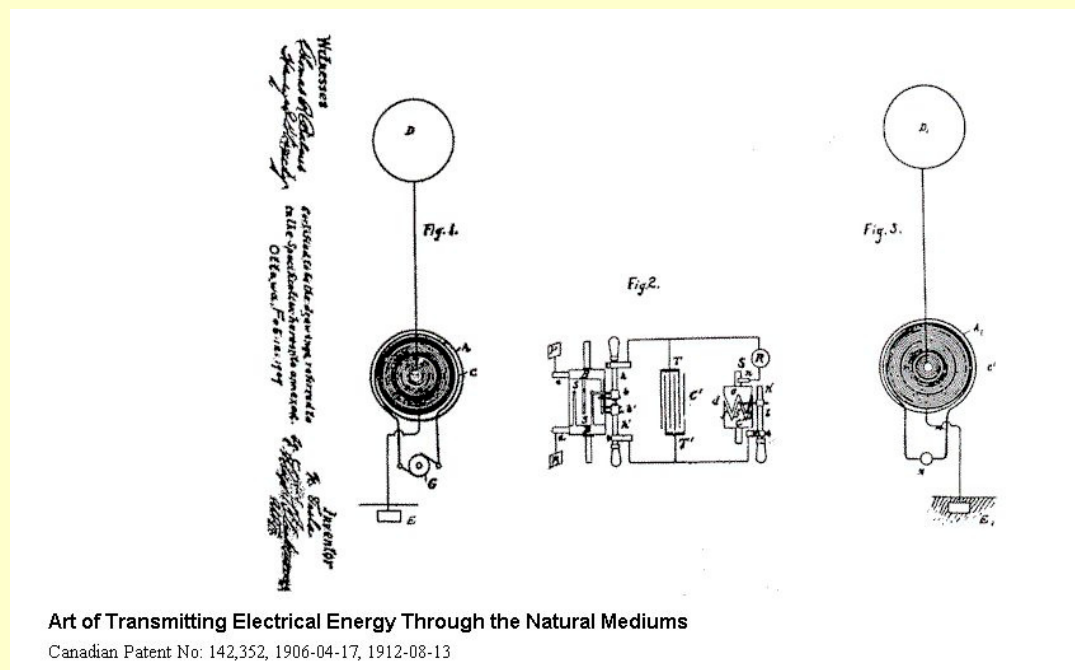
1900 - US patent 650 343 - bez rezonansu Ziemi (wpłynął 1897)

1905 - US patent 787 412 - z rezonansem Ziemi (wpłynął 1905)

1906 - Canada patent 142 352 - (wpłynął 1905)

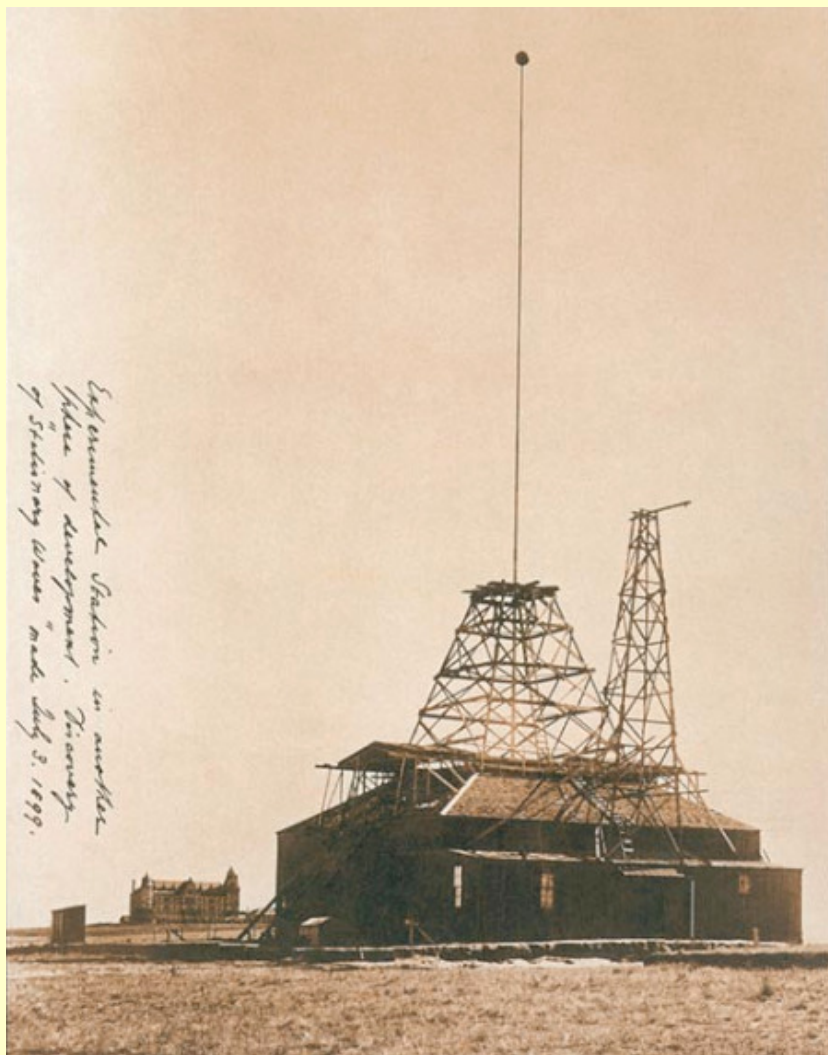


wersja USA



wersja Kanada

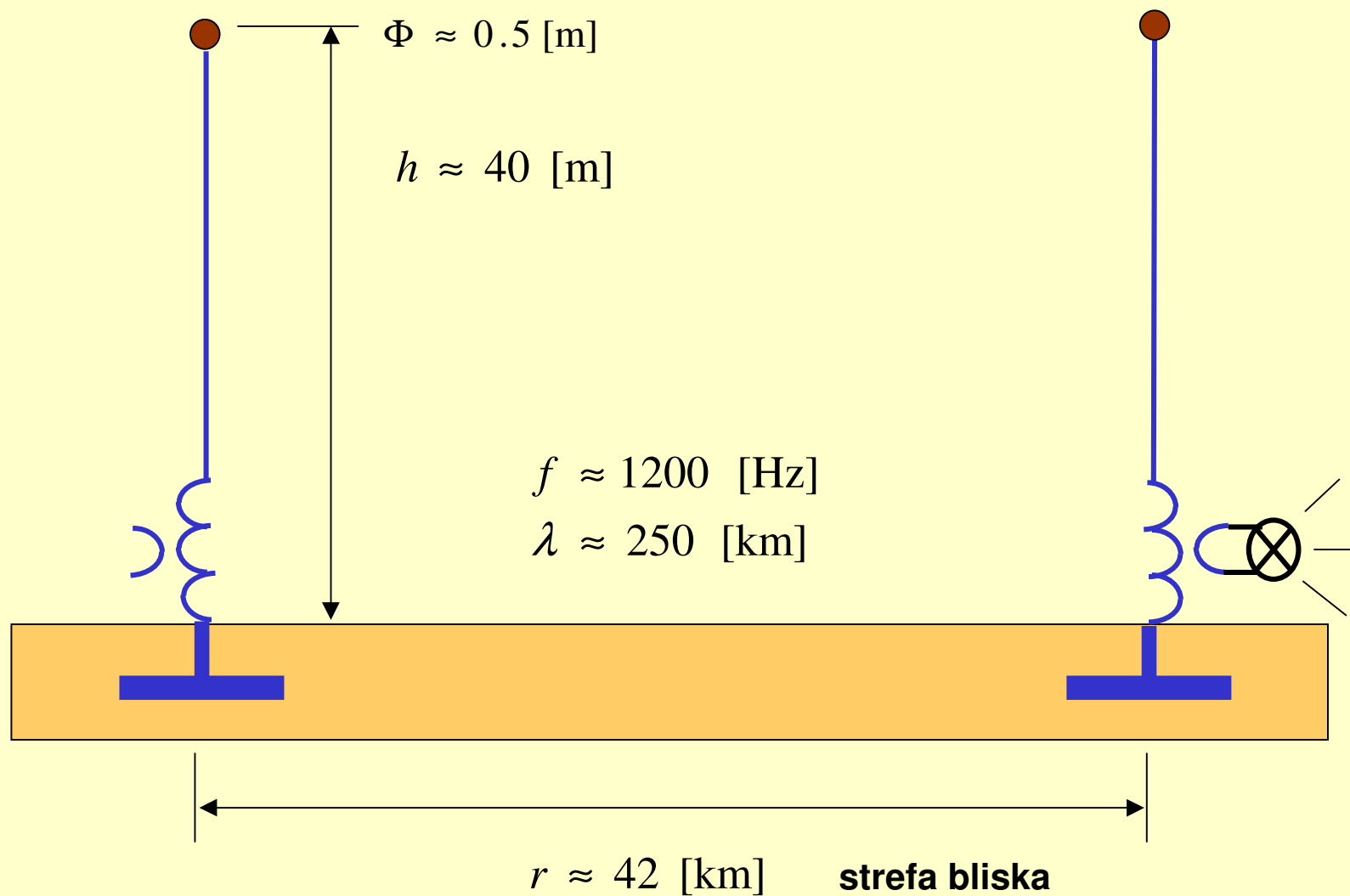
Etap I - laboratorium ELF w Colorado Springs - 1899



wieża nadawcza

Pokaz przekazu energii ELF w Colorado Springs - 1899

współczynnik skrócenia anteny: 625

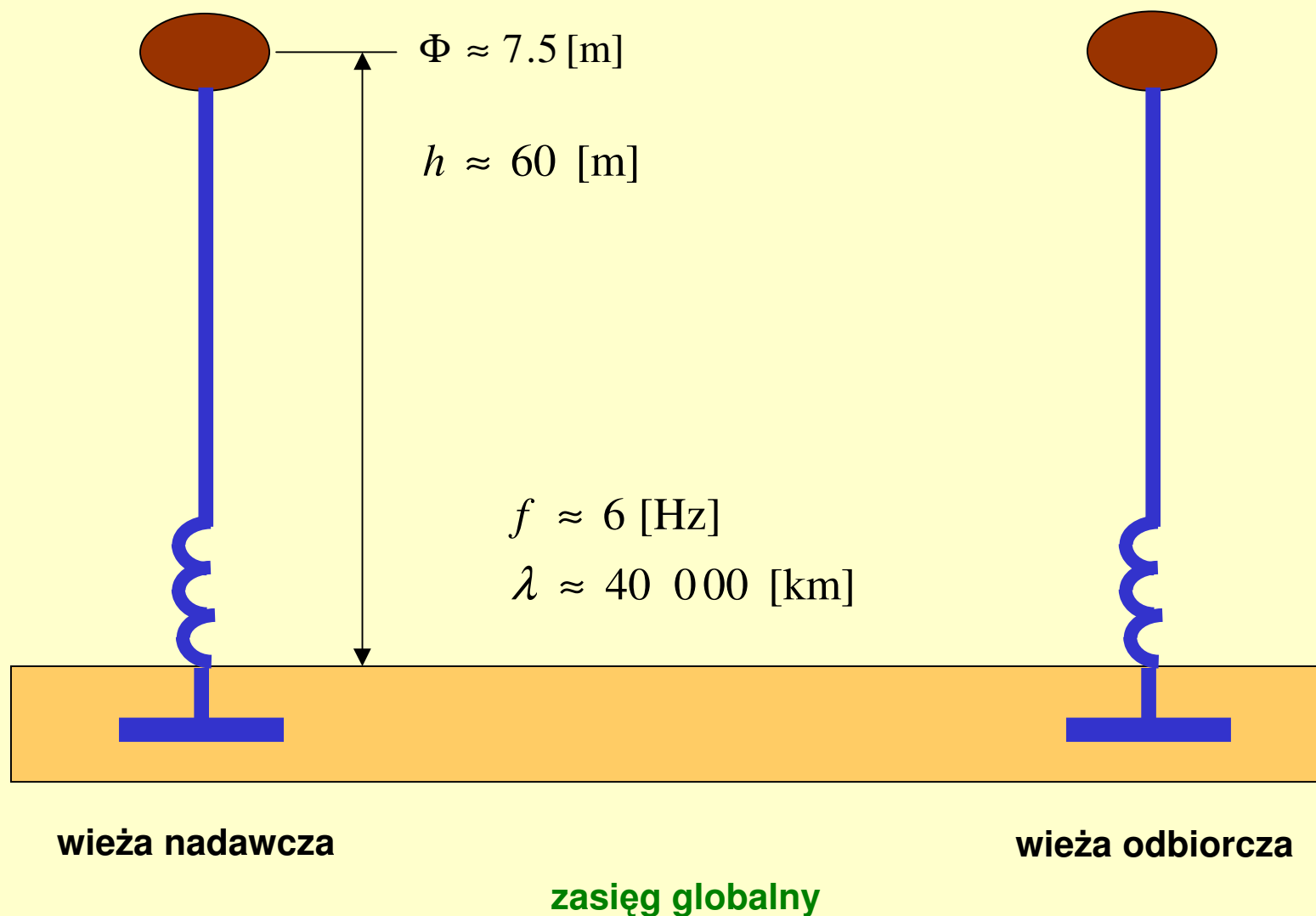


Etap II - laboratorium ELF na Long Island - 1900

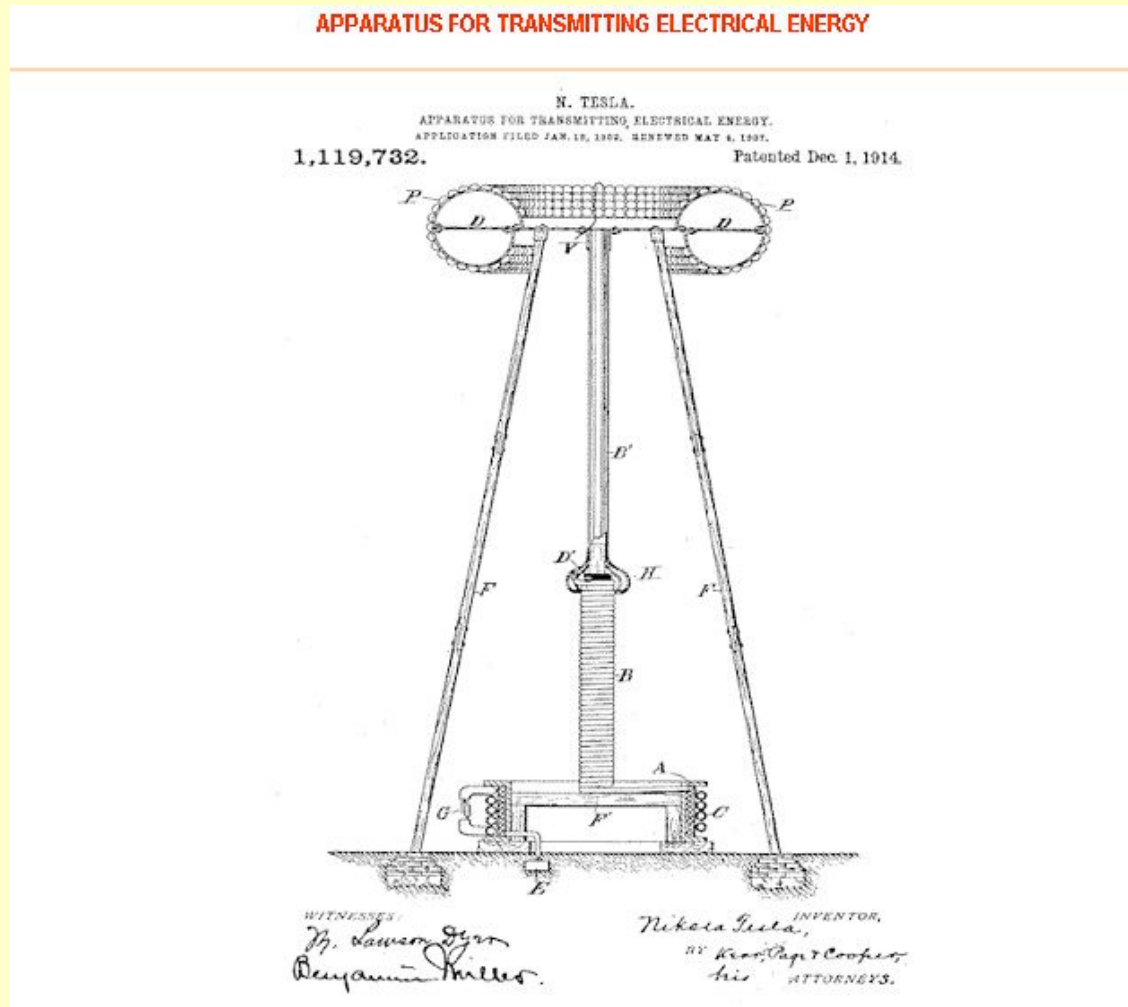


Założenia konstrukcyjne instalacji ELF na Long Island

współczynnik skrócenia anteny: 160 000



Laboratorium na Long Island



opis wieży w patencie z 1914 r.

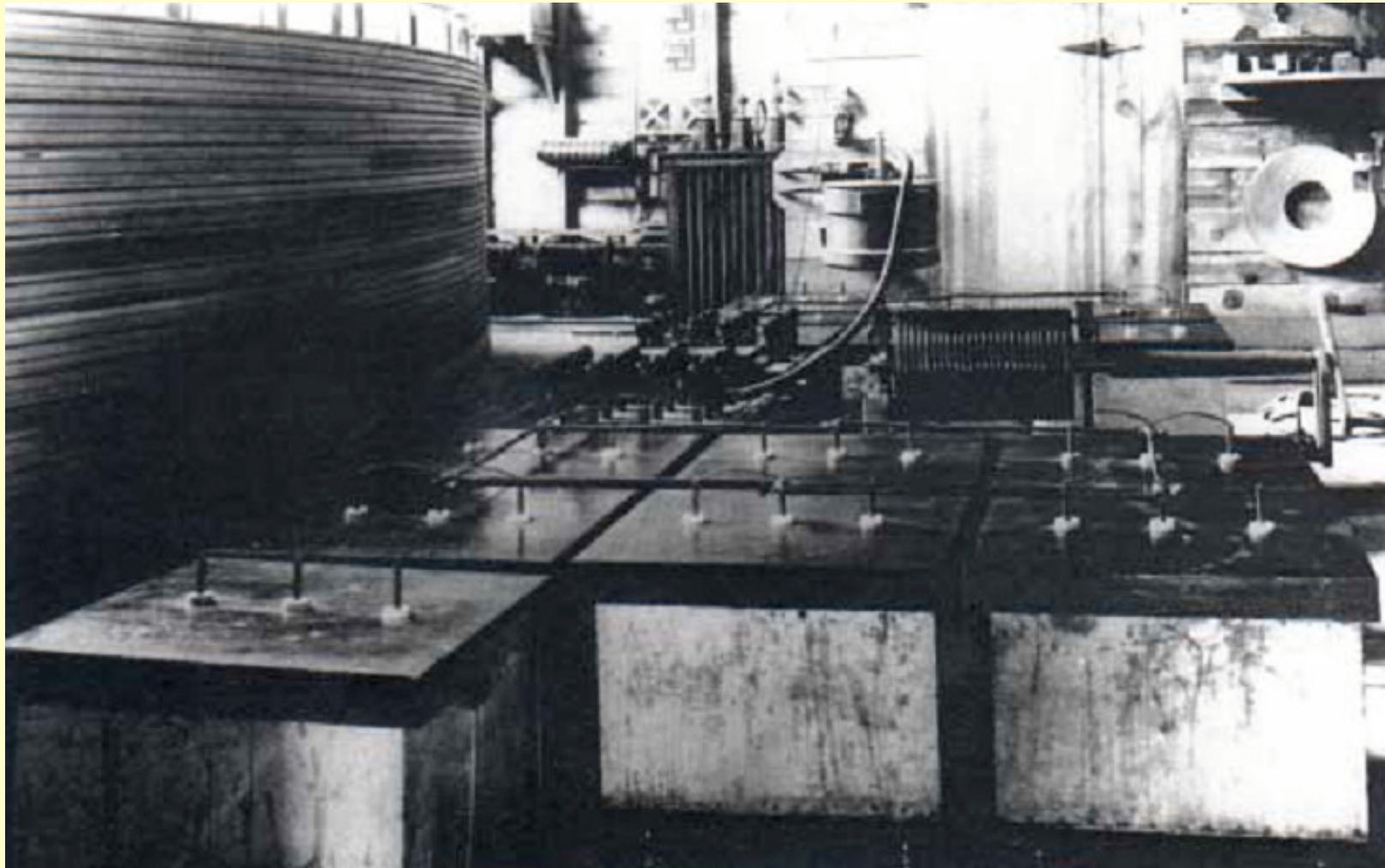
Laboratorium na Long Island



Tesla Wardencliff
Project Archives

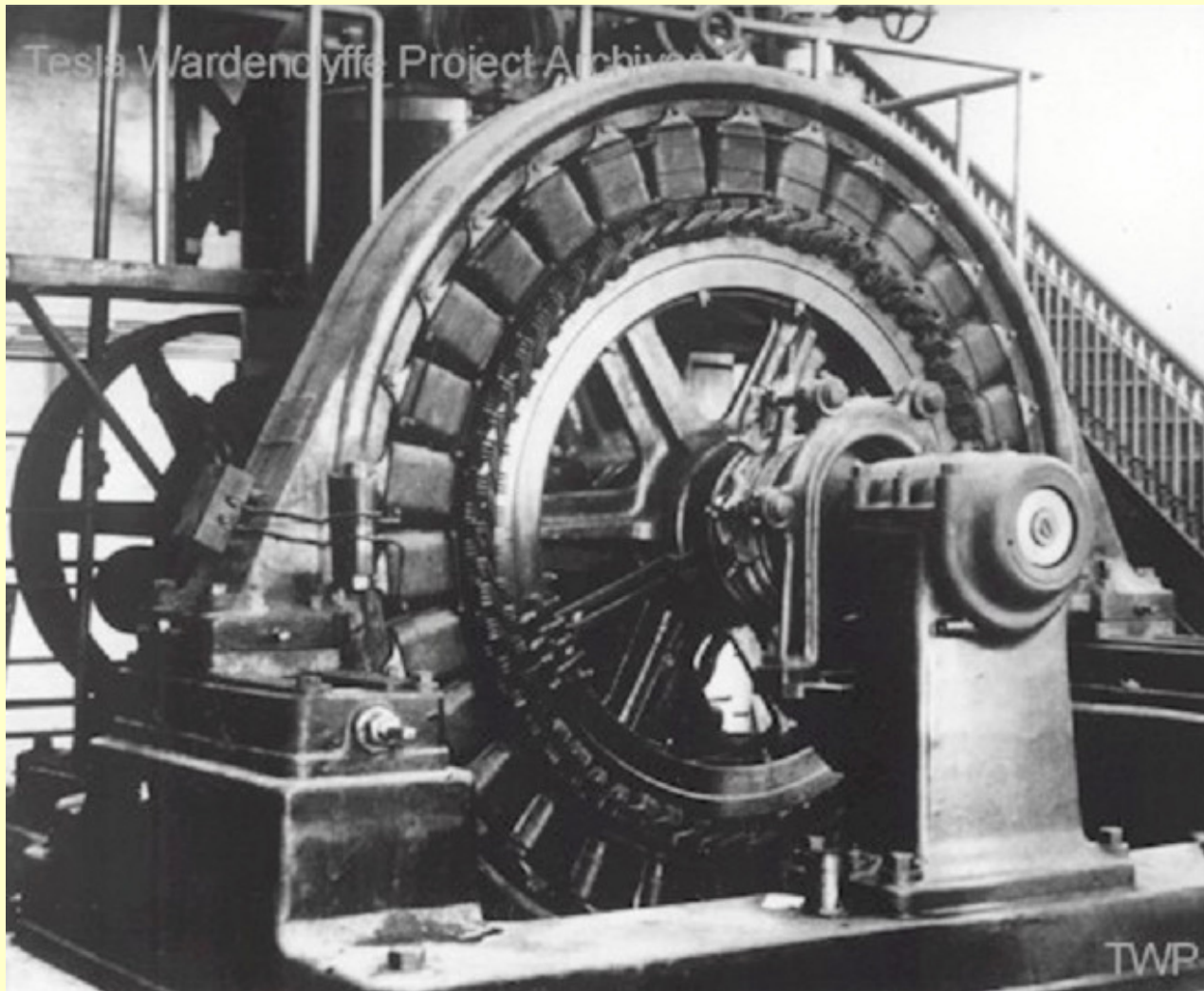
wieża transmisji globalnej ELF

Laboratorium ELF na Long Island



rezonansowa cewka antenowa ELF o średnicy 17 metrów

Laboratorium ELF na Long Island



generator pola 6 Hz

Laboratorium ELF na Long Island



ogólny widok laboratorium 1

Laboratorium ELF na Long Island



ogólny widok laboratorium 2

Laboratorium ELF na Long Island

wyniki badań (1900 - 1903 - 1914):

brak wyników

nie uzyskano zadowalającego transferu energii na duże odległości

zauważono możliwość prowadzenia łączności w zakresie ELF

możliwości tej nie wykorzystano

Dlaczego system ELF nie działał ? - dzisiejszy punkt widzenia

przyczyny techniczne:

antena nadawcza nie była dopasowana do falowodu Ziemia - jonosfera

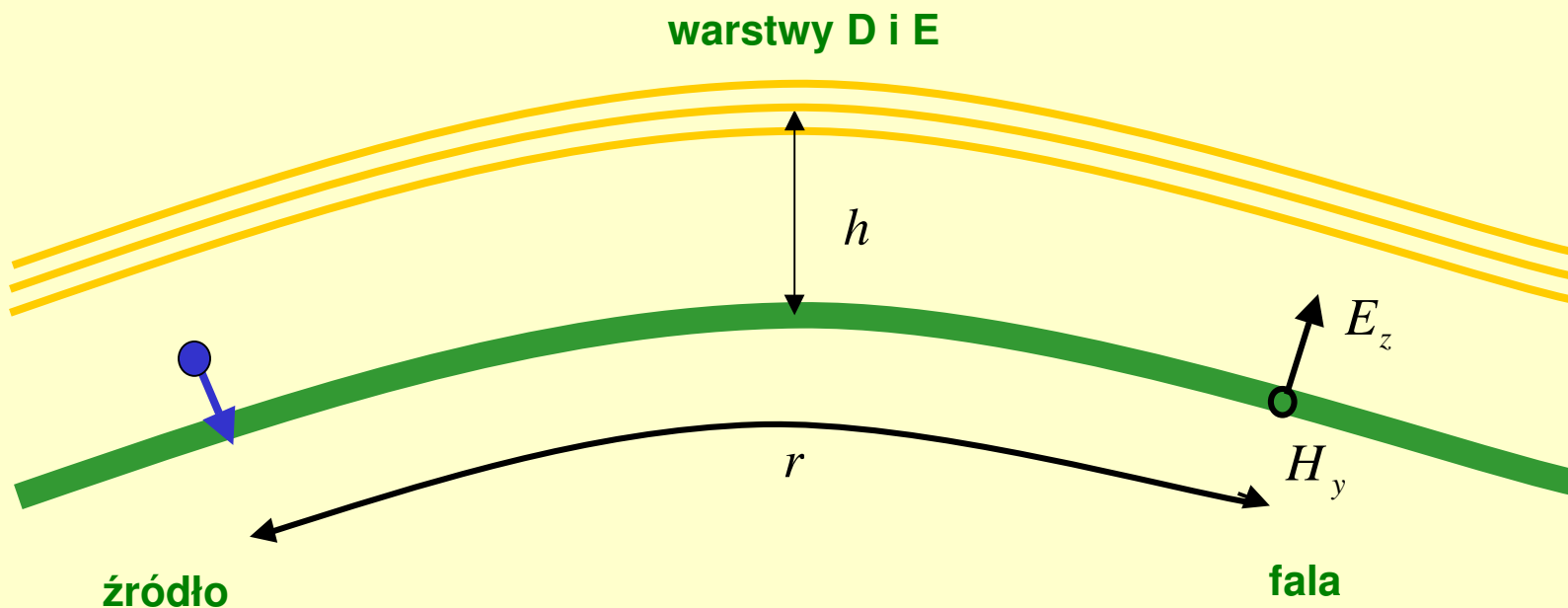
sprawność zastosowanych krótkich anten rezonansowych była zbyt mała

przyczyny teoretyczne:

straty wnęki rezonansowej Ziemia - jonosfera ($Q \approx 5$) są zbyt duże

rozproszenie energii na planecie byłoby zbyt duże, by system miał sens

Co wiemy dzisiaj o propagacji pola ELF w falowodzie Ziemia - jonosfera ?



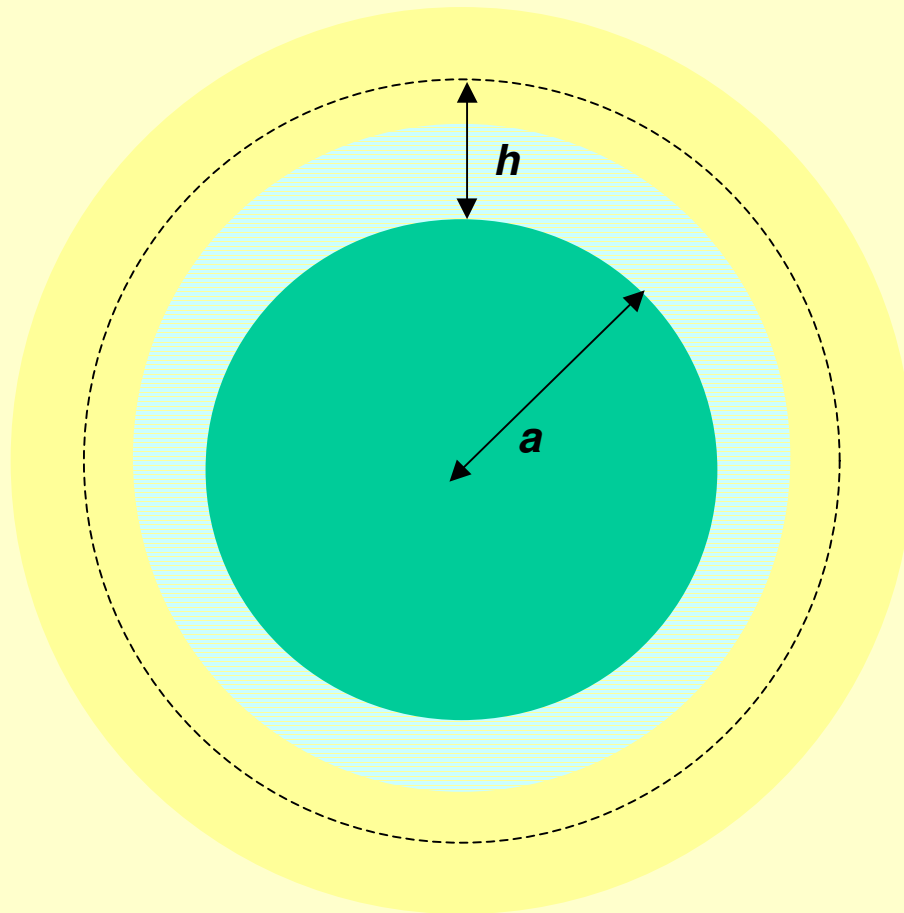
dolne odbijające pole ELF warstwy jonosfery: 65 [km]

propagacja fal jest jednomodowa w zakresie: 8 - 1500 [Hz] (linia paskowa)

prędkość rozchodzenia się fal: 0.75 prędkości światła

tłumienie fal: na częstotliwości 8 Hz spadek energii do 1/4 na 10 000 [km]

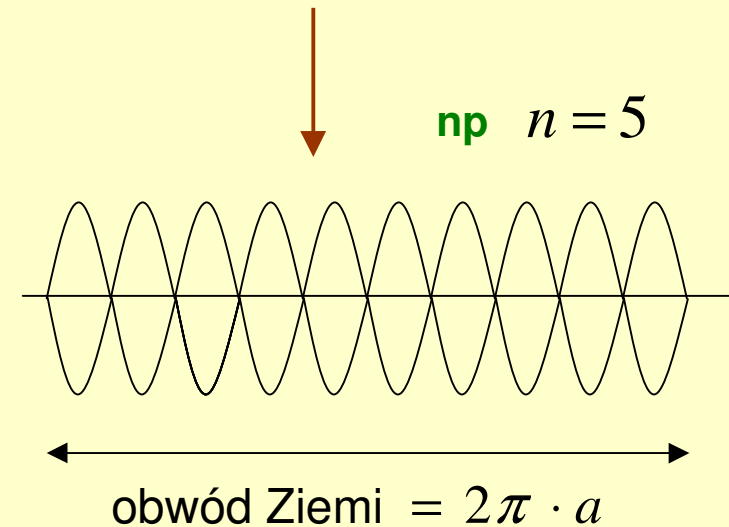
Co wiemy o rezonansie pola ELF we wnętrzu Ziemia - jonosfera ?



kolejne częstotliwości rezonansowe:

8, 14, 20, 26, 32, 38, 42 [Hz]

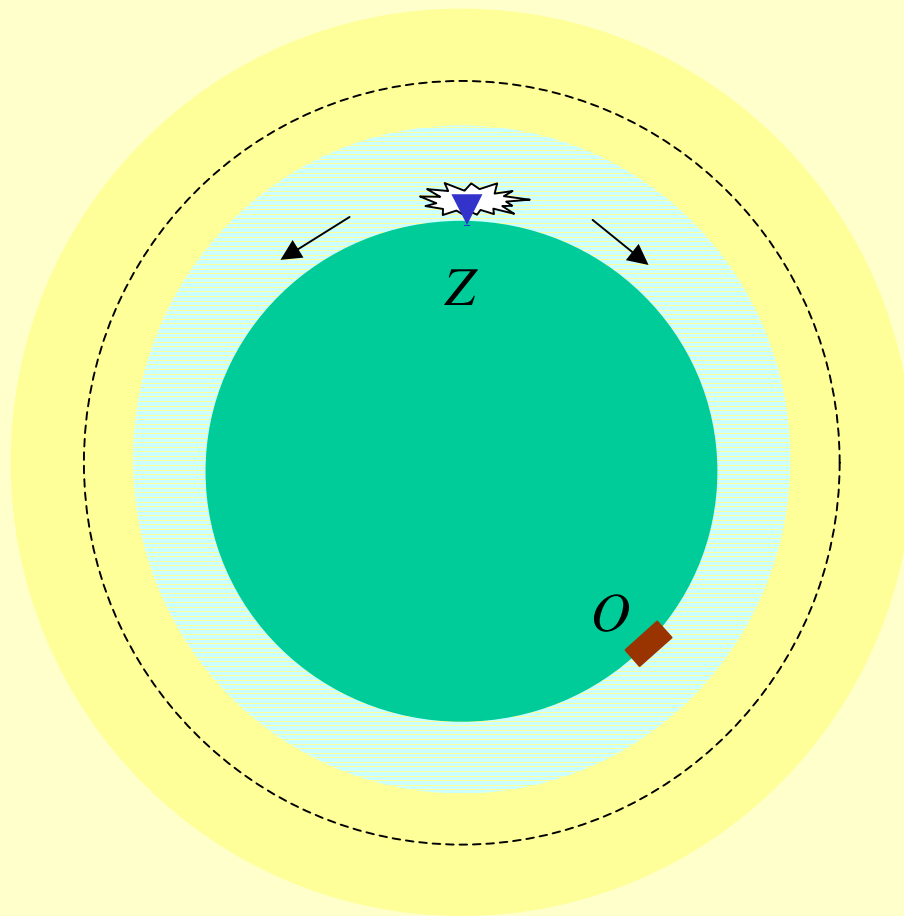
**fale obiegają Ziemię wiele razy
powstają fale stojące**



$$f = \frac{\text{prędkość}}{\text{obwód}} \sqrt{n(n+1)}$$

Co wiemy o funkcjonowaniu rezonansu we wnętrzu Ziemia - jonosfera ?

wyładowania elektryczne w centrach burzowych: ~ 70 [1/s]



energia fal ELF w rezonatorze:

1000 [J]

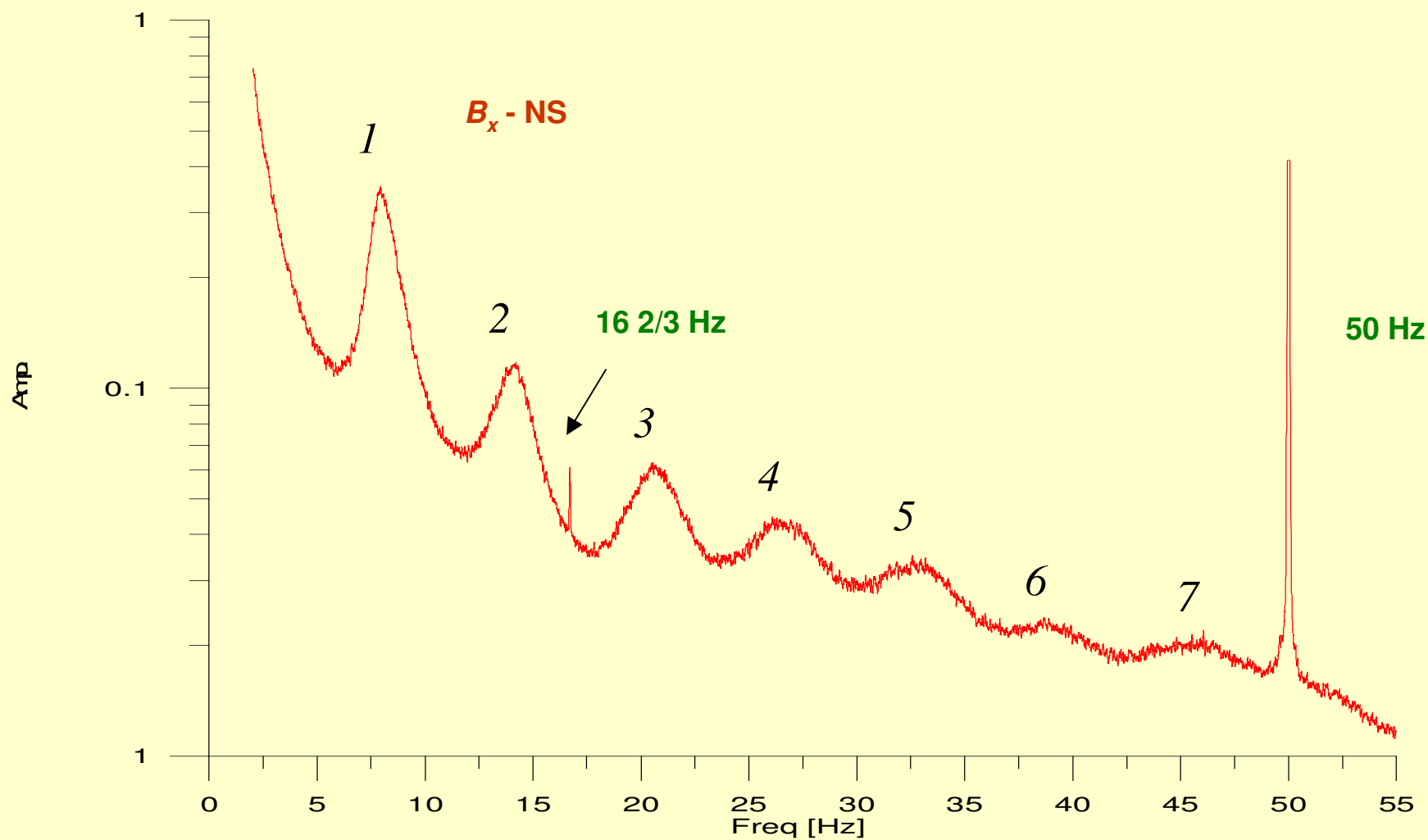
czas zaniku energii:

1 [s]

moc odbierana przez anteny ELF:

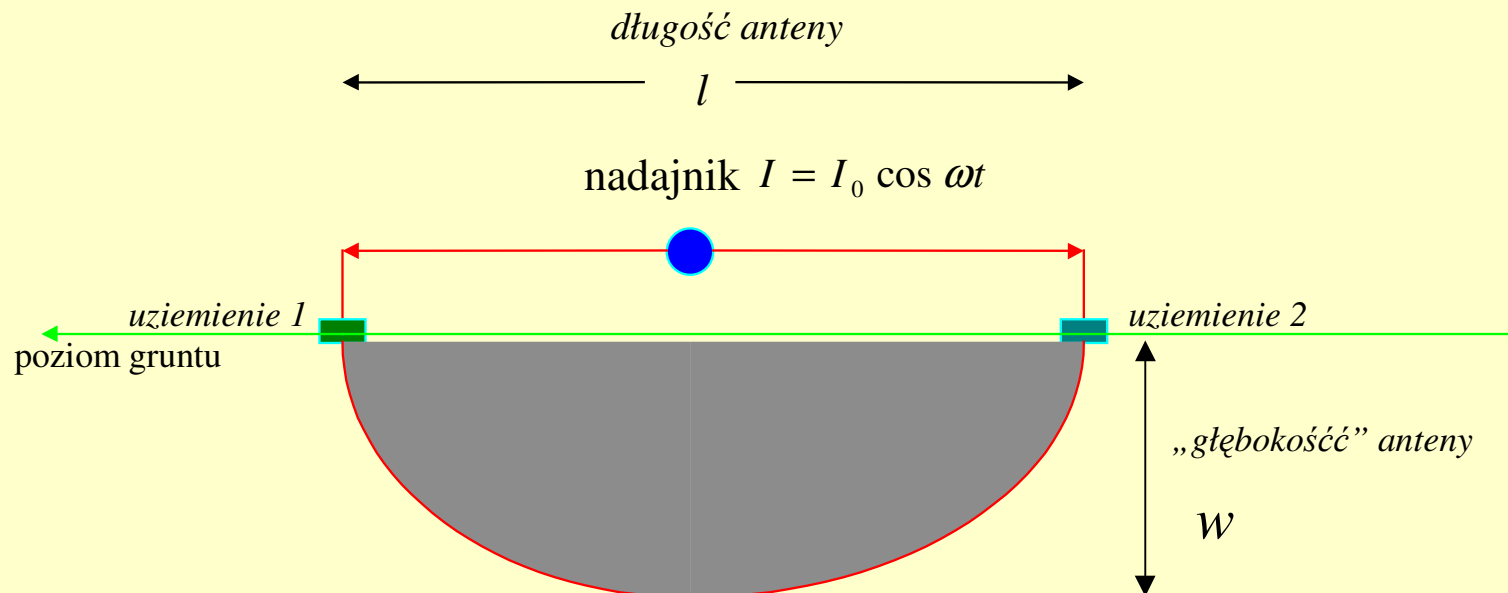
10^{-20} [W]

Tak wygląda rezonans Ziemi w zakresie ELF



Optymalna antena nadawcza ELF dzisiaj

antena ziemna - horyzontalny dipol magnetyczny (HDM)



$$m = I_0 \cdot l \cdot w \quad \text{moment magnetyczny anteny}$$

$$w = \delta / \sqrt{2}$$

δ głębokość wnikania pola ELF do gruntu

R rezystancja pętli i uziemień

$$P = 1 [\text{MW}]$$

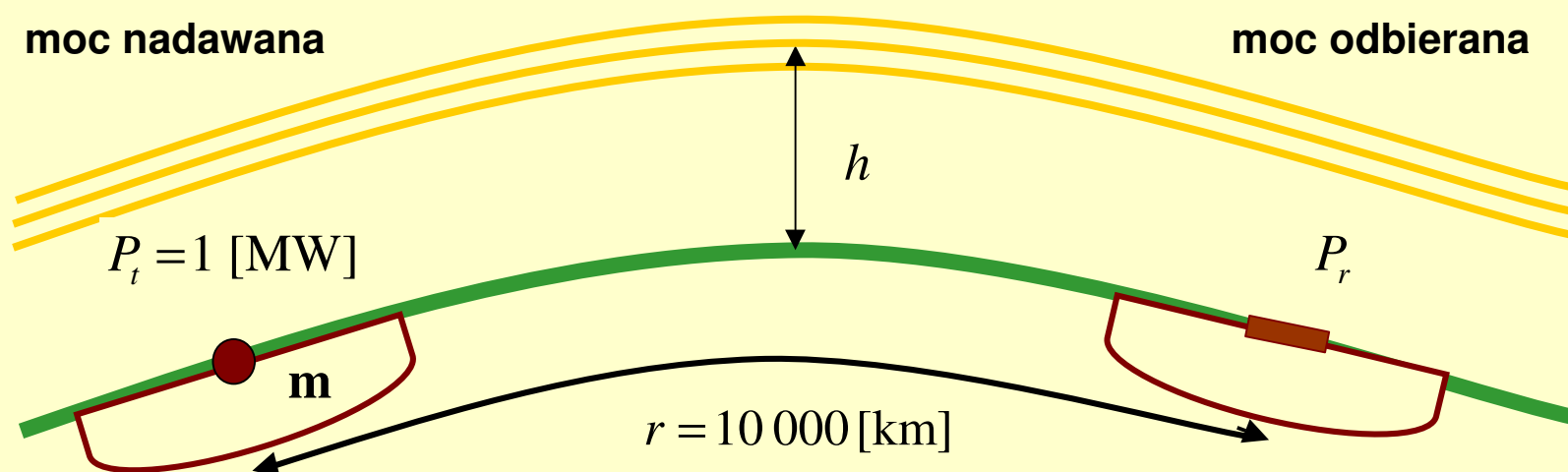
$$I_0 = 300 [\text{A}]$$

$$w \approx 2.6 [\text{km}]$$

$$l \approx 22.5 [\text{km}]$$

$$R \approx 10 [\Omega]$$

Jaka jest sprawność współczesnych systemów antenowych ?



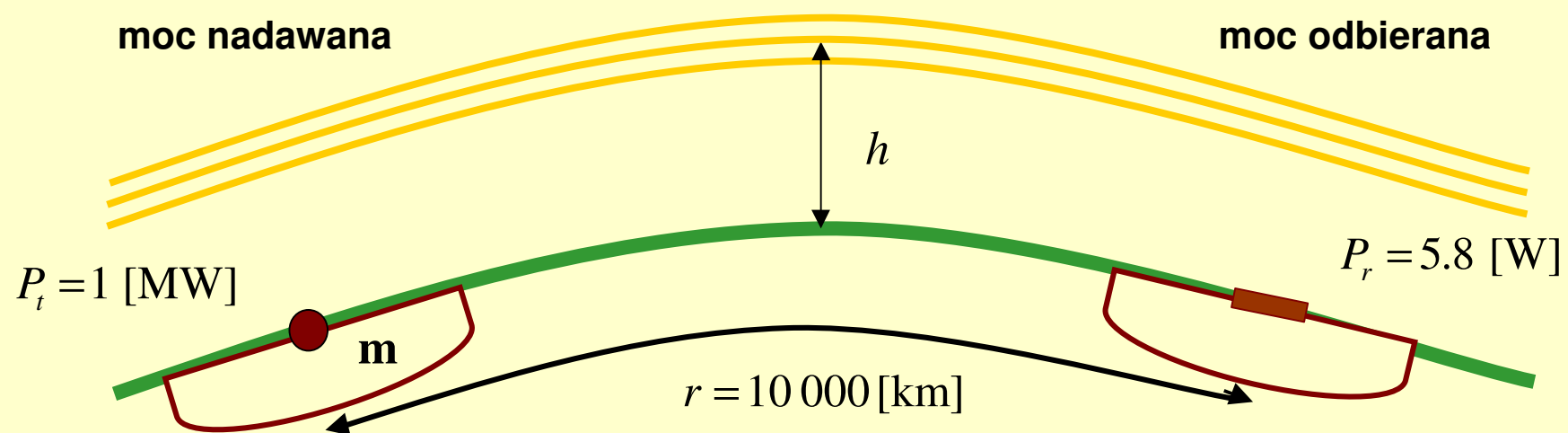
$$B(r) \approx \frac{\pi \cdot \mu_0}{h} \cdot \frac{m}{\lambda^2} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{a \sin(r/a)}} \cdot e^{-\alpha r}$$

76 [Hz]	$m \approx 3.5 \cdot 10^{10}$ [A·m ²]	$B(r) = 0.026$ [pT]	$P_r = 5.3 \cdot 10^{-8}$ [W]
---------	---	---------------------	-------------------------------

8 [Hz]	$m \approx 1.1 \cdot 10^{11}$ [A·m ²]	$B(r) = 840$ [pT]	$P_r = 5.8$ [W]
--------	---	-------------------	-----------------

sprawność całkowita łączy na 8 Hz: $\eta \approx 5.8 \cdot 10^{-6}$

Dzisiejsze możliwości transmisji energii ELF na odległość (8 Hz)



sprawność anteny nadawczej

$$\eta_t \approx 5 \cdot 10^{-3}$$

sprawność falowodu

$$\eta_k \approx 0.25$$

sprawność anteny odbiorczej

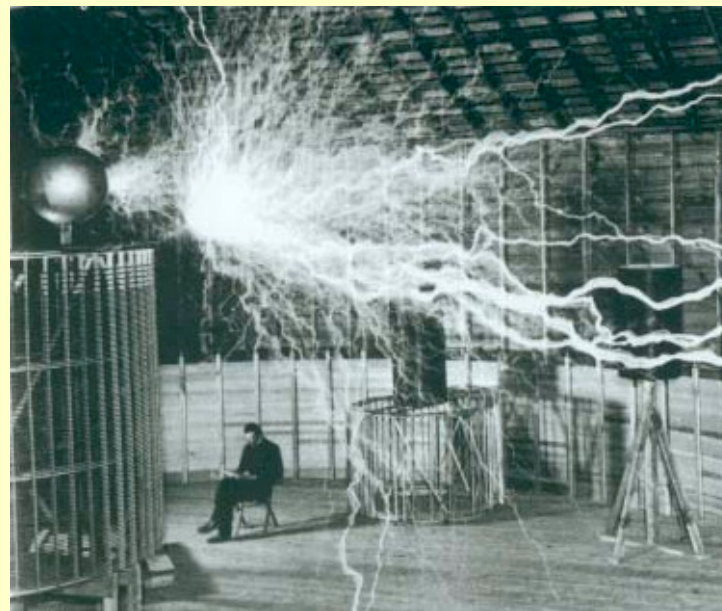
$$\eta_r \approx 5 \cdot 10^{-3}$$

bilans energii

$$\frac{P_r}{P_t} = \eta_t \cdot \eta_k \cdot \eta_r \approx 5.8 \cdot 10^{-6}$$

Przyczyny porażki programu ELF Tesli - wnioski

N. Tesla nie zdawał sobie sprawy z istnienia stref wokół dipola
bliskie pole coulombowskie interpretował jako zaletę swoich anten
nie brał pod uwagę wpływu sprawności anten krótkich na transmisję energii
nie próbował rozważać dopasowania swoich anten do falowodu Ziemia - jonosfera
nie wykorzystał fal ELF do łączności



Wkład N. Tesli w badania radiowe - podsumowanie

**N. Tesla skupiał się na technikach przesyłania energii prądu zmiennego
rozwinął do perfekcji techniki rezonansowe wielkiej częstotliwości
preferował w eksperymentach anteny wysokonapięciowe
nie rozwijał technik detekcji słabych prądów**

koncepcja bezprzewodowego przesyłania energii była kwintesencją jego prac

zastosowanie uziemień było jego oryginalnym wkładem

zastosowanie krótkich rezonansowych anten ELF było jego oryginalnym wkładem

myśl wykorzystania rezonansu Ziemi była jego oryginalnym wkładem

przeczcucie małego tłumienia fal ELF było jego oryginalnym wkładem

kto był odkrywcą radia ? odkrycia - pierwszeństwo - naśladownictwo - zapożyczenie



Michał Ostrowski



Adam Michalec



Andrzej Kułak

**dziękujemy
za uwagę**



Piotr Koperski



Jerzy Kubisz



Stanisław Zięba



Anna Odzimek



Janusz Młynarczyk



Zenon Nieckarz