



Akademia Górniczo-Hutnicza
Katedra Elektroniki

Obserwatorium Astronomiczne UJ
Zakład Fizyki Wysokich Energii

Andrzej Kułak

Fale elektromagnetyczne ELF na powierzchni Ziemi

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

17 kwietnia 2016

Fale elektromagnetyczne ELF

są to fale radiowe o częstotliwościach w zakresie $3 \div 3000$ Hz (ELF)

Ekstremalnie Niskie Częstotliwości – ENC (skrót nie stosowany)

Extremely Low Frequency – ELF

częstotliwości ELF nie są stosowane w radiokomunikacji cywilnej

licencje są wydawane w zakresie 9 kHz \div 300 GHz

są używane w radiokomunikacji wojskowej

(76 Hz) i 82 Hz

Treść

propagacja fal ELF

źródła fal ELF

techniki obserwacji fal ELF

przyszłość badań w zakresie ELF

pola ELF jako czynnik zakłócający pracę detektorów fal grawitacyjnych

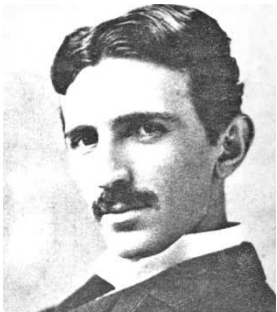
uwaga: prezentacja skupia się na wynikach badań krakowskich

Początek badań – seria niepowodzeń



1890 - Arthur Edwin Kennelly – inżynier amerykański (1861–1939)

próba obserwacji Słońca w zakresie fal ELF



1899 do 1914 - Nikola Tesla – inżynier serbskiego pochodzenia (1856 - 1943)

eksperymenty nad generacją i przekazem energii w zakresie ELF

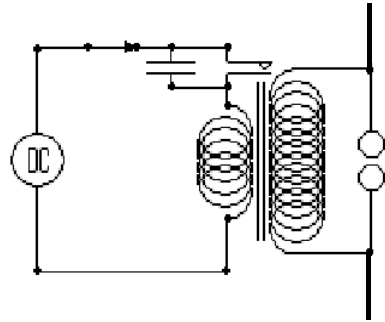


1952 - Winfried Otto Schumann – fizyk niemiecki (1888 – 1974)

rozwiązania dla wyidealizowanej wnęki sferycznej Ziemia - Jonosfera

1886 – I eksperyment Hertza

nadajnik - TX



dipol półfalowy

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

częstotliwość $f \approx 500$ MHz

50 MHz

50 kHz

500 Hz

długość dipola $l = 30$ cm

3 m

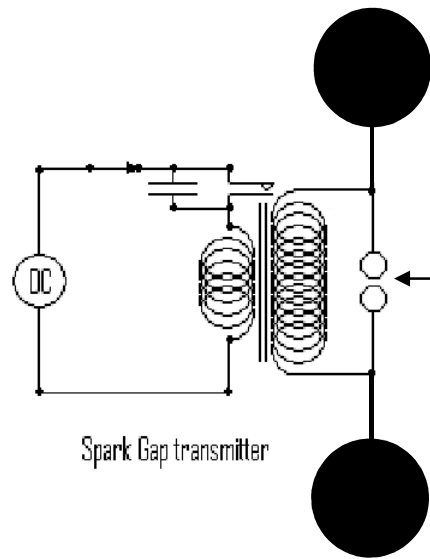
3 km

300 km

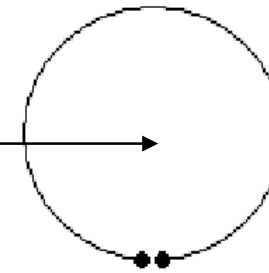
jak eksperymentować w zakresie ELF ?

1887 - II eksperyment Hertza

nadajnik - TX



$r \approx 10 \text{ m}$

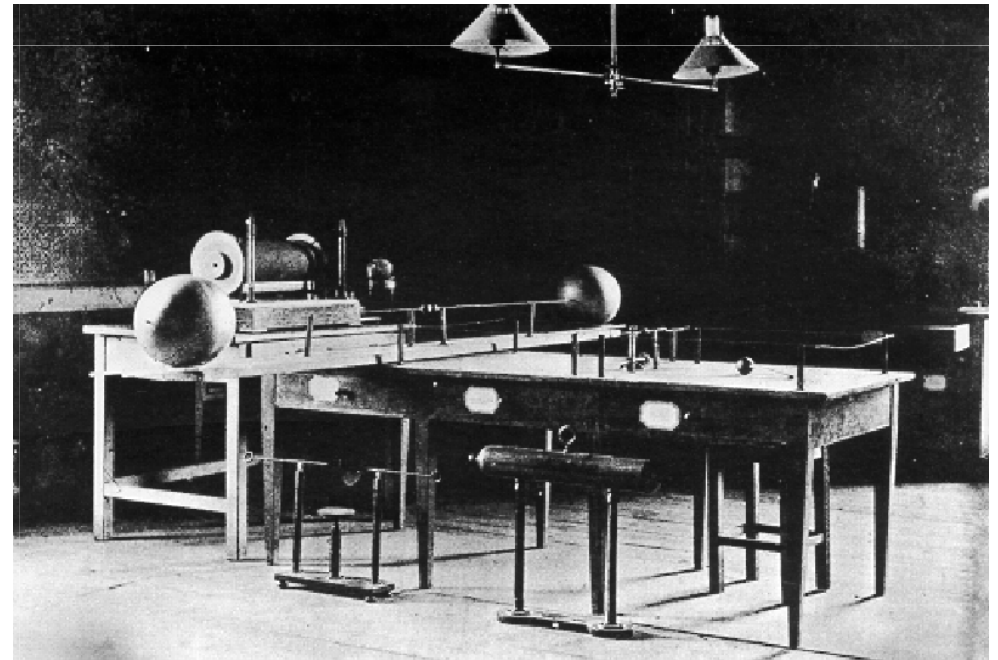


odbiornik - RX

częstotliwość $f \approx 50 \text{ MHz}$

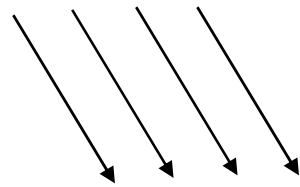
moc $\approx 10 \text{ W}$

laboratorium w Karlsruhe

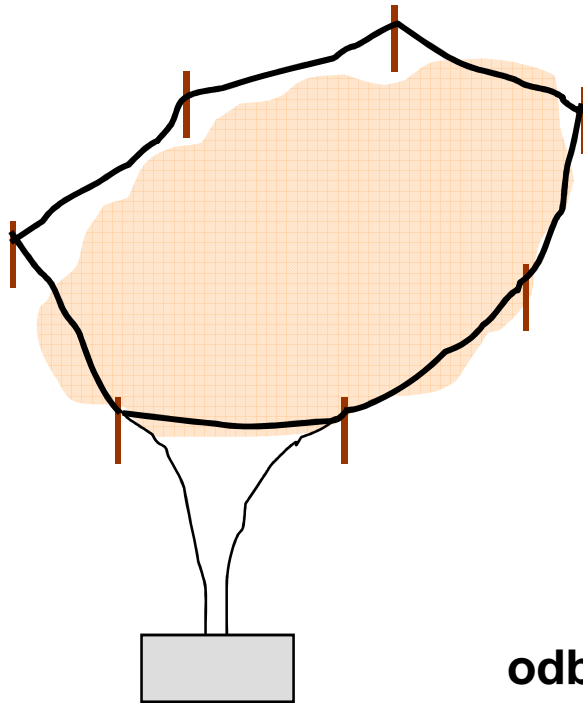


1890 – A. E. Kennelly - próba radioastronomii w zakresie ELF

projekt w ramach Laboratorium Edisona



emisja fal elektromagnetycznych ELF ze Słońca

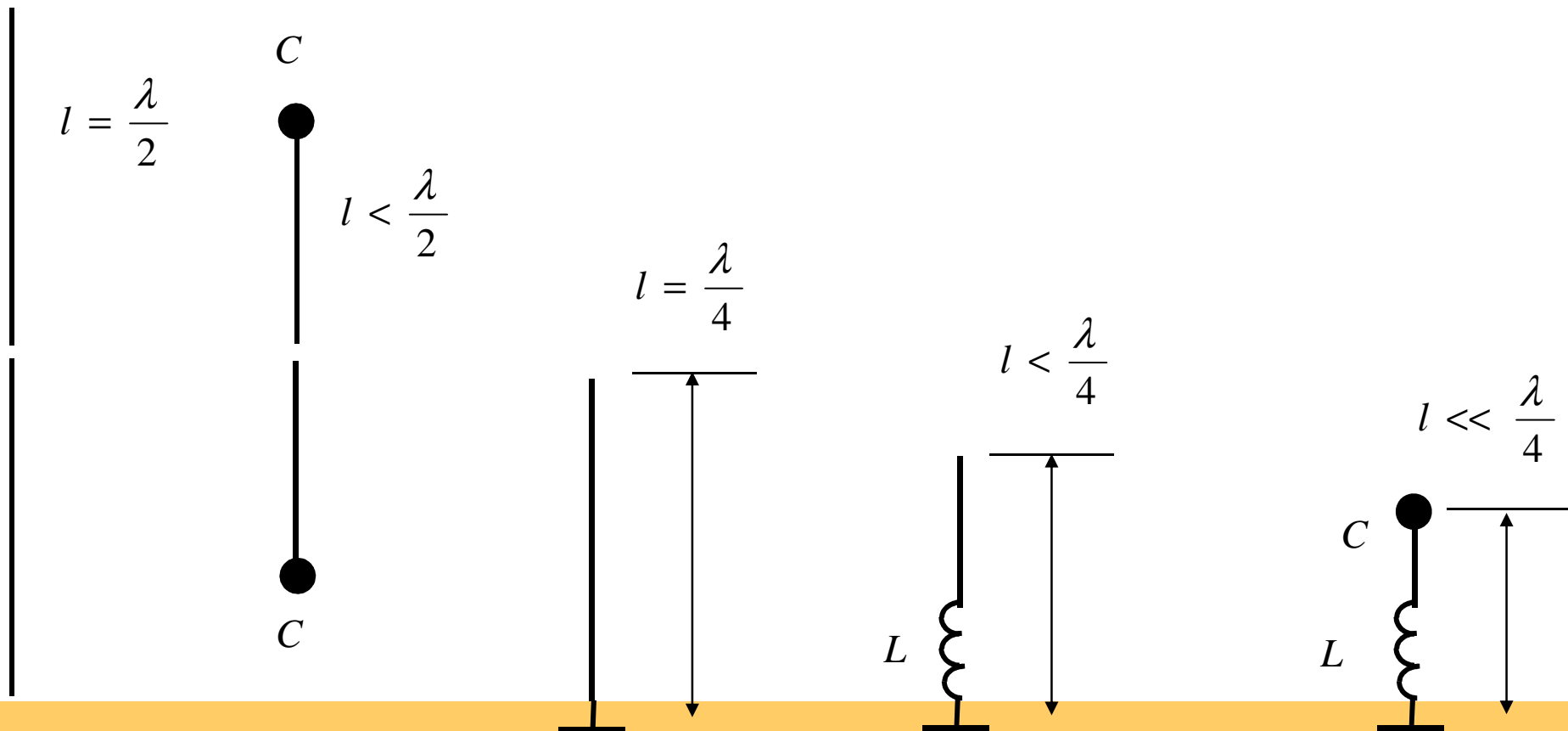


7 zwojowa antena ferrytowa

złóże rudy żelaza w New Jersey

odbiornik ELF - słuchawka telefoniczna

W kierunku ELF - kolejne etapy skracania rezonansowych anten nadawczych



Hertz
1886

Hertz
1887

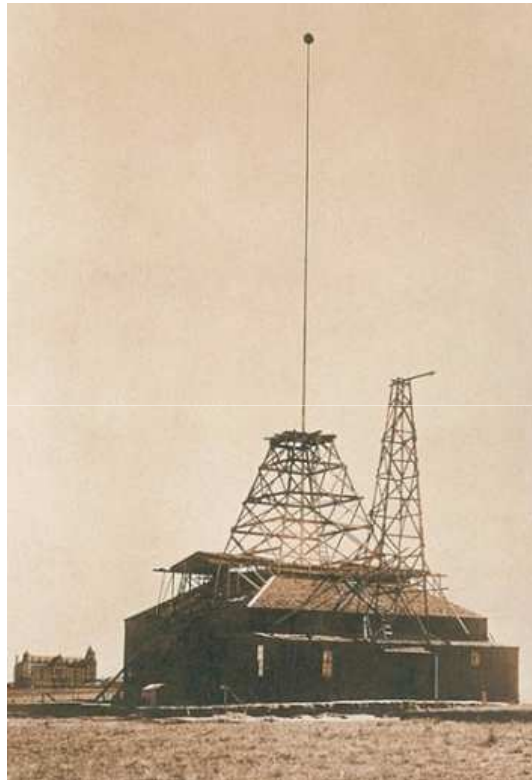
Abraham
1893

Abraham + Lodge
1894

Abraham + Lodge + Hertz
1898

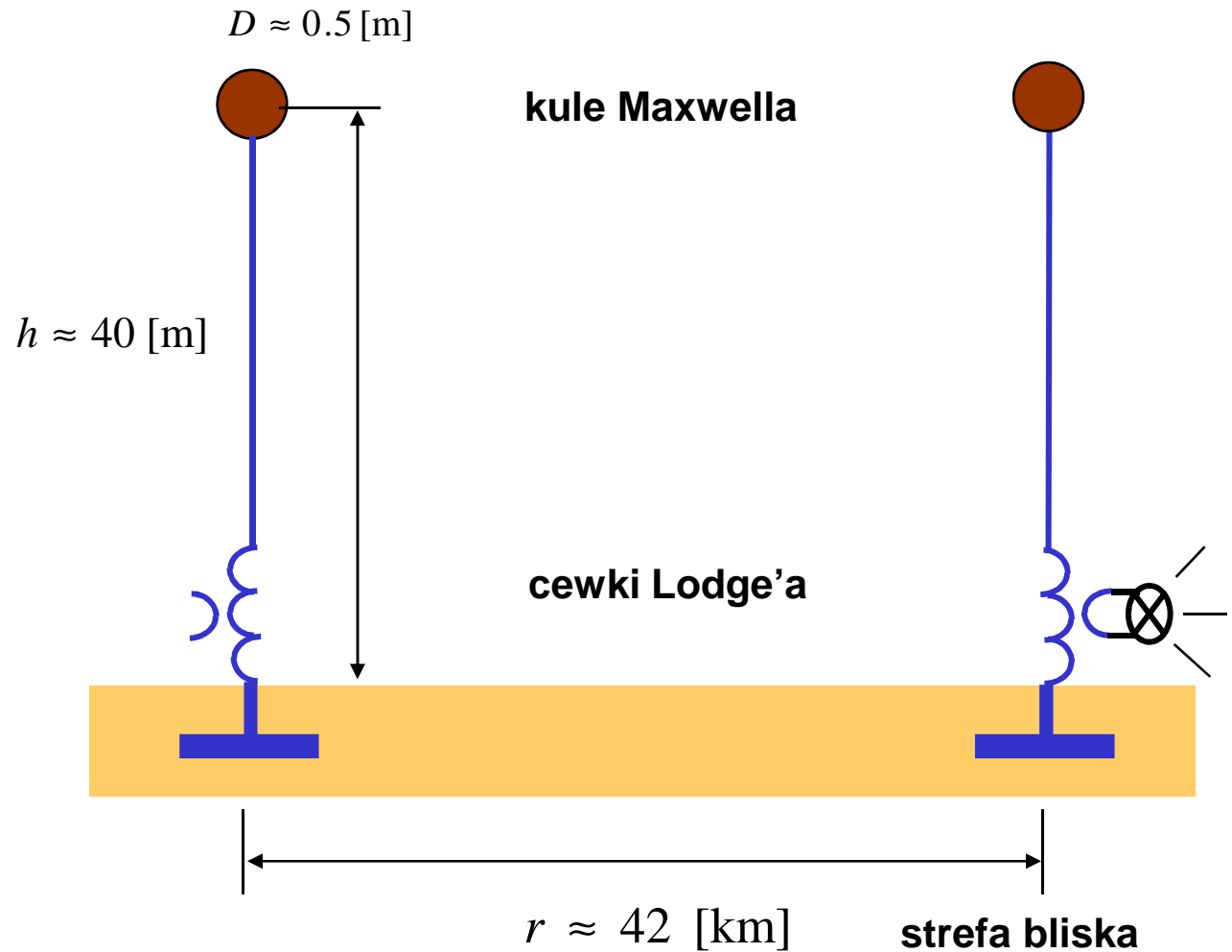
1899 - N. Tesla – udany pokaz przekazu energii w Colorado Springs

współczynnik skrócenia anteny: 625



$$f \approx 1200 \text{ [Hz]}$$

$$\lambda \approx 250 \text{ [km]}$$

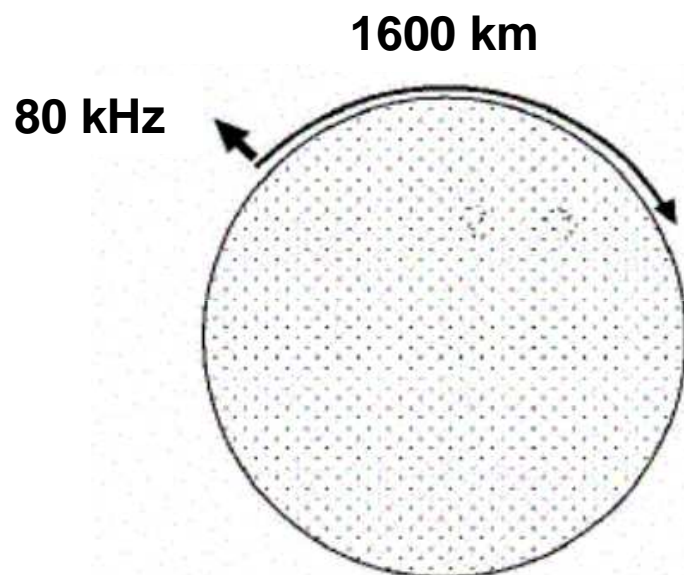


ale to nie były fale ELF – to były pulsacje pola w strefie bliskiej (pole coulombowskie)

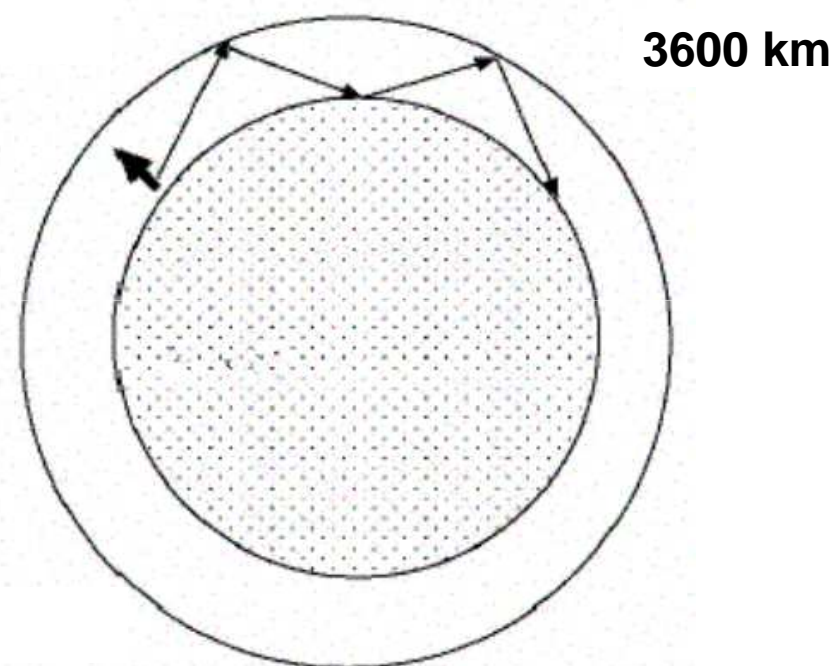
1901 – G. Marconi przeprowadza łączność radiową przez Atlantyk

eksperyment był stanowczo odradzany przez fizyków (nonsens + koszt)

dyfrakcja fal na powierzchni kuli



warstwa odbijająca fale

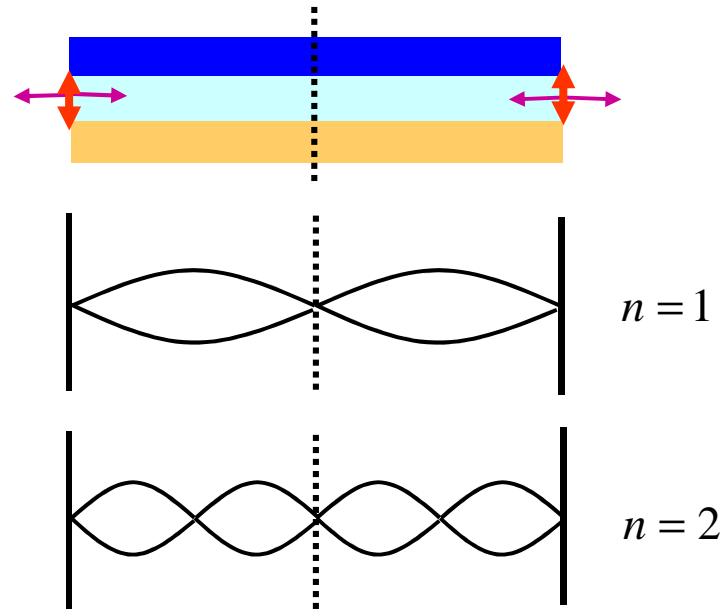
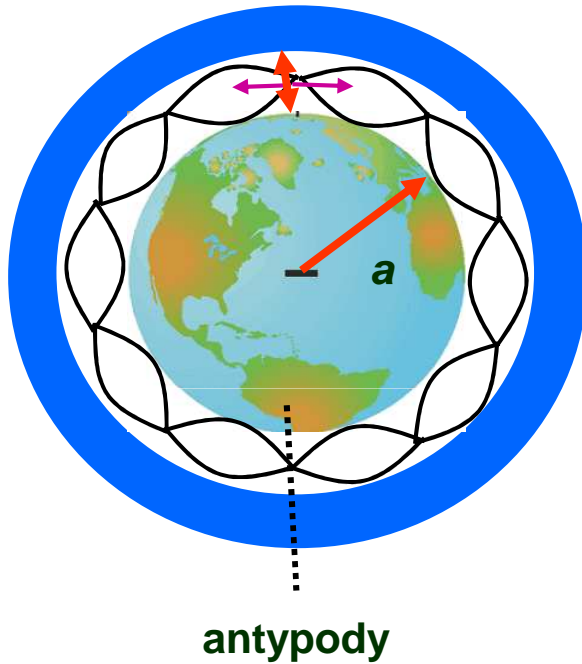


Arthur Edwin Kennelly i Oliver Heaviside wysuwają hipotezę istnienia jonosfery

wyjaśnia to porażkę radioastronomii Słońca

1952 - W. O. Schumann

rozwiązania równań pola w idealnej wnęce sferycznej G - J



dla Ziemi częstotliwości własne:

$$f_n = \frac{c}{2\pi a} \sqrt{n(n+1)}$$

$$f_1 = 10.6 \text{ [Hz]}$$

$$f_2 = 18.4$$

$$f_3 = 26.0$$

1960 – pierwsza obserwacja rezonansu Schumanna

pierwsze próby obserwacji rezonansu podjął sam Schumann w 1952, 1954 i 1957 r

z powodu zbyt dużych zakłóceń w okolicach Monachium nie dały one wyników

M. Balsler, C. A. Wagner MIT – pustynia meksykańska

$$f_{r1} \approx 8 \text{ [Hz]}$$

$$f_{r2} \approx 14$$

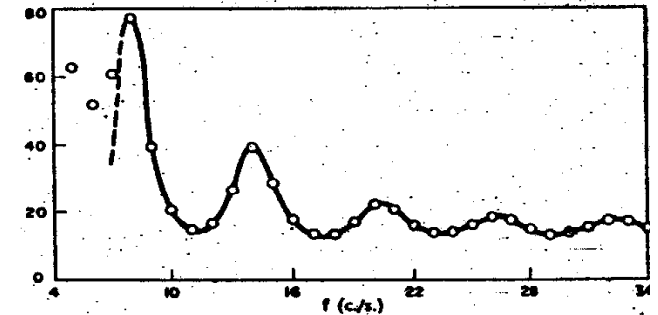
$$f_{r3} \approx 20$$

były one dalece rozbieżne z przewidywaniami Schumanna

$$f_1 = 10.6 \text{ [Hz]}$$

$$f_2 = 18.4$$

$$f_3 = 26.0$$



Nature, 188, 638, 1960

rozbieżność wyjaśniły późniejsze modele uwzględniające dyspersyjne tłumienie wnąki

Historia badań fal ELF

***** I etap *****

1960 – pierwsza obserwacja MIT

1962 ÷ 1972 – podstawowe prace modelowe falowodu Ziemia - Jonosfera i wnęki Z-J

1987 – pierwszy globalny system łączności radiowej (76 Hz)

***** II etap *****

1991 - E. R. Williams MIT – amplituda 1 modu rezonansu Schumanna jako globalny wskaźnik temperatury

1991 - inni

G. Satori
A. P. Nickolaenko
M. Hayakawa
V. Bliokh
C. Price

1993 – początek badań krakowskich

Badania wnętrza Ziemia - Jonosfera

rozwiązania równań pola w idealnej sferycznej wnęce idealnej

W. O. Schumann, 1952, P. V. Bliokh, 1977, J. D. Jackson, 1982 (wydanie polskie monografii)

modelowanie wnętrza uwzględniające niejednorodny profil przewodności jonosfery

modele analityczne

D. L. Jones, 1964

J. R. Wait, 1965

J. Galejs, 1972

C. Greifinger and P. Greifinger

D. D. Sentman, 1989, 1996

V. Mushtak, E. Williams, 2002

GRS, 2007, 2014

modele numeryczne FTDT

J. Galejs, 1972

J. J. Simpson and A. Taflove, 2002

GRS, 2003

T. Ostuyama et al., 2004

S. A. Cummer, 2004

H. Yang and V. Pasko, 2006

GRS, 2015

rozwiązania odwrotne, odtwarzanie rozmieszczenia źródeł we wnętrzu

S. J. Heckman, E. Williams, B. Boldi, 1998

A. V. Shvets, 2001

Y. Ando, M. Hayakawa, 2005

GRS, 2003, 2006, 2009, 2015

Badania propagacji impulsów pola ELF w falowodach Grunt - Jonosfera

badania rozpoczęły się w latach 60 - tych

T. Ogawa, 1965 – pojęcie odosobnionego impulsu, Q burstu

D. D. Sentman, 1993

M. Rycroft, 1994

W. A. Lyons, 1994

D. Boccippio, 1995

GRS, 1996

S. A. Cummer, 1999 – rozwiązania odwrotne do wyznaczania momentów dipolowych

D. Boccippio, E. R. Williams , 1995 – pierwsze analizy sygnałów SPRITE

W. A. Lyons, 1999

GRS 2007

S. A. Cummer, 1999 – rozwiązania odwrotne do wyznaczania momentów dipolowych

Hayakawa, Nikolaenko, 2000 – 2015 – impulsy generowane przez trzęsienia Ziemi

GRS, 2010, 2011, 2014 – rozwiązania odwrotne, analiza źródeł

GRS 2012, 2013, 2014 – modelowanie falowodów grunt – jonosfera, inne planety

Wyjątkowość zakresu ELF - dzisiejszy punkt widzenia

zakres fal ELF jest propagacyjnie wyróżniony na planetach posiadających atmosfery

ich górne warstwy są zazwyczaj wystarczająco zjonizowane by odbijać fale ELF

w połączeniu z gruntem tworzą **falowody Grunt – Jonosfera (G-J)**

tłumienie fal ELF w falowodach G - J jest bardzo małe

nie konkuruje pod tym względem żaden inny zakres częstotliwości fal EM

Główne ośrodki zajmujące się badaniami fal ELF

od 1960 - MIT - Lincoln Laboratory

E. Williams

Rhode Island

od 1990 - Hungary

G. Satori

Nagycekk

od 1993 - Polska

GRS

Hylaty

od 1997 - Israel

C. Price

Mitzpe Ramon

od 1999 - Japan

M. Hayakawa

Moshiri

głównym utrudnieniem obserwacji są zakłócenia cywilizacyjne

w Europie jest niewiele miejsc czystych elektromagnetycznie

w Polsce rygorystyczny wymóg czystości spełniają wybrane miejsca w Bieszczadach

Grupa Rezonansu Schumanna – UJ / AGH



Kraków ELF Research Team

własna aparatura obserwacyjna, własna metodologia badań

Anteny fal ELF



antena magnetyczna

wielozwojowa cewka na rdzeniu magnetycznym

długość 0.6 do 1.5 m

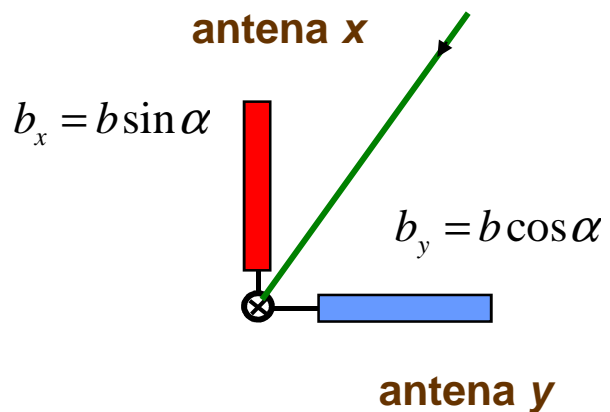


antena elektryczna

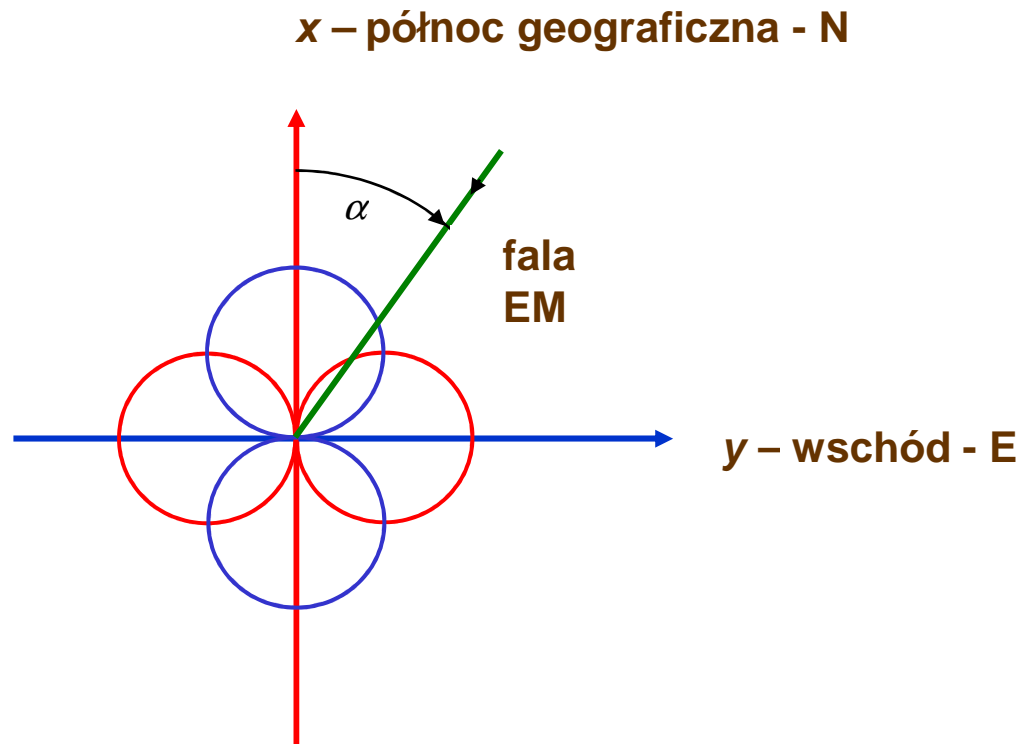
pręt pionowy

wysokość 1.5 m

Charakterystyki kierunkowe anten magnetycznych - wyznaczenie azymutu źródła



azymut $\text{tg } \alpha = \frac{b_x}{b_y}$



Odbiorniki ELF

1993



odbiornik ELA1

1 kanał

0.03 – 60 Hz

próbkowanie 175 1/s

dynamika 14 bit

12 V / 80 mW

RS232 notebook HDD

błąd czasu < 60 s

2004



odbiornik ELA7

4 kanały

0.03 – 60 Hz

próbkowanie 175 1/s

dynamika 16 bit

12 V / 600 mW

card CF 4 GB

błąd czasu < 500 μ s

2012



odbiornik ELA10

4 kanały

0.03 – 300 Hz

próbkowanie 900 1/s

dynamika 16 bit

12 V / 800 mW

card CF 16 GB

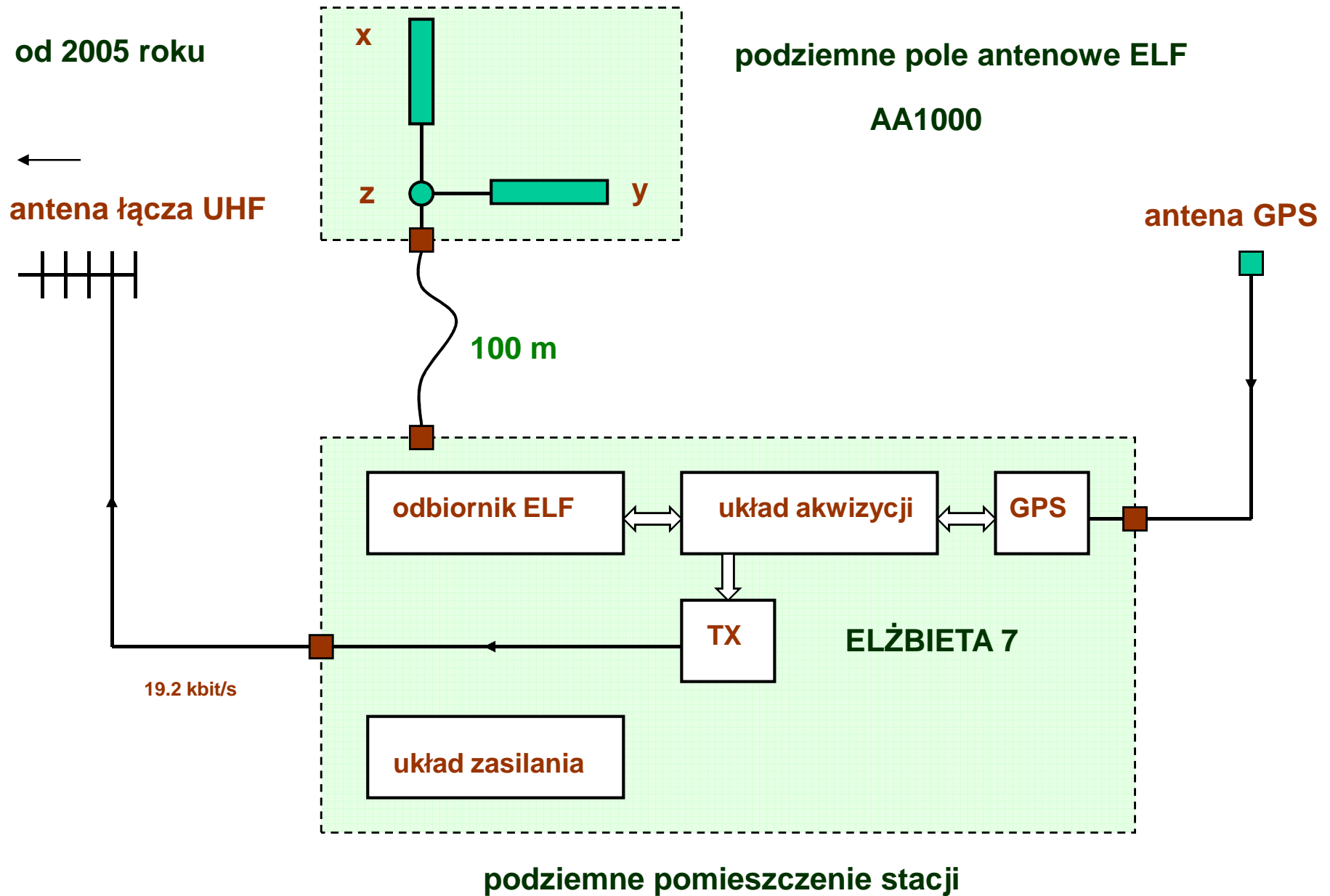
błąd czasu < 200 μ s

Odbiorniki ELA stosowane w badaniach krakowskich

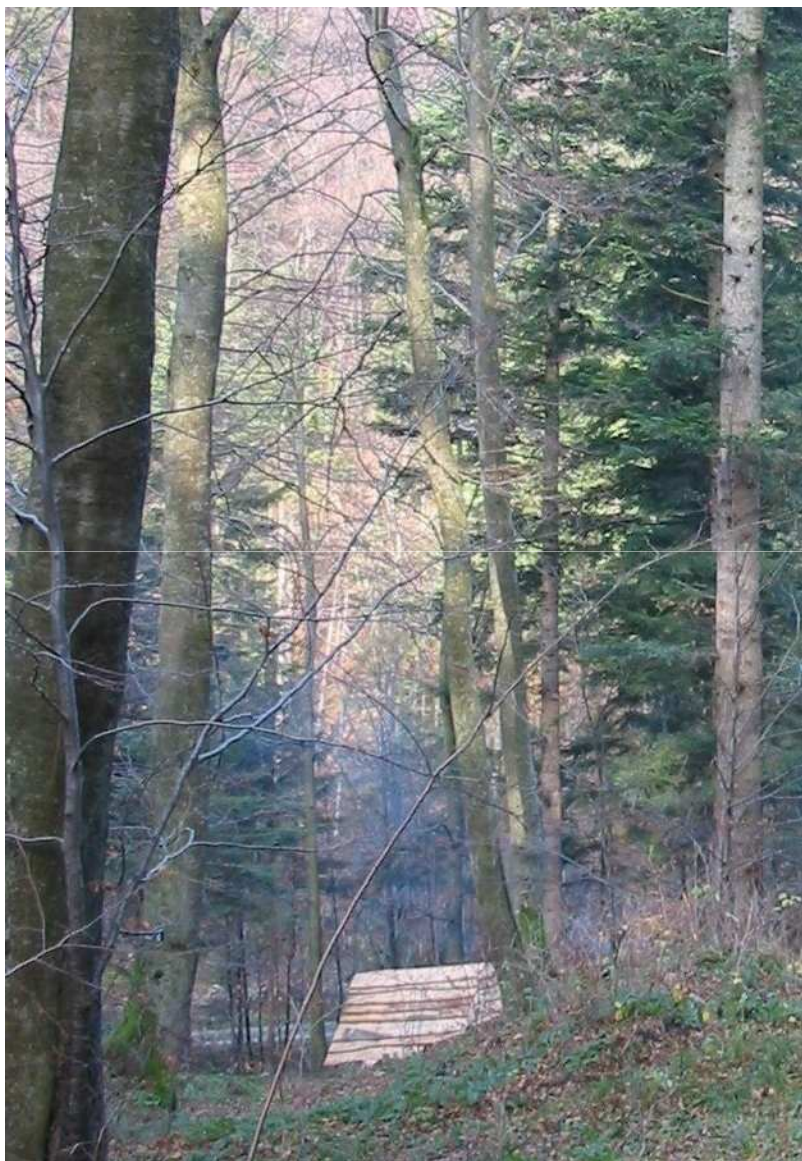
	ELA1	ELA2	ELA6	ELA7	ELA9	ELA10
year	1993	1997	2004	2006	2009	2012
number of units	1	2	1	2	2	3
destiny	expeditions	expeditions	continuous	continuous	continuous	continuous
chanelns	1 + 3	4 lub 8	4	4	2	4
antennas	AB1000	AB600	AA1000	AA1000	AA1130	AAS1130
noise limit	0,07 pT/Hz ^{1/2}	0,2 pT/Hz ^{1/2}	0,02 pT/Hz ^{1/2}	0,02 pT/Hz ^{1/2}	0,02 pT/Hz ^{1/2}	0,02 pT/Hz ^{1/2}
ADC	12 bit	12 bit	16 bit	16 bit	16 bit	16 bit
max frequency	60 Hz	20/40/60 Hz	60 Hz	60 Hz	60 Hz	300 Hz
sampling	180/240 Hz	50/100/180 Hz	175 Hz	175 Hz	175 Hz	900 Hz
processor	I8051	I8052	Atmega128	Atmega128	Atmega128	Atmega256
GPS time	-	-	-	+	+	+
time error	minutes	30 s/ month	30 s/ month	500 μs	500 μs	200 μs
modem GSM	-	-	-	external	external	external
data storage	notebook HDD	notebook HDD	card CF 1GB	card CF 4GB	card CF 4GB	card CF 16GB
data transmission	RS232	RS232	RS232	RS232 RS485	RS485 USB	RS485 USB
battery	6 x R20	12 V/12 Ah	12V/260 Ah	12V/260 Ah	12 V/12 Ah	12V/260 Ah
power	80 mW	1400 mW	600 mW	600 mW	600 mW	800 mW



Obserwatorium fal ELF Hylaty w Bieszczadach



Wejście do podziemi stacji



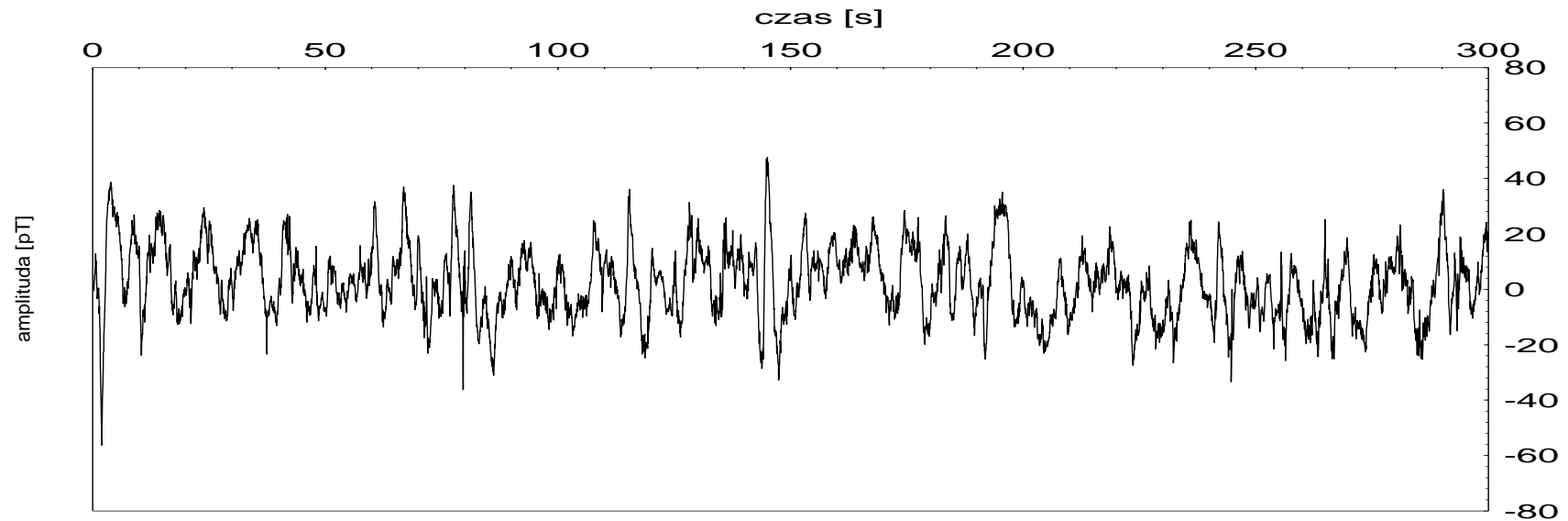
Podziemne pole antenowe



Podziemne pomieszczenie aparaturowe stacji / anteny magnetyczne ELF



300 sekundowy plik standardowy



plik standardowy – 300 s - 52 500 16 bitowych próbek pola

pliki są tworzone „na styk”

w takich przebiegach zawarte są informacje o wielu procesach planetarnych

obserwacja poszczególnych typów zjawisk wymaga specyficznych metod analizy

od listopada 2009 samplowanie z dokładnością czasu GPS

Baza danych obserwacyjnych

od 1994 wysokiej jakości materiał obserwacyjny w paśmie 0.03 – 60 Hz

wysokiej jakości filtry antyaliasingowe > 35 dB na $f_s / 2$

niski poziom szumu anten magnetycznych

optymalna lokalizacja stacji obserwacyjnej

plik standardowy – 300 s

1994 – 2005 obserwacje sporadyczne – 50 ekspedycji kilkudniowych – 10 tys. plików

od 2005 – obserwacja ciągła – pasmo 30 mHz do 60 Hz - 2 współrzędne magnetyczne

60 MB / doba

22 GB / rok

od 2008 – precyzyjny timing próbek – 500 μ s

od 2013 – równolegle obserwacja ciągła – pasmo 30 mHz do 300 Hz - 2 współrzędne magnetyczne

300 MB / doba

110 GB / rok

od 2015 – dodatkowo stacja obserwacyjna HUGO

Teoria - falowod Grunt-Jonosfera

wysokość falowodów planetarnych w zakresie ELF jest zawarta w granicach 50 – 100 km

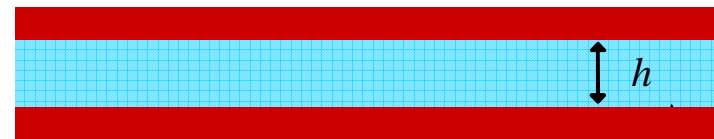
jest ona w szerokim zakresie częstotliwości jest mniejsza od połowy długości fali

na Ziemi $\frac{\lambda}{2} > h \longrightarrow f < 1500 \text{ Hz}$



równania Maxwella – zmienne E i H

linia paskowa - mikrofałe

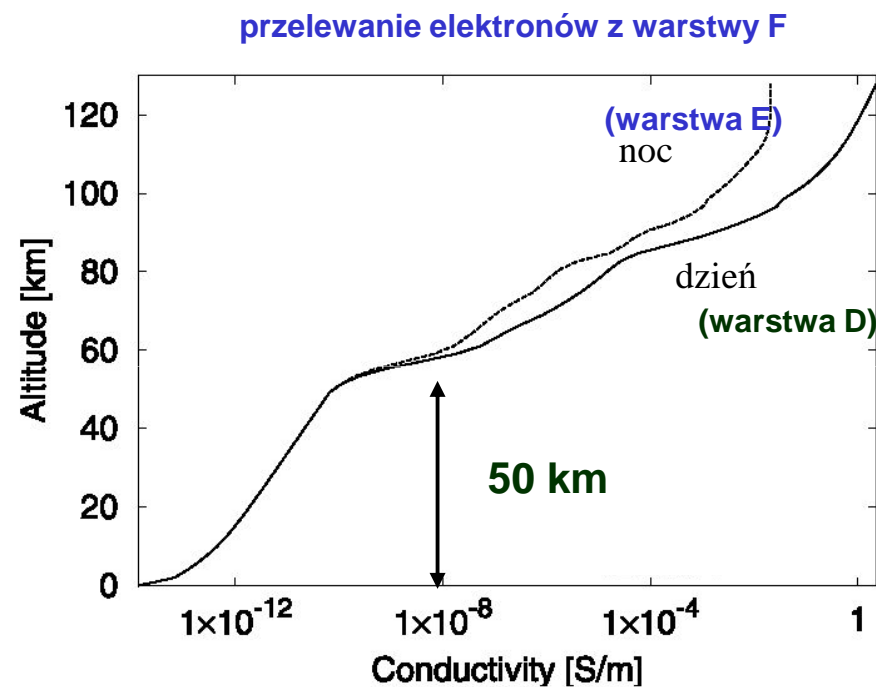
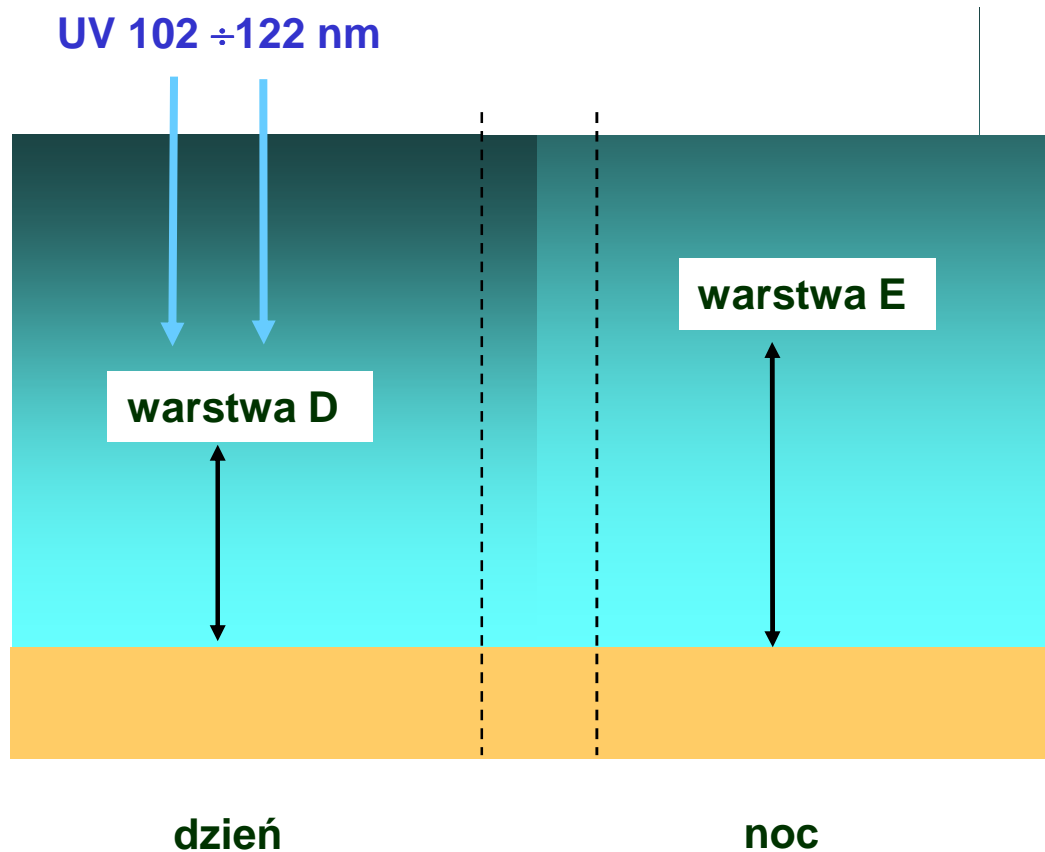


równania obwodowe Kirchhoffa – zmienne U, I

równanie falowe Kleine-Gordona

Fizyczna budowa falowodu G-J

słabo zjonizowana plazma o rosnącej przewodności

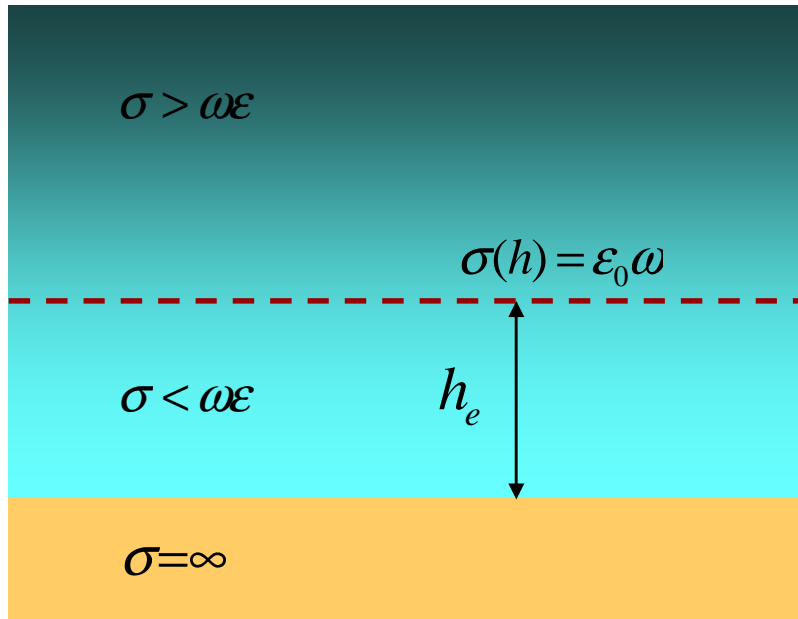


wysokości daytime różnią się od nocnych

→ w pierwszym przybliżeniu model „uniform”

Fala EM w falowodzie G-J

wysokość „elektryczna”



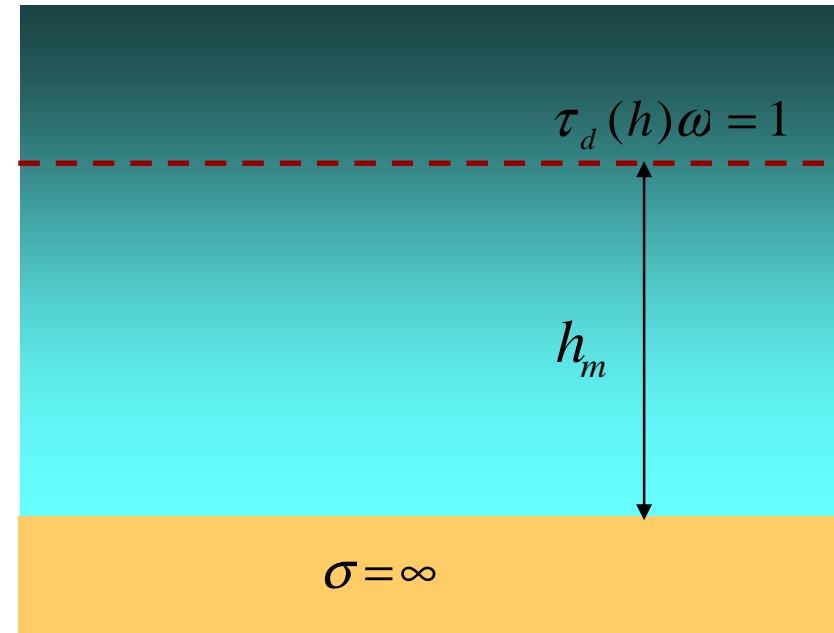
granica wnikania pola E

prąd przewodzenia

zrównuje się z prądem przesunięcia

$$h_e \approx 55 \text{ km}$$

wysokość „magnetyczna”



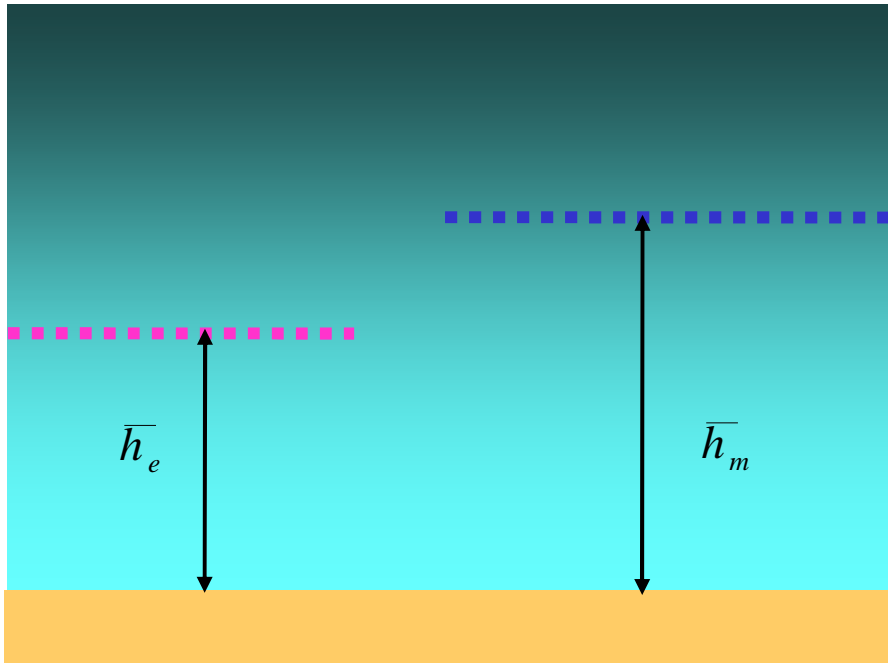
granica wnikania pola H

wysokość na którą pole magnetyczne
fali zdąży wdyfundować w czasie 1 okresu

$$h_m \approx 95 \text{ km}$$

$$f = 10 \text{ Hz}$$

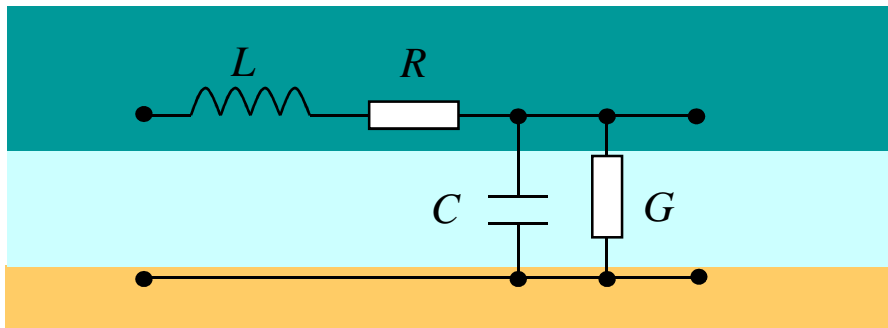
Reprezentacja fizyczna falowodu G-J



$\left. \begin{array}{l} \bar{h}_e \\ \bar{h}_m \end{array} \right\}$ zespolone wysokości charakterystyczne E i H

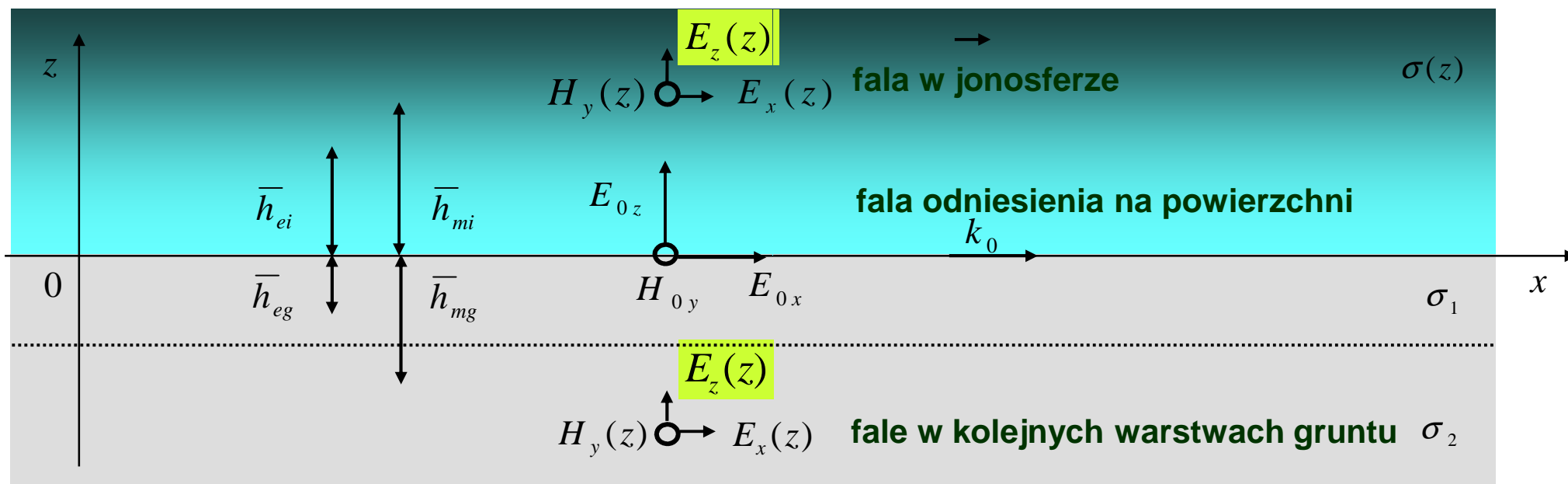
prędkość fazowa $\frac{c}{v_{ph}} = \text{Re} \sqrt{\frac{\bar{h}_m}{\bar{h}_e}}$

współczynnik tłumienia $\alpha = \frac{\omega}{c} \text{Im} \sqrt{\frac{\bar{h}_m}{\bar{h}_e}}$



$\left. \begin{array}{l} \bar{L} = \frac{\mu \cdot \bar{h}_m}{w} \\ \bar{C} = \frac{\epsilon_0 w}{\bar{h}_e} \end{array} \right\}$ parametry jednostkowe linii

Ogólny model falowodu G - J



daje analityczne rozwiązania dla wysokości h_e i h_m dla dowolnego duktu w ośrodku niejednorodnym

$$\delta_m = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \sigma \omega}}$$

$$\delta_e = \sqrt{\frac{2 \varepsilon_0^2 \omega}{\mu_0 \sigma^3}}$$

(efekt Casimira)

atmosfera

$$h_{mi} = 97.3 \text{ [km]}$$

$$h_{ei} = 56.3 \text{ [km]}$$

grunt

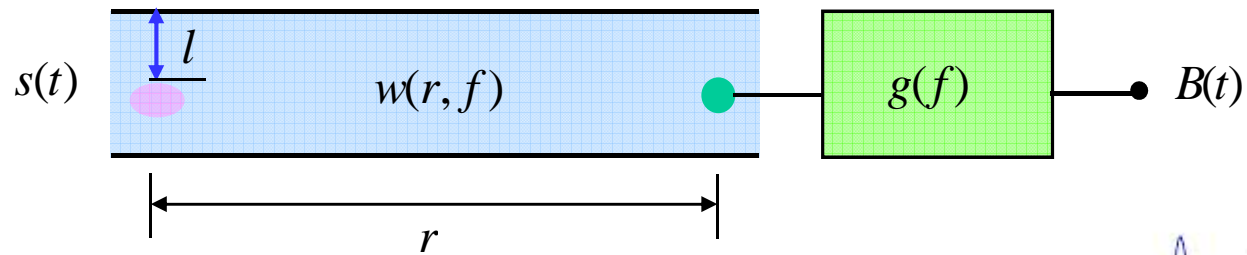
$$h_{mg} = 5 \text{ [km]}$$

$$h_{eg} = 2.7 \text{ [mm]}$$

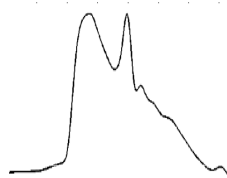
Rozwiązania odwrotne - odtwarzanie parametrów źródeł

funkcja transmitancji falowodu G - J

funkcja transmitancji odbiornika ELF



wyładowanie



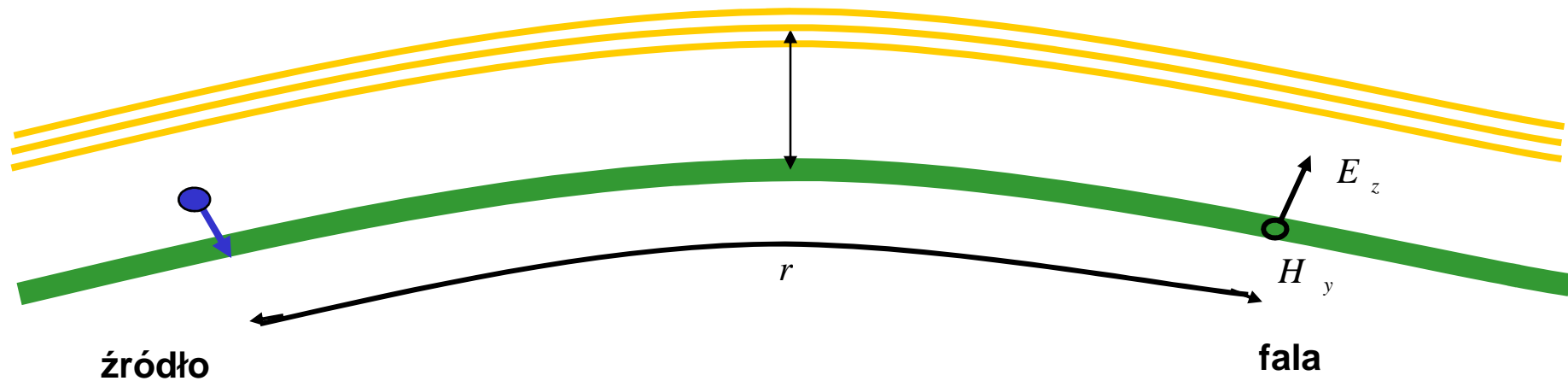
obserwacja



rozwijamy intensywnie metody odwrotne

przygotowywane są algorytmy do tomografii Marsa

Typowe parametry propagacyjne falowodu G - J na Ziemi



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

prędkość fazowa fal silnie zależy od częstotliwości: $v = 0.83 c$ dla 10 Hz

tłumienie fal silnie zależy od częstotliwości: na 10 Hz spadek energii do połowy na 10 000 [km]

niezwykła stałość parametrów propagacyjnych

w cyklu 11 letnim zmiana prędkości fazowej jest rzędu 3 %

w cyklu 11 letnim zmiana współczynnika tłumienia jest rzędu 15 %

z dnia na dzień zmiany współczynnika tłumienia nie większe niż 0.2 %

Promieniowanie pionowego dipola elektrycznego w falowodzie G-J



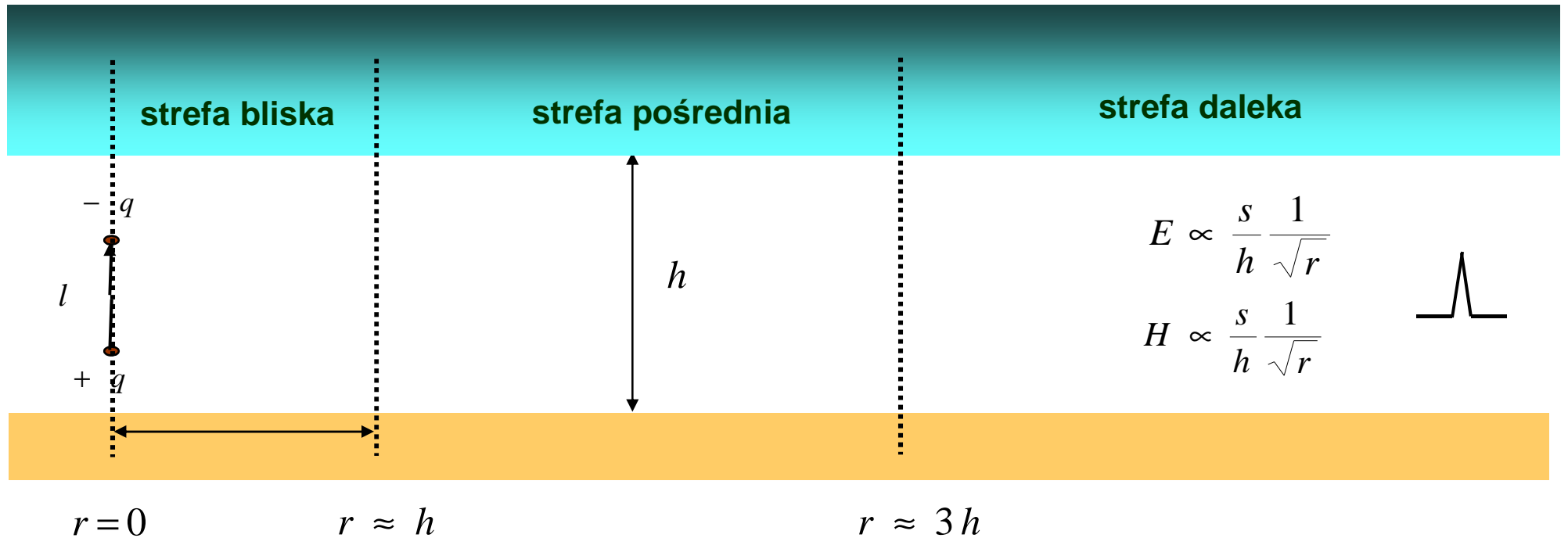
$$p(t) = ql U(t)$$

przebieg momentu dipolowego



$$s(t) = \dot{p} = ql \delta(t)$$

przebieg momentu prądowego



strefa bliska kończy się w odległości h od źródła (w odległości ok. 100 km)

Naturalne źródła fal ELF w falowodzie G-J

podstawowe źródło - wyładowania elektryczne w atmosferze

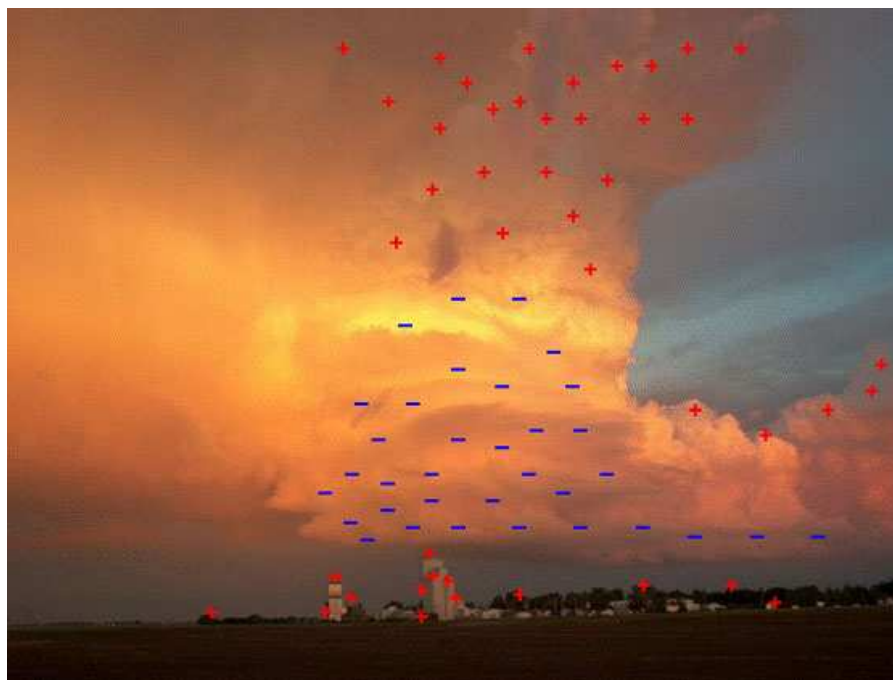
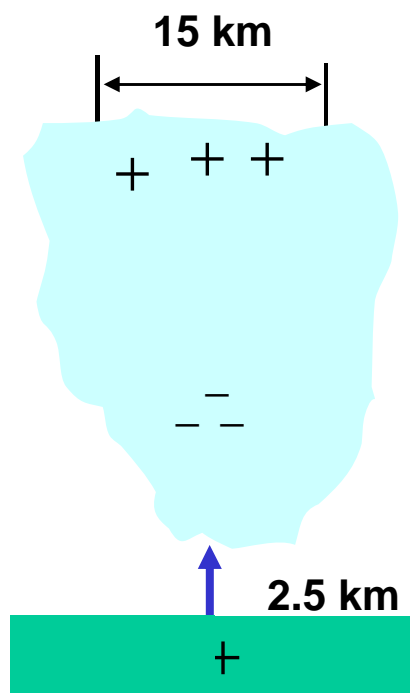
fale przenikają również z przestrzeni wokółziemskiej – magnetosfery (słaba konwersja)

wzbudzają je również trzęsienia ziemi

wyładowania atmosferyczne w kolejności częstości występowania:

	skala energii	
CC - chmura – chmura		0.1
CG ⁻ - ujemne chmura – grunt		1
CI - wewnątrzchmurowe		10
CG ⁺ - dodatnie chmura – grunt		1000
IC – wyładowanie jonosfera – chmura typu SPRITE		10 000
IC typu Gigantic Jet (GJ)		

Wyładowania ujemne chmura – grunt (CG⁻)



wewnątrz komórek burzowych zachodzi separacja ładunków - mechanizm prądnicy
na dole gromadzą się ładunki ujemne prowadzące do dużej różnicy V
dochodzi do przebicia powietrza i gwałtownego rozładowania chmury
w typowej chmurze burzowej wyładowanie jest możliwe co kilka sekund
na Ziemi stale działa ok. 1500 burz – zachodzi ok. 50 wyładowań CG⁻ / sekundę

Wyładowanie ujemne CG⁻ jako źródło



$$q = 2.5 \text{ [C]}$$

typowy ładunek

$$l = 2.5 \text{ [km]}$$

długość kanału wyładowania

$$W = 20 \text{ [MJ]}$$

zgromadzona energia elektrostatyczna

$$\tau = 75 \text{ [}\mu\text{s]}$$

czas rozładowania (wyładowanie udarowe)

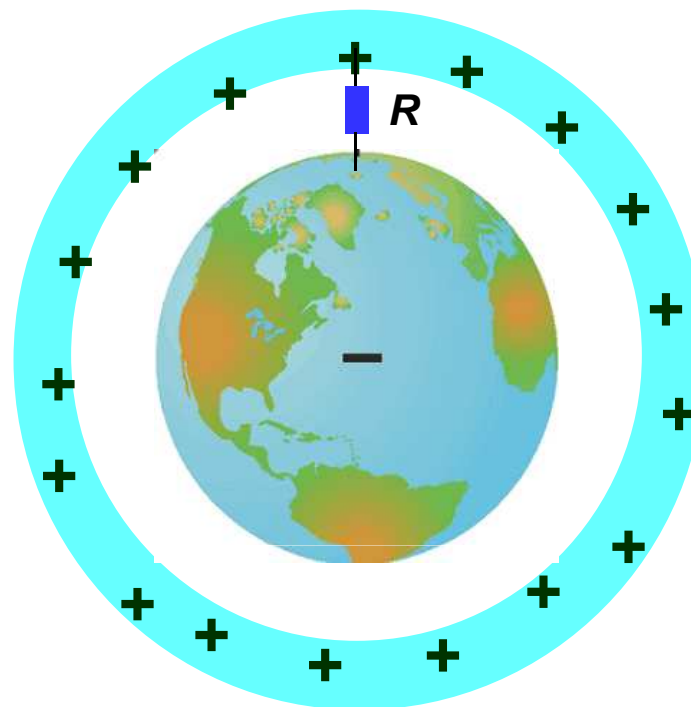
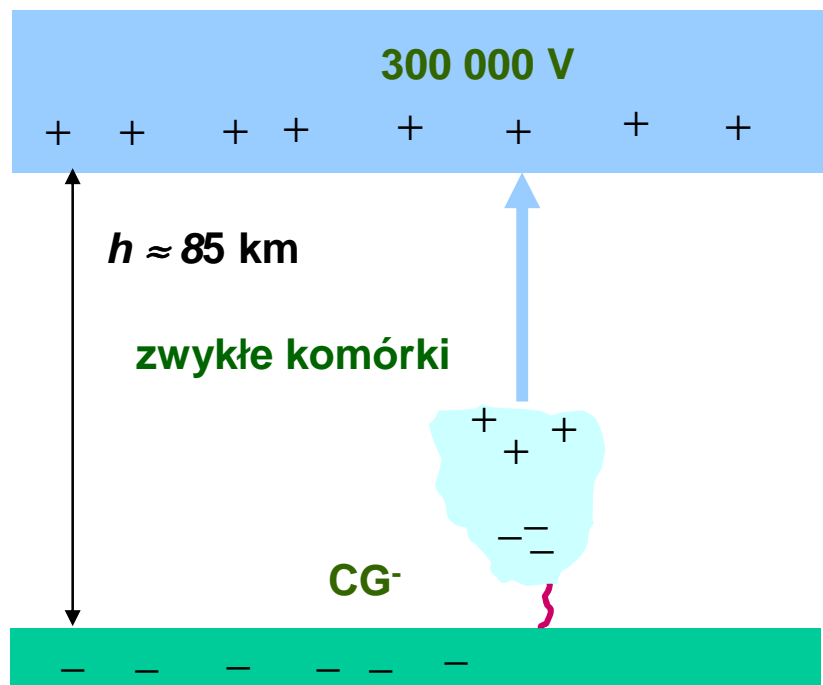
$$I_{\max} = 20\,000 \text{ [A]}$$

typowy prąd maksymalny (antenowy)

$$P_{em} \approx 100 \text{ [W]}$$

chwilowa moc promieniowana w zakresie ELF (widmo płaskie)

I globalna konsekwencja wyładowań ujemnych - naładowana jonosfera Ziemi



potencjał jonosfery – 300 000 V

pojemność jonosfery – 1.8 F

zgromadzony ładunek – 540 000 C

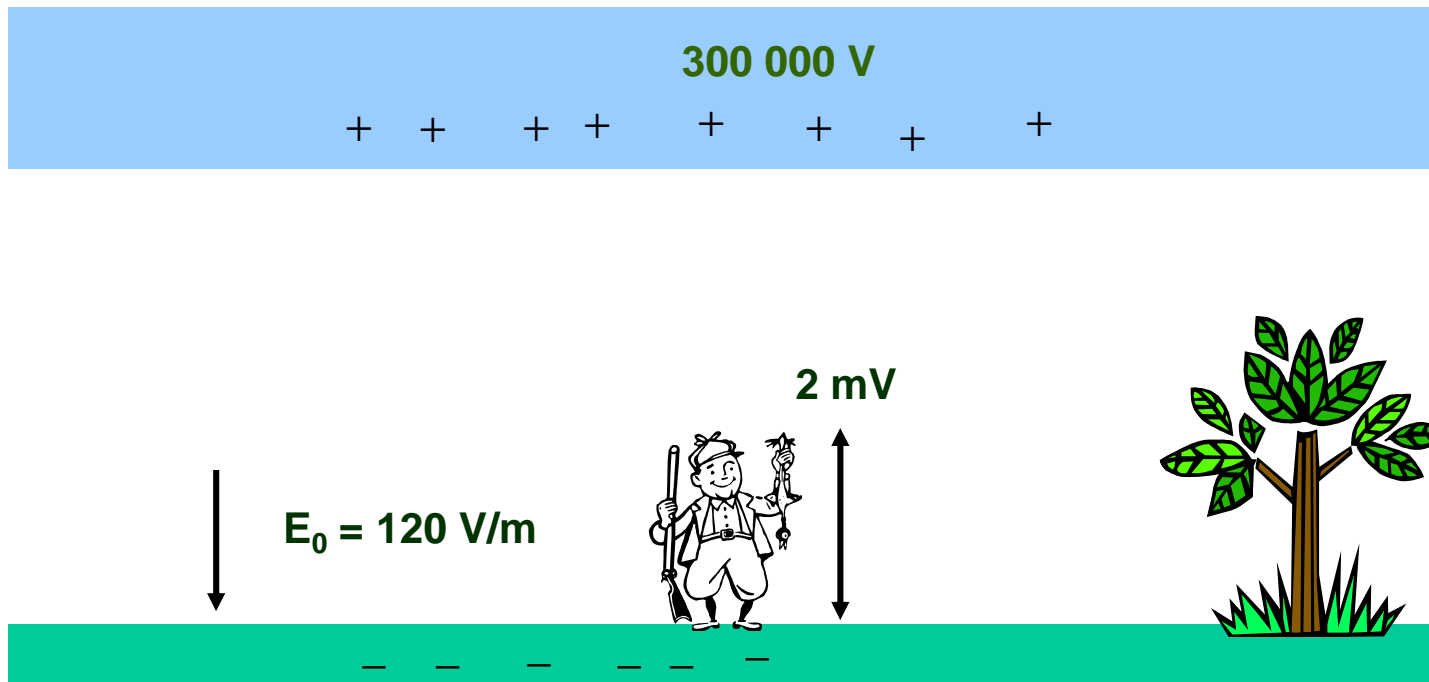
oporność upływu - 220 Ω

prąd upływu – 1360 A

moc cieplna upływu wydzielana w atmosferze – 400 MW

1927 - C. T. R. Wilson – Nagroda Nobla

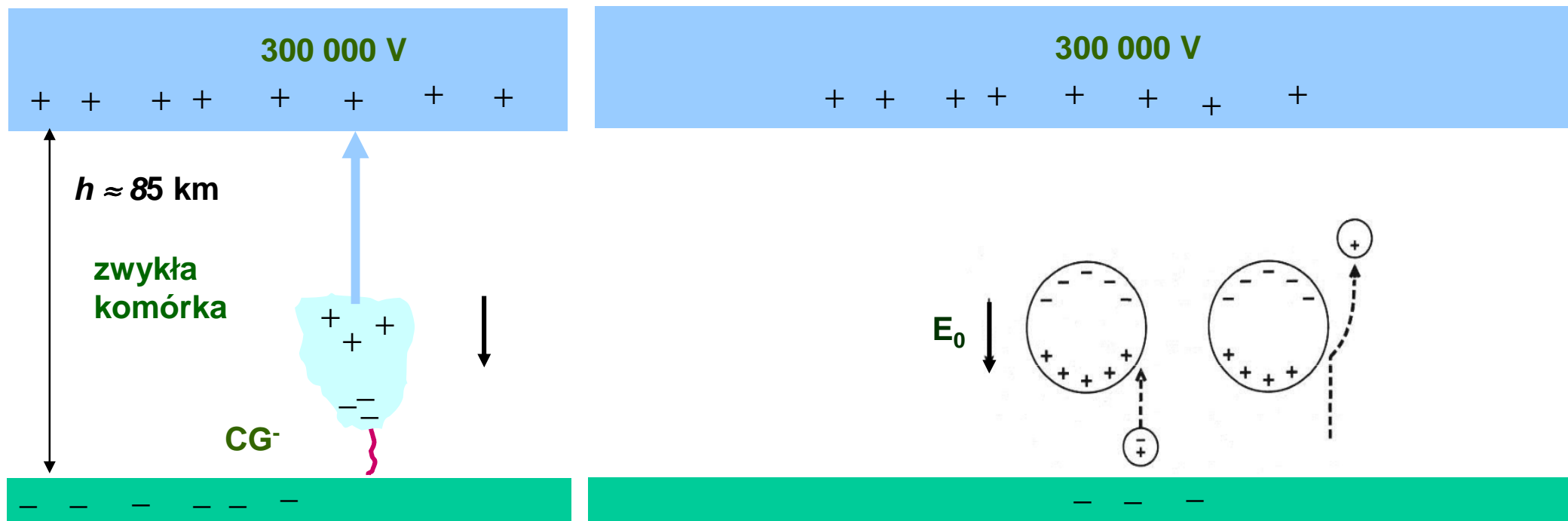
I globalna konsekwencja - cd



mieszkamy wewnątrz naładowanego kondensatora sferycznego

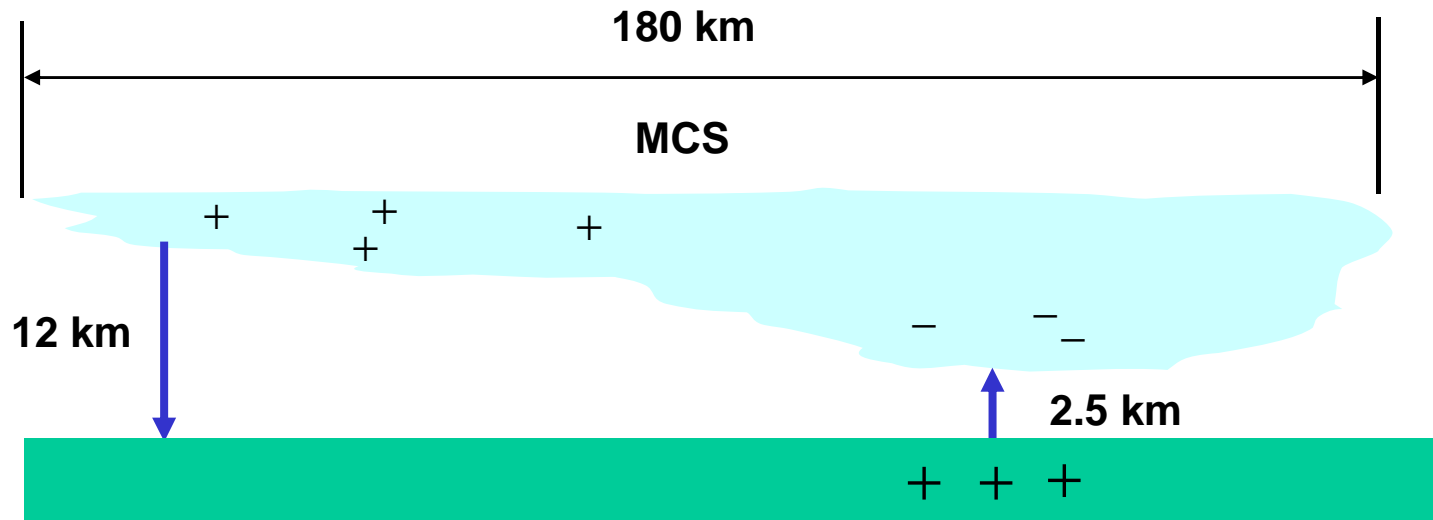
istnieje stałe pole elektryczne na powierzchni gruntu

Dzięki naładowanej jonosferze możliwe są burze



mechanizm separacji ładunku w chmurze burzowej zachodzi dzięki istnieniu pola E

Wyładowania dodatnie chmura-grunt (CG⁺)

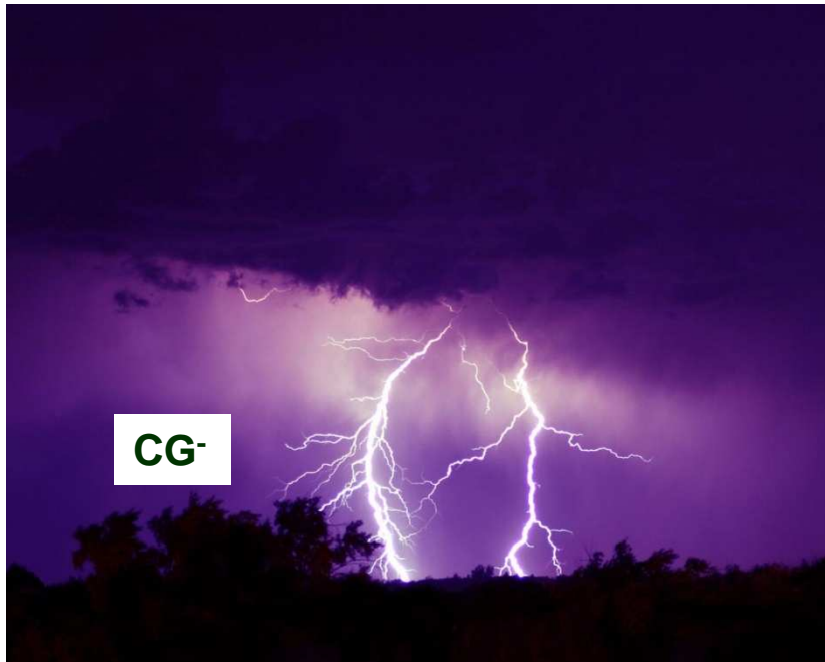


wielka komórka burzowa - mezoskalowy system konwekcyjny - MCS

wyładowania dodatnie CG⁺ powstają w wydłużonej części chmury

są rzadkie – na Ziemi 1 wyładowanie co kilkanaście sekund

Czym się różnią wyładowania dodatnie od ujemnych ?



wyładowanie ujemne chmura – grunt

typowy prąd - ok. 20 000 A
energii rzędu 10 milionów J



wyładowanie dodatnie chmura - grunt

prądy sięgające 200 000 A
energii rzędu 100 milionów J

Fale ELF wytwarzane przez wyładowania dodatnie CG⁺



typowe

$$q = 15\text{ [C]}$$

$$l = 12\text{ [km]}$$

$$p = 225\text{ [C km]}$$

$$W = 100\text{ [MJ]}$$

$$\tau = 200\text{ [\mu s]}$$

$$I_{\max} = 100\,000\text{ [A]}$$

ładunek

długość kanału wyładowania

moment dipolowy ładunków

zgromadzona energia

czas rozładowania

prąd maksymalny

bardzo silne (Q-bursty)

$$q = 100\text{ [C]}$$

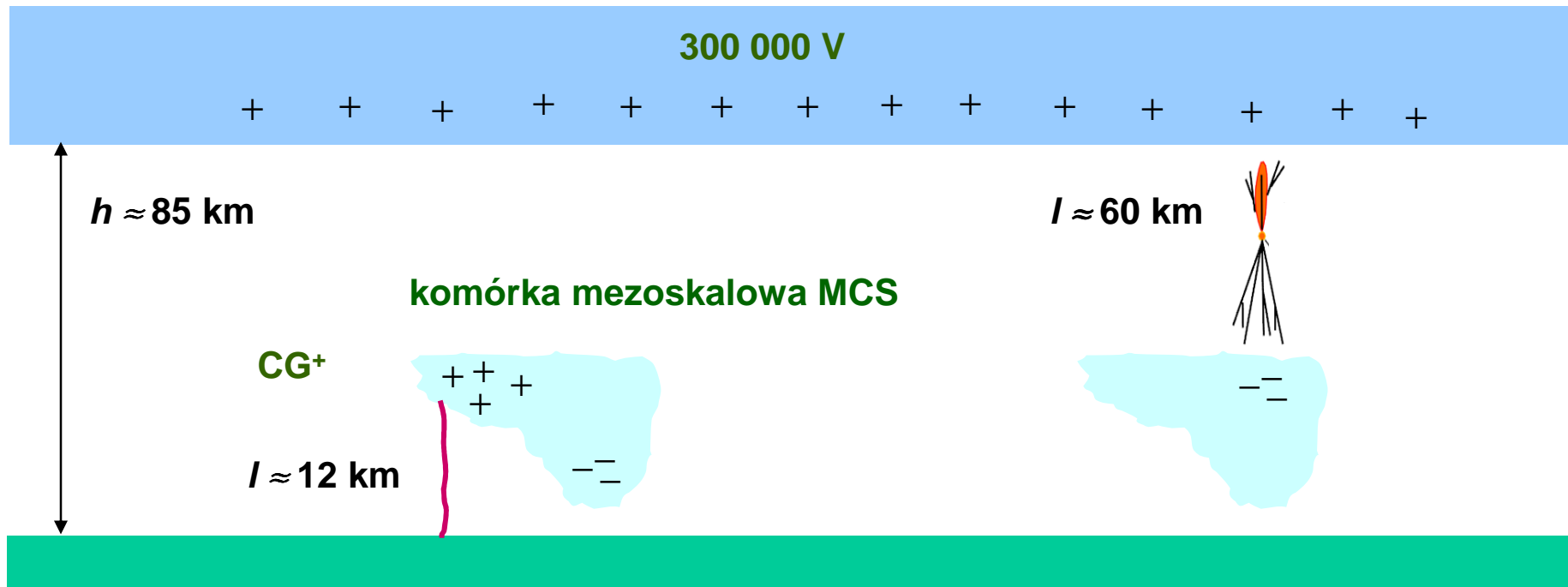
$$l = 12\text{ [km]}$$

$$p = 1200\text{ [C km]}$$

$$W = 1400\text{ [MJ]}$$

widoczny wielokrotny obieg impulsu wokół Ziemi

Wyładowania Jonosfera - Chmura (IC)



wyładowanie CG⁺ usuwa ładunek dodatni z górnej części chmury

ładunek ujemny przesuwa się do góry

dochodzi do przyspieszania elektronów w kierunku jonosfery

wytwarza się prekursor i przebicie lawinowe (RS)

dochodzi do przepływu prądu z jonosfery do chmury (IC)

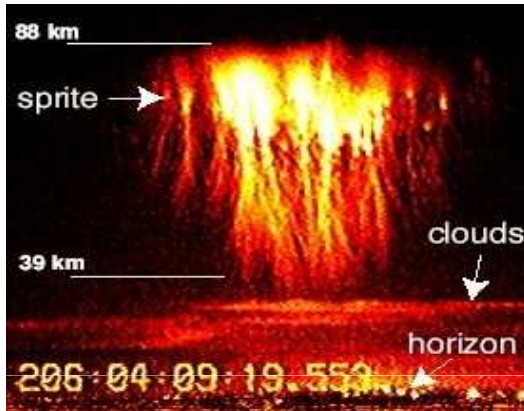
potencjał jonosfery w wyniku wyładowania opada o 10 V

Efekty optyczne związane z wyładowaniami Jonosfera - Chmura

optycznie widoczne jako TLE

(Transient Luminous Event)

orbitalnie: ISUAL, EUSO



SPRITE

czas trwania świecenia : ok. 100 ms

jasność całkowita: 1 - 10 MR (mega Rayleigh)

czas wyładowania: ok. 200 ms



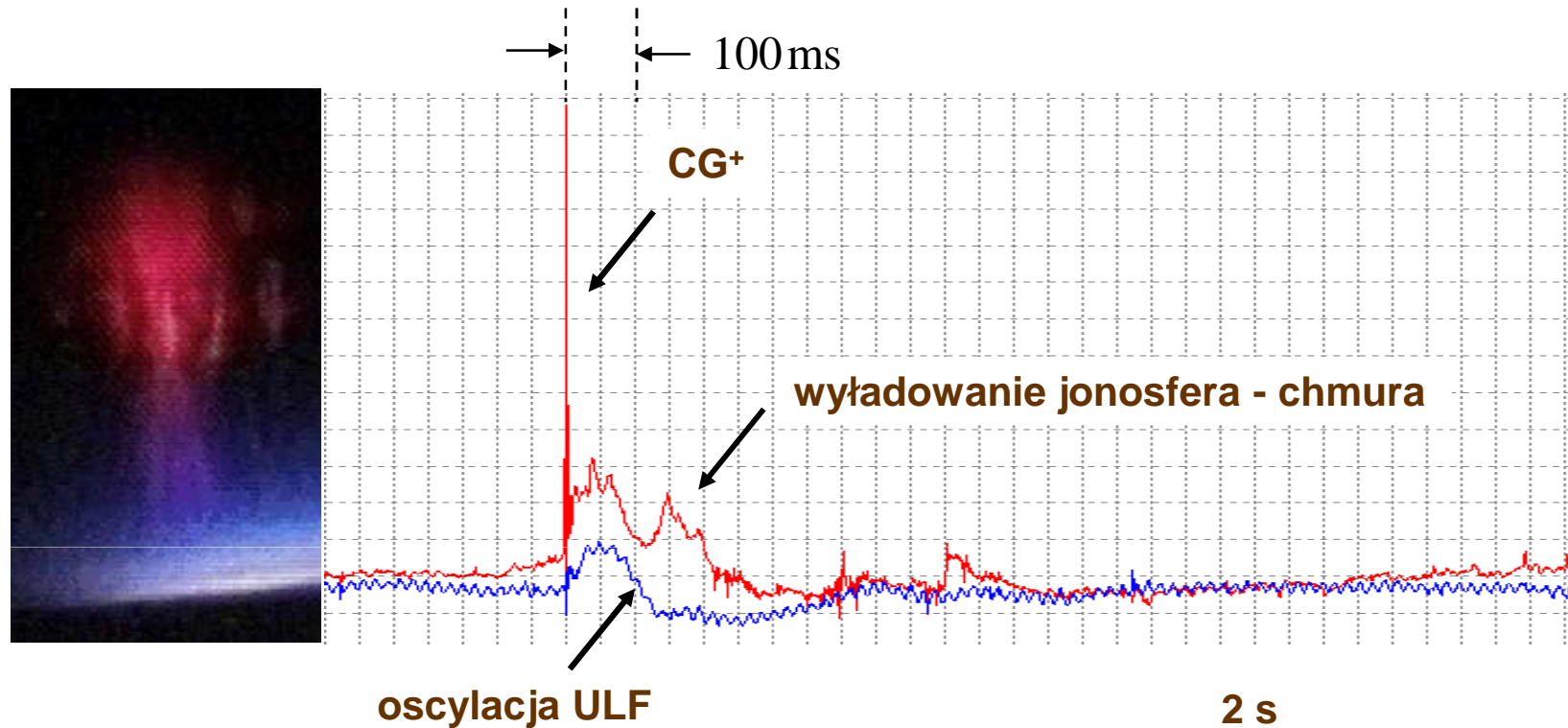
GJ (Gigantic Jet)

czas trwania świecenia : ok. 20 ms

jasność całkowita: ok. 3 MR

czas wyładowania: ok. 100 ms

Impulsy ELF generowane przez SPRITE



S13 23.06.2013 22:56:44.244 (750 km od Hylatego)

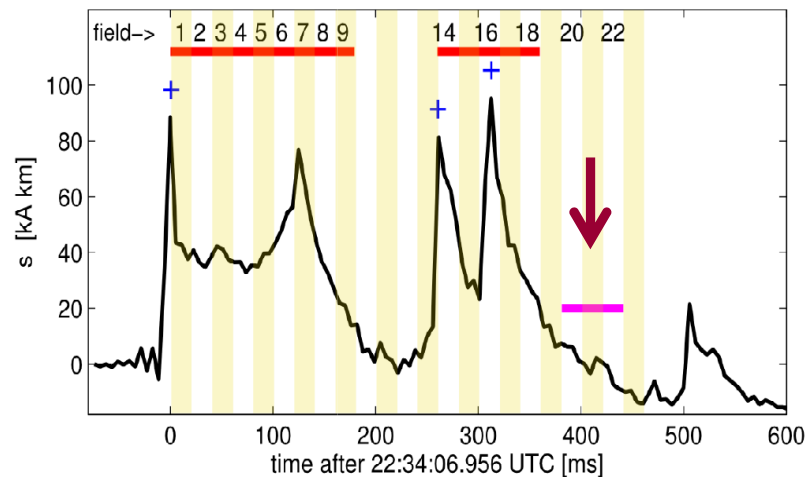
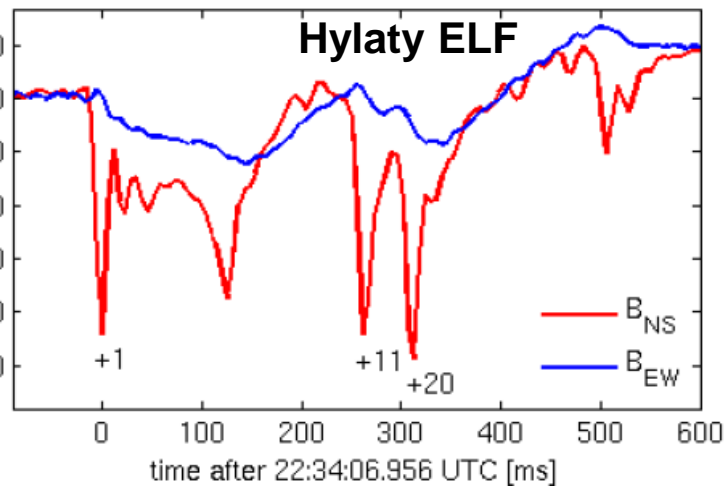
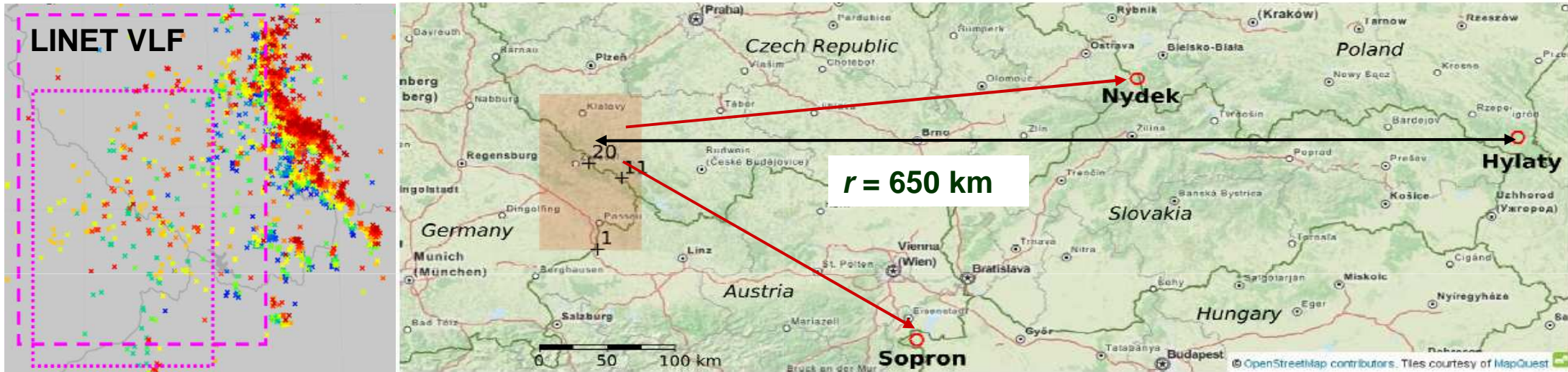
CG⁺ – wyładowanie CG⁺ do gruntu

ULF – fala podłużna, prawdopodobnie wzbudzana lokalnie w rezonatorze IAR

Przykład - studium serii sprajtów zakończonej trolelem

duża komórka MCS nad Niemcami - noc sprajtów 6 sierpnia 2013 (ogółem 100)

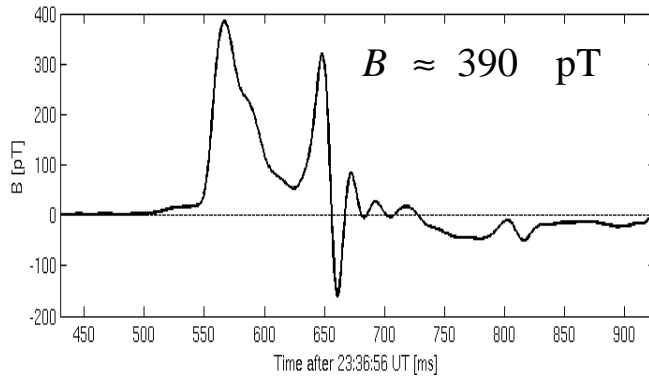
prowadzono jednoczesne obserwacje przy pomocy 2 kamer, stacji Hylaty i stacji LINET-u



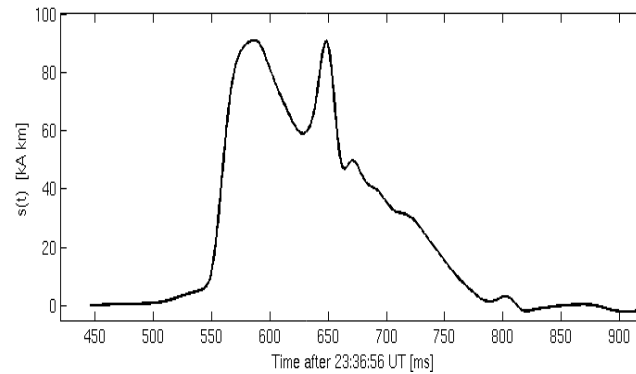
2014 - JGR

Odtworzenie parametrów europejskiego GJ

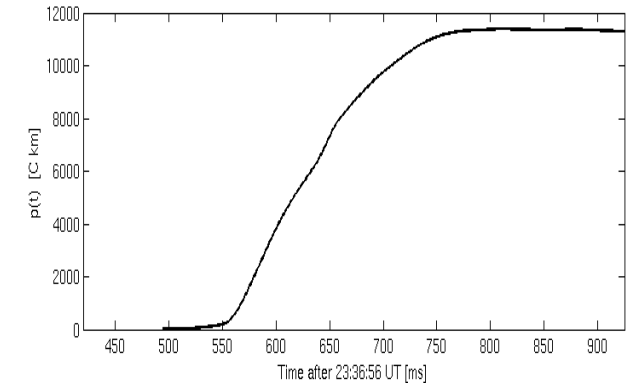
przebieg pola magnetycznego



przebieg momentu prądowego



moment dipolowy



odległość od Hylatego $r \approx 1400 \text{ [km]}$

moment dipolowy $p \approx 1.2 \cdot 10^4 \text{ [C km]}$

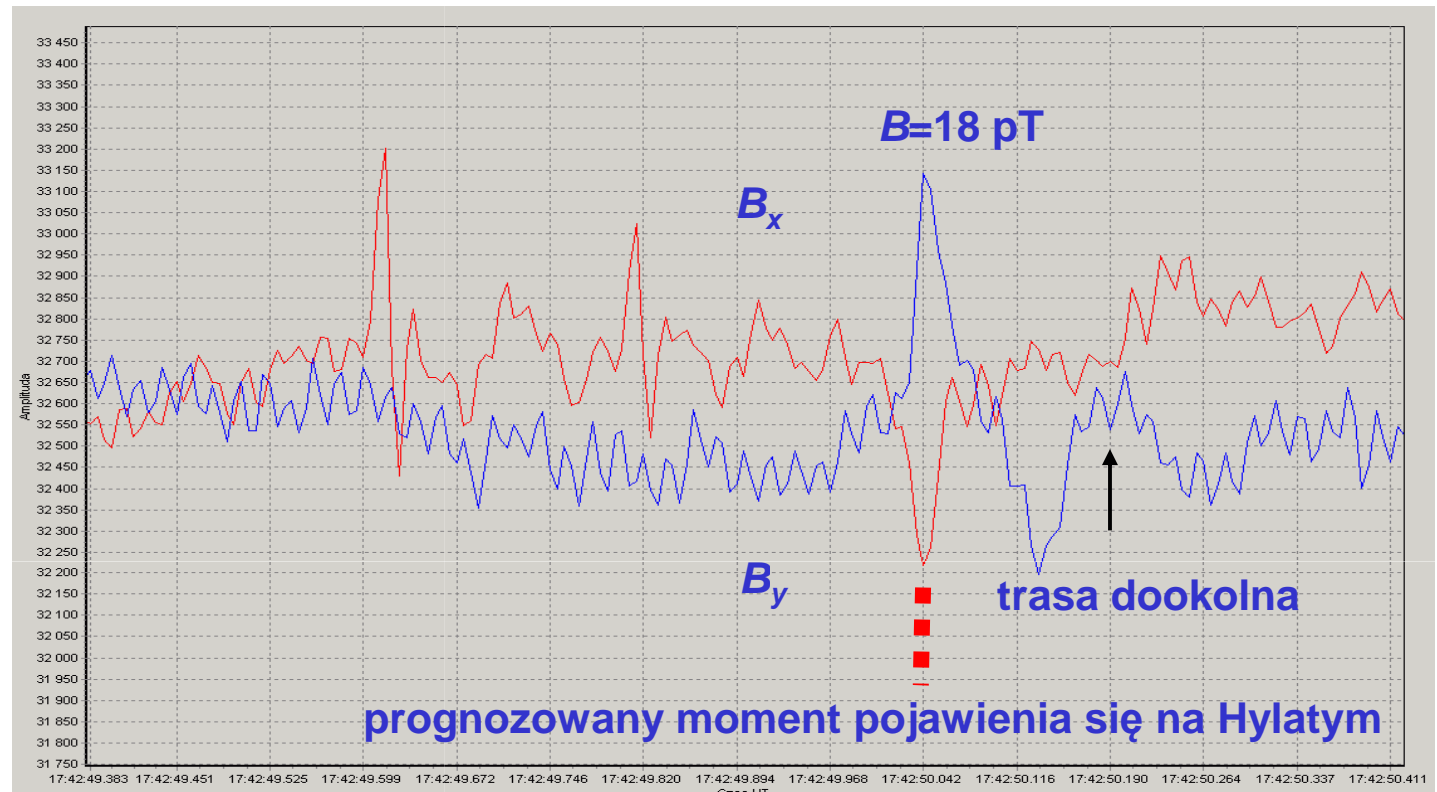
długość kanału wyładowania wynikająca z pomiarów optycznych $l \approx 60 \text{ [km]}$

wynikający stąd przeniesiony ładunek $q = p / l \approx 200 \text{ [C]}$

energia rozładowania układu ładunków $W \approx 6 \text{ [GJ]}$

równoważnik 1 kt TNT $\longleftrightarrow W \approx 1.5 \text{ [kt TNT]}$

Inny przykład - Madagaskar



Madagaskar – 7 marca 2010 – 6 GJ w ciągu kilku minut

GJ2 - moment wystąpienia maksimum 17:42:50.042

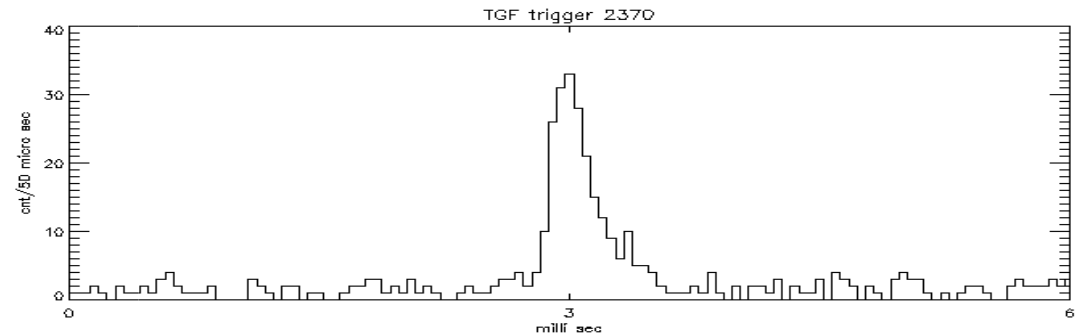
czas moment kamery 17:42:50.000

moment dipolowy szybkiej fazy wyładowania RS: $\rho = 700 \text{ C km}$

Badania wyładowań emitujących ziemskie błyski gamma (TGF)

1992 - satelita BATSE Compton Gamma Ray Observatory

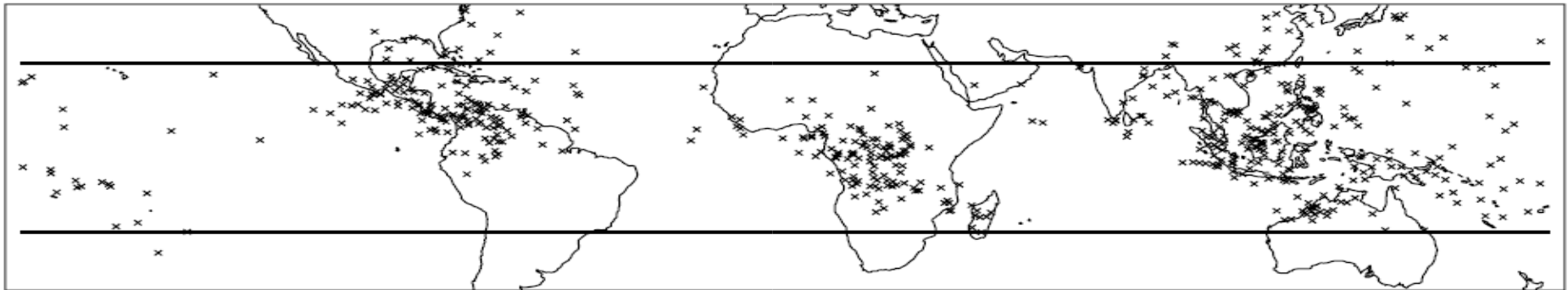
[Fishman et al., 1994]



typowy czas trwania 1 ms

fotony powyżej 1 MeV, widoczne ponad chmurami (ponad 40 km)

podejrzenie: wyładowania IC, SPRITE ?

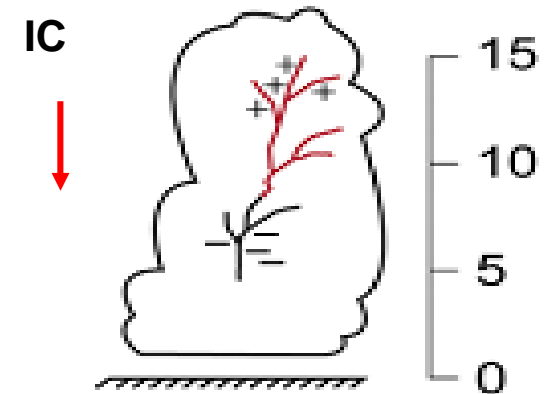
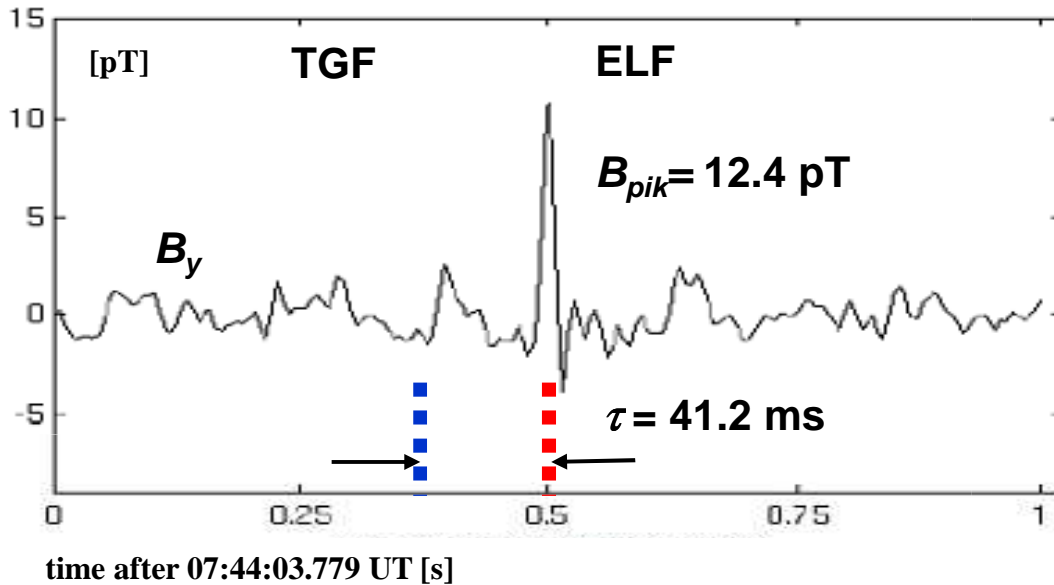


rozmieszczenie - satelita RHESSI - 1.03.2002 do 15.09.2005 – 561 TGF

dla nas bezpośrednim impulsem była praca *M. S. Briggs* w JGR, 2010,
„First results on TGF from Fermi Gamma-ray Monitor”

Przykład wyładowania wewnątrzchmurowego związanego z TGF 081113

TGF - Camerron 7.33 E, 2.89 N - 13 Nov 2008



impuls ELF o sygnaturze dodatniej

$r = 5352$ km

$\tau = 41.2$ ms

$B_{pik} = 12.4$ pT

← przewidywane

zmierzone

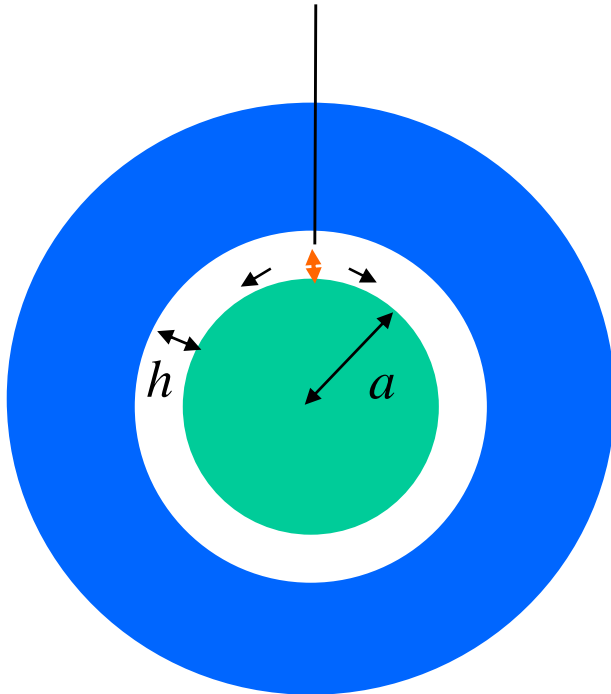
→ $\tau = 41.0$ ms

→ $\rho = 320$ C km jest to silne wyładowanie

3 z 8 TGF, położone w odległości mniejszej niż 6000 km

II globalna konsekwencja występowania wyładowań ujemnych – rezonans Schumanna

w czasie lokalnym ok. 14 LT – działają na Ziemi wielkie tropikalne centra burzowe



globalna częstość wyładowań $\langle \lambda \rangle = 50$ [1/s]

średnia moc wyładowań $\langle P \rangle = 1$ [GW]

współczynnik konwersji energii na ELF $\alpha = 10^{-6}$

średnia energia pola ELF we wnętrzu $\langle W \rangle = 1000$ [J]

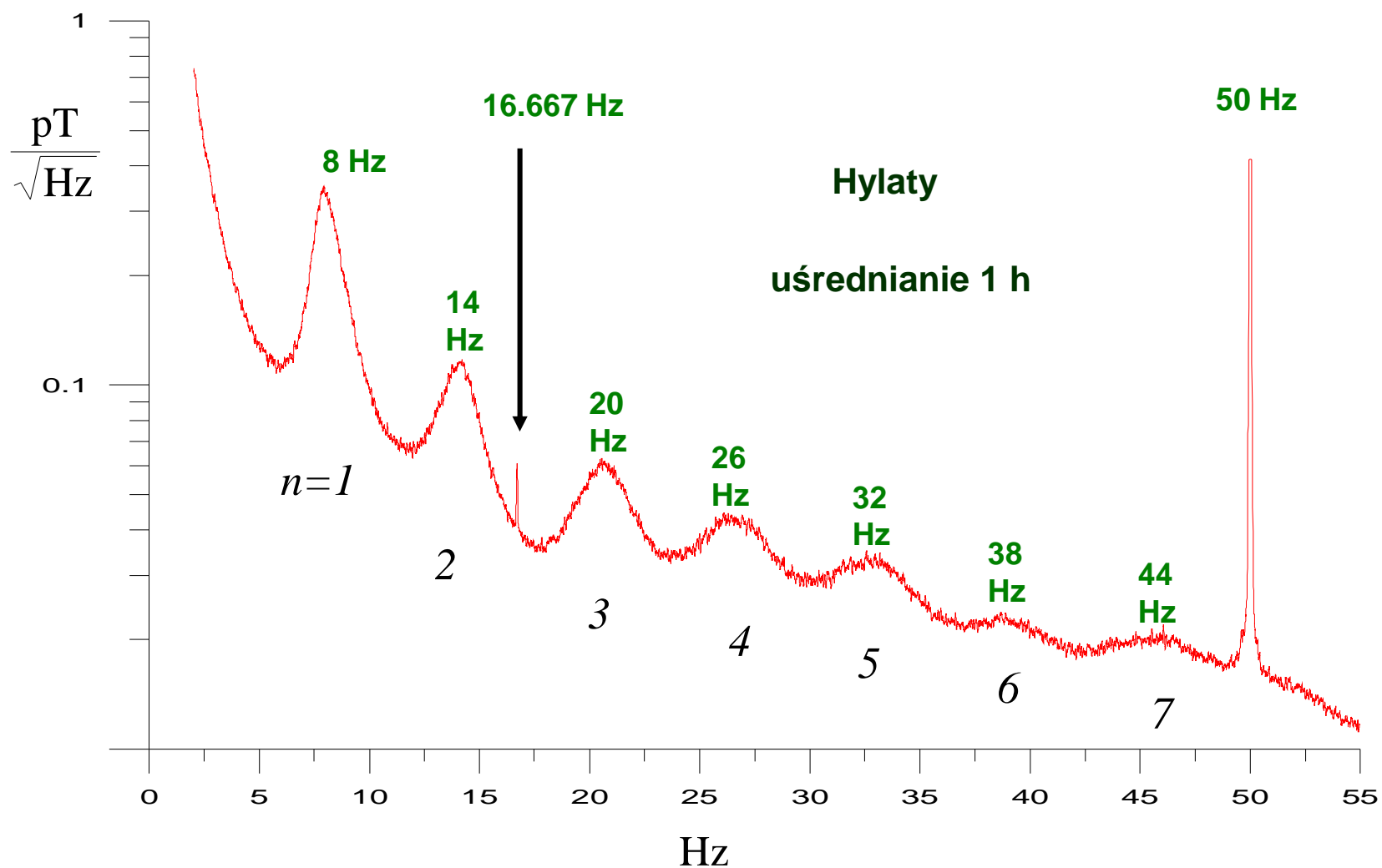
czas zaniku energii pola we wnętrzu 1 [s]

średnia moc pompowania rezonansu Schumanna $\langle P \rangle = 1000$ [W]

moc odbierana przez antenę ELF 10^{-20} [W]

amplituda pierwszego modu rezonansu 8 Hz ok. $B \approx 1 \left[\frac{\text{pT}}{\sqrt{\text{Hz}}} \right]$

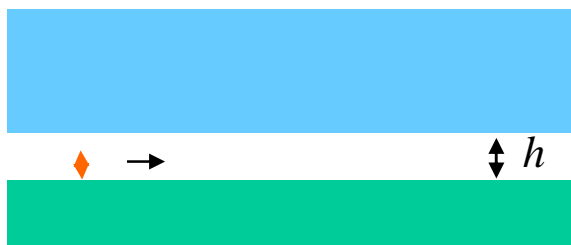
Rezonans Schumanna - BSR - Background Schumann Resonance



kolorowy proces gaussowski o czasie koherencji 1 s

Falowód czy wnęka ? - ciekawy obiekt do badań

rezonans pola EM w sferycznej stratnej wnęce o niejednorodnych ścianach okazał się niezwykle ciekawy



są rozwiązania analityczne

podjęcie falowodowe

fale biegnące - propagacja

fale tłumione

propagacja

rezonans Fano

są rozwiązania

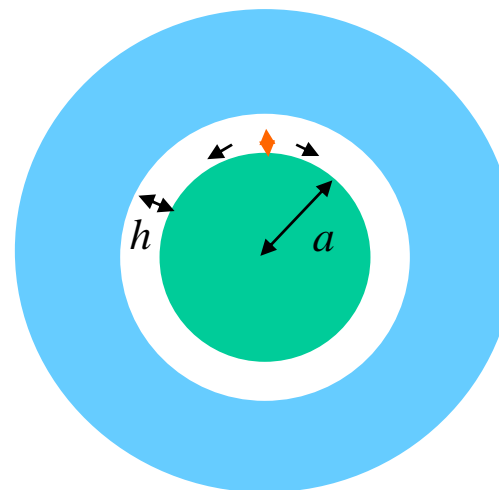
metoda funkcji Greena

równanie niejednorodne

fale biegnące + pole rez

superpozycja

propagacja rezonansowa



są rozwiązania analityczne

metoda faktoryzacji (równanie Helmholtza)

równanie jednorodne

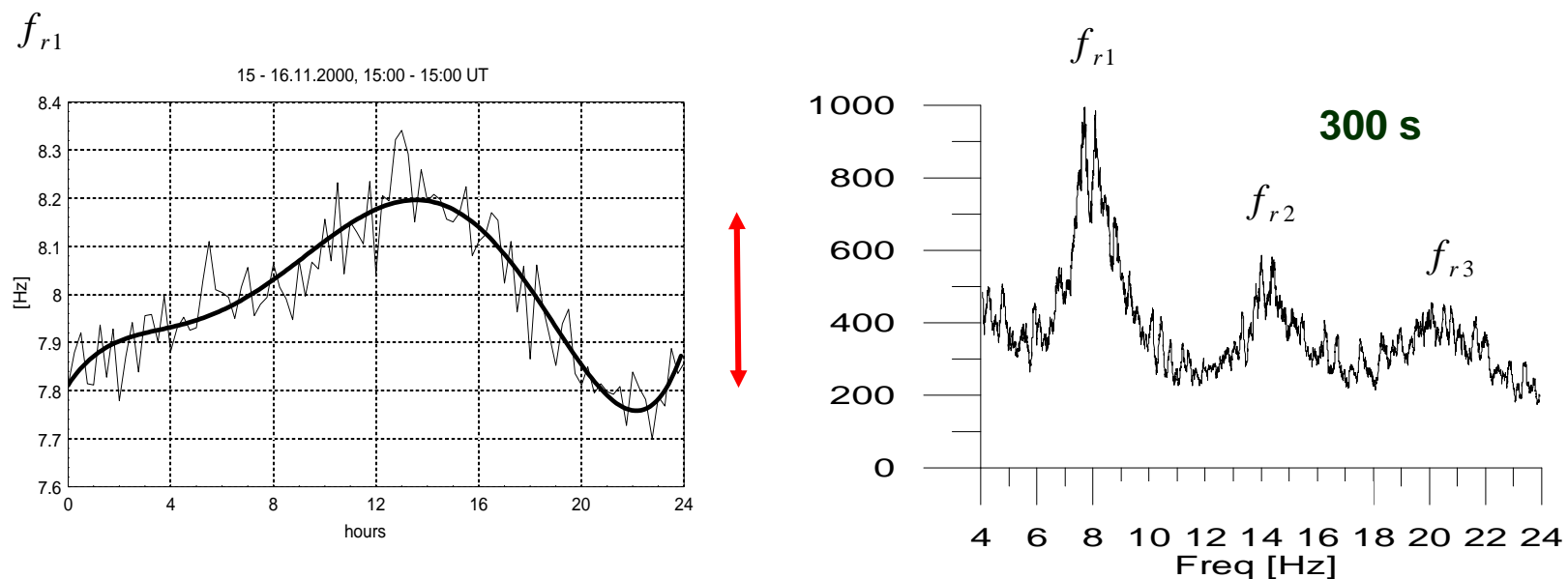
fale stojące - pole rezonansowe

węzły i strzałki

rezonatory akademickie

Rezonans Schumanna - zaskoczenie

w 2000 r dysponowaliśmy już dużym materiałem obserwacyjnym (Elżbieta 1 od 1994)



typowe codzienne wahania częstotliwości 1 modu sięgają 0.4 Hz (5%)

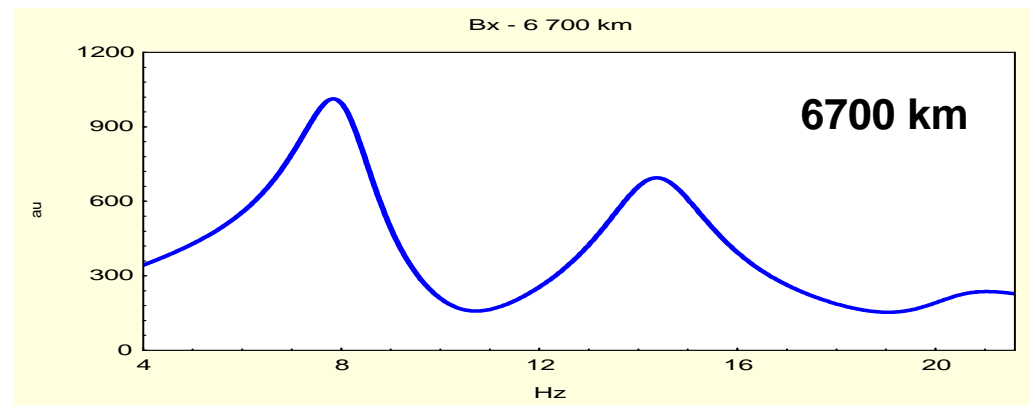
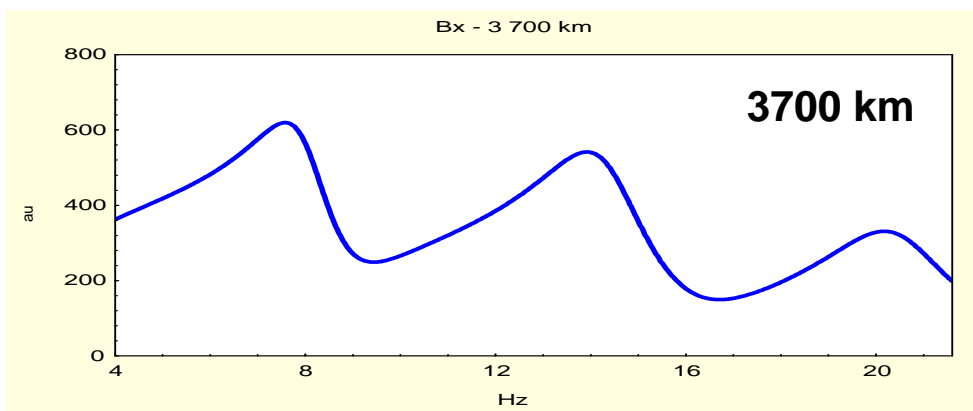
to nie możliwe by w takim stopniu zmieniały się parametry wnęki

linie rezonansowe są często asymetryczne

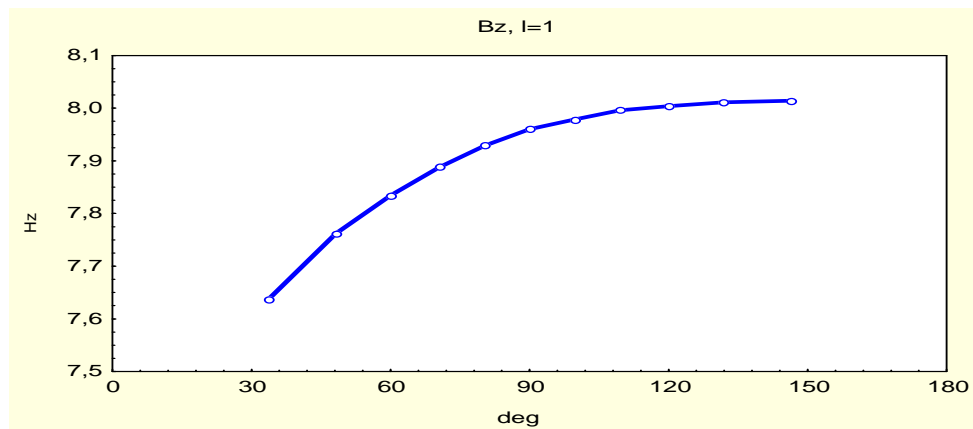
co się dzieje ?

Pełny model propagacji fal we wnętrzu sferycznej Ziemia - Jonosfera

krzywe rezonansowe pola blisko źródła są wyraźnie asymetryczne



częstotliwości maksimum rezonansowych zależą od odległości obserwator - źródło



model TDTE SG1312 2D

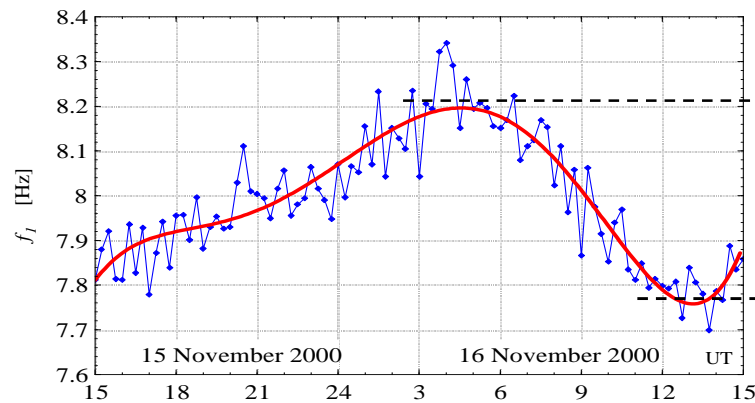
(obecnie model FDTD Maxwell 3D)

dla podstawowego modu magnetycznego występuje efekt „poniebieszczenia” (sięga 5 %)

(im dalej znajduje się źródło tym wyższą częstotliwość rezonansu obserwujemy)

Wyjaśnienia się zagadka dobowych zmian częstotliwości rezonansu Schumanna

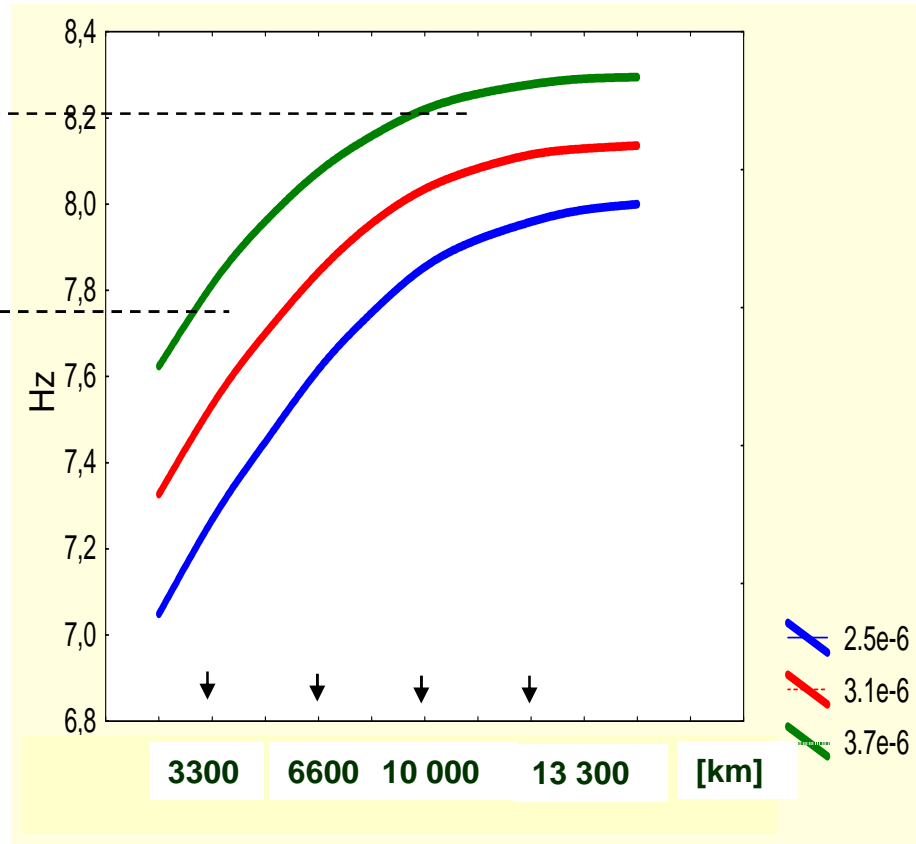
model poprawnie opisał dobowe zmiany częstotliwości 1 modu sięgające 0.5 Hz



Ameryka

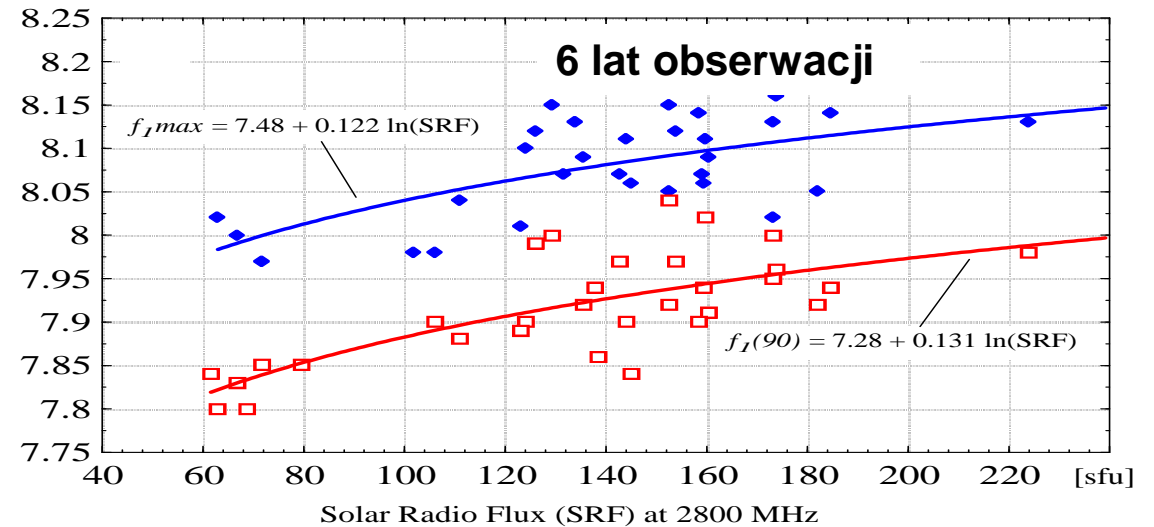
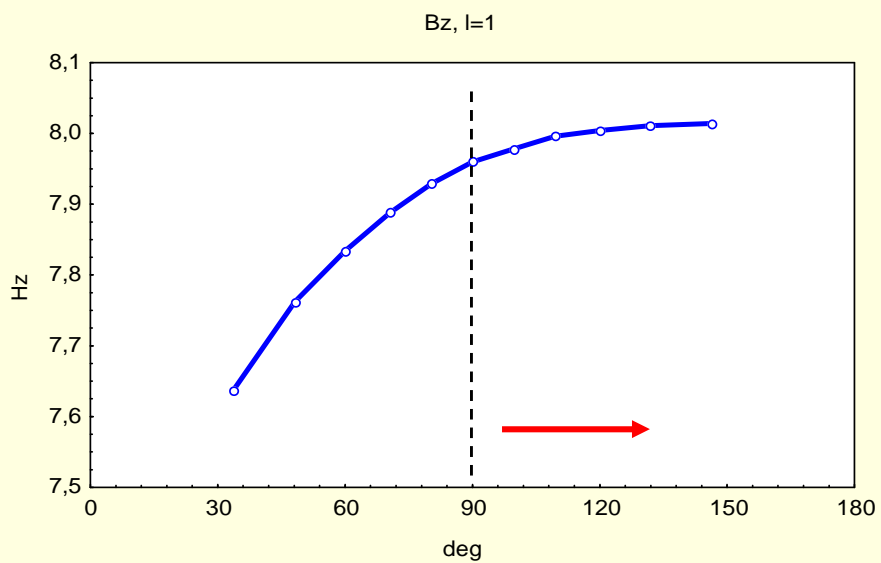
Azja

Afryka



wynikają one ze zmian odległości pomiędzy obserwatorem a źródłem (efekt O-S)

Jaka jest „prawdziwa” częstotliwość rezonansowa wnąki ?



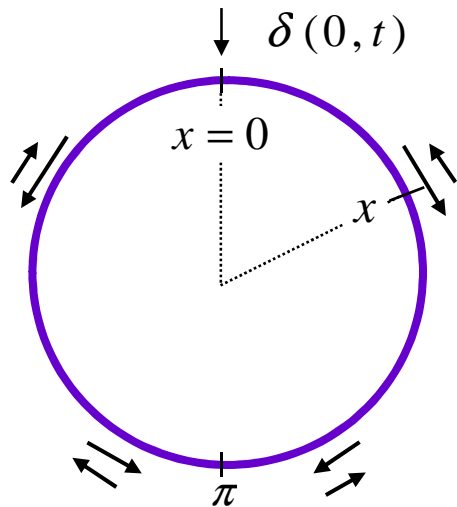
przyjeliśmy $f_{1rez} = f_1(90)$ **metoda wskaźników odległości**

„prawdziwe” częstotliwości rezonansowe wnąki okazały się bardzo stałe !

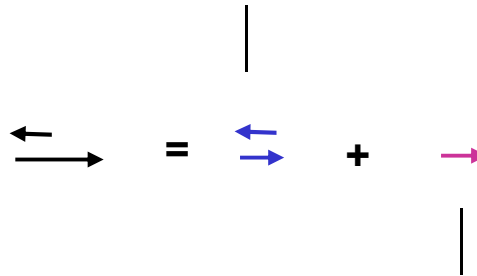
w 23 cyklu aktywności zmiany od minimum do maksimum były rzędu 0.2 Hz

częstotliwość rezonansowa wnąki dla spokojnego Słońca $f_{1rez} \approx 7.83$ [Hz]

Fizyczne przyczyny efektu obserwator-źródło i asymetrii krzywych rezonansowych



pole rezonansowe tworzy interferencja fal o jednakowych amplitudach



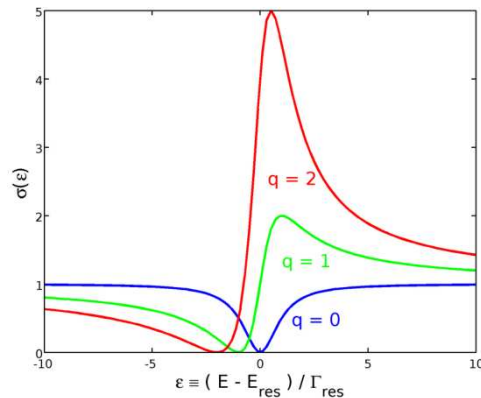
pozostała nadwyżka pola deformuje pole rezonansowe

ta nadwyżka to fale biegnące – prowadzi do asymetrycznego rezonansu Fano

potwierdza to metoda dekompozycji widma rezonansu Schumanna

metoda odtwarza pole rezonansowe wnąki

Rezonans Fano



(July 28, 1912 – February 13, 2001)

asymetryczny rezonans przeanalizował w 1961 r Ugo Fano (fizyk włosko – amerykański)

opisał model nieelastycznego rezonansowego rozpraszania elektronów na He

przyczyną asymetrii okazało się oddziaływanie pola rezonansowego z falami padających elektronów

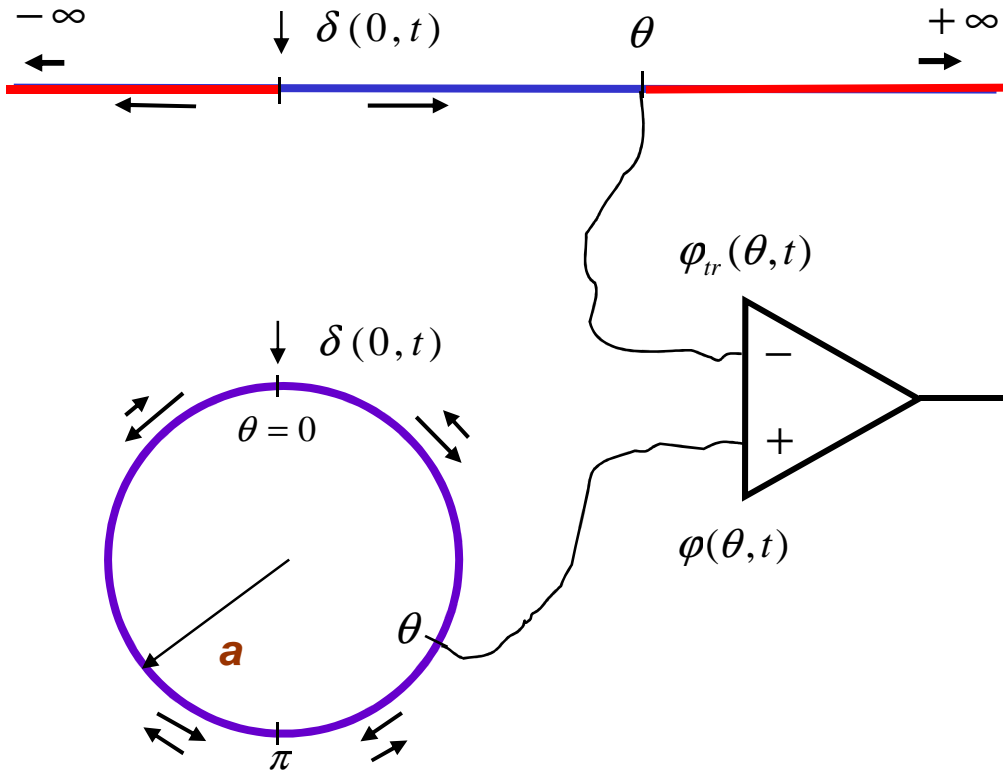
wyraził myśl – oddziaływanie pomiędzy procesem rezonansowym i falami tła daje zawsze asymetrię

efekt jest silny gdy:

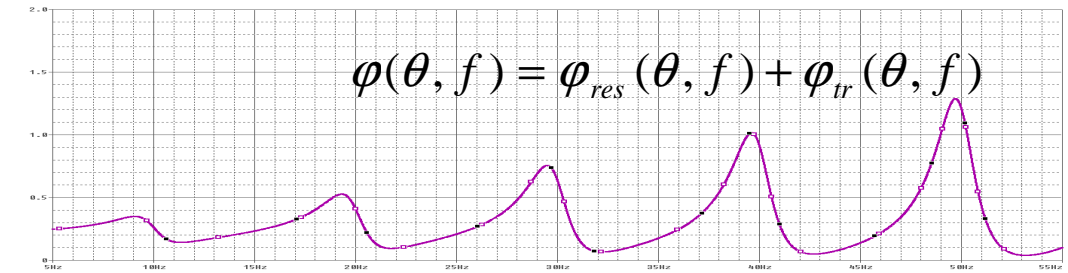
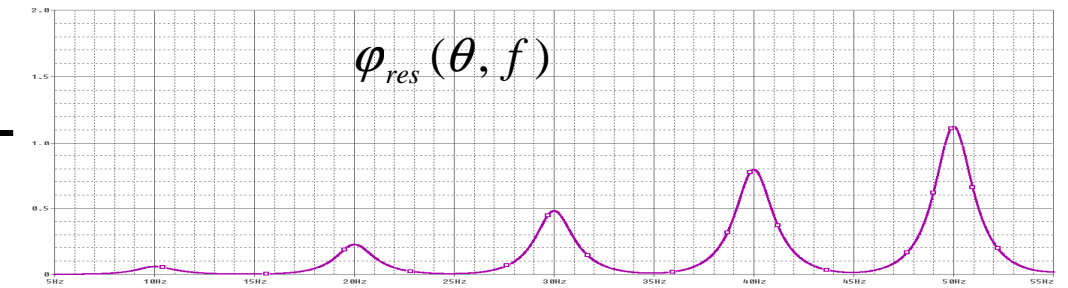
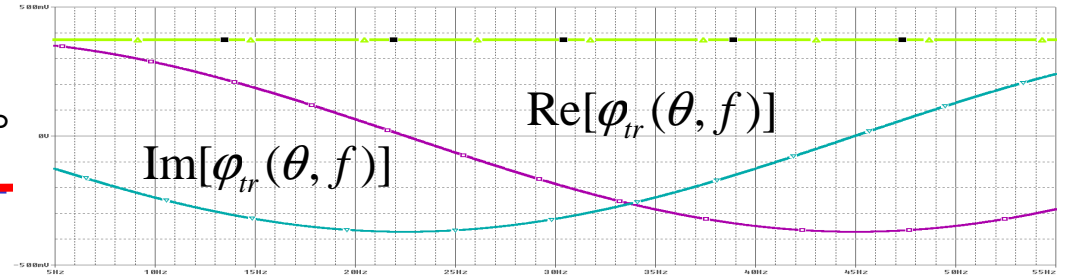
pole rezonansowe jest silnie tłumione (proces nieelastyczny, silnie dyssypatywny)

Anatomia rezonansu Fano w tłumionym rezonatorze sferycznym

referencyjna linia transmisyjna

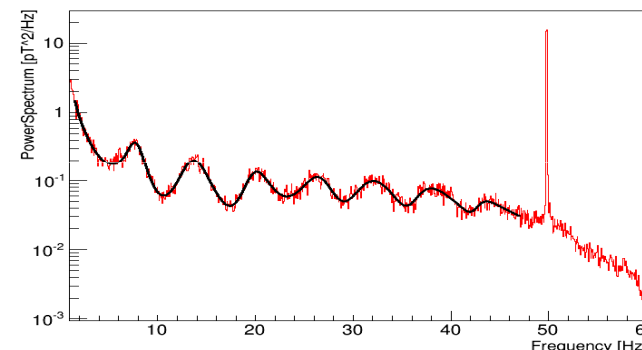
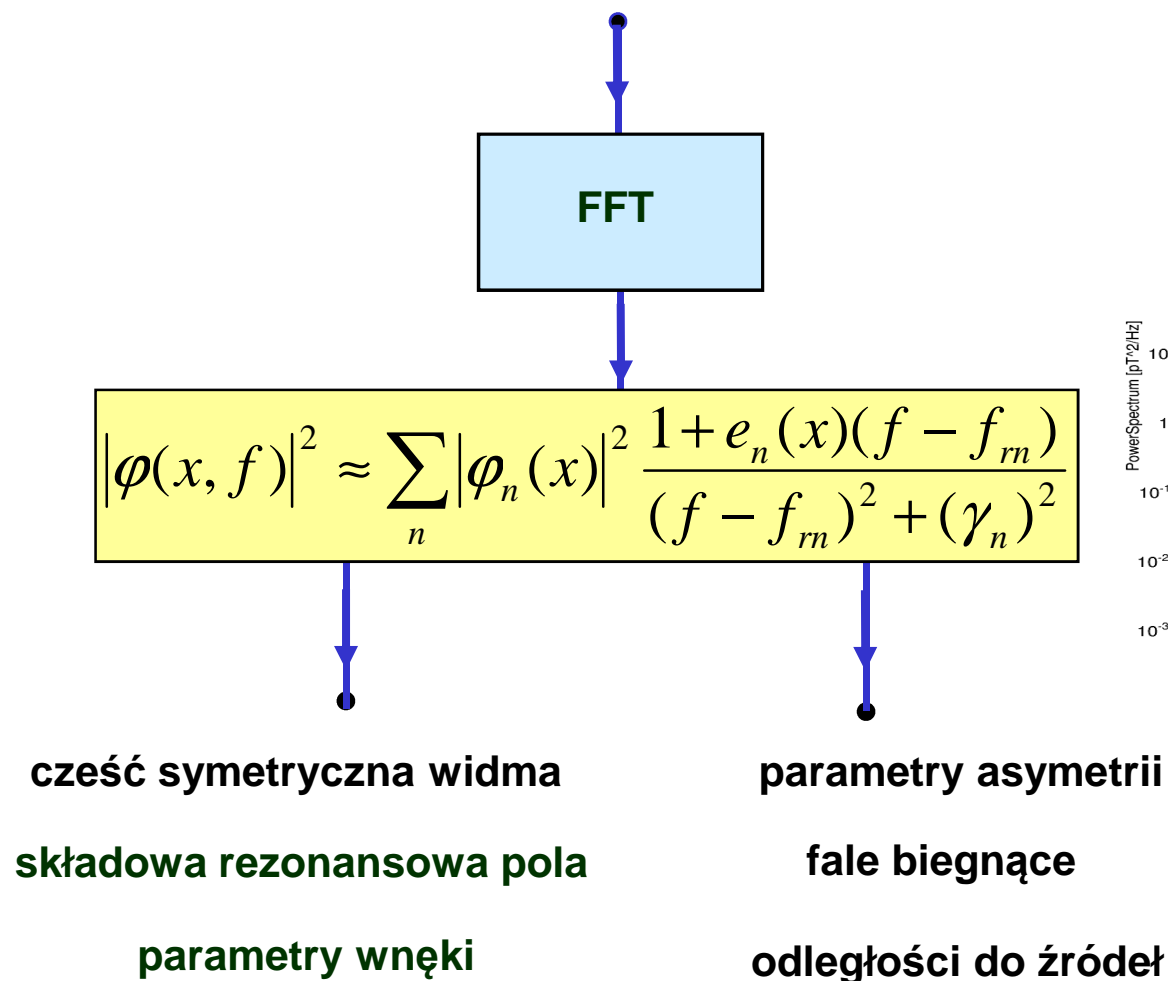


rezonator



Metoda dekompozycji widma

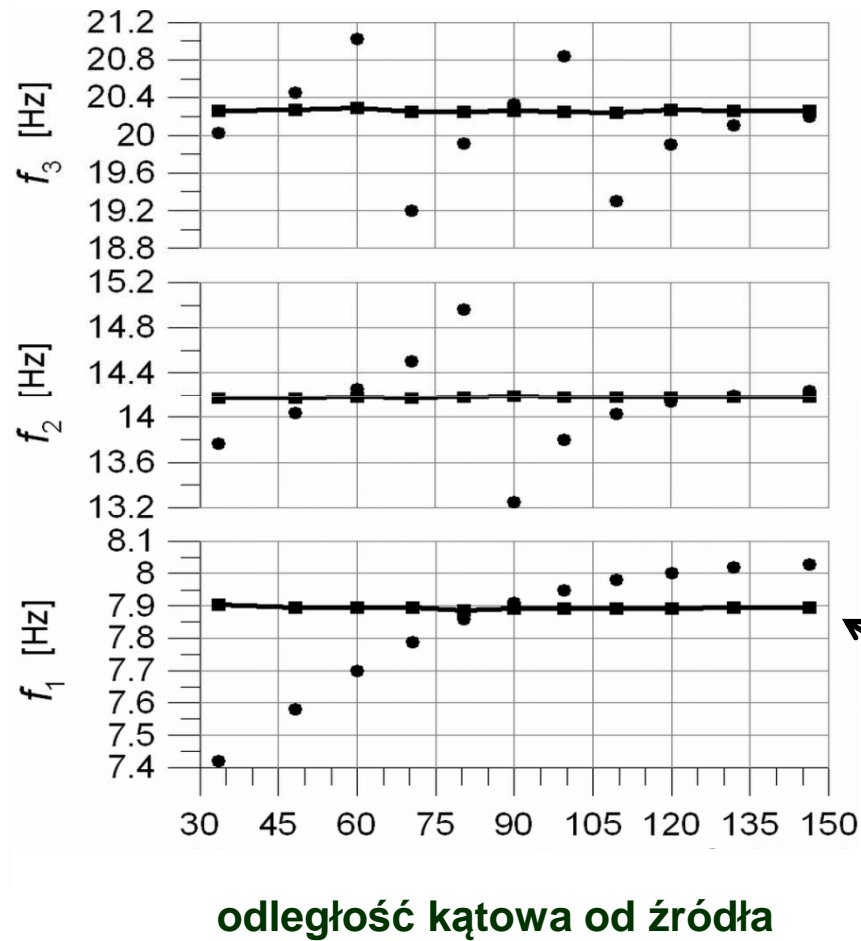
rozwiązania równania niejednorodnego / sygnał rezonansu Schumanna z wyjścia odbiornika



rozwiązania odwrotne – badanie intensywności i rozmieszczenia źródeł

1 - test skuteczności metody dekompozycji na rozwiązaniach modelowych

dekompozycja ujawnia „prawdziwe” częstotliwości rezonansowe wnętrza



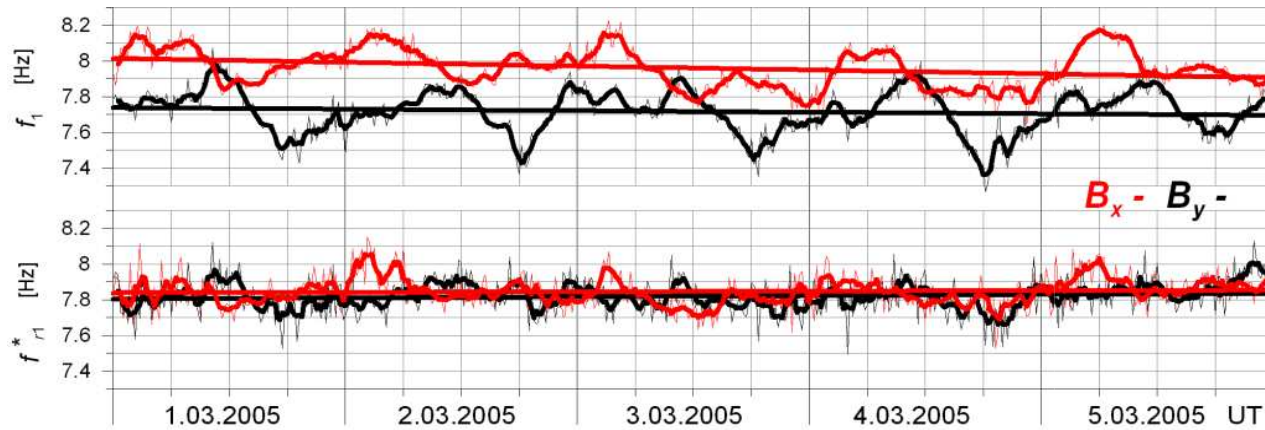
3 mod

2 mod

1 mod

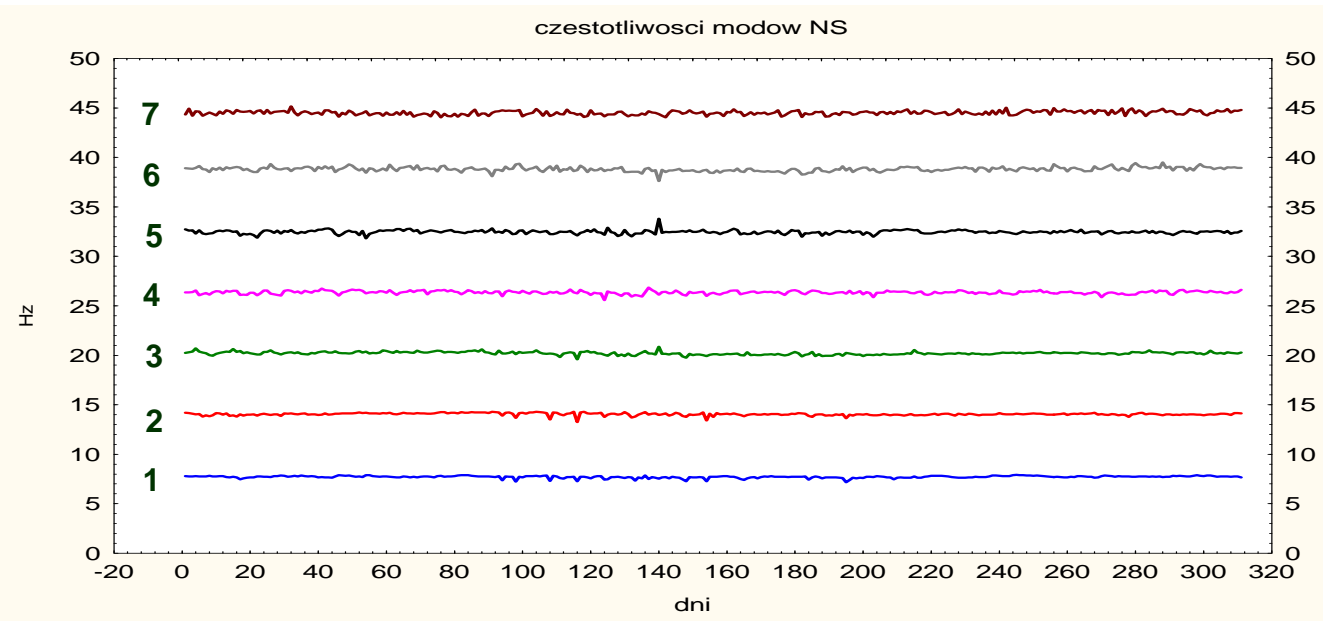
dla każdej odległości ta sama częstotliwość

2 - test metody na obserwowanych widmach rezonansu Schumanna



← 5 dni obserwacji
przed dekompozycją

← po dekompozycji



310 dni obserwacji
częstości 7 modów

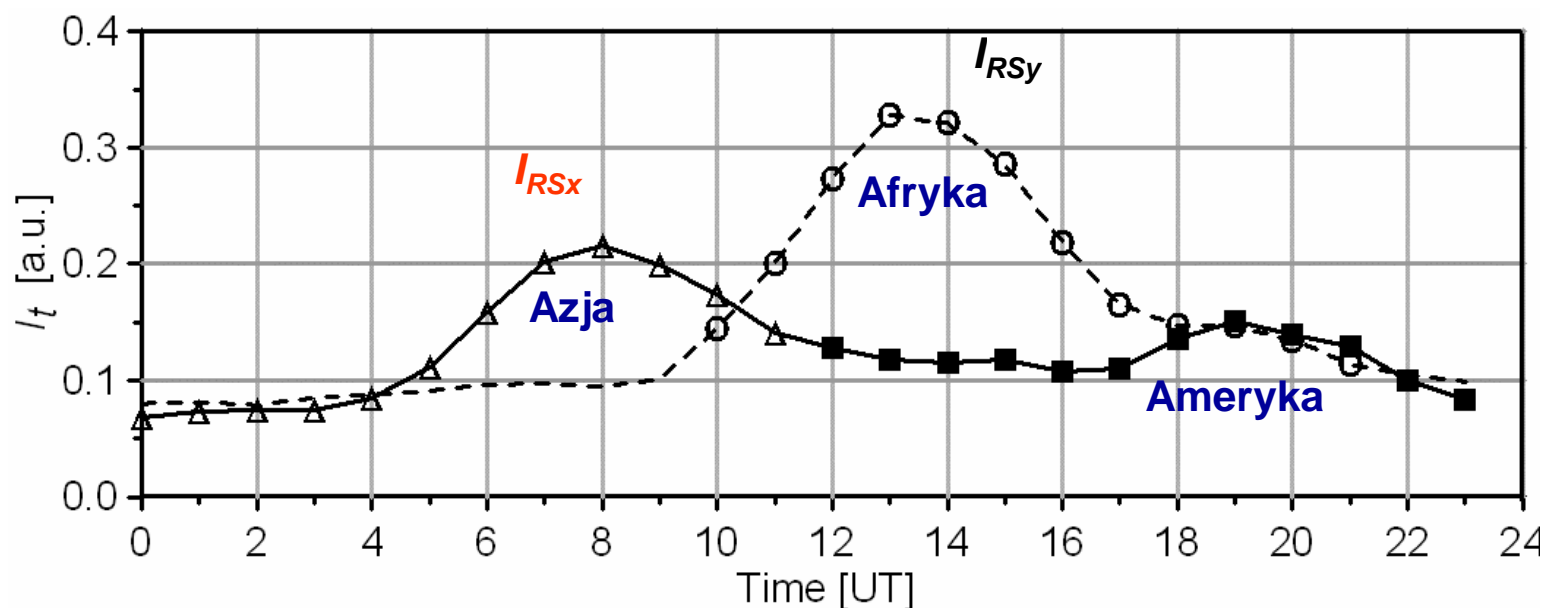
3 - wskaźnik intensywności burz na Ziemi

składowa rezonansowa pola we wnęce Z-J jest globalna – wszyscy obserwatorzy widzą to samo

amplitudy modów rezonansowych odzwierciedlają intensywność wszystkich burz na Ziemi

dzięki metodzie dekompozycji można wyznaczać amplitudy modów

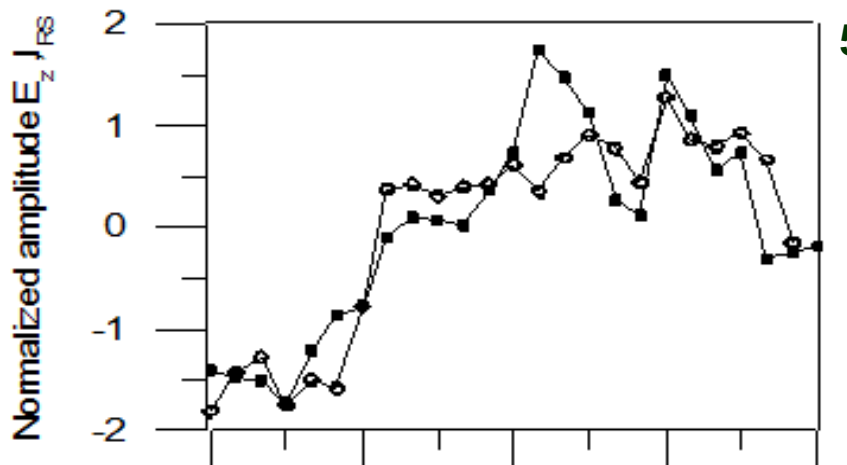
i na tej podstawie obliczyć wskaźnik intensywności burz I_{RS} (mocy burz)



$$I_{RS} = I_{RSx} + I_{RSy}$$

wskaźnik intensywności burz I_{RS} powinien zmieniać się tak samo jak stałe pole jonosfery E_{0z}

4 - I i II konsekwencja wyładowań ujemnych są ze sobą ściśle powiązane !



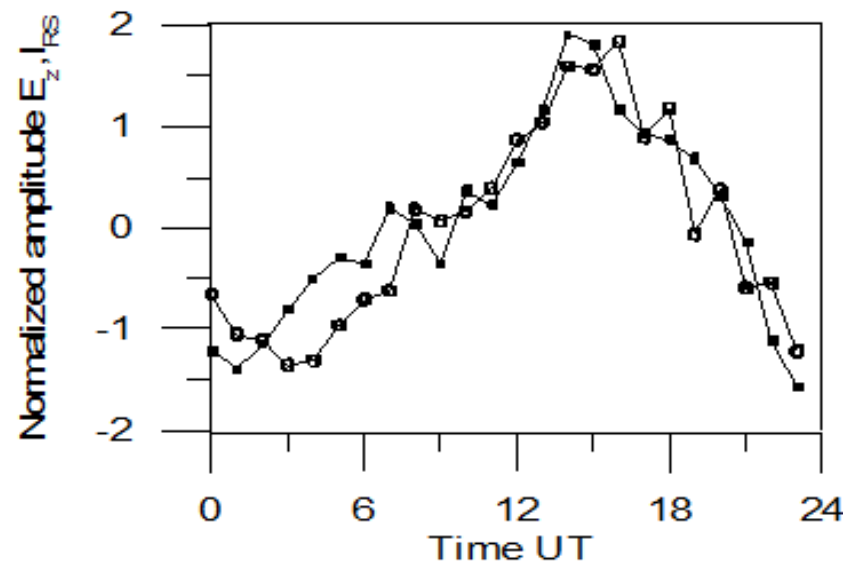
55 dni wspólnych obserwacji Świder - Hylaty

metoda ELF pomiaru mocy burz:

rezonans Schumanna

metoda dekompozycji

wskaźnik aktywności I_{RS}



metoda pomiaru potencjału jonosfery:

pomiar stałego pola E_{oz}

krzywa Carnegie

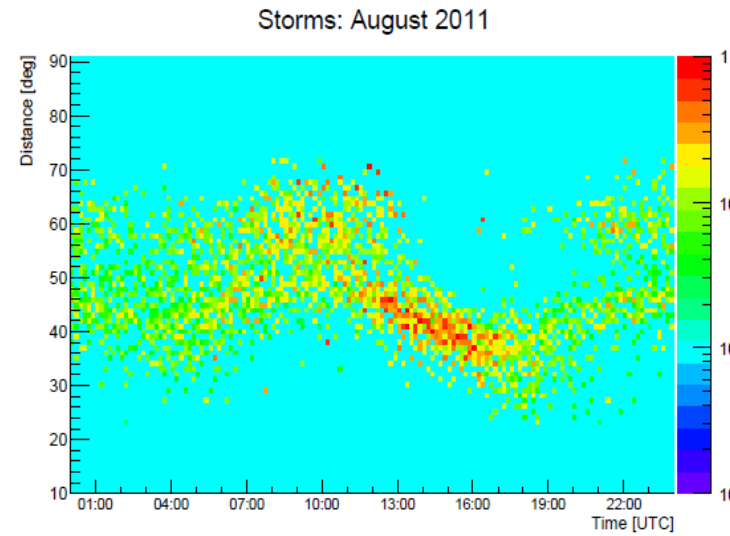
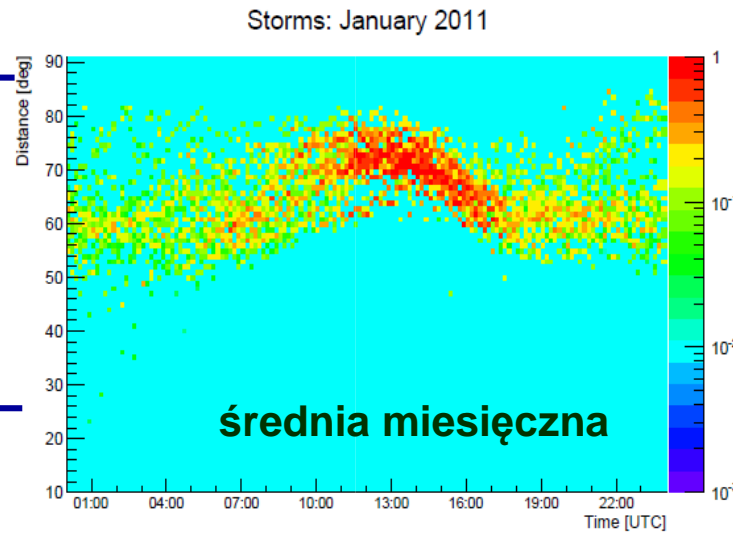
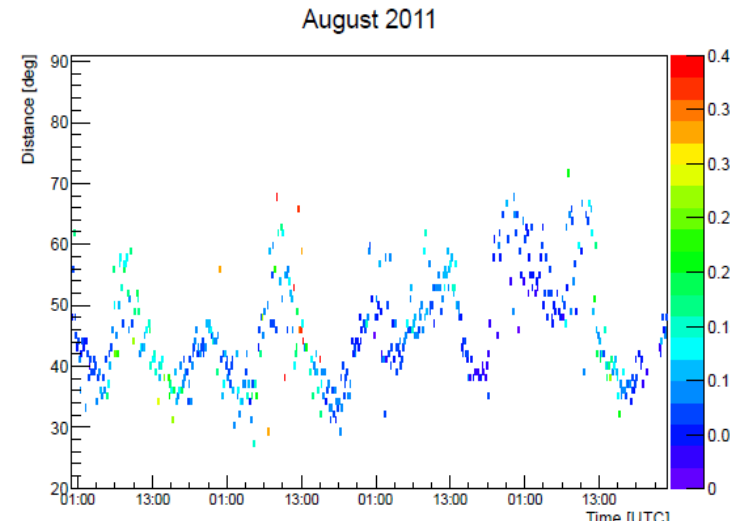
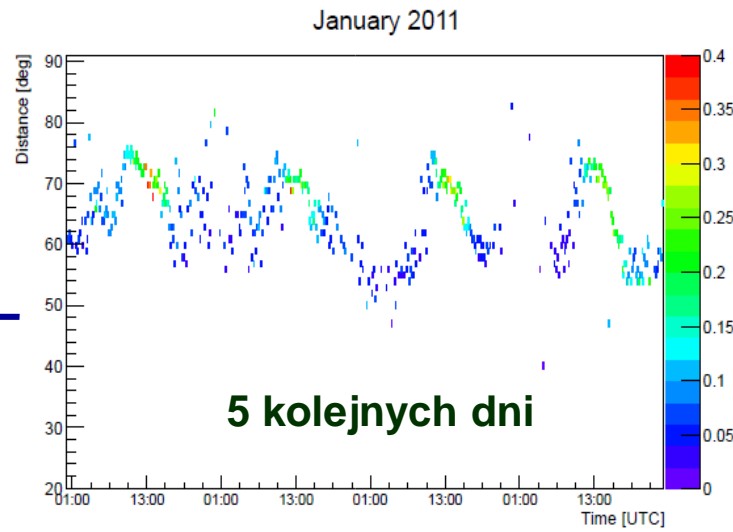
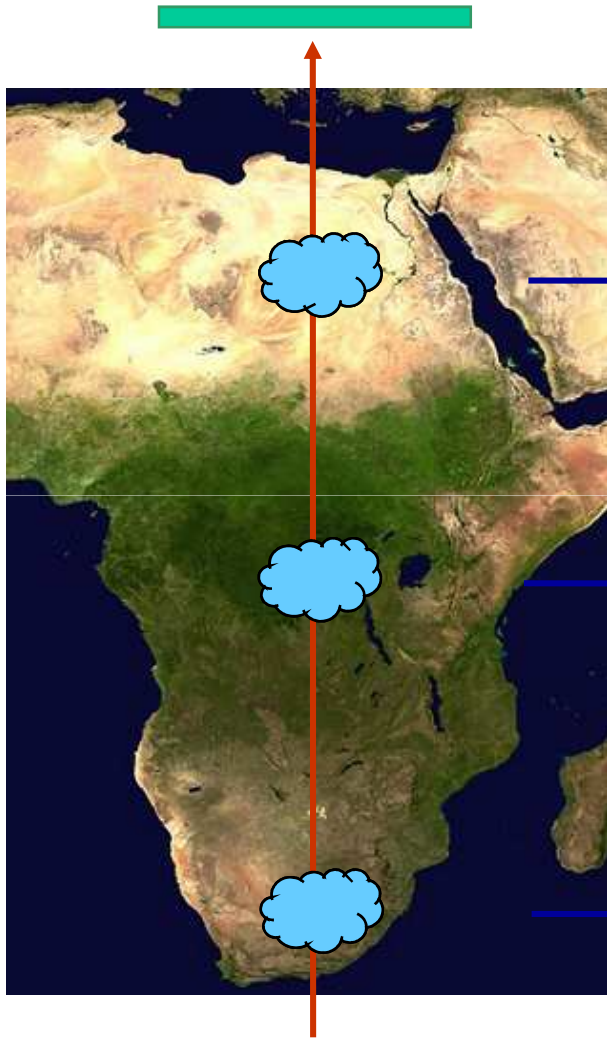
istnieją dni wyraźnej zbieżności

współczynnik korelacji sięga 0.85

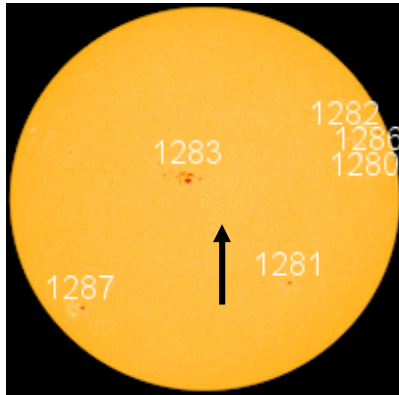


5 - badania aktywności wybranych centrów burzowych

Hylaty – antena y



6 - badania wpływu X słonecznych na warstwę D - SID ELF

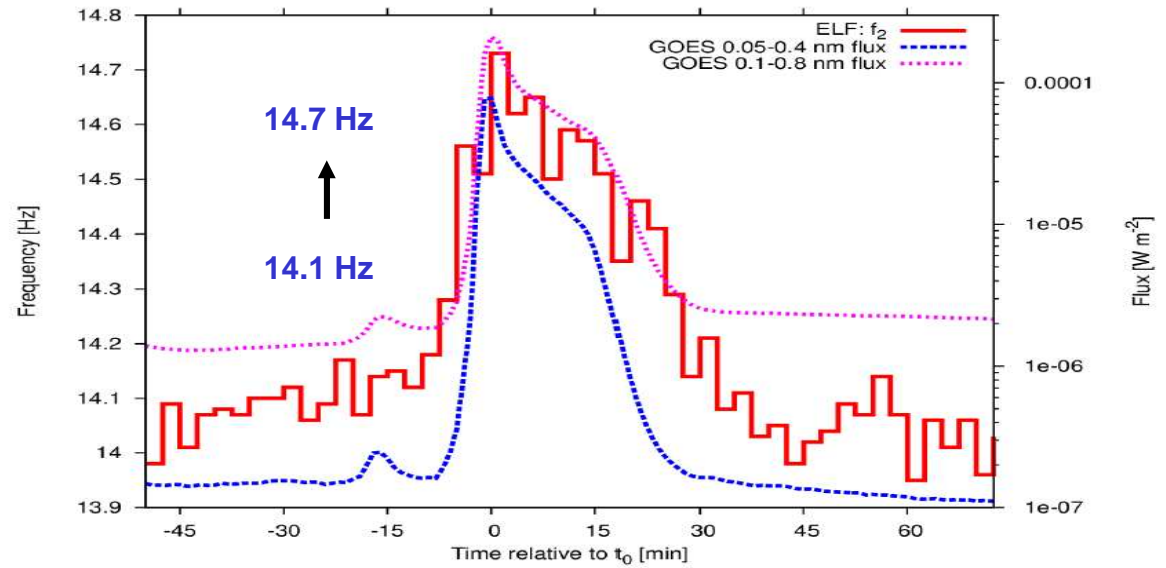
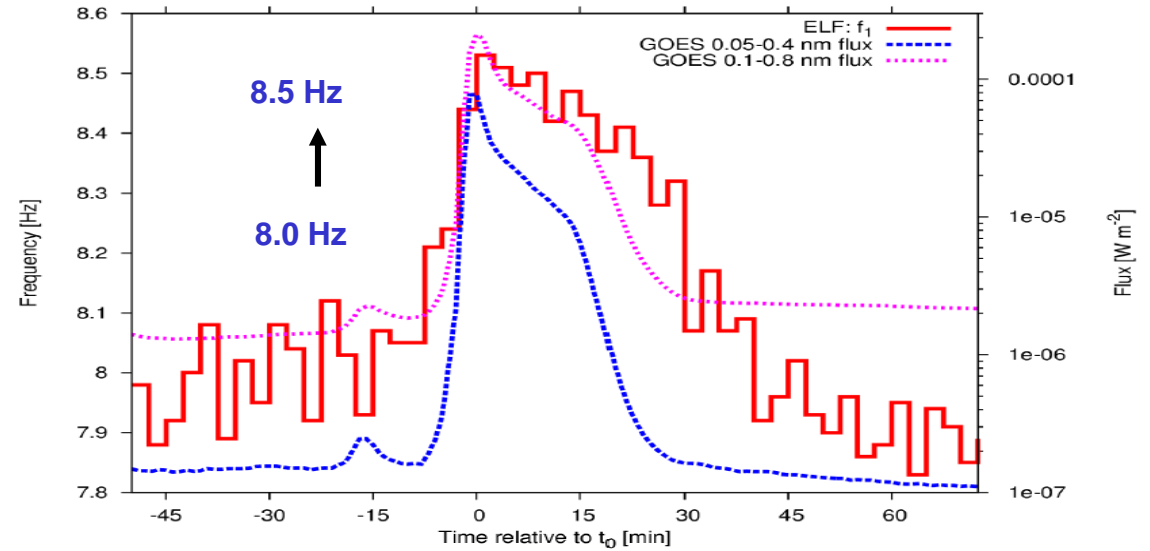
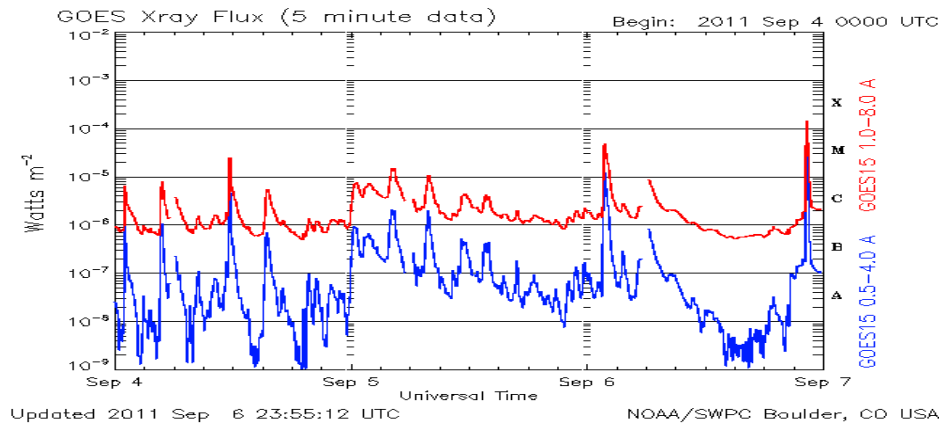


wnika do 70 km

6 sierpnia 2011

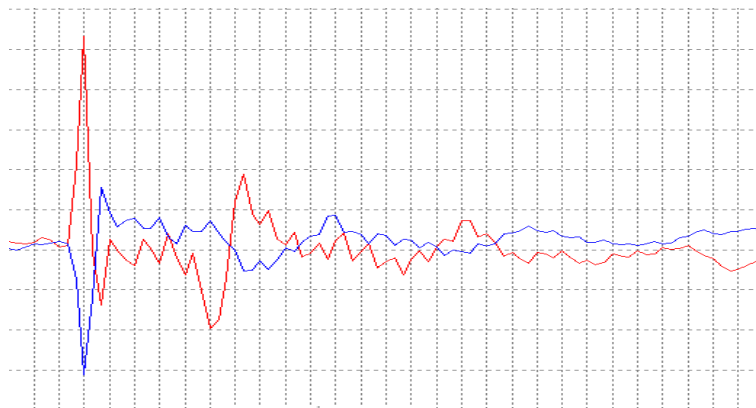
X2.1 – 6 class flare

strumień promieniowania X rzędu 10^{-4} W/m²

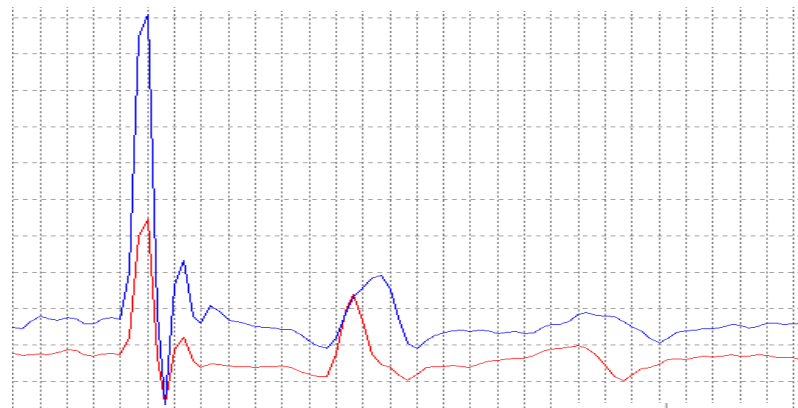


Przykład obserwacji systemem HC – silne wyładowanie dodatnie X24

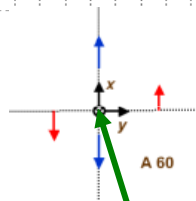
46° 5' 32.273"N 078° 52' 59.92"W
ALG δ = - 11° 41' W = 11.68° / 2013



49° 10' 50.1179"N 022° 33' 19.6078"E
HYL δ = + 4° 30' E = 4.50° / 2007



$$\text{tg } \alpha = \frac{b_x}{b_y}$$



$\Delta t = 12 \text{ ms}$ $\Delta r = 3070 \text{ km}$

t = 04:00:18.021

$b_x = 5200$

$b_y = 3100$

b = 6050

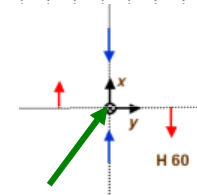
tg α = 1.6774

α = 1.0332

α = 59.23

α = 180 - 59.23 - 11.68 = 109.39°

$$\text{tg } \alpha = \frac{b_x}{b_y}$$



t = 04:00:18.010

$b_x = 3500$

$b_y = 8200$

b = 8915

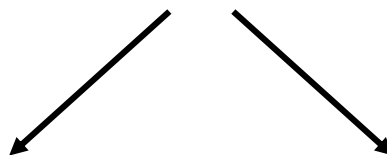
tg α = 0.4268

α = 0.4034

α = 23.12

α = 180 + 23.12 + 4.50 = 207.62°

azymuty

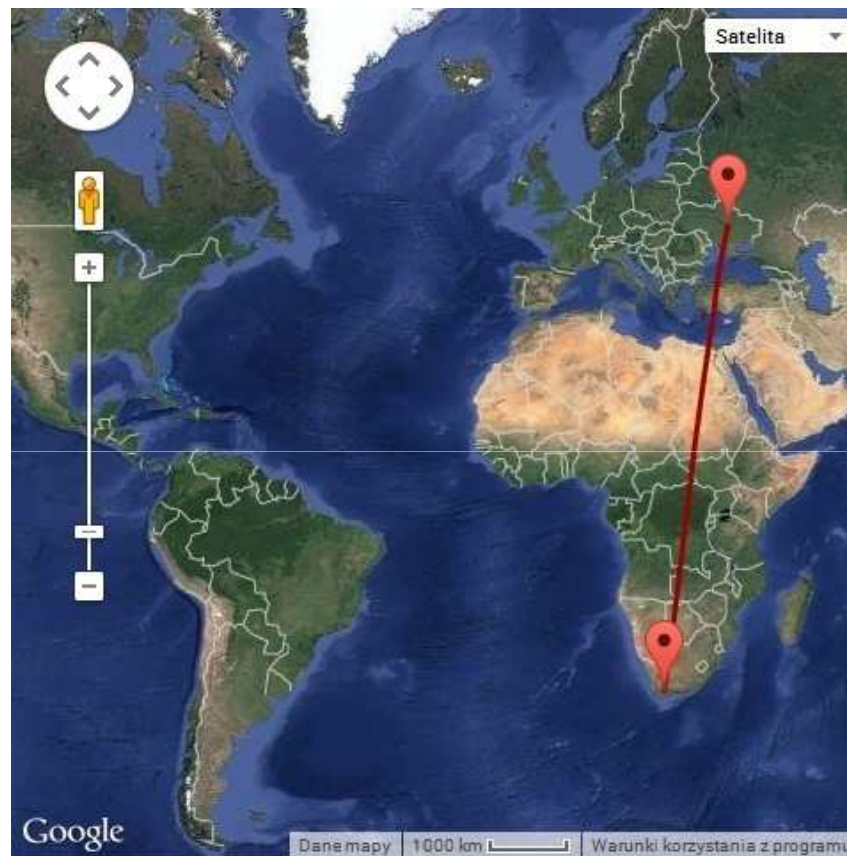


Lokalizacja X24

ALG



HYL



04:00:18.021

ALG 13 100 km

b = 6050

b = 365 pT

$\Delta r = 3800$ km

$\Delta r = 3270$ km - czasowa

$v_n = 2.73 \cdot 10^8$ [m/s]

HYL 9300 km

b = 8915

b = 535 pT

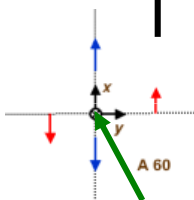
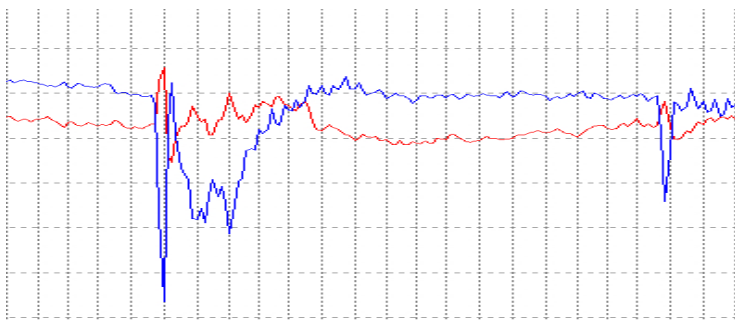
04:00:18.010



Źródło X30S - sprajt

46° 5' 32.273"N 078° 52' 59.92"W
ALG $\delta = -11^\circ 41' W = 11.68^\circ / 2013$

49° 10' 50.1179"N 022° 33' 19.6078"E
HYL $\delta = +4^\circ 30' E = 4.50^\circ / 2006$



$$v_n = 2.73 \cdot 10^8 \text{ [m/s]}$$

$$\tau_g = r/v_g + \tau_r = 32 + 17 = 49 \text{ [ms]}$$

t = 03:12:43.xxx

$b_x = 1250$

$b_y = -4700$

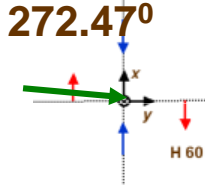
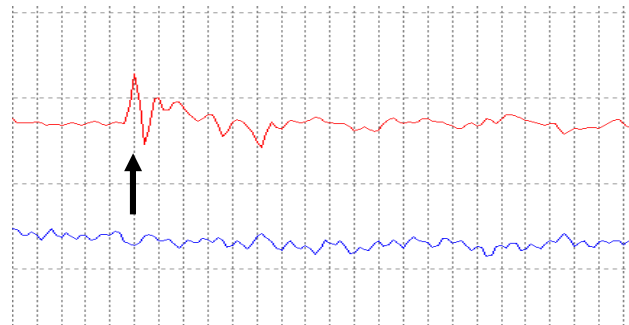
b = 4860

tg $\alpha = 0.2695$

$\alpha = 0.2599$

$\alpha = 14.90^\circ$

$$\alpha = 180 - 16.19 - 11.68 = 153.42^\circ$$



$$\alpha = 180 + 87.19 + 4.50 = 272.47^\circ$$

t = 03:12:43.415

$b_x = 550$

$b_y = -50$

b = 550

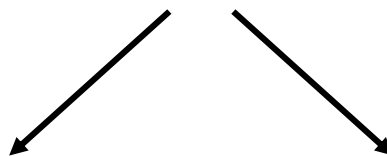
tg $\alpha = 27.50$

$\alpha = 1.5344$

$\alpha = 84.87$

$$\alpha = 360 - 84.87 + 4.50 = 279.63^\circ$$

azymuty



Lokalizacja X30S



ALG 3455 km

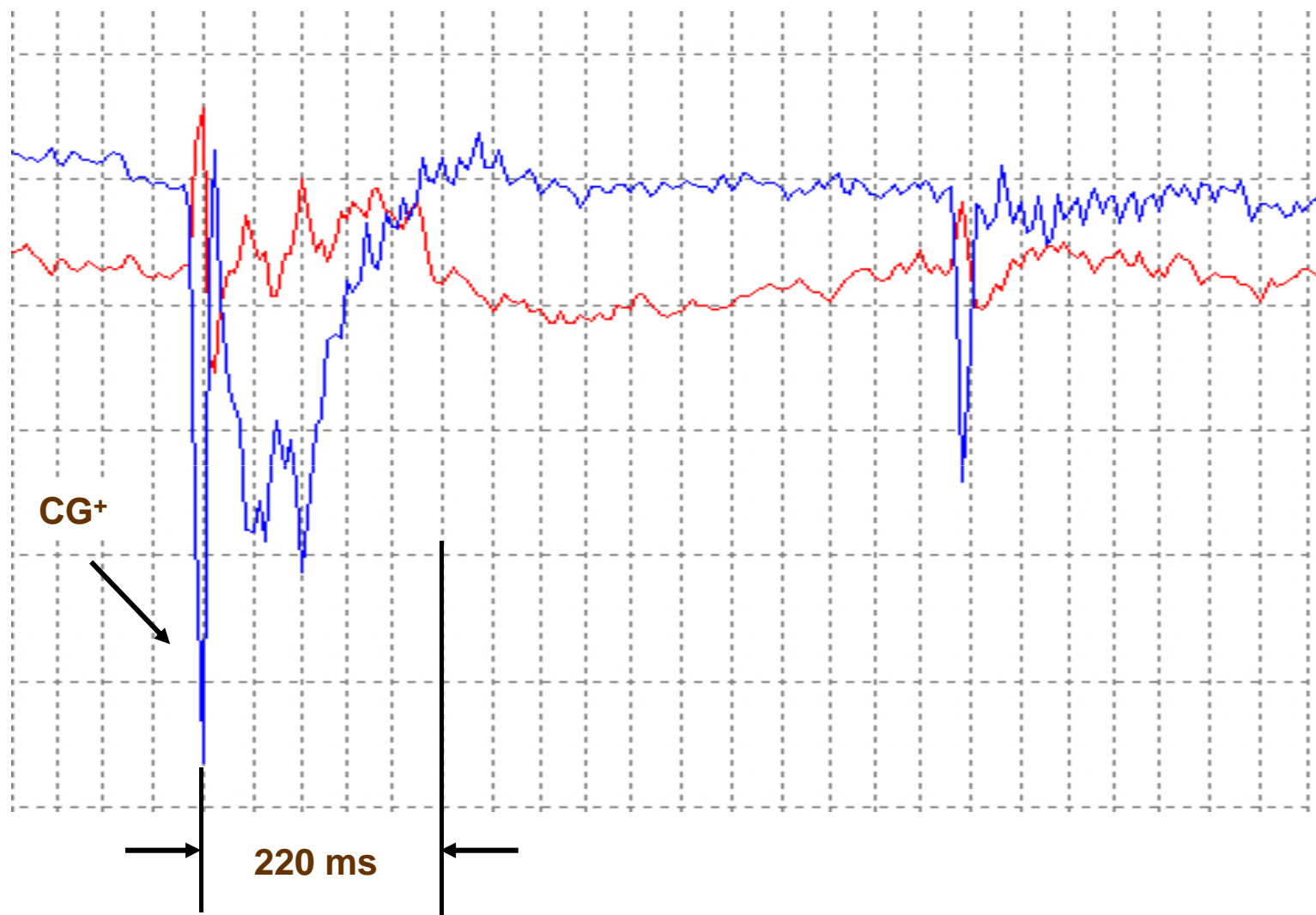
$\Delta r = 4475$ km

HYL 8380 km

b = 4860

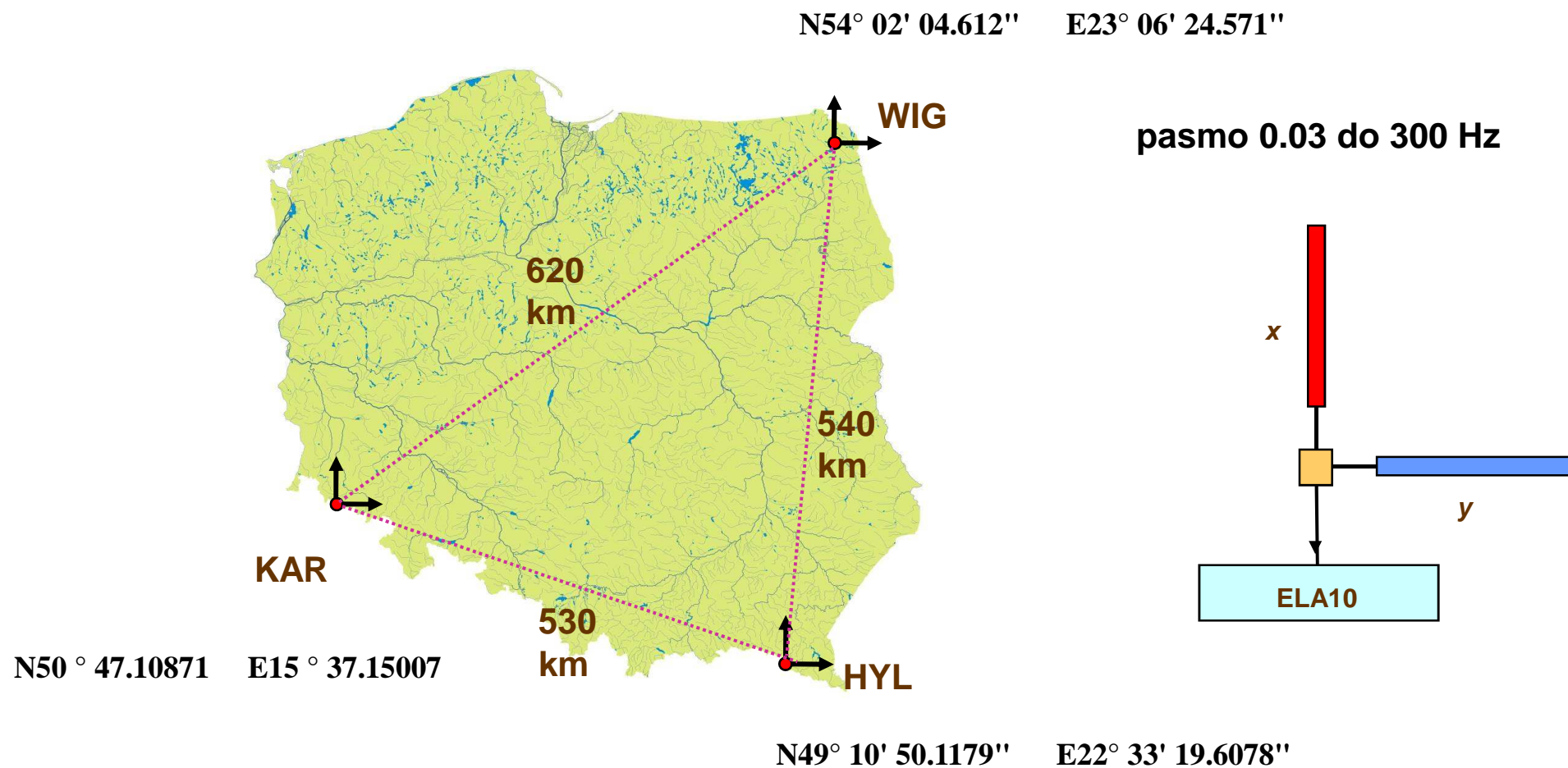
b = 550

Forma falowa X30S



widok ze stacji ALG – odległość 3450 km

2013 / 2014 - system HWK (Hylaty-Wigry-Karkonosze)

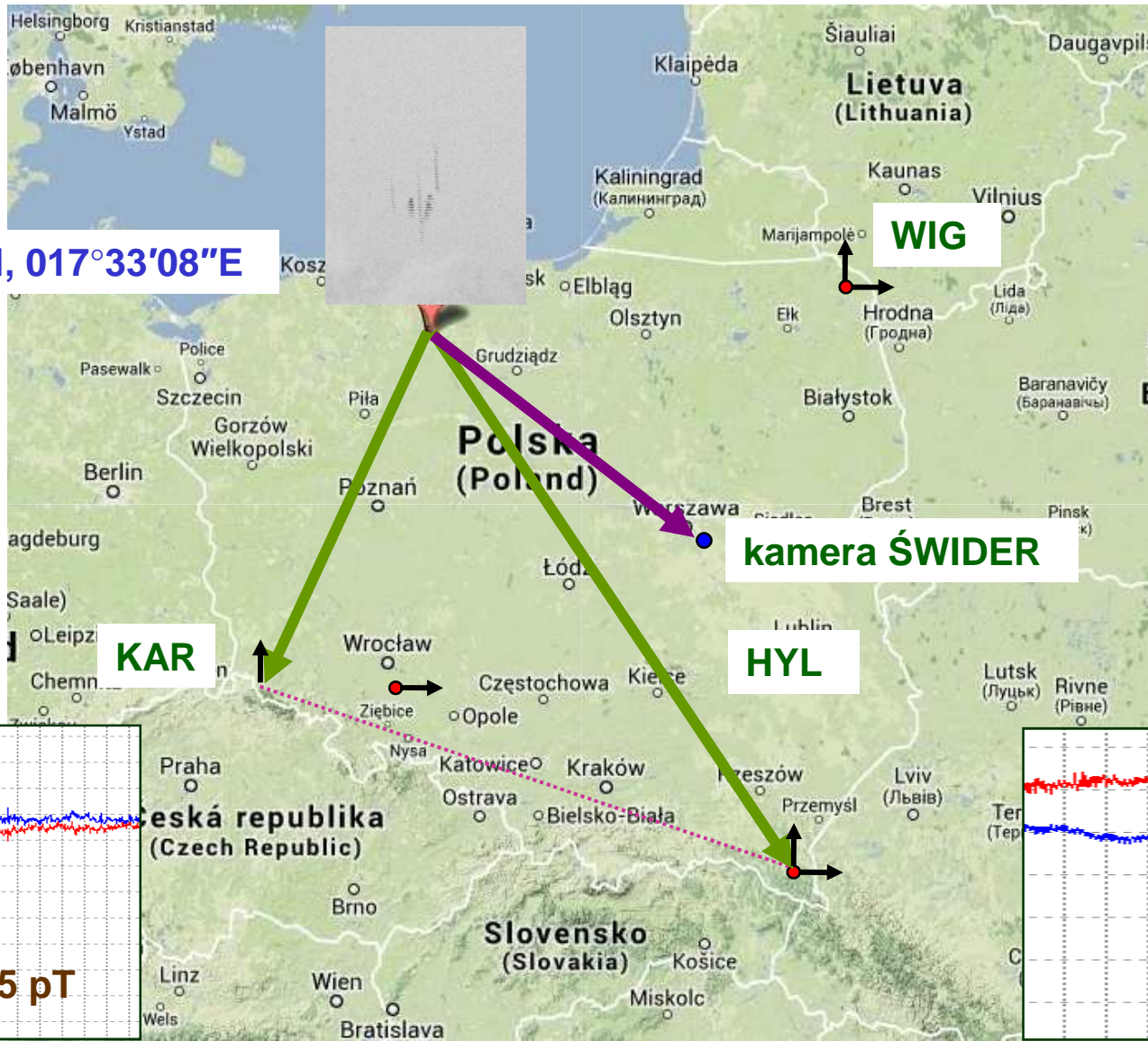


system HWK działał od 27 lipca do 12 sierpnia 2013 r

system HB (Hylaty – Brody) działał w sierpniu 2014 r

HWK - przykład obserwacji SPRITE

53°47'12"N, 017°33'08"E



$\alpha = 21.06^\circ$

KAR

kamera ŚWIDER

HYL

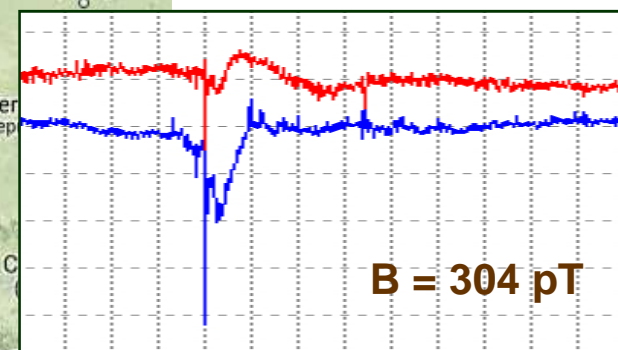
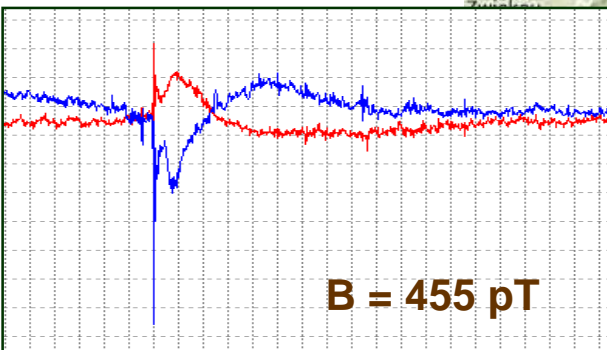
$\alpha = -32.14^\circ$

B = 304 pT

B = 455 pT

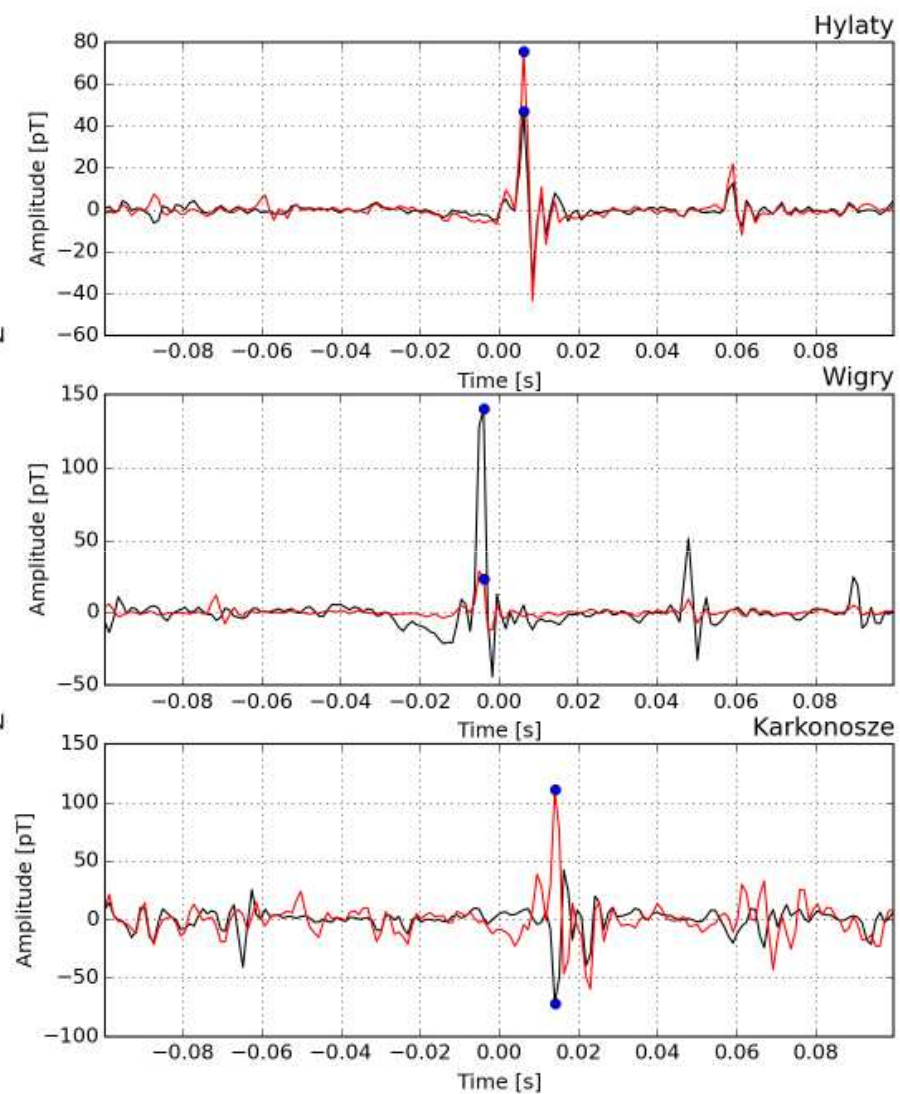
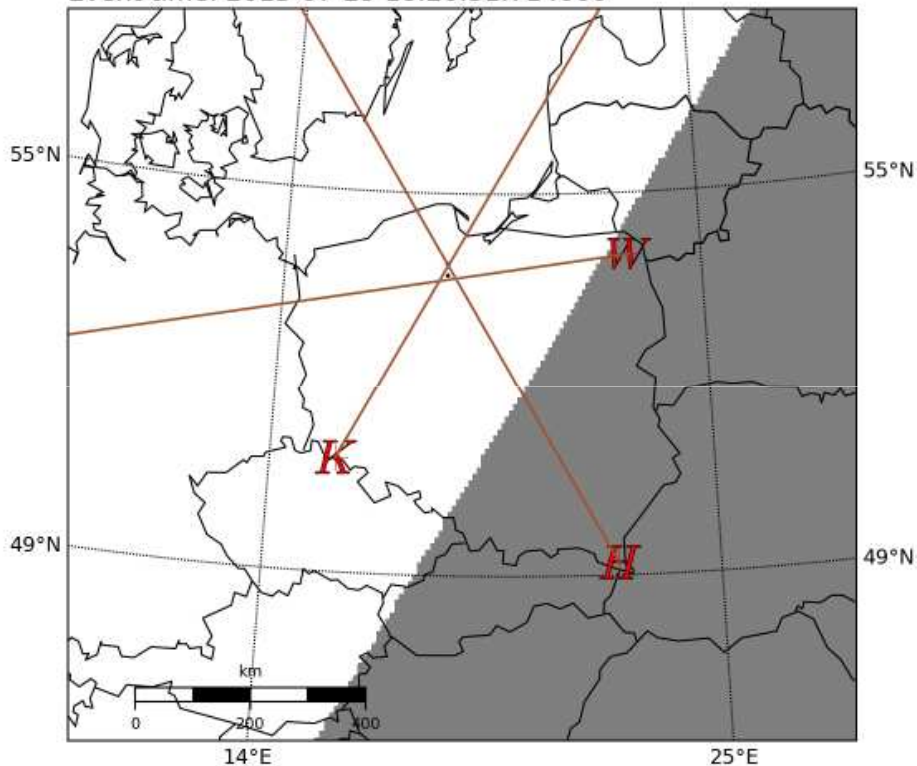
S02K 03.08.2013 23:25:14.110

S02H 03.08.2013 23:25:14.109



HWK - automatyczne śledzenie pozycji i wyznaczanie parametrów wyładowań

The HWK Lightning maps
Event number: 53
Event time: 2013-07-29 18:26:31.714000



metoda wyznaczania kierunków i czasów opóźnień (RDF i TOA)

Globalny system radiolokacji WERA - World ELF Radiolocation Array

3 stacje ELF mierzące składowe H_x , H_y , E_z rozmieszczone na 3 kontynentach

wyznaczanie położenie źródeł metodą TOA + RDF



WERA - współpraca

Earle Williams - Massachusetts Institute of Technology - Massachusetts



Fernanda T. Sao Sabbas - Instituto Nacional de Pesquisas - Aeronomy Division, Brazil



Mark Golkowski - Electrical Engineering University of Colorado Denver - Denver



20 maja 2015 – uruchomienie stacji w rezerwacie Hugo (Colorado)

AGH + OA UJ:



dr Janusz Młynarczyk



inż. Jerzy Kubisz

Electrical Engineering University of Colorado:



dr Marek Gołkowski

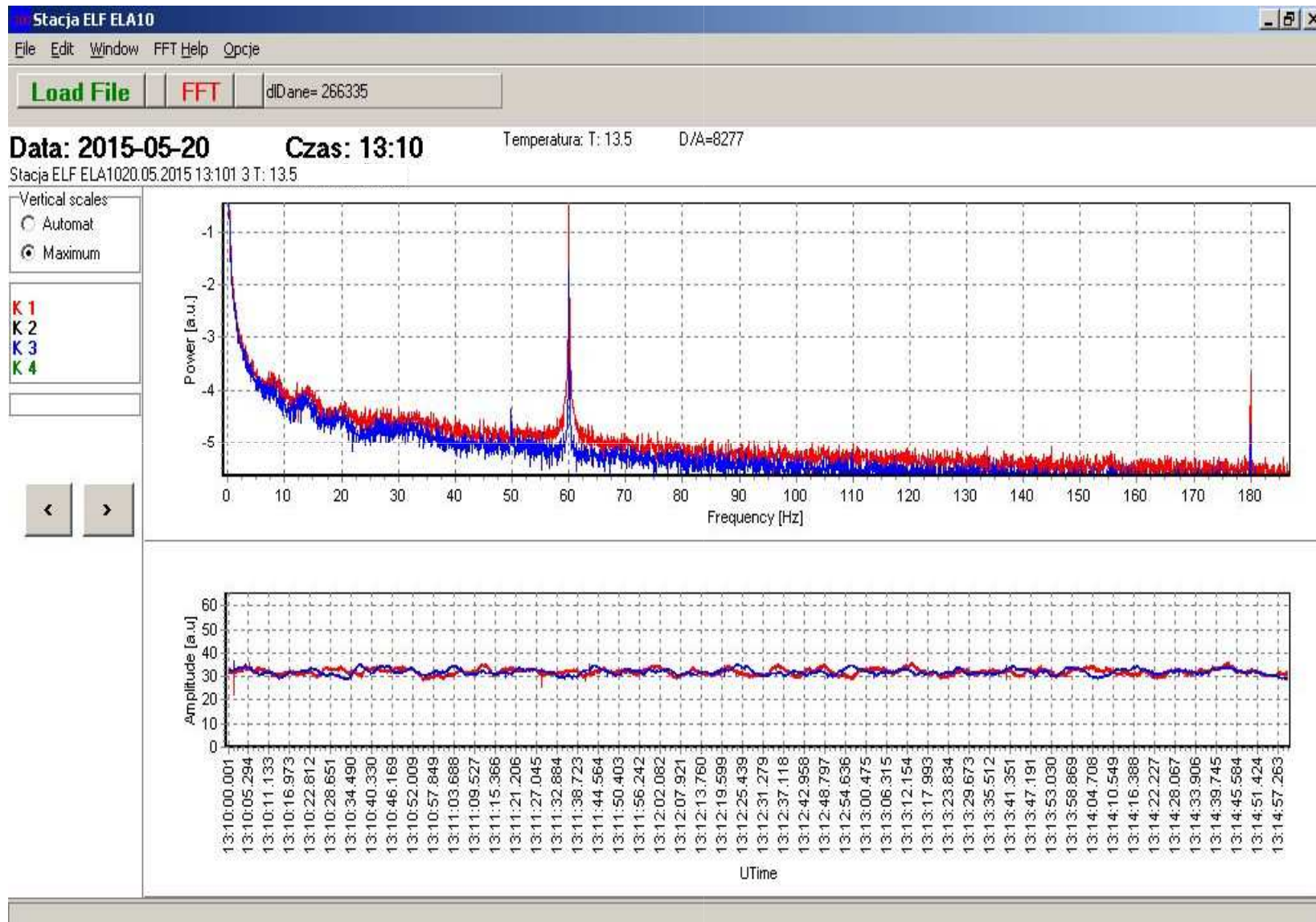


6 studentów Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Colorado

Stacja Hugo



2015-05-20 - Hugo - pierwszy test



27 marca 2016 – uruchomienie stacji w Patagonii (Argentyna)

AGH + OA UJ:



dr Janusz Młynarczyk



inż. Jerzy Kubisz

UNIDAD DE INVESTIGACION Y DESARROLLO ESTRATEGICO PARA LA DEFENSA – Buenos Aires

director dr Eduardo J. Quel

stacja geofizyczna UNIDEF w bazie wojskowej w Río Gallegos



Jacobo Salvador

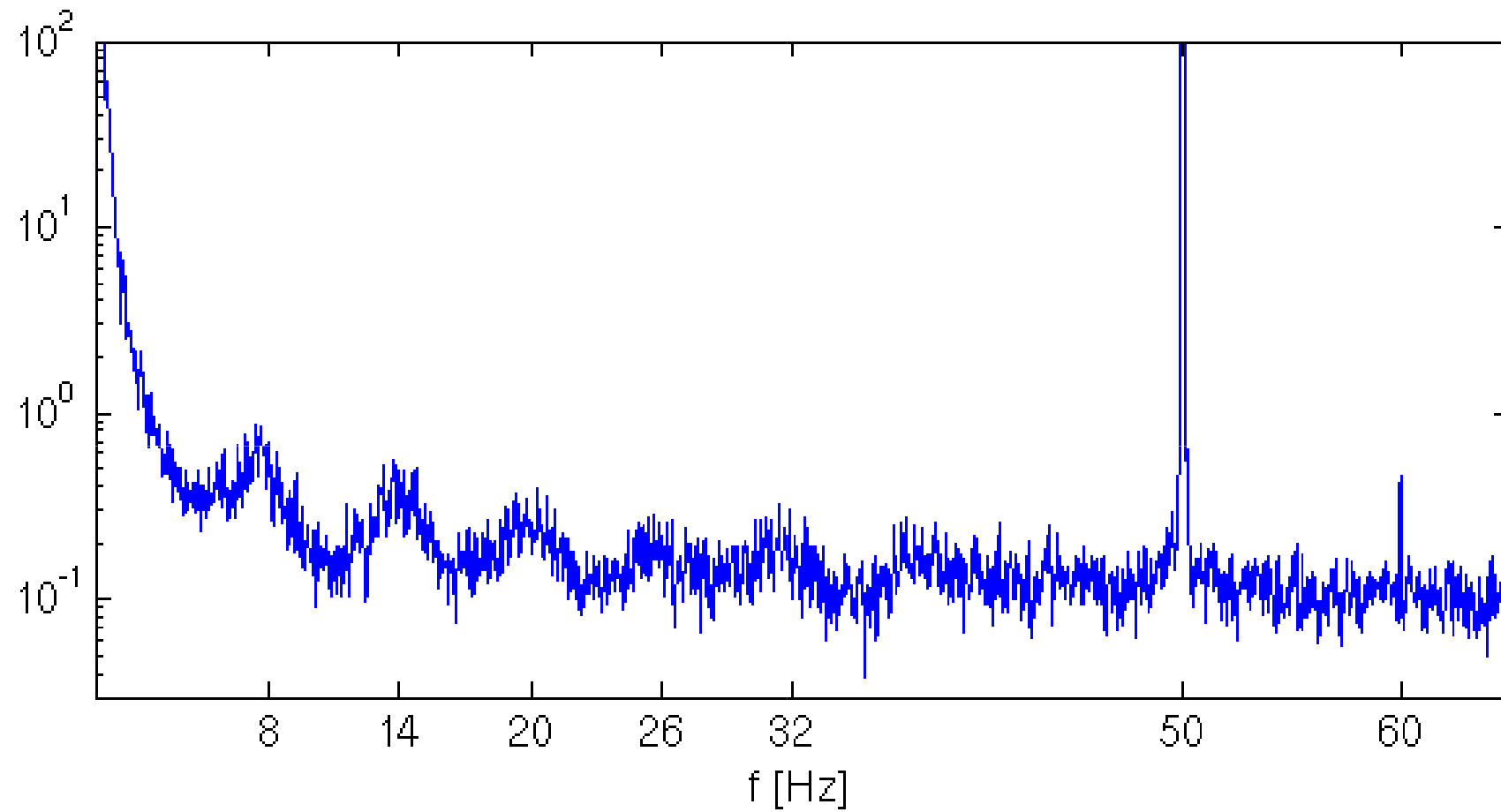


fizyk z lokalnej szkoły średniej

Stacja Patagonia



2016-03-28 - Patagonia - pierwszy test



Co daje system WERA ?

rozwiązania odwrotne w falowodach Grunt – Jonosfera / pojedyncze wyładowania

pierwszy kompletny przegląd globalny silnych CG⁺ i dojonosferycznych

pomiar momentów prądowych odosobnionych wyładowań o $p > 100$ C km

błąd pozycji wyładowań: 50 km x 50 km (10 km x 10 km w przyszłości)

badania parametrów jonosfery na trasie propagacji

rozwiązania odwrotne we wnętrzu Grunt – Jonosfera / rezonans Schumanna

mapowanie i kalibracja mocy burz w jednostkach bezwzględnych

pozycja centrów: lepiej niż 300 km, czasowa zdolność rozdzielcza: 5 min

pomiar mocy burz na Ziemi (w czasie rzeczywistym)

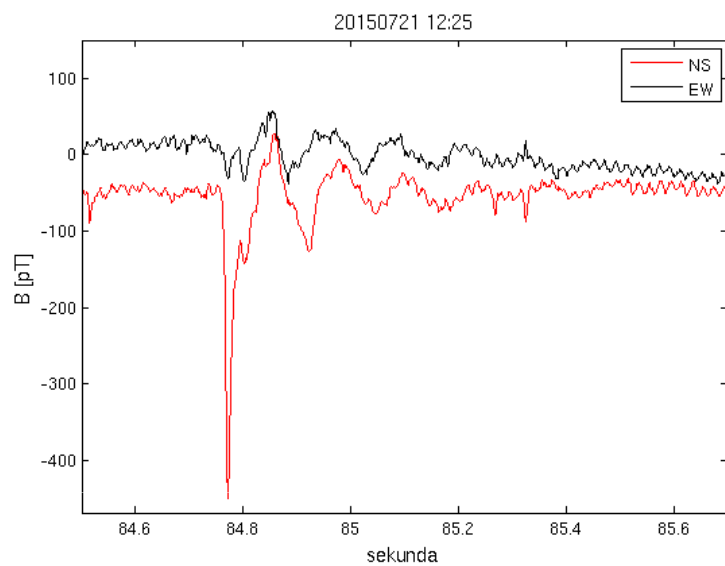
badania dolnych warstw jonosfery

badania wpływu aktywności Słońca na wnątkę

badania pogody i klimatu

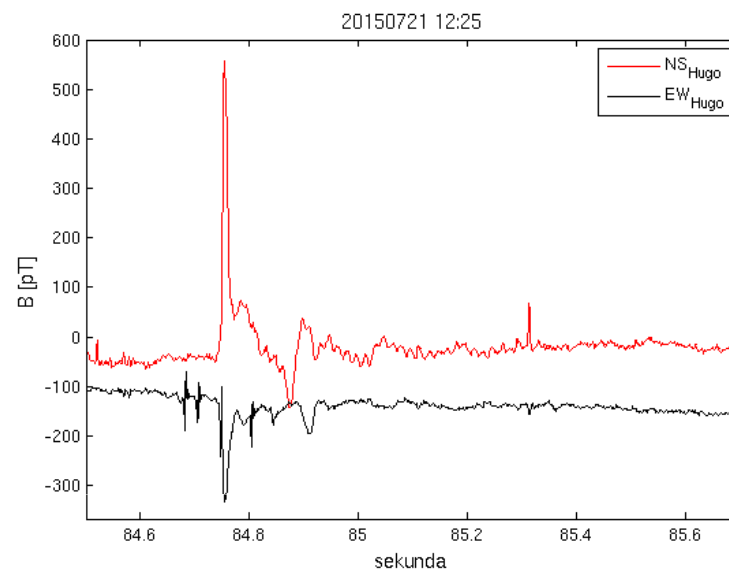
WERA - silne wyładowanie CG+

Hylaty



8420 km

Hugo



4390 km

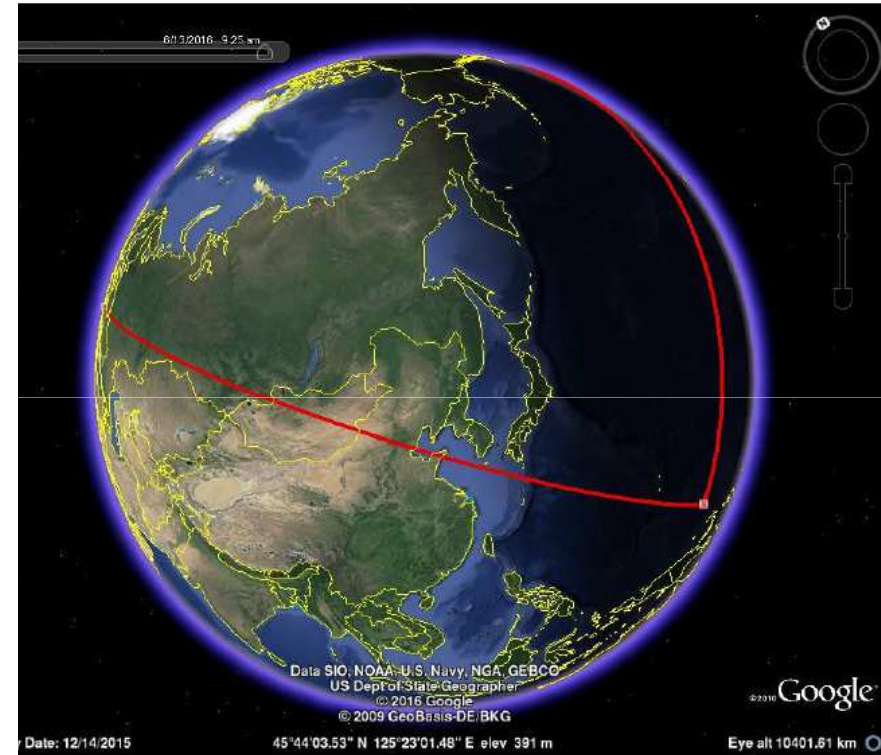
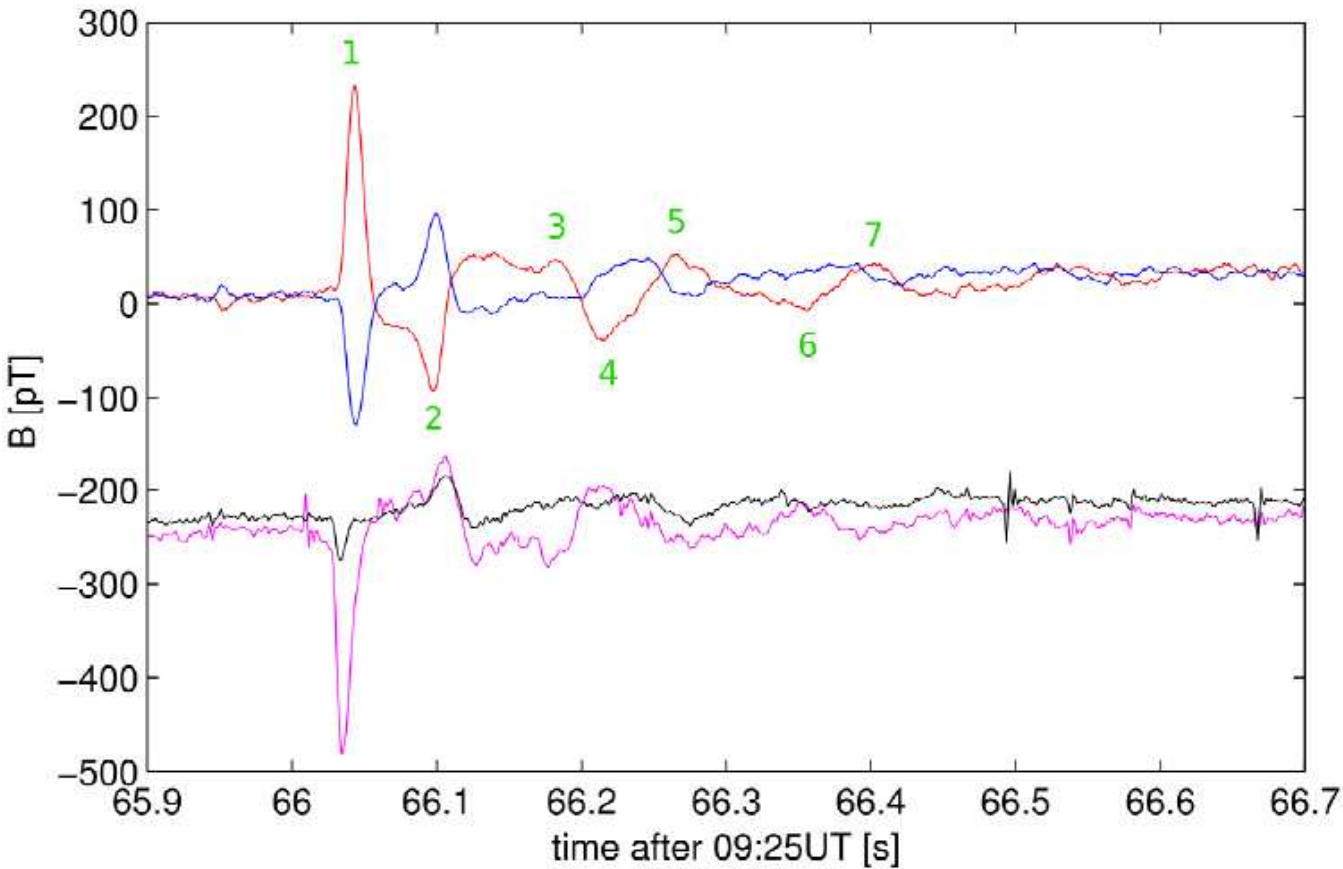
metoda RDF + TOA



WERA inne silne wyładowanie CG+

9 June 2015

metoda RDF + TOA



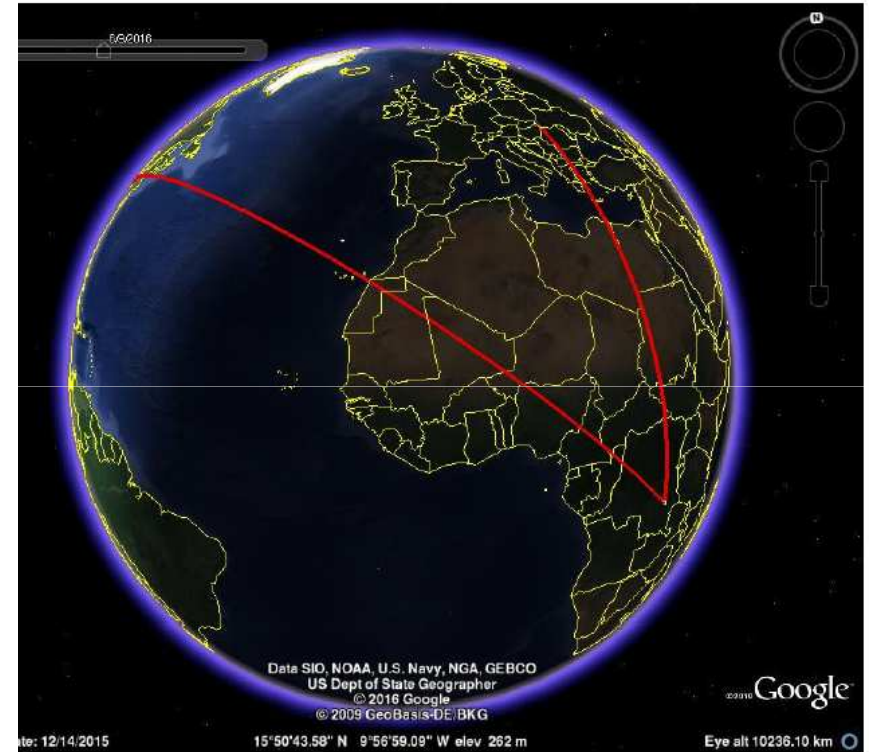
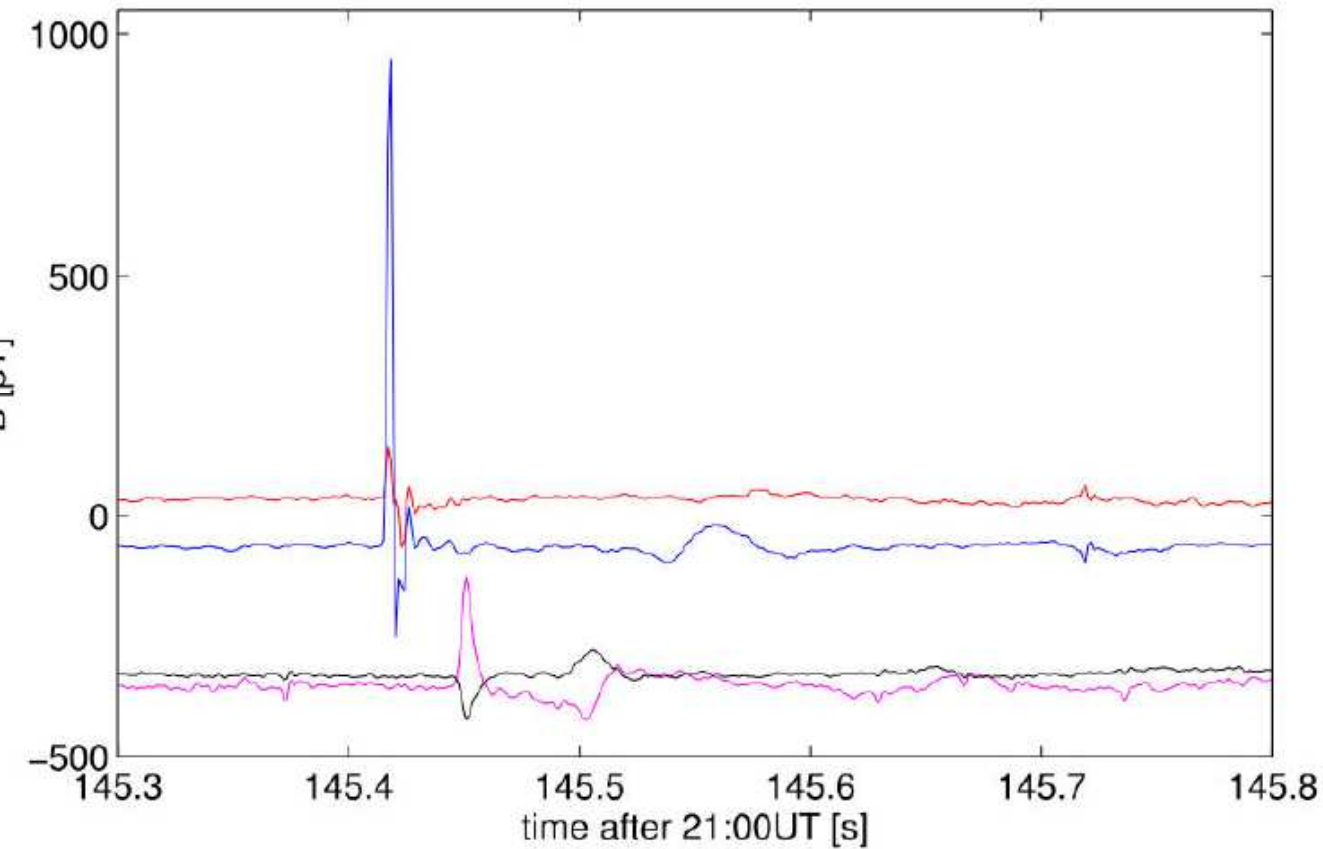
$$\alpha_{\text{HYL}} = 58.4^\circ$$

$$\alpha_{\text{HUG}} = 281.9^\circ$$

WERA - kolejny przykład CG+

9 June 2015

metoda RDF + TOA



$$\alpha_{\text{HYL}} = 174.1^\circ$$

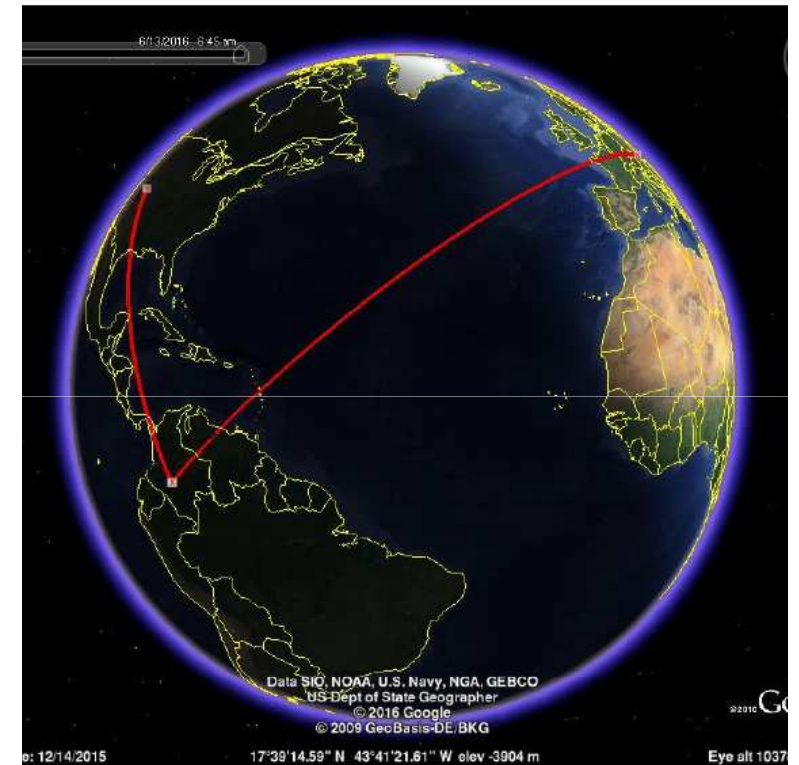
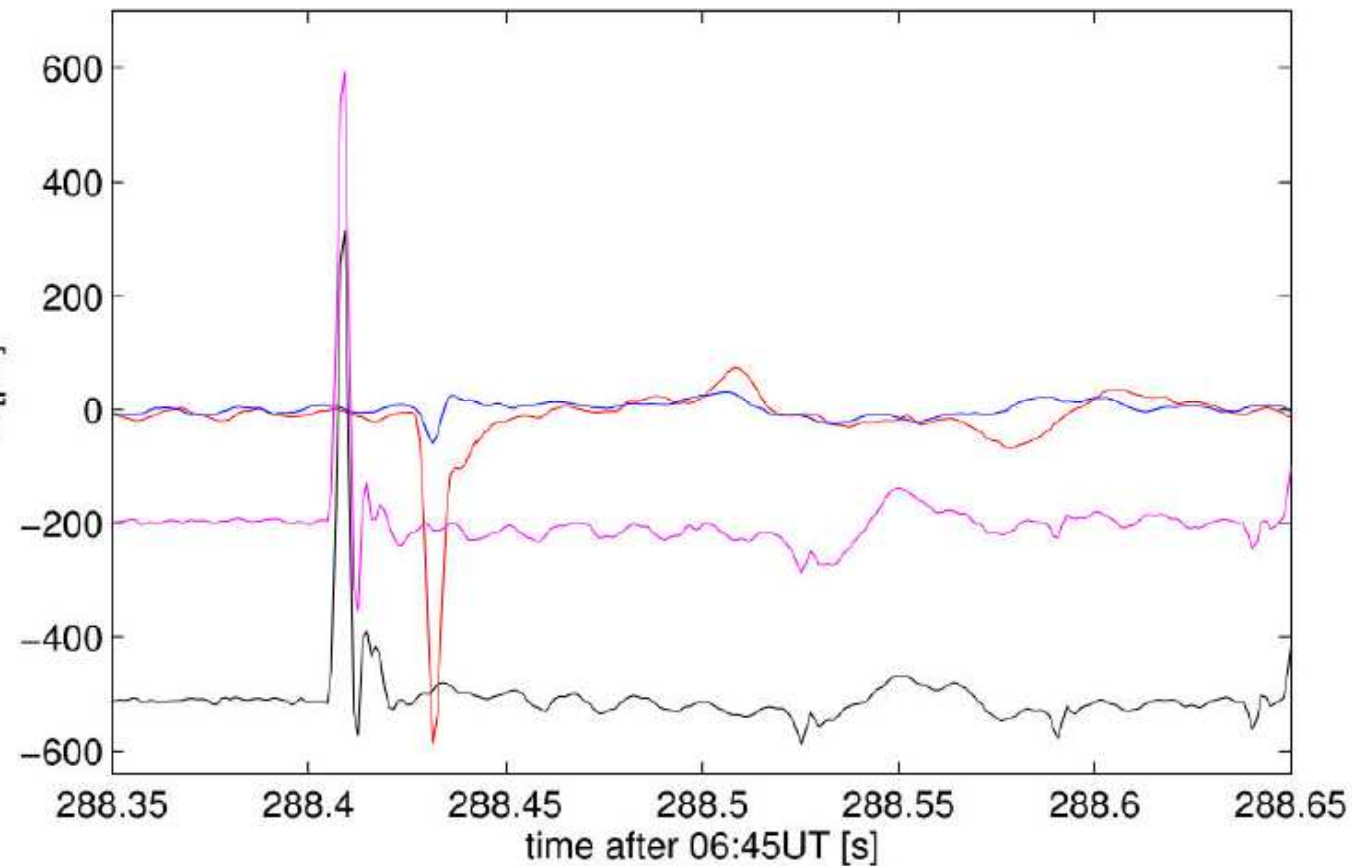
$$\alpha_{\text{HUG}} = 68.3^\circ$$

Afryka

WERA - i jeszcze kolejny przykład silnego CG^+

9 June 2015

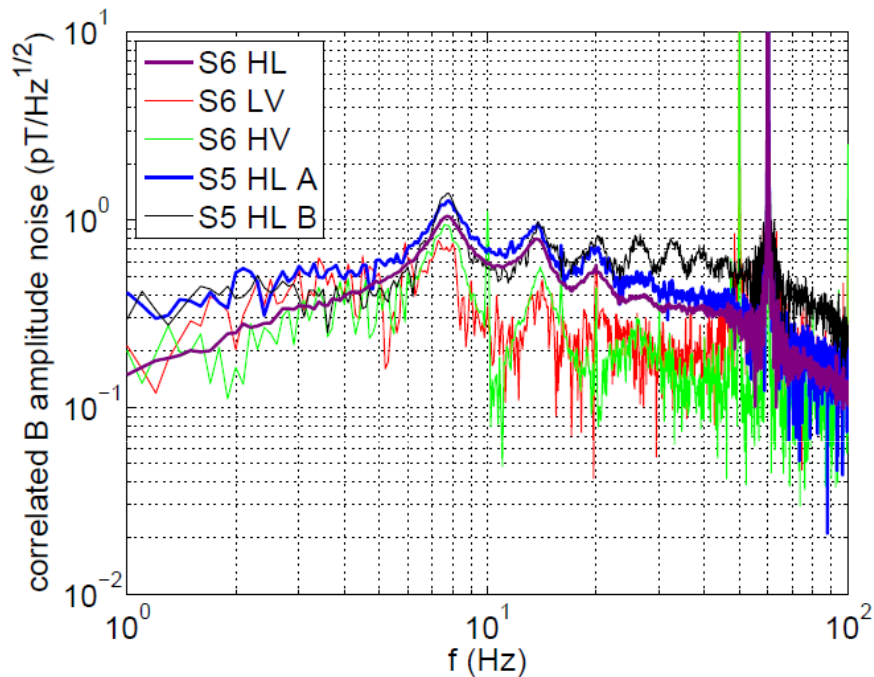
metoda RDF + TOA



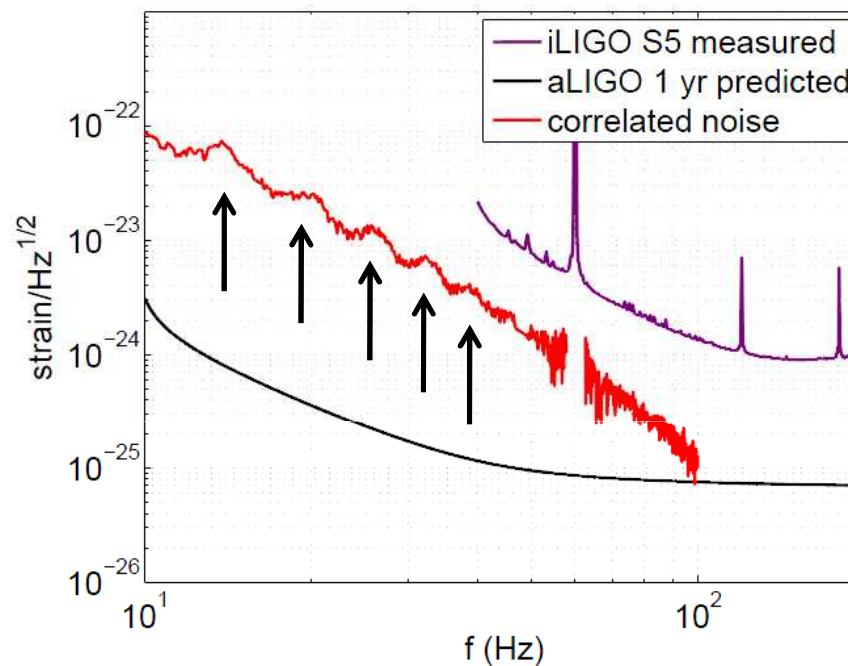
$$\alpha_{\text{HYL}} = 276.1^\circ \quad \alpha_{\text{HUG}} = 136.5^\circ$$

Południowa Ameryka

interferometry LIGO Hanford (LHO) i LIGO Livingston



Magnetic cross-amplitude spectra during the S5 and S6-VSR2/3 LIGO-Virgo science runs.

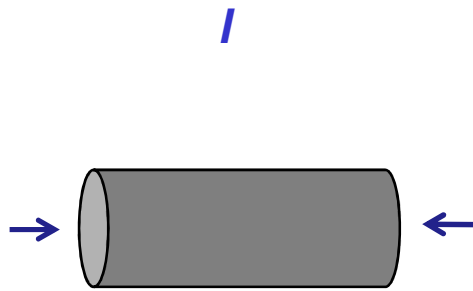


Strain amplitude spectra for correlated and uncorrelated noise. Black is the uncorrelated noise for the H1L1 detector pair operating at Advanced LIGO design sensitivity and assuming 1 yr of integration.

Metody detekcji fal grawitacyjnych

ciało stałe

rezonatory mechaniczne



rezonansowy

limit – szумы termiczne - fonony

J. Weber - 1968

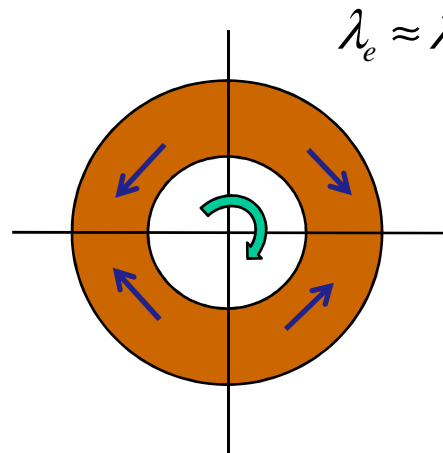
$$l = 2 \text{ m}$$

$$\Delta l = 10^{-16} \text{ m}$$

$$h = 5 \cdot 10^{-17}$$

rotujące

pole elektromagnetyczne

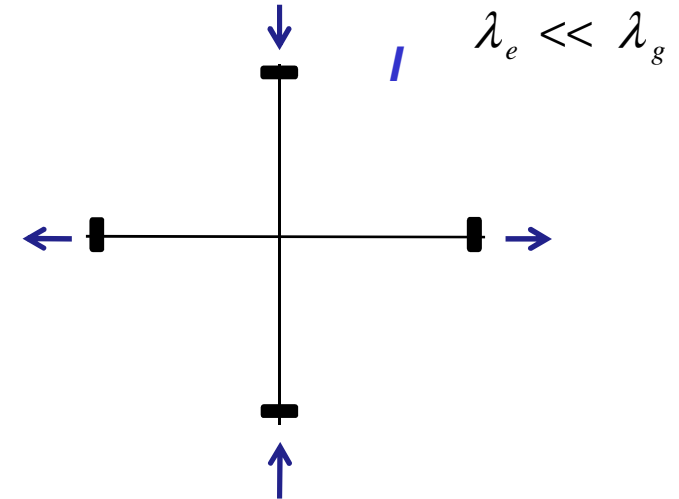


rezonansowy

$$\lambda_e \approx \lambda_g$$

ciało stałe

swobodne masy



szerokopasmowy

limit – szum fotonowy

G. E. Moss, J. R. Miller, R. J. Forward - 1971

$$l = 4000 \text{ m}$$

$$\Delta l = 5 \cdot 10^{-20} \text{ m}$$

$$h = 10^{-23}$$

aLIGO



aLIGO - dolny limit sygnału

ograniczenia szumowe:

powyżej 150 Hz - szum kwantowy

poniżej 150 Hz – inne źródła szumu

szum fazowy lasera

szum termiczny zawiesznień

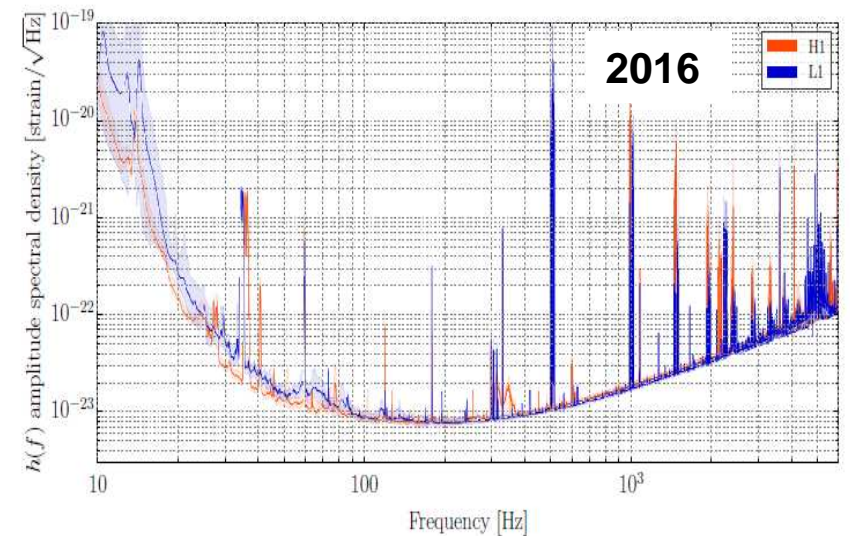
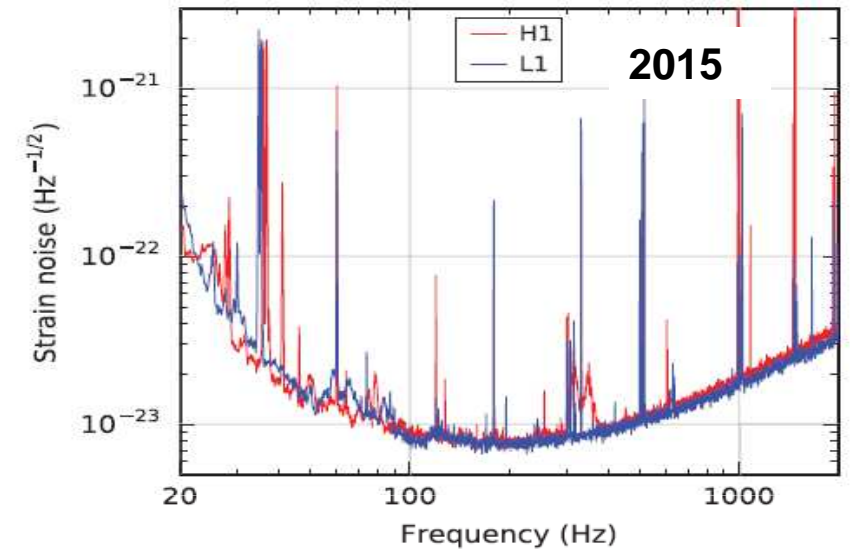
ponadto sygnały kalibracyjne:

33-38, 330 i 1080 Hz

w widmie sygnału detektora widać również:

drgania zawieszenia włókna - 500 Hz i harmoniczne

sieć 60 Hz i harmoniczne



Dlaczego tak się dzieje - możliwe mechanizmy oddziaływania pola EM

silny wpływ – głównie składowa magnetyczna pola H – trudna do ekranowania

powstawanie sił w elementach zawieszonych i masach próbnych

hierarchia intensywności oddziaływań :

10^{36}

720 dB

przewody z prądem – siły elektrodynamiczne

ferromagnetyk namagnesowany – momenty skręcające

ferromagnetyk miękki – wciąganie

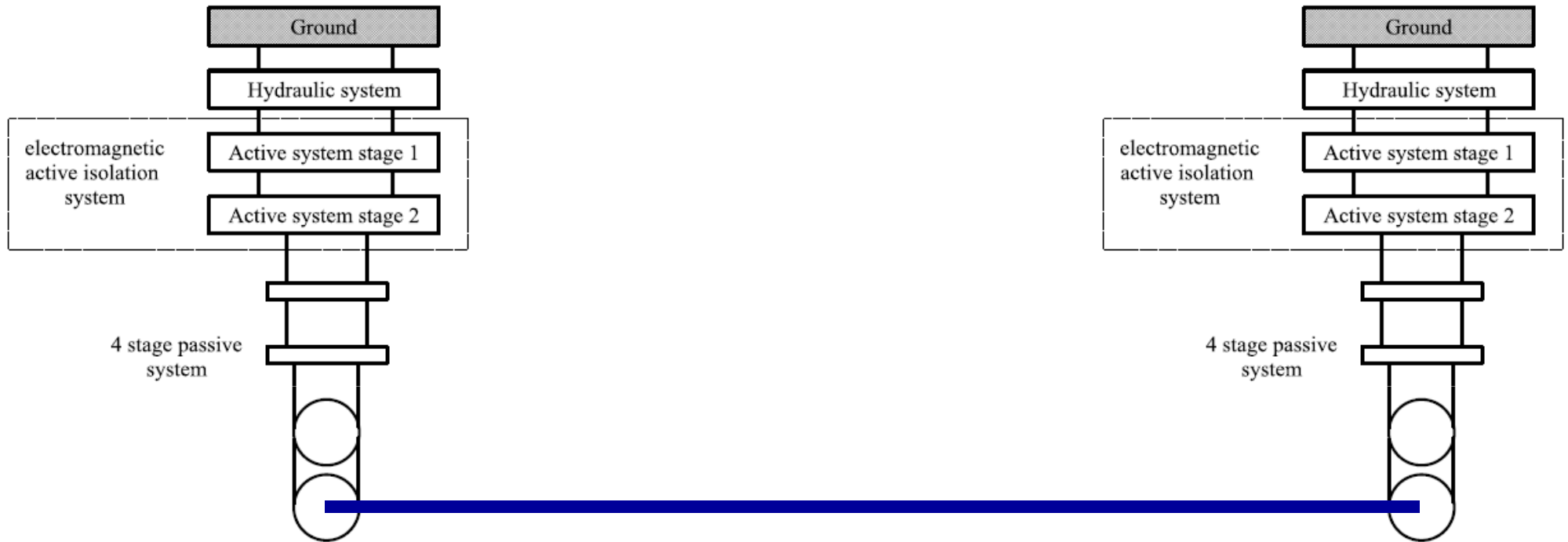
ferromagnetyk miękki – magnetostrykcja

przewodnik – siły Lenza

niedoskonały dielektryk – siły Lenza, elektrostrykcja

doskonały dielektryk – elektrostrykcja

Oddziaływanie pól EM na zawieszania mas próbnych



w LIGO stosowano magnesy zamontowane bezpośrednio na masach testowych

w aLIGO pole wpływa na ferromagnetyki w 1 i 2 systemie zawiesznień

impuls pola ELF o amplitudzie $B = 10 \text{ pT}$ wywołuje impuls pseudograwitacyjny o amplitudzie $h = 10^{-22}$

Jak przeciwdziałać ?

ekranowanie wrażliwych układów zawieszonych mas próbnych

ekranowanie bierne – osłony ferromagnetyczne wrażliwych elementów zawieszonych

ekranowanie aktywne – możliwe układy o wielu czujnikach magnetycznych

zastosowanie lokalnych magnetometrów i usuwanie postdetekcyjne na wyjściu detektora

odosobnione impulsy ELF

weryfikacja korelacyjna

pole BSR – Background Schumann Resonance

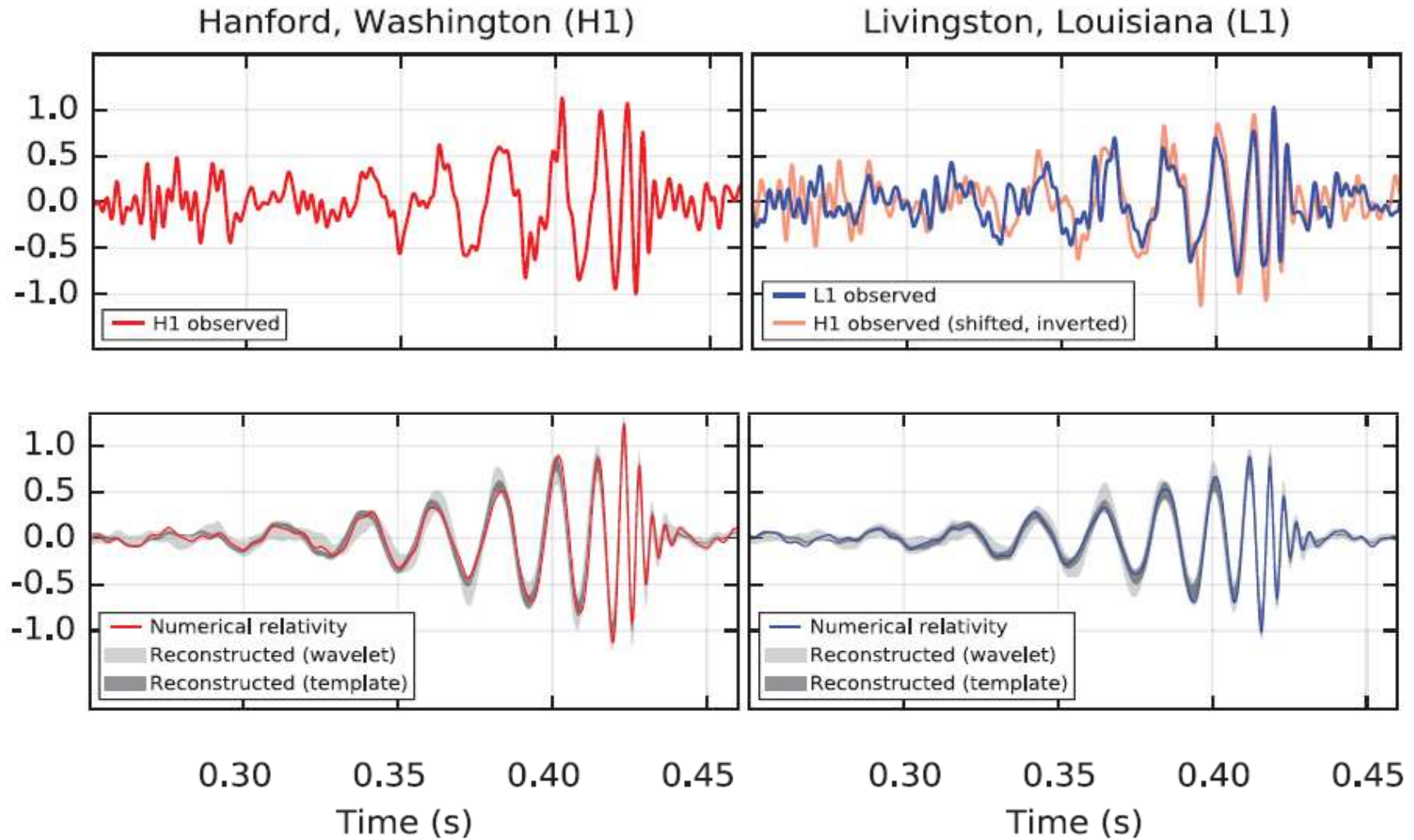
odejmowanie niekoherentne

optymalne filtry wienerowskie w czasie rzeczywistym

odejmowanie widmowe

odejmowanie koherentne (z uwzględnieniem fazy)

Transient gravitational wave signal - September 14, 2015 at 09:50:45 UTC



Położenie stacji Hugo względem detektorów LIGO

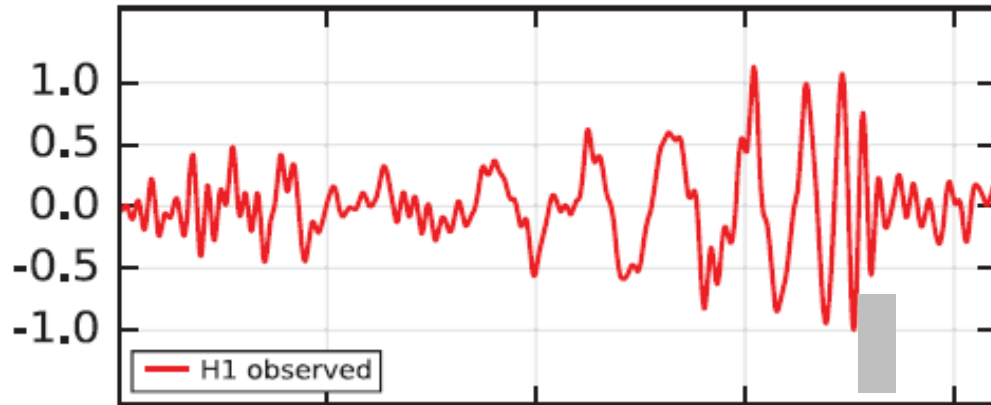
Hanford, Washington



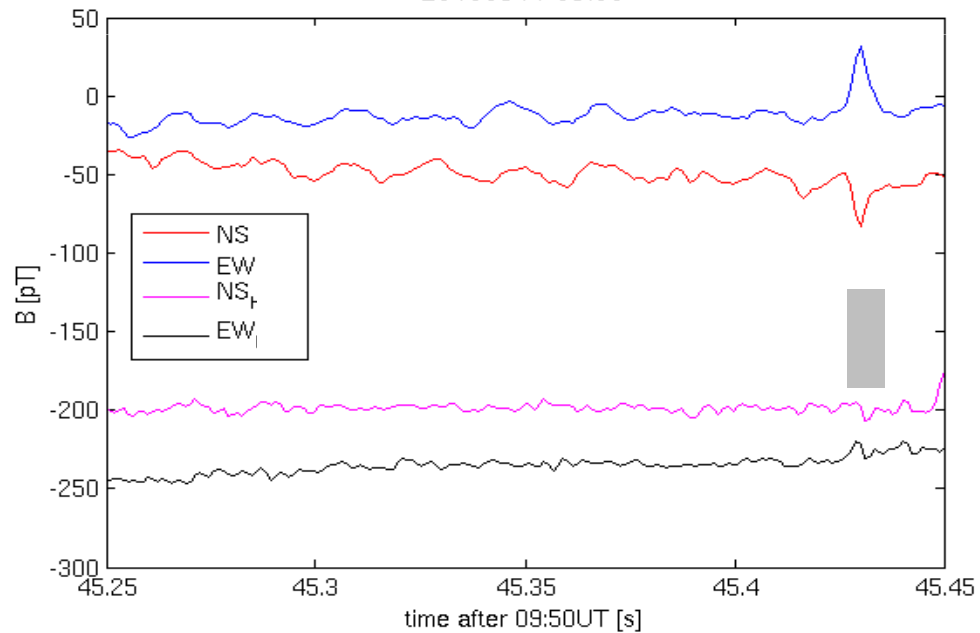
Livingston, Louisiana

Weryfikacja wpływu impulsów EM na zapis LIGO

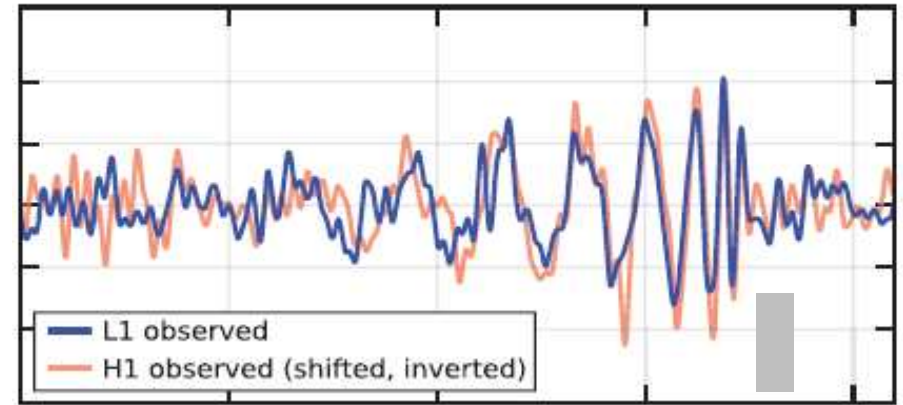
Hanford, Washington (H1)



20150914 09:50

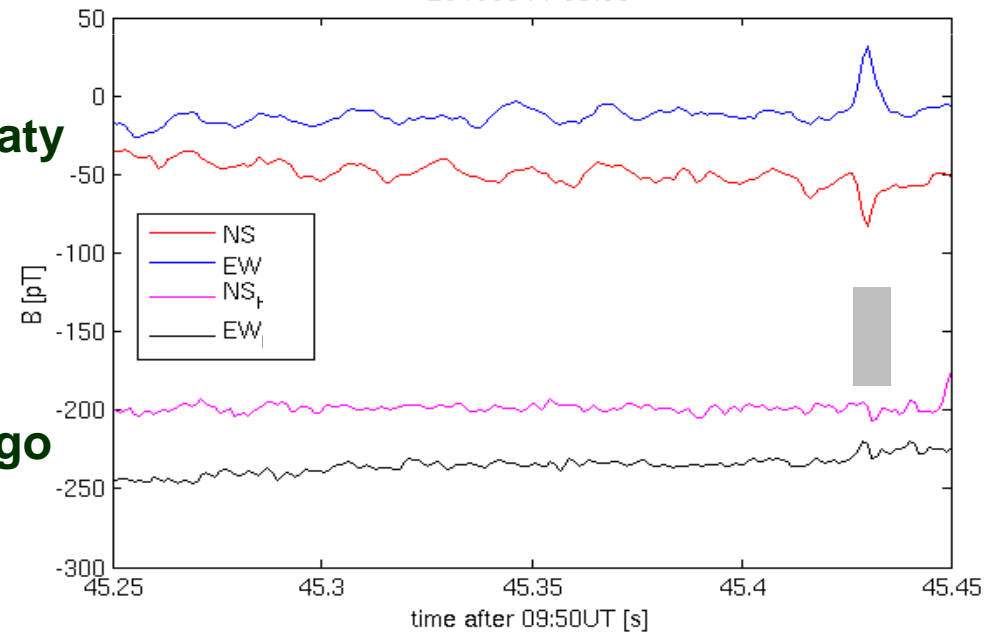


Livingston, Louisiana (L1)



20150914 09:50

Hylaty



Hugo

Podsumowanie

badania fal elektromagnetycznych ELF są szybko rozwijającym się działem geofizyki

dostarczają informacji o fizyce wyładowań w atmosferze Ziemi

pozwalają badać dolne warstwy jonosfery i wpływ Słońca na ich stan

umożliwiają precyzyjną metrologię globalnego obwodu elektrycznego

mapowanie burz w skali globalnej

pomiary aktywności w jednostkach bezwzględnych

wkrótce staną się nową metodą badań jonosfer i gruntu planet

jest jeszcze wiele problemów do rozwiązania

zagadnienia typowe dla fizyki i informatyki stosowanej

Dziękujemy za zaproszenie

ELF

Andrzej Kułak	AGH + OA UJ
Michał Dyrda	IFJ Kraków
Sławomir Kłucjasz	Bełchatów
Jerzy Kubisz	OA UJ
Volodya Marchenko	OA UJ
Adam Michalec	OA UJ
Janusz Młynarczyk	AGH
Zenon Nieckarz	IF UJ
Anna Odzimek	IGF PAN Warszawa
Michał Ostrowski	OA UJ
Stanisław Zięba	OA UJ

kontakt: Andrzej Kulak <andrzej.radiol1@gmail.com>

Ważniejsze publikacje GRS cytowane w wykładzie

- A. Kułak, K. Maślanka, A. Michalec, S. Zięba, Observations of Alfvén Ionospheric Resonances on the Earth Surface, *Studia Geophysica et Geodaetica*, 43, 399 – 406, 1999.
- A. Kułak, S. Micek, Z. Nieckarz, S. Zięba, Solar variations in extremely low frequency propagation parameters: I. A two-dimensional telegraph equation (TDTE) model of ELF propagation and fundamental parameters of Schumann resonances, *J. Geophys. Res.*, 108, A7, 1270, doi: 10.1029/2002JA009304, 2003
- A. Kułak, J. Kubisz, A. Michalec, Z. Nieckarz, S. Zięba, Solar variations in extremely low frequency propagation parameters: II. Observations of Schumann resonances and computation of the ELF attenuation parameter, *J. Geophys. Res.*, 108, A7, 1271, doi: 10.1029/2002JA009305, 2003
- A. Kułak, J. Młynarczyk, S. Zieba, S. Micek, Z. Nieckarz, Studies of ELF propagation in the spherical shell cavity using a field decomposition method based on asymmetry of Schumann resonance curves, *J. Geophys. Res.*, Vol. 111, A10304, doi:10.1029/2005JA01149, 2006.
- A. Odzimek, Kułak A., Michalec A., Kubisz J., An automatic method to determine the frequency scale of the ionospheric Alfvén resonator using data from Hylaty station, Poland, *Annales Geophysicae*, 2151-2158, 2006.
- M. J. Rycroft, A. Odzimek, N. F. Arnold, M. Fullekrug, A. Kułak, T. Neubert, New model simulations of the global atmospheric electric circuit driven by thunderstorms and electrified shower clouds: The roles of lightning and sprites, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 69 (17-18), 2485-2509, 2007.
- Z. Nieckarz, Andrzej Kułak, Stanisław Zięba, Marek Kubicki, Stanisław Michnowski, Piotr Barański, Comparison of global storm activity calculated from Schumann resonance background component to electric field intensity E0Z, *Atmospheric Research*, Vol. 91, pp. 184-187, 2009.
- Z. Nieckarz, S. Zieba, A. Kułak and A. Michalec, Study of the Periodicities of Lightning Activity in Three Main Thunderstorm Centers Based on Schumann Resonance Measurements, *Monthly Weather Review*, Volume 137, Issue 12, pp. 4401–4409, DOI: 10.1175/2009MWR2920.1, 2009.
- A. Kułak, Z. Nieckarz, and S. Zięba, Analytical description of ELF transients produced by cloud-to-ground lightning discharges, *J. Geophys. Res.*, 115, D19104, DOI:10.1029/2009JD013033, 2010.

Ważniejsze publikacje GRS cytowane w wykładzie

- Z. Nieckarz, A. Kulak, S. Zieba, and A. Odzimek, Cloud-to-ground lightning dipole moment from simultaneous observations by ELF receiver and combined direction finding and time-of-arrival lightning detection system, *J. Geophys. Res.*, DOI:10.1029/2010JD014736, 2011.
- A. Kulak, J. Mlynarczyk, A new technique for reconstruction of the current moment waveform from the magnetic field component based on a gigantic jet associated lightning discharges recorded by ELF station, *Radio Science*, 46, RS2016, doi:10.1029/2010RS004475, 2011.
- A. Kulak, J. Mlynarczyk, M. Ostrowski, J. Kubisz, and A. Michalec, Analysis of ELF electromagnetic field pulses recorded by the Hylaty station coinciding with terrestrial gamma-ray flashes, *J. Geophys. Res.*, 117, D18203, doi:10.1029/2012JD018205, 2012.
- A. Kulak, and J. Mlynarczyk, ELF Propagation Parameters for the Ground-Ionosphere Waveguide With Finite Ground Conductivity, *IEEE Transactions on Antennas and Propagations*, Vol. 61, No. 4, doi: 10.1109/TAP.2012.2227445, 2013.
- A. Kulak, J. Mlynarczyk, J. Kozakiewicz, An Analytical Model of ELF Radiowave Propagation in Ground-Ionosphere Waveguides With a Multilayered Ground, *IEEE Transactions on Antennas and Propagations*, 61, 9, 10.1109/TAP.2013.2268244, 2013.
- A. Kulak, J. Kubisz, S. Klucjasz, A. Michalec, J. Mlynarczyk, Z. Nieckarz, M. Ostrowski, and S. Zieba, Extremely low frequency electromagnetic field measurements at the Hylaty station and methodology of signal analysis, *Radio Science*, 49, doi:10.1002/2014RS005400, 2014.
- M. Dyrda, A. Kulak, J. Mlynarczyk, M. Ostrowski, J. Kubisz, A. Michalec and Z. Nieckarz, Application of the Schumann resonance spectral decomposition in characterizing the main African thunderstorm center, *J. Geophys. Res.*, DOI: 10.1002/2014JD022613, 2014.
- J. Mlynarczyk, J. Bor, A. Kulak, M. Popek, J. Kubisz, An unusual sequence of sprites followed by a troll – an analysis of ELF radio measurements and optical observations *J. Geophys. Res.*, 120, doi:10.1002/2014JA020780, 2015.
- M. Dyrda, A. Kulak, J. Mlynarczyk, and M. Ostrowski, Novel analysis of a sudden ionospheric disturbance using Schumann resonance measurements, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, doi:10.1002/2014JA020854, 2015.
- J. Kozakiewicz, A. Kulak, J. Mlynarczyk, Analytical modeling of Schumann resonance and ELF propagation parameters on Mars with a multi-layered Ground, *Planetary and Space Science*, 117, 127–135, 2015.