

ACADEMIA astronomia

NIEZRÓWNIANE FALE ELF

Mapowanie globalnej aktywności burzowej w skalach czasowych od minut aż do wielu lat, co odgrywa ważną rolę w pomiarach i prognozowaniu efektu cieplarnianego. Weryfikacja modeli wpływu różnych form aktywności Słońca na stan dolnych warstw jonosfery. To m.in. umożliwi na Ziemi system WERA. Kiedy przyjdzie czas, sprawdzi się także na Marsie.

dr hab. Andrzej Kułak

Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków
Uniwersytet Jagielloński



**dr hab.
Andrzej Kułak**

pracuje w Katedrze Elektroniki AGH i Obserwatorium Astronomicznym UJ. Od 20 lat specjalizuje się w modelowaniu źródeł i propagacji fal ELF oraz projektowaniu aparatury do ich obserwacji.
kulak@oa.uj.edu.pl

Trzecia stacja pomiarowa systemu WERA (World ELF Radiolocation Array) została uruchomiona w Patagonii w Argentynie 27 marca. Tak oto rozpoczął pracę pierwszy międzykontynentalny system radiolokacji źródeł promieniowania radiowego wykorzystujący fale elektromagnetyczne ekstremalnie niskich częstości (ELF – Extremely Low Frequency). Pierwsza stacja pomiarowa – Hyłaty w Bieszczadach – działa od 2005 roku, a kolejną – Hugo w Colorado – postawiono dziesięć lat później. WERA pracuje w zakresie częstotliwości od 0,03 do 300 Hz i jest przeznaczona do badania wyładowań elektrycznych w atmosferze Ziemi. Zastosowanie anten kierunkowych w każdej ze stacji pozwala na wyznaczenie lokalizacji wyładowań, a analiza przebiegów fal ujawnia szczegóły obserwowanego procesu.

Dlaczego ELF?

Fale ELF poruszają się w falowodzie utworzonym przez przewodzącą powierzchnię Ziemi i dolne war-

stwy jonosfery leżące na wysokości ok. 75 km. Doskonałe właściwości odbijające jonosfery w tym zakresie częstotliwości sprawiają, że falowod charakteryzuje się niezwykle małym tłumieniem. Np. energia fali o częstotliwości 10 Hz maleje do połowy dopiero na dystansie 10 000 km.

Daleki zasięg fal i dobrze poznane parametry falowodu grunt – jonosfera sprawiają, że ten zakres częstotliwości wyjątkowo dobrze nadaje się do badania globalnej aktywności elektromagnetycznej planet. Do zapewnienia dużej dokładności pomiarów wystarczy niewielka liczba stacji obserwacyjnych.

Wydawałoby się, że ze względu na dostępność źródeł prądów zmiennych o niskich częstotliwościach zakres fal ELF powinien być zbadany wkrótce po przeprowadzeniu pierwszych eksperymentów z falami radiowymi przez Henryka Hertza w 1887 roku. Na przeszkodzie stanęły trudności związane z budową sprawnych anten nadawczych o rozmiarach setek kilometrów. Sama detekcja jest łatwiejsza. Już w 1890 roku amerykański inżynier Arthur Edwin Kennelly przeprowadził próbę obserwacji fal ELF emitowanych przez Słońce. Zbudował w tym celu system odbiorczy, składający się z wielokilometrowej siedmiozwojowej cewki, otaczającej złożę rudy w New Jersey i podłączony do słuchawki telefonicznej. Negatywny wynik obserwacji spowodowany był istnieniem nieznaną jeszcze wtedy jonosfery ziemskiej, całkowicie zasłaniającej Słońce w tym zakresie fal. Nie powiodły się też próby przesyłania w zakresie ELF energii na du-



że odległości, podjęte przez Nicolę Teslę w 1899 roku w Colorado Springs. Te wczesne niepowodzenia sprawiły, że zakresem ELF przestano się interesować. Dopiero w 1952 roku Winfried Otto Schumann zauważył, że sferyczny kształt falowodu Ziemia – jonosfera tworzy wielką wnękę rezonansową, w której powinny występować drgania elektromagnetyczne o bardzo niskich częstotliwościach. Przypuszczenia te potwierdziły się po przeprowadzeniu obserwacji przez zespół badaczy z MIT w 1960 roku. Data ta otwiera początek systematycznych badań propagacji fal ELF, w których uczestniczą dzisiaj ośrodki w Stanach Zjednoczonych, Japonii, Izraelu, na Węgrzech, a także w Polsce.

Największą przeszkodą w obserwacjach fal ELF są zakłócenia cywilizacyjne, które eliminują z badań obszar praktycznie całej Europy. W Polsce pierwsza obserwacja rezonansu Schumanna udała się w 1992 roku w Bieszczadach, które – jak się potem okazało – stanowią obszar unikatowy pod tym względem. Zafascynowani, utworzyliśmy zespół fizyków i astro-

nomów z Uniwersytetu Jagiellońskiego oraz AGH w celu prowadzenia systematycznych badań pól ELF. W 1994 roku rozpoczęliśmy obserwacje ekspedycyjne specjalnie zbudowaną do tego celu aparaturą ELA1. Zapoczątkowała ona ciąg kolejnych generacji anten i układów odbiorczych. W 2005 roku, dzięki projektowi KBN 3Po4D 018 24 i współpracy z Nadleśnictwem Lutowiska, zbudowaliśmy stałe obserwatorium fal ELF Hylaty, oparte na systemie ELA7. Ciekawostką jest to, że dzięki głębokiemu wnikananiu fal ELF w głąb gruntu zarówno anteny, jak i aparaturę odbiorczą Hylaty mogliśmy umieścić pod ziemią. Obserwatorium zlokalizowane z dala od sieci energetycznych, na obrzeżu Bieszczadzkiego Parku Narodowego, zapewnia bardzo wysokiej jakości dane. Prowadzimy też prace teoretyczne w dziedzinie modelowania propagacji fal ELF w falowodzie grunt – jonosfera oraz zjawisk rezonansowych we wnęce Ziemia – jonosfera. Przeanalizowaliśmy wpływ aktywności Słońca na stan wnęki Ziemia – jonosfera (2003), opracowaliśmy oryginalną metodę

ACADEMIA prezentacje astronomia

Fot. 1:

Patagonia, przygotowania do umieszczenia anten magnetycznych ELF pod powierzchnią ziemi. Dr Janusz Młynarczyk z AGH (na pierwszym planie) wyznacza kierunki ustawienia anten



Fot. 2, 3:

Moduł odbiorczy stacji Patagonia tuż przed ukryciem w ziemi. Znajduje się w odległości kilkudziesięciu metrów od anten, tak by obsługujące go osoby nie zakłócały pomiarów. Inż. Jerzy Kubisz z OA UJ i Jacobo Salvador z UNIDEF przeprowadzają pierwszą obserwację testową.

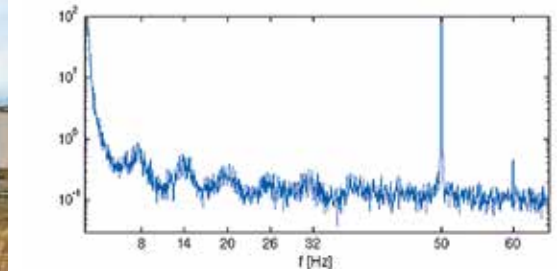


Fot. 4:

Zasobnik stacji geofizycznej UNIDEF

Fot. 5:

Pierwsze pięciominutowe widmo Rezonansu Schumanna zarejestrowane 27 marca 2016 r. w stacji Patagonia. Oprócz maksimum rezonansu widać linie widmowe sieci elektrycznych 50 Hz (Ameryka Południowa) i 60 Hz (Ameryka Północna)



badan właściwości fizycznych wnętrza oraz mapowania ruchu i intensywności centrów burzowych (2006–2015). Opracowaliśmy też nową metodę pomiaru parametrów fizycznych różnych rodzajów wyładowań w oparciu o rozwiązania odwrotne (2010–2015). Obecnie zespół krakowski ELF jest jednym z najbardziej zaawansowanych w tego rodzaju badaniach na świecie.

Co można obserwować?

Najczęstszym źródłem fal wzbudzanych w falowodzie grunt – jonosfera są ujemne wyładowania atmosferyczne, przybierające postać piorunów uderzających w ziemię. Powstają w wyniku gromadzenia się ładunku ujemnego u podstawy komórek burzowych, co prowadzi do przebicia elektrycznego pomiędzy chmurą a gruntem. Typowe wyładowanie jest trwającym kilkadziesiąt mikrosekund impulsem prądu o natężeniu kilkudziesięciu tysięcy amperów, przepływającym w kanale plazmowym o długości od 2 do 3 kilometrów. Generuje ono w falowodzie impuls pola ELF dobrze widoczny w odległościach rzędu tysiąca kilometrów. Dalej zlewa się z podobnymi impulsami, powstającymi w wyniku innych licznych wyładowań na całej kuli ziemskiej.

Na Ziemi, głównie w strefach tropikalnych, istnieje ponad tysiąc stale czynnych komórek burzowych, które wytwarzają ok. 50 ujemnych wyładowań doziemnych na sekundę. Ponieważ wysyłają one fale we wszystkich kierunkach, prowadzi to do interferencji fal obiegających Ziemię i w rezultacie do powstawania zjawisk rezonansowych. Rezonans Schumanna widoczny jest jako stale występujący szum atmosferyczny

o maksimum widmowych w pobliżu częstotliwości 8, 14, 20, 26 itd. Hz, odpowiadającym kolejnym modom rezonansowym wnętrza Ziemia – jonosfera.

Każda ze stacji systemu WERA widzi stale 7 maksimum. Ich pomiar pozwala na bieżące badania zaburzeń parametrów wnętrza zachodzących pod wpływem zmiennej emisji słonecznego promieniowania ultrafioletowego UV i rentgenowskiego X oraz wysokoenergetycznych protonów promieniowania kosmicznego, docierających do dolnych warstw atmosfery Ziemi.

Silniejszym i znacznie rzadszym rodzajem wyładowań atmosferycznych są wyładowania dodatnie chmura – grunt. Powstają w wyniku gromadzenia się ładunku dodatniego w górnych partiach dużych mezoskalowych systemów burzowych, co prowadzi do przebicia elektrycznego w kierunku gruntu. Wyładowania te odprowadzają znacznie większe ładunki poprzez kanał plazmowy o długości rzędu 12 kilometrów. Wytwarzają silne impulsy pola ELF. Najsilniejsze z nich, tzw. Q-bursty, dzięki okrążaniu Ziemi są widoczne wielokrotnie zanim zrównają się z szumem tła. Energie wyładowań dodatnich są setki razy większe od energii zwykłych wyładowań ujemnych. Ze wstępnych obserwacji systemu WERA wynika, że liczba tak silnych wyładowań nie przekracza kilkunastu na godzinę na całej Ziemi.

Jeszcze silniejsze wyładowania, wywołane przebiegami pomiędzy jonosferą a chmurami, wiążą się ze zjawiskami optycznymi klasyfikowanymi jako TLE (*Transient Luminous Event*). Najbardziej znany ich rodzaj, SPRITE, występuje ponad mezoskalowymi systemami burzowymi i poprzedza silne wyładowanie dodatnie chmura – grunt, pozbawiające chmurę łą-

dunku dodatniego. Wyładowanie SPRITE ma długość rzędu 50 km i związane jest z przepływem ładunku dodatniego z jonosfery do chmury. Trwa kilkadziesiąt do kilkuset milisekund i towarzyszą mu przepływy ładunku porównywalne z ładunkami silnych wyładowań dodatnich. Z powodu przepływu prądu w kanale o tak dużej długości generowane przez nie impulsy pola ELF są widoczne na całej Ziemi.

Do najsilniejszych znanych wyładowań związanych z TLE należą wielkie dżety GJ (Gigantic Jet). Ten rodzaj wyładowań pomiędzy chmurami i jonosferą trwa zazwyczaj krócej niż SPRITE, ale wyzwala ogromne energie, odpowiadające niekiedy eksplozji kilku ton trotylu (TNT). Te zjawiska występują jednak niezwykle rzadko. W Europie zarejestrowano dotychczas tylko jeden przypadek GJ – w 2009 roku, w okolicach Korsyki.

Jak WERA stała się międzykontynentalna?

Budowę systemu WERA poprzedziły testy krajowego systemu Hylaty-Wigry-Karkonosze (HWK), przeprowadzone w 2014 roku. System ten powstał w ramach projektu NCN – 2011/01/B/ST10/06954. Nowa generacja szerokopasmowych anten AA1130 i systemów odbiorczych ELA10 została przystosowana do wieloletniej pracy w szczelnych zasobnikach umieszczonych pod ziemią. Aparaturę zbudowano w oparciu o technologie mikromocowe; jest zdolna do dwumiesięcznej pracy bez ładowania akumulatorów.

Dzięki życzliwości dyrekcji Wigierskiego Parku Narodowego oraz dyrekcji Karkonoskiego Parku Narodowego system HWK pracował na terenie parków w optymalnych warunkach środowiskowych. W 2015 roku, przy gościnnej współpracy Nadleśnictwa Brody, obserwacje zostały powtórzone na dystansie Hylaty – Puszcza Augustowska (system HA). Zebrane dane dostarczyły ważnych informacji dotyczących pracy aparatury w warunkach terenowych oraz cennych danych o aktywności burzowej w Europie.

Poszukiwanie czystych elektromagnetycznie obszarów w obu Amerykach nie było łatwe. Musiały to być okolice bezludne, ale jednocześnie będące w zasięgu współpracujących z nami badaczy. Optymalizacja lokalizacji stacji WERA stała się możliwa dzięki realizacji projektu NCN-2012/04/M/ST10/00565 Harmonia, razem z partnerami amerykańskimi: Earle Williamsem z MIT, Markiem Gołkowskim z University of Colorado oraz Eduardo J. Quelem, dyrektorem Unidad de Investigacion y Desarrollo Estrategico Para Defensa w Buenos Aires.

Ostatecznego wyboru miejsc i instalacji stacji Hugo i Patagonia dokonali przy współudziale naszych lokalnych współpracowników dr Janusz Młynarczyk z AGH oraz inż. Jerzy Kubisz z OA UJ. Już pierwsze testy potwierdziły wysoką jakość danych, nieustępujących danym z wzorowej stacji Hylaty.

Co jeszcze można odkryć?

Obserwacje systemu WERA pozwalają zarówno na prowadzenie badań astronomicznych (pogoda kosmiczna), jak i geofizycznych, meteorologicznych i klimatycznych. Dzięki precyzyjnym pomiarom rezonansu Schumanna za pomocą trzech stacji mapujemy globalną aktywność burzową w skalach czasowych od minut aż do wielu lat. Badania te odegrają ważną rolę w pomiarach i prognozowaniu efektu cieplarnianego na Ziemi. Wielopunktowy pomiar rezonansu Schumanna umożliwi ponadto badania parametrów fizycznych wnętrza Ziemi – jonosfera oraz weryfikację modeli wpływu różnych form aktywności Słońca na stan dolnych warstw jonosfery ziemskiej.

Unikatową cechą systemu WERA jest możliwość pomiaru wielu parametrów różnych typów wyładowań, niedostępna w innych systemach śledzących wyładowania. Dzięki globalnemu zasięgowi systemu możliwe są kompleksowe badania częstości występowania i rozrzutu parametrów silnych wyładowań dodatnich generujących Q-bursty oraz śledzenie rozmieszczenia i przebiegu procesów wyładowań typu SPRITE i wielkich dżetów GJ. Pomiar form falowych impulsów wzbudzanych przez poszczególne wyładowania dostarczą ponadto istotnych informacji o stanie dolnych warstw jonosfery ziemskiej na trasie ich propagacji.

Najczęstszym źródłem fal wzbudzanych w falowodzie grunt – jonosfera są ujemne wyładowania atmosferyczne, **przybierające postać piorunów uderzających w ziemię**

Stacje WERA – wcześniej dwie, obecnie już trzy – biorą udział w badaniu wpływu ziemskich zakłóceń elektromagnetycznych na pomiar detektorów fal grawitacyjnych LIGO w USA i VIRGO we Włoszech.

Doświadczenia związane z budową systemu WERA mogą być z łatwością przeniesione na inne planety i księżycy posiadające choćby szczątkowe jonosfery (zakres ELF jest pod tym względem najmniej wymagający). Nasz zespół rozpoczyna obecnie projekt budowy podobnego systemu na Marsie. Specyfiką Marsa jest stosunkowo duże tłumienie falowodu grunt – jonosfera, wynikające z dużej głębokości wnikania fal pod powierzchnię. Dlatego projekt obejmuje nie tylko konstrukcję wyspecjalizowanej aparatury, ale także opracowanie rozwiązań odwrotnych, pozwalających na tomografię gruntu Marsa.

ANDRZEJ KUŁAK

Chcesz wiedzieć więcej?

<http://www.ou.uj.edu.pl/elf/index/projects3.htm>