



Koronalne wyrzuty materii

Grzegorz Michałek

Obserwatorium Astronomiczne UJ

Dla zwykłego śmiertelnika Słońce jawi się być niezmiennym, a nawet dość nudnym obiektem. Wydaje się, że od wieków wygląda tak samo. Dokładne obserwacje pokazują jednak, że zmienia ono swoje właściwości w jedenastoletnim cyklu. Ten cykl aktywności obserwowany był przez wieki i został wyznaczony na podstawie ilości plam na Słońcu, czyli ciemnych obszarów pojawiających się na widocznej z Ziemi tarczy słonecznej. Wydawało się jednak, że ich obecność nie ma bezpośredniego wpływu na nasze życie, że – pomijając oddziaływanie grawitacyjne – Słońce działa na nas jedynie wysyłając promieniowanie elektromagnetyczne.

Rozwój technologii i ekspansja człowieka w Kosmos pokazały, że Słońce ma o wiele większy wpływ na naszą planetę niż początkowo sądzono. 11 września 1859 roku, w bezchmurny dzień, słynny obserwator Słońca Richard Carrington zaobserwował niezwykle zjawisko: dookoła plam na Słońcu pojawiły się dwie jasne wstęgi. To gwałtowne pojaśnienie trwało jedynie 5 minut. Następnej nocy niebo nad Ziemią rozbłysło z powodu czerwonych, zielonych i purpurowych zórz. Linie telegraficzne zaczęły iskrzyć. Nawet po wyłączeniu zasilających baterii, prądy indukowane przez te zorze wystarczały do utrzymania normalnej pracy telegrafów. Zaobserwowano również silne wahania ziemskiego pola magnetycznego. Carrington nie tylko dostrzegł na Słońcu erupcję, ale z wielką intuicją i przenikliwością potrafił ją powiązać z zorzami występującymi na Ziemi. Były to pierwsze obserwacje pokazujące, że Słońce może wpływać na naszą planetę również w inny sposób. Okazało się, iż Carrington zauważył największą erupcję zaobserwowaną na Słońcu w ostatnich 500 latach.

Dziś wiemy, że Ziemia leży wewnątrz rozciągłej atmosfery słonecznej. Atmosferę tę stanowi emitowany nieustannie w przestrzeń planetarną tzw. wiatr słoneczny złożony z energetycznych cząstek i pola magnetycznego. Przed jego zgubnym wpływem chroni nas ziemskie pole magnetyczne zwane magnetosferą. Czasami jednak zjawiska eksplozji na Słońcu są tak gwałtowne, że nasza magnetyczna tarcza ochronna nie wystarcza. Wówczas odczuwamy negatywne skutki słonecznej aktywności. Istnieją dwa typy eksplozji na Słońcu, są to rozbłyski chromosferyczne oraz koronalne wyrzuty materii. Podczas rozbłysku fragment atmosfery słonecznej rozgrzewany jest do temperatur porównywalnych z tymi panującymi w jądrze słonecznym (10 milionów kelwinów). Temu zjawisku towarzyszy silna emisja promieniowania elektromagnetycznego w całym zakresie widma. Rozbłyski te wpływają na ziemską atmosferę powo-

dując jej dodatkową jonizację. Z kolei podczas koronalnych wyrzutów materii (KWM) ogromne fragmenty słonecznej korony wyrzucane są w przestrzeń międzyplanetarną. Energia kinetyczna takiego wyrzutu osiąga czasami wartość 10^{26} J. Obłoki wyrzuconej materii często pędzą z prędkościami około 1000 km/s, a ich masa przewyższa 10^{16} g. Najszybsze dotychczas zarejestrowane wyrzuty miały prędkości sięgające 3000 km/s. Wielkoskalowe ruchy materii o takiej energii nierzadko generują fale uderzeniowe, które dodatkowo efektywnie przyspieszają naładowane cząstki. Jeżeli taki wyrzut skierowany jest w stronę Ziemi, może na niej generować silne burze geomagnetyczne, których najbardziej znanym przejawem są zorze polarne.

Korona słoneczna (najwyższa warstwa atmosfery słonecznej) jest bardzo rzadka i jej jasność w świetle widzialnym jest dużo mniejsza od jasności fotosfery (widoczna część atmosfery słonecznej). Koronę słoneczną możemy zatem obserwować jedynie podczas całkowitych zaćmień Słońca lub za pomocą specjalnych teleskopów (koronografów) z przysłonami (dyskami oklucyjnymi) zasłaniającymi jasną tarczę słoneczną. Wyrzuty koronalne są trudne do obserwacji, dlatego mogą być obserwowane tylko przez teleskopy umieszczone powyżej ziemskiej atmosfery. W porównaniu z rozbłyskami chromosferycznymi, KWM są zjawiskiem odkrytym niedawno. Ich pierwsza detekcja miała miejsce w 1971 roku. Obserwacji dokonano przy użyciu pierwszego koronografu umieszczonego na orbicie okołozemskiej (OSO-7).

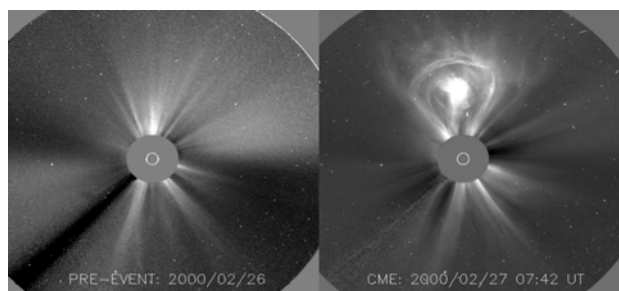
Prawdziwy przełom w badaniu KWM dokonał się po wysłaniu misji SOHO (**S**olar and **H**eliospheric **O**bservatory). Satelita ten obserwuje Słońce już od 13 lat. Na jego pokładzie obecnie pracują dwa koronografy pozwalające obserwować koronę słoneczną w odległości od 1,5 do 30 promieni słonecznych od centrum Słońca. W okresie swojej pracy koronografy te zarejestrowały ponad 11 tysięcy wyrzutów. Wszystkie one zostały zbadane, scharakteryzowane i umieszczone w dostępnym w Internecie SOHO/LASCO katalogu (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list). Katalog ten jest na bieżąco uzupełniany. W okresie maksimum słonecznej aktywności obserwujemy nawet dziesięć silnych wyrzutów w ciągu dnia. W okresie minimum słonecznej aktywności obserwuje się kilka silnych wyrzutów na tydzień. W obecnym minimum, które jest nadzwyczajnie długie, obserwujemy znacznie mniej silnych eksplozji.

Morfologia KWM

W koronografach obserwujemy światło pochodzące z fotosfery słonecznej, ale rozpraszane w naszym kierunku przez elektrony lub cząsteczki pyłu znajdujące się w koronie słonecznej. Każdy elektron jest jak małe zwierciadło o przekroju poprzecznym 10^{-28} m². Im więcej elektronów znajduje się w danym obszarze, tym jaśniej obszar ten świeci. Obrazy z koronografów odzwierciedlają więc gęstość koronalnej plazmy. W klasycznym obrazie KWM możemy wyróżnić trzy struktury: jasny front oraz ciemną wnękę otaczającą jasne jądro

(rys. 1). Jasny front jest czołem magnetycznego obłoku, który torując drogę, spycha plazmę niczym śnieżny płóg. Jego parametry fizyczne odpowiadają właściwościom koronalnej plazmy (temperatura ~ 2 miliony K, gęstość 10^8 cząstek na cm^3 , pole magnetyczne ~ 1 Gs (gaus)¹). Najbardziej jasne, centralne jądro jest pozostałością po erupcji protuberancji – obszaru o dużej gęstości (gęstość 10^{11} cząstek na cm^3), ale bardzo chłodnego, jak na warunki panujące w koronie (temperatura około 8000 K). Protuberancja oraz otaczająca ją ciemna pusta wnęka (gęstość 10^7 cząstek na cm^3) zawierają silnie skrzyżowane pole magnetyczne (~ 10 Gs), które jak hamak podtrzymuje protuberancję nad Słońcem oraz izoluje ją od gorącej otaczającej plazmy.

Gdy wyrzut porusza się z prędkością większą od prędkość fal magnetosonicznych w danym ośrodku, wówczas generuje on szybką falę uderzeniową (strukturę podobną do tej, jaka powstaje na skrzydłach naddźwiękowego samolotu). Fala ta jest jednak bardzo cienka i trudna do obserwacji za pomocą koronografów.



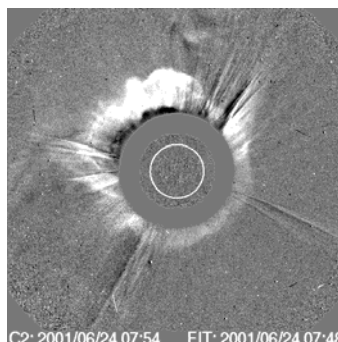
Rys. 1. Po lewej stronie obraz korony bez koronalnego wyrzutu materii. Po prawej stronie typowy wyrzut koronalny zarejestrowany przez koronograf LASCO umieszczony na satelicie SOHO. Wyraźnie widać trzy charakterystyczne struktury: front, wnękę i jądro

KWM typu halo

Niektóre KWM pojawiają się jako jasne pierścienie otaczające cały dysk okultacyjny (rys. 2). Z tego powodu nazywane są wyrzutami typu halo. KWM typu halo fizycznie nie różnią się niczym od pozostałych wyrzutów, ich wygląd jest rezultatem lokalizacji ich źródła. Są to wyrzuty, które powstają w centrum tarczy słonecznej, na widocznej z Ziemi lub przeciwnej stronie Słońca. Te generowane na widocznej stronie Słońca są dokładnie skierowane w stronę Ziemi i mogą stanowić dla niej potencjalne zagrożenie. To one są źródłem najintensywniejszych burz geomagnetycznych i dlatego wzbudzają największe zainteresowanie badaczy. 3% całej populacji KWM stanowią wyrzuty typu halo. W ostatnim dwudziestym trzecim cyklu aktywności słonecznej zaobserwowano około 10 tysięcy wyrzutów, co daje około 300 wyrzutów typu halo w całym

¹ Gs = 10^{-4} T

11-letnim cyklu. Ponieważ dwie trzecie obserwowanych wyrzutów typu halo powstaje na widocznej części tarczy słonecznej, otrzymujemy w ciągu cyklu aktywności populację 200 KWM skierowanych dokładnie w stronę naszej planety. Zatem możemy się spodziewać średnio w ciągu miesiąca jednej silnej burzy magnetycznej.



Rys. 2. Typowy wyrzut koronalny typu halo zarejestrowany przez koronograf LASCO umieszczony na satelicie SOHO

Jak są generowane KWM?

Gęstość energii unoszonej przez typowy KWM wynosi około 100 ergów/cm^3 . W koronie słonecznej energia występuje w trzech postaciach: termicznej, grawitacyjnej oraz magnetycznej. Proste rozważania pokazują jednak, że tylko energia zgromadzona w postaci pola magnetycznego może stanowić źródło energii potrzebnej do powstania KWM. Typowa energia magnetyczna zgromadzona nad obszarem aktywnym czterokrotnie przewyższa energię kinetyczną unoszoną przez KWM (gęstość energii magnetycznej $\sim 400 \text{ ergów/cm}^3$). Jesteśmy pewni, że pola magnetyczne zasilają KWM, ale dokładny mechanizm erupcji nie jest znany. Uważa się, że KWM powstają w wyniku utraty stabilności koronalnych pól magnetycznych. Pola magnetyczne produkowane są nieustannie wewnątrz Słońca w warstwie konwektywnej. W wyniku siły wyporu unoszone są ponad powierzchnię fotosfery. W miejscach, gdzie pola magnetyczne są najsilniejsze, powstają obszary aktywne (ciemne plamy). Rotacja różnicowa powoduje, że struktury magnetyczne (arkady pętli magnetycznych) są wyciągane i odkształcane. Pole magnetyczne ulega naprężeniom, jak przy naciąganiu cięciwy w zwykłym łuku. W pewnym momencie naprężenia są tak duże, że następuje utrata stabilności, blisko leżące linie sił pola magnetycznego o przeciwnej polarności zaczynają anihilować. Obserwujemy zjawisko rekoneksji² pola ma-

² Rekoneksja pola magnetycznego oznacza ściskanie linii magnetycznych o przeciwnej polarności, co prowadzi do ich anihilacji i wyzwolania energii. W obszarach rekoneksji plazma jest podgrzewana do wysokich temperatur. Fizycy używają raczej terminu „przełączanie linii pola magnetycznego”.

gnetycznego. Podczas gwałtownej erupcji wyzwalana jest energia zmagazynowana w naprężonym polu magnetycznym. Ogromne magnetyczne obłoki są wyrzucane do ośrodka międzyplanetarnego, a w miejscu, gdzie następuje anihilacja pola magnetycznego, plazma rozgrzewana jest do wysokich temperatur, generując gwałtowny wzrost emisji głównie promieniowania ultrafioletowego oraz X.

KWM a pogoda kosmiczna

Pogoda kosmiczna to ogół warunków panujących w najbliższym otoczeniu Ziemi, które mogą zakłócać prawidłowe działanie satelitów, urządzeń technicznych umieszczonych na powierzchni naszej planety lub zagrażać życiu i zdrowiu astronautów w Kosmosie. Badania nad pogodą kosmiczną zaczęły się szybko rozwijać w ostatnich latach, gdy nastąpił gwałtowny rozwój różnego rodzaju urządzeń stosowanych w sondach kosmicznych. Praktycznie cała łączność oparta jest na satelitach umieszczonych na orbitach geostacjonarnych. Warto wspomnieć, że między lotami Apollo 16 i 17, w 1972 roku na Słońcu miała miejsce eksplozja, w wyniku której promieniowanie jonizujące spowodowałoby w ciągu 10 godzin śmierć astronautów znajdujących się w przestrzeni międzyplanetarnej. W kontekście planowanych załogowych lotów na inne planety, w szczególności na Marsa, znaczenie prognozowania pogody kosmicznej wydaje się kluczowe. Aktywność Słońca całkowicie determinuje pogodę kosmiczną, a KWM są zjawiskami, które w najistotniejszy sposób mogą wpływać na jej kształt.

KWM mogą wpływać na pogodę kosmiczną w dwojaki sposób. Szybkie KWM generują fale uderzeniowe, dzięki którym następuje akceleracja naładowanych cząstek (elektrony, protony, cząstki alfa, jądra helu) aż do relatywistycznych prędkości. Cząstki te, lecąc z prędkościami bliskimi prędkości światła, docierają do Ziemi w ciągu 15 minut po rozpoczęciu erupcji na Słońcu. Satelity badawcze rejestrują wówczas gwałtowny wzrost strumienia cząstek. Strumień protonów o energiach rzędu MeV osiąga często wartość 10 tysięcy cząstek na sekundę na steradian. Strumień ten utrzymuje się na tak wysokim poziomie nawet przez kilka dni, gdyż fala uderzeniowa, propagując się przez ośrodek międzyplanetarny, nieprzerwanie produkuje energetyczne cząstki. Fala uderzeniowa może dotrzeć nawet do Ziemi, wówczas możemy obserwować dodatkowy wzrost strumienia energetycznych cząstek, które są uwięzione w okolicach fali uderzeniowej i podróżują wraz z nią. Energetyczne cząstki mają zgubny wpływ na satelity. Powodują one elektryczne ładowania ich powierzchni, co prowadzi w efekcie do wyładowań niszczących strukturę statków. Zniszczeniu ulegają panele słoneczne zasilające w energię satelity, ponadto zakłóceniu ulegają systemy elektroniczne znajdujące się na statkach (wyrzuty powodują jonizację krzemu w układach elektronicznych, co prowadzi do zakłócenia działania systemów sterujących czy też komputerów). Cząstki te powodują dodatkową jonizację górnych warstw ziemskiej atmosfery, zakłócając łączność radiową. Oczywiście, magnetyczne pole Ziemi chroni nas przed bezpo-

średnim działaniem tych cząstek na powierzchnię planety. Jedynie cząstki o energii przewyższającej 1 GeV mogą docierać do powierzchni Ziemi. Takie energetyczne zdarzenia są jednak bardzo rzadkie. Szkodliwa działalność energetycznych cząstek jest zatem ograniczona do górnych warstw atmosfery ziemskiej. Niestety, energetyczne cząstki bardzo szybko docierają w okolice Ziemi, a ich pojawienie jest trudne do przewidzenia.

Drugim czynnikiem wpływającym na pogodę kosmiczną są bezpośrednio uderzające w magnetosferę ziemską fale uderzeniowe oraz generujące je KWM. Docierają one w okolice Ziemi później, w zależności od ich początkowej prędkości potrzebują na to od 1 do 4 dni. Co prawda docierają z opóźnieniem i ich przybycie możemy dość dokładnie przewidzieć, ale za to ich oddziaływanie na naszą planetę jest silniejsze. Struktura KWM zdominowana jest przez silnie skręcone pole magnetyczne. Jeżeli pole magnetyczne unoszone przez KWM ma kierunek przeciwny do ziemskiego pola magnetycznego, to wówczas silnie oddziałuje ono z ziemską magnetosferą. Ziemskie pole magnetyczne anihiluje z polem unoszonym przez KWM. Magnetosfera traci swoje ochronne działanie, „otwiera się” i energetyczne cząstki mogą swobodnie wnikać do magnetosfery ziemskiej. Strumienie cząstek generują prądy elektryczne, które produkują pole magnetyczne zakłócające ziemskie pole magnetyczne. Magnetometry umieszczone na powierzchni Ziemi rejestrują wówczas spadek horyzontalnej składowej pola magnetycznego. Tego rodzaju globalne zakłócenia ziemskiego pola magnetycznego nazywamy burzami magnetycznymi. Spadek pola magnetycznego podczas najintensywniejszych burz może osiągnąć wartość 400 nT³. Jedynym przyjemnym przejawem burz magnetycznych są piękne kolorowe zorze pojawiające się w okolicach ziemskich biegunów magnetycznych. W okolicach biegunów linie magnetyczne w najmniejszym stopniu blokują dostęp energetycznych cząstek do powierzchni Ziemi. Szybkie cząstki, przenikając do atmosfery ziemskiej, wzbudzają do świecenia głównie atomy tlenu i azotu.

Prądy generowane przez energetyczne cząstki docierające ze Słońca mogą być zgubne dla ziemskich systemów energetycznych oraz ropo- i gazociągów. W 1989 roku w Quebec w Kanadzie, burza magnetyczna spowodowała całkowitą destrukcję systemów energetycznych tej prowincji. KWM dodatkowo podgrzewają ziemską atmosferę, powodując jej ekspansję i wzrost siły tarcia działającej na satelity umieszczone na orbitach okołoziemskich. Ponieważ większość satelitów nie posiada silników napędowych, zwiększone tarcie powoduje ich szybsze opadanie w kierunku Ziemi.

Przez wieki człowiek żył w pełnej harmonii ze Słońcem. Słońce było największym sprzymierzeńcem w rozwoju cywilizacyjnym człowieka. Jednak, gdy człowiek zaczął ekspansję w Kosmos – w kierunku imperium Słońca – pokazało ono swoje drugie, mniej przyjazne oblicze.

³ 400 nT to mniej więcej 1% wartości ziemskiego pola magnetycznego.