

Zmienny jak... Słońce?

Niestałe Słońce



Prof. dr hab. Janusz Sylwester zajmuje się fizyką Słońca i spektroskopią rentgenowską plazmy. W kierowanym przez niego zakładzie powstają przyrządy kosmiczne do diagnostyki plazmy rozblysków słonecznych

JANUSZ SYLWESTER
Centrum Badań Kosmicznych, Wrocław
Polska Akademia Nauk
js@cbk.pan.wroc.pl

Nasza najbliższa gwiazda, źródło życia, badana jest systematycznie dopiero od kilkuset lat. Obserwujemy Słońce, aby zrozumieć, co czeka nas jako mieszkańców planety Ziemia w bliższej i dalszej przyszłości. Okazuje się, że Słońce, nie dość, że niestałe, to może nie być wcale naszym najlepszym przyjacielem

Przepis na gwiazdę i Układ Słoneczny: znajdź w przestrzeni dużą chmurę rozproszoną gazu i pyłu, najlepiej zawierającą ślady cięższych pierwiastków – pozostałości poprzednich gwiazd. W sprzyjających warunkach chmura ta zacznie się zagęszczać pod wpływem sił grawitacji i coraz szybciej obracać, aż uformuje się dysk. Materia, ściśkana w jego ciągle gęstniejącym środku, będzie się nagrzewała, aż rozpoczną się reakcje termojądrowe. Wodór, jak w tyglu alchemika, zacznie zamieniać się w hel – i od tej pory na długo zapanuje równowaga pomiędzy ciśnieniem termicznym i siłami grawitacyjnymi. Pole magnetyczne rodzącej się gwiazdy będzie oddziaływało z dyskiem i sprawi, że z lokalnych kondensacji grawitacyjnych powstaną w nim planety, planetoidy i komety.

Dzieje Słońca

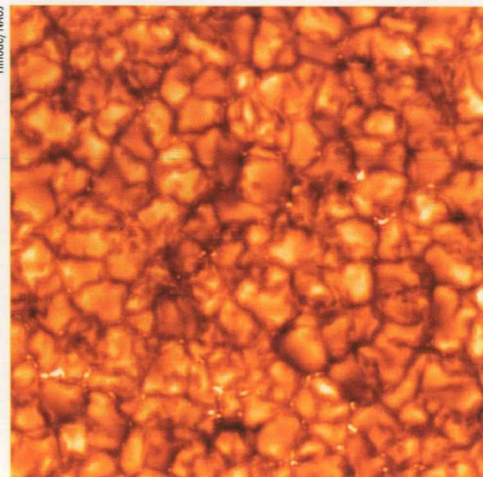
Słońce powstało ok. 5 miliardów lat temu i będzie królowało w naszym lokalnym kosmicznym otoczeniu aż do swej burzliwej agonii za mniej więcej 4 miliardy lat. To wiemy na pewno. Wiemy, że Słońce powstało z „kurzu” kosmicznego, który w cięższe od wodoru i helu pierwiastki wzbogaciły eksplozje wcześniejszych supernowych – gwiazd wielokrotnie od Słońca cięższych, kończących wybuchem swe krótkie i gwałtowne życie. Wiemy też od czasów Galileusza i Heweliu-

sza, że obraz Słońca jako ideału niezmienności i doskonałości nie da się utrzymać.

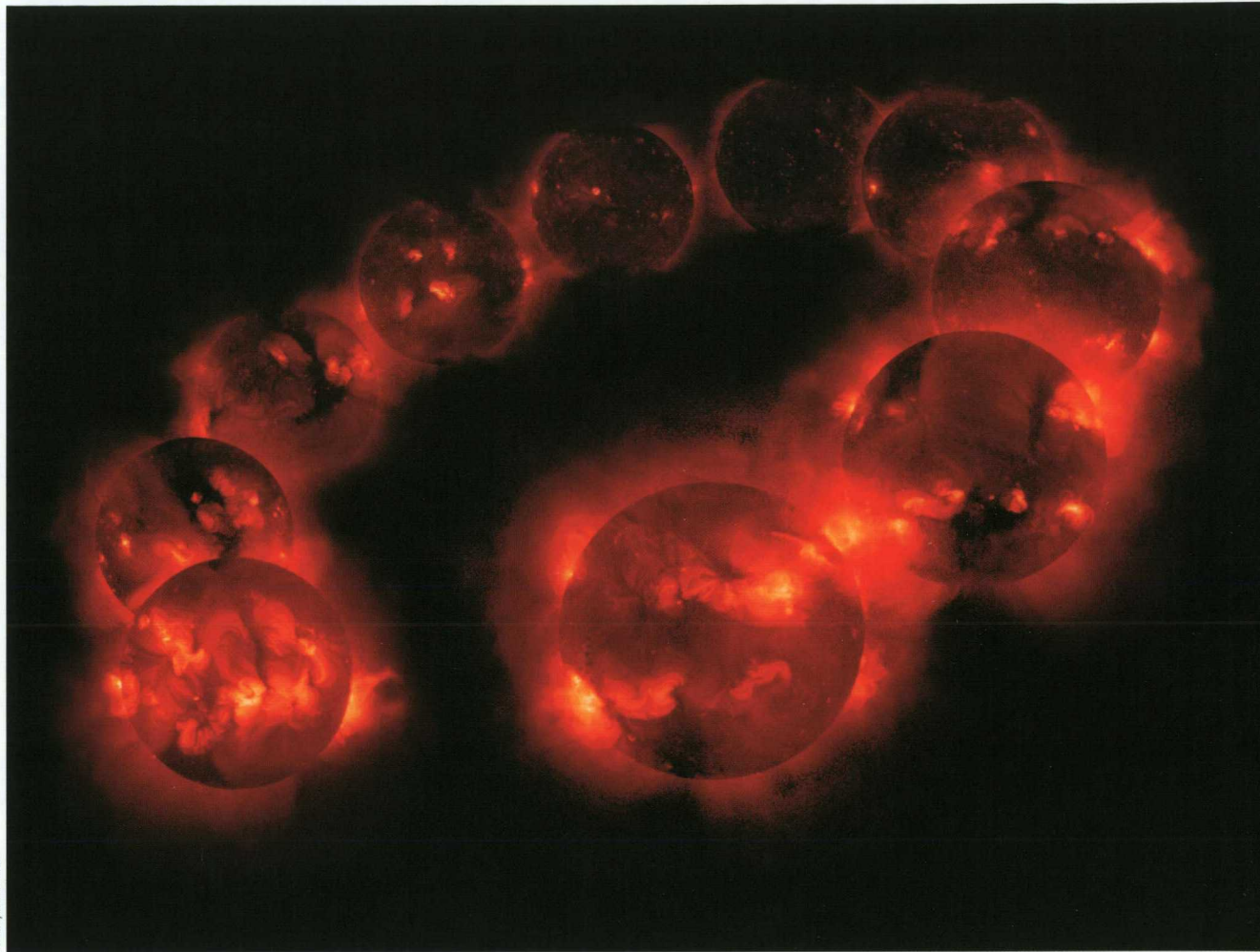
Jądro Słońca stanowi naturalnie „kontrolowany” reaktor termojądrowy, w którym w każdej sekundzie około 4 milionów ton materii zmienia się w energię promienistą zgodnie z powszechnie znanym wzorem Einsteina. Ta przemiana zachodzi w wyniku cyklu reakcji syntezy, w której cztery protony tworzą jądro helu. W rezultacie w centrum Słońca wodór powoli jest wypierany przez hel. Obecnie paliwa jądrowego jest na Słońcu jeszcze pod dostatkiem. Od momentu powstania naszej gwiazdy, czyli ok. 4,6 miliardów lat, zużyło się mniej więcej 40% zapasów wodoru. Przez dalsze blisko 4 miliardy lat Słońce będzie zapewniało względnie stabilne źródło energii dla całego Układu Słonecznego. Pod koniec swej ewolucji dwukrotnie na krótko stanie się tzw. chłodnym olbrzymem, pochłaniając bliskie planety, być może łącznie z Ziemią. Następnie „dokona żywota” w zapaści, połączonej z powstaniem mgławicy planetarnej i niezmiernie gęstego białego karła o rozmiarach Ziemi.

Heliofizyka, czyli fizyka Słońca, stanowi gałąź astrofizyki zajmującą się budową, własnościami i aktywnością naszej gwiazdy – źródłami energii dla biosfery i naszej cywilizacji. Połączenie wiedzy z wielu dziedzin fizyki oraz postęp metod obliczeniowych po-

Poza plamami jasność fotosfery jest również nieregularna, do złudzenia przypominając powierzchnię wrzącego oleju. Obecność komórek tzw. granulacji (o rozmiarach kilkuset kilometrów) jest wynikiem konwekcji przenoszącej energię do powierzchni gwiazdy. W ciemnych przestrzeniach międzygranularnych plazma opada do wnętrza



Obraz zmienności promieniowania Słońca w zakresie rentgenowskim, sporządzony z wybranych zdjęć wykonanych za pomocą teleskopu rentgenowskiego SXT (japoński satelita *Yohkoh*), co rok w okresie od 1991 do 2000 roku (od maksimum poprzez minimum z powrotem do maksimum aktywności). Różnica w poziomie emisji jest w tym zakresie widma dramatyczna



Yohkoh/SXS i NASA

zwalają dziś dokładnie przewidzieć przyszłą ewolucję Słońca oraz przeanalizować jego historię. Wiadomo, że od momentu uformowania się Słońce stopniowo zwiększało swą jasność (do chwili obecnej o około 30%). Za około 1,2 miliarda lat na Ziemi nastąpi gigantyczne przyspieszenie efektu cieplarnianego prowadzące do odparowania oceanów i zagłady życia wielokomórkowego.

Dlaczego Słońce świeci?

Zasadnicza część energii wydziela się we wnętrzu Słońca w postaci kwantów promieniowania gamma. Kwanty te nie mają prostej drogi ku powierzchni. Ulegają wielokrotnemu pochłanianiu, przy okazji rozmięniając się na drobne. W procesach tych średnia energia kwantu maleje, a ich liczba proporcjonalnie rośnie. Do powierzchni kwanty przesączają się dopiero po kilkudziesięciu tysiącach lat. Ostatnim etapem jest przebycie zewnętrznej warstwy konwekcyjnej o gru-

bości ok. 200 tys. km. Drobna część energii przenika na zewnątrz bez przeszkód niemal natychmiast w postaci strumienia antyneutrino, rejestrowanych również na Ziemi za pomocą wyrafinowanych detektorów umieszczonych głęboko w kopalnianych sztolniach. Dzięki temu możemy „na bieżąco” – powiedzmy raz na miesiąc – śledzić aktualne tempo procesów w jądrze Słońca. Jest ono (w naszej skali czasu) stałe.

Zaplamiona gwiazda

Znacznie ciekawsze jest badanie widocznej części Słońca, tzw. fotosfery, skąd wypromieniowywane jest 99,9% energii. Okresowe pojawianie się tzw. plam słonecznych badał systematycznie Galileusz. Plamy grupują się przy powierzchni w zlokalizowanych obszarach, obecnie nazywanych obszarami aktywnymi. Fenomen ich powstawania jest dobrze zbadany obserwacyjnie, ale problemem pozostaje interpretacja teoretyczna. Za opis zja-

Zmienny jak... Słońce?

wisk aktywnych odpowiada magneto hydrodynamika, czyli dyscyplina fizyki, która zajmuje się opisem zachowania zjonizowanego gazu w obecności pola magnetycznego.

We wnętrzu każdej plamy znajduje się ciemniejszy obszar - tzw. cień. Jego temperatura jest obniżona o ok. 1500 stopni w stosunku do otoczenia. Na peryferiach widzimy półcień. Obszar półcienia jest niezwykle dynamiczny. Tworzy go zespół ruchliwych włókien, w których namagnetyzowana plazma (zjonizowany gaz) przemieszcza się w stronę określonej kierunku lokalnego pola magnetycznego. Wielkość plam - średnio o rozmiarach Ziemi - zmienia się z czasem. Żyją od kilku dni do kilku miesięcy.

Poza plamami jasność fotosfery jest również nieregularna, do złudzenia przypomina powierzchnię wrzącego oleju. Obecność jaśniejszych komórek, tzw. granulacji, jest wynikiem konwekcji, przenoszącej energię z wnętrza do powierzchni gwiazdy. Rozmiary ciemniejszych przestrzeni międzygranularnych - rzędu kilkudziesięciu - są na granicy rozdzielczości obecnych obserwacji.

Wiarygodne obserwacje liczby plam słonecznych prowadzone są od kilkuset lat. Dane historyczne (głównie z Chin) zawierają opisy plam obserwowanych na Słońcu tysiące lat wcześniej. Analiza czasu i miejsc pojawiania się plam wykazała, że aktywność Słońca jest cykliczna, a cykl trwa ok. 11 lat. Plamy nowego cyklu pojawiają się dalej od równika Słońca i z czasem miejsce ich formowania zbliża się ku równikowi. Okresowość tak naprawdę jest 22-letnia, gdyż po 11 latach charakter biegunowości magnetycznej plam zmienia się na przeciwny.

„Zaplamienie” jest naturalną reakcją atmosfery gwiazdy na skomplikowaną sytuację fizyczną, kiedy bardzo dobrze przewodząca zjonizowana kula gazowa - czyli gwiazda - obraca się w nieruchliwym ośrodku międzygwiazdowym. Indywidualne cykle aktywności różnią się między sobą intensywnością. Obecnie oczekujemy na start cyklu 24, który nieco się opóźnia.

Regularność cykli stoi jednak pod znakiem zapytania. W wiekach XVI i XVII, po początkowych obserwacjach plam wykonanych przez Galileusza i Heweliusza, przez dziesięciolecia nie obserwowano zaplamienia Słońca ani nie odnotowano pojawiania się stowarzyszonych z aktywnością plam zórz polarnych. Ten okres w znanej historii aktywności Słońca nazywany jest minimum Maundera. W tym czasie, obejmującym potop szwedzki, z niejasnych do tej pory względów aktywność Słońca zanikła.

Ze współczesnych precyzyjnych pomiarów wiemy, że wraz ze wzrostem aktywności rośnie nieznacznie (o ok. 0,01%) strumień energii docierający od naszej Gwiazdy. W czasie minimum Maundera to długotrwałe niewielkie obniżenie ilości dostarczanej energii prawdopodobnie wystarczyło, aby klimat Ziemi ochłodził się na tyle, aby na zamrzniętej Tamizie organizowane były targi, a Bałtyk zamarzł, umożliwiając piesze przeprawy wojsk (o czym wspomina Jan Chryzostom Pasek). Wielce prawdopodobny jest więc długofalowy związek ziemskiego klimatu z poziomem aktywności Słońca.

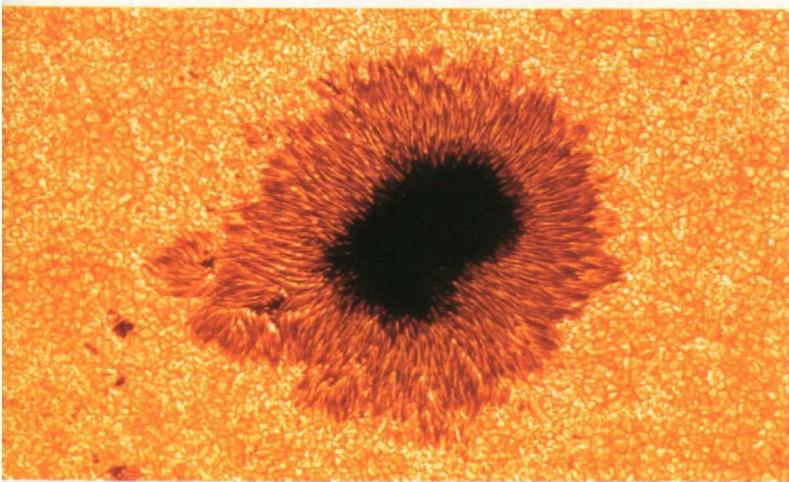
Ze względu na wagę problemu globalnego ocieplenia badania zmienności energii dostarczanej przez Słońce mają dziś pierwszoplanowe znaczenie.

Pod ostrzałem rozbłyków

Obecnie Słońce badamy nie tylko w tym zakresie widma, gdzie oko ludzkie jest czułe, a atmosfera ziemska przezroczysta. Obserwacje w zakresach ultrafioletowym i rentgenowskim prowadzą przyrządy umieszczone wysoko ponad atmosferą. Dopiero tutaj fenomen aktywności magnetycznej widoczny jest w pełnej krasie.

Struktura atmosfery Słońca jest bardzo niejednorodna, obszary o różnych gęstościach i temperaturach sąsiadują ze sobą bezpośrednio, a sytuacja zmienia się nie tylko z godziny na godzinę, ale wręcz z sekundy na sekundę.

Najlepsze istniejące zdjęcie plamy, uzyskane za pomocą teleskopu SOT znajdującego się na pokładzie japońskiego satelity Hinode, wprowadzonego na orbitę jesienią 2006 r. Średnica plamy wynosi 50 tys. km

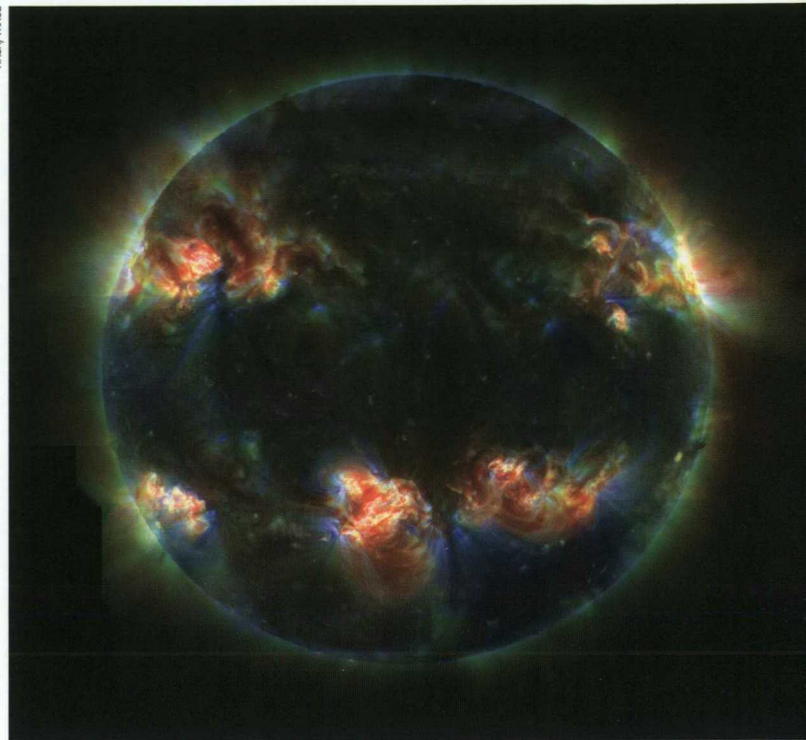


Hinode/NAO

Z naszego punktu widzenia najbardziej istotne są tzw. rozbłyski. W ciągu minuty w namagnetyzowanym niewielkim obszarze atmosfery słonecznej wydziela się ilość energii równoważna eksplozji milionów megaton. Jasność Słońca w zakresie rentgenowskim rośnie wtedy do miliona razy. Plazma nagrzewa się do temperatury milionów stopni, emitując głównie promieniowanie rentgenowskie. Powoduje ono silną dodatkową jonizację zewnętrznych warstw atmosfery Ziemi, blokując komunikację radiową na wielu częstotliwościach i zakłócając wskazania systemów GPS. Słońce wyrzuca, stowarzyszony zazwyczaj z rozbłyskiem, obłok plazmy o masie miliardów ton – tzw. koronalny wyrzut masy. Jeśli na jego trasie znajdzie się Ziemia, są powody do zmartwienia. Znajdziemy się wtedy „w oku cyklonu” pogody kosmicznej – czeka nas burza magnetyczna. Przy powierzchni Ziemi w zasadzie nic się wtedy nie zmienia. Ale np. w 1859 r., niedługo po instalacji pierwszych linii telegrafu w Stanach Zjednoczonych, przewody nagle uległy przepaleniu na rozległych obszarach. Obecnie wiemy, że przyczyną tej awarii były prądy wyindukowane w przewodach w wyniku silnej deformacji pola magnetycznego Ziemi przez taki pędzący obłok plazmy słonecznej. W 1989 r. połowa prowincji Quebec miała awarię zasilania wywołaną przez znacznie słabszy rozbłysk. Wskutek rozbłysków nasza ziemská tarcza obronna – pole magnetyczne, które steruje igłą kompasu – może zostać znacznie zdeformowana. Bywało, że te deformacje prowadziły do awarii satelitów (tylko w roku 2000 utraciono ok. 10), problemów telekomunikacyjnych czy awarii rurociągów. Niewątpliwie strumienie słonecznych cząstek stwarzają wielkie zagrożenie dla zdrowia i wręcz życia astronautów na trasach planowanych lotów na Księżyc i Marsa. Ochrona ziemskiego pola magnetycznego nie sięga tak daleko.

Niezbędne jest więc stałe śledzenie aktywności słonecznej tak, aby móc w miarę możliwości przewidzieć bieżące zagrożenia i zminimalizować skutki aktywnych zjawisk w atmosferze Słońca. Jest to podstawowe zadanie programu tzw. pogody kosmicznej. Ośrodki pogody kosmicznej działają od wielu lat w centrum NOAA (w Boulder, USA), w Rosji, Belgii, a także w Polsce przy Centrum Badań Kosmicznych PAN. Kontynuowanie prac badawczych w zakresie fizyki Słońca jest ko-

NASA/TRACE



nieczne, albowiem mimo trwających już wiele dziesiątków lat prac i tysięcy analiz, nie rozumiemy jeszcze podstawowych mechanizmów fizycznych prowadzących do gwałtownego uwalniania energii podczas rozbłysku i nie potrafimy przewidzieć dostatecznie precyzyjnie, kiedy on nastąpi i jaka będzie jego skala.

Polska aktywnie włączyła się w program pozatmosferycznych badań Słońca, głównie w zakresie badań promieniowania rentgenowskiego rozbłysków. Przyrządy badawcze, powstające we współpracy międzynarodowej we wrocławskim Zakładzie Fizyki Słońca Centrum Badań Kosmicznych, są obecnie najlepsze w swojej klasie, umożliwiając pomiar widm rentgenowskich z rozdzielczością pozwalającą na określanie temperatury i ilości rozbłyskującej plazmy. Budowany właśnie fotometr rentgenowski (projekt SphinX) umożliwi rejestrację widm rentgenowskich rozbłysków kilkanaście razy w ciągu sekundy, o wiele częściej, niż było to dotychczas możliwe. ■

Korona słoneczna w okresie podwyższonej aktywności widoczna w promieniach rentgenowskich 30 lipca 1999 roku. Barwa związana jest z temperaturą – od 1 mln stopni (niebieska) do 2-3 mln stopni (czerwonawa)

Chcesz wiedzieć więcej?

- Aschwanden M. (2004). *Physics of the Solar Corona*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.
 Phillips K.J.H. (1995). *Guide to the Sun*. Cambridge: University Press.
 Whitehouse D. (2004). *Słońce*. Warszawa: Prószyński i S-ka.