

# Jak działa Słońce?

Marcin KIRAGA\*

Od tysięcy lat ludzie zdają sobie sprawę z ogromnego znaczenia, jakie Słońce ma dla ich życia. Obserwowali cykl dnia i nocy, śledzili cykl pór roku, w którym przyroda na naszych szerokościach budziła się do życia wiosną, rozkwitała latem i zamierała zimą. Nie powinno nas dziwić, że w większości starożytnych społeczności i cywilizacji Słońcu oddawano cześć boską. W dzisiejszych czasach zależność ludzi od Słońca niewiele się zmniejszyła. Wiele dziedzin naszego życia jest uzależnionych od poprawnego działania satelitów, linii energetycznych czy sieci telekomunikacyjnych. Te urządzenia techniczne mogą być narażone na uszkodzenia w wyniku procesów związanych z aktywnością magnetyczną Słońca. Z tego powodu jest ono przedmiotem nieustannych badań i nasza wiedza o nim jest znacznie większa niż kiedykolwiek przedtem. Wymienienie wszystkich zjawisk obserwowanych na Słońcu lub z nim związanych, nawet bez próby choćby krótkiego ich opisu, prawdopodobnie przekroczyłoby objętość tego artykułu. W związku z tym ograniczę zakres omawianych problemów do tych najważniejszych i, jak się wydaje, dobrze zrozumianych. Należą do nich odpowiedzi na pytania: dlaczego Słońce świeci, jakie jest źródło jego promieniowania, jak jest zbudowane i co się z nim stanie w przyszłości.



Faraon Echnaton z rodziną składa ofiarę swemu bogu Atonowi, czyli tarczy słonecznej. Promienie Słońca, każdy zakończony ludzką dłonią, symbolizują jego opiekę nad władcą (patrz str. 8).

Na początku warto zebrać informacje o podstawowych parametrach Słońca, które dość łatwo można otrzymać z obserwacji.

Słońce jest najjaśniejszym obiektem na naszym niebie. Obecna wartość stałej słonecznej, czyli strumień energii promieniowania przepływającej w ciągu 1 sekundy przez  $1 \text{ m}^2$  powierzchni ustawionej prostopadle do kierunku rozchodzenia się promieniowania w odległości jednej jednostki astronomicznej, wynosi  $1365 \text{ W/m}^2$ . Można porównać to ze strumieniem energii geotermalnej, której źródłem jest nasza planeta i który jest rzędu  $100 \text{ mW/m}^2$ . Wewnętrzne ciepło Ziemi zapewniłoby powierzchni naszej planety średnią temperaturę rzędu  $35 \text{ K}$ . Słońce jest więc głównym źródłem energii dla zjawisk zachodzących na powierzchni naszej planety.

Średnica kątowna Słońca wynosi około  $32'$  (minut łuku), co w przeliczeniu na radiany wynosi  $0,0093$ . Przez długi czas ludzie nie znali odległości od Słońca, ale już starożytni mieli świadomość (począwszy od Arystarcha z Samos), że jest ona dość duża i że Słońce jest większe od Ziemi. Od połowy XVIII wieku nasza odległość od Słońca znana jest już z dość dużą dokładnością (z błędem względnym rzędu dwóch procent). Obecnie przyjęta długość wielkiej półosi orbity Ziemi wynosi około  $149,6 \text{ mln km}$ . Jeżeli znamy odległość, to łatwo możemy obliczyć wartości podstawowych parametrów Słońca. Promień widocznej tarczy słonecznej (fotosfery) wynosi  $696 \text{ tys. km}$  (jest  $109$  razy większy niż promień Ziemi). Masa Słońca wynosi blisko  $2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$  i jest ponad  $330 \text{ tys.}$  razy większa niż masa Ziemi. Słońce jest więc ponad  $1000$  razy masywniejsze od Jowisza, największej z obiegających je planet. Blisko  $74\%$  masy zewnętrznych warstw Słońca stanowi wodór, trochę mniej niż  $25\%$  hel i około  $1,5\%$  pierwiastki cięższe niż hel, które przez astronomów nazywane są „metalami”. Spośród „metali” najwięcej jest tlenu ( $45\%$ ), węgla ( $17\%$ ), żelaza ( $9\%$ ), siarki ( $7\%$ ), neonu ( $7\%$ ), azotu ( $5\%$ ), krzemu ( $4\%$ ) i magnezu ( $3\%$ ). Masa samego żelaza znajdującego się w materii słonecznej jest ponad  $500$  razy większa niż masa Ziemi i jest tego rzędu co masa wszystkich otaczających Słońce planet. Możemy wreszcie wyznaczyć obecną jasność Słońca, która wynosi około  $3,84 \cdot 10^{26} \text{ W}$ .

Fakt, że Słońce nie zmienia na naszych oczach w znaczący sposób swoich rozmiarów, jest dowodem, że znajduje się ono bardzo blisko stanu równowagi hydrostatycznej. Siła grawitacji działająca na materię słoneczną jest równoważona przez rosnące w głąb ciśnienie. Gdyby tej równowagi zabrakło, charakterystyczny czas zmian, jakim podlegałoby Słońce, byłby rzędu  $(R^3/GM)^{1/2}$ , czyli mniej niż pół godziny. Ponieważ znamy masę i rozmiary Słońca, więc stan równowagi hydrostatycznej umożliwia podanie ograniczenia wartości średniej temperatury w jego wnętrzu, a także minimalnej wartości ciśnienia centralnego. Tak więc już w XVIII wieku ludzie wiedzieli, że średnia temperatura wnętrza Słońca wynosi kilka milionów stopni.

Słońce traci energię głównie na skutek emisji promieniowania elektromagnetycznego. Jeżeli nie byłaby ona uzupełniana, to już po kilku

\* Obserwatorium Astronomiczne,  
Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski



Szamasz wylania się zza gór na wschodnim horyzoncie. Relief z Hatry w Iraku, wielkiego sanktuarium boga-Słońca w II-III wieku n.e. (patrz str. 8).

milionach lat (a zapewne dużo prędzej) Słońce musiałoby w zauważalny sposób się zmienić. Mechanizm produkcji energii na Słońcu przez długi czas był zagadką. W XIX wieku ludzie zdawali sobie sprawę, że wiek Ziemi wynosi co najmniej kilkaset milionów lat i że jej istnienie związane jest z obecnością Słońca. W związku z tym trudno było wytłumaczyć, w jaki sposób Słońce może świecić, nie zmieniając w znaczny sposób swoich rozmiarów i jasności.

Można zrobić bilans energetyczny dla Słońca. Jeżeli przyjmiemy, że ciało spoczywające w nieskończonej odległości od masy  $M$  ma energię równą zero, to energia wiązania grawitacyjnego kuli o masie  $M$  i promieniu  $R$  jest równa  $GM^2/R$ , co dla obecnej masy i promienia Słońca wynosi około  $3,8 \cdot 10^{41}$  J. Jeżeli prędkości cząstek tworzących układ w stanie równowagi są znacznie mniejsze od prędkości światła, to – zgodnie z twierdzeniem o wiriale – energia termiczna, związana z energią kinetyczną cząstek, jest co do wartości bezwzględnej dwa razy mniejsza niż energia wiązania grawitacyjnego tego układu. Innymi słowy, jeżeli jakiś obiekt będzie się kurczył, to połowa energii uzyskanej w wyniku tej kontrakcji powinna zostać wypromieniowana, a połowa będzie zużyta na wzrost energii wewnętrznej (energii kinetycznej cząstek). Tak więc Słońce mogłoby świecić z obecną jasnością na koszt energii grawitacyjnej przez czas rzędu  $5 \cdot 10^{14}$  s, czyli około 15 mln lat. Po odkryciu oddziaływań jądrowych większość astrofizyków była przekonana, że reakcje termojądrowe powinny stanowić podstawowe źródło energii gwiazd. Z porównania masy jądra wodoru i jądra helu wynika, że przy zamianie wodoru w hel zostaje wydzielona energia równoważna około 0,007 masy spoczynkowej materii, która brała w niej udział. Jeżeli przyjmiemy, że pół masy Słońca będzie mogło wziąć udział w takich reakcjach, to otrzymamy energię  $c^2 \cdot 0,007 \cdot 10^{30}$  kg =  $6,3 \cdot 10^{44}$  J, co przy obecnej jasności powinno wystarczyć na około 50 miliardów lat. Koncepcja ta była bardzo atrakcyjna, jednak energia termiczna jąder atomowych we wnętrzu Słońca jest zbyt mała, aby dwa protony mogły się zderzyć, a deuteru i helu  $^3\text{He}$  jest na Słońcu zbyt mało, aby mogły stanowić długotrwałe źródło energii. Dopiero uwzględnienie efektów kwantowych i zauważenie możliwości tunelowania cząstek przez barierę potencjału elektrostatycznego pozwoliło na rozwiązanie zagadki procesów odpowiedzialnych za produkcję energii we wnętrzu Słońca.

Wiek Słońca i otaczających je planet jest szacowany na około 4,6 mld lat. Warto poznać jego dzisiejszą budowę. W środku Słońca temperatura wynosi 15,7 mln K, gęstość  $157 \text{ g/cm}^3$ , a ciśnienie blisko  $2,4 \cdot 10^{16} \text{ N/m}^2$ . Mimo że w centrum materia słoneczna ma dużą gęstość, to z dobrym przybliżeniem można traktować ją jako gaz doskonały. W centrum Słońca, tam gdzie temperatura jest największa i najszybciej zachodzą reakcje termojądrowe, już ponad połowa wodoru zamieniona jest w hel. Gdy oddalimy się od środka, ciśnienie zaczyna spadać, a wraz z nim gęstość i temperatura. W kuli o promieniu 25% promienia Słońca zawarta jest w przybliżeniu połowa jego masy i produkowane 99% emitowanej na powierzchni energii. Na jej powierzchni temperatura wynosi niecałe 8 mln K, a gęstość około  $20 \text{ g/cm}^3$ . Umownie tę kulę nazywa się jądrem Słońca. Powyżej znajduje się otoczka promienista, w której energia wyprodukowana w jądrze przenoszona jest przez fotony, a właściwie przez ich dyfuzję, na którą składają się wielokrotne rozproszenia, absorpcje i emisje. Spadek temperatury powoduje transport energii. Sytuację, w której element objętości gazu otrzymuje energię na skutek przepływu fotonów z gorętszej warstwy i tyle samo energii oddaje warstwie chłodniejszej, nazywamy równowagą promienistą.

Transport energii przez dyfuzję fotonów zachodzi we wnętrzu Słońca do głębokości około 200 tys. km poniżej fotosfery (mniej więcej 70% promienia Słońca). Głębiej nieprzezroczystość materii staje się na tyle duża, że aby fotony mogły przenieść cały strumień energii, temperatura musi spadać na tyle szybko, że niemożliwe jest istnienie stabilnych warstw materii słonecznej (stabilna stratyfikacja). Wtedy, jak łatwo uzasadnić, pojawia się konwekcja. Wyobraźmy sobie, że w gazie temperatura spada szybciej na zewnątrz (w kierunku przeciwnym do przyspieszenia grawitacyjnego) niż w przemianie adiabatycznej, jakiej podlegałyby element gazu wychylany powoli ze stanu równowagi. Jeżeli przesuniemy go w górę, to jego temperatura stanie się większa niż temperatura otoczenia, a gęstość mniejsza i zacznie na niego działać nie zrównoważona siła wyporu skierowana w górę.

Oczywiście, niestabilność pojawi się również, gdy taki element przesuniemy w dół. Jak łatwo zauważyć, w przypadku stabilnej stratyfikacji wypadkowa siła działająca na odchylony z położenia równowagi element gazu będzie skierowana przeciwnie do wychylenia. W warstwie konwektywnej mamy do czynienia z wielkoskalowymi ruchami gazu, które przenoszą energię ku powierzchni. Szczyt warstwy konwektywnej jest na powierzchni widoczny w postaci granulacji: jaśniejszych komórek wypływającego gazu rozdzielonych ciemniejszymi splotami. Ich rozmiary są rzędu 1000 km, a czas istnienia pojedynczej komórki zazwyczaj jest krótszy niż 10 minut. Prędkość gazu niedaleko powierzchni może dochodzić do kilku kilometrów na sekundę, co może być źródłem fluktuacji ciśnienia wzbudzających oscylacje słoneczne.

Istnienie otoczek konwektywnych na Słońcu i innych gwiazdach wiąże się z ich aktywnością magnetyczną. Na powierzchni Słońca widać wiele struktur związanych z istnieniem pola magnetycznego. Jednym z najwcześniej stwierdzonych są plamy słoneczne: obszary, w których silne pole magnetyczne hamuje konwekcję i w związku z tym ilość energii dochodzącej do powierzchni Słońca jest niższa niż w ich otoczeniu. Rozmiary plam mogą być bardzo duże, do około 80 tys. km, i w wyjątkowych przypadkach mogą być widoczne nawet gołym okiem. Obserwacje plam były pierwszym źródłem informacji o rotacji Słońca, którego okres obrotu na równiku wynosi około 25 dni i rośnie do ponad miesiąca w okolicy biegunów. Liczba plam widocznych na powierzchni Słońca zmienia się w przybliżeniu z okresem 11 lat, a okres pełnego cyklu magnetycznego, po którym pojawiają się plamy o tej samej biegunowości, jest dwa razy większy. Niestety, nie znamy jeszcze wszystkich mechanizmów związanych ze wzmocnianiem i transportem pola magnetycznego na Słońcu, czego przykładem był ostatni okres jego niezwykle małej aktywności (w latach 2007–2009), który był dużym zaskoczeniem dla heliofizyków.

Reakcje termojądrowe są przyczyną powolnych, lecz nieuniknionych zmian w budowie Słońca. Zamiana czterech jąder wodoru w jedno jądro helu zmniejsza liczbę cząstek we wnętrzu Słońca. Zachowanie równowagi wymaga więc powolnego kurczenia się jądra naszej gwiazdy, w którym zachodzą reakcje termojądrowe. W efekcie wzrasta tam zarówno gęstość, jak i temperatura, a to z kolei powoduje zwiększenie tempa zachodzenia reakcji termojądrowych. Słońce powoli zwiększa swoją jasność. Za mniej więcej miliard lat będzie ono o około 10% jaśniejsze niż obecnie i ta stosunkowo niewielka zmiana może już spowodować odparowanie oceanów na Ziemi, co uczyni naszą planetę miejscem niesprzyjającym dla życia. Za około 5 miliardów lat wodór w centrum Słońca zostanie wyczerpany i poniżej warstwy palenia wodoru zacznie się tworzenie helowego jądra. Po pewnym czasie jego gęstość wzrośnie na tyle, że elektrony w nim zawarte staną się zdegenerowane, a więc wypełnią wszystkie dostępne poziomy energetyczne aż do pewnej granicznej wartości, nazywanej energią Fermiego. Ruch tych elektronów będzie źródłem ciśnienia potrzebnego do zachowania równowagi hydrostatycznej jądra. Szczegółowe prześledzenie parametrów Słońca na późniejszych etapach jego ewolucji nie jest obecnie możliwe ze względu na utratę masy, która stanie się istotna w fazie czerwonego olbrzyma, a której tempa i wielkości nie jesteśmy w stanie dokładnie określić. Niemniej jednak astrofizycy są zgodni, że przed samym zapłonem helu rozmiary Słońca będą około 200 razy większe niż obecnie, a jasność prawie 3 tysiące razy większa niż dzisiaj. Zapłon helu w zdegenerowanym jądrze gwiazdy jest niestabilny i powoduje wyzwolenie w krótkim czasie ogromnej ilości energii, która w większości jednak pozostanie we wnętrzu i zostanie zużyta na zniesienie degeneracji. Słońce wejdzie w liczący około 100 mln lat okres spalania helu w swoim jądrze. Rozmiary Słońca będą kilkanaście razy większe niż dzisiaj, a jasność kilkadziesiąt razy większa. Wypalenie helu w centrum i powstanie węglowo-tlenowego zdegenerowanego jądra spowodują kolejną fazę wzrostu rozmiarów i jasności do wartości charakterystycznych dla końcowej fazy czerwonego olbrzyma. Następnie Słońce utraci resztę swej otoczki i odsłoni gorące jądro, które stygnąc, osiągnie stadium białego karła. Nastąpi to za około 8 miliardów lat. Wtedy właśnie Słońce zakończy swoje życie jako gwiazda (a więc kula gazu, we wnętrzu której zachodzą reakcje termojądrowe). Stanie się niewielkim obiektem o rozmiarach Ziemi, świecącym jedynie na koszt energii wewnętrznej, a więc w konsekwencji powoli stygnącym.



Helios pędzi po niebie na swoim rydwanie, rzeźba ze świątyni Ateny w Troi, II w. p.n.e.