

## Jasność powierzchniowa tarczy Słońca

Dr Jerzy MADEJ

Patrząc na Słońce tuż przed jego zachodem (albo tuż po jego wschodzie) każdy może z łatwością zauważyć, że powierzchnia tarczy widziana z Ziemi nie jest jednakowo jasna. Największą jasność powierzchniową obserwujemy w centrum tarczy Słońca, natomiast w miarę oddalania się w kierunku krawędzi jasność zmniejsza się w sposób ciągły. Cały efekt jest symetryczny względem środka tarczy Słońca i pozostaje niezmienny w czasie.

Pociemnienie brzegowe tarczy Słońca jest zjawiskiem realnym, niezależnym od istnienia atmosfery ziemskiej, która wpływa w negatywny i zakłócający sposób na większość obserwacji astronomicznych. Zjawisko to jest interpretowane w ścisłym związku z teoriami budowy atmosfery (fotosfery) słonecznej.

Słońce, będąc ogromną rozżarzoną kulą gazową, nie ma oczywiście żadnej stałej powierzchni, w przeciwieństwie do wielu planet Układu Słonecznego. Patrząc na Słońce obserwujemy tzw. fotosferę, czyli zewnętrzną jego warstwę o grubości kilkuset kilometrów. Stopniowo wzrastająca nieprzezroczystość gazowej fotosfery nie pozwala na zaobserwowanie warstw położonych głębiej i stanowiących wnętrze naszej dziennej gwiazdy. Wspólną cechą wnętrza i fotosfery słonecznej jest spadek temperatury w kierunku na zewnątrz. Tak więc światło słoneczne (o natężeniu  $I_\nu$  dla danej, ustalonej częstotliwości fali  $\nu$ ), obserwowane z zewnątrz w pewnym miejscu tarczy, pochodzi z wielu warstw (znajdujących się w fotosferze) o różnych temperaturach. Można jednak wybrać spośród nich warstwę (o jakiejś temperaturze  $T$ ), której promieniowanie będzie najlepiej przybliżać rozkład obserwowanego natężenia  $I_\nu$  przez lokalną wartość funkcji Plancka

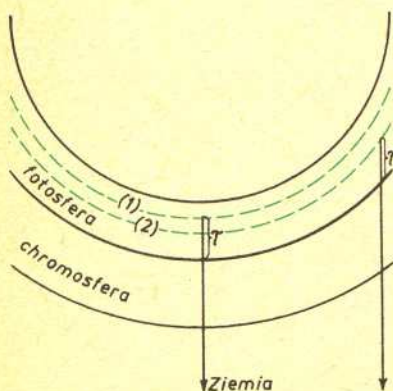
$$I_\nu(\text{zewn.}) = B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left[ \exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right]^{-1}$$

Zakładamy w tym miejscu, że warstwa ta promieniuje tak, jak ciało doskonale czarne. Wartość funkcji Plancka dla ustalonej częstotliwości  $\nu$  monotonicznie rośnie ze wzrostem temperatury.

Zjawisko pociemnienia brzegowego wyjaśnia pierwszy spośród zamieszczonych rysunków. Zewnętrzny obserwator, patrząc na środek tarczy Słońca, obserwuje promieniowanie z warstwy fotosferycznej (1) położonej na głębokości optycznej  $\tau = 1$ . Parametr  $\tau$  oznacza, że z tej głębokości wychodzi na zewnątrz  $e^{-\tau}$  część wyemitowanego tam promieniowania, nie ulegając przy tym absorpcji w warstwach fotosfery leżących wyżej (reszta jest zaabsorbowana). Jeżeli obserwator patrzy poza centrum tarczy Słońca, promienie światła przecinają ukośnie kolejne warstwy fotosfery i w rezultacie głębokość optyczna odpowiada warstwie (2) położonej wyżej, a więc chłodniejszej od warstwy (1). Tak więc obserwowane natężenia spełniają nierówność

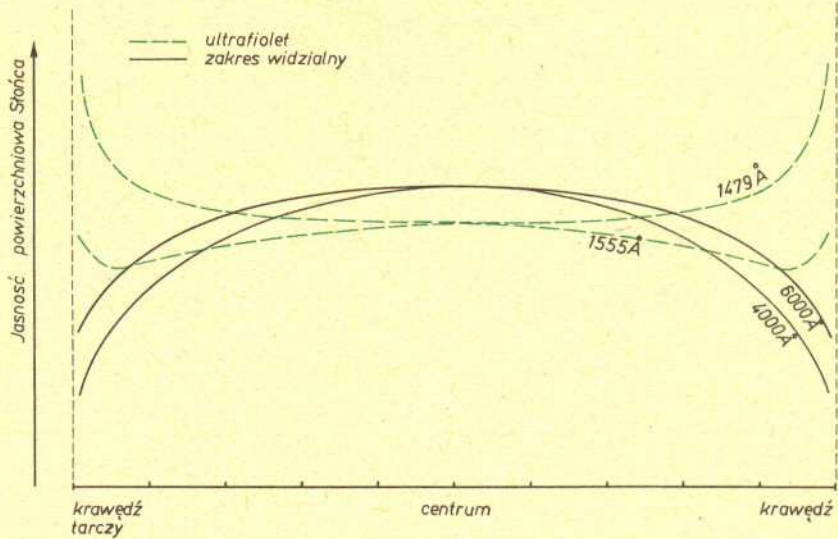
$$I_\nu(1) = B_\nu(T_1) > B_\nu(T_2) = I_\nu(2).$$

Natężenie promieniowania spoza centrum tarczy słonecznej jest mniejsze niż w jej środku, a różnica ta narasta w miarę zbliżania się do krawędzi tarczy.



Rys. 1

Efekt pociemnienia brzegowego Słońca silnie zależy od częstości (długości fali) promieniowania, które bierzemy pod uwagę. W widzialnym zakresie widma efekt ten wzrasta w miarę zwiększania częstości  $\nu$  i jest najsilniejszy w zakresie fioletowym. Prawdopodobnie taka nie jest jednak sztywną regułą, albowiem np. w ultrafiolecie istnieją skokowe zmiany tego efektu, a także odwrócenie jego zależności od  $\nu$  w sposób ciągły. Tak na przykład w 1973 roku wykonano przy użyciu rakiety obserwacje tarczy Słońca w widmie ciągłym w bardzo dalekim ultrafiolecie, które wykazały, że dla długości fali  $\lambda < 1560 \text{ \AA}$  istnieje efekt pojaśnienia brzegowego!



Rys. 2 Rozkład jasności tarczy Słońca w różnych długościach fal

Przyczyną pojaśnienia brzegowego Słońca w dalekim ultrafiolecie jest obecność chromosfery, warstwy niezwykle rzadkiej plazmy leżącej ponad fotosferą, z której pochodzi promieniowanie słoneczne w widzialnym zakresie widma. W chromosferze właśnie zachodzi odwrócenie fotosferycznego spadku temperatury: w kierunku na zewnątrz temperatura wzrasta na skutek dyssypacji energii mechanicznej docierającej tu z głębokich warstw podfotosferycznych w postaci fal akustycznych i magnetohydrodynamicznych. Tak więc na granicy pomiędzy fotosferą i chromosferą temperatura ośrodka osiąga minimum,  $T_{\min} = 4400 \text{ K}$ .

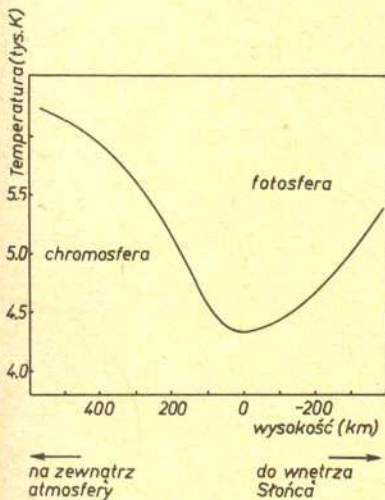
Podana uprzednio interpretacja pociemnienia brzegowego w widzialnym zakresie widma promieniowania nie jest naruszona przez obecność chromosfery, ponieważ ta warstwa jest całkowicie przezroczysta dla promieniowania widzialnego. W miarę przechodzenia do coraz krótszych fal nieprzezroczystość atmosfery Słońca bardzo szybko wzrasta, tak że dla  $\lambda < 1560 \text{ \AA}$  głębokość optyczna  $\tau = 1$  (silnie zależna od nieprzezroczystości w danej barwie) osiągana jest już w chromosferze. Wtedy, w warunkach wzrastającej na zewnątrz temperatury,

$$I_{\nu}(1) = B_{\nu}(T_1) < B_{\nu}(T_2) = I_{\nu}(2),$$

ponieważ teraz  $T_1 < T_2$ .

Ten niezwykle efekt pojaśnienia brzegowego jest właśnie jednym z dowodów istnienia chromosfery, warstwy o nietypowym (odwróconym) gradientie temperatury. Istnienie chromosfer jest zresztą czymś bardzo typowym w świecie gwiazd. Ocenia się, że wszystkie gwiazdy typu Słońca i chłodniejsze (tzn. gwiazdy późnych typów widmowych) muszą mieć chromosfery ogrzewane przez biegnące od wewnątrz atmosfery fale uderzeniowe.

Badania efektu pociemnienia brzegowego Słońca w różnych długościach fali  $\lambda$  pozwalają prawie w bezpośredni sposób wyznaczać przebieg temperatury w fotosferze. Porównywanie pociemnień brzegowych Słońca w różnych  $\lambda$  pozwala ponadto wyznaczać obserwacyjnie przebieg nieprzezroczystości w fotosferze dla rozmaitych barw  $\lambda$ . Są to dane o podstawowym znaczeniu dla teoretycznych badań atmosfery Słońca i gwiazd do niego podobnych.



Rys. 3 Przebieg temperatury w zewnętrznych warstwach Słońca

Barwa — termin często używany przez astronomów jako synonim długości fali promieniowania. Wiadomo, że światło o długości  $\lambda = 6000 \text{ \AA}$  jest czerwone, natomiast dla  $\lambda = 4000 \text{ \AA}$  obserwujemy błękit. Pojęcie to ekstrapoluje się na inne zakresy widma.