



Pociemnienie brzegowe

Marcin KIRAGA*

Patrząc na Słońce przez lunetę zaopatrzoną w odpowiedni filtr (koniecznie!), czy też oglądając zdjęcia Słońca (przynajmniej niektóre), można mieć wrażenie, że środek jego tarczy jest jaśniejszy niż brzeg. Nie jest to złudzenie. W promieniowaniu widzialnym stosunek jasności środka tarczy Słońca do jasności na jego krawędzi zmienia się od około trzech dla barwy czerwonej do około ośmiu dla barwy niebieskiej. Dokładna jego wartość zależy od długości fali, na której prowadzimy obserwacje, lub od filtra, który stosujemy. Aby wytłumaczyć zjawisko pociemnienia brzegowego najlepiej posłużyć się uproszczonym modelem atmosfery Słońca i zjawisk tam zachodzących. Będzie interesował nas średni stan atmosfery, w którym pominiemy ruch materii związany z konwekcją, czy takie zjawiska jak plamy słoneczne.

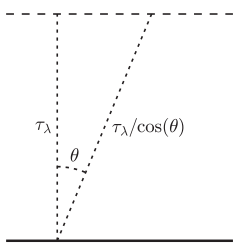
Jeżeli przyjmiemy, że promieniowanie słoneczne ma charakter termiczny (co w zakresie widzialnym jest dobrym przybliżeniem), to ilość energii emitowana przez jednostkową powierzchnię w jednostce czasu na jednostkę długości fali (lub jednostkę częstości) w jednostkowy kąt bryłowy będzie tym większa, im wyższa jest temperatura ośrodka.

Słońce jest kulą gazową i to, co widzimy jako jego powierzchnię, stanowi obszar, z którego dochodzą do nas fotony po raz ostatni oddziałujące z jego materią. Większość promieniowania widzialnego pochodzi z warstwy o grubości kilkuset kilometrów, nazywanej fotosferą. Użytecznym pojęciem jest głębokość optyczna (τ_λ), która określa prawdopodobieństwo, z jakim foton o długości fali λ wyemitowany w danej warstwie w kierunku obserwatora nie będzie już oddziaływał z materią ośrodka i może być bezpośrednio zarejestrowany (jest ono określone jako $e^{-\tau_\lambda}$). Przyrost głębokości optycznej $d\tau_\lambda$ związany jest z gęstością cząstek n na drodze fotonu, ich przekrojem czynnym σ_λ i drogą ds przebytą przez promieniowanie zależnością

$$d\tau_\lambda = n\sigma_\lambda ds.$$

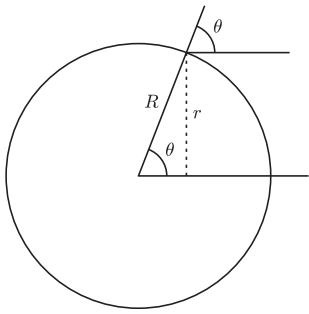
Jak widać, głębokość optyczna jest wielkością bezwymiarową, bo gęstość cząstek wyrażana jest ich liczbą na metr sześcienny, przekrój czynny w metrach kwadratowych, a droga w metrach. Jeżeli mamy ośrodek o stałej gęstości i temperaturze, to głębokość optyczna będzie w nim proporcjonalna do odległości od źródła promieniowania. W rzeczywistości przekrój czynny na oddziaływanie między promieniowaniem a materią bardzo silnie zależy od długości fali tego promieniowania i od własności ośrodka.

Grubość fotosfery Słońca jest znacznie mniejsza niż jego promień i można z dobrym przybliżeniem przyjąć, że jest ona płaskorównoległa (tzn. wszystkie jej własności będą zależały tylko od głębokości). Promieniowanie emitowane z pewnej warstwy wzdłuż normalnej (tj. prostopadłej) do powierzchni atmosfery ma na swojej drodze mniej materii, niż gdy jest emitowane pod pewnym kątem (rys. 1). Jeżeli przyjmiemy, że głębokość optyczna liczona wzdłuż normalnej wynosi τ_λ i że warstwa gazu jest płaskorównoległa, to promieniowanie emitowane pod kątem θ do normalnej będzie miało do przebycia głębokość optyczną równą $\tau_\lambda/\cos\theta$ (od tej pory będziemy oznaczać $\cos\theta$ przez μ). W najprostszych modelach opisujących atmosfery gwiazd natężenie promieniowania mierzone przez obserwatora odpowiada w przybliżeniu natężeniu, jakie jest emitowane na głębokości optycznej równej jeden. Gdy patrzymy na środek tarczy Słońca, patrzymy prostopadle do jego powierzchni i fotony mogą do nas dotrzeć z warstw głębiej położonych, niż gdy patrzymy na fragment położony bliżej brzegu. Jeżeli patrzymy na powierzchnię Słońca pod kątem θ do normalnej do jego powierzchni, to promieniowanie do nas dochodzące będzie miało w przybliżeniu takie natężenie, jak pochodzące z głębokości optycznej μ liczonej wzdłuż normalnej. Odległość r od środka tarczy Słońca fragmentu jego powierzchni, na który patrzymy pod kątem θ , określona jest wzorem $r/R = \sqrt{1 - \mu^2}$, gdzie r to odległość kątowa od środka tarczy, R to promień



Rys. 1. Promieniowanie wyemitowane wzdłuż normalnej do powierzchni atmosfery ma do przebycia najmniejszą grubość optyczną.

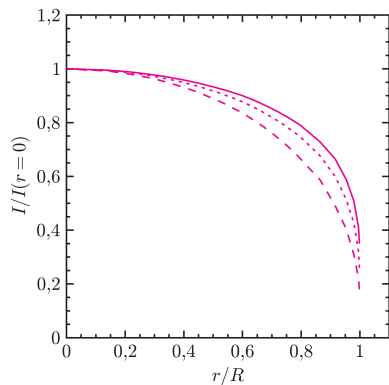
* Obserwatorium Astronomiczne, Uniwersytet Warszawski



Rys. 2. Gdy patrzymy na tarczę Słońca w odległości r od jej środka, widzimy promieniowanie wyemitowane pod kątem θ względem normalnej do jego powierzchni.

kątowy tarczy Słońca (rys. 2). Jak widać, w Słońce najgłębiej możemy zajrzeć, patrząc na środek jego tarczy. Gdy obserwujemy fragment położony bliżej krawędzi, dochodzą do nas fotony emitowane w warstwach położonych wyżej. Ponieważ w fotosferze temperatura rośnie z głębokością, więc największe natężenie promieniowania w świetle widzialnym obserwujemy na środku tarczy Słońca. Innymi słowy zjawisko pociemnienia brzegowego może być uznane za dowód, że w fotosferze Słońca temperatura rośnie z głębokością.

Oddziaływanie fotonów z materią silnie zależy od ich energii. W związku z tym głębokość optyczna równa jeden osiągnięta jest na różnych poziomach w zależności od długości fali na jakiej obserwujemy. W modelach atmosfery Słońca jako wzorcową najczęściej podaje się głębokość optyczną na długości fali 500 nm. Warstwa gazu, której własności możemy poznawać za pomocą pomiarów pociemnienia brzegowego na tej długości fali, ma grubość około 200 km (pomiędzy $\tau_\lambda = 0,05$ a $1,0$). To, że z obserwacji trudno podać wartość pociemnienia brzegowego dla mniejszych μ , związane jest z rozdzielczością kątową naszych obserwacji. Jak wynika z zależności $r/R = \sqrt{1 - \mu^2}$, pomiar natężenia promieniowania odpowiadającego $\mu = 0,05$ powinien zostać wykonany około $1''$ od krawędzi (kątowny promień tarczy Słońca to w przybliżeniu $960''$).



Rys. 3. Profile pociemnienia brzegowego obserwowanego na Słońcu dla trzech różnych długości fal (linia ciągła $\lambda = 600$ nm, linia kropkowana $\lambda = 500$ nm i linia przerywana $\lambda = 400$ nm).

Dla promieniowania w zakresie widzialnym i nadfioletowym można w przybliżeniu przyjąć, że im mniejsza długość fali, tym większy przekrój czynny na oddziaływanie z materią. W związku z tym warstwy o głębokości optycznej równej jeden dla promieniowania o barwie niebieskiej czy w nadfiolecie będą leżały powyżej warstwy o $\tau_{500} = 1$. Na rysunku 3 przedstawione są profile pociemnienia brzegowego na Słońcu dla trzech długości fali w zakresie widzialnym (400, 500 i 600 nm). Jak już wspomniałem, w barwie niebieskiej pociemnienie brzegowe jest silniejsze niż dla promieniowania odpowiadającego barwie czerwonej.

Natomiast obserwacje prowadzone w dalekim nadfiolecie (musiały być one wykonane sponad ziemskiej atmosfery) dają już inny wynik. Na przykład na fali 155,5 nm jasność powierzchniowa tarczy Słońca początkowo spada, gdy oddalamy się od jej środka, ale od pewnej odległości zaczyna rosnąć. Oznacza to, że obserwujemy promieniowanie z warstwy gazu, która ma w atmosferze Słońca najniższą temperaturę, wynoszącą w przybliżeniu 4400 K. Minimalna temperatura panuje w warstwie, której głębokość optyczna τ_{500} jest poniżej jednej tysięcznej (a więc niemożliwa do zmierzenia w pociemnieniu brzegowym w świetle widzialnym). Na jeszcze krótszych falach obserwowane jest pojaśnienie brzegowe. Wynika z tego, że począwszy od pewnego poziomu temperatura atmosfery słonecznej zaczyna rosnąć. Gorętszą warstwę gazu (o bardzo małej już gęstości), znajdującą się powyżej fotosfery nazywamy chromosferą. Można ją dostrzec gołym okiem w czasie całkowitego zaćmienia Słońca. Obecność chromosfery jest typowa dla gwiazd mających, podobnie jak Słońce, otoczkę konwektywną.

Obserwacje pociemnienia brzegowego nie ograniczają się do Słońca, choć oczywiście w przypadku innych gwiazd nie są aż tak dokładne. Uwzględnienie tego zjawiska jest konieczne w wielu sytuacjach. W przypadku gwiazd zaćmieniowych kształt krzywej zmian jasności układu zależy od pociemnienia brzegowego jego składników. Bardzo duże zainteresowanie towarzyszy poszukiwaniu planet pozasłonecznych. Jedną z metod badawczych są pomiary zmian jasności gwiazdy, powodowanych przejściem planety na tle jej tarczy. Precyzyjne pomiary zmian blasku podczas zaćmienia oraz właściwy model pociemnienia brzegowego dla gwiazdy umożliwiają dość dokładne ustalenie względnych rozmiarów gwiazdy i planety. Pociemnienie brzegowe może być również mierzone w sposób bezpośredni dla gwiazd o największych średnicach kątowych takich jak np. Betelgeuse. Najdokładniejsze jak do tej pory pomiary pociemnienia brzegowego dla innej gwiazdy niż Słońce zostały wykonane w czasie obserwacji zjawiska mikrosoczewkowania grawitacyjnego.