

dość złożone i nie będziemy się tym zajmować. Inaczej wygląda sytuacja dla gwiazd podwójnych, których okres obiegu jest krótszy od tygodnia. Wtedy gwiazdy oddziałują ze sobą przepływowo i „patrz” na siebie zawsze tymi samymi stronami. A zatem okres rotacji każdej z nich jest równy okresowi obiegu, niezależnie od wieku układu.

Silny związek między szybkością rotacji i aktywnością magnetyczną przemawia za słuszością tzw. teorii dynamo powstawania pól magnetycznych. Zgodnie z nią oddziaływanie rotacji i konwekcji prowadzi do dużego wzmocnienia nawet bardzo słabego początkowego pola magnetycznego. Im szybsza rotacja i im głębsza warstwa konwektywna, tym silniejsze pole końcowe. Teoria dynamo opiera się na założeniach, z których kilka jest kwestionowanych przez jej przeciwników. Jest ona jednak stale modyfikowana i ulepszana, a ponadto nie ma innej teorii, która mogłaby z nią rywalizować w odniesieniu do chłodnych gwiazd. Teoria dynamo nie tłumaczy wciąż jeszcze wielu obserwowanych zjawisk, np. zagadnień związanych z cyklami aktywności u gwiazd.

W sumie widzimy, że badania aktywności magnetycznej są nie tylko ciekawe same w sobie, ale okazują się też bardzo ważne z punktu widzenia ewolucji gwiazd, wyznaczania ich wieku, a w przyszłości, gdy lepiej zrozumiemy oddziaływanie pól magnetycznych z konwekcją, będą mogły służyć do badania ich wnętrza.

Dopplerowskie obrazy plam gwiazdowych

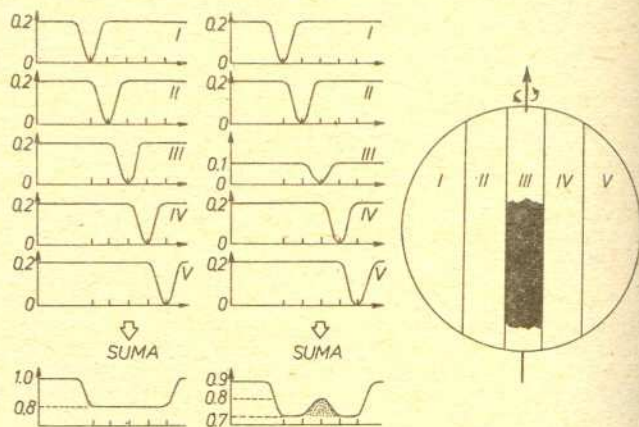
Mgr Krzysztof JAHN

Tak nazwano nową technikę obserwacyjno-obliczeniową pozwalającą konstruować obrazy powierzchni zaplamionych gwiazd. Czym jest plama gwiazdowa? W jakich warunkach może się pojawiać? Czy zjawisko to ma coś wspólnego z plamami słonecznymi? Odpowiedzi na te i na wiele innych pytań znajdzie Czytelnik w artykule doc. K. Stępnia.

Tutaj postaramy się odpowiedzieć na pytanie, czy można zobaczyć plamę gwiazdową? Oczywiście nie bezpośrednio, bo nawet największe teleskopy nie mają takiej zdolności rozdzielczej, która pozwoliłaby rozróżnić niejednorodności powierzchni odległych gwiazd. Dokładne obserwacje fotometryczne dostarczają wprawdzie pewnych informacji, ale są one często niejednoznaczne, i co więcej, na ich podstawie niewiele możemy powiedzieć o kształcie plamy. Z pomocą przychodzi spektroskopia. Okazało się, że subtelna analiza widm gwiazdowych w połączeniu z nowoczesną techniką obliczeniową umożliwia określenie rozmiarów, kształtu, położenia i temperatury plamy lub plam. Autorzy rozwijanej obecnie techniki — nazwanej techniką dopplerowskich obrazów plam gwiazdowych — zapewniają, że wkrótce można będzie otrzymać dodatkowo rozkład pola magnetycznego związanego z plamami.

Początki rozwoju tej techniki związane są z pewnym odkryciem, które miało miejsce w 1980 r. Zaobserwowano mianowicie pewną szczególną własność widma liniowego jednej z zaplamionych gwiazd (HR 1099 = V 711 Tauri). W profilach linii absorpcyjnych pojawiało się wybrzuszenie, które periodycznie przesuwało się wewnątrz profilu lub całkowicie zniknęło w zależności od tego, którą część tarczy gwiazda zwracała ku Ziemi. Okres zmian w linii odpowiadał dokładnie okresowi zmian obserwowanej jasności. Taką korelację położenia garbu wewnątrz profilu ze zmianami fotometrycznymi, za które odpowiedzialne są plamy, przejawiały wszystkie bez wyjątku linie absorpcyjne. Jak zinterpretować takie obserwacje? Jeśli na powierzchni rotującej gwiazdy znajduje się duży obszar o temperaturze niższej od temperatury otoczenia, to na ogół powinno to mieć swoje odzwierciedlenie w widmie liniowym. Dlaczego „na ogół”, a nie zawsze, to okaże się później. Teraz przyjrzyjmy się bliżej deformacji linii w najprostszym przypadku.

Pomocą w tym niech będzie rysunek, na którym porównamy kształty linii widmowych w przypadku gwiazdy bez plam (z lewej strony rysunku) i gwiazdy zaplamionej (strona prawa).



Podzielmy tarczę wirującej gwiazdy na sektory o jednakowej powierzchni (jak na rysunku). Gdyby możliwe było obserwowanie pojedynczych sektorów, to na skutek efektu Dopplera zauważylibyśmy przesunięcie się linii w kierunku większych długości fal w przypadku obszarów oddalających się (IV i V), oraz w kierunku niebieskiej części widma dla linii obserwowanych w sektorach zbliżających się do obserwatora (I i II). Obserwacja sektora III dałaby oczywiście linię nieprzesuniętą w widmie. W rzeczywistości obserwujemy strumień promieniowania z całej tarczy, a więc jedną, poszerzoną rotacyjnie linię. Lewa strona rysunku ilustruje przesunięcia linii dla poszczególnych sektorów, oraz zsumowany efekt — poszerzony profil. Co się stanie, gdy np. w sektorze III znajdzie się plama (dla uproszczenia całkowicie czarna) zajmująca 1/2 powierzchni sektora? Linie od pozostałych sektorów nie zmienią się, natomiast rozważany obszar emituje mniej promieniowania, bo połowa obszaru w ogóle nie świeci. W efekcie obniży się poziom widma ciągłego. Zostało to zaznaczone na rysunku wartością 0,1 (w pewnych umownych jednostkach). Sumowanie strumieni promieniowania od poszczególnych sektorów nie da tym razem wyłącznie spłyconego i poszerzonego profilu (można to sprawdzić dodając odczytane z rysunku wartości dla tych samych długości fal — 2, -1, 0, 1, 2, też w pewnych jednostkach). Pojawił się

dotatkowo garb w centrum linii, który jest związany z istnieniem ciemnego obszaru na środku tarczy. Z tej uproszczonej analizy widać, że rozkład energii w zakresie długości fal obejmowanych przez poszerzoną rotacyjnie linię jest jednoznacznie odwzorowaniem niejednorodności jasności powierzchni gwiazdy. Jeśli plama znajdzie się w sektorze II lub IV, to garb przesunie się w lewo lub w prawo. Odwzorowanie to jest jednak tylko jednowymiarowe. Za jego pomocą można określić tylko odległość od osi rotacji gwiazdy. I to wszystko co można wynioskować z takiego obrazka. Na szczęście rzeczywistość jest bardziej skomplikowana. Przytoczony przed chwilą przykład nie uwzględnia pociemnienia brzegowego, jak też faktu, że plama również promieniuje (nie jest całkowicie czarna). Uwzględnienie obu efektów komplikuje oczywiście rachunki, ponieważ trzeba w nich uwzględnić różne poziomy ciąglej składowej (kontinuum) promieniowania (więc i różne względne głębokości linii) pochodzącego z plamy i normalnej fotosfery w różnych odległościach od brzegu tarczy. Niemniej, dzięki temu można wyznaczyć temperaturę plamy. Pociemnienie brzegowe w sposób naturalny dzieli tarczę gwiazdy na pierścienie, które promieniają tym słabiej, im bliżej brzegu są położone (patrz artykuł J. Madeja w *Delcie* 6/1983). W efekcie takiego obniżania poziomu kontinuum garb w linii obserwowanej blisko brzegu tarczy staje się bardziej ostry. Zauważmy, że można w ten sposób określić drugą współrzędną położenia plamy, a mianowicie odległość od centrum tarczy. Razem z odległością od osi rotacji dają nam to lokalizację chłodniejszego obszaru na gwieździe. Obserwacje linii absorpcyjnych muszą być przeprowadzone w kilku fazach obrotu gwiazdy tak, aby otrzymać profile dla różnych położenia plamy lub plam na tarczy. Wysokość i kształt garbu oraz jego położenie wewnątrz linii daje informację o temperaturze i lokalizacji plamy. A co z kształtem? Oczywiście i ta informacja jest zawarta w wymienionych cechach linii. Aby otrzymać kształt plamy, trzeba podzielić tarczę gwiazdy nie na kilka sektorów, a na kilka tysięcy małych prostokątów. Im więcej, tym dokładniejsze kontury plamy, bo większa jest wtedy rozdzielczość metody. Nie mogą one mieć jednak zbyt małych powierzchni, bo inaczej załamałyby się przybliżenia fizyczne w modelach numerycznych. Innymi słowy, również zbyt drobny podział tarczy nie jest wskazany.

Zobaczmy, jak wygląda w całości procedura prowadząca do otrzymania obrazu powierzchni gwiazdy pokrytej plamami. Na początku trzeba oczywiście zrobić obserwacje widma interesującej nas gwiazdy w różnych fazach oraz wybrać linie absorpcyjne, które będą następnie badane. Dalsza część pracy jest prowadzona przy użyciu komputera. Tarczę gwiazdy dzieli się na prostokątki i odgaduje się przybliżoną wartość temperatury każdego z nich.

Można to zrobić znając obserwowany kształt linii. Jeśli garb znajduje się w prawej części profilu, to obszar chłodniejszy jest na oddalającej się części tarczy, itd. Zauważmy, że przyporządkowując temperatury poszczególnym obszarom od razu określamy kształt plamy. W niczym to jednak nie przeszkadza procedurze, która wybierze tylko właściwe rozwiązanie. Po próbnym odgadnięciu temperatur i kształtów plam trzeba obliczyć profile linii dla każdego obszaru, a następnie zsumować je uwzględniając pociemnienie brzegowe. Otrzymany w ten sposób teoretyczny profil porównuje się z obserwowanym i jeśli oba pokrywają się, to odgadnięcie było prawidłowe. W praktyce to się jednak nie zdarza. Zwykle otrzymuje się kształt linii różny od obserwowanego. Całe postępowanie powtarza się z nowym rozkładem temperatury tak długo, aż zgodność profilu obliczonego i obserwowanego będzie zadowalająca. Przy odgadywaniu kolejnych rozkładów temperatur wykorzystuje się różnice między profilami teoretycznymi a obserwowanymi (różnice wysokości i szerokości garbu czy też jego położenia wewnątrz linii). Decyzję o modyfikacji temperatury, lokalizacji i rozmiarów plamy podejmuje człowiek; oczywiście w taki sposób, aby w następnym kroku zbliżyć się do poprawnego rozwiązania. Mogłoby się wydawać, że metoda ta może dawać niejednoznaczne wyniki, ponieważ decyzja człowieka jest w niej czynnikiem subiektywnym. Żeby sprawdzić, czy otrzymany obraz bardzo zależy od osoby dokonującej wyboru parametrów, przeprowadzono kilka eksperymentów, w których kilka osób niezależnie wykonało tę procedurę dla jednego zestawu obserwacji. Wyniki okazały się prawie identyczne, co przemawia za tym, że czynnik subiektywny metody jest co najmniej kontrolowany, jeśli nie jest to wręcz argumentem za jednoznacznością metody.

Nie chciałbym jednak, aby czytelnik odniósł wrażenie, że opracowanie obrazu powierzchni zaplamionej gwiazdy jest pracą niezwykle żmudną, polegającą np. na określaniu temperatury każdego z dziesięciu tysięcy sektorów. Jest to raczej podejmowanie ogólnych decyzji o zmianie temperatury, kształtu i położenia plamy. Czynnikiem umożliwiającym prawie pełną automatyzację procedury jest wykorzystanie obserwacji linii widmowych w różnych fazach rotacyjnych gwiazdy. Inaczej wygląda garb wewnątrz profilu, gdy plama jest na brzegu tarczy, a inaczej, gdy znajdzie się np. w centrum. Polega to nie tylko na zmianie położenia wewnątrz linii, lecz również na różnicach w kształcie plamy. Efekty takie, które trzeba oczywiście uwzględnić w obliczeniach numerycznych, umożliwiają zamknięcie cyklu iteracji i tak naprawdę człowiek byłby tu niepotrzebny, gdyby nie to, że całkowicie automatyczna procedura trwałaby znacznie dłużej. Brzmi to może paradoksalnie, ale specyfika tej metody rzeczywiście wymaga ingerencji człowieka, jeśli chce się skrócić czas obliczeń, który na dużych komputerach (bo takie są tu potrzebne) jest bardzo kosztowny.

Zanim zilustruję technikę otrzymywania obrazów zaplamionych gwiazd konkretnym przykładem (zresztą jedynym, jak dotąd, opracowanym do końca), powiedzmy coś o jej wadach lub raczej o zakresie jej stosowności. Granice takie wyznacza wielkość poszerzenia rotacyjnego linii; jeśli jest zbyt małe, tzn. porównywalne z normalnym jej kształtem, to nie znajdziemy w niej odzwierciedlenia przesuwania się plam po tarczy gwiazdy. Zmiany położenia garbu wewnątrz profilu mogą się wtedy sprowadzać do subtelnych deformacji kształtu linii, które nie niosą wystarczającej informacji. Z taką sytuacją będziemy mieli do czynienia wtedy, gdy prędkości radialne obszarów gwiazdy przybliżających się i oddalających (czyli iloczyn prędkości rotacji gwiazdy i sinusa kąta nachylenia osi obrotu do obserwatora — i) będą zbyt małe. Z tego powodu trzeba wyeliminować z obserwacji zarówno gwiazdy rotujące zbyt wolno, jak i te, które są zwrócone do obserwatora biegunem (gdy i jest bliskie zeru). Z drugiej strony, jeśli poszerzenie rotacyjne wzrasta, to profil linii staje się coraz bardziej płaski. Wówczas ze względu na jej duże rozmycie niemożliwe jest zaobserwowanie wewnątrz garbu. Widzimy więc, że nie dla każdej zaplamionej gwiazdy występuje zauważalna charakterystyczna deformacja linii absorpcyjnej.

Poza ograniczeniem dopuszczalnej prędkości rotacji istnieje jeszcze jedna trudność. Jeśli obserwowana gwiazda ma oś rotacji skierowaną prostopadle do obserwatora ($i = 90^\circ$), to omawiana tu procedura nie może określić, na której półkuli znajduje się plama. Wyznaczenie położenia obszarów chłodniejszych w kierunku równoległym do osi rotacji jest wtedy niejednoznaczne.

Czasami wiele trudności może sprawiać problem wyboru do opracowania odpowiednich linii widmowych. Gwiazdy z plamami są chłodne; ich temperatury są niższe od 5000 K.

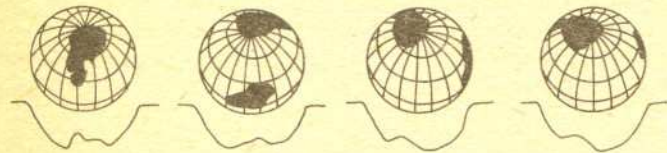
Widma takich gwiazd są bardzo gęsto pocięte liniami absorpcyjnymi, które często zachodzą na siebie, a czasami nawet tworzą pasma. Kłopot polega na tym, że trzeba wybrać nie tylko takie linie, które byłyby widoczne w całości (nie zachodziły na inne), ale także aby kształt tych linii nie był zbyt czuły na temperaturę. Chodzi o to, aby linia powstająca w atmosferze plamy (w obszarze chłodniejszym) była z grubsza taka sama jak ta z niezaburzonej fotosfery (pewnych linii w plamach w ogóle nie widać). Do tego celu najbardziej nadają się linie metali niezjonizowanych. Na szczęście, w widmach interesujących nas gwiazd czasami udaje się znaleźć linie spełniające odpowiednie warunki.

Pierwszym obiektem, dla którego zastosowano technikę dopplerowskich obrazów plam, była ta sama gwiazda, w której widmie po raz pierwszy odkryto „wygryzienia” linii absorpcyjnych skorelowane z fazą rotacyjną. Obiekt ten, HR 1099 (lub V 711 Tauri), znany był już wcześniej jako układ podwójny, w którym jeden ze składników jest pokryty dużymi plamami powodującymi obserwowane zmiany fotometryczne z okresem równym okresowi rotacji tego składnika. Po dokonaniu wyboru odpowiednich linii w widmie gwiazdy — były to linie obojętne żelaza (6430,9 Å) i wapnia (6439,1 Å) — wykonano obserwacje spektroskopowe w różnych fazach rotacyjnych.

Załączone rysunki ilustrują obserwowane „wygryzienia” w liniach.

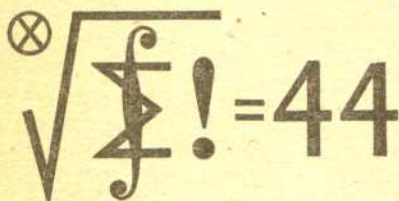


Po wykonaniu obliczeń okazało się, że na powierzchni gwiazdy istnieją dwie plamy: jedna położona na biegunie, a druga w pasie równikowym. Następny rysunek pokazuje tarczę gwiazdy widoczną w różnych fazach.



Pod każdą ilustracją zaznaczony został, tym razem schematycznie, odpowiedni profil, aby zilustrować odwzorowanie obrazu tarczy w kształcie linii. Plamy te, jak widać, w niczym nie przypominają plam słonecznych. Zwłaszcza biegunowa, ze względu na swe położenie nie ma swego odpowiednika na Słońcu. Plamy te nie mają praktycznie tzw. półcienia, który w przypadku plam słonecznych stanowi duży procent ich powierzchni. Jeśli w tych olbrzymich plamach półcienia istnieje, to tylko w formie paska otaczającego ciemny obszar. Musi on być stosunkowo wąski, bo opisywana tu metoda nie może go rozróżnić.

Twórcy tej techniki obiecują w najbliższej przyszłości uzupełnić otrzymywane obrazy o jeszcze jedną ważną informację — natężenie pola magnetycznego w plamach. Będzie to najprawdopodobniej możliwe po takim zmodyfikowaniu aparatury obserwacyjnej, aby można było prowadzić pomiary linii widmowych przy użyciu polarymetru. Zrozumiałe jest, że taka informacja o polu magnetycznym, jego natężeniu i położeniu na gwiazdzie, byłaby niezwykle cenna dla badań teoretycznych tego typu zjawisk.



Liga zadaniowa Wydziału Matematyki, Informatyki i Mechaniki Uniwersytetu Warszawskiego i Redakcji „Delfy”

Skrót regulaminu

Każdy może nadsyłać rozwiązania zadań z numeru n w terminie do końca miesiąca $n+2$. Szkice rozwiązań zamieszczamy w nr $n+4$. Można nadsyłać rozwiązania trzech, dwóch lub jednego zadania (każde na oddzielnej kartce), można to robić co miesiąc lub z dowolnymi przerwami. Oceniamy zadania w skali od 0 do 1 z dokładnością do 0,1. Ocenę mnożymy przez

$$4 - 3 \cdot \frac{\text{suma ocen za rozwiązania danego zadania}}{\text{liczba osób, które nadesłały choć jedno rozwiązanie z numeru}}$$

i tyle punktów otrzymuje nadsyłający. Po zgromadzeniu 44 punktów (w dowolnym czasie) zostaje on członkiem Klubu, a nadwyżka punktów jest zaliczana do ponownego udziału. Trzykrotne członkostwo — to tytuł Weterana. Szczegółowy regulamin został wydrukowany w nr 1/1984.

Klub 44

Redaguje dr Marcin E. KUCZMA

Zadania nr 91, 92, 93

Termin nadsyłania rozwiązań: 30 XI 1984

91. Na płaszczyźnie dana jest łamana zamknięta. Łącząc odcinkami środki kolejnych jej boków otrzymujemy nową łamaną zamkniętą. Powtarzając tę operację wielokrotnie dostajemy ciąg łamanych zamkniętych. Zakładamy, że w żadnej z tych łamanych środki żadnych dwóch boków nie pokrywają się, a więc wszystkie łamane mają tę samą liczbę wierzchołków i boków. Udowodnić, że ciąg długości otrzymanych łamanych dąży do zera.

92. Czy trzema kwadratami o boku 5 można pokryć kwadrat o boku 2π ?

93. Niech $x = m/n$ będzie ułamkiem nieskracalnym, $x \in (0, 1)$. Dowieść, że liczbę x można przedstawić w postaci sumy odwrotności co najwyżej $n-1$ różnych liczb naturalnych.

Zadanie 93 przysłał pan Jerzy Tyszkiewicz z Warszawy.