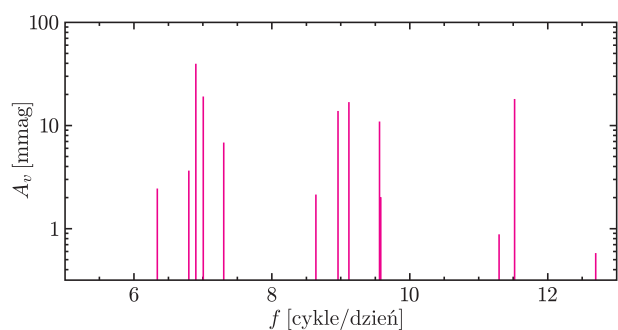


Asterosejsmologia – sondowanie wnętrza gwiazd

Radostaw SMOLEC*



Wśród gwiazd zmiennych szczególnie ważną rolę odgrywają gwiazdy zmienne pulsujące. Zmieniają one swoją jasność, a także rozmiary i kształt, w sposób okresowy. Wiąże się to z występowaniem w zewnętrznych obszarach gwiazdy warstw częściowej jonizacji gazu. W pewnych warunkach destabilizuje ona gwiazdę, która kurcząc się i rozszerzając wokół położenia równowagi, zachowuje się jak silnik cieplny. W zmienności wielu gwiazd pulsujących można doszukać się wielu okresowości. Na rysunku 1 przedstawiamy tak zwane widmo częstotliwości dla przykładowej wielookresowej gwiazdy pulsującej, 44 Tauri. Każda kreska na diagramie odpowiada zaobserwowanej częstotliwości pulsacji (oś pozioma), a odpowiadającą jej amplitudę zmian jasności możemy odczytać na osi pionowej.

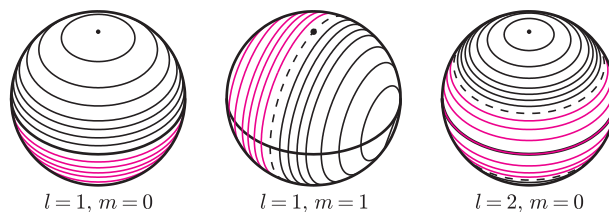


Rys. 1. Widmo częstotliwości gwiazdy 44 Tauri.

Okazuje się, iż na podstawie zaobserwowanych częstotliwości pulsacji możemy dowiedzieć się naprawdę dużo o gwiazdzie, w szczególności o warunkach panujących w jej wnętrzu. Zajmuje się tym asterosejsmologia. Podobnie jak geosejsmologia pozwala nam zajrzeć do wnętrza Ziemi poprzez badanie jej drgań, czy to wywołanych w sztuczny sposób (wybuchy), czy w naturalny (trzęsienia ziemi), tak asterosejsmologia pozwala nam zajrzeć do wnętrza gwiazd poprzez badanie ich drgań, czyli pulsacji. Aby zrozumieć, jak działa asterosejsmologia, zastanówmy się najpierw, czym są pulsacje, i co tak naprawdę widzimy na rysunku 1.

Pulsacje (drgania) gwiazdy wygodnie jest opisywać jako dźwiękowe fale stojące, analogicznie do dźwiękowych fal stojących powstających w dętych instrumentach muzycznych, takich jak flet. Za pomocą fletu nie uzyskamy dźwięków o dowolnych częstościach, lecz tylko o ściśle określonych, odpowiadających częstościom własnym, charakterystycznym dla instrumentu. Drgania powietrza w instrumencie oraz ich częstości możemy opisać, podając ilość węzłów fali dźwiękowej wewnątrz instrumentu.

Podobnie jest z gwiazdami. Tylko ściśle określone drgania, tak zwane mody pulsacji, są możliwe. Ponieważ drgania gazu tworzącego gwiazdę odbywają się w trzech wymiarach, więc do ich opisu potrzebujemy aż trzech liczb całkowitych, n , l i m . Liczba n to radialny rząd modu. Mówi nam ona, ile powierzchni węzłowych znajduje się we wnętrzu gwiazdy. Powierzchnie te nie biorą udziału w ruchu, oddzielając warstwy, w których gaz porusza się w przeciwnych kierunkach. Liczba l mówi o ilości linii węzłowych na powierzchni gwiazdy, $|m|$ zaś mówi, ile z tych linii przechodzi przez bieguny gwiazdy. Linie węzłowe dzielą powierzchnię gwiazdy na obszary, w których warunki fizyczne zmieniają się w wyniku pulsacji, ale w przeciwnych fazach. Tak więc, gdy w jednym z obszarów jasność wzrasta, w obszarze sąsiadującym – maleje. Znaczenie liczb l i m obrazuje rysunek 2, na którym przerywane



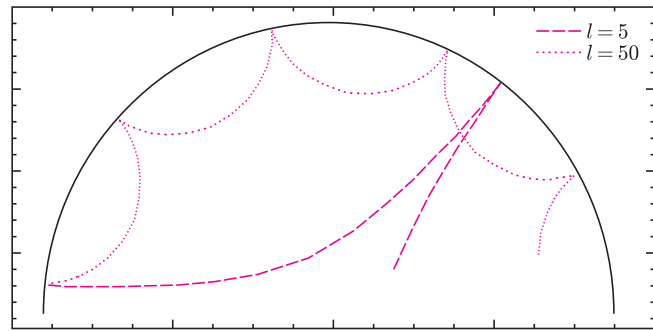
Rys. 2. Ilustracja modów nieradialnych.

linie to linie węzłowe. Liczba m nie jest dowolna, lecz może przyjmować wartości od $-l$ do l . Mody o takich samych wartościach n oraz l , ale o różnych m , tworzą tak zwane multiplety, ważne w badaniu rotacji gwiazd, o czym za chwilę. Najprostszym rodzajem pulsacji są pulsacje radialne. Gwiazda kurczy się i rozszerza, nie zmieniając swojego kształtu. Dla pulsacji radialnych mamy $l = m = 0$. Pulsacje nieradialne związane są ze zmianami kształtu gwiazdy. Dla nieradialnych modów pulsacji mamy $l > 0$. Każdej trójce n , l i m odpowiada określona częstotliwość drgań gwiazdy, przy czym różnym trójkom w ogólności różne częstotliwości. Pulsacje gwiazd obserwujemy zarówno spektroskopowo, jak i fotometrycznie. Spektroskopowo obserwujemy przesuwanie się linii widmowych, co odpowiada zmianom prędkości powierzchni gwiazdy, a także obserwujemy zmiany profili linii widmowych, charakterystyczne dla danego modu pulsacji. Fotometrycznie obserwujemy zmieniającą się jasność gwiazdy. O amplitudzie zmian jasności związanej z danym modem pulsacji decydują skomplikowane i nie do końca zbadane jeszcze procesy. Nie wszystkie mody pulsacji mogą być obserwowane. Części nie obserwujemy, gdyż nie są one wzbudzone w danej gwiazdzie, innych możemy nie dostrzegać z uwagi na zbyt małą amplitudę zmian. Gwiazdy pulsujące radialnie, takie jak cefeidy, mogą zmieniać swoją jasność na poziomie magnitud,

*Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika, Warszawa

natomiast w przypadku gwiazd ciągu głównego spodziewamy się znacznie mniejszych amplitud zmian jasności. Satelity, takie jak Corot czy właśnie wystrzelony Kepler, pozwalają na obserwacje z dokładnością poniżej milimagnitud. Pozwala to na odkrywanie coraz to nowych modów pulsacji, których nie widzieliśmy w obserwacjach prowadzonych z Ziemi. Problemem jest obserwacja zmian jasności w przypadku modów o dużym l . Wówczas na tarczy gwiazdy mamy wiele sąsiadujących obszarów jaśniejszych oraz ciemniejszych. Obserwując całą gwiazdę, mamy więc do czynienia z efektem uśrednienia zmian jasności. Na rysunku 1 widzimy częstotliwości i amplitudy odpowiadające różnym wzbudzonym modom pulsacji obserwowanym u 44 Tauri. Dla badania struktury gwiazdy najistotniejsze są wartości obserwowanych częstotliwości.

Co wpływa na częstotliwość danego modu pulsacji? Dźwiękowa fala stojąca, odpowiadająca danemu modowi, powstaje dzięki zjawisku konstruktywnej interferencji. Fala rozchodząca się z jakiegoś punktu wewnątrz gwiazdy ulega odbiciu od powierzchni granicznych (na przykład od powierzchni gwiazdy) i wraca z powrotem. Fale biegnące w przeciwnych kierunkach dodają się i mogą ulec wzmocnieniu lub wygaszeniu. Aby w wyniku kolejnych odbić fala nie wygasła, na drodze pomiędzy punktem początkowym, granicznym i z powrotem do punktu początkowego, musi zmieścić się całkowita liczba długości fali. To rozważanie prowadzi nas do wniosku, iż częstotliwość fali zależy od prędkości dźwięku wzdłuż trajektorii jej przebiegu. Prędkość rozchodzenia się fali dźwiękowej w ośrodku gazowym zależy przede wszystkim od temperatury i rodzaju gazu. Warunki panujące we wnętrzu gwiazdy silnie zależą od odległości od jej powierzchni. Zmienia się temperatura, gęstość, stan jonizacji i skład gazu. Zatem w różnych warstwach gwiazdy prędkość dźwięku jest różna, generalnie rosnąc w głąb gwiazdy. Prowadzi to do występowania bardzo ważnego efektu. Trajektorja fali dźwiękowej rozchodzącej się w gwieździe nie jest linią prostą, lecz ulega zaginaniu. Odpowiada to zjawisku załamania promieni świetlnych, znanemu z optyki. Promień światła ulega załamaniu na granicy ośrodków, w których światło rozchodzi się z różną prędkością. Jak mówi prawo Snella, kąt załamania zależy od kąta padania oraz stosunku prędkości rozchodzenia się fali w ośrodkach. Fala padająca prostopadłe na granicę ośrodków nie ulega załamaniu. Analogicznie, w przypadku pulsacji radialnych ($l = 0$) trajektorja fali dźwiękowej nie ulega zagięciu. Ale fale mające składową horyzontalną, a więc odpowiadające nieradialnym modom pulsacji, ulegają zagięciu, zależnemu od wartości liczby l . Ilustruje to rysunek 3. Widzimy, że w przypadku dużych l fala może zawrócić w kierunku powierzchni gwiazdy już płytko pod jej powierzchnią. Mówimy, że różne mody pulsacji różnie odczuwają (sondują) wnętrze gwiazdy. Zatem o częstotliwości modu o wysokim l decyduje struktura



Rys. 3. Rozchodzenie się modów o różnych l wewnątrz gwiazdy.

tylko zewnętrznych warstw gwiazdy, natomiast w przypadku modów o niskim l istotna jest także budowa głębszych warstw.

Asterosejsmologia pozwala także na badanie rotacji gwiazdy. Tu niezwykle istotne są mody nieradialne, tworzące multiplety. Dla gwiazdy sferycznej i nierotującej częstotliwości modów wchodzących w skład multipletu są takie same. Gdy gwiazda obraca się jednostajnie, częstotliwości modów ulegają rozszczepieniu. Różnica częstotliwości modów wchodzących w skład multipletu jest proporcjonalna do częstotliwości rotacji gwiazdy. Zatem na podstawie odstępów pomiędzy kolejnymi częstotliwościami multipletu możemy wnioskować o rotacji gwiazdy. Jeśli gwiazda rotuje szybciej w warstwach wewnętrznych niż w warstwach powierzchniowych, wywnioskujemy to na podstawie obserwacji odstępów w multipletach o różnych l . Im niższe l , tym bardziej odstęp jest czuły na rotację w wewnętrznych warstwach gwiazdy.

A jak w praktyce wygląda badanie struktury gwiazdy? Po pierwsze, musimy zaobserwować pulsacje gwiazdy i zidentyfikować obserwowane mody pulsacji. Pomocne są tu obserwacje zmienności gwiazdy w różnych zakresach długości fal, a także spektroskopowe obserwacje prędkości rozszerzania i kurczenia się gwiazdy. Na rysunku 1 podpisane są wartości l i m dla modów, które udało się zidentyfikować. Następnie specjalnymi programami komputerowymi konstruujemy model gwiazdy, zakładając początkowe wartości parametrów modelu, takich jak masa gwiazdy, jej jasność, temperatura i skład chemiczny. Jeśli w widmie częstotliwości obserwujemy multiplety, możemy również poczynić założenia dotyczące rotacji gwiazdy. W rezultacie otrzymujemy częstotliwości odpowiadające różnym modom, które najpewniej różnią się od obserwowanych. Oznacza to, iż profil prędkości dźwięku w naszym początkowym modelu nie zgadza się z rzeczywistym profilem w gwieździe. Poprawiamy więc parametry naszego modelu tak, aby uzyskać jak najlepszą zgodność częstotliwości wyliczonych z obserwowanymi. Oczywiście, im więcej modów pulsacji obserwujemy, tym więcej możemy dowiedzieć się o gwieździe.