

Asterosejsmologia

Wnętrze Ziemi od zawsze było zagadką dla ludzkości. Aby odpowiedzieć na pytanie o warunki panujące we wnętrzu Ziemi powstał zupełnie nowy dział geofizyki zwany sejsmologią. Sejsmolodzy na podstawie obserwacji fal sejsmicznych są w stanie wysnuć wnioski dotyczące budowy wnętrza Ziemi. Podobnie wnętrze Słońca jest dla nas bardzo ciekawym zakątkiem wszechświata.

Interesuje nas na przykład jaka panuje tam temperatura. Odpowiedzi na to pytanie może dostarczyć fizyka teoretyczna, a dokładniej teoretyczny model budowy wnętrza Słońca. Należy sobie zadać dwa pytania: czy możemy ufać takiemu teoretycznemu modelowi oraz w jaki sposób możemy zweryfikować nasz model? Dotarcie do wnętrza Słońca oraz bezpośrednio zbadanie warunków tam panujących jest czymś kompletnie niemożliwym. Z pomocą w weryfikacji naszej teorii przychodzi heliosejsmologia, której krótki zarys zostanie przedstawiony w następnych akapitach. Heliosejsmologia zajmuje się badaniami wnętrza Słońca, a ogólniej badaniami wnętrza wszystkich gwiazd zajmują się asterosejsmologia. Heliosejsmologia to jedna z najmłodszych dziedzin astrofizyki, pierwsze badania przeprowadzono pod koniec lat 60 XX wieku.

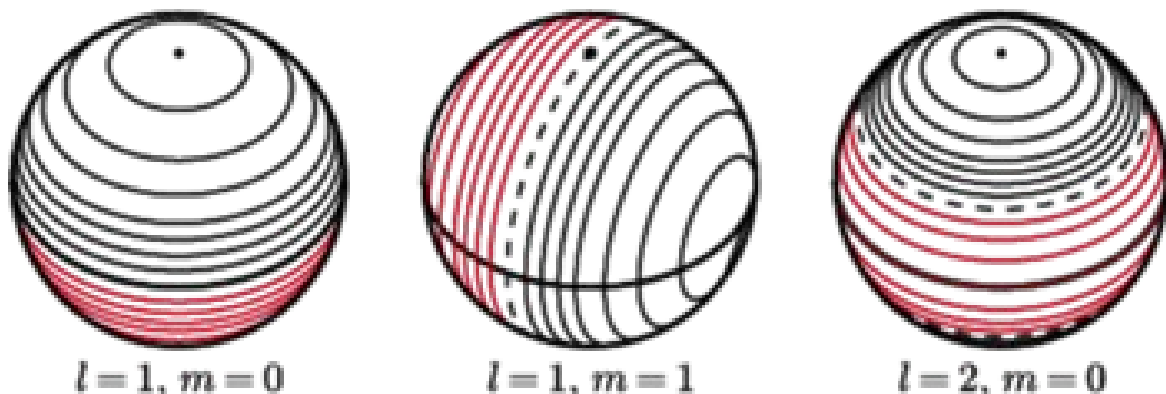
Wśród gwiazd zmiennych szczególnie ważną rolę odgrywają gwiazdy zmienne pulsujące. Najbardziej znane są oscylacje cefeid klasycznych. Są to oscylacje wielkoskalowe – co oznacza, że zmiany promienia gwiazdy sięgają kilku a nawet kilkunastu procent jego wartości. Prędkości radialne związane z oscylacjami mają amplitudy rzędu km/s. W ostatnich latach zaczęliśmy odkrywać i analizować oscylacje które zachodzą w niewielkich skalach, ale występują w ogromnych ilościach i często związane są z tzw. modami nieradialnymi. Nieradialność oznacza, że gwiazda nie zachowuje symetrii sferycznej w czasie pulsacji, lecz przyjmuje kształty różne od kuli. Suma wielu takich oscylacji tworzy bardzo złożony obraz zmienności na powierzchni badanego obiektu. W przypadku Słońca obserwujemy, że

niewielkie fragmenty tarczy zbliżają się lub oddają się od nas z prędkościami rzędu kilku cm/s.

Pulsacje gwiazd wygodnie jest opisywać jako dźwiękowe fale stojące, analogicznie do dźwiękowych fal stojących powstających w instrumentach muzycznych takich jak flet. Jak wiadomo za pomocą fletu nie uzyskamy dźwięku o dowolnych częstotliwościach, lecz tylko o ściśle określonych. Tak samo sprawa wygląda z gwiazdami, tylko ściśle określone drgania – tak zwane mody pulsacji są możliwe. Najprostszym modelem pulsacji są pulsacje radialne. Gwiazda kurczy się i rozszerza, zachowując symetrię sferyczną.

W gwiazdach jesteśmy w stanie zaobserwować wiele różnych modów pulsacji. Astrofizycy do opisu modów używają trzech liczb: n , l , m . Pozwala to klasyfikować i rozróżniać mody pulsacji.

- Liczba n to radialny rząd modu, mówi ile powierzchni węzłowych znajduje się we wnętrzu gwiazdy. Powierzchnie węzłowe nie biorą udziału w ruchu, oddzielają warstwy w których gaz porusza się w przeciwnych kierunkach
- Liczba l mówi o liczbie linii węzłowych. Linie węzłowe dzielą powierzchnie gwiazdy na obszary w których warunki fizyczne zmieniają się w wyniku pulsacji, ale dzieje się to w przeciwnych fazach. Tak więc gdy w jednym z obszarów np. jasność wzrasta w obszarze sąsiadującym jasność musi maleć.
- Liczba m informuje nas ile linii węzłowych przechodzi przez bieguny gwiazdy.

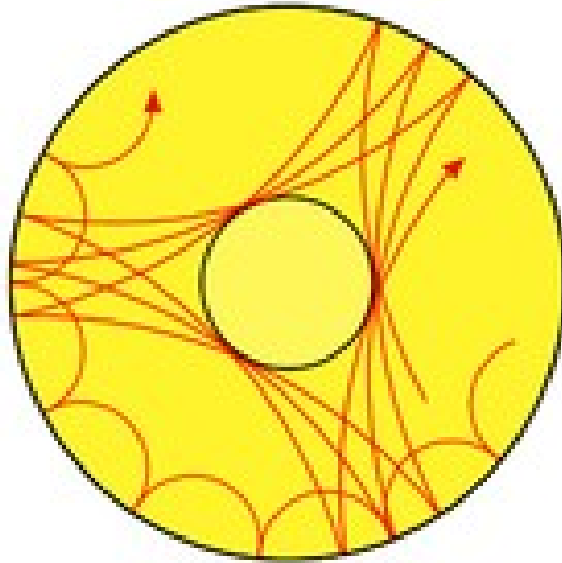


Rys. 1 Ilustracja modów nieradialnych. Linie węzłowe zostały przedstawione za pomocą linii przerywanych. Obszary „czerwone” i „czarne” są w przeciwfazie – jeśli obszar „czerwony” wznosi się to „czarny” opada.

Pulsacje gwiazd możemy obserwować zarówno spektroskopowo jak i fotometrycznie. Spektroskopowo obserwujemy przesuwanie się linii widmowych, co odpowiada zmianom prędkości radialnych na powierzchni gwiazdy. Fotometrycznie obserwujemy zmieniającą się jasność gwiazdy.

Dźwiękowa fala stojąca odpowiadająca danemu modowi powstaje dzięki nakładaniu się fal. Fale rozchodzące się z jakiegoś punktu wewnątrz gwiazdy ulegają odbiciu od powierzchni granicznych (np. od powierzchni gwiazdy) i zwracają w kierunku wnętrza gwiazdy. Fale biegnące w przeciwnych kierunkach dodają się i mogą ulec wzmocnieniu lub wygaszeniu. Częstotliwość fali zależy od prędkości dźwięku wzdłuż jej trajektorii. Natomiast prędkość rozchodzenia się dźwiękowej w ośrodku gazowym, zależy przede wszystkim od temperatury i składu gazu. Musimy jednak pamiętać, że warunki panujące we wnętrzu gwiazdy silnie zależą od odległości od jej powierzchni. Zmienia się temperatura, gęstość, stan jonizacji oraz skład gazu. Zatem w różnych warstwach gwiazdy prędkość dźwięku jest różna.

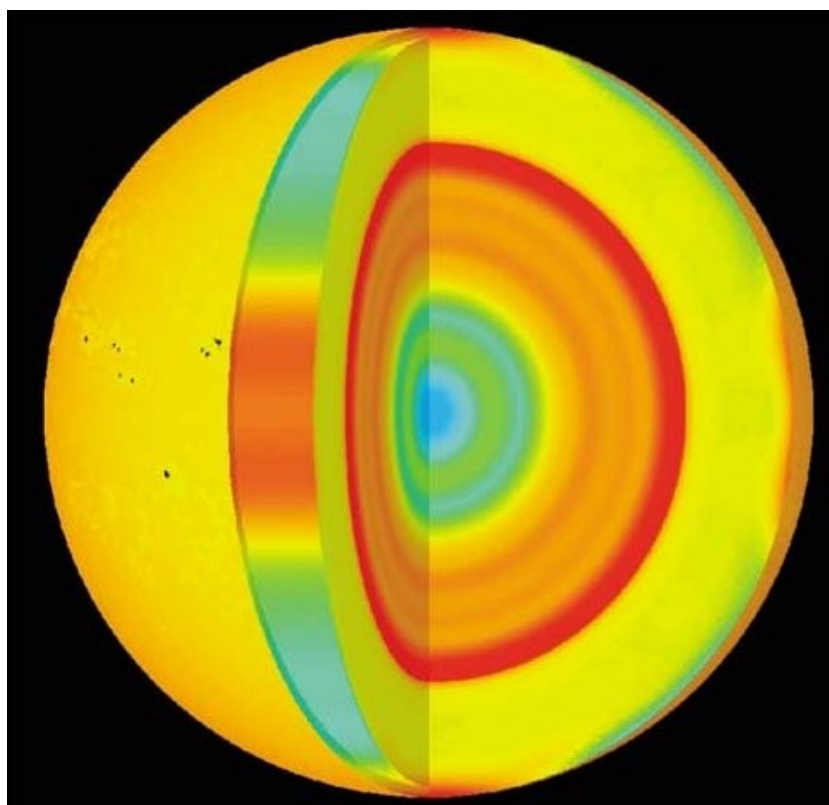
Ten fakt prowadzi do występowania ważnego efektu. Trajektoria fali dźwiękowej rozchodzącej się w gwieździe nie jest linią prostą, lecz ulega zaginaniu. Odpowiada to zjawisku załamania promieni świetlnych znanemu z optyki. Promień światła ulega załamaniu na granicy ośrodków, w których światło rozchodzi się z różną prędkością. „Zaginanie” fal we wnętrzu gwiazdy zostało przedstawione na rysunku 2 [1].



Rys. 2 Różne mody pulsacji docierają do różnych warstw gwiazdy

Na rysunku 2 wyraźnie widać, że niektóre fale poruszają się głęboko pod powierzchnią gwiazdy, a niektóre płytko. Decyduje o tym wspomniana wcześniej liczba l . Gdy wartość liczby l jest duża fala podróżuje płytko pod powierzchnią gwiazdy. Tak więc o częstotliwości modu o wysokim l decyduje struktura tylko zewnętrznych warstw gwiazdy. Sytuacja wygląda odwrotnie gdy mamy do czynienia z modami o niskim l : fala podróżuje głęboko wewnątrz gwiazdy. Na częstotliwość takich modów ma wpływ również budowa głębszych warstw gwiazdy. [1] Rysunek 2 zwraca uwagę na jeszcze jeden bardzo istotny fakt. We wnętrzu gwiazdy istnieje obszar gdzie nie docierają żadne fale, z tego powodu nie jesteśmy w stanie badać najgłębszych obszarów gwiazdy.

Ale jak w praktyce wyglądają badania struktury gwiazdy? Po pierwsze, musimy zaobserwować pulsacje gwiazd i zidentyfikować obserwowane mody pulsacji. Podczas rozpoznawania modów pomocne są obserwacje zmienności gwiazdy w różnych zakresach długości fal, a także spektroskopowe obserwacje prędkości rozszerzania i kurczenia się gwiazdy. Następnie przy użyciu specjalnych programów komputerowych konstruujemy model gwiazdy, zakładając początkowe wartości parametrów modelu, takich jak masa gwiazdy, jasność, temperatura oraz skład chemiczny. W wyniku obliczeń otrzymamy częstotliwości odpowiadające różnym modom, które najpewniej różnią się od obserwowanych. Oznacza to iż prędkości w poszczególnych warstwach gwiazdy nie zgadzają się z rzeczywistymi prędkościami w gwieździe. Poprawiamy więc parametry naszego modelu tak, aby uzyskać jak najlepszą zgodność częstotliwości wyliczonych z obserwowanymi.



Rys. 3 Profil prędkości dźwięku we wnętrzu Słońca

Na powyższej ilustracji widzimy różnice pomiędzy rzeczywistą prędkością rozchodzenia się dźwięku w Słońcu i prędkością przewidywaną przez teorię budowy gwiazd. Kolorem niebieskim zaznaczono obszary gdzie fale dźwiękowe rozprzestrzeniają się wolniej niż przewiduje to teoria. Co również oznacza, że temperatura w tych miejscach jest niższa od przewidywanej. Kolor czerwony wskazuje na obszary gdzie dźwięk rozprzestrzenia się szybciej, analogicznie temperatura w tych miejscach jest wyższa od przewidywanej. Na największe rozbieżności napotykamy w odległości około 1/3 promienia Słońca od powierzchni. Jednak te rozbieżności nie przekraczają 4%. Oznacza to, że nasze teoretyczne przewidywania przyzwoicie opisują warunki panujące we wnętrzu Słońca.

Jeżeli zaobserwujemy i zidentyfikujemy mody pulsacji gwiazdy jesteśmy w stanie wyznaczyć jej masę, temperaturę i inne parametry. Asteroseismologia pozwala nam weryfikować teorie dotyczące budowy gwiazd oraz je poprawiać. Umożliwia budowanie i testowanie wielu teorii astrofizycznych poprzez ich konfrontację z obserwacjami.

Źródła:

1. http://www.deltami.edu.pl/temat/astronomia/2014/06/01/Asteroseismologia_sondowanie_w/
2. <http://archiwum.wiz.pl/2001/01042600.asp>
3. <http://orion.pta.edu.pl/muzyka-gwiazd>
4. <http://news.astronet.pl/6836>
5. http://w.astro.berkeley.edu/~gmarcy/astro160/papers/basics_seismology.pdf

Źródła ilustracji:

- Rys 1: http://www.deltami.edu.pl/temat/astronomia/2014/06/01/Asteroseismologia_sondowanie_w/
Rys 2: <https://en.wikipedia.org/wiki/Asteroseismology>
Rys 3: <http://archiwum.wiz.pl/2001/01042600.asp>