

6 Pulsujące podkarły typu B

Podkarły typu B, oznaczane jako sdB, są obiektami należącymi do skrajnej gałęzi horyzontalnej. Na diagramie H-R leżą w pasie pomiędzy ciągiem głównym i ciągiem białych karłów. Wartości przyspieszenia grawitacyjnego na powierzchni mieszczą się w przedziale $\log g = 5.2 - 6.2$, a temperatury efektywne w przedziale $\log T_{\text{eff}} = 4.4 - 4.6$. Względne obfitości pierwiastków chemicznych są osobliwe. Obserwuje się w szczególności deficyt helu. Gwiazdy sdB są obiektami o masach $\sim 0.5M_{\odot}$ w fazie ewolucyjnej palenia helu w jądrze konwektywnym, które w fazie ewolucji na gałęzi olbrzymów utraciły więcej masy niż obiekty tworzące gałąź horyzontalną.

Pulsacje gwiazd sdB zostały przewidziane na podstawie wyników obliczeń stabilności odpowiednich modeli gwiazd z *ad hoc* powyższą zawartością metali (Charpinet i in., 1996) i - niemal w tym samym czasie - niezależnie odkryte (Kilkeny i in., 1997). Wpierw odkryto wielomodalne pulsacje krótko-okresowe (3-10 min), interpretowane jako mody p i g niskich rzędów. Obecnie znamy blisko 40 takich obiektów. Później (Green i in., 2003), w 10 obiektach chłodniejszych ($\log T_{\text{eff}} < 4.48$, odkryto pulsacje z okresami od 45 min. do 2 godz., interpretowane jako mody g-wysokich rzędów. Znany jest też jeden obiekt, w którym wykryto obydwa typy modów.

6.1 Mechanizm wzbudzenia

Istota działania mechanizmu jest taka sama jak dla gwiazd typu B ciągu głównego, ale staje się on wystarczająco efektywny dla destabilizacji modów jedynie przy znacznie wyższej obfitości żelaza, czego ani dane spektroskopowe, ani standardowe modele nie uzasadniają. Proponowane rozwiązanie (Charpinet i in., 1997) odwołuje się do efektów barodyfuzji i selektywnego ciśnienia promieniowania na jony Fe. prowadzących do akumulacji Fe w warstwie napędzającej pulsacje.

Jeżeli prędkości makroskopowe są zaniedbywalne, to rozkład obfitości pierwiastków wyznacza równowaga dyfuzyjna. W otoczce gwiazdy równowaga ustala się w czasie $\sim 10^5$ lat, podczas gdy faza ewolucyjna sdB trwa $\sim 10^8$ lat. Obfitość Fe w warstwie napędzającej pulsacje wzrasta niemal o rząd wielkości kosztem warstw leżących poniżej. Głębiej dominuje barodyfuzja, która zachodzi powoli, ale nie ma ona wpływu na stabilność modów. Ponad warstwą napędzającą obfitość też nieco wzrasta, w wyniku zwykłej dyfuzji.

W modelach uwzględniających wspomniane efekty, znaleziono (Fontaine i in., 2003) też niestabilność modów długookresowych, ale tylko przy $\ell > 2$.

6.2 Modele sejsmiczne

Modele sejsmiczne gwiazd sdB konstruowane były przez grupę astronomów Montrealu, metodą podobną do opisanej w rozdziale 4.6.

Używano czterowymiarowej siatki modeli z parametrami

$$\Pi = (g, T_{\text{eff}}, M, M_{\text{env}}/M),$$

Tablica 4: Sejsmiczne modele gwiazd typu sdB

obiekt	$\log g$	$\log T_{\text{eff}}$	M/M_{\odot}	$\log(M_{\text{env}}/M)$	mody	referencja
PG 0014+065	5.780	4.538	0.490	-4.31	13	Brassard et al.(2001)
PG 1219+534	5.807	4.526	0.457	-4.25	9	Charpinet et al.(2005a)
Feige 48	5.437	4.471	0.460	-2.97	9(4)	Charpinet et al.(2005b)

gdzie M_{env}/M oznacza grubość wodorowej otoczki. Na dnie otoczki. Cienka warstwa przejściowa, w której nie zachodzą już reakcje jądrowe, dzieli otoczkę od bezwodorowego wnętrza. Rozkład obfitości wodoru i helu wewnątrz tej warstwy wyznacza równowaga dyfuzyjna. Rozkład obfitości żelaza w otoczce, równowag dyfuzyjna z uwzględnieniem selektywnego ciśnienia promieniowania.

Jako możliwe identyfikacje wzbudzonych modów rozpatrywano tylko te z $\ell \leq \ell_{\text{max}} = 3$, które były niestabilne w rozpatrywanych modelach.

Tabela 4 podaje parametry modeli sejsmicznych i liczbę zidentyfikowanych modów. W przypadku Feige 48 tylko cztery mody były wykorzystane do konstrukcji modelu sejsmicznego. Pozostałe, zinterpretowane jako składowe multipletów, wykorzystane zostały do oszacowania prędkości kątowej rotacji.

Wartości pierwszych dwóch składowych Π są ograniczone przez dane spektroskopowe. Ocenę masy mamy tylko dla obiektów znajdujących się w układach podwójnych, ale takich obiektów nie można uznać za reprezentatywne dla całej populacji sdB. Asterosejsmologia jest jedynym źródłem empirycznej wiedzy o M_{env} .

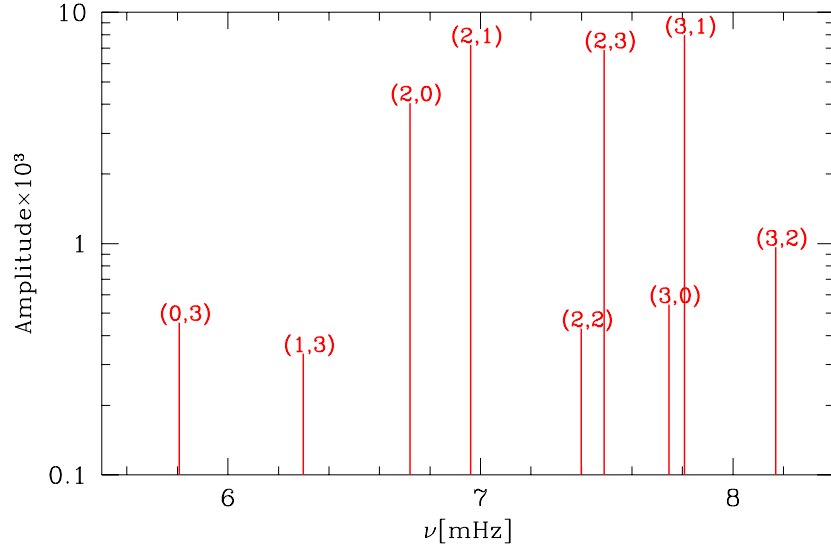
6.3 PG1219+534

Na rysunku 22 przedstawione jest schematycznie widmo oscylacji gwiazdy i identyfikacja modów wzbudzonych w niej modów. Identyfikacje modów jest związana z modelem sejsmicznym, którego parametry podane są w Tabeli 4.

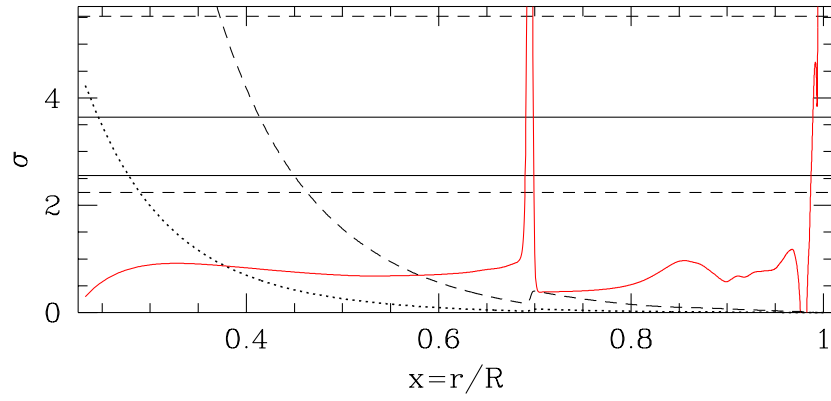
Wszystkie wykryte mody mają charakter (nawet te z $n = 0$) akustyczny, o czym przekonuje nas porównanie częstotliwości modów z przebiegiem częstotliwości krytycznych na rys. 23. Przy $r \approx 0.7R$, gdzie σ_{BV} osiąga wysokie wartości w związku z szybkim spadkiem obfitości helu, zachodzi częściowe odbicie fali. Warstwa napędzająca znajduje się przy $r \approx 0.98R$.

Na rozkład częstotliwości modów istotny wpływ ma występowanie warstwy odbicia wewnątrz obszaru propagacji akustycznej. Bezwymiarowe częstotliwości modów trzech pierwszych modów radialnych wynoszą 2.67, 2.93 i 3.41, a typowe wartości dla gwiazd o jednorodnych chemicznie otoczkach to 2.0, 2.6 i 3.2. Duża czułość częstotliwości na położenie powierzchni odbicia umożliwia dokładny sejsmiczny pomiar masy wodorowej otoczki.

Zakres częstotliwości obserwowanych pokrywa mniej niż połowę zakresu ni-



Rysunek 22: Częstotliwości i amplitudy modów wykrytych w PG1219+534. Liczby w nawiasach to znalezione identyfikacje (ℓ, n) .



Rysunek 23: Bezwymiarowe częstotliwości krytyczne w modelu PG1219+534: częstotliwość Brunta-Väisäli, σ_{BV} , (linia ciągła), częstotliwość Lamba, $\sigma = \sigma_{L,\ell}$ przy $\ell = 1$ (kropki) i przy $\ell = 3$ (kreski). Poziome linie ciągłe podają zakres mierzonych częstotliwości. Linie przerywane pokazują zakres niesatbilnych modów.

estabilności modów niskich stopni. Tylko w oparciu o teorię potrafilibyśmy odpowiedzieć na pytanie czy ta niezgodność świadczy o niedostatkach sejsmicznego modelu gwiazdy. Poważniejsze wątpliwości budzi przyjęcie górnego ograniczenia na $\ell = 3$ w sytuacji takiej właśnie identyfikacji trzech spośród dziewięciu wzbudzonych modów, a efekty uśredniania przy $\ell = 4$ i 3 są zbliżone.

6.4 Feige 48

W widmie oscylacji tej gwiazdy, pokazanym na rys. 24, występuje w przybliżeniu stały odstęp, $\sim 30\mu\text{Hz}$, pomiędzy pięcioma częstotliwościami, który autorzy pracy zinterpretowali jako rozczepienie rotacyjne. Odstępy nie są dokładnie równe, kolejne (licząc od strony niskich częstotliwości) wynoszą 31.2, 29.5, 26.4, 28.9, 25.0 μHz .

Ze wzoru (3.12) dla powolnej rotacji jednorodnej mamy

$$\nu_{n\ell, m+1} - \nu_{n\ell, m} = (1 - C_{n\ell})\nu_{\text{rot}}.$$

Stąd, przyjmując na wartość odstępów częstotliwości 28.2 ± 2.5 i wyliczone wartości stałej Ledoux, $C_{n\ell}$, autorzy znaleźli

$$\Pi_{\text{rot}} = 9.44 \pm 1.16\text{h}.$$

Następnie, znając promień gwiazdy, $R = 0.215R_{\odot}$, dostali równikową na prędkość rotacji

$$v_{\text{eq.}} = 27.6 \pm 3.9\text{km/s}.$$

Górne ograniczenie na spektroskopową wartość $v \sin i$ wynosi 5 km/s. Stąd wniosek autorów, że obserwujemy gwiazdę z kierunku bliskiego osi rotacji, $i \leq 10^\circ$.

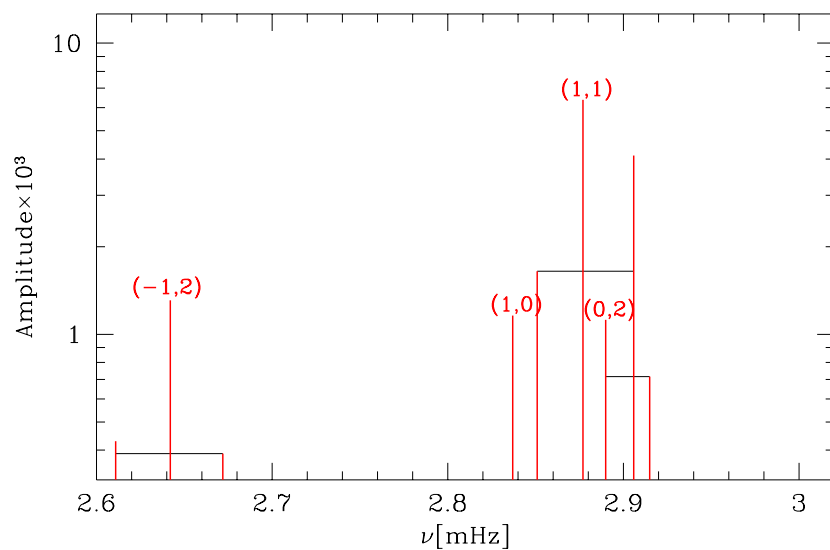
Taka interpretacja wydaje się zgodna z tym co widzimy na rys. 24 dla multipletu (-1,2). Trzy kolejne piki odpowiadają $m = -1, 0, +1$. Ponieważ oczekiwana amplituda zawiera czynnik $(\sin i)^{|2m|}$, mody z $m \pm 2$ mają amplitudy poniżej progu detekcji, a te z $m \pm 1$ amplitudy znacznie niższe niż mod z $m = 0$. Gorzej jest z interpretacją pozostałych multipletów. Składowe $m = +1$ multipletów (0,1) i (1,2) ma duże amplitudy.

Wyznaczona szybkość rotacji jest jak na gwiazdy tego typu wysoka. Odkształcenie związane z siłą odśrodkową jest jednak niewielkie. Stosunek przyspieszenia odśrodkowego do grawitacyjnego na równiku wynosi

$$\epsilon = \frac{v_{\text{eq.}}^2}{Rg} \approx 2.3 \times 10^{-3}.$$

Z tą wartością, ze wzoru (3.22) znajdujemy, że odstępstwa od równo-odstępności składowych multipletów są rzędu $1\mu\text{Hz}$.

Feige 48 jest składnikiem ciasnego układu podwójnego o okresie $\Pi_{\text{orb}} = 9.02 \pm 0.03\text{h}$ i nachyleniu orbity $i \leq 11^\circ$ (O'Tool i in. 2004), co częściowo potwierdza wnioski oparte na danych sejsmicznych i wyjaśnia przyczynę względnie szybkiej rotacji gwiazdy.



Rysunek 24: Częstotliwości i amplitudy modów wykrytych w Feige 38. W nawiasach podane są identyfikacje (ℓ, n) dla multipletów. Poziome kreski łączą mody należące do jednego multipletu.

Podobnie jak w przypadku PG 1219+534, zakres niestabilnych modów jest szerszy niż w sejsmicznym modelu Feige 48 jest istotnie szerszy niż wykrytych w tym obiekcie. Rozciąga się aż do 5.2 mHz.