لرزه شناسی ستارگان متغیر (Asteroseismology)

اگر بخواهیم علم تجربی را فقط وابسطه به *دیدن* بدانیم اطلاعات ما از درون زمین و درون ستاره ها (با توجه به اینکه *دیدن* آنها عملا غیر ممکن است) باید از محدودۀ علم تجربی بیرون باشد، همانطوری که سر آرتور ادینگتون (پدر علم اخترفیزیک) در کتاب خود *"ساختار درونی ستاره ها" (۱۹۲۶)* می نویسد:

در نگاه اول به نظر می رسد که دستیابی به عمق درونی ستاره ها و خورشید از هر منطقۀ دیگر این گیتی، سخت تر باشد. ممکن است که تلسکوپ های ما هر روز عمق بیشتری از گیتی را ببینند ولی چگونه ممکن است که ما از مکانی اطلاعات بدست آوریم که پشت لایه های زیادی پنهان شده باشد؟ به چه طریقی ما می توانیم لایه های بالایی را کنار بزنیم و به درون یک ستاره برسیم؟

و بعد از آن اظافه می کند:

کاملا غیر عاقلانه خواهد بود که بتوان به نتیجه گیری علمی در جایی که خیلی از تجربه و آزمایش های رصدی دور می شود، اعتماد کرد.

البته به نظر می رسد نکته ای که آقای ادینگتون در این بحث در نظر نگرفته اند این است که مشاهده و آزمایش تجربی صرفا از طریق *دیدن* حاصل نمی شود. به عنوان مثال ما از طریق سونوگرافی (با امواج صوتی)، جنینی را که هنوز از رحم مادر بیرون نیامده است را *می بینیم*. در رابطه با ستاره ها نیز می توانیم گفت که درون ستاره ها اصلا محیط ساکتی نیست، درون آنها امواج صوتی فراوانی وجود دارد و این امواج در تعداد زیادی از ستاره ها باعث تپش هایی (نوساناتی) می شوند که به راحتی با تلسکوپ قابل دید است، پس می توانیم فرکانس های نوسانی را ببینیم و از روی آن صدای درون ستاره را *بشنویم*.

یک موج صوتی در واقع یک موج فشاری است که طی آن قسمت های پر فشار در یک محیط منتقل می شوند، همانطور که می دانیم در حالت بی در رو می توانیم سرعت صوت در یک محیط را با معادلۀ زیر به خصوصیات محیط نسبت دهیم: $v_s = \sqrt{\frac{\Gamma P}{\rho}}$ که در آن Γ ثابت بی در رو محیط، P فشار و ρ چگالی محیط است. با توجه به اینکه برای فشار می توانیم بنویسیم: $P = \frac{\rho k T}{\mu}$ که در آن μ جرم ملکولی است. پس برای سرعت صوت در محیط می توان از رابطۀ بهتری استفاده کرد:

$$v_s = \sqrt{\frac{\Gamma k T}{\mu}}$$

پس همانطور که می بینیم، سرعت صوت در یک محیط به دما و ساختار شیمیایی محیط بستگی دارد، طوری که اگر دما بالاتر باشد و ملکول ها با سرعت بیشتری حرکت کنند و سبک تر باشند (μ کمتری داشته باشند) صوت با سرعت بیشتری در محیط حرکت خواهد کرد. پس اگر بتوانیم در یک گاز سرعت صوت را اندازه گیری کنیم، می توانیم از دما و ساختار شیمیایی آن مطلع شویم و از طریق معادلۀ حالت گاز، فشار و چگالی گاز را بدست می آوریم.

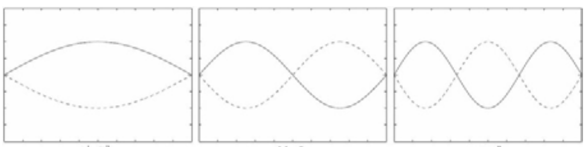
نوسان ستاره ها به وضوح به ما نشان می دهد که درون ستاره ها امواج صوتی (آکوستیکی) در حال انتشار، منعکس شدن و ایجاد نوسان در پوستۀ ستاره هستند. می توان گفت که هدف از لرزه شناسی ستاره ها *دیدن* درون ستاره ها توسط ثبت لرزه های پوسته ای آنها و در نتیجه شنیدن آنهاست. اما آیا واقعا می توان صدای ستاره ها را شنید؟ مسلما اولین جواب به این سوال این است که، نه نمی توان. به این دلیل که فضای بین ما و ستاره ها خلاء است و خلاء مانع از این می شود که ما صدای ستاره ها را بشنویم، اما جدا از این مشکل باید بگوییم که محدودۀ شنوایی انسان ۱۰ اکتاو (اکتاو یک مقیاس لگاریتمی است؛ هر اکتاو ۱۰ برابر قبلی فرکانس دارد) است در حالی که محدوده ای که تا به حال برای ستاره ها دیده شده است ۲۰ اکتاو است، به این معنی که محدودۀ فرکانسی ستاره ها خیلی بیشتر از محدودۀ فرکانسی شنوایی انسان است، طوری که حتی بالا ترین فرکانس ستاره ای ۱۵ اکتاو از پایین ترین صدای قابل شنوایی کمتر است.

با وجودی که فرکانس و دامنۀ فرکانسی نوسانات آکوستیکی ستاره ای خیلی بزرگتر و پایینتر از فرکانس و دامنۀ شنوایی ما است اما دو تن از دانشمندان رصدخانۀ کنکولی در بوداپست کشور مجارستان طی یک تغییر فرکانس (با حفظ نسبت های فرکانسی)، از فرکانس های

آکوستیک ستاره ای که تا به حال ثبت شده است، در سایت خود، اولین سمفونی ستاره ای را ایجاد کرده اند (Kollath et al. 2004) که می توان آن را از آدرس زیر[1] شنید، شنیدن آن بسیار جالب است!

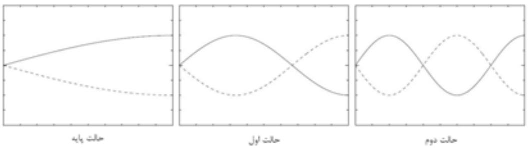
همانطور که می دانیم، فرکانس تمام ساز های موسیقی هنگامی که نوت دو را می نوازند برابر ۴۴۰ هرتز است، اما صدای هر ساز به وضوح با ساز دیگر متفاوت است، طوری که به سادگی می توان شکل ساز را از نوع صدای آن تشخیص داد. دلیل این اتفاق این است که هر ساز با توجه به شکل خاص خود، هماهنگ های خاصی از کل حالت های نوسانی ایجاد شده را تشدید و هماهنگ های دیگر را تضعیف می کند. ستاره ها نیز مانند ساز های موسیقی بنا به شرایط درونی خود هماهنگ های خاصی را تشدید و هماهنگ های دیگر را تضعیف می کنند که به ما این امکان را می دهد که با دانستن فرکانس، دامنه و فاز نوسان ستاره، ساختار درونی ستاره را درک کنیم، این مطلب در درک ایجاد موسیقی ستاره ها که در قسمت قبل معرفی شد خیلی اهمیت دارد. در نهایت می توانیم بگوییم یکی از اهداف لرزه شناسی ستاره ها، بدست آوردن سرعت صوت در عمق های مختلف ستاره می باشد تا از طریق آن خصوصیات فیزیکی آن محیط را بدست آوریم. حال بیایید ببینیم ستاره ها دقیقا به چه شکل نوسان می کنند...

قبل از اینکه بخواهیم چگونگی نوسان ستاره ها (به عنوان اشیایی با تقارن کروی در سه بعد) را مورد بررسی قرار دهیم بیایید به نوسان یک طناب نگاه کنیم. اگر دو سر طناب بسته باشند، مانند سیم های سه تار، کمانچه، گیتار، ویالون و تقریبا هر ساز موسیقی، به دلیل بسته بودن دو سر آن، طناب فقط می تواند در یک سری حالت نوسانی خاص (مانند شکل زیر) نوسان کند.



فرکانس نوسان هر کدام از این حالت ها به طول طناب، کشش ایجاد شده در طناب و مادهٔ سازندهٔ طناب بستگی دارد. اما نکته ای که در اینجا خیلی مهم است این است که اگر مواد تشکیل دهندهٔ طناب در طول آن همگن باشد، فرکانس حالت پایه دقیقا نصف حالت اول و یک سوم حالت دوم است! به همین ترتیب فرکانس حالت دوم با حالت سوم نسبت ۲ به ۳ دارد و همینطور برای تمام حالت های نوسانی یک طناب دو سر بسته. چنین ارتباطی بین هماهنگ های مختلف را هماهنگ یا هارمونی می نامیم، چنین ارتباطی بین دو فرکانس برای گوش ما هارمونیک است؛ می توان با آن موسیقی ساخت!

اما بیایید به طنابی با یک سر آزاد نگاه کنیم (مانند فلوت در صورتی که به جای نوسان طناب، نوسان هوا در آن را در نظر بگیریم)، در این صورت یک طرف طناب بسته است و طرف دیگر آن باز، در اصطلاح فیزیک؛ یک طرف گره است و یک طرف شکم. در این شرایط حالت های نوسانی به شکل زیر خود را نمایش خواهند داد:



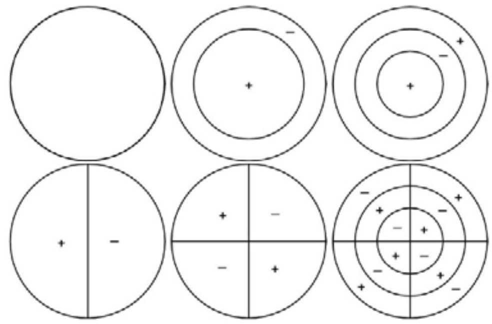
در مقایسهٔ دو حالت نوسانی بسته و باز، می بینید که شماره گذاری حالت ها از روی گره های موجود در نوسان انجام می شود. در نوسان با یک سر باز، می بینیم که با در نظر گرفتن تمام شرایط بالا (همگن بودن طول طناب و ...)، حالت اول یک سوم فرکانس حالت دوم را دارد و حالت دوم با فرکانسی پنج برابر حالت اول نوسان می کند. در مورد فلوت، چون دمای هوا و چگالی هوا در تمام طول لوله برابر است این نسبت ها همیشه بر قرار هستند.

می توان گفت نوسان ستاره تعمیم سه بعدی حالت نوسان هوا در یک فلوت یا طنابی با یک سر آزاد است؛ مرکز ستاره همیشه یک گره است و سطح آن همیشه بیشترین نوسان را دارد (یک شکم است)، اما همانطور که می دانیم در یک ستاره دما در شعاع های مختلف (فاصله های مختلف از مرکز) مقادیر مختلفی از خود نشان می دهد، به همین دلیل داستان کمی پیچیده تر می شود!

حال بیایید به نوسان در دو بعد نگاهی بیندازیم، دو بعد به معنی دو درجهٔ آزادی است (نسبت به حالت اول که یک درجهٔ آزادی بیشتر نداشتیم) در این حالت باید با یک صفحه

[1] http://www.konkoly.hu/staff/kollath/stellarmusic/

کار کنیم، بهترین مثال از صفحه ای که نوسان می کند تنبک، دف یا تبل است! به دلیل دو بعدی بودن در دو راستا گره خواهیم داشت. در شکل مقابل می توانید ۶ حالت نوسانی یک صفحهٔ دو بعدی را ببینید. در این شکل از



نوسان، دایرهٔ محیطی تبل یک گره است (در اثر نوسان حرکت نمی کند) و مرکز در حالت های مختلف یا گره است یا شکم. البته در حالت دو بعدی گره دیگر یک نقطه نیست، یک خط یا انحنا است. به این دلیل که دو نوع گره در این حالت وجود دارد حالت ها را با دو عدد نمایش می دهیم: به عنوان مثال (۰,۱) که معرف حالت اول از سمت چپ در ردیف دوم است. عدد اول معرف آن دسته از گره هایی است که به صورت شعاعی اثر می گذارند؛ دایره هایی که طی نوسان بی حرکت می مانند (ردیف بالا). عدد دوم معرف گره هایی است که غیر شعاعی هستند (ردیف پایین، خط های راست).

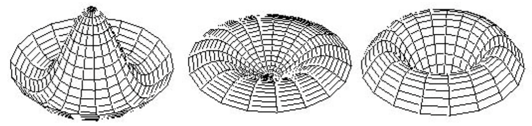
برای درک بهتر نوسان یک صفحه چند حالت را بررسی می کنیم، یاد آوری می کنیم که در تمام حالت ها دایرهٔ محیط یک گره است و شمارش در شکل بالا از سمت چپ انجام می شود.

حالت (۰,۰)، حالت پایه:

در حالت پایه (اول در ردیف بالا) مرکز دایره تنها شکم است. این حالت نوسانی به عنوان مثال وقتی که یک طبل را در مرکز بکوبید خود را نشان می دهد. مرکز تنها شکم است و بیشترین دامنهٔ نوسان را نسبت به سایر حالت ها از خود نشان می دهد.

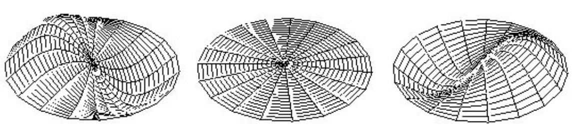
حالت (۱,۰):

در اولین حالت برانگیختهٔ شعاعی (دوم از ردیف بالا) همانطور که معلوم است غیر از محیط دایره که گره است، یک گرهٔ دیگر تقریبا در میانهٔ راه (۰,۴۳۶ شعاع) داریم، در این حالت نوسان به شکل زیر انجام خواهد شد:



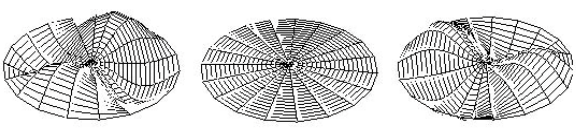
فرکانس در این حالت ۲,۲۹۵ برابر حالت پایه است، همانند حالت پایه این حالت نیز با کوبیدن تبل در وسط ایجاد می شود (می بینیم که با یک ضربه به عنوان منشاء نوسان فقط یک حالت نوسانی ایجاد نمی شود!) البته این حالت با کوبیدن هر نقطه از دایرهٔ گرهٔ آن نیز ایجاد می شود.

حالت (۰,۱): در اولین حالت برانگیختهٔ غیر شعاعی (شکل اول از ردیف پایین) گرهٔ شعاعی (دایره) نداریم، اما همانطور که در شکل زیر می بینید، گره به صورت یک خط عمودی است که دایره را به دو نیم تقسیم کرده است:



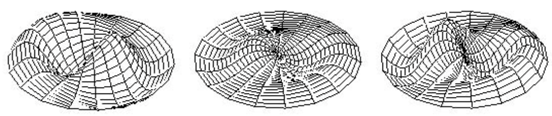
فرکانس این حالت ۱,۵۹۳ برابر فرکانس حالت پایه است.

حالت (۰,۲): در دومین حالت برانگیختهٔ غیر شعاعی (شکل دوم از ردیف پایین) نوسان حالت پیچیده تری پیدا می کند ولی همانطور که از اعداد و شکل صفحهٔ قبل معلوم است، دو گرهٔ خطی که بر هم عمودند. تمام این توضیحات را به صورت شکل زیر می توانید ببینید.



در این حالت فرکانس ۲,۱۳۵ برابر فرکانس حالت پایه است.

حالت (۱,۱): در اولین حالت برانگیختهٔ شعاعی و غیر شعاعی، می بینیم که ساختار نوسان واقعا پیچیده می شود!



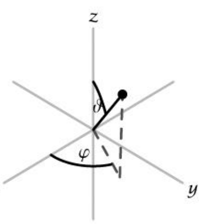
نوسان در این حالت ۲,۱۹۷ برابر نوسان در حالت پایه است.

برای یک پوستهٔ نوسانگر همگن با کشش یکسان در سر تا سر آن، توابعی که این نوسانات را توضیح می دهند توابع بسل می باشند، که از همانها می توان رابطهٔ فرکانس حالتهای مختلف با فرکانس حالت پایه و همچنین محل و شکل تقارنی تمام حالت ها را بدست آورد. شبیه سازی های بالا از پایگاه اینترنتی آقای دن راسل[2] گرفته شده است. در این پایگاه شبیه سازی های متحرک زیبایی از حالت های نوسانی در تک بعد و دو بعد موجود است.

نکتهٔ مهم در رابطه با نوسانات در دو بعد این است که نسبت های فرکانسی در حالت های مختلف رابطهٔ ساده ای (مانند حالت تک بعدی) با هم ندارند. در واقع به همین دلیل است که طبل، تنبک یا دف هیچکدام صدای هماهنگ (هارمونیک یا موسیقیایی)، مانند سه تار یا گیتار ندارند!

برای پیدا کردن حالت های نوسانی در سه بعد به هماهنگ های کروی نیاز داریم، معادلات این هماهنگ ها از تعمیم چند جمله ای های لوژاندر به حالت هایی بدون تقارن استوایی و بعد از واحد کردن آنان، بدست می آید. در اینجا فقط هماهنگ های کروی و چند جمله ای های لوژاندر را می آوریم: معادلات تقارن های کروی به این صورت هستند

$$Y_l^m(\theta,\varphi)=\sqrt{\frac{2l+1}{4\pi}\frac{(l-m)!}{(l+m)!}}P_l^m(\cos\theta)e^{im\varphi}$$



در این معادلات، θ نمایندهٔ زاویه نسبت به محور تقارن کره است (محور تقارن فقط در گونه های معدودی از ستاره ها با محور ستاره هماهنگ نیست) و φ زاویهٔ استوایی است. برای درک بهتر این دو زاویه اگر بخواهیم در بارهٔ کرهٔ زمین بگوییم، $90-\theta$ عرض جغرافیایی و φ طول جغرافیایی می شود. l و m دو درجهٔ آزادی زاویه ای هستند که به ترتیب درجهٔ آزادی در راستای θ و φ را نشان می دهند.

$P_l^m(\cos\theta)$ چند جمله ای های لوژاندر هستند که در زیر می توان رابطهٔ آنها با $\cos\theta$ را دید:

$$P_l^m(\cos\theta)=\frac{(-1)^l}{2^l l!}(1-\cos^2\theta)^{\frac{m}{2}}\frac{d^{l+m}}{d\cos^{l+m}\theta}(\cos^2\theta-1)^l$$

استفاده از این دو هماهنگ در بحث نوسان ستاره ای به صورت زیر است؛ برای یک ستاره با تقارن کروی بعد از حل معادلات حرکت در مختصات کروی می بینیم که حرکت در سه راستای شعاعی r، راستای متمم عرض جغرافیایی θ و راستای طول جغرافیایی φ به صورت زیر خواهند بود:

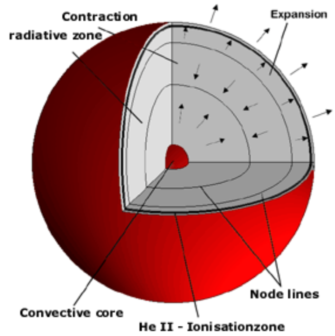
$$\xi_r=a(r)Y_l^m(\theta,\varphi)\exp(i2\pi\nu t)$$
$$\xi_\theta=b(r)\frac{\partial Y_l^m(\theta,\varphi)}{\partial\theta}\exp(i2\pi\nu t)$$
$$\xi_\varphi=\frac{b(r)}{\sin\theta}\frac{\partial Y_l^m(\theta,\varphi)}{\partial\varphi}\exp(i2\pi\nu t)$$

در قسمت قبل که بحث از دو بعد بود، دو درجهٔ آزادی داشتیم. در سه بعد، سه درجهٔ آزادی خواهیم داشت که این سه را با l,m و n نام گذاری می کنیم. درجهٔ سوم یا شعاعی مانند بحث قبل باعث تغییرات در شعاع (و در نتیجه حجم) کره می شود، درجه l تغییرات در زاویهٔ θ را نشان می دهد و m تغییرات در زاویهٔ سمتی φ، البته این سه از هم مستقل نیستند! مقدار l همیشه باید کمتر از n باشد و m هم باید برای هر l، بین $-l$ و l جایگزین شود (m عضو اعداد صحیح است در حالی n و l جزو اعداد طبیعی می باشند).

ساده ترین حالت نوسانی (حالت پایه) برای یک ستاره (که البته تقارن کروی در سه بعد دارد) حالت $l=0$ است یا نوسان شعاعی است، همانطور که معلوم است تحت این شرط، حتما $m=0$ خواهد بود، پس تنها درجهٔ آزادی در راستای شعاع است. یعنی حجم ستاره پیوسته بزرگ و کوچک می شود طوری که مرکز ستاره گره است و پوستهٔ آن یک شکم. در حالت پایه ستاره غیر از مرکزش گره ای ندارد، هر چه حالت بر انگیخته تر باشد (n بیشتر باشد) تعداد گره ها (پوسته های کروی در شعاع های خاص) که در اثر نوسان تغییر شعاع نمی دهند، بیشتر می شود.

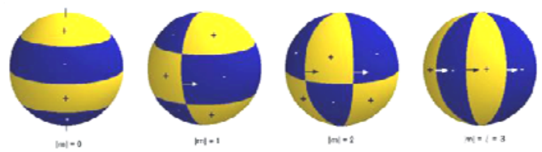
در شکل زیر حالت ($n=2,l=0,m=0$) را می توانید ببینید، در این حالت ستاره همیشه کره خواهد بود، ولی

[2] http://www.kettering.edu/~drussell/Demos.html



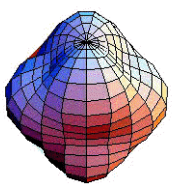
شعاع آن تغییر می کند، در این میان اما در شعاع های خاصی که مقدار آنها از صفر کردن جواب معادلهٔ حرکت در راستای شعاعی بدست می آیند، پوسته های نازکی وجود خواهند داشت که اصلا حرکت نمی کنند. تعداد اینها در حالت $n=2$، دو عدد خواهد بود. همانطور که از شکل معلوم است، در این حالت گاز بین مرکز ستاره تا گرهٔ اول به سمت بیرون حرکت می کند (منبسط می شود)، گاز بین منطقهٔ اول و دوم به سمت درون حرکت می کند (منقبض می شود) و گاز فرای منطقهٔ دوم به سمت بیرون حرکت می کند (منبسط می شود). شکل های قسمت نوسان های سه بعدی از پایگاه اینترنتی گروه تئوری و رصد ستارگان تپنده (TOPS)[3] وابسته به شبکهٔ دلتا اسکوتی و مقالهٔ آقای کرتز (۲۰۰۶) گرفته شده اند.

در حالتی که مقادیر l و m غیر از صفر باشند نوسان حالت ها، در ظاهر بسیار پیچیده تر می شود. سعی می کنیم در ادامه با توضیح آنها از این پیچیدگی کم کنیم! درجهٔ آزادی l تعداد کل گره هاست که تعداد $l-|m|$ از آنها در عرض جغرافیایی هستند و تعداد $|m|$ آنها در طول جغرافیایی. در اشکال زیر سعی می کنیم این نوسان در سه بعد را بهتر توصیف کنیم. در شکل زیر برای حالت $n=3, l=3$ با هر هفت مقدار m آن، یعنی ۳-، ۲-، ۱-، ۰، ۱، ۲ و ۳ می توانید گره ها را ببینید، البته با توجه به اینکه گره های شعاعی درون ستاره روی می دهند از نمایش آنها پرهیز می کنیم.



[3] http://www.univie.ac.at/tops/

در این شکل ها قسمت های زرد (روشن در چاپ سیاه و سفید آن) در حال انبساط و قسمت های آبی (تیره در چاپ سیاه و سفید آن) در حال انقباض هستند. در حالتی که مقدار m صفر است (شکل اول از سمت چپ)، می بینیم که ۳ گره در راستای عرض جغرافیایی خودنمایی می کنند (پاراگراف قبل را به یاد بیاورید که گفتیم تعداد $l-|m|$ گره در راستای عرض جغرفیایی هستند) به این دلیل که مقدار m صفر است، اما در حالت بعد که m مقدار ۱ یا ۱- را به خود گرفته است می بینیم دو گره در عرض جغرافیایی هستند و یک گره در طول جغرافیایی دیده می شود، در حالتی که مقدار m به دو افزایش پیدا می کند می بینیم که تعداد گره های عرض جغرافیایی به یک کاهش پیدا می کند و برعکس تعداد گره های طول جغرافیایی به ۲ افزایش پیدا می کند. در نهایت می بینیم که برای حالت $m=\pm 3$ یا $|m|=3$ که همان مقدار l است، اصلا گره ای در راستای عرض جغرافیایی نداریم و تمام سه گره در راستای طول جغرافیایی قرار می گیرند. همانطور که حتما خودتان هم تا به حال یافته اید، تعداد کل گره ها (چه در طول و چه در عرض جغرافیایی) برابر مقدار l است.



در شکل مقابل می توانید حالتی که نوسانات غیر شعاعی بیشترین مقدار خود را (انبساط و انقباض) دارند ببینید. به عنوان تمرین می توان پیدا کردن حالت نوسانی این شکل را به خواننده سپرد! همانطور که می بینید، در جاهایی (با تقارن غیر شعاعی) گاز در نهایت انبساط است و در جاهای دیگر گاز در نهایت انقباض، البته باید گفته شود که این انبساط و انقباض در نیم دورهٔ بعد برعکس می شود و قسمت های منبسط شده به درون می روند و قسمت های منقبض شده به بیرون می آیند.

همانطور که حتما دقت کرده اید، تا به حال ما همیشه با مقدار m به صورت قدر مطلق برخورد کرده ایم، اما بیایید ببینیم چرا. دلیل آن به طرز تعریف پارامتر m بر می گردد؛ m پارامتری بود که ما برای حل معادلهٔ لاپلاس در راستای φ (معادلهٔ زیر) به آن نیازمند شدیم؛

$$\frac{1}{Q}\frac{d^2Q}{d\varphi^2}=-m^2$$

در واقع ثابتی بود که در آن معادله ظاهر می شد. اما با توجه به شکل خاص این معادله، جواب آن به صورت زیر بدست می آمد:

$$Q=e^{\pm im\varphi}$$

در این معادله $i=\sqrt{-1}$ است، که این جواب به وضوح معادلهٔ دو موج است (یک موج با $+m$ و یک موج با $-m$)، البته اگر به معادلهٔ $Y_l^m(\theta,\varphi)$ دوباره نگاهی بیندازید در آن معادله نیز همین معادلهٔ موج خود را نشان داده است. در واقع این حل جزئی از حل کلی و واحد شدهٔ آن که $Y_l^m(\theta,\varphi)$ می باشد، است. اگر این قسمت از $Y_l^m(\theta,\varphi)$ را موقعی که داریم جواب معادلهٔ حرکت در سه راستا را حل می کنیم، از $Y_l^m(\theta,\varphi)$ بیرون بکشیم و توان های عدد نپر را با هم جمع کنیم می بینیم وابستگی جواب معادلهٔ حرکت به زمان چنین معادله ای خواهد داشت:

$$\exp[i(2\pi\nu t+m\varphi)]$$

می بینیم که m خود را در کنار وابستگی زمانی نشان می دهد. در واقع می توان گفت گره های طول جغرافیایی (وابسته به m) گره های حرکت دار هستند؛ گره هایی که $+m$ دارند در خلاف جهت چرخش ذاتی ستاره حرکت خواهند کرد و گره های با $-m$ موافق جهت چرخش ستاره به حرکت در خواهند آمد. به زبان دیگر می توان گفت گه اگر چرخش وجود نداشته باشد، آنگاه محور تقارنی نمی توان برای ستاره در نظر گفت که از روی آن مقدار m را شمرد.

وقتی که به هماهنگ های کروی نگاه می کنیم، می بینیم که فرکانس نوسان یک حالت خاص، در نبود چرخش، فقط به مقادیر l و n بستگی دارد و هیچ وابستگی به m از خود نشان نمی دهد، به زبان دیگر می توان گفت که فرکانس نوسان در هماهنگ های کروی در m های مختلف تبهگن است. اما حضور چرخش در ستاره به این دلیل که موافق جهت چرخش $-m$ و مخالف چرخش $+m$ است، فرکانس اولی را بیشتر و فرکانس دومی را کمتر می کند، با فاصله هایی برابر بین دو فرکانس برای تمام محدودهٔ فرکانسی ایجاد شده.

اهمیتی که این بحث برای یک لرزه شناس ستاره ای دارد این است که در مواقعی که چنین فرکانس هایی با فاصله های یکسان دیده می شوند با شمارش تعداد فرکانس ها مقدار l و m به راحتی بدست می آیند و از روی فاصلهٔ بین هر فرکانس می توان فرکانس چرخش ستاره را بدست آورد. همچنین با بدست آوردن تمام مقادیر l و m می توان n را بدست آورد و در نتیجه حتی حرکت درونی ترین لایه های ستاره را نیز شناخت (رؤیای هر اخترفیزیک دان!)، شناختی که به هیچ روش دیگری میسر نمی باشد. به زبان ساده می توان گفت که هر حالت نوسانی یک اندازه گیری مستقل از ساختار درونی ستاره است، در نتیجه با پیدا کردن حالت های بیشتر نوسانی برای یک ستاره اطلاعات ما از ساختار آن گونه از ستاره ها بیشتر می شود.

در مورد خورشید، با مشاهدات بسیار دقیق انجام شده، تمام حرکات لایه ها تقریبا تا نصف راه مرکز خورشید شناخته شده اند، فهمیده ایم که خورشید در شعاع هایی کمتر از ۰,۷ شعاع کل خود، مانند یک جسم صلب با دورهٔ ۲۷ روز در حال چرخش است، اما بالا تر از آن به دلیل فرایند های همرفتی (که وابستگی دوره به فاصله از مرکز خورشید را بسیار پیچیده می کنند) در عرض های جغرافیایی مختلف دوره های چرخش متفاوتی خواهد داشت. در واقع می توان گفت که با تشکر از همین حالت های m است که ما تمام این اطلاعات را بدست آورده ایم.

حالا در نهایت بیایید ببینیم لرزه شناسی ستاره ای دقیقا چه کار می کند! نوسان هایی که تا به حال معرفی کردیم همگی از نوع نوسان های فشاری (در مورد تار تک بعدی و سطح دو بعدی) یا آکوستیکی (در مورد فلوت و ستاره) بوده اند که هر دو از لحاظ فیزیکی به نوسان های فشاری معروف هستند. آن دست از نوساناتی که در راستای شعاع نیستند در نفوذ به عمق ستاره به دلیل اینکه دما در عمق ستاره بیشتر از لایهٔ قبلی آن است، بعد از کمی طی مسیر کاملا منعکس می شوند و دوباره به سطح بر می گردند، همانند اثری که در ایجاد سرآب می بینیم، چون این نوع از نوسان ها مجبور به ماندن درون ستاره می باشند، از سطح دوباره منعکس می شوند و به همین دلیل هر حالت خاص از

نوسانات غیر شعاعی فقط تا عمق خاصی به درون ستاره نفوذ می کند، همانطور که از شکل زیر معلوم است.

تعداد نقاط بازتاب با مقدار l دقیقا برابر نیست، اما با افزایش مقدار l تعداد نقاط بازتاب بیشتر می شود. این مطلب به این معنی است که حالت های با l بالا، تا عمق کمی از ستاره نفوذ می کنند و حالت های با l پایین تا عمق بیشتر. فرکانس بدست آمده از هر حالت به سرعت صوت در مسیری که طی کرده است بستگی دارد. پس اگر حالت های زیادی که به اعماق مختلف نفوذ می کنند مشاهده بشوند (فرکانس آنها از تبدیل فوریهٔ منحنی نوری آنها بدست بیاید) آنگاه می توان سرعت صوت را در هر عمق مورد نظر بدست آورد. در مورد خورشید تا تقریبا ۹۰ درصد عمق خورشید، سرعت صوت را با دقت یک هزارم بدست آورده ایم هدف نهایی لرزه شناسی ستاره ای این است که همین اطلاعات را در مورد ستارگان دیگر نیز بدست بیاورد.

این فایل از آدرس زیر دریافت شده است:
http://astr.tohoku.ac.jp/~akhlaghi/