

امواج گرانشی

مریم قلی نسب ۴۰۰۱۰۰۳۹۵
نرگس خورشیدی ۴۰۰۱۷۰۴۰۱
سجاد اشرفیان ۴۰۰۱۰۰۰۵۱

۱۵ بهمن ۱۴۰۲

فهرست مطالب

۳	۱	مقدمه
۴	۲	نخستین آشکارسازی امواج گرانشی
۵	۳	طرز کار آزمایشگاه LIGO
۸	۴	گرانش
۸	۱.۴	چهار نیروی طبیعت
۸	۲.۴	نیوتون
۹	۵	پیدایش امواج گرانشی
۹	۱.۵	انحنا فضا و متریک تخت
۱۲	۶	ستاره ها
۱۲	۱.۶	ساختار ستاره ها
۱۲	۲.۶	تولید انرژی هسته ای
۱۳	۷	تحول ستاره ها
۱۴	۸	مرگ ستاره ها
۱۴	۱.۸	ستاره هایی با جرمی کمتر از هشت برابر خورشید
۱۴	۲.۸	ستاره هایی با جرمی ما بین هشت و بیست و پنج برابر خورشید
۱۵	۳.۸	ستاره هایی با جرمی بیشتر از بیست و پنج برابر خورشید
۱۶	۹	منبع امواج گرانشی
۱۶	۱.۹	انفجار سوپرنووا
۱۶	۲.۹	مجموعه های دوتایی ستارگان نوترونی
۱۶	۳.۹	سیاه چاله های دوتایی
۱۶	۴.۹	سیستم دوتایی سیاه چاله و ستاره نوترونی
۱۶	۵.۹	منابع پس زمینه تصادفی
۱۷	۱۰	منابع

یکی از راه های بشر برای دریافت اطلاعات از اجرام نجومی از طریق امواج الکترومغناطیسی است و این تنها ابزار ما تا قبل از آشکار کردن امواج گرانشی یعنی سال ۲۰۱۵ بوده. انواع مختلفی از امواج الکترومغناطیسی داریم که طیف آن از اشعه گاما تا امواج رادیویی گسترده می شود که هر منبع نجومی امواج مختلفی از دیگری را در این طیف نشر میکند. این امواج به ما اطلاعاتی از ویژگی های آن منبع نجومی می دهد، مثلاً: درخشندگی، فاصله، دما، اندازه، طیف نشری خطی اجرام آسمانی که به ما اطلاعاتی در مورد مقدار و انواع ترکیبات شیمیایی، جرم، میدان مغناطیسی و سرعت شعاعی منبع می دهد. با تمام این ویژگی ها امواج گرانشی برای ما اهمیت دارند. در این مقاله سعی شده به پرسش هایی همچون امواج گرانشی چیست؟ این نوع موج به ما چه اطلاعاتی می دهد که امواج الکترومغناطیسی آن را ندارد؟ منشأ این موج چیست؟ چطور می توان آن را شناسایی کرد؟ برای نخستین بار این موج چگونه کشف شد؟

۲ نخستین آشکارسازی امواج گرانشی

این موج اولین بار توسط انیشتین در سال ۱۹۱۶ از تئوری وی درمورد گرانش حدس زده شد. او گفت که امواج گرانشی قوی توسط اجرام آسمانی مشخص تولید می‌شوند که با سرعت نور به شکل موج‌هایی در ساختار فضا زمان منتشر می‌شوند که یعنی در ابعاد اجرام بر سر راهشان تغییرات ایجاد می‌کنند که البته این تغییرات بسیار ناچیز اند و دیدنشان سخت است. در سال ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ متوجه شدند که می‌توان این موج را با تداخل‌سنجی لیزری مشاهده کرد بنابراین ساخت چنین آشکارسازهایی در همان دوران آغاز شد. در سال ۲۰۰۲ آزمایشگاه‌های LIGO^۱ در آمریکا با استفاده از این آشکارسازها به مدت یک دهه به تحقیق درمورد این موج برای آشکارکردن آن پرداختن که تنها به دانش مربوط به طبیعت احتمالی این موج و دانش به نوع ابزار لازم برای شناسایی آن منجر شد. از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ به بهبود دادن لوازم آزمایشگاهی لایگو برای مشاهداتی با حساسیت بالاتر پرداخته شد که در نهایت در ۱۱ ام فوریه‌ی سال ۲۰۱۶ سرپرست تیم لایگو، از اولین آشکارسازی امواج گرانشی خبر داد و این لحظه بسیار مهمی در تاریخ علم بود و یکی از دلایل آن این است که حدس انیشتین با قدمتی برابر با یک صده را به یقین تبدیل کرد. منبع این کشف یک سیستم از دو سیاهچاله عظیم بود که دور هم در مداری مشخص می‌گشتند که در کسری از ثانیه در هم به صورت مارپیچی ادغام می‌شوند و یک سیاهچاله‌ی تکی می‌سازند. از آنجایی که سیاهچاله‌ها امواج الکترومغناطیسی نشر نمی‌کنند این اتفاق فقط توسط لایگو قابل شناسایی بود و هیچکدام از تلسکوپ‌های دیگر موجود نمی‌توانستند آن را آشکار کنند. این اولین کشف یک سیاهچاله و اولین کشف یک سیستم باینری از سیاهچاله‌ها بود. این کشف همچنین تاییدی بر صحت تئوری گرانش انیشتین بود برای همین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شد.

^۱Laser Interferometric Gravitational Wave Observatory

۳ طرز کار آزمایشگاه LIGO

مشکل اصلی در تشخیص امواج گرانشی این است که آن‌ها کوچک هستند، آن‌ها فضا را فقط به اندازه یک قسمت در هر 10^{21} بخش، منقبض و منبسط می‌کنند. این معادل است با اندازه گیری فاصله بین زمین و آلفا قنطورس و سپس تلاش برای اندازه گیری تغییرات در فاصله ای که به اندازه عرض یک موی انسان است. برای تشخیص چنین تکان‌های ریز شما باید تا حد امکان فاصله بسیار زیادی را اندازه گیری کنید، به همین دلیل است که همانطور که در شکل ۱.۱ می‌بینید بازوهای تداخل سنج لایگو چهار کیلومتر اند و حتی با بازوهایی به این درازی، امواج گرانشی این بازوها را به اندازه حداکثر 10^{-18} متر تغییر می‌دهند. بنابراین آشکارساز باید بتواند با اطمینان، فاصله‌ها را به اندازه $\frac{1}{10000}$ عرض یک پروتون اندازه گیری کند. این کوچکترین اندازه گیری‌ای است که تا کنون انجام شده. بنابراین چگونه می‌توان آن را اندازه گیری کرد با در نظر گرفتن تمام منابع دیگر ارتعاشات و نویز محیط، مانند زلزله، ترافیک و طوفان‌های الکتریکی.

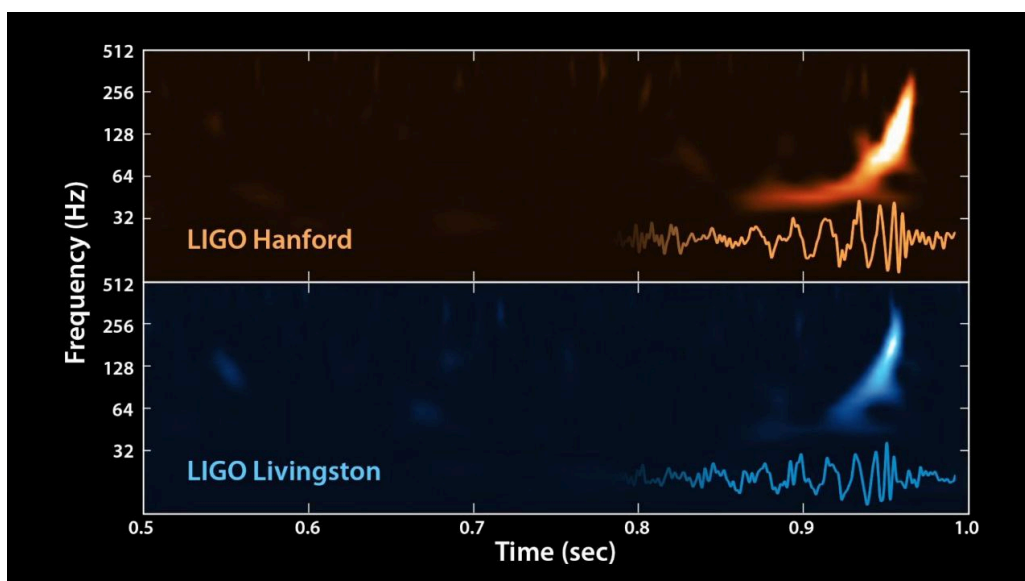


اولین عامل کمک کننده آینه‌های لایگو اند که صاف ترین آینه‌های ساخته شده به دست بشر اند که حدوداً ۴۰ کیلوگرم هم وزن دارند درحالی‌که توسط نخ‌هایی به ضخامت فقط دوبرابر موی انسان از جنس سیلیس معلق شده اند تا به خوبی از محیط خود جداسازی آنها از محیط خود و حتی پس از آن تنها راه برای اطمینان از عدم انجام آن شوند.

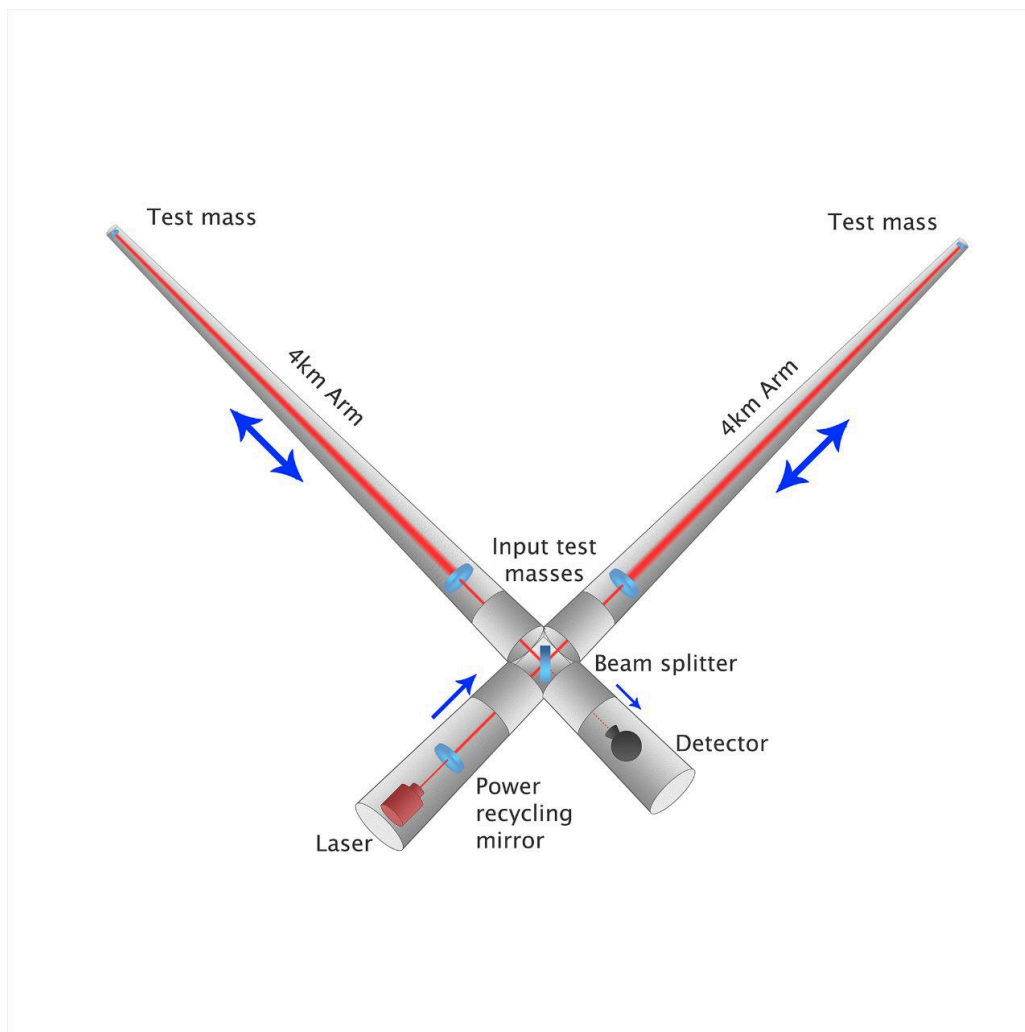


عامل دیگر برای آنکه فریب نویزهای محیطی را نخوریم ساخت دو آشکارساز دور از هم (شکل ۲.۱ و ۳.۱) در مکان‌هایی نسبتاً آرام است که به شما امکان می‌دهد بین نویزهای محلی (فقط در یکی از طرفین

دیده می‌شود) و امواج گرانشی (در هر دو طرف دیده می‌شود) به طور همزمان تمایز قائل شوید. (شکل ۴.۱)



طرز کار این بازوها در لایگو به شکل ۵.۱ است، ابتدا لیزر نور را می‌فرستد و در آینه‌ی وسط به دو بازو منتقل می‌شود سپس به آینه‌ی موجود در انتهای بازوها برخورد کرده و باز می‌گردد در نهایت در اشکارساز جمع شده و دیده می‌شود. هرچه تعداد فوتون‌ها بیشتر باشد دقت اشکارساز بالاتر می‌رود برای همین لیزر موجود قدرتی به اندازه ۱ مگاوات که برابر است با روشنایی ۱۰۰۰ خانه است را دارد.



۴ گرانش

۱.۴ چهار نیروی طبیعت

در میان چهار نیروی طبیعت، نیروهای ضعیف و قوی در فواصل بسیار کوچک حس می‌شوند. نیروی گرانشی در فواصل دور حس می‌شود اما تنها بر اجسام باردار اعمال می‌شود در صورتی که مثلاً اجرام آسمانی بدون بار و خنثی هستند. به رغم اینکه نیروی گرانشی ضعیف‌ترین نیرو در بین چهار نیروی طبیعت است اما در فاصله‌های دور حس می‌شود و متناسب با توده جرم بر اجرام حاکم است. از طرفی نیروی گرانش تنها به صورت جاذبه در بین اجرام وجود دارد و بین هر دو جسم یک نیروی خالص گرانش وجود دارد. به همین دلیل نقش نیروی گرانشی در هر پدیده نجومی دیده می‌شود.

۲.۴ نیوتون

نیوتون پس از مشاهداتش متوجه شد نیروی گرانش به سمت مرکز زمین است؛ از طرفی سیب به سمت زمین سقوط می‌کند نه زمین به سمت سیب. زیرا زمین به دلیل جرم بیشتر نیروی گرانش قوی‌تری دارد و از طرفی گرانش متناسب با عکس مجذور فاصله کاهش می‌یابد. از طرفی نیوتون مشاهده کرد ماه به سمت زمین سقوط نمی‌کند بلکه در مداری به دور آ» در گردش است و اگر از حرکت بازایستد روی آن سقوط می‌کند!

اما نظریه نیوتون برای توصیف اجرامی با میدان گرانشی قوی مناسب نبود و از طرفی انبساط کیهانی را نیز توصیف نمی‌کرد.

از طرفی طبق نظریه نیوتون دو جسم حتی اگر تماس نداشته باشند و در خلا در فاصله دور از هم باشند به یکدیگر نیروی گرانش وارد می‌کنند و این نیروی بدون تغییر در جرم یا موقعیت یک جسم به صورت آنی توسط جسم دیگری در فاصله دور حس می‌شود و تاثیر گرانشی با سرعتی سریع‌تر از نور حرکت می‌کند. در صورتی که نظریه نسبیت خاص بعد ها نشان داد هیچ جسم و اطلاعاتی سریع‌تر از سرعت نور حرکت نمی‌کند.

این مشکلات به نبوغ امشتین سپرده شد تا نظریه گرانش جدید را تدوین کند. این نظریه با نظریه نسبیت خاص متناسب بود و پس از ده سال منجر به نظریه نسبیت عام یا نظریه گرانش جدید شد.

۵ پیدایش امواج گرانشی

۱.۵ انحنای فضا و متریک تخت

در امواج گرانشی وضعیت پیچیده تر از امواج دیگر است. زیرا تغییر در طول زمان و فاصله یعنی فضا زمان باید در میدان گرانشی رخ دهد. اما در نظریه انشتین گرانش خود اساس تعریف فضا زمان است و در نظریه نسبیت عام، نیروی گرانشی به دلیل انحنای فضا زمان تعریف می شود و وجود ماده فضا را منحنی می کند به طوری که به نحو حرکت ذرات و پرتو نور اثر می گذارد. هرچه انحنای بیشتر باشد نیروی گرانشی بیشتر است.

اندازه گیری انحنای فضا توسط کمیت های ریاضی به عنوان تانسور ریمان و ریچی اندازه گیری می شود. هندسه هر فضا، یعنی انحنای آن در هر نقطه از فضا به طور کلی تعیین می شود اگر تانسور متریک آن در همه نقاط شناخته شده باشد.

فضا می تواند همان فضای سه بعدی باشد که در تجربه روزمره به آن عادت کرده ایم؛ یا می تواند هر فضای پیچیده تری باشد. در نسبیت خاص، سه بعد فضا زمان در یک موجودیت چهاربعدی واحد ترکیب می شود. شکل متریک برای این فضا بسیار ساده است و فضا زمان در اینجا تخت یا مسطح است.

اما وجود توزیع ماده این فضای مسطح را دچار تغییر می کند و به فضا انحنای می بخشد. در این صورت متریک نیز تغییر می کند و به توزیع ماده و انرژی وابسته می شود. پس متریک اولیه را متناسب با هندسه جدید تغییر می دهیم. با تغییر متریک جدید و جاگذاری آن در معادله انشتین، باتوجه به ناوردایی متوجه موجود جدیدی می شویم که معادله امواج گرانشی است.

از طرفی با توجه به ترکیبی از تانسور ریمان و ریچی برای هندسه جدید و برابر بودن آن با تانسور انشتین، به وضوح می توان شاهد ارتباط هندسه با توزیع ماده و انرژی بود. در ادامه به این معادلات می پردازیم. در مختصات دو بعدی اگر فاصله بین دو نقطه را با t پارامتریزه کنیم، طول L را با رابطه زیر به دست می آوریم:

$$L = \int_a^b \sqrt{\eta_{\mu\nu} dx^\mu dy^\nu} = \int_a^b dt \sqrt{\eta_{\mu\nu} \frac{dx^\mu}{dt} \frac{dy^\nu}{dt}} \quad (1)$$

که در آن سیگما (η) متریک تخت مینوکفسکی است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

که مولفه زمانی آن نسبت منفی یک با مولفه های مکانی آن دارد و قدر مطلق آن یک است که به معنای تخت بودن است. این منفی بودن مختصه زمانی به دلیل رابطه طول ناردای نسبیتی است.

$$c^2 dt^2 - dr^2 \quad (3)$$

این رابطه ناوردا است زیرا در دستگاه s' و در دستگاه s برابر است. در نتیجه طول L در هر دو دستگاه برابر اندازه گیری می شود. از این رو L یک اسکالر است. و از طرفی در فضا زمان تخت می دانیم کمینه

فاصله طبیعی روی خط راست است. اما اگر سنجه یکسانی روی همه محور ها در نظر نگیریم و با حرکت کردن روی یکی از محورها روی محور دیگر این سنجه قدرمطلق یک نباشد و تغییر کند، یا به اصلاح فضا مسطح نباشد چگونه می توان این طول ناوردا و کمینه را اندازه گیری کرد؟
با عوض کردن متریک اولیه یا همان سیگما به شکل هوشمندانه ای می توان متریک جدید را متناسب با فضای غیر تخت وارد معادله کرد.

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} \quad (4)$$

با تغییر متریک اولیه و اضافه در نظر گرفتن اعوجاجات کوچک حول یک جرم کم می توان متریک را تغییر داد. که در این جا می توان مقدار اضافه شده به متریک اولیه را همان اعوجاجات کوچک در نظر گرفت.
از طرفی با حل معادله کمینه طول و مشتق آن در یک ناحیه کوچک رابطه جدیدی به نام رابطه هموستار^۲ می رسیم.

$$\delta L = 0 \Rightarrow \Gamma_{\alpha\Sigma}^r = \frac{1}{2}g^{\beta r} \left(\frac{\partial g_{\alpha\beta}}{\partial x^\Sigma} + \frac{\partial g_{J\beta}}{\partial x^\alpha} - \frac{\partial g_{\alpha\Sigma}}{\partial x^\beta} \right) \quad (5)$$

$$\frac{d^2 X^r}{dt^2} + \Gamma_{\alpha\beta}^r \frac{d^2 X^\alpha}{dt^2} \frac{d^2 X^\Sigma}{dt^2} = 0 \quad (6)$$

با حل این معادله به x کمینه می رسیم^۳. پس این رابطه جاگزین رابطه خط راست در فضای تخت است.
اما این انحنا از کجا می آید؟
با ترکیب خاصی از تانسور ریچی و ریمان می توان رابطه ای میان تانسور انشتین و تانسور انرژی تکانه نوشت.

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (7)$$

و به صورت کلی تانسور انشتین به صورت زیر تعریف می شود.

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R \quad (8)$$

این رابطه به وضوح رابطه میان هندسه فضا و توزیع ماده است. در نتیجه توزیع جرم می تواند هندسه اطراف خودش را تغییر دهد و انحنا ایجاد کند. با جاگذاری این رابطه در معادله انشتین به رابطه زیر می رسیم.

² Connection or Christoffel symbol

³ Geodesic Equation

$$\partial^2 h_{\mu\nu} = 0 \quad (9)$$

که یک معادله موج است! پس می‌توان پیدایش موج گرانشی را با دنبال کردن معادلات نسبیت عام اثبات کرد.

ستارگان در طول زندگی خود از طریق انجام انفجار هسته‌ای که از سطح آن‌ها تابیده می‌شود، انرژی تولید می‌کنند. در این مرحله، ستارگان دارای اندازه‌ی ثابتی هستند که توسط تعادل بین میدان گرانشی خود و فشار بالای گازهایشان حفظ می‌شود. پس از تمام شدن سوخت برای انفجار هسته‌ای، منطقه‌ی مرکزی ستاره به یک جسم فشرده فرو می‌پاشد، در حالی که بخش دیگر ستاره به فضا منفجر می‌شود. این جسم فشرده می‌تواند یک سفید کوتوله، ستاره نوترونی یا سیاه‌چاله باشد، به تفاوت جرم اولیه‌ی ستاره بستگی دارد.

جرم زیاد و بسیار فشرده‌ی ستاره‌های نوترونی و سیاه‌چاله‌ها، در زمینه‌ی موج‌های گرانشی، برای ما جذاب است، وقتی این اجسام در سیستم‌های دوتایی حضور دارند، تحت شتاب‌های بزرگ قرار می‌گیرند و باعث تابش امواج گرانشی قابل آشکار سازی برایش ما می‌شود.

۶ ستاره ها

۱.۶ ساختار ستاره ها

در یک ستاره، دو نیروی رقابتی وجود دارند که تأثیرات مخالفی روی ماده دارند. یکی از این نیروها نیروی جاذبه‌ای است که سعی دارد تمام ماده‌ی ستاره را به یک نقطه در مرکز آن، جذب کند. به دلیل جرم بزرگ ستاره، این نیرو به قدری قوی است که اگر مقاومتی نداشت، ستاره در عرض چند ساعت به یک نقطه فرو می‌پاشد. بدیهی است که برای اینکه یک ستاره برای میلیاردها سال اندازه‌ی یکسانی داشته باشد، نیاز است که نیروی جاذبه توسط نیروی دیگری متعادل شود. این نیروی مخالف توسط فشار گازهای درون ستاره فراهم می‌شود، هرچه دما و چگالی گاز بیشتر باشد، فشار آن نیز بیشتر خواهد بود. گاز درون ستاره تمایل دارد درون فضا پخش شود، و به همین ترتیب نیرویی به سمت خارج ایجاد می‌کند که نیروی جاذبه را متعادل می‌کند. برای ستاره‌هایی مانند خورشید، این دو نیروی مخالف به دقت یکدیگر را تعادل می‌دهند. این موضوع به عنوان تعادل هیدرواستاتیک شناخته می‌شود. تعادل هیدرواستاتیک ستاره به این معناست که فشار در هر عمق داخل ستاره باید به اندازه‌ی کافی بالا باشد تا وزن تمام ماده‌ی بالای آن را تحمل کند. هر چه به عمق بیشتر می‌رویم، وزنی که باید تحمل شود بیشتر است، بنابراین فشار بیشتر است. این به نوبه‌ی خود نشان می‌دهد که چگالی و دما باید هرچه نزدیک‌تر به مرکز می‌شویم، بیشتر می‌شود.

۲.۶ تولید انرژی هسته‌ای

ستاره‌ها، که به طور قابل توجهی گرم‌تر از فضای سرد اطراف خود هستند، و به طور مداوم گرما خود را از می‌دهد. به دلیل جریان گرما از داخل به خارج، ستاره‌ها شروع به سرد شدن می‌کنند، مگر اینکه انرژی ایجاد شود که تخلیه گرما را تعادل بدهد. نیروی جاذبه در خورشید با گذر زمان تغییر نمی‌کند، زیرا جرم و اندازه‌ی آن تغییر نمی‌کند. بنابراین برای تعادل فشار گاز و جاذبه همانطور که به نظر می‌رسد، دما باید حفظ شود. این بسیار حیاتی است که منبعی از انرژی در ستاره‌ها وجود داشته باشد که دما را حفظ کند. منبع انرژی، انرژی هسته‌ای است که هیدروژن را به هلیوم و عناصر سنگین‌تر تبدیل می‌کند. این فرآیند نیاز به دما و چگالی بسیار بالا دارد که فقط در مرکز خورشید یافت می‌شود. بنابراین، تولید انرژی هسته‌ای فقط در منطقه‌ی مرکزی اتفاق می‌افتد.

۷ تحول ستاره ها

تعادل بین نیروی جاذبه به سمت داخل و فشار به سمت خارج ستاره ، زمانی مختل می شود ، که هیدروژن در منطقه‌ی مرکزی ستاره تمام شده و در نتیجه منبع تامین انرژی به پایان رسیده است.

بدون وجود منبعی از انرژی، دما شروع به کاهش می کند، زیرا ستاره به طور مداوم انرژی گرمای ذخیره شده را به دلیل گرم تر بودن از محیط اطراف تابش می کند. همانطور که در بالا دیده شد، کاهش دما باعث کاهش فشار گاز می شود و دیگر نمی تواند نیروی جاذبه را متعادل کند. این منجر به تراکم مناطق داخلی ستاره می شود.

به دلیل تراکم، انرژی پتانسیل گرانشی ستاره کاهش می یابد، که منجر به افزایش انرژی حرارتی ستاره می شود، زیرا کل انرژی باید همیشه ثابت باقی بماند. (قانون پایستگی انرژی) بنابراین، تراکم ستاره گاز های آن را گرم می کند. چگالی ماده در ستاره به وضوح با کوچک شدن ستاره و ثابت ماندن جرم آن افزایش می یابد .

با افزایش چگالی و دما، شرایط مناسب در مرکز برای شروع مرحله بعدی تولید انرژی هسته ای ایجاد می شود. در مرحله اول، هیدروژن به عنصر سنگین تر هلیوم تبدیل می شود. در مرحله بعدی، هلیوم به عناصر حتی سنگین تر مانند کربن و اکسیژن تبدیل می شود و در این فرآیند انرژی تولید می شود. اما چرا هلیوم در همان زمانی که هیدروژن تبدیل به هلیوم می شود، به همجوشی هسته ای نمی پردازد؟ دلیل این است که هر چه عنصر سنگین تر باشد، چگالی و دمای مورد نیاز برای انفجار هسته ای بیشتر است. این موضوع به این دلیل است که برای انفجار هسته ای، دو هسته از آن عنصر باید به یکدیگر بسیار نزدیک شوند به عبارت دیگر باید بر نیروی قوی که مسئول انفجار هسته ای است، غلبه کنند. هسته ها بار مثبت دارند. هسته هیدروژن کوچک ترین بار مثبت را دارد زیرا فقط یک پروتون دارد، در حالی که هسته های هلیوم دو پروتون و دو نوترون دارند. به علت اینکه نوترون ها ذرات بدون بار الکتریکی هستند، هسته هلیوم دو برابر بار مثبت هسته هیدروژن دارد. به عبارت دیگر، نیروی دافعه بین دو هسته هلیوم چهار برابر نیروی دافعه بین دو هسته هیدروژن است. برای غلبه بر این نیروی بزرگتر، در یک برخورد، سرعت هسته های هلیوم باید بسیار بیشتر باشد.

بدلیل متناسب بودن سرعت ها با دما ستاره ها ، سرعت بیشتر به معنا دما بیشتر است، بنابراین تبدیل هلیوم فقط پس از اینکه منطقه مرکزی به اندازه کافی جمع شده است تا هلیوم در آنجا به دمای بسیار بالای مورد نیاز را برسد، آغاز می شود. با این منبع جدید انرژی، ستاره دوباره تعادل را به دست می آورد. چنین چرخه هایی که با استفاده از یک نوع سوخت آغاز می شود ، سپس با اتمام این سوخت ، ستاره متراکم تر، گرم تر و چگال تر می شود، و عناصر سنگین تر انفجار هسته ای را تجربه می کنند و انرژی تولید می کنند و تعادل موقتی به ستاره می دهند، پیاپی اتفاق می افتد.

مقدار سوخت هسته ای که برای یک ستاره در دسترس است، به جرم آن بستگی دارد ، در حالی که نرخ مصرف این سوخت با درخشندگی ستاره متناسب است، که مقدار انرژی است که توسط ستاره در هر ثانیه رها می شود. درخشندگی به شدت با افزایش جرم ستاره افزایش می یابد، نتیجه نهایی این است که ستاره هایی که جرم بیشتری دارند، درخشندگی بیشتر و عمر کمتری دارند.

۸ مرگ ستاره ها

۱.۸ ستاره هایی با جرمی کمتر از هشت برابر خورشید

اشیائی که جرم آن‌ها کمتر از حدود ۰.۸۰ برابر جرم خورشید است، بدلیل اینکه در مرکز آن‌ها واکنش هسته ای آغاز نمی‌شود، هرگز تبدیل به ستاره نمی‌شوند. ستاره هایی که جرمی بیشتر از این مقدار داشته باشند، تبدیل به ستاره می‌شوند.

ستاره‌های با جرم کمتر در این محدوده پس از چرخه اول، به عبارت دیگر پس از تبدیل هیدروژن به هلیوم، متوقف می‌شوند. دلیل این موضوع نیز این است که به دلیل جرم کم آن‌ها، پس از انقباض پس از پایان هیدروژن، نمی‌توانند به دمای بالایی برسند که برای همجوشی هسته ای هلیوم لازم است. ستاره‌هایی با جرم کمی بیشتر ممکن است از دوره دوم عبور کنند، به عبارت دیگر هلیوم را به کربن و اکسیژن تبدیل کنند، در حالی که ستاره‌های نزدیک به هشت برابر جرم خورشید قادر به عبور از دوره سوم، به عبارت دیگر تبدیل کربن به نئون و منیزیم، خواهند بود. پس از آن، تولید انرژی هسته‌ای متوقف می‌شود و ستاره‌ها تحت تأثیر گرانش فرو می‌پاشند.

مقدار زیادی انرژی که در هر تراکم منطقه مرکزی ستاره آزاد می‌شود، منجر به انبساط لایه‌های گازی خارجی ستاره می‌شود، که دوباره پس از رسیدن به یک حالت تعادلی جدید، متراکم می‌شوند. در حالت گسترش یافته، لایه خارجی نسبتاً سرد است و به رنگ قرمزی ظاهر می‌شود. در این حالت گسترش یافته، شعاع ستاره بسیار بزرگ است و ستاره به عنوان یک "غول قرمز" شناخته می‌شود.

هسته‌ی ستاره بسیار گرم است و به همین دلیل، همه‌ی اتم‌ها در آن به‌طور کامل یونیزه می‌شوند، به این معنی که الکترون‌ها به‌طور کامل از هسته‌های اتمی که به‌طور معمول دور آن‌ها می‌چرخند جدا می‌شوند. در طی انقباض هسته‌ی ستاره، چگالی به‌طور مداوم افزایش می‌یابد و زمانی می‌رسد که الکترون‌های آزاد به‌طور بسیار نزدیک به یکدیگر می‌گیرند. برای گاز عادی، فشار به‌طور مستقیم با دما متناسب است. اما در چگالی‌های بالا که در ستاره‌های فرو رفته به دست می‌آید، اثرات کوانتومی غالب می‌شوند. در این حالت، الکترون‌ها به‌طور میانگین سرعت‌های بسیار بیشتری نسبت به دمایشان دارند و در این حالت ویژگی‌های گاز عادی را ندارند و یکی از نتایج آن این است که فشاری که تحت آن قرار دارند دیگر با دما متناسب نیست. برای این گاز، می‌توان گفت که فشار تقریباً تنها به چگالی وابسته است. همچنین، در ادامه‌ی انقباض، مرحله‌ای به دست می‌آید که تعادل بین گرانش و تعادل هیدرواستاتیک دوباره به دست می‌آید. از آنجا که سوخت هسته‌ای در این جسد تمام شده است، و هیچ انرژی را از طریق فرآیندهای هسته‌ای تولید نمی‌کند. اما همچنان انرژی حرارتی ذخیره شده خود را تابانده و به همین دلیل به مدت طولانی خنک می‌شود. اما کاهش دما منجر به کاهش فشار نمی‌شود، زیرا فشار در حال حاضر تنها به چگالی وابسته است، به این دلیل تعادل بین فشار و گرانش در واقع برای همیشه باقی می‌ماند.

در زمان تولد، چنین جسمی بسیار گرم است و به‌طور آبی-سفید ظاهر می‌شود، این جسم به عنوان یک " کوتوله سفید " شناخته می‌شود. همانطور که کوتوله سفید خنک می‌شود، رنگ به تدریج به قرمز تغییر می‌کند و در نهایت، پس از چند میلیارد سال، به یک " کوتوله سیاه نامرئی " تبدیل می‌شود. اما اندازه، جرم و محتوای شیمیایی آن‌ها تغییری نمی‌کند. این مرحله بنابراین مرحله پایانی در زندگی تمام ستاره‌ها با جرم‌های کمتر از حدود هشت برابر جرم خورشید است.

۲.۸ ستاره هایی با جرمی ما بین هشت و بیست و پنج برابر خورشید

برای ستاره هایی با جرمی بیش از هشت برابر خورشید، همجوشی هسته ای تا رسیدن به آهن ادامه پیدا می‌کند، همجوشی از آهن به عناصر بعدی فرآیندی است که انرژی گیر است و نمی‌تواند انرژی مورد نیاز ستاره را تولید کند.

همانطور که تولید انرژی با تشکیل آهن متوقف می‌شود، ستاره شروع به خنک شدن می‌کند و در نتیجه

به انقباض می‌پردازد. چگالی و همچنین دما به دلیل این انقباض افزایش می‌یابند. وقتی ستاره متراکم می‌شود، و به شعاعی از چند ده کیلومتر می‌رسد، هسته‌های آهن و عناصر دیگر که در آن وجود دارند، نمی‌توانند تحت چگالی و فشار بسیار زیادی که در مرکز ستاره به دست می‌آید، خود را حفظ کنند. به همین دلیل، هسته‌ها به ذرات ابتدایی تشکیل‌دهنده‌ی خود، یعنی نوترون‌ها، پروتون‌ها و الکترون‌ها تجزیه می‌شوند. پروتون‌ها و الکترون‌ها بسیار نزدیک هم قرار دارند و با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا نوترون‌های آزاد را تشکیل دهند. در این مرحله، ماده از نوترون‌های آزاد و کسر کوچکی از پروتون‌ها و الکترون‌ها تشکیل شده است. تمام ذرات به دلیل چگالی بسیار بالای ماده، در حالت تبهگنی نسبت به یکدیگر قرار دارند، مقادیر بسیار زیادی از انرژی، که ممکن است بیشتر از چند برابر انرژی تولید شده توسط یک کهکشان کلی در یک ثانیه باشد، در طی فروپاشی هسته‌ی ستاره تولید می‌شود. به دلیل این موضوع، قسمت‌های خارجی ستاره به صورت یک انفجار عظیم و با یک نمایش شگفت‌انگیز پرتاب می‌شوند. چنین انفجار ستاره‌ای را «سوپر نوا» می‌نامند و باقی‌مانده‌ی فشرده‌ی آن را «ستاره‌ی نوترونی» می‌خوانند.

۳.۸ ستاره‌هایی با جرمی بیشتر از بیست و پنج برابر خورشید

سرعت فرار یک جسم حداقل سرعتی است که اگر یک شی از سطح آن جسم پرتاب شود، از میدان گرانشی این جسم فرار کرده و به سطح آن باز نمی‌گردد.

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \quad (۱۰)$$

باقیمانده انفجارهای سوپر نوا ستاره‌ها با جرم‌های بزرگتر از حدود ۲۵ برابر جرم خورشید نمی‌توانند تعادلی بین فشار و نیروی جاذبه برقرار کنند و محکوم به تراکم همیشگی هستند. در این فرآیند فروپاشی و به تبع آن افزایش سرعت فرار، مرحله‌ای رخ می‌دهد که سرعت فرار بزرگتر از سرعت نور در خلاء می‌رسد. این به این معناست که هیچ شی‌ی با سرعت کمتر یا مساوی با سرعت نور نمی‌تواند از جاذبه باقی‌مانده‌ی ستاره فرار کند. با توجه به نظریه‌ی نسبیت خاص هیچ شی‌ی نمی‌تواند سرعتی بیشتر از نور داشته باشد، و به همین دلیل نه نور و نه هیچ اطلاعات دیگری نمی‌توانند از این شیء خارج نمی‌شوند. بنابراین، به منظور همه‌ی اهداف عملی، ستاره‌ی مذکور نامرئی خواهد شد و تنها چیزی که در موقعیت آن مشاهده می‌شود، یک سیاه‌چال خواهد بود.

۹ منبع امواج گرانشی

۱.۹ انفجار سوپرنووا

در طی یک انفجار سوپرنووا، جرم زیادی از مواد داخل ستاره بدلیل انفجار عظیم شتاب زیادی می گیرند، پس این انفجار های عظیم یکی از اصلی ترین منابع امواج گرانشی هستند.

۲.۹ مجموعه های دوتایی ستارگان نوترونی

هر چنین سیستمی از دو ستاره تشکیل شده است که به یکدیگر به وسیله نیروی جاذبه متصل هستند و دور یکدیگر می گردند، منابع دودویی می توانند موج های گرانشی ایجاد کنند. هر چه چرخش سریع تر باشد، انتشار موج های گرانشی قوی تر خواهد بود.

یک سیستم دودویی با دو ستاره ی نوترونی بسیار فشرده است، زیرا هر ستاره ی نوترونی یک شیء بسیار چگال است، با شعاعی که معمولاً حدود ۱۰ کیلومتر است. چنین سیستمی سرعت چرخش بسیار بالایی خواهد داشت و منبع قوی ای از موج های گرانشی خواهد بود. همچنین، همانطور که سیستم از طریق انتشار موج های گرانشی انرژی را از دست می دهد، مدار آن کوچک تر می شود بزرگی فرکانس موج ها با گذر زمان افزایش می یابد.

۳.۹ سیاه چاله های دوتایی

دو سیاه چال که به یکدیگر می چرخند، منابع قوی ای از موج های گرانشی هستند. آن ها به دلیل انتشار انرژی، به تدریج به داخل می چرخند. در نهایت، این سیاه چال ها به یکدیگر می پیوندند و یک سیاه چال بزرگ تر تشکیل می دهند. این ادغام، یک سیگنال مشخص و قوی از موج های گرانشی را ایجاد می کند که به مدت چند میلی ثانیه باقی می ماند. جالب است که حداکثر فرکانس موج های گرانشی در این سیستم، زمانی رخ می دهد که افق های رویداد سیاه چال ها به یکدیگر می رسند.

۴.۹ سیستم دوتایی سیاه چاله و ستاره نوترونی

ممکن است یک سیستم دوتایی سیاه چاله و ستاره نوترونی نیز وجود داشته باشد که بدلیل فشردگی زیاد این دو جسم و شتاب زیاد این اجسام در حین حرکت یکی از منابع بسیار خوب امواج گرانشی است.

۵.۹ منابع پس زمینه تصادفی

در کهکشان ما، کهکشان های دیگر و حتی قبل از تشکیل کهکشان ها، می توان تعداد بسیار زیادی منبع از موج های گرانشی داشت. هر یک از این منابع به صورت جداگانه ممکن است بسیار ضعیف باشد و نتواند تشخیص داده شود. مثال هایی از چنین منابعی، سیستم های دوتایی کوتوله های سفید است، در کهکشان ما، می توان میلیون ها سیستم دوتا کوتوله سفید یافت. انتشار از چنین منابعی، و منابع مشابه دیگر، می تواند با هم ترکیب شده و یک پس زمینه از موج های گرانشی را ایجاد کند که به عنوان «تصادفی» شناخته می شود، زیرا با زمان به صورت تصادفی نوسان می کند، اما می تواند به صورت آماری مورد مطالعه قرار گیرد.

- Ajit Kembhavi and Pushpa Khare, Gravitational Waves, A New Window to the Universe
- <https://www.ligo.caltech.edu/>
- <https://www.eoportal.org/other-space-activities/ligo>