امواج گرانشی؛

خاصیت ها و شناسایی

توسط: محمد اخلاقی

امواج گرانشی

شاید جواب ما در پاسخ به این سوال که "تابش چیست؟" این باشد: انتقال انرژی و اطلاعات در فضا را تابش می نامیم، یا چیزی که بتوان برای آن یک معادلهٔ موج نوشت. حداقل می توان گفت که نظریهٔ الکترومغناطیس این جواب را به ما می دهد! موضوعی که در هر دوی این تعریف ها مشترک است این است که این اطلاعات یا انتقال انرژی با سرعتی خاص در فضا حرکت می کنند که به عنوان مثال برای نور در خلاء یک ثابت جهانی به نام سرعت نور نامیده می شود.

در مکانیک نیوتونی انرژی گرانشی (یا اطلاعات گرانشی) با میدان پتانسیل گرانشی یا V نشان داده می شود، این پتانیسیل در رابطهٔ لاپلاسین Vبرابر صفر صدق می کند:

$$V = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \rightarrow \nabla^2 V = 0$$

البته این معادله یک معادلهٔ موج محسوب نمی شود، مگر اینکه آن را حالتی خاص از یک معادلهٔ موج در نظر بگیریم که سرعت موج در آن نامتناهی در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر به نظر نیوتن گرانش (یا انرژی گرانشی) به طور کاملا لحظه ای از نقطه ای به نقطه ای دیگر منتقل می شده است که کاملا با اصل دوم نسبیت مبنی بر اینکه اطلاعات حداکثر با سرعت نور منتشر می شوند در تناقض است، علاوه بر آن برای موجی که با سرعت بی نهایت حرکت می کند طول موج و فرکانس نمی توان نسبت داد.

بر خلاف نیوتن، نظر انشتاین این بود که انرژی گرانشی هم مانند نور باید با اصل دوم نسبیت مطابقت داشته باشد؛ معادلاتی که او برای این میدان نوشت سرعتی دقیقا برابر c به این امواج می دهند. به علت پیچیدگی زیاد (غیر خطی بودن) معادلات نسبیت عام، حل مستقیم آنها برای بدست آوردن معادلهٔ موج برای این شکل از نیرو عملا غیر ممکن است به همین خاطر با فرض اینکه مبدا ایجاد کنندهٔ موج ضعیف است معادلاتی خطی از بین معادلات بیرون کشیده می شود که می توان از آنها به معادلهٔ موج رسید.

میدان الکترومغناطیس از شتاب گرفتن ذرات باردار ایجاد می شود، با استفاده از تشابه می توان گفت که امواج گرانشی نیز با شتاب گرفتن جسم ایجاد می شوند، بر اساس همین تشبیه می توان نتیجه گرفت که بیشترین تابش امواج گرانشی نیز باید همانند امواج مغناطیسی از نوع دو قطبی باشد اما این طور نیست! بر اساس تعریف می توان گفت که معادلهٔ دوقطبی جرمی یک سیستم از ذرات، یک سه بردار (بردار سه بعدی) با معادلهٔ زیر است (در معادلهٔ زیر $\mathbf{d}$ را دوقطبی جرمی تعریف می کنیم):

$$\mathbf{d} = \sum m\mathbf{x}$$

که در آن $\mathbf{x}$ بردار مکان ذره ای با جرم m است. پس مشتق $\mathbf{d}$ اندازهٔ حرکت کل سیستم است و مشتق دوم آن بر اساس قانون بقای اندازهٔ حرکت صفر می باشد (در حالتی که نیروی خارجی نداشته باشیم)، به همین خاطر است که ما در امواج گرانشی تابشی از نوع دو قطبی نداریم (در این مورد تابش دو قطبی بستگی به مشتق دوم $\mathbf{d}$ در معادلهٔ بالا دارد). در معادلات نسبیت عام دیده می شود که مشتق زمانی دومین مومان توضیع جرمی (یک تانسور درجهٔ دو) است که باعث تابش می شود، به همین جهت تابش گرانشی اکثرا از نوع چهارقطبی می باشد.

به طور خلاصه در مقایسهٔ میان انواع امواج گرانشی و سایر امواج می توانیم دسته بندی زیر را انجام دهیم:

- امواج گرانشی نمایندهٔ اختلالاتی در یک تانسور درجهٔ دو هستند (که با استفاده از اسمی که از مکانیک کوانتم قرض می گیریم) آن را اسپین دو می نامیم.
- امواج الکترومغناطیسی نتیجهٔ اختلالاتی در یک میدان برداری هستند؛ با اسپین ۱.
- امواج دیگر همگی به صورت اختلال در میدان های اسکالر ایجاد می شوند که به آنها اسپین صفر می گویند.

تعدادی از دانشمندان در اولین روز های تولد نسبیت عام به سختی بحث امواج گرانشی را می پذیرفتند. اما در سال ۱۹۹۳ آقایان هولس و تیلور موفق شدند با توجیه تغییرات مداری ستارهٔ تپندهٔ دوتایی PSR 1913+16 به کمک امواج گرانشی جایزهٔ پر افتخار

نوبل را نسیب خود کنند. آنها نشان دادند که کم شدن فاصلهٔ دو ستاره دقیقا با از دست دادن انرژی و اندازهٔ حرکت توسط امواج گرانشی مطابقت دارد.

همانطور که گفتیم امواج گرانشی به دلیل شتاب گرفتن غیر متقارن جرم (به دلیل چهار قطبی بودن آنها) ایجاد می شوند، اما به خاطر خاصیت ذاتی امواج گرانشی (ضعیف بودن) امواج گرانشی قابل تشخیص فقط می توانند توسط اجرامی بسیار بزرگ در میدان هایی بسیار قوی ایجاد شوند، که البته روی زمین به هیچ وجه نمی توان آنها را ایجاد کرد و برای دریافت این امواج فقط می توان وابسته به منابع اخترفیزیکی یا کیهانشناختی بود. محدودهٔ فرکانسی امواج گرانشی بسیار وسیع است؛ 10^{-17} Hz برای نوساناتی با مقیاس های کیهانی تا 10^{3}Hz برای ایجاد ستاره های نوترونی در یک انفجار ابرنواختری.

در نهایت می توان دلیل تاکید بر کشف چنین امواجی را به دو مورد خلاصه کرد: امتحان نسبیت عام در زمینهٔ امواج گرانشی و مهمتر از آن اینکه این امواج علاوه بر امواج الکترومغناطیسی، دیدی کاملا جدید به منجم و اخترفیزیک دان می دهند؛ نکتهٔ جالب اینجاست که معادلهٔ موج یک ستارهٔ دوتایی غیر متقارن (Coalescing) حالتی نسبتا ساده دارد و فاصله آن ستاره به راحتی با پیدا کردن دامنهٔ موج رسیده به ما و تغییرات آن در زمان بدست می آید. اگر بتوان فاصلهٔ اجرام بسیار دور با (قرمزگرایی بالا) را با دقت خوبی بدست آورد می توان ثابت هابل را تا دقت بسیار خوبی محاسبه کرد، که خود یکی از مهمترین و پر بحث ترین مسائل کیهانشناسی امروزه است.

شناسایی امواج گرانشی

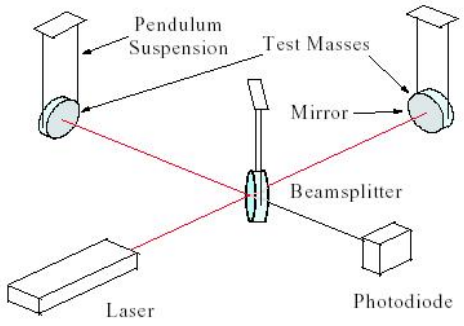
به زبان ساده می توان امواج گرانشی را اختلالاتی در خمیدگی فضا-زمان دانست که مهترین اثر آنها تغییر مکان جرم های مجاور روی زمین یا در فضا نسبت به یک دیگر است، در واقع همین حرکت موجی است که اساس کار تمام آشکار ساز ها می باشد. قدرت امواج گرانشی را بر اساس پارامتر بدون بعد h یا دامنهٔ موج گرانشی که از معادلهٔ زیر بدست می آید نشان می دهند:

$$h = (2\Delta L) / L$$

که در آن ΔL تغییر در فاصلهٔ دو جرم با فاصلهٔ L است. برای یک موج گرانشی قوی h متناسب با مشتق سوم چهارقطبی گرانشی جرم و مجذور فاصلهٔ جرم تابش کننده است.

مشکل اصلی دانشمند علاقه مند به شناسایی چنین امواجی این است که حتی برای قوی ترین منابع اخترفیزیکی مقدار h چیزی حدود $۱۰^{-۲۱}$ یا پایین تر می باشد. ضعیف بودن این مقدار به این معنی است که منابع نویز در داده ها مانند حرکت گرمایی ملکول های آشکارساز یا حرکت های زمینشناختی زمین یا نویز های دستگاه های الکتریکی ثبت کننده همگی ممکن است از خود داده بیشتر باشند! آشکار ساز های زمینی می توانند تا فرکانس های بیشتر از 10 Hz را اندزه گیری کنند ولی برای فرکانس های کمتر از این به خاطر خطاهای ناشی از حرکت های زمین و تغییرات میدان گرانشی باید آشکار ساز را در فضا قرار داد.

اولین کسی که سعی در تشخیص امواج گرانشی کرد آقای وبر بود، او در دههٔ ۱۹۶۰ آزمایشی را بر مبنای تغییر مکان ذرات یک جسم صلب انجام داد. او یک استوانهٔ بزرگ آلومنیومی که خیلی خوب از تغییرات زمین و نویزهای آکوستیک ایزوله بود را مورد استفاده قرار داد (با فرکانس رزونانت ۱۶۰۰ هرتز) و توسط حسگر هایی هر لحظه استرس موجود روی قسمت های مختلف آن را اندزه گیری کرد. با وجودی که دو میلهٔ آلومنیومی که او استفاده کرد بیش از ۱۰۰۰ کیلومتر فاصله داشتند (برای کم کردن خطا) و او علامت هایی را روزانه پیدا کرد اما این آزمایش به تایید دیگر دانشمندان نرسید (دوباره تکرار نشد). استفاده از روش میله های وبر امروزه با تاکید بر سرد کردن میله ها برای کاهش نویز ادامه دارد که هم اکنون در دانشگاه های روم، پاودا، لوییزیانا و پرث در حال آزمایش است. استفاده از میله ها مشکلات خاص خود را نیز دارد: اینکه فقط نسبت به امواجی واکنش نشان می دهند که فرکانسی بسیار نزدیک به فرکانس رزونانت خودشان داشته باشند. بهترین میله هایی که هم اکنون مشغول آشکار سازی هستند می توانند h را تا حدود $۱۰^{-۱۸}$ بدست بیاورند و از لحاظ نظری رسیدن به مقادیر حدود $۱۰^{-۲۰}$ امکان پذیر است. روش دیگری برای پیدا کردن این امواج استفاده از تداخل سنج های لیزری است.



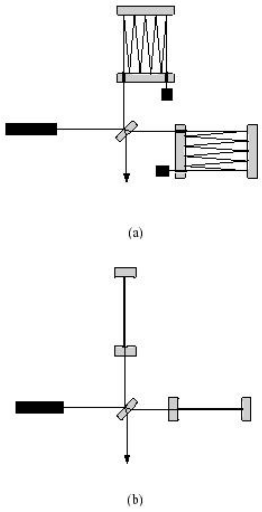
بهترین مزیت استفاده از تداخل سنج های لیزری برای آشکار سازی امواج گرانشی این است که آنها در محدودهٔ فرکانسی بسیار بزرگی فعالیت می کنند طوری که می توان با استفاده از آنها h را به عنوان تابعی از زمان بدست آورد، در ضمن دقت این دستگاه ها به مراتب (حدود $۱۰^{-۲۲}$) از میله ها بیشتر است.

در این نوع از تداخل سنجها از دو جرم نمونهٔ آویزان با فاصله هایی بسیار دور از هم استفاده می شود، با استفاده از تداخلسنج لیزری می توان حرکات بسیار ریز در این جرم ها (آیینه ها) را اندزه گیری کرد.

این تداخل سنج ها بر اساس تداخل سنج مایکلسون طراحی شده اند و مخصوصا با توجه به اینکه امواج گرانشی چهار قطبی می باشند می توانند بسیار مفید واقع شوند؛ زیرا در این امواج، اگر در یک راستا (در صفحهٔ عمود بر راستای حرکت موج) دو جسم نزدیک شوند در راستای عمود بر آن دو جسم دور می شوند. تغییرات بسیار کوچک در فاصلهٔ دو جسم باعث تغییراتی در شدت نور نهایی می شود. التبه نتیجهٔ گرفته شده از چنین آشکار سازهایی به طور خیلی حساسی به نویز ها دارد و با توجه به تداخل سنج آمریکایی LIGO 1 می توان گفت که این تداخل سنج قابلیت ثبت امواج گرانشی را خواهد داشت.

از لحاظ نظری می توان در ساخت این تداخل سنج ها به دقتی برابر اصل عدم قطعیت هایزنبرگ رسید، اما در عمل موانعی وجود دارند؛ منابع اصلی ایجاد نویز در داده های حاصل از چنین تداخل سنج هایی را می توان تحت عناوین زیر نوشت:

- گرادیان های گرانشی در حال تغییر: تغییراتی که در گرادیان محلی دیده می شود اصلی ترین عامل محدود کنندهٔ محدودهٔ فرکانسی تداخل سنج های زمینی است.
- لرزش های زمین شناختی و انواع نویز های مکانیکی
- نویز های دمایی مربوط به دمای اجرام و نوار هایی که از آنها آویزان هستند.
- نویز های الکتریکی در جریان حاصل از فوتون ها در فوتو دایود.



برای ساخت این تداخل سنج ها به دلیل مسافت های زیاد (۳ الی ۴ کیلومتر) لیزر هایی با توان بسیار بالا لازم است. برای طولانی تر کردن مسیر و در نتیجه گرفتن نتیجه ای بهتر می توان از ساختار های مولتی پاس (چند باز گذر) استفاده کرد که باعث می شوند نور قبل از تداخل چندین بار طول مورد نظر را طی کند. امواج باز تابی یا می توانند در کنار هم منعکس شوند (قسمت اول شکل) و یا مانند تداخل سنج فابری-پرو روی هم منعکس شوند (قسمت دوم شکل).

بهینه ترین شکل کار این است که فاصلهٔ طی شده توسط نور طوری باشد که مدت حضور نور در مسیر برابر مدت تغییرات در موج گرانشی باشد. به همین دلیل اگر مدت موج گرانشی یک هزارم ثانیه باشد، برای طول ۳ کیلومتر تعداد دفعات رفت و برگشت نور باید ۵۰ در نظر گرفته شود.

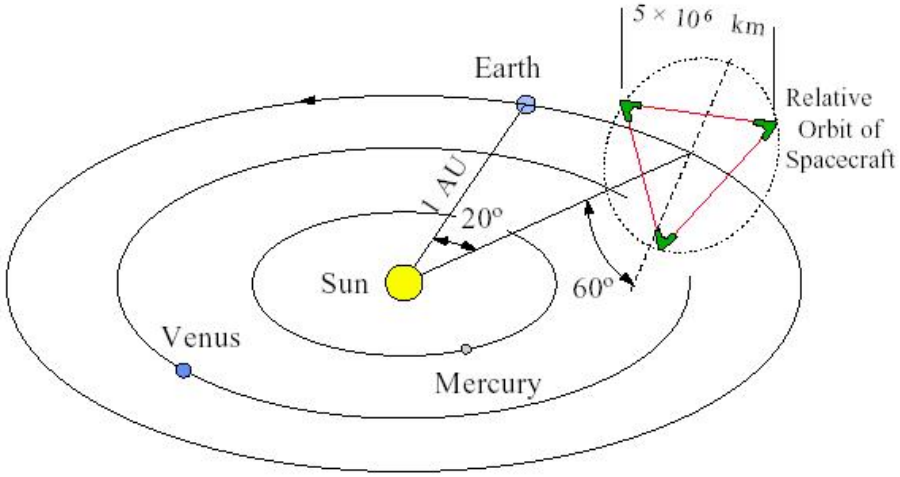
بزرگترین تداخل سنج لیزری ساخته شده (تقریبا در حال اتمام) LIGO است که محصول همکاری چند مرکز در آمریکا می باشد طول هر قسمت از تداخل سنج آن ۴ کیلومتر می باشد و مشابه آن در ایالت لویزیانا با حدود ۳۵۰۰ کیلومتر فاصله در حال ساخت

است، قرار است که این دو با هم داده ها را بدست آورده و مقایسه کنند. غیر از آن موسسهٔ ماکس پلانک در آلمان، دانشگاه گلاسگو، موسسهٔ تکنولوژی کالیفورنیا، موسسهٔ تکنولوژی ماساچوست، موسسهٔ فضا و علوم نجومی توکیو و رصدخانهٔ نجومی توکیو نیز تداخل سنج هایی با طول های بین ۱۰ الی ۱۰۰ متر در اختیار دارند.

طرح های دیگر نیز به ترتیب آمده است:

- VIRGO با همکاری فرانسه و ایتالیا با طول ۳ کیلومتر، نزدیکی های پیزا.
- TAMA 300 مربوط به رصدخانهٔ نجومی توکیو در حال ساخت زیر زمین.
- GEO 600 با همکاری بریتانیا و آلمان با طول بازویی برابر ۶۰۰ متر اما کارایی مراحل اول LIGO و VIRGO.

برای رسیدن به دقت های بالاتر همانطور که گفته شد آشکار سازهای زمینی اطلاعات دقیق تری نمی توانند در اختیار ما قرار دهند، تنها راه دستیابی به اطلاعات دقیق تر استفاده از آشکار ساز های فضایی است؛ طوری که تعدادی سفینهٔ غیر میرا در مدار قرار گیرند و تداخل بین سفینه ها با فاصله هایی بسیار دور از هم انجام شود. فعلا طرح LISA (Laser Interferometer Space Antenna) توسط آمریکا و اروپا پیشنهاد شده است.



در این طرح سه ماهواره با فاصله های ۵ میلیون کیلومتر از هم زاویه های یک مثلث متساوی الاضلاع را می سازند. این مجموعه در مدار زمین اما ۲۰ درجه عقب تر قرار خواهند گرفت، هر ماهواره دو سری آیینه دارد طوری که در مجموع سه تداخل سنج جدا اما غیر مستقل از این سه ماهواره ایجاد می شود. علاوه بر افزایش احتمال آشکار سازی امواج گرانشی چنین ساختاری امکان پیدا کردن قطبش امواج گرانشی را نیز دارد. سفینه ای که هر کدام از تداخل سنج ها درون آن قرار می گیرد عوامل جلوگیرنده ای دارد که تقریبا باعث خنثی شدن کل عوامل نویز در داده ها می شود.

لیزر مورد استفاده از نوع Nd:YAG با طول موج ۱،۰۶۴میکرومتر و توان یک وات خواهد بود. برای اینکه بتوان در LIGO خطای کمی داشت فاصلهٔ آیینه ها از هم باید با دقت ۳۰ پیکومتر تنظیم شود. با در نظر گرفتن فاصلهٔ بسیار زیاد آیینه های LISA فقط پراش نور لیزر بعد از این فاصله باعث می شود که نقطهٔ لیزر حدود ۵۰ کیلومتر قطر پیدا کند! تعداد بسیار کم فوتون باعث می شوند که استفاده از آیینه های معمولی غیر ممکن باشد، به همین دلیل آیینه های تلسکوپ جای آنها قرار خواهند گرفت.

همانطور که دیده می شود سرمایه های بسیار زیادی تا به حال صرف فهم بهتر چنین امواجی شده است. اما تا به حال شاهد مستقیمی که بتوان با استناد به آن امواج گرانشی را دقیقا قبول کرد پیدا نشده است. روشی که آقایان هولس و تیلور استفاده کردند غیر مستقیم بود: کم شدن پریود دو ستاره دقیقا با مقدار پیشبینی شده توسط تابش گرانشی برابر بود. امید است که با پیشرفت تکنولوژی و دانش بتوان هر چه زود تر به این جواب نیز رسید، بعد از رسیدن به این جواب، اگر سوال های ما بیشتر نشوند، احتمال پیدا کردن رابطه ای بین چهار نیروی اساس طبیعت: الکترومغناطیس، هسته ای ضعیف، هسته ای قوی و گرانش بسیار بالا می رود، به امید آن روز...

منابع:

- S. Rowan, J. Hough, Gravitational Wave detection by Interferometry, Living Reviews on Relativity, 2003.
- R. d'Inverno, Introducing Einstein's Relativity, Oxford University Press, 1996
- J. Foster, J.D. Nightingale, A short course in General Relativity, Springer-Verlag, 1995
- Wikipedia, The free Encyclopedia, 2006

این فایل از آدرس زیر دریافت شده است:

http://astr.tohoku.ac.jp/~akhlaghi/