درباره‌ی امواج گرانشی

سعید میرشکاری*، ICTP-SAIFR

۶ شهریور ۱۳۹۳

چکیده: این نوشته ضمن معرفی امواج گرانشی، به صورت کوتاه به چشمه‌های امواج گرانشی، آشکارسازها و سازوکار آن‌ها می‌پردازد. با شروع به‌کار نسل جدید آشکارسازهای امواج گرانشی در اوایل سال ۲۰۱۵ میلادی، سال‌های پر هیجانی پیش‌رویِ حوزه‌ی پژوهشی امواج گرانشی پیش‌بینی می‌شود.

۱ مقدمه

امواج گرانشی انقباض و انبساط‌های کوچکی هستند که در بافت فضا-زمان منتشر می‌شوند (شکل ۱). وجود امواج گرانشی یکی از نتایج مستقیم نظریه‌ی نسبیت عام اینشتین است [۱].

جایزه‌ی نوبل سال ۱۹۹۳ بخاطر نشان دادن تطابق بسیار خوبِ پیش‌بینی نظریه‌ی نسبیت عام در مورد شار انرژی گسیل شده از طریق انتشار امواج گرانشی با مشاهدات تجربی در مورد نرخ تغییر دوره‌ی تناوب سیستم‌های دوتایی چرخان (متشکل از دو تپ‌اختر) در اثر تابش امواج گرانشی به فیزیک‌پیشگان هالس[۱] و تیلور[۲] اهدا شد.

به تازگی در سال ۲۰۱۴ نیز اندازه‌گیری های بسیار دقیقی از قطبش تابش پس‌زمینه‌ی کیهانی[۳] انجام شد که در صورت تایید، شاهدِ تجربی دیگری بر وجود امواج گرانشی (در این مورد امواج گرانشی تولید شده در زمان‌های بسیار دور، درست پس از انفجار بزرگ) است.

این امواج تاکنون به صورت مستقیم آشکارسازی نشده اند. به زودی، آشکارسازی مستقیم امواج گرانشی توسط آشکارسنج‌های تداخل‌سنجیِ لیزری (مانند لایگو[۴] در آمریکا و ویرگو[۵] در اروپا) و رادیوتلسکوپ‌های زمان‌سنجیِ تپ‌اختری[۶]، دریچه‌ی تازه‌ای به شناخت کیهان خواهد گشود.

آشکارسازهای امواج گرانشی قادر خواهند بود اطلاعات مفیدی از خصوصیات اجرام ابرچگال

*saeed.mirshekari@ligo.org

[۱] Halse

[۲] Taylor

[۳] CMB Polarization

[۴] LIGO

[۵] VIRGO

[۶] Pulsar Timing Array

سماوی مانند جرم و اسپینِ سیاهچاله‌ها و ساختار ستاره‌های نوترونی در اختیار منجمان قرار دهند که علی‌الاصول به‌وسیله‌ی تلسکوپ‌های کلاسیک شامل تلسکوپ‌های نوری، رادیو تلسکوپ‌ها، تلسکوپ‌های اشعه‌ی ایکس و گاما قابل مشاهده نیستند.

رصد آسمان بوسیله‌ی امواج گرانشی همچنین ابزار منحصربفردی در کیهان‌شناسی، مطالعه‌ی جهان نخستین و نظریه‌ی انفجار بزرگ فراهم می‌کند.

۲ سازوکار امواج گرانشی

سازوکار تولید امواج گرانشی شباهت زیادی به سازوکار تولید امواج الکترومغناطیسی دارد. طبق نظریه‌ی الکترومغناطیس ماکسول، هر ذره‌ی باردار (در این‌جا بار الکتریکی) شتابداری موج الکترومغناطیسی تابش می‌کند. طبق نظریه‌ی نسبیت عام اینشتین نیز هر ذره‌ی باردار (در این‌جا بار گرانشی یا همان جرم) شتابداری موج گرانشی تابش می‌کند.

اما چرا امواج الکترومغناطیسی (که توسط ایستگاه تلویزیونی شهر تولید شده است) را می‌توان به آسانی با یک آنتن کوچک با دقت بالا دریافت کرد در حالی که آنتن‌های امواج گرانشی در ابعاد چند کیلومتری و با استفاده از تکنولوژی‌های بالا تا به حال موفق به آشکارسازی امواج گرانشی (که توسط چشمه‌های بزرگ سماوی تولید شده است) نشده اند؟

پاسخ کوتاه این است که توان امواج گرانشی به صورت طبیعی بسیار کمتر[۷] از توان امواج الکترومغناطیسی است. برای آشکارسازی امواج گرانشی نیاز به اندازه‌گیری‌های دقیق توسط تکنولوژی‌های سطح بالا و تکنیک‌های پیشرفته در پردازش داده‌ها است. برای مثال، آشکارسازهای امواج گرانشی باید بتوانند تغییرات فاصله به اندازه‌ی یک هزارم قطر یک پروتون را تشخیص دهند.

امواج گرانشی (مانند امواج الکترومغناطیسی) حامل انرژی هستند. دریافت امواج الکترومغناطیسی در آنتن موجب حرکت ذرات آزاد باردار در آن (الکترون‌های آزاد) می‌شود. در مقایسه‌ای نه چندان دقیق، امواج گرانشی نیز می‌توانند موجب جابجایی ذرات آزاد باردار گرانشی (جرم‌های آزاد) شوند.

این جابجایی جرم‌های آزاد به واسطه‌ی دریافت امواج گرانشی را می‌توان از طریق تداخل‌سنجی لیزری اندازه‌گیری کرد. این اساس کار تمام آشکارسازهای تداخل‌سنجی امواج گرانشی (مانند لایگو) است. از این راه می‌توان این امواج را آشکارسازی، پردازش و از آن اطلاعاتی راجع به ویژگی‌های فیزیکی چشمه‌ی این امواج مانند جرم و اسپین استخراج کرد.

سرعت انتشار امواج گرانشی در نظریه‌ی نسبیت اینشتین برابر سرعت انتشار نور است. همچنین طبق این نظریه می‌توان دو نوع قطبش بعلاوه‌ای و ضربدری برای امواج گرانشی متصور شد (شکل ۲). علاوه بر استخراج اطلاعات راجع به چشمه‌ها، امواج گرانشی همچنین برای اولین بار ابزار مفیدی برای آزمایش تجربی نظریه‌ی بنیادی گرانش در میدان‌های قوی گرانشی فراهم می‌آورد.

هرچند نظریه‌ی نسبیت عام اینشتین به عنوان ساده‌ترین و کارآمدترین نظریه‌ی گرانش تاکنون از تمام آزمون‌های تجربی در میدان‌های ضعیف گرانشی (مانند مشاهدات سماوی در اندازه‌های منظومه‌ی شمسی) سربلند بیرون آمده است، اما نظریه‌ی تانسوری اینشتین تنها نظریه‌ی معتبر موجود برای توضیح گرانش نیست.

برای مثال، نظریه‌ی اسکالر-تانسوری گرانش برانس-دیکی[۸] (که ساده‌ترین گزینه‌ی جایگزین برای نظریه‌ی اینشتین محسوب می‌شود و دارای یک پارامتر آزاد اسکالر است) نیز از تمام آزمون‌های

[۷] در حدود سی مرتبه‌ی بزرگی

[۸] Brans–Dicke

تجربی انجام شده با موفقیت بیرون آمده است.

نظریه‌ی اسکالر-تانسوری برانس-دیکی در حد مقادیر بزرگ برای پارامتر آزادش ($\omega \to \infty$) به نظریه‌ی اینشتین میل می‌کند. اگرچه، این نظریه در مواردی پیش‌بینی‌های متفاوتی از آن‌چه نظریه‌ی نسبیت عام اینشتین پیش‌بینی می‌کند دارد. برای مثال حالت‌های بیشتری برای قطبش امواج گرانشی پیش‌بینی می‌کند.

با هر آزمون، با توجه به دقت آزمایش، یک حد کمینه برای مقدار پارامتر آزاد اسکالر نظریه‌ی برانس-دیکی به دست می‌اید. بر خلاف نظریه‌ی برانس-دیکی، نظریه‌ی نسبیت عام اینشتین فاقد هرگونه پارامتر آزادی است. به همین دلیل، هر انحرافی از آن هر چند به مقدار بسیار جزئی در حکم مرگ این نظریه به شمار می‌رود.

۳ چشمه‌های امواج گرانشی

علی‌الاصول هر رخدادی که در آن توزیع جرم به سرعت و به میزان زیاد در فضا تغییر کند می‌تواند یک چشمه‌ی امواج گرانشی باشد. با یک محاسبه سرانگشتی می‌توان نشان داد که حداقل میزان جرم و تغییرات توزیع آن در فضا برای تولید امواج گرانشی‌ای که در محدوده‌ی آشکارسازهای کنونی ما باشند آن‌قدر بالاست که هر تلاشی برای تولید چشمه‌های امواج گرانشی در آزمایشگاه کاملا ناامید کننده است.

اما مشاهدات آماری نجومی نشان می‌دهد چشمه‌های سماوی نسبتا قوی امواج گرانشی به تعداد قابل توجهی در کیهان وجود دارند. دو نکته‌ی مهم در این میان، اول، فاصله‌ی این چشمه‌ها با آشکارسازهای ما و دوم، درجه‌ی حساسیت آشکارسازها است. تا کنون هیچ چشمه‌ی امواج گرانشی‌ای در فاصله‌ای از زمین که بتوان امواج ساطع شده از آن را با آشکارسازهای کنونی از روی زمین ثبت کرد، مشاهده نشده است.

امواج گرانشی می‌توانند از طریق چشمه‌های مختلف سماوی مانند انفجار ابرنواخترها[۹]، تپ‌اخترها[۱۰] و تابش تصادفی پس‌زمینه کیهانی تولید شوند. اما در میان تمامی آن‌ها سیستم های دوتایی، متشکل از دو ابرجرم، مانند دو سیاهچاله که حول مرکزجرمشان می‌چرخند، از اهمیت خاصی برخوردارند. دوتایی های پرجرم چرخان کاندیدای شماره‌ی یک چشمه‌های امواج گرانشی به شمار می‌روند و بسیاری از مطالعات مدل‌سازی و تحلیلی بر روی امواج گرانشی با تمرکز بر روی این نوع از چشمه‌ها انجام می‌گیرد. این اهمیت خاص به این دلیل است که سازوکار آن‌ها شناخته شده‌تر از سایر چشمه‌های امواج گرانشی است.

تحول یک سیستم دوتایی چرخان (مانند دو سیاهچاله) به عنوان چشمه‌ی امواج گرانشی را می‌توان در سه بازه زمانی مختلف با خصوصیات مجزا دسته بندی و بررسی کرد (شکل ۳). در مرحله‌ی نخست دو جرم از هم دورند و میدان گرانشی بین آن‌دو نسبتا ضعیف و سرعت چرخش دوتایی نسبت به سرعت نور کم است. استفاده از روش‌های تقریبی پُست-نیوتونی برای حل معادلات میدان اینشتین به معادلات تحلیلی حرکت می‌انجامد. برای دوتایی‌های با جرم تقریبا چند برابر جرم خورشید (و نه خیلی بیشتر) این مرحله از لحاظ زمانی طولانی‌ترین قسمت موج را تشکیل می‌دهد.

در مرحله‌ی میانی، حرکت چرخشی دو جرم در اثر از دست دادن انرژی از طریق گسیل امواج گرانشی کند شده و دو جرم بسیار به هم نزدیک می‌شوند و در نتیجه میدان گرانشی قوی به وجود می‌آید. در این مرحله سرعت‌ها نیز کسر قابل توجهی از سرعت نور است. به همین دلایل در این فاز از تحول سیستم دوتایی روش تقریبیِ پُست-نیوتونی برای حل معادلات غیرخطی اینشتین دیگر

[۹] Supernovea
[۱۰] Pulsars

معتبر نیست. روش‌های عددی و استفاده از ابررایانه‌ها تنها راه مطالعه‌ی این مرحله از تحول سیستم‌های دوتایی است. موج گرانشی در این مرحله از تحول قوی‌ترین توان خود را دارد.

در مرحله‌ی نهایی، دو سیاهچاله در مرکز جرم سیستم با هم‌دیگر برخورد کرده و در هم فرو می‌روند. در این مرحله از تحول، سیستم در واقع یک سیاهچاله‌ی چرخانِ اختلال یافته است. برای تحلیل این قسمت از تحول سیستم دوتایی می‌توان روش‌های اختلالی را به کار برد. در نهایت، می‌توان از ترکیب آن‌چه از تحلیل سیستم در هریک از سه مرحله فوق از تحول سیستم به دست می‌آید شکل موج گرانشی حاصل را به دست آورد. داشتن شکل موج گرانشی با دقت بالا نقش کلیدی در آشکارسازی و نیز در تخمین پارامترهای فیزیکی چشمه‌های امواج گرانشی دارد.

۴ آشکارسازهای امواج گرانشی

همان‌طور که پیش‌تر به آن اشاره شد، تداخل‌سنجی لیزری (مانند تداخل‌سنج مایکسون–مورلی[۱۱]) اساس متداول‌ترین آشکارسازهای امواج گرانشی را تشکیل می‌دهد. در انتهای هر بازو یک آینه‌ی سنگین بسیار صیقلی به حالت معلق در فضا قرار دارد. پرتو لیزر توسط یک جداکننده به دو پرتو در جهت دو بازو تقسیم می‌شود. هر پرتو پس از طی مسافت طول بازو در خلاء از آینه‌ی جرم‌دار انتهای هر بازو بازتاب می‌شود. سپس پرتوهای بازگشتی از دو بازو در مبدا با هم تلاقی کرده و نوارهای تداخلی تشکیل می‌دهند (شکل ۴). امواج گرانشی باعث تغییر در طول بازوها و در نتیجه تغییر نوارهای تداخلی می‌شود که با دقت بالا قابل اندازه‌گیری است.

آشکارسازهای لایگو در ایالات متحده، دو تا از چندین آشکارساز فعال کنونی امواج گرانشی بر روی زمین است[۱۲]. با صرف‌نظر از جزئیات، هر یک از تداخل‌سنج‌های لایگو (یکی در ایالت لوئیزیانا و دیگری در ایالت واشینگتون) یک تداخل‌سنج غول‌پیکر با دو بازوی عمود بر هم هریک به طول تقریبی چهار کیلومتر است.

آشکارسازهای لایگو [۲] در اوایل سال ۲۰۱۵ با درجه‌ی حساسیت بالاتر نسبت به قبل شروع به کار خواهند کرد. لایگو ۲۰۱۵ اولین آشکارساز از نسل دوم آشکارسازهای امواج گرانشی است. این برای اولین بار است که درجه‌ی حساسیت آشکارسازهای ما به اندازه‌ای است که از می‌توان انتظار داشت چشمه‌ای که توان دریافتی موج گرانشی آن در محدوده‌ی حساسیت آشکارساز باشد، را بتوان آشکارسازی کرد.

منابع

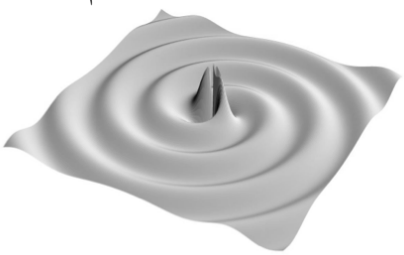
[1] E. Poisson and C. M. Will, Gravity: Newtonian, Post-Newtonian, Relativistic (2014).

[2] http://www.ligo.org.

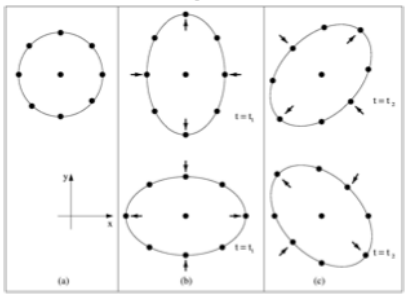
[۱۱] Michelson–Morley

[۱۲] آشکارسازهای امواج گرانشی مستقر در فضا مانند e-LISA در برنامه‌های سال‌های آینده قرار دارد.

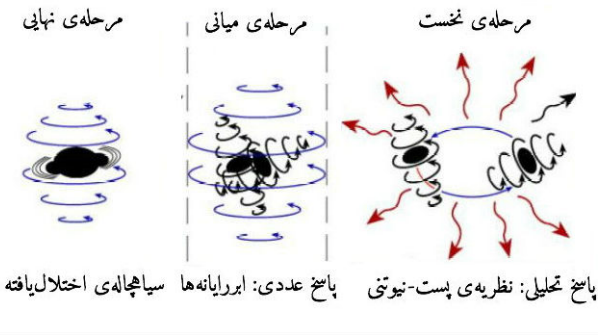
شکل ۱: انتشار امواج گرانشی تولیدشده توسط یک سیستم دوتایی، بصورت شماتیک در دو بعد



شکل ۲: قطبش بعلاوه‌ای و ضربدری امواج گرانشی در نظریه‌ی نسبیت عام اینشتین



شکل ۳: مراحل تحول یک سیستم دوتایی به عنوان چشمه‌ی امواج گرانشی



شکل ۴: شکل شماتیکی از یک آشکارساز تداخل‌سنجی امواج گرانشی