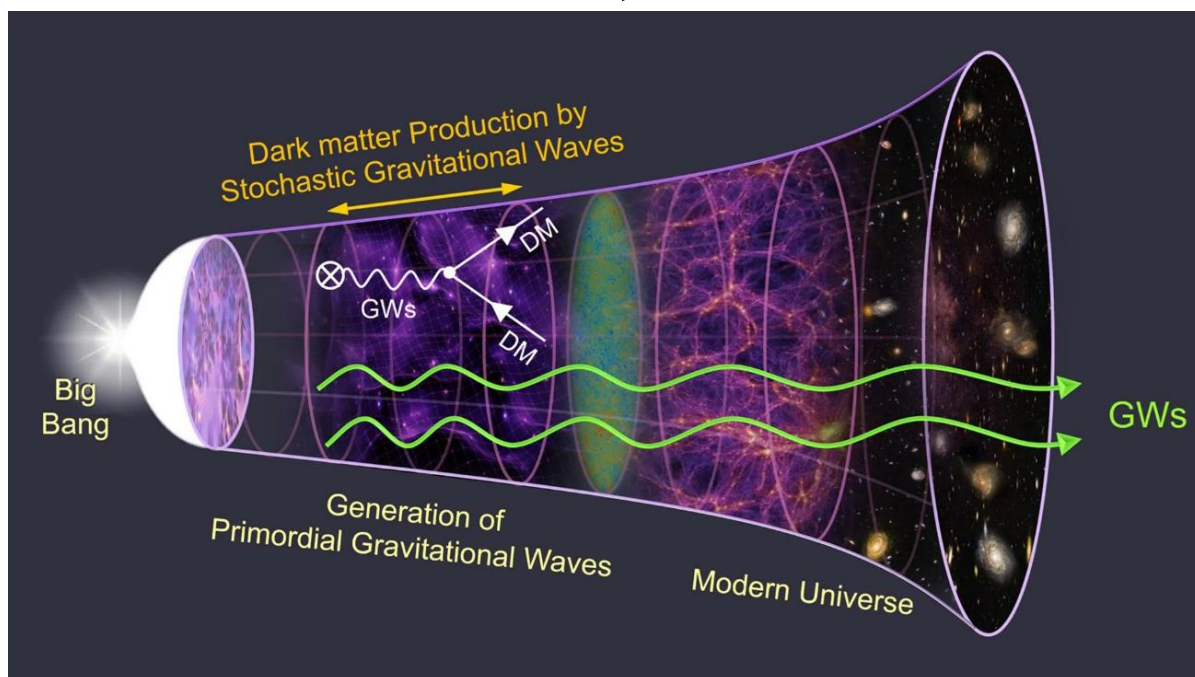


امواج گرانشی و ساختار کیهان



Gravitational Waves and Cosmic Structure⁰

توصیف کامل جهان هستی بدون شناخت کافی از شرایط و مسائل آغازین آن ناممکن است. یکی از بنیادی‌ترین آنها، مسئله پس‌زمینه امواج گرانشی، یک نوفه (Noise) پس‌زمینه^۱، در سراسر گیتی، و نقش آن در ساختار کیهان است.

فشرده

بنابر فیزیک نظری. امواج گرانشی اولیه، کوتاه زمانی پس از انفجار بزرگ ایجاد شده و نقش تعیین کننده در برهمکنش‌های آغازین کیهان و سرعت انبساط آن داشته است. اما، جزئیات این فرایندها، برای مثال فاز تورمی کیهان^۲، روشن نیست. سوای این مسائل، کشف امواج گرانشی اختریفیزیکی در سال ۲۰۱۵ ما را در آستانه‌ی عصر جدید با چشم‌انداز بسیار شگفت‌انگیزتر از آنچه تاکنون از طریق امواج الکترومغناطیسی در باره‌ی جهان هستی دریافته‌ایم، قرار داده است.

امواج گرانشی اولیه، برخلاف امواج گرانشی اختریفیزیکی، ناشی از آمیختگی (تداخل) سیاهچاله‌ها یا انفجار ابرستاره‌ها نیست. امواج گرانشی اولیه، بنابر برآوردهای نظریه تورم کیهانی، حدود 10^{-36} تا 10^{-10} ثانیه پس از انفجار بزرگ ایجاد شده و طول موج‌شان همسو با انبساط کیهان افزایش یافته و اکنون نوعی پس‌زمینه‌ی (نوفه) کیهانی را تشکیل می‌دهند. کشف و بررسی این امواج گرانشی با طول موج‌های بسیار بزرگ نیاز به آشکارسازهایی در ابعاد کیهانی دارد. شواهد نشان می‌دهند که کشف این امواج از طریق آرایه زمان‌سنجی تباخترها (Pulsar Timing Array) امکان‌پذیر است.

در این مقاله می‌خواهیم پس از پیش‌گفتار، به مفهوم امواج گرانشی (اختریفیزیکی و پس‌زمینه‌ای) و رابطه‌ی این امواج با فضازمان پرداخته و در ادامه خاستگاه‌های امواج گرانشی، ساختار و شیوه‌ی کار آشکارسازهای مربوطه را توضیح دهیم.

یادآوری

۱. در مقاله 'فضازمان کلاسیک'^۳: با یافته‌های ۲۵ قرن گذشته در باره فضازمان کلاسیک و لزوم اصلاح آنها آشنا شدیم.
۲. در مقاله 'معمای فضازمان'^۴: به‌طرح مسئله فضازمان در رابطه با نظریه نسبیت عام و نظریه کوانتومی پرداختیم.
۳. در مقاله 'محدودیت‌های شناخت فضازمان'^۵: محدودیت‌ها را از جمله اختلاف در ساختارهای نظری ملاحظه کردیم.
۴. در مقاله 'فضازمان کوانتومی'^۶: به کوانتیزه کردن هندسه فضا و لزوم ملاحظه گرانش در اصل عدم قطعیت پرداختیم.

پیش‌گفتار

تصور می‌شود کوتاه زمانی پس از انفجار بزرگ (؟) عصر تورم آغاز شده و کیهان در این دوران با سرعت بالایی، در طول 10^{-33} تا 10^{-30} ثانیه با ضربی برابر با 10^{30} الی 10^{50} ، انبساط یافته است. این اندازه‌ها نشان می‌دهند که سرعت انبساط کیهان در عصر تورم بیشتر از 'سرعت نور' بوده است! البته، این گفته به معنای آن نیست که سرعت انبساط کیهان در آن دوران با نظریه‌ی نسبیت که حداکثر سرعت در طبیعت را 'سرعت نور' می‌داند، در تضاد است. چراکه بنابر نظریه نسبیت، 'سرعت نور' یک حالت معمولی از حرکت در فضا نیست، بلکه توصیف قانون طبیعت است که فضا و زمان را به هم پیوند می‌زند. در حالی که، منظور از سرعت انبساط کیهان، سرعت انبساط خود کیهان است.

بزرگی بخش قابل مشاهده‌ی کنونی کیهان در آغاز عصر تورم کوچکتر از شعاع یک ذره پروتون (10^{-15} متر) بوده که در طول تورم تا نزدیک به 10^{10} سانتی‌متر انبساط می‌یابد. جزئیات این دوران و علت پایان یافتن آن روشن نیست.

امواج گرانشی اولیه (امواج گرانشی پس‌زمینه) یا نوفه پس‌زمینه به میدانی از امواج گرانشی از دوران آغازین کیهان گفته می‌شود. این امواج جهت مشخصی در آسمان ندارند و سرعت انتشار آنها برابر است با سرعت نور، حدود سیصد هزار کیلومتر در ثانیه. طول موج امواج گرانشی اولیه هم‌سو با انبساط کیهان افزایش، بسامدشان کاهش، یافته است، یعنی اکنون طول موج بسیار بزرگی دارند. از این‌رو، کشف آنها به مراتب دشوارتر از امواج گرانشی اخت‌فیزیکی است.

شناخت از شرایط و مسائل آغازین کیهان (کیهان کوانتومی) نیازمند کوانتیزم کردن گرانش^۷ است. برای این منظور بیشتر دو ایده مطرح است: ۱. کوانتیزه کردن نظریه نسبیت عام که در حال حاضر بیشتر در شکل گرانش کوانتومی حلقوی^۷ مطرح است. ۲. نظریه ریسمان‌ها: کسب گرانش کوانتومی از طریق جایگزینی ذرات "نقطه‌ای" با رشته‌های انرژی کوچک و در حال لرزش به نام "ریسمان‌ها". در این نظریه صحبت از 10^6 بُعد و یا بیشتر است. ناگفته نماند که از زمان طرح این نظریه در نیمه دوم قرن گذشته تاکنون نتیجه فیزیکی خاصی کسب نشده است.^{۸ و ۹}

با توجه به نکات ذکر شده، سعی می‌کنیم در زیر، پس از معرفی مفهوم امواج گرانشی اخت‌فیزیکی و مفهوم امواج گرانشی پس‌زمینه و شیوه‌ی سنجش و واکاوی این امواج به رابطه آنها با فضا‌زمان (کیهان) بپردازیم.

مفهوم امواج گرانشی اخت‌فیزیکی

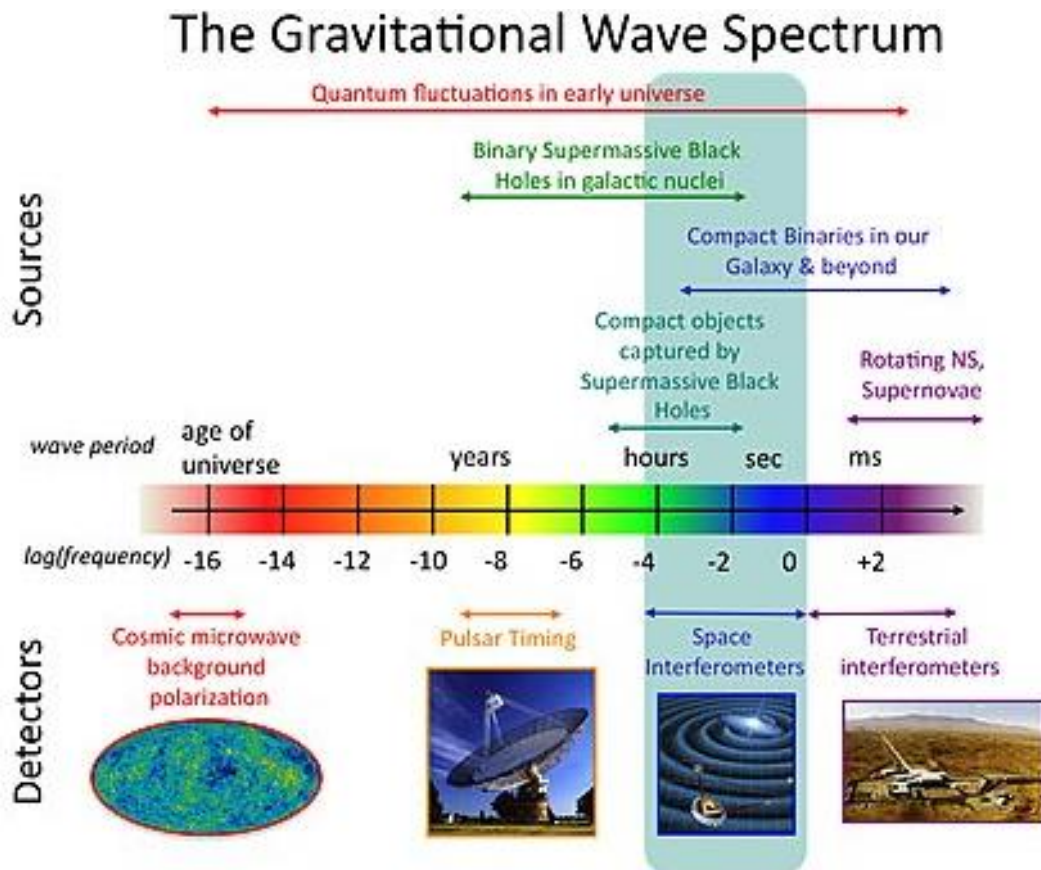
در سال ۱۹۱۵ آلبرت اینشتین، نظریه نسبیت عام را که بیان از رابطه میان هندسه فضا‌زمان با انرژی - تکانه دارد، ارائه نمود و در سال ۱۹۱۶، امواج گرانشی با سرعت نور را پیش‌بینی کرد. اثبات درستی این پیش‌بینی، به‌خاطر بسامد بسیار پائین این امواج و نبود ابزار لازم برای سنجش و اندازه‌گیری آنها، یک قرن به‌طول انجامید. در ۱۴ سپتامبر ۲۰۱۵ ساعت ۹ و ۵۰ دقیقه و ۴۵ ثانیه به وقت گرینویچ، امواج گرانشی (سیگنال GW150914) کشف شد و نتیجه پس از بررسی بافته‌ها به‌طور رسمی در ۱۱ فوریه ۲۰۱۶ اعلام گردید. امواج گرانشی کشف شده، حاصل از برخورد دو سیاه‌چاله با جرم‌هایی حدود ۲۹ و ۳۶ جرم خورشید بود. انرژی منتشر شده به فضا از این "تصادم" معادل سه برابر جرم خورشید، یعنی ۵۰ برابر کل انرژی الکترومغناطیسی منتشر شده از جهان قابل رؤیت بود. طنین این رخداد ۲۵ صدم ثانیه‌ای پس از حدود ۱/۴ میلیارد سال به زمین رسید. طول موج نوسان مشاهده شده برابر بود با یک هزارم قطر یک ذره پروتون. این کشف بزرگ، نه تنها صحنه بر پیش‌بینی یک قرن پیش آلبرت اینشتین گذاشت بلکه تحولی بزرگ در تاریخ علم کیهان‌شناسی بشمار می‌آید.

کشف امواج گرانشی در تاسیسات لایگو (LIGO Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)، رصدخانه موج گرانشی با تداخل سنج لیزری) و در دو مکان دور از هم - یکی در شرق و دیگری در غرب ایالات متحده امریکا - انجام شد. کشف این امواج به معنای گشودن پنجره‌ای تازه به کیهان و آغاز عصر جدید در تاریخ بشر است. به‌ویژه به این خاطر که امواج گرانشی امکان بررسی ۹۹ درصد کیهان را می‌دهد. در حالی که امواج الکترومغناطیسی بررسی تنها حدود ۵ درصد کیهان را امکان‌پذیر می‌کند.

"به‌نظر من آن‌چه به احتمال از این پس از طریق امواج گرانشی کشف خواهند شد بسیار متفاوت و شگفت‌انگیزتر از هر آن‌چه تاکنون یافته‌ایم خواهد بود. از این‌رو، لازم است خود را برای خدشه‌دار شدن چندمین باره‌ی "عقل سلیم" مان آماده کنیم."^{۱۰}

بنابر نظریه نسبیت عام، گرانش یک نیرو محسوب نمی‌شود، بلکه بیان از رابطه‌ی هندسه‌ی فضا‌زمان با انرژی - تکانه دارد. هرچه جرم و انرژی یک جسم بیشتر و فشرده‌تر باشد، به‌همان نسبت نیز انحنا‌ی فضا‌زمان اطراف آن بیشتر است.

باز بنابر نظریه نسبیت عام، شدت امواج گرانشی اخت‌فیزیکی، به‌معنای تغییرات موجی‌شکل فضا‌زمان حاصل از تداخل دو سیاه‌چاله و یا انفجار ابرستاره‌ها، تابع جرم‌های اجسام مربوطه است. تصویر ۲، طیف این نوع امواج گرانشی را نشان می‌دهد. طول موج این امواج، هم‌سو با مسافت‌های طی نموده، بیشتر و بسامدشان کمتر می‌شود. البته هم‌زمان، انبساط کیهان نیز به نوبه خود سبب افزایش طول موج آنها می‌گردد.



تصویر ۲: طیف امواج گرانشی، منابع و آشکارسازها^۱
 برای مثال: محدوده‌ی بسامد آرایه‌های زمان‌سنجی تباختر 10^{-10} تا 3×10^{-7} در ثانیه و طول موج 10^{15} تا 3×10^{18} متر!

مفهوم امواج گرانشی پس‌زمینه

در پیش‌گفتار گفتیم: امواج گرانشی پس‌زمینه به میدانی از امواج گرانشی بدون جهت مشخص در آسمان گفته می‌شود. و اضافه کردیم، این امواج گرانشی اولیه به‌صورت یک نوفه (Noise) پس‌زمینه، گسترده در سراسر گیتی، تصور می‌شود.

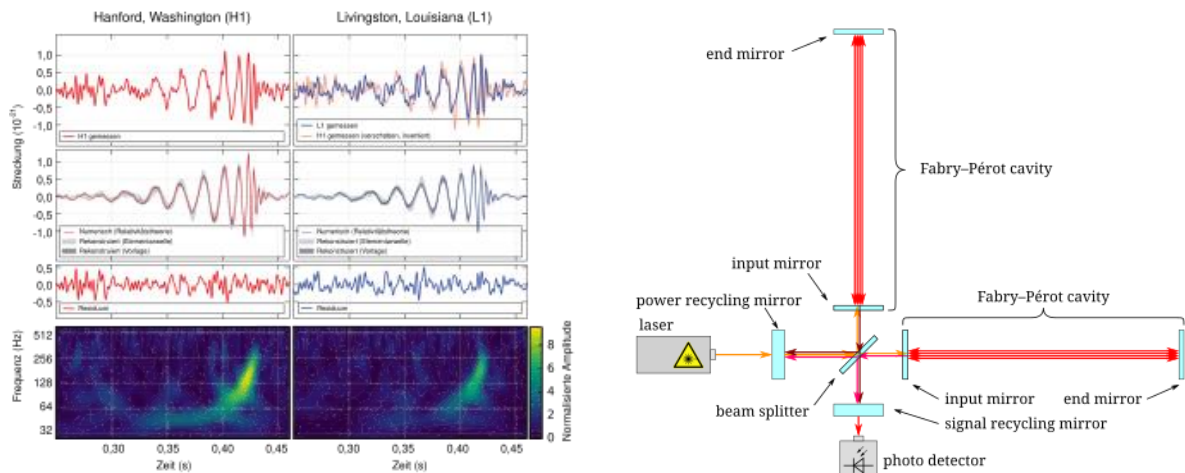
بررسی امواج گرانشی اولیه از جمله به این خاطر مورد توجه است که به احتمال اطلاعاتی را از منشاء کیهان دربردارد. اما، این امواج به دو دلیل تاکنون کشف نشده‌اند: ۱. برهم‌کنش آنها با ماده بسیار ضعیف است. ۲. بسامد آنها با گذشت زمان، در رابطه با انبساط کیهان، بسیار کاهش یافته است. با این همه، شاید بتوان این امواج را به‌عنوان مثال با سنجش تأثیراتشان بر قطبش تابش پس‌زمینه کیهانی، شناسایی کرد. بی‌شک در اینجا نیز، همچون در مورد ذره هیگز، تعیین محدوده‌ی کنونی امواج گرانشی اولیه برای جستجوی سیگنال‌های اوسیلون (Oscillons)، پدیده‌های موجی موضعی و طولانی‌زمان (از اهمیت بالایی برخوردار است. در عین حال، روشن است که سنجش و اندازه‌گیری چنان امواج خفیفی بسیار دشوار است. برای این منظور نیاز به آشکارسازهای نامتعارف در ابعاد کیهانی می‌باشد!

آشکارسازهای امواج گرانشی

۱. آشکارساز امواج گرانشی اخت‌فیزیکی

تصویر ۲ نشان می‌دهد که امواج گرانشی با بسامدهای کمتر از حدود ۱۰ هرتز (Hz) در سامانه لایگو (تصویر ۳) قابل اندازه‌گیری نیستند. علت این امر به حضور انواع اختلال‌های مکاتبکی و الکترومغناطیسی برمی‌گردد. به‌عنوان مثال، اندازه‌ی اختلال‌های ناشی از حرکت‌های زمین و یا نویزهای دستگاه‌های الکتریکی ثبت کننده، بیشتر از اندازه‌ی کمیت‌های

قابل سنجش و اندازه‌گیری هستند. اما، برای بسامدهای بزرگتر از طیف ذکر شده، سامانه‌ای مانند لایگو توان ردیابی امواج گرانشی اخت‌فیزیکی و اندازه‌گیری آنها را دارد. تصویر ۴ نتیجه‌ی نخستین شناسایی امواج گرانشی GW150914 توسط لایگو را نشان می‌دهد.



تصویر ۳: ساختار ساده شده از آشکارساز (تداخل سنج لیزری) لایگو^{۱۱} تصویر ۴: نخستین شناسایی امواج گرانشی GW150914 توسط لایگو^{۱۲}

امواج گرانشی کشف شده از نوع امواج گرانشی اخت‌فیزیکی هستند. این امواج برای زمان بسیار کوتاهی در رصدخانه قابل شناسایی می‌باشند. برای مثال، امواج گرانشی ناشی از برخورد دو سیاه‌چاله در فاصله‌ی حدود ۱/۴ میلیارد سال نوری از زمین که در سال ۲۰۱۵ توسط تداخل‌سنج لیزری تاسیسات لایگو (LIGO) ثبت گردید، تنها ۲۵ صدم ثانیه دوام داشت.

طرز کار این رصدخانه تقریباً مشابه سامانه‌ی آزمایش آلبرت مایکلسون و ادوارد مورلی در سال ۱۸۸۷ است. این دو توانستند از طریق سنجش تداخل نور نشان دهند که نظریه اتر صحت ندارد. یعنی، روشن شد که برای انتقال نور نیازی به اتر نیست. همچنین روشن شد که سرعت نور، مستقل از حرکت زمین، در همه جهات ثابت و یکسان است.

آشکارساز امواج گرانشی لایگو، همان‌گونه که تصویر ۳ نشان می‌دهد، از دو بازو که در حالت عادی هر یک طولی برابر با ۴ کیلومتر دارند و از یک ساعت اتمی بسیار دقیق و نور لیزر پُر قدرت بهره گرفته شده است. در صورت عبور امواج گرانشی از سامانه لایگو طول بازوها اندکی تغییر می‌کنند. به این علت که تأثیر امواج مربوطه بر هر یک از آن دو بازو متفاوت است. در نتیجه، نور لیزر نمی‌تواند طول‌های نابرابر را در زمان برابر طی نماید. طول نوسان مشاهده شده در تاسیسات لایگو در سال ۲۰۱۵ برابر بود با یک هزارم قطر یک ذره پروتون (قطر ذره پروتون 10^{-15} - 10^{-16} متر)! در مقایسه: یک تار موی انسان ده‌ها هزار بار ضخیم‌تر از قطر یک ذره پروتون است. در نتیجه، روشن است که اجرای یک چنان آزمایش دقیق و حساسی، لازم بود مسایل بسیاری در نظر گرفته و مشکلات و موانع فراوانی برطرف می‌شدند. اجرای این پروژه از سال ۱۹۹۲ شروع و تا دستیابی به نتیجه در سال ۲۰۱۵/۱۶ با صرف بودجه حدود ۶۰۰ میلیون دلار ممکن گردید. پژوهشگران این آزمایش سترگ، جایزه نوبل فیزیک سال ۲۰۱۷ را از آن خود کردند: ۳ فیزیکدان آمریکایی به اسامی بری سی. بریش Barry C. Barish متولد ۱۹۳۶، کیپ اس. تورن Kip S. Thorne متولد ۱۹۴۰ و راینر ویس Rainer Weiss (۱۹۳۲-۲۰۲۵). نام فامیلی راینر متولد برلین در زبان آلمانی واپس تلفظ می‌شود.

۲. آشکارساز امواج گرانشی اولیه

آشکارسازی امواج گرانشی اولیه با منشاء کیهانی موضوع پژوهش روز است. طول موج این امواج از زمان ایجاد آنها در ۱۳/۸ میلیارد سال پیش هم‌سو با انبساط کیهان گسترش یافته است. بی‌تردید، کشف این امواج، تحولاتی بزرگی را در دانش فلسفه، غم فیزیک و نگاه انسان به جهان هستی رقم خواهد زد. اما، در حال حاضر اجرای آن با مسایل و دشواری‌های فراوانی مواجه است و به آسانی امکان‌پذیر نیست. برای مثال، خواهان ابزاری در ابعاد کیهانی است. تصویر ۲، طیف امواج گرانشی اولیه، با طول موج‌های چند سال نوری تا ده‌ها سال نوری (10^{17} متر به بالا)، را نشان می‌دهد. تصور می‌شود که این امواج اکنون به‌صورت نوفه (Noise) پس‌زمینه در سراسر گیتی گسترده باشند.

برای کشف و سنجش امواج گرانشی اولیه از روش 'آرایه زمان‌سنجی تب‌اخترها' (Pulsar Timing Array) بهره‌مسته می‌شود. روشی که در آن از آشکارسازهایی در ابعاد کیهانی استفاده می‌شود (تصویر ۵):

"نتایج امیدوار کننده در راستای کشف امواج گرانشی اولیه را اخترشناسان در تابستان سال ۲۰۲۳ ارایه کردند. آنها در جستجوی نوفه (نویز) این امواج در کهکشان م از آرایه‌های زمان‌سنجی تباخترها استفاده کردند. آخرین داده‌های آرایه‌های زمان‌سنجی تباخترها، نشانه روشنی از وجود چنان نویزی دارند."^۱



تصویر ۵: آرایه زمان‌سنجی تباخترها (Pulsar Timing Array)

"آرایه زمان‌سنجی تباخترها (PTA)، یک زمان‌سنج (ساعت) کهکشان با دقت بسیار بالاست که در آن تپش (ضربان) یک هزارم ثانیه‌ای تباخترها یک ریتم منظم ایجاد می‌کنند. امواج گرانشی اولیه، این ریتم منظم را مختل می‌کنند و همین باعث ایجاد الگوی ویژه برای شناسایی آنها می‌شود (تصویر ۵)."^۱

خاستگاه‌های امواج گرانشی

۱. خاستگاه امواج گرانشی اخت‌فیزیکی
خاستگاه امواج گرانشی اخت‌فیزیکی، اجسام گوناگون آسمانی در سراسر کیهان هستند، مانند سیاهچاله‌های دوتایی و درهم‌آمیزی (ادغام) آنها، انفجار ابرستاره‌ها، حرکت شتابدار اجسام پُر جرمی مانند تباخترها، یعنی ستاره‌هایی پُر جرم با حرکت‌های دورانی نامتقارن.
رصدخانه‌هایی مانند لایگو توانسته‌اند تعدادی از تک رویدادهای امواج گرانشی ناشی از درهم‌آمیزی سیاهچاله‌ها در فاصله‌های میلیاردها سال نوری از زمین را شناسایی کنند. اما، تعداد زیادی از آنها تاکنون، به‌خاطر بسامد پایین، قابل شناسایی، تفکیک از هم و ثبت نیستند. با این حال، امواج گرانشی آنها نوعی نویز تصادفی در آشکارسازها ایجاد می‌کنند.

در لینک https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_wave، ویدیوی حدود یک دقیقه، می‌توان شکل‌گیری امواج گرانشی بر اثر نزدیک شدن و درهم‌آمیزی دو سیاه‌چاله با بسامد بیشینه (ماکسیموم) در حین "برخورد" را مشاهده کرد

۲. خاستگاه امواج گرانشی اولیه

همان‌گونه که پیشتر ذکر کردیم، تصور می‌شود که امواج گرانشی اولیه، نه چون امواج گرانشی اخت‌فیزیکی، در لحظات آغازین کیهان ایجاد شدند، یعنی منشاء کیهانی دارند. به عبارت دیگر، این امواج در دورانی به وجود آمدند که رویدادهای سرنوشت‌سازی برای کل توسعه‌ی آتی کیهان در جریان بود، مانند تورم کیهانی. از این‌رو، امواج گرانشی اولیه به‌طور بنیادی متفاوت از امواج گرانشی اخت‌فیزیکی هستند. به‌نظر، کشف این امواج و راستی آزمایی آنها با یاری شواهدی از تاریخ کیهان، می‌تواند در کسب اطلاع از شرایط اولیه پیدایش کیهان راهگشا باشد.

طول موج امواج گرانشی اولیه از زمان شکل‌گیری تا حال حاضر، یعنی در طول نزدیک به ۱۴ میلیارد سال گذشته، بر اثر انبساط کیهان، مدام افزایش (بسامدشان کاهش) یافته است. این وضعیت، کشف آنها را سخت دشوار می‌کند. به این معنا که خواهان آشکارسازهایی نامنعارف در ابعاد کیهانی، توضیح داده شده در بالا، است.

یکی دیگر از راه‌های قابل تصور برای کشف و سنجش امواج گرانشی اولیه، ردیابی این امواج در تابش پس‌زمینه کیهانی از طریق بررسی اثرات این امواج بر قطبش تابش پس‌زمینه کیهانی است.

امواج گرانشی اخت‌فیزیکی و فضا‌زمان

بنابر نظریه نسبیت عام، گرانش بیان از رابطه‌ی بین انرژی - تکانه و هندسه‌ی فضا‌زمان دارد. این رابطه، بافت فضا‌زمان را متناسب با جرم و حرکت اجسام آسمانی، مانند حرکت تب‌اخترها، چرخش نامتقارن اجسام پُر جرم، برخورد ستاره‌های نوترونی و یا تداخل سیاه‌چاله‌ها تغییر می‌دهند. تغییرات ساختار فضا‌زمان در شکل موج‌هایی به نام امواج گرانشی نمایان می‌شوند. این امواج با سرعت نور انتشار می‌یابند. لازم به تاکید است که امواج گرانشی اخت‌فیزیکی، امواجی مانند امواج الکترومغناطیسی نیستند که در فضا‌زمان موجود منتشر شوند، بلکه تغییرات هندسه‌ی خود فضا‌زمان، در شکل کشیده و فشرده شدن، می‌یابند.

گفتیم که بسامد امواج گرانشی هم‌سو با مسافت‌های طی نموده کاهش می‌یابد. به همین جهت، آشکارسازی امواج گرانشی، ایجاد شد، به عنوان مثال از تداخل دو سیاه‌چاله در فاصله ۱/۴ میلیارد سال نوری از زمین، در رصدخانه لایگو در سال ۲۰۱۵/۱۶ بدون ابزار لازم از جمله و به‌ویژه نور لیزر قوی و زمان‌سنج دقیق اتمی، عملی نبود. ابزاری که یک قرن پیشتر، یعنی زمانی که اینشتین در سال ۱۹۱۶ امواج گرانشی را پیش‌بینی کرد، نه وجود داشتند و نه اجرای آن قابل تصور بود. ناگفته نماند که رصد امواج گرانشی اخت‌فیزیکی بیان از آبرسیال^{۱۲} بودن فضا‌زمان نیز دارد.

امواج گرانشی اولیه و فضا‌زمان

با توجه به آن‌چه پیش‌تر در باره‌ی امواج گرانشی اولیه گفتیم، می‌دانیم که طول موج این امواج از همان زمان پیدایش کیهان هم‌سو با انبساط کیهان گسترش و بسامدشان کاهش یافته است. تصور می‌شود این امواج اکنون به صورت یک نوفه (Noise) پس‌زمینه، گسترده در سراسر گیتی، حضور دارند. کشف این پس‌زمینه به معنای گشودن پنجره‌ای برای درک از شرایط و مسائل لحظات آغازین کیهان و همچنین بافت فضا‌زمان و نوسانات ریز "اتم‌های فضا‌زمان" می‌باشد. اما، کشف امواج گرانشی اولیه به دلیل طول موج‌های بسیار بزرگشان (با بسامد بسیار اندک) سخت دشوار است، به مراتب دشوارتر از امواج گرانشی اخت‌فیزیکی. با این حال، خارج از تصور نیست که امواج گرانشی اولیه ردیابی از خود در قطبش تابش پس‌زمینه کیهانی گذاشته باشند. از این‌رو، جستجو در این حوزه یکی از امکانات دیگر است که می‌تواند به کشف امواج گرانشی اولیه منجر شود.

جمع‌بندی

انسان از دیرباز تا اوایل قرن حاضر تنها یک امکان و یک شیوه را برای کسب اطلاع از رویدادهای کیهانی می‌شناخت. و آن استفاده از امواج الکترومغناطیسی بود. اما، این امواج در بهترین حالت امکان شناسایی کمتر از ۵ درصد کیهان را می‌دهند. با کشف امواج گرانشی اخت‌فیزیکی در سال ۲۰۱۵ روش جدیدی شکل گرفته است که می‌توان توسط آن تا ۹۹ درصد کیهان را شناسایی کرد! در امکان اول، از شیوه به اصطلاح "بینایی"، مانند مشاهده‌ی اجسام آسمانی^۹، اما در امکان دوم از روش به اصطلاح "شنیداری"، مانند "شنیدن صدای" تداخل سیاه‌چاله‌ها بهره‌مسته می‌شود. از زمان کشف

اولین امواج گرانشی اخت‌ر‌ف‌ی‌ز‌ی‌ک‌ی، در نتیجه‌ی تداخل دو سیاه‌چاله‌ی ذکر شده در بالا، تاکنون صدها رویداد مشابه کشف شدند. در حال حاضر کشف این نوع رویدادها به امری سراسر (کاملاً) طبیعی و روزمره تبدیل شده است. به این معنا که از این پس کشف هرچه بیشتر چنان رویدادهایی و همچنین رویدادهایی مانند تصادم ستاره‌های نوترونی و یا حرکت هر ابژکت کیهانی پُر‌جرم شتابدار نامتقارن دیگری که فضازمان را متأثر از حرکت خود می‌کند، قابل تصور است. در حال حاضر موضوع پژوهش روز، جستجو و کشف امواج گرانشی اولیه با منشاء کیهانی است. این امواج می‌توانند حاوی اطلاعاتی از جمله در باره‌ی شرایط اولیه پیدایش کیهان باشند. کشف امواج گرانشی اولیه می‌تواند همچنین به فهم بهتر ما در باره‌ی بافت فضازمان و درک درست از ساختار فضا در مقیاس پلانک^۷، جایی که صحبت از خلاء کوانتومی^{۱۴} است، یاری رساند. با آگاهی به این امر که خلاء کوانتومی و یا "هیچ" کوانتومی به‌معنای "هیچ" (عدم) فلسفی نیست. چراکه خلاء کوانتومی به‌معنای یک حالت کوانتومی با کمترین انرژی ممکن می‌باشد.

مراجع

0. <https://www.sciencedaily.com/images/1920/stages-of-universe-evolution-and-stochastic-gravitational-waves.webp>
1. Kai Schmitz, Rauschende Raumzeit, In: Physik Journal 7, DPG, Juli 2025, 24. Jahrgang
2. Hassan Bolouri, Classical cosmology
۲. حسن بلوری، 'کیهان‌شناسی کلاسیک'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه مارچ سال ۲۰۲۳
3. Hassan Bolouri, Classical spacetime
۳. حسن بلوری، 'فضازمان کلاسیک'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه اکتبر سال ۲۰۲۵
4. Hassan Bolouri, The mystery of spacetime, relativity and quantum
۴. حسن بلوری، 'معمای فضازمان، نسبیت و کوانتوم'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه ژوئن سال ۲۰۲۵
5. Hassan Bolouri, The limitations of our knowledge of spacetime
۵. حسن بلوری، 'محدودیت‌های شناخت فضازمان'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه اوت سال ۲۰۲۵
6. Hassan Bolouri, Quantum spacetime
۶. حسن بلوری، 'فضازمان کوانتومی'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه دسامبر سال ۲۰۲۵
7. Hassan Bolouri, Quantum gravity
۷. حسن بلوری، 'گرانش کوانتومی'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه می سال ۲۰۲۳
8. Hassan Bolouri, Quantum Cosmos: The Origin of the Universe
۸. حسن بلوری، 'کیهان کوانتومی - منشاء هستی'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه ژوئیه سال ۲۰۲۳
9. Hassan Bolouri, The limits of sensory perception
۹. حسن بلوری، 'مرزهای ادراک حسی در شناخت بی‌واسطه'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه نوامبر سال ۲۰۲۰
10. <https://science.gsfc.nasa.gov/663/research/>
- 11 <https://de.wikipedia.org/wiki/LIGO>.
12. https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_wave
13. Hassan Bolouri, Superfluid Spacetime
۱۳. حسن بلوری، 'فضازمان ابرسیال'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه می سال ۲۰۲۱
14. Hassan Bolouri, Vacuum and its structure – a discussion about “Nothing”
۱۴. حسن بلوری، 'خلاء و ساختار آن - بحثی در باره‌ی "هیچ"'، منتشر شده در سایت‌های پارسی‌زبان، ماه آوریل سال ۲۰۲۳