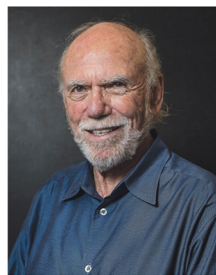


## وایس، بریش، و تورن مشترکاً جایزه نوبل فیزیک سال ۲۰۱۷ را دریافت کردند\*

بزرگداشت سه معمار لایگو برای تلاش موفقشان در آشکارکردن امواج گرانشی



بری بریش



کیپ تورن



راینر وایس

حاصل از سه برخورد دیگر سیاه‌چاله‌ها و برخورد دو ستاره نوترونی را آشکار کرده است. در دو مورد اخیر رصدخانه ویرگو (Virgo) نیز سهم داشته است.

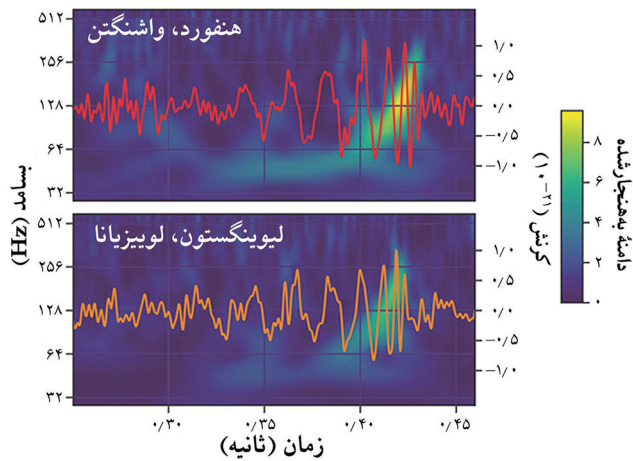
این دومین باری است که فرهنگستان علوم سوئد جایزه نوبل فیزیک را به موضوعی مربوط به امواج گرانشی اختصاص داده است. در سال ۱۹۹۳ جایزه نوبل فیزیک به جوزف تیلور و راسل هالس داده شد، چون توانسته بودند بر اساس نسبیت عام، زوال مدار سیستم دوتایی تپاخترها به علت گسیل انرژی گرانشی را توضیح دهند.

جایزه نوبل سال ۲۰۱۷ تنها برای این نیست که پیش‌بینی صد سال پیش آلبرت اینشتین در باره گسیل امواج گرانشی را تأیید کرده بلکه بیشتر به این دلیل است که زمینه پژوهشی نوینی در علم نجوم به وجود آمده است: شواهد آشکارگرهای لایگو و ویرگو، در باره انفجارهای ناگهانی پرتوگاما، قطبش امواج گرانشی، و سیاه‌چاله‌هایی که جرمی در حد و اندازه‌های ستاره‌ها دارند، اطلاعات زیادی در اختیار فیزیکدان‌ها قرار داده است و انتظار می‌رود که با اکتشافات آینده لایگو، ویرگو، و جانشین‌های آنها در زمین و فضا، به درکی عمیق‌تر در باره تحول کیهان، ابرنواخترها و دیگر پدیده‌های کیهانی که برخی را نمی‌توان با تلسکوپ‌های اپتیکی بررسی کرد، دست یافت.

در ۳ اکتبر ۲۰۱۷، فرهنگستان سلطنتی علوم سوئد اعلام کرد که «به خاطر سهمی تعیین‌کننده در ساخت آشکارگر لایگو (LIGO) و مشاهده امواج گرانشی»، جایزه نوبل فیزیک در سال ۲۰۱۷ به راینر وایس از ام‌آی‌تی، و بری بریش و کیپ تورن از کلتک داده می‌شود. وایس نیمی از جایزه ۹ میلیونی کرونی (حدوداً ۱/۱ میلیون دلار آمریکا) را دریافت می‌کند و نیم دیگر را بریش و تورن با هم نصف می‌کنند. وایس و تورن همراه با رونالد درور (Ronald Drever) فقید، رصدخانه تداخل‌سنج لیزری امواج گرانشی (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) را بنیاد نهادند. این رصدخانه، دو تداخل‌سنج مایکلسون به شکل L است: یکی در لیوینگستون لوئیزیانا، و دیگری در هنفورد واشنگتن. بریش در سال ۱۹۹۴ مدیر لایگو شد و توانست گروه‌های همکار را هدایت کند تا بتوانند موانع پرشمار مراحل مختلف برنامه‌ریزی و عملی‌کردن پروژه‌ای علمی در مقیاس عظیم را که در نهایت می‌تواند بسیار پرحاصل باشد، پشت سر بگذارند.

در ۱۴ سپتامبر ۲۰۱۵، نزدیک به نیم قرن پس از طراحی اولیه و اساسی وایس، لایگو نخستین شاهد مستقیم امواج گرانشی را آشکار کرد. این امواج را زوج سیاه‌چاله‌هایی در فاصله ۱/۳ میلیارد سال نوری در حال یکی‌شدن گسیل کرده بودند. از آن زمان، رصدخانه امواج

## آشکار کردن موج‌های فضا زمان



شکل ۱. ارتعاش برخاسته از موج گرانشی حاصل از یکی شدن دو سیاه‌چاله در فاصله ۱٫۳ میلیارد سال نوری را دو آشکارگر LIGO در ۱۴ سپتامبر ۲۰۱۵ ضبط کردند. نمودار کرنش را نشان می‌دهد؛ رنگ‌های پس‌زمینه نماینده شدت سیگنال در بسامدهای مختلف است [با تشکر از آزمایشگاه Caltech/MIT/LIGO]. [عکس رنگی داخل پشت جلد همین شماره]

اجرام مختلف اخترفیزیکی داشت [۳]. کارهای درِور در باره افزایش حساسیت تداخل‌سنج‌های امواج گرانشی نظر تورن را جلب کرد. درِور در دانشگاه گلاسگو در اسکاتلند بود و تورن از او دعوت کرد که به کلتک بیاید. درِور در کلتک کار روی پیش‌نمونه چهل‌متری آشکارگر را آغاز کرد. در اوائل دهه ۱۹۸۰، بنیاد ملی علوم، هم بودجه تداخل‌سنج درِور را تأمین می‌کرد و هم بودجه پیش‌نمونه ۱/۵ متری وایس در ام‌آی‌تی را. مدتی نگذشت که این اداره از طراحی و ساخت پروژه بزرگ‌تر لایگو تحت نظر کلتک و ام‌آی‌تی پشتیبانی کرد؛ کنگره بودجه ساخت‌وساز این پروژه را در سال ۱۹۹۲ تصویب کرد.

مسیر رسیدن به کشف بزرگ پر از چالش‌های تدارکاتی و فنی و تضاد شخصیت‌ها بود. در سال ۱۹۹۴ بریش، که قرار بود ساخت یکی از آشکارگرهای پروژه اخیراً لغوشده ابربرخورددهنده ابرسانا (SSC) را رهبری کند، به استخدام پروژه لایگو درآمد و طولی نکشید که تأثیر حیاتی این واقعه در ثبات این پروژه آشکار شد. پیترو ساؤلسون از دانشگاه سیراکیوز که از زمان کار پسادکتری در سال ۱۹۸۱ با وایس در ام‌آی‌تی درگیر پروژه لایگو بوده است، می‌گوید: «بدون بریش پروژه قطعاً شکست می‌خورد».

بریش رهبری پروژه را در آخرین مراحل طراحی بر عهده داشت و بنیاد ملی علوم را متقاعد کرد پول بیشتر به پروژه‌ای اختصاص دهد که در همان زمان هم بیشترین بودجه مختص یک پروژه را از این اداره دریافت می‌کرد. بریش گروه‌های علمی همکار در پروژه لایگو (LIGO Scientific Collaboration) را نیز به‌وجود آورد که جمع

اینشتین در سال ۱۹۱۶، چند ماه پس از آنکه معادلات میدان گرانش را در برلن ارائه کرد، مفهوم نوسانات تانسور فضا زمان را به میان آورد [۱]. هر شیء پرجرمی که شتاب بگیرد چنین امواجی را گسیل می‌کند. برخلاف موج الکترومغناطیسی که دوقطبی است و انتشارش در فضا زمان بر فضا زمان اثری نمی‌گذارد، موج گرانشی انتشار اختلال چارقطبی فضا زمان است. این اختلال به‌صورت کش‌آمدن فضا در یک جهت و فشرده‌شدن آن در جهت عمود بر جهت اول است. با آنکه دامنه موج گرانشی متناسب با فاصله از چشمه موج کاهش می‌یابد، و از این نظر مانند موج الکترومغناطیسی است، ضعف نسبی گرانش آشکار کردن موج گرانشی را بسیار مشکل‌تر می‌کند، حتی وقتی چشمه موج از پرجرم‌ترین اشیاء عالم باشد.

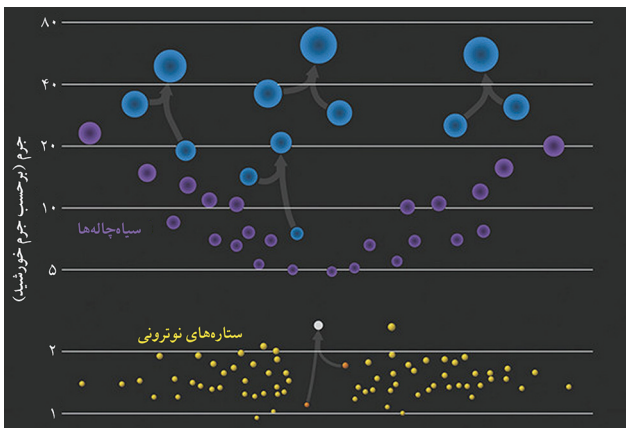
تا دهه ۱۹۵۰ میلادی، امواج گرانشی نوعی پدیده شگفت‌انگیز و غریب نظری پنداشته می‌شد تا اینکه جوزف وبر، فیزیکدان دانشگاه مرلیند، عزم کرد استوانه‌هایی آلومینیومی بسازد که با گذر امواج گرانشی با بسامد تشدید مشخص استوانه به نوسان در بیایند. او در سال ۱۹۶۹ ادعا کرد که چنین نوسان‌هایی را مشاهده کرده است اما تلاش برای بازسازی و تکرار نتایج آزمایش ناموفق بود.

در سال ۱۹۶۷، وایس رهیافت دیگری برای آشکار کردن امواج گرانشی ابداع کرد. وقتی مطالب درس نسبیتی را آماده می‌کرد که تدریسش در دانشگاه ام‌آی‌تی بر عهده او گذاشته شده بود، انعکاس مکرر باریکه‌های نور بین آینه‌هایی را به تصور در آورد که در آرایشی مثل حرف L قرار گرفته باشند. گذر موج گرانشی طول نسبی دو مسیر عمود بر هم را موقتاً تغییر می‌دهد و شاید منجر به اختلافی قابل اندازه‌گیری بین زمان رفت و برگشت دو باریکه شود. این روش می‌توانست بالقوه بسیار دقیق‌تر از روش وبر باشد و اندازه‌گیری گستره پهناتری از بسامدهای امواج گرانشی را ممکن کند.

## چالش علم در مقیاس بزرگ

اما وایس مجبور شد بخشی از تلاش‌های خود را بر شالوده‌ریزی برنامه علمی کاوشگر پس‌زمینه کیهانی برای اندازه‌گیری تابش میکروموجی پس‌زمینه کیهان متمرکز کند و بلافاصله در پی عملی کردن ایده تداخل‌سنج خود برنیامد و تنها در باره اندازه ایده‌آل چنین ابزاری و انواع عوامل زاینده نوفه، از جمله لرزش زمین و عوامل گرمایی و تابشی که برای این ابزار مشکل می‌آفرینند گزارشی در سال ۱۹۷۲ منتشر کرد [۲].

در این بین، تورن که فیزیکدان نظری بود پی‌درپی مقاله‌هایی در این باره منتشر می‌کرد که باید انتظار گسیل چه نوع امواج گرانشی از



شکل ۲. سیاه‌یه روبه‌رشد: رصدخانه‌های موج گرانشی اجرامی را کشف می‌کنند که با تلسکوپ‌های معمولی مشکل می‌توان دید، از جمله سیاه‌چاله‌هایی که در شکل با رنگ آبی نمایش داده شده‌اند (پیکان‌ها نماینده برخورد و ترکیب سیاه‌چاله‌هاست) و پرچم‌تر از جمعیت سیاه‌چاله‌های شناخته‌شده (به رنگ بنفش) هستند که جرمی در حد و اندازه ستاره‌ها دارند. رصد اخیر برخورد و یکی‌شدن دو ستاره نوترونی (وسط شکل و پایین) بر خواص این اجرام که اندازه‌شان در حد شهرهای زمینی است قید می‌گذارد (ستاره‌های نوترونی پیش‌تر کشف‌شده در شکل با رنگ زرد نمایش داده شده است) [با تشکر از آزمایشگاه Caltech/MIT/LIGO]. [عکس رنگی داخل پشت جلد همین شماره]

دو سیاه‌چاله با جرم‌های ۳۶ و ۲۹ برابر جرم خورشید ثبت شد نزدیک بود که وایس آشکارگر لیوینگستون را برای برخی تعمیرات جزئی موقتاً تعطیل کند. همان‌طور که شکل ۱ نشان می‌دهد کرنشی که باریک‌ها ثبت کردند از مرتبه  $10^{-21}$  و معادل با اختلافی برابر با شعاع پروتون در ۱۰۰۰ کیلومتر مسیری است که باریک‌ها طی کرده بودند. در ۰/۲ ثانیه بسامد سیگنال از ۳۵ هرتز به ۱۵۰ هرتز رسید که نشان می‌داد سیاه‌چاله‌ها پیش از ترکیب و یکی‌شدن ۷۵ بار در ثانیه یکدیگر را دور می‌زدند. پژوهشگران نتایج را با شبیه‌سازی عددی نسبیتی مقایسه کردند و دریافتند که نتیجه نهایی ترکیب دو سیاه‌چاله با سیاه‌چاله‌ای قابل توصیف با اسپین و جرم، سازگار است [۵].

از آن زمان تا کنون، لایگو همان‌طور که شکل ۲ نشان می‌دهد، چهار برخورد دیگر را ثبت کرده است. در ۱۷ اوت ۲۰۱۷ لایگو و ویرگو برخورد دو ستاره نوترونی را آشکار کردند. این کشف جست‌وجویی جهانی برای یافتن و ردگیری انفجار پرتوهای گاما و کیلونوایی را در پی داشت که هزاران برابر جرم زمین، عناصر سنگین‌تر از آهن تولید کرده است. فراتر از کاوش اجرام آسمانی منفرد و برخورد این اجرام، ترکیب رصد امواج گرانشی و نجوم الکترومغناطیسی می‌تواند دانش عمیق‌تری در باره رازهایی مانند سازوکار شکل‌گیری سیاه‌چاله، معادله حالت ستاره نوترونی، و آهنگ انبساط جهان به دست دهد.

پژوهشگران بیرونی است و اکنون بیش از هزار دانشگر از سرتاسر جهان را در بر می‌گیرد.

جستجوی لایگو در سال ۲۰۰۲ با دوره کار چندساله‌ای آغاز شد که هدفش اثبات عملی بودن فناوری به‌کاررفته بود. انتظار نمی‌رفت که پروژه در این مرحله به کشفی ناآل آید و هر کشفی پاداش اضافی به حساب می‌آمد. ایده اصلی به‌کارگرفتن درس‌های دوره اول برای بهتر کردن ابزارها بود تا بخت آشکار کردن امواج گرانشی در دوره کاری «پیشرفته» دوم هر چه بیشتر شود.

هر کدام از دو آشکارگر که در فاصله ۳۰۰۰ کیلومتر از یکدیگر قرار دارند، نسخه تقویت‌شده ایده اولیه وایس است با ویژگی‌هایی اضافی که درور طراحی کرده و ساخته بود. در هر آشکارگر، لیزر حالت جامد نوری گسیل می‌کند که در شکافنده (splitter) به دو باریکه یکسان در دو بازوی ۴ کیلومتری تبدیل می‌شود. هر بازو یک زوج آینه دارد که باریکه مجبور به صدها بار رفت و بازگشت بین آنهاست و نوفه، برخاسته از پراکندگی نور به این ترتیب به حداقل می‌رسد.

زمانی که دو باریکه در شکافنده بازترکیب شوند هر کدام بیش از هزار کیلومتر را طی کرده است. اگر هیچ اختلالی وجود نداشته باشد، دو باریکه یکدیگر را خنثی می‌کنند و نور آشکارگر (آشکارگر نور) در تاریکی می‌ماند اما وقتی موج گرانشی از راه می‌رسد یکی از بازوها کمی از بازوی دیگر بلندتر می‌شود و با گذر موج بازوی دیگر بلندتر می‌شود. لایگو به‌ویژه به تابش گرانشی در گستره ۲۰ تا ۲۰۰۰ هرتز حساس است که معمول‌ترین بسامدها در برخی از برخوردهای بین سیاه‌چاله‌ها و ستاره‌های نوترونی است.

همان‌طور که انتظار می‌رفت وقتی دوره اول کار در ۲۰۱۰ به پایان رسید هیچ موج گرانشی آشکار نشده بود و به پنج سال زمان نیاز بود تا آشکارگرها برای کار موفقیت‌آمیز آماده شود [۴]. تیم لایگو توان لیزر را از ۱۰ وات به ۲۰۰ وات افزایش داد و طرح درور برای افزودن آینه‌ای که سیگنال را در بسامدهای خاص تقویت می‌کند اجرا کرد. مهندسان به جای آینه‌های ۱۱ کیلوگرمی در کاواک‌های اپتیکی، آینه‌های ۴۰ کیلوگرمی گذاشتند تا نوفه گرمایی کاهش یابد و با آویختن آینه‌ها از سیستم آونگی پیچیده آنها را ثابت نگه داشتند. سیستم منفردکننده، به شکل پیوسته، لرزش‌های محیطی ناشی از فعالیت‌های زمین‌شناختی و گذار لحظه‌ای کامیون‌های ۱۸ چرخ را خنثی می‌کند.

## موفقیت کامل

در اواخر تابستان ۲۰۱۵، لایگوی بهترشده و پیشرفته، دوره آزمایش‌های مهندسی خود را آغاز کرد. در روزی که ارتعاشات برخاسته از ترکیب

## مراجع

1. **A. Einstein**, *Sitzungsber. K. Preuss. Akad. Wiss.*, (Jan.–June 1916), 688.
2. **R. Weiss**, in *Quarterly Progress Report*, no. **105**, MIT Research Laboratory of Electronics (1972), 54.
3. **W.H. Press, K.S. Thorne**, *Annu. Rev. Astron. Astrophys* **10**, 335 (1972).
4. **J. Aasi et al.** (LIGO Scientific Collaboration), *Class. Quantum Grav.* **32** 074001 (2015).
5. **B. P. Abbott et al.** (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **116** 061102 (2016).

## ترجمه نادر حیدری

(ویراستار مجری پیشین مجله فیزیک مرکز نشر دانشگاهی)

- **Andrew Grant, Weiss, Barish, and Thorn Share 2017 Nobel Prize in Physics**, *Physics Today* **70** (12-16 Dec. 2017), 16-18.

موفقیت لایگو نه تنها زمینه پژوهشی جدیدی را به وجود آورده است بلکه باعث حمایت بیشتر از پروژه‌هایی دیگر برای آینده شده است. یک هفته پس از اعلام اولین کشف لایگو، هندوستان رسماً ساخت آشکارگری را که باید تا سال ۲۰۲۴ تکمیل شود تصویب کرد. لایگوی هندوستان به کاگرا (KAGRA)، تداخل‌سنج زیرزمینی ژاپن خواهد پیوست که انتظار می‌رود در سال ۲۰۱۹ به کار بیفتد. و در ماه ژوئن، سه ماه و نیم پس از مرگ درِور، آژانس فضایی اروپا اعلام کرد که یکی از مأموریت‌های فضایی این آژانس پروژه لیزا (LISA) خواهد بود: تداخل‌سنجی که در اواسط دهه ۲۰۳۰ به فضا پرتاب و در فضا مستقر خواهد شد.

در این بین لایگو و ویرگو همچنان دور دیگری از تغییرات برای افزایش حساسیت را از سر می‌گذرانند. وقتی در پاییز ۲۰۱۸ این رصدخانه‌ها دوباره به کار بیفتند باید بتوانند برخورد اجرامی آسمانی با جرم‌های در حد و اندازه ستاره‌ها را در فواصلی دو برابر فواصل قبل آشکار کنند. به این ترتیب حجم فضایی که رصد می‌شود و در نتیجه تعداد رخدادهایی که آشکار می‌شود هشت برابر خواهد شد.