# مرزهای فیزیک
## تازه‌ترین اخبار پژوهشی
منیژه رهبر

### پلاسمونیک فناوری‌های مبتنی بر نور را متحول می‌سازد

هنرمندان قرن‌ها برای ساخت شیشه‌های رنگین جهت تزیین ساختمان‌ها گرد نقره و طلا را با شیشه مخلوط می‌کردند. نتیجهٔ این کار تحسین‌برانگیز بود، اما آن‌ها دلیل علمی اینکه چگونه این ترکیبات شیشهٔ رنگی به‌وجود می‌آورد را نمی‌دانستند. در اوایل قرن بیستم، گوستاو می[1] فیزیک‌دان متوجه شد که رنگ یک نانو ذرهٔ فلزی به اندازه و ویژگی‌های اپتیکی فلز و مواد مجاور آن بستگی دارد.

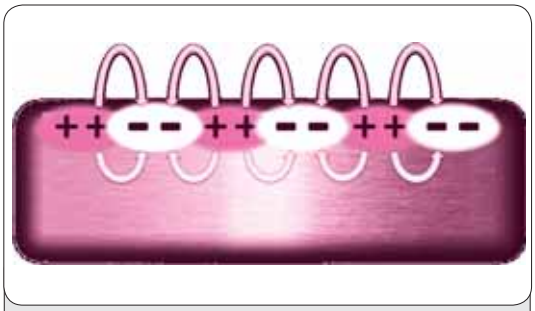
پژوهشگران فقط اخیراً موفق به درک قطعهٔ گمشدهٔ این معما شده‌اند. بدون شک شیشه‌گران قرون وسطایی از درک اینکه در واقع چیزی را به‌کار می‌گرفتند که دانشمندان امروزی **پلاسمونیک** می‌نامند شگفت‌زده می‌شدند. پلاسمونیک زمینهٔ جدیدی مبتنی بر نوسان‌های الکترون موسوم به پلاسمون است.

### متمرکز کردن نور

پلاسمونیک نشان می‌دهد که چگونه می‌توان نور را در سطوح فلزی یا در لایه‌های فلزی به ضخامت نانومتر هدایت کرد. کار آن بر این مبناست که بلورهای فلز دارای ساختار شبکهٔ بسیار سازمان‌یافته‌اند. شبکه حاوی الکترون‌های آزادی است که وابستگی شدید به اتم‌های فلز ندارند و با نوری که به آن‌ها برخورد کند برهم‌کنش می‌کنند.

این الکترون‌های آزاد دسته‌جمعی نسبت به هسته‌های دارای بار مثبت ثابت در شبکه شروع به نوسان می‌کنند. چگالی الکترون در شبکه فلز، مثل چگالی هوا در یک موج صوتی، به‌صورت یک موج پلاسمون افت‌وخیز پیدا می‌کند.

بنابراین نور مرئی را که دارای طول موج تقریباً نیم میکرومتر است می‌توان با ضریب ۱۰۰ طولی متمرکز کرد که در لایه‌های فلزی به ضخامت فقط چند نانومتر (nm) حرکت کنند. این مقدار ۱۰۰۰ بار کوچک‌تر از موی انسان است. حالت موجی جدید آمیزهٔ نور ـ الکترون برهم‌کنش‌های شدید نور ـ ماده با ویژگی‌های اپتیکی بی‌سابقه را امکان‌پذیر می‌سازد.

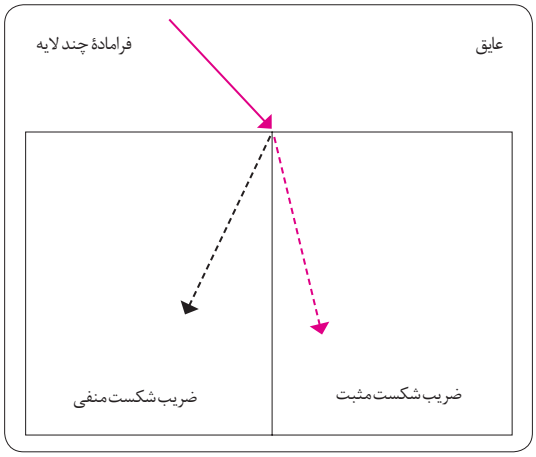


▲ طرح سادهٔ نوسان‌های الکترون (پلاسمون‌ها) در فصل مشترک فلز/هوا. ابرهای تیره و روشن به ترتیب نواحی با تراکم الکترون کمتر و بیشتر را نشان می‌دهد. پیکان‌ها نشانگر خط‌های میدان الکتریکی در داخل و خارج فلزند.

### پلاسمون‌ها چه می‌توانند بکنند؟

پلاسمون‌ها می‌توانند روش انتقال داده‌ها در مدارهای مجتمع الکترونیکی رایانه‌ها و تلفن‌های هوشمند را متحول سازند. انتقال داده‌ها در مدارهای مجتمع کنونی از طریق جریان الکترون در سیم‌های فلزی صورت می‌گیرد. در پلاسمونیک، این کار ناشی از حرکت نوسانی حول هسته‌های مثبت است. بنابراین انتقال داده با فناوری قدیمی زمان بسیار بیشتر لازم دارد. چون انتقال دادهٔ پلاسمونیک با امواج نورگونه و نه با جریان الکترون‌ها (جریان الکتریکی) در سیم‌های فلزی متداول صورت می‌گیرد، این کار بسیار سریع (با سرعت نزدیک به سرعت نور) ـ مانند فناوری‌های فیبر نوری کنونی ـ صورت می‌گیرد. اما لایه‌های فلزی پلاسمونیک بیش از ۱۰۰ بار از فیبرهای شیشه‌ای نازک‌ترند. این می‌تواند به فناوری‌های اطلاعات سریع‌تر، نازک‌تر و سبک‌تر بینجامد.

پلاسمون‌های سطح به ماده مجاور لایهٔ فلزی بسیار حساس‌اند. وجود مقدار بسیار کم اتم‌ها، مولکول‌ها یا باکتری‌های وابسته به سطح فلز می‌تواند ویژگی پلاسمون‌های آن را تغییر دهد. از این ویژگی می‌توان در پی بردن زیست‌شناختی و شیمیایی مقادیر اندک مواد ـ مثلاً بررسی آلودگی آب ـ استفاده کرد.




جهت نور هنگام ورود به عایق شفاف با ضریب شکست مثبت یا فرامادهٔ با ضریب شکست منفی تغییر می‌کند.

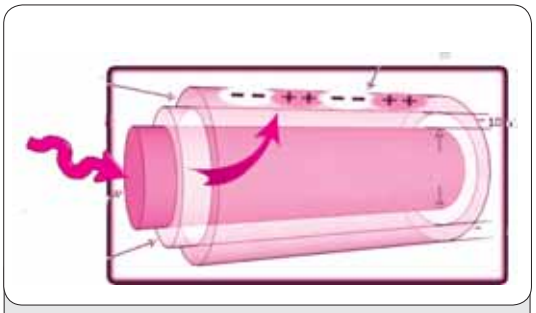
چند لایه‌های نانوساختار پلاسمونیک فلز/عایق که به خوبی طراحی شده باشند فراموادِ مصنوعی را تشکیل می‌دهند. فراموادِ برخلاف مواد موجود در طبیعت دارای ضریب‌شکست منفی

هســـتند. این معیاری از چگونگی تغییر جهت نور هنگام ورود به عایق شـــفاف است. عایق‌ها، از جمله شیشه، دارای ضریب‌شکست مثبت‌اند؛ نور هنگام ورود به آن‌ها به امتداد عمود بر ســـطح عایق نزدیک می‌شود.

فراماده‌هـــای چندلایه برخلاف آن نور را در جهت «مخالف» خم می‌کنند. از این ویژگی جالب می‌توان برای پنهان کردن اجسام با پوشاندن آن‌ها در پوششی از فراماواد استفاده کرد. این ورقه به‌جای بازتاب نور آن را به آرامی در اطراف جسم هدایت می‌کند. به‌صورت تقریباً باورنکردنی، جسم پوشانده‌شده نامرئی می‌شود.

ســـایر کاربردهای آن شامل اَبَرعدسی‌های اپتیکی با توان تفکیک بسیار بیشتر از میکروســـکوپ‌های اپتیکی معمولی است. آن‌ها این امکان را در اختیار دانشمندان می‌گذارند که اجسام به اندازه ۱۰۰nm را مشاهده کنند. این مقدار یک‌دهم اندازهٔ یک میکروب معمولی است.

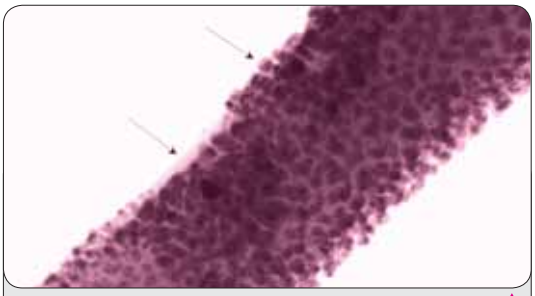
چند شنل نامرئی و اَبَرعدســـی را برای اثبات مفهوم وجود دارد. اما اتلاف‌های مقاومتی شدید در لایه‌های فلز، که انرژی موج نور ـ الکتـــرون را به گرما تبدیل می‌کنند، فعلاً امکان چنین کاربردها را محدود ساخته است.



طرح سادهٔ یک نانوسیم ناجورساختار پلاسمونیک فلز/مادهٔ آلی/نیمرسانا. گسیل ناشی از نانوسیم که با برانگیزش توسط باریکهٔ لیزر به‌وجود آمده است به‌عنوان پمپ انرژی برای جبران اتلاف‌های مقاومتی در پوستهٔ فلزی به‌کار می‌رود. یک لایهٔ فاصله‌گذار آلی به ضخامت ۱۰nm برای کنترل این انتقال انرژی قرار داده شده است.

## ساخت نانوسیستم‌های پلاسمونیک

اتلاف‌های مقاومتی شدید مهم‌ترین شکل پلاسمونیک است. برای غلبه بر این محدودیت‌ها یک نانوسیم ناجور ساختار پلاسمونیک فلز/ماده آلی/نیمرسانای منحصربه‌فرد را طراحی کردیم و ساختیم. هدف ما برانگیختن نانوسیم‌های نیمرسانا با یک چشمهٔ نور خارجی و ســـپس استفاده از تابش داخلی آن‌ها به‌عنوان منبع پمپ انرژی برای جبران اتلاف‌های فلزی است. به این ترتیب، نانوسیم‌ها انرژی نور را با نوسان‌های نور ـ الکترون در لایهٔ فلزی هماهنگ می‌سازند و دامنهٔ موج پلاسمون میرا را به وضعیت اولیه برمی‌گردانند.



تصویر گرفته شده با میکروسکوپ الکترونی تراگسیلی از یک نانوسیم که هستهٔ آن GaAS_ALGaAS و پوشش آن ۱۰nm کینولین آلومینیم و لایهٔ خوشه طلا به ضخامت ۵ تا ۱۰nm بر روی آن است.

محیط جدید و منحصربه‌فرد فلز ـ نیمرسانا در اختیار می‌گذارد. امید می‌رود که بتوانیم چشم‌اندازهای جدیدی از طراحی ابزارهای پلاسمونیکی با اتلاف کم یا بدون اتلاف در اختیار بگذاریم. در حالت ایـــده‌آل این موضوع کاربردهای مهمـــی در فناوری‌های اطلاعات، حسگرهای زیست‌شـــناختی و دفاع ملی خواهد داشت. همچنین بررسی‌های ما می‌تواند تأثیر شدیدی بر دیگر حوزه‌های پژوهشی مانند ارتقای گسیل نور در دیودهای نور گسیل یا لیزرها یا بهبود کیفیت گردآوری نور در ابزارهای فوتو ولتانیک داشته باشد.

همهٔ زیبایی شیشه‌های رنگی مربوط به نوسان‌های الکترون است.

**پی‌نوشت‌ها**

1. Gustav Mie

**منبع**

Hans- Peter Wagner and Masoud kaveh Baghbadorani, University of Cincinnaty of cincinnati, CC By- ND

## چگونه پژوهشگران به امواج گرانشی گوش می‌سپارند

یـــک قرن پیش، آلبرت اینشـــتین[1] در نظریهٔ نســـبیت عام خود وجود امواج گرانشـــی را پیش‌بینی کـــرد. اما این واپیچیدگی‌های فضازمان تاکنون با سرسختی از مشاهده مستقیم پنهان مانده‌اند. پژوهشگران انســـتیتوی ماکس پلانک[2] برای فیزیک گرانشی در هانوفر[3] با آشکارساز GEO۶۰۰ در کوره‌راه این پدیده هستند. در قلب این دستگاه یک لیزر قرار دارد.

ایزاک نیوتون نه در باغ بهشـــت بلکه در یک بوســـتان انگلیسی گردش می‌کرد، با وجود این با یک ســـیب درگیر شد ـ به عبارت دقیق‌تر سیب به سر نیوتون خورد. یا شاید جلوی پایش قِل خورد؟ مشکل بتوان گفت. در مورد صحت این داستان افتادن سیب تردید وجود دارد. اما مثل همهٔ افســـانه‌ها، دســـت‌کم سرهم‌بندی خوبی است. این داســـتان را اولین‌بار هَنری پمبرتون[4] در سال ۱۷۲۸ در زندگینامهٔ فیزیک‌دان معروف بیان کرد.

در واقع دانشگاه کمبریج از سال ۱۶۶۵ تا ۱۶۶۶ به‌علت طاعون تعطیل بود و اســـتادان وقت زیادی برای فکر کردن داشتند. به هر حال، رویارویی با ســـیب بـــرای نیوتون ثمربخش بود. گفته‌اند این موضوع باعث شد نیوتون به این فکر بیفتد که پدیدهٔ فیزیکی مربوط به حرکت سنگی که به هوا پرتاب می‌شود، مدار ماه به دور زمین، و حرکت سیبی که به زمین می‌افتد یکسان و مربوط به گرانی است.

بنابراین، اواســـط قرن هفدهم میلادی آغـــاز تاریخچهٔ گرانش ـ نیرویی که به دورترین گوشـــه‌های عالم می‌رسد و اجزای جهان را به هم پیوند می‌دهد ـ را مشخص می‌کند. به عبارت دقیق‌تر: «دو

جرم نقطه‌ای یکدیگر را با نیرویی جذب می‌کند که در امتداد خط بین آن‌هاست، با حاصلضرب جرم آن‌ها نسبت مستقیم و با مجذور فاصلهٔ آن‌ها نسبت عکس دارد.» قانون گرانش نیوتون با زندگی روزمرهٔ ما به خوبی سازگار است. این قانون توجیه می‌کند که چرا زمین دور خورشید می‌گردد همچنین چرا تلفن‌های همراه (البته، حتی گرانبهاترین آن‌ها) بر اثر افتادن به زمین می‌شکنند. خُب، اوضاع تا اینجا روبه‌راه است، اگر این مشکل کوچک وجود نداشت که کاربرد قانون گرانش محدود است.

وقتی اخترشناسان قرن نوزدهم حرکت سیارات را با دستگاه‌هایی مشاهده کردند که مدام بهتر می‌شد، متوجه شدند که نزدیک‌ترین نقطهٔ عطارد به خورشید (حضیض) در فضا جابه‌جا می‌شود. گرچه این اثر برای همهٔ سیارات رخ می‌دهد، چون آن‌ها هم به یکدیگر نیروی گرانشی عکس مجذوری وارد می‌کنند ـ اما حرکت تقویمی حضیض کاملاً نمایان و بزرگ‌تر از چیزی است که از فیزیک نیوتونی انتظار می‌رود: مقدار آن در هر قرن حدود $\frac{۱}{۸۰}$ درجه است. آیا این اثر مربوط به یک جسم آسمانی پنهان بود؟ یا شاید ساخت نظریه گرانش کلاسیک ایراد طراحی داشت؟

در سال ۱۹۰۷ یک «متخصص درجهٔ دو» در ادارهٔ ثبت اختراع برن عمیقاً دربارهٔ گرانی فکر می‌کرد. او دو سال پیش از آن پنج مقاله به مجلهٔ انالن در فیزیک[۶] ارائه کرده بود که عنوان یکی از آن‌ها «دربارهٔ الکترودینامیک اجسام متحرک» بود. در این مقاله پژوهشگر تفننی کار پایه‌های فیزیک را همان‌قدر به لرزه درآورد که با پیوست سه صفحه‌ای خود تحت عنوان «آیا لختی یک جسم به محتوای انرژی آن بستگی دارد؟» تکان داده بود.

این دو اثر بعداً نظریهٔ نسبیت خاص نامیده شد. نام نویسندهٔ مبتکر آلبرت اینشتین و سال ۱۹۰۵ سال معجزه‌آسای او بود. او در ۲۰ ژوئیه انتشار اثری همراه با همسرش میلوأ را جشن گرفت او پایان این جشن پرشور را در یک کارت‌پستی برای دوستش کزاد هابیشت[۷] چنین شرح داده است: «کاملاً سرمست، متأسفانه هر دو در زیر میز.»

نظریه نسبیت خاص عقیدهٔ جزمی نیوتونی مربوط به زمان مطلق را همراه با سایر موارد در هم شکست، و این ادعا را که سرعت‌ها همواره مستقیماً با هم جمع می‌شوند باطل کرد. به‌علاوهٔ این موضوع که هر تغییر در اثر گرانشی جسم باید طبق نظریهٔ نیوتونی بلافاصله در سراسر عالم قابل آشکارسازی باشد. این بدان معناست که گرانی بلافاصله در همه جا عمل می‌کند. در واقع، این با گزاره انیشتین سازگار نبود که بیان می‌کرد یک حد سرعت ـ سرعت نور ($C=۳۰۰۰۰۰ \ km/S$) ـ برای انتشار آثار هر نوع نیرو وجود دارد.

بنابراین انیشتین قوانین گرانش را در جایگاهی جدید قرار داد. او بعداً یادآور شد: «در سال ۱۹۰۷ این فکر بکر از ذهنم گذشت که میدان گرانشی فقط دارای موجودیتی نسبی است. زیرا اگر ناظری را که، مثلاً از بام یک خانه، سقوط آزاد می‌کند در نظر بگیریم، برای او در طی این سقوط ـ دست‌کم در حول‌وحوش او ـ هیچ میدان گرانشی وجود ندارد. همهٔ اجسامی که این ناظر رها سازد، بدون توجه به سرشت شیمیایی یا فیزیکی آن‌ها، در حال سکون یا در حرکت یکنواخت باقی می‌مانند.

ترفند اینشتین را می‌توان به‌صورت بسیار ساده شرح داد: او با استفاده از شتاب گرانی را شبیه‌سازی می‌کند، زیرا شتاب هم، مانند آنچه در آسانسوری که به سرعت شتاب می‌گیرد رخ می‌دهد، نیروهایی را تولید می‌کند. اگر اتاقک آسانسور عایق صدا و عایق نور بود، افراد داخل آن می‌توانستند فکر کنند که گرانی زمین ناگهان افزایش یافته است. اما آیا گرانی آن‌طور که نیوتون بیان کرده است اصلاً یک نیروست؟

تشخیص اینکه گرانش دست‌کم تا اندازه‌ای به دستگاه مرجع مربوط می‌شود اینشتین را به ایده‌های انقلابی رهنمون شد که او آن‌ها را هشت سال بعد در نظریهٔ نسبیت عام خود مطرح کرد. انحراف‌های اندک از مدل نیوتونی ناشی از نظریهٔ نسبیت عام برای حرکت سیارات است. این اثر برای عطارد که در فاصله نزدیک به سرعت دور خورشید می‌گردد از همه واضح‌تر است. حرکت تقدیمی حضیض را می‌توان به دقت محاسبه کرد و توضیح داد. اینشتین پس از حل این معما نوشت: «به مدت چند روز هیجان‌زده و از خود بیخود بودم.»

نظریه نسبیت عام اینشتین ـ درست مثل الکترودینامیک ماکسول ـ اساساً یک نظریهٔ میدان است. فیزیک‌دان و ریاضی‌دان اسکاتلندی جیمز کلارک ماکسول[۸] در معادله‌های خود میدان الکتریکی و مغناطیسی را به بارها و جریان‌ها مربوط می‌سازد. اکنون، ما پیامدهای الکترودینامیک را به‌صورت طبیعی و غیرقابل اجتناب تجربه می‌کنیم: آن‌ها رادیو و تلویزیون را به‌صورت امواج الکترومغناطیسی به خانه‌های ما می‌آورند. این امواج را شتاب گرفتن بارهای الکتریکی تولید کرده‌اند. گرچه نظریهٔ نسبیت عام و الکترودینامیک از بسیاری جهات متفاوت‌اند، اما چندین جنبهٔ مشترک نیز دارند.

در الکترودینامیک، میدان‌ها ناشی از توزیع بارند و به نوبهٔ خود بر ذرات باردار تأثیر می‌گذارند که به سهم خود دارای اثری روی میدان‌ها هستند. در نظریهٔ نسبیت عام، توزیع ماده هندسهٔ فضازمان را تعیین می‌کند که اثری روی توزیع ماده دارد که سرانجام هندسه را تغییر می‌دهد.

دو نظریه نقطهٔ مشترک دیگری نیز دارند: برای ماکسول، آشفتگی‌های میدان‌های مغناطیسی از نقطهٔ مبدأ، مثلاً بار الکتریکی، با سرعت نور حرکت می‌کنند. برای اینشتین، حرکت شتابدار جرم‌ها در یک میدان گرانشی به آشفتگی‌هایی می‌انجامد که با سرعت نور در فضا حرکت می‌کنند. در هر دو مورد، به‌جای آشفتگی‌ها می‌توان از امواج استفاده کرد.

▲ پژوهش میدانی: در روته۹ در نزدیکی هانوفر، GEO۶۰۰ هر دو بازوی ۶۰۰ متری خود را گشوده است. قلب آن ساختمانی در مرکز است که دستگاه لیزر (نزدیک، سمت چپ) در آن قرار دارد.

اگر روی ترامپولین بالا و پایین بپرید، انرژی (نه فقط به‌صورت کالری) از دست می‌دهید و امواجی را در فضا زمان تولید می‌کنید. اما، جرم یک شخص نسبتاً کم است و آهسته بالا و پایین می‌پرد. بنابراین، امواج گرانشی گسیل شده به‌صورت غیرقابل اندازه‌گیری کوچک‌اند.

خوشبختانه، لرزش‌های بسیار شدیدتر فضازمان در عالم هنگامی رخ می‌دهد که دو ستارهٔ نوترونی یا سیاهچاله با سرعت زیاد دور هم بچرخند، یا حتی به یکدیگر برخورد کنند. یا وقتی ستارهٔ پرجرمی به‌صورت ابَرنواختر منفجر شود. این رویدادهای کیهانی امواج گرانشی با انرژی‌های حدود ۱۰۴۵ وات تولید می‌کند.

داسل هالس[9] و جوزف تیلور[10] اخترشناسان امریکایی در واقع نشان داده‌اند که دورهٔ حرکت مداری دو ستارهٔ نوترونی PSR۱۹۱۳+۶ از این‌رو کاهش می‌یابد که این دستگاه دوتایی انرژی از دست می‌دهد و آن را به‌صورت امواج گرانشی گسیل می‌کند. این پژوهشگران به‌خاطر این کشف خود جایزهٔ نوبل فیزیک سال ۱۹۹۳ را دریافت کردند. اما چگونه می‌توان این امواج موجود در فضازمان را آشکارسازی کرد؟ چگونه می‌توان این امواج را حس کرد؟

به این منظور، یک ورقهٔ لاستیکی مجازی را در نظر بگیرید که دو آزمایشگر، که آن‌ها را آلبرت و ایزاک می‌نامیم، هریک دو گوشهٔ مقابل آن را گرفته‌اند اکنون آلبرت و ایزاک با دو یا سه قدم عقب رفتن همزمان این ورقه را می‌کشند. با دور شدن آن‌ها از یکدیگر، بازوهایشان نزدیک بدن آن‌ها باقی می‌ماند. ورقهٔ لاستیکی بلندتر و باریک‌تر می‌شود.

سپس، آلبرت و ایزاک به طرف هم حرکت و در عین حال بازوهایشان را از بدن دور می‌کنند: ورقه لاستیکی کوتاه‌تر و پهن‌تر می‌شود. سرانجام، دو آزمایشگر به حمل اولیهٔ خود بازمی‌گردند. در طی این آزمایش، تصویر آلبرت اینشتین که روی ورقهٔ لاستیکی نقاشی شده است منبسط و متراکم می‌شود و انگار یک موج گرانشی از ته صفحهٔ ورقه به سر آن فضا را واپیچیده کرده است.

در آزمایش دوم، دو دایره را روی ورقه در فاصلهٔ حتی‌الامکان دور از هم نقاشی می‌کنیم. یکی از آن‌ها را شروع/ پایان و دیگری را نقطهٔ بازگشت می‌نامیم. سپس لشگری از مورچه‌های آموزش‌دیده را سازمان‌دهی می‌کنیم. همهٔ آن‌ها را در دایره شروع/ پایان قرار می‌دهیم و می‌گذاریم یکی پس از دیگری در بازه‌های زمانی منظم به نقطهٔ بازگشت بدوند و برگردند. چون مورچه‌ها با سرعت ثابت حرکت می‌کنند، همگی آن‌ها در همان بازه‌های زمانی منظم که نقطهٔ شروع را ترک کرده بودند به آن نقطه برمی‌گردند.

اکنون آلبرت و ایزاک ورقهٔ لاستیکی را تا دو برابر اندازهٔ آن می‌کشند. این کار باعث می‌شود که ترتیب حرکت لشکر مورچه‌ها نیز کشیده شود و فاصلهٔ بین مورچه‌ها افزایش یابد: مورچه‌ها به فاصلهٔ دوبرابر فاصله زمانی اولیه به نقطهٔ پایان می‌رسند. اما با این تأخیر زمانی یک رویداد موقتی فقط برای مورچه‌ها بین راه است. اگر ورقه با ضریب دو کشیده باقی بماند. مورچه‌هایی که شروع به حرکت می‌کنند باز هم در همان بازه‌های زمان باز می‌گردند. موج گرانشی (شبیه‌سازی شده) این اثر را دارد که مورچه‌ها زمانی تندتر و زمانی کندتر از آنچه انتظار می‌رود دنبال هم حرکت کنند. چنانکه در بالا شرح داده شد، موج گرانشی فاصلهٔ اجسام موجود در فضا را در جهت عمود بر جهت انتشار تغییر می‌دهد. اندازه‌گیری این بسیار دشوار است. بگذارید سناریوی بدترین مورد در کهکشان خود را در نظر بگیریم که انفجار یک ستارهٔ پر جرم است. امواج گرانشی ناشی از این رمبش ـ هنگام رسیدن به منظومهٔ شمسی ما پس از زمان انتشار چند هزار سال ـ فاصلهٔ بین خورشید و زمین ($۱/۵\times۱۰^{۱۱}$m) در مدت چند ده‌هزارم ثانیه فقط به اندازهٔ قطر اتم هیدروژن ($۱۰^{-۱۰}$m) تغییر می‌دهند.

بنابراین آلبرت اینشتین فکر می‌کرد آشکارسازی امواج گرانشی ناممکن است. و اکنون تعداد از دانشمندان دستگاه‌هایی را ابداع کرده‌اند که انتظار می‌رود موفق به انجام این کار شوند. اولین نسل این وسایل از استوانه‌های آلومینیومی به وزن چند تن تشکیل شده بود که به حسگرهایی مجهز بودند. امواج گرانشی باید باعث نوسان آن‌ها مانند زبانه زنگ کلیسا می‌شدند. اما، این آشکارسازهای تشدیدی به‌رغم تقویت‌کننده‌های بسیار حساس آن‌ها نتیجه‌ای تولید نکردند.

بنابراین پژوهشگران گیرنده‌های حساس‌تری طراحی کردند. اصل آن‌ها مبتنی بر آزمایش فکری با ورقهٔ لاستیکی است. برای این منظور به‌جای دایره شروع/ پایان یک لیزر و به‌جای نقطهٔ برگشت یک آینه قرار دادیم و فرض کردیم مورچه‌ها ستیغ‌های موج یک سیگنال نور باشند. برای آشکارسازی تأخیرهای مختصر در زمان رسیدن، باید یک مسیر باریکهٔ دیگر عمود بر باریکهٔ اول را چنان ترتیب دهیم که امواج نور این دو بازو بر هم نهاده شوند.

این تداخل‌سنج مالکیسون از سال ۱۸۸۲ میلادی وجود داشته است؛ این وسیله ابتدا برای آزمایش ثابت بودن سرعت نور ساخته شد. با مجهز کردن این وسیله به فناوری بسیار پیشرفته، برای آشکارسازی امواج گرانشی ایده‌آل خواهد بود. تجهیزات GEO۶۰۰ که در مزرعه‌ای در روته در نزدیکی هانوفر قرار دارد. طبق اصل تداخل‌سنج مایکلسون کار می‌کند.

نور را چند دیود لیزر تولید می‌کنند که مانند چیزی است که در

در زیر زمین: در GEO۶۰۰ باریکه‌های نور در لوله‌های فولاد و ضدزنگ شیاردار به قطر ۶۰ سانتی‌متر و دیواره‌های به ضخامت ۰/۹ میلی‌متر (راست) در زیر زمین حرکت می‌کند. این دستگاه در مقابل ارتعاش محافظت و کاملاً تخلیه شده است.

دستگاه‌های پخش CD به‌کار می‌رود. یک بلور کوچک نور را به باریکه لیزر فروسرخ تبدیل می‌کند که توان آن پس از آماده‌سازی دقیق و فیلتر کردن فقط ده وات است ـ بسیار بیشتر از یک اشاره‌گر لیزری، و بسیار ضعیف برای اندازه‌گیری‌های مفید.

بنابراین پژوهشگران از «بازیافت نور» استفاده می‌کنند. آینه‌ای تمام نور مصرف‌نشده را به طرف لیزر برمی‌گرداند که آن را دوباره به طرف تداخل‌سنج هدایت می‌کند. این چرخه چند بار تکرار و نه‌تنها تا توان نور ۱۰۰۰ وات تقویت می‌شود، بلکه حساسیت آشکارساز را نیز زیاد می‌کند. لیزر بسیار پایدار است و نور با دامنه و بسامد ثابت را برای ماه‌ها و سال‌ها تولید می‌کند.

لوله‌های به طول ۶۰۰ متر دو بازوی تداخل‌سنج را تشکیل می‌دهند که در کانال‌هایی نصب شده‌اند. ایده آن است که باریکه‌های لیزر می‌توانند بدون اختلال ناشی از تأثیرهای خارجی در لوله‌ها حرکت کنند. در واقع، ارتعاش‌های ناشی از ترافیک، حرکت‌های لرزه‌ای یا امواج دریای شمال باید حذف شوند. لرزه‌سنج‌ها نوسان‌ها را اندازه می‌گیرند و سپس آن‌ها با عملکردهای مکانیکی پیزوالکتریک خنثی می‌شوند.

علاوه بر این دستگاه فعال، تمام قطعات اپتیکی به دستگاه غیرفعال هم مجهزند که ضربه‌گیرهای دولایه از جنس لاستیک و فولاد ضدزنگ است. فنرهای شمش و آونگ‌های چندمرحله‌ای نیز به‌عنوان ضربه‌گیر ارتعاش عمل می‌کنند. به منظور کمینه کردن افت‌وخیزهای گرمایی چگالی هوای داخل دستگاه، تداخل‌سنج در داخل لوله‌های فولاد ضدزنگ تخلیه شده قرار گرفته است. پمپ‌های توربومولکولی خلأ بسیار خوب بهتر از ۱۰-۱۱ بار تولید می‌کنند.

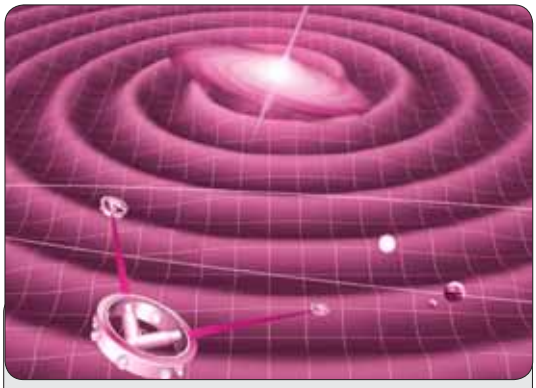
GEO۶۰۰ یک طرح مشترک به رهبری انستیتوی ماکس‌پلانک برای فیزیک گرانشی و دانشگاه لایب نیتس[9] هانوفر برای آلمان و دانشگاه کاردیف و گلاسکو برای بریتانیای کبیر است. این تأسیسات یکی از چند ایستگاه زمینی با وظیفهٔ گوش سپردن به کنسرت ستارگان است.

در پایان سال ۲۰۱۵، ایالات متحده aLico را در دو محل به فاصله ۳۰۰۰km به‌کار می‌اندازد که از آشکارسازهای تداخل‌سنج نسل دوم هر یک با بازویی به طول ٤ کیلومتر است و از فناوری‌های اندازه‌گیری به‌وجود آمده در GEO۶۰۰ استفاده می‌کند. در نزدیکی شهر ایتالیایی پیزا، Virgo بازوهای خود به طول سه کیلومتر را گسترده است، و دانشمندان ژاپنی نیز آشکارساز زیرزمینی KAGRA با همان اندازه را می‌سازند. انتظار می‌رود که اولین پیام‌ها از فضا در چند سال آینده دریافت شوند.

با این همه، اخترشناسان اکنون به سال ۲۰۳٤ می‌اندیشند که قرار است تداخل‌سنج eLSA به امواج گرانشی کم بسامد از سراسر عالم مرئی گوش بسپارد و به این وسیله آشکارسازهای زمینی را تکمیل کند.

## گزاره‌های کلیدی نظریهٔ نسبیت خاص

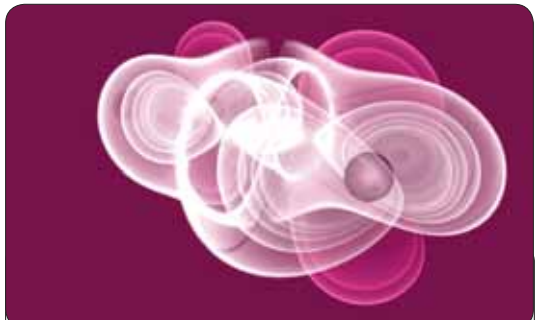
- اتری وجود ندارد که حامل نور و امواج رادیویی باشد.
- همهٔ قانون‌های فیزیک در دستگاه‌هایی که با سرعت یکنواخت نسبت به هم حرکت می‌کنند یکسان‌اند.
- فضا و زمان به‌طور ناگسستنی به هم مربوط‌اند.
- همزمانی مطلق وجود ندارد.
- سرعت نور یک ثابت عمومی و مستقل از حرکت نسبت به چشمه نور است.
- انرژی و جرم هم‌ارزند، جرم معیار سرراستی از انرژی موجود در یک جسم است. و: نور جرم را منتقل می‌کند...



▲ آینده در فضا قرار دارد: در آشکارسازهایی که در روی زمین قرار دارند هرگز نمی‌توان از لرزش‌ها کاملاً اجتناب کرد و آن‌ها اندازه‌گیری امواج گرانشی زیر ده هرتز را آشفته می‌سازند. یک گروه بین‌المللی از دانشمندان طرح eLISA۱۰ (آنتن فضایی با تداخل‌سنج لیزری تحول‌یافته) را برنامه‌ریزی می‌کنند. این طرح در سال ۲۰۳٤ آغاز می‌شود و سه ماهواره زمین را در فاصلهٔ ۵۰ میلیون کیلومتر دنبال و مثلثی به ضلع میلیون‌ها کیلومتر به‌وجود می‌آورند. این تداخل‌سنج لیزری فضایی قادر خواهد بود امواج گرانشی کم‌بسامد را از سراسر عالم مرئی دریافت کند.

## گزاره‌های کلیدی نظریهٔ نسبیت عام

- گرانی یک نیرو به معنای متعارف نیست، بلکه یک ویژگی هندسهٔ فضازمان است.
- ماده فضازمان را خم می‌کند و میزان خمیدگی با جرم یک جسم افزایش و با زیاد شدن فاصله از آن کاهش می‌یابد. فضا و زمان کمیت‌هایی دینامیکی هستند و به نوبهٔ خود حرکت ماده را تعیین می‌کنند.
- زمان نقش مهمی در نظریهٔ نسبیت عام دارد. ساعت در نزدیکی یک جسم آسمانی پر جرم کندتر از نواحی دور که کمتر تحت تأثیر گرانی آن هستند تیک می‌زند.



▲ برخورد کیهانی: امواج گرانشی وقتی تولید می‌شوند که سیاهچاله‌ها دور هم بچرخند و حتی برخورد کنند ـ در اینجا با رایانه شبیه‌سازی شده است.

**پی‌نوشت‌ها**

1. Albert Einstein
2. Max Planck Institute
3. Hanover
4. Henry Pem berton
5. Annalen der Physik
6. Mileva
7. Conrad Habicht
8. James Clark Maxwell
9. Leibnitz Uini-versitat
10. evolved Laser interferometer Space Antenna

**منبع**

Max Plank Sou-ety