

جایزه نوبل فیزیک سال ۲۰۲۳

ثبت کوتاه‌ترین لحظه‌ها به کمک آزمایش با نور

جایگاه فیزیک تجربی در علم روز دنیا

The Nobel Prize in Physics 2023



Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach
Pierre Agostini
Prize share: 1/3



Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach
Ferenc Krausz
Prize share: 1/3



Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach
Anne L'Huillier
Prize share: 1/3

چکیده

در سال جاری، جایزه نوبل فیزیک به سه محقق برجسته اهدا شد. یکی از برندگان این جایزه، پیر آگوستینی از فرانسه، به همراه گروه تحقیقاتی خود، به تولید و بررسی پالس‌های نوری به اندازه اتوثانیه پرداخته است. اتوثانیه به معنای یک میلیارد میلیارد ثانیه (10^{-18} ثانیه) است. این پالس‌ها امکان مشاهده و اندازه‌گیری فرآیندهای بسیار سریع در سطح اتم‌ها و مولکول‌ها را فراهم کرده و به ما امکان می‌دهد تا جزئیاتی جدید از دنیای خیلی ریز را بررسی کنیم. این کار نه تنها اندازه‌گیری زمانی که یک الکترون از اتم خارج می‌شود را امکان پذیر می‌کند؛ بلکه این امکان را فراهم می‌کند که اطلاعات بیشتری از اتصال الکترون به هسته اتم به دست آید. همچنین، این تکنیک امکان درک چگونگی حرکت توزیع الکترون‌ها در مولکول‌ها و مواد از مکانی به مکان دیگر را فراهم می‌کند.

برنده دیگر این جایزه، فرانتس کرایوس از اتریش، با گروه تحقیقاتی خود روی تکنیکی کار کرده است که امکان انتخاب و مطالعه پالس‌های نوری در پنجره زمانی اتوثانیه را فراهم می‌کند. این تکنیک به ما این امکان را می‌دهد که با دقت بیشتری فرآیندهای داخلی ماده را بررسی و رویدادهای مختلف را شناسایی نماییم.

در مجموع، این آزمایش‌ها نشان دادند که می‌توان پالس‌های اتوثانیه را تولید، مشاهده و اندازه‌گیری کرد و همچنین می‌توان از آن‌ها در آزمایش‌های جدید استفاده کرد. اکنون که دنیای اتوثانیه دسترسی پذیر شده است، این پالس‌های کوتاه نوری می‌توانند نه تنها برای مطالعه حرکات الکترون‌ها بلکه در گستره وسیعی از دانش و فناوری استفاده شوند.

فیزیک تجربی و آزمایشگاهی، به عنوان ستون اصلی پیشرفت در علم جدید، نقش بسیار بزرگی در شکوفایی دانش و تکامل تفکر علمی ایفا می‌کند. این رشته علمی، از چشم‌انداز مشاهدات مستقیم و آزمایش‌های واقعی بهره می‌برد که تأثیر قابل ملاحظه‌ای در بهبود فهم ما از جهان و حل چالش‌های اساسی دارد. باید توجه داشت که این واقعیت مانند یک شمشیر دو لبه است که در صورت فهم سطحی از آن، می‌تواند به نتیجه‌گیری نادرست منجر شود. پدیده‌ای که مکرراً در فضای توسعه علم کشور مشاهده

شده است. افراط در توجه به کاربرد کوتاه مدت نتایج پژوهش و فاصله گرفتن از پژوهش‌های بنیادی - که هدف آن‌ها کشف حقایق هستی و شناخت و توسعه مواد جدید است - تهدید جدی برای توسعه علم و فناوری خواهد بود.

جایزه نوبل سال ۲۰۲۳ به دانشمندانی اهدا شد که نتیجه فعالیت آنها منجر به توسعه فناوری آزمایشگاهی برای تصویر برداری در مقیاس اتونانیه شده است. این پژوهش در کنار وجود کاربرد تجربی، عملاً پژوهشی در حوزه پژوهش‌هایی بنیادی و نتیجه شناخت و تعمق در فیزیک نظری است. در این مورد خاص نمی‌توان مرزی میان این دو حوزه یعنی فیزیک نظری و فیزیک تجربی و آزمایشگاهی دید و روشن است که چنین موفقیتی مرهون رویکرد چند وجهی پژوهشگران بوده است.

مجموعه‌ای از جوایز نوبل فیزیک معمولاً به دلیل کشف‌هایی ارزشمند در زمینه آزمایش‌های فیزیکی اهدا می‌شود که منجر به فهم عمیق‌تر و دقیق‌تر از قوانین طبیعت شده‌اند. این دستاوردها چنانچه که در تاریخ نوبل فیزیک قابل مشاهده است، اثرات بزرگی بر توسعه صنعتی، فناوری، پزشکی، و بسیاری از حوزه‌های دیگر دارند. به عنوان مثال، اکتشاف مواد نوین یا توسعه تکنولوژی‌های پیشرفته باعث شده است که فیزیک‌دانان تجربی به طور مستقیم در بهبود شرایط زندگی انسان‌ها نقش مؤثری ایفا کنند. این نقش در اهداء جوایز نوبل فیزیک به افتخار افرادی چون جایزه نوبل امسال و جوایز متعدد دیگر تجلی یافته است. در نتیجه، فیزیک تجربی به عنوان پایه علمی و تکنولوژیکی، با اهمیتی چندگانه در پیشرفت علم و فناوری ایفای نقش می‌کند و جوایز نوبل فیزیک در این حوزه نماد تلاش‌های بی‌وقفه برای روشنایی نواحی تاریک دانش انسانی می‌باشد.

باید متذکر شد، جایگاه فیزیک تجربی و آزمایش در موفقیت یک مؤسسه پژوهشی بسیار حیاتی و کلان است. برای یک مؤسسه پژوهشی، ارتباط و هماهنگی با زمینه فیزیک تجربی و آزمایشی اهمیت زیادی دارد. این دو حوزه به طور ترکیبی می‌توانند به رشد و توسعه بهتری دست یابند. چند نکته می‌تواند در این زمینه مؤثر باشد:

۱. تعامل و همکاری:

- تشویق به تعامل نظری پژوهان با دانشمندان و محققان فیزیک تجربی.
- تشکیل تیم‌های چندتخصصی برای حل مسائل پیچیده با استفاده از دانش‌های نظری و آزمایشی.

۲. تبادل اطلاعات:

- ایجاد مکانیزم‌های قوی برای تبادل اطلاعات و دانش بین بخش‌های نظری و تجربی.
- برگزاری کنفرانس‌ها و همایش‌های مشترک به منظور ارتقاء تبادل نظر و تجربیات.

۳. پشتیبانی مالی:

- اختصاص بودجه‌های مناسب به پروژه‌های مشترک نظری و تجربی.
- حمایت از پژوهش‌هایی که همزمان از روش‌های نظری و آزمایشی استفاده می‌کنند.

۴. آموزش مشترک:

- برگزاری دوره‌های آموزشی مشترک برای افزایش دانش فردی در هر دو زمینه.
- ترویج فرهنگ مشارکت در تدریس و آموزش بین دو حوزه.

۵. مدیریت پروژه:

- ایجاد ساختار مدیریت پروژه‌های مشترک به طوری که بهینه‌سازی منابع و زمان انجام تحقیقات صورت گیرد.
- توسعه سیاست‌ها و استراتژی‌های مشترک برای دستیابی به اهداف مشترک.

با توجه به این نکات، یک مؤسسه پژوهشی می‌تواند به نحوه ایجاد شبکه تحقیقاتی و تبادل دانش بین این دو حوزه کمک کند و از ترکیب دانش‌های نظری و آزمایشی بهترین بهره‌وری را برای پیشرفت علمی و فناوریانه کسب کند. پژوهشگاه دانش‌های بنیادی اینگونه فعالیت‌ها را در حوزه‌های مختلف در ساخت و بهره‌برداری از رصدخانه ملی ایران، طرح چشمه نور ایران و همکاری با سرن و بخش‌های دیگر شروع کرده که سنگ بنای مناسبی برای رشد و توسعه کشور خواهد بود. بخش مهمی از این نوع فعالیت‌ها در ساخت شتابگر چشمه نور ایران محقق خواهد شد. دنیای شتابگرهای ذرات بسیار بیشتر از یک مسابقه ساده برای ساختن یک ماشین با بالاترین انرژی ممکن برای پاسخگویی به سؤالات علمی ناب علمی مانند ارشمیدس، کوپرنیک، نیوتن یا دیراک است. شتابگرها از زمان شروع به کار برای حل مشکلات و چالش‌های علمی بشری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از این رو دنیای فیزیک تجربی و آزمایشگاهی با سرعت فزاینده‌ای در حال پیشرفت است. به طوری که اکنون بسیاری از کشورها چنین امکاناتی را برای

تحقیقات مواد در سطح مولکولی ساخته‌اند، یا به افزایش تعداد مراکز درمانی بیمارستانی با استفاده از شتاب‌دهنده‌های پروتون و یون کمک کرده‌اند. واضح است که چگونه دنیای فیزیک نظری و فیزیک تجربی در کنار هم به بهبود زندگی بشر کمک کرده‌اند.

جایزه نوبل فیزیک ۲۰۲۳

یک پرنده کوچک که بال‌های خود را هر ثانیه ۸۰ بار می‌زند را در نظر بگیرید. مشاهده این حرکات با فاصله زمانی بسیار کوتاه و به طور کلی حس رخداد‌های بسیار سریع برای حواس انسانی غیرقابل مشاهده هستند. برای ضبط یا تصویر کشی از این لحظات بسیار کوتاه، نیاز به فناوری پیشرفته داریم. عکس بسیار متمرکز از یک پرنده کوچک در حال پرواز نیاز به زمان نوردهی دارد که بسیار کوتاه‌تر از یک بار بال زدن است. هرچه رویداد مورد نظر سریع‌تر باشد، عکس برداری نیاز به سرعت بیشتری در گرفته‌شدن دارد تا لحظه را ضبط کند.

این اصل به همه روش‌های استفاده شده برای اندازه‌گیری یا تصویربرداری از فرایندهای سریع اعمال می‌شود؛ هر اندازه‌گیری باید سریع‌تر از زمانی باشد که سیستم مورد مطالعه تغییر می‌کند، در غیر این صورت تغییر در سیستم قابل اندازه‌گیری و مشاهده نبوده و نتیجه مبهم است. برندگان جایزه نوبل امسال آزمایش‌هایی را انجام داده‌اند که روشی برای تولید پالس‌های نوری کوتاه است که به کمک آن‌ها می‌توان تصاویری از فرایندها درون اتم‌ها و مولکول‌ها ضبط کرد.

در یک مولکول، اتم‌ها می‌توانند در میلیون میلیاردم یک ثانیه یا فمتوثانیه حرکت کنند. این حرکات می‌توانند با کوتاه‌ترین پالس‌هایی که با لیزر تولید می‌شوند، مورد مطالعه قرار گیرند. در دنیای الکترون‌ها، موقعیت‌ها و انرژی‌ها با سرعتی بین یک الی چند صد اتوثانیه تغییر می‌کنند. اتوثانیه به اندازه‌ای کوتاه است که تصور کنید وقتی یک فلاش نوری از یک سر اتاق به دیوار مقابل فرستاده شود به اندازه ده میلیارد اتوثانیه طول می‌کشد.

پیشتر فمتوثانیه به عنوان حداکثر زمان ممکن برای تصویر برداری تصور می‌شد. سرعت بهبود فناوری موجود برای مشاهده فرایندهای مربوط به رخداد‌های زمانی بسیار کوتاه الکترون‌ها کافی نبود. چیزی کاملاً جدید مورد نیاز بود. برندگان جایزه نوبل امسال آزمایش‌هایی انجام دادند که امکان اندازه‌گیری با دقت اتوثانیه را به دنیای فیزیک باز کرد.

تولید پالس‌های کوتاه به کمک امواج نوری ثانویه

همان‌طور که می‌دانیم نور از امواج تشکیل شده است - ارتعاشات در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی - که در خلاء با سرعت ۳۰۰ هزار کیلومتر بر ثانیه یعنی سرعتی بیشتر از هر چیز دیگری، حرکت می‌کنند. امواج نور طول موج‌های مختلفی دارند که معادل رنگ‌های مختلف هستند. به عنوان مثال، نور قرمز دارای طول موجی حدود ۷۰۰ نانومتر است، حدود یک صدم عرض یک موی سر، و در هر ثانیه حدود ۴۳۰ هزار میلیارد بار نوسان می‌کند.

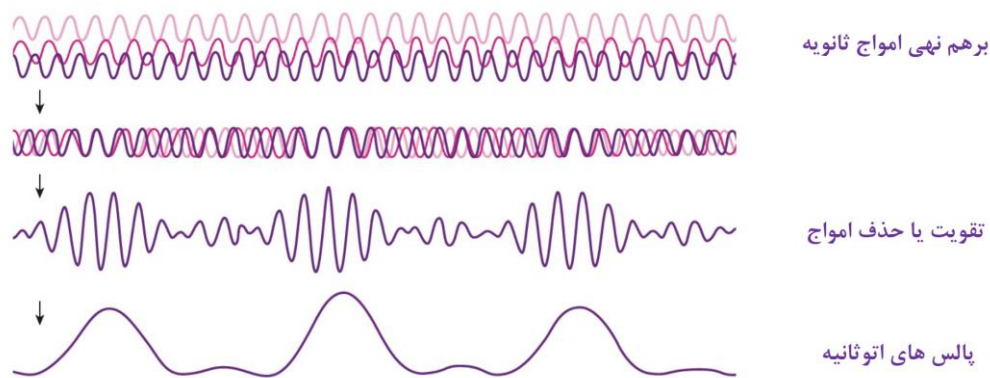
کوتاه‌ترین پالس ممکن از نور عبارت است از زمان طی یک دوره تناوب کامل که موج نوری ارتعاش خود را شروع می‌کند، به اتمام می‌رساند و مجدداً به نقطه شروع نوسان خود بازمی‌گردد. قابل توجه است که پالس‌ها در سیستم‌های لیزر معمولی هرگز نمی‌توانند به زیر یک فمتوثانیه برسند، بنابراین در گذشته این به عنوان حد سخت برای کوتاه‌ترین پالس نور در نظر گرفته می‌شد.

با توجه به فرمول بندی ریاضی که فیزیک امواج را توصیف می‌کند، اگر امواج با دامنه و طول موج‌های مناسب و مختلف به اندازه‌ی کافی ترکیب شوند، شکل موج‌های مختلفی می‌تواند ساخته شود. راز تولید پالس‌های نوری اتوثانیه عبارت است از اینکه ترکیب امواج زیاد با طول موج‌های کوتاه‌تر منجر به تولید پالس‌های نوری کوتاه‌تر می‌گردد.

برای ایجاد این شرایط، نور لیزر از یک گاز عبور داده می‌شود. نور با اتم‌های گاز برهمکنش می‌کند و امواج نوری ثانویه را ایجاد می‌کند، امواجی که برای هر دوره تناوب در موج اصلی تعدادی نوسان کامل را انجام می‌دهند. در سال ۱۹۸۷، آن لوتییه و

همکارانش در یک آزمایشگاه در فرانسه توانستند امواج ثانویه را با استفاده از یک پرتو لیزر فرورسرخ که از یک گاز نجیب عبور می‌کرد، تولید کنند. نور فرورسرخ باعث ایجاد امواج ثانویه بیشتر و پرشدتی شد که از لیزر با طول موج‌های کوتاه‌تر استفاده شده در آزمایش‌های پیشین، شدت بیشتری داشتند.

هنگامی که امواج نور لیزر وارد گاز می‌شوند با اتم‌های گاز برهمکنش الکترومغناطیسی می‌کنند که میدان الکتریکی که الکترون‌ها را دور هسته اتم نگه می‌دارد، تحریک کرده و باعث خارج شدن الکترون‌ها از اتم‌ها می‌شوند. در این شرایط، الکترون‌های آزاد ممکن است به مدارهایی حول هسته اتم بازگردند و انرژی اضافی خود را به عنوان پالس‌های نور آزاد کنند. این پالس‌های نور که از بازترکیب الکترون‌ها با اتم‌ها ظاهر می‌شوند، امواج ثانویه را ایجاد می‌کنند. این امواج ثانویه با یکدیگر برهم‌کنش می‌کنند و وقتی که همگی هم‌زمان به قله می‌رسند نور شدت بیشتری پیدا می‌کند و زمانی که قله یک موج با میانه موجی دیگر منطبق می‌شود، شدت کاهش می‌یابد. این فرایند پالس نوری چند اتوتانیه را تولید می‌کند که نمایی از آن در شکل ۱ نمایش داده شده است. فیزیک‌دانان تئوری این مسئله را در دهه ۱۹۹۰ متوجه شدند، اما کشف تجربی آن در سال ۲۰۰۱ رخ داد.



شکل ۱: نحوه شکل‌گیری امواج اتوتانیه در اثر ترکیب امواج ثانویه.

پیر آگوستینی و گروه تحقیقاتی او موفق به تولید یک سری پالس نور متوالی مشابه یک قطار با واگن‌های متعدد شدند. آن‌ها این "قطار پالس" را با یک بخش دارای تأخیر از پالس اصلی لیزر ترکیب کردند تا هم‌فازی آنها را با یکدیگر مطالعه کنند. با این روش آن‌ها مشاهده کردند که پهنای هر پالس تنها ۲۵۰ اتوتانیه است.

هم‌زمان، فرانتس کرایوس و گروه تحقیقاتی او در اتریش در حال کار بر روی یک تکنیک بودند که می‌توانست یک پالس واحد را انتخاب کند - مشابه واگنی که از یک قطار جدا می‌شود و به مسیر دیگری تغییر مسیر می‌دهد. پالسی که آن‌ها جدا کردند، ۶۵۰ اتوتانیه طول داشت که این گروه از آن برای ردیابی و مطالعه فرآیندی که الکترون‌ها از اتم‌های خود دور می‌شدند، استفاده کردند.

این پالس‌های اتوتانیه امکان اندازه‌گیری زمانی که لازم است تا یک الکترون از یک اتم دور شود را فراهم می‌کنند و این امکان را می‌دهند که چگونه توزیع الکترون‌ها از یک سو به سوی دیگر یا از یک مکان به مکان دیگر در مولکول‌ها و مواد نوسان می‌کند. قبلاً مکان آن‌ها تنها به عنوان یک میانگین قابل اندازه‌گیری بود.

پالس‌های اتوتانیه می‌توانند برای آزمایش‌های داخلی ماده و شناسایی رویدادهای مختلف استفاده شوند. این پالس‌ها کاربردهایی در حوزه‌های مختلف از الکترونیک تا پزشکی دارند که در زیر مختصراً مطرح می‌شوند:

مطالعه فرآیندهای الکترونی: این فناوری به دانشمندان این امکان را می‌دهد که جدا شدن الکترون‌ها از اتم و تحول زمانی آن را به دقت مطالعه کنند. مثلاً، آن‌ها می‌توانند بررسی کنند که الکترون چقدر به هسته اتم متصل است و چگونه این اتصال تحت تأثیر اثرات مختلف قرار می‌گیرد.

رهیافت در زمینه مواد و مولکول‌ها: در زمینه مواد و مولکول‌ها، این پالس‌ها به دانشمندان این امکان را می‌دهند که نحوه نوسان الکترون‌ها را از یک مکان به مکان دیگر، با دقت بیشتری بسنجند. این اطلاعات برای درک بهتر از خصوصیات مواد و مولکول‌ها و حتی ترکیبات شیمیایی مفید است. همچنین این اطلاعات می‌توانند در توسعه مواد جدید، داروها، یا حتی در فهم بهتر از واکنش‌های شیمیایی مؤثر باشند.

کاربردهای پزشکی: در زمینه کاربردها، این تحقیقات اثرات بسیاری دارند. مثلاً، پالس‌های اتوثانیه می‌توانند برای جابه‌جایی مولکول‌ها در داخل سلول‌ها و بافت‌ها استفاده شوند. این امکان به پزشکان این قابلیت را می‌دهد که سیگنال‌هایی را از این مولکول‌ها دریافت کنند که نشان دهنده وضعیت و سلامتی بافت‌ها است.

مطالعه ترکیبات شیمیایی: در زمینه شیمی، این تکنیک‌ها به دانشمندان این امکان را می‌دهند که خصوصیات مولکول‌ها و ترکیبات شیمیایی را با دقت بسیار بیشتری مطالعه کنند. این اطلاعات می‌توانند در توسعه مواد جدید، داروها، یا حتی در فهم بهتر از واکنش‌های شیمیایی مؤثر باشند.

در پایان بیان این موضوع خالی از لطف نیست که لیزر الکترون آزاد در آزمایشگاه‌های شتابگر در موقعیتی منحصر به فرد برای ادامه این گونه تحقیقات قرار دارند. منبع لیزر مبتنی بر شتاب دهنده همان برهم نهی منسجم از امواج ثانویه را با شدت بالا و انعطاف پذیری بیشتر ایجاد می‌کند. بی شک در آینده این دو رویکرد با هم تکامل خواهند یافت و منجر به خلق ایده‌های بین رشته‌ای خواهند شد.

بخش اصلی این نوشته برگرفته از تارنمای جایزه نوبل www.nobelprize.org می‌باشد.