

## تند و ریز؛ جوایز نوبل فیزیک و شیمی ۲۰۲۳

علی صادقی - دانشکده فیزیک دانشگاه شهید بهشتی

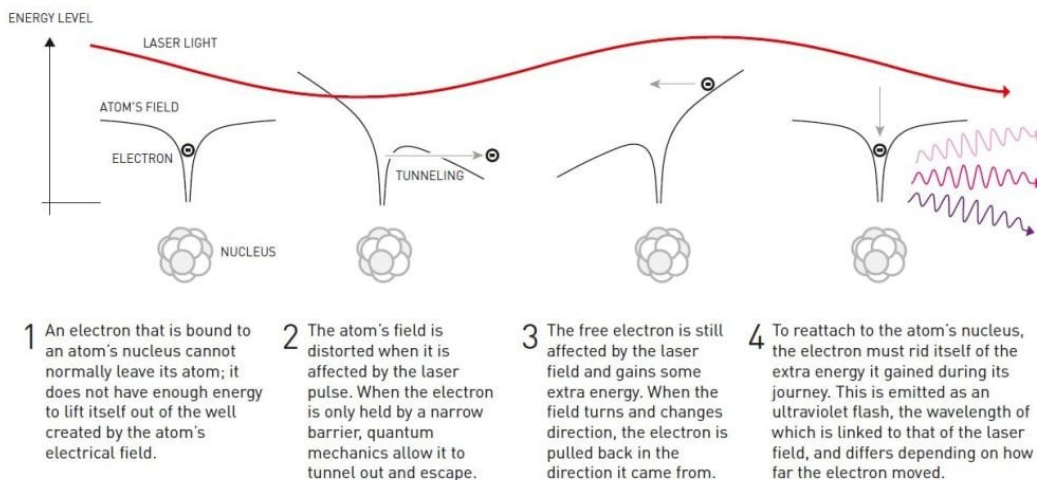
امسال کمیته‌های فیزیک و شیمی جایزه نوبل هر دو به مقیاسهای بسیار کوچک توجه کردند تا از توسعه‌دهندگان شیوه‌های آزمایشگاهی فوق‌العاده سریع (نوبل فیزیک) و فوق‌العاده کوچک (نوبل شیمی) تقدیر شود. [۲۰۱] علاوه بر اهمیت فنی، آنچه هر دو دستاورد را از سایر پژوهشها متمایز کرده است، به طور مشترک کارایی آنها در رابطه با رفتار الکترون‌ها است. تحول الکترون‌ها در مواد در زمانهایی از مرتبه آتوثانیه (میلیارد-میلیاردم ثانیه) و در ابعاد نانومتر (میلیاردم متر) روی می‌دهد، و تلاش برندگان جایزه نوبل و شیمی دستیابی به روشهای تجربی برای کار در این مقیاس را هموار کرده است.

پیشگامان تولید و به‌کارگیری تپ (پالس)های نوری به پهنای حدود ۱۰۰ آتوثانیه، پی‌یر آگوستینی، فرنس کراوس و آن لویلیه، جایزه نوبل فیزیک ۲۰۲۳ را دریافت کردند [۱]. مسیر رسیدن به این دستاورد شگرف طولانی بوده است. بیش از سه دهه قبل، هنگامی که مشاهده شد از برهمکنش یک لیزر فروسرخ از اتمهای یک گاز بی‌اثر، تعداد زیادی هماهنگهای بالا با شدتهای یکسان تولید می‌شود، حتی توضیح نظری پدیده «تولید هماهنگهای بالا» هم ساده نبود. حل عددی در چارچوب مکانیک کوانتومی و تلاشهای مستمر تجربی بعدی روشن کرد که این منشاء این پدیده، بازگشتن الکترون به قید همان هسته‌ای که با تابش لیزر از آن جدا شده بود و به دلیل معکوس شدن جهت میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی است (شکل را ببینید). الکترون، انرژی دریافت شده از لیزر را که خیلی بیشتر از انرژی بستگی الکترون به اتم است در بسامدهایی چندین مرتبه بزرگتر اما متناسب با بسامد لیزر اولیه گسیل می‌کند. اگر اتمهای تابش‌کننده همدوس (هم‌گام) شوند، از تداخل آنها تپهای کوتاهی ساخته می‌شود. تلاشهای نظری و تجربی منجر به ایجاد همدوسی تا ده‌ها فمتوثانیه شد و به این ترتیب با برهم‌نهی تعداد زیادی هماهنگهای بالای لیزر اولیه که شدت یکسانی دارند پالسهایی با پهنای زمانی چند ۱۰۰ آتوثانیه ساخته شد. در آن زمان، جدا کردن یک تپ از بقیه تپها و اندازه‌گیری دقیق پهنای زمانی آن، کاری دشوار و پیشرفتی خلاقانه‌ای بود. اما امروزه تولید و به‌کارگیری تپهای نوری آتوثانیه‌ای دیگر فقط یک مساله تخصصی در حوزه فیزیک اتمی نیست و کاربردهای منحصر به فرد زیستی، شیمیایی و فیزیکی پیدا کرده است. مثلاً شناسایی تغییرات در ترکیب مولکولی سیالات زیستی، تشخیص نشانه‌های مولکولی بیماریها در آزمایش خون را میسر می‌کند و به عنوان یک کاربرد بالقوه در تشخیص پزشکی مطرح است. با دسترسی به تپهای آتوثانیه‌ای بینش ما در مورد دینامیک الکترون‌ها در مواد به شکل بی‌سابقه‌ای عمیق‌تر شده است. حرکت و تحول الکترون‌ها در ماده با چنان سرعتی اتفاق می‌افتد که غالباً فقط اثر متوسط آن آشکار می‌شود. اما همانطور که با روشهای محاسباتی برای حل معادله شرودینگر، به ویژه نظریه تابعی چگالی وابسته به زمان معروف به TD-DFT، می‌توان این دینامیک را پیش‌بینی کرد، تپهای آتوثانیه‌ای به ما این امکان را داده است که جابجا شدن الکترون‌ها در یک مولکول را ردیابی کنیم و زمان جدا شدن الکترون‌ها از قید هسته اتم را اندازه‌گیری کنیم: تاباندن دو تپ آتوثانیه‌ای پشت سرهم به سطح تنگستن (اولی تحریک‌کننده و دومی آشکارساز حالت گذار) حدود ۱۰۰ آتوثانیه

اختلاف زمانی بین گسیل فوتوالکترون‌ها از حالت‌های جایگزیده اتمی و حالت‌های غیرجایگزیده فلزی قابل آشکارسازی است [۳]. به این ترتیب، جزئیات اتفاقاتی مانند جدا شدن فوتوالکترون‌ها از سطح فلزات را که تا مدتها پس از پیدایش نظریه مکانیک کوانتومی یک فرآیند «آنی» فرض می‌شد حالا می‌توان به کمک تپهای نوری آتوثنایه‌ای «مشاهده» کرد.

## Laser light interacts with atoms in a gas

Experiments that created overtones in laser light led to the discovery of the mechanism that causes them. How does it work?

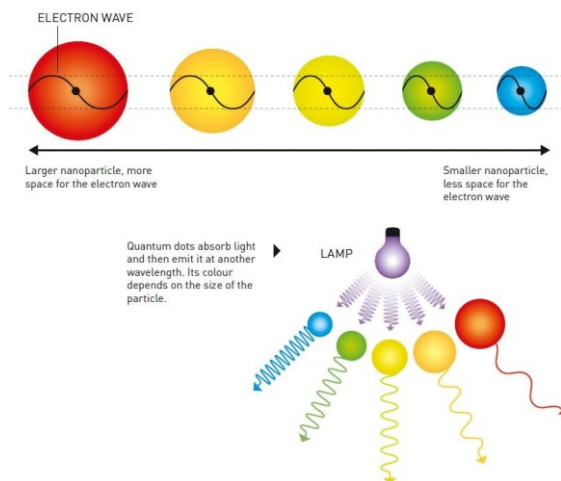


<https://www.nobelprize.org>

از سوی دیگر کشف و کنترل پذیر کردن تولید ساختارهای حالت جامد در ابعاد حدود ده نانومتر (نقطه‌های کوانتومی) برنده جایزه نوبل شیمی ۲۰۲۳ شد که البته ۱/۳ آن به یک فیزیکدان (الکسی اکیموف) تعلق گرفت [۲]. بر خلاف مواد در ابعاد بزرگ و ذرات میلیمتری و میکرومتری، ویژگیهای کوانتومی نانوساختارها را می‌توان با تغییر اندازه‌شان تنظیم کرد. به عنوان مثال، وقتی نور به نانوذراتی از یک جنس اما با اندازه‌های متفاوت تابانده می‌شود هر یک از آنها انرژی تابشی دریافتی را در طول موجی که تابعی از اندازه آن نانوذره است باز می‌تاباند و به عبارتی «رنگ» هر نانوذره نشانه‌ای از «اندازه» آن است (شکل را ببینید). اولین بار اکیموف در حین پژوهشهای مربوط به شیشه‌های رنگی چنین پدیده جالبی را شناسایی کرد. اما امروزه در صفحه‌های نمایش کامپیوتر و تلویزیون موسوم به QLED از چنین نقاط کوانتومی برای تولید نور به سه رنگ اصلی استفاده می‌شود: بخشی از نور آبی که دیود نورگسیل (LED، موضوع جایزه نوبل فیزیک ۲۰۱۴) تولید می‌کند [۴] به کمک نقاط کوانتومی (Q) جذب و به جایش نور قرمز و سبز تولید می‌شود. «وابسته به اندازه بودن» ویژگیهای نقطه‌های کوانتومی بر اساس نظریه مکانیک کوانتومی قابل پیش‌بینی است و دانشجویان در درسهای مکانیک کوانتومی مقدماتی و فیزیک حالت جامد با رفتار الکترون‌هایی که در یک یا چند بعد فضایی محدود شده‌اند آشنا می‌شوند (اگر دانشجوی فیزیک هستید نمودارهای طیف انرژی یک ذره در جعبه و وابستگی آن به اندازه جعبه را به خاطر آورید). اما تولید یک دست و سرراست نانوذرات و تحقق عملی تنظیم عملکرد و ویژگی‌های نانوذرات بر اساس اندازه و نه تغییر جنس، کار شگفت‌انگیزی بود که برندگان جایزه نوبل شیمی ۲۰۲۳ در انجام آن پیشگام بودند.

### Quantum effects arise when particles shrink

When particles are just a few nanometres in diameter, the space available to electrons shrinks. This affects the particle's optical properties.



<https://www.nobelprize.org>

بیش از چهار دهه تلاش گروه‌های پژوهشی و شرکتهای دانش‌بنیان، توانایی‌های تجربی و نظری بشر را در هر دو زمینه مربوط به این دو جایزه رشد چشمگیری داده است و امروزه کار و اندازه‌گیری در مقیاسهای زمانی و مکانی ده‌ها برابر کوچکتر از مقادیر مذکور در دسترس قرار گرفته است. مثلاً می‌توان اختلاف زمانی بین تولد دو الکترون که از دو نقطه متفاوت یک اوربیتال اتمی گسیل شده‌اند را با تداخل‌سنجی آن الکترونها اندازه گرفت. این زمان که حدود چند دهم آتوثانیه است در واقع مدت زمانی است که طول می‌کشد تا پالس فوق کوتاه نوری فاصله بین دو نقطه مذکور را در داخل یک مولکول هیدروژن ببیماید [۵]. جالب است که همزمان قدرت تفکیک فضایی میکروسکوپیهای نیروی اتمی امروزی که به کسری از آنگستروم رسیده است می‌تواند توزیع فضایی این اوربیتالها را با جزئیات به تصویر بکشند [۶]. جالب است که نسبت قدرتهای تفکیک مکانی و زمانی در دسترس ما هم مرتبه سرعت نور است. گرچه بر مبنای فیزیک نظری، کوتاهترین بازه زمانی که به طور بنیادی قابل دستیابی است (زمان پلانک) و کوچکترین فاصله فضایی متناظر آن (طول پلانک) هنوز ده‌ها مرتبه بزرگی کوچکترند، اما فراهم کردن امکانات آزمایشگاهی برای شناخت رفتار الکترونها در مواد و پیش‌زمینه علمی توسعه فناوریهای مرتبط با آنها شایستگی دریافت جوایز نوبل فیزیک و شیمی را پیدا کرد. فراموش نکنیم که چیزی که ویژگیهای الکتریکی، مغناطیسی، اپتیکی، گرمایی و مکانیکی مواد را تعیین می‌کند رفتار الکترونها در بستر «آتوثانیه» و «نانومتر» است.

1. <https://www.nobelprize.org/uploads/2023/10/advanced-physicsprize2023.pdf>
2. <https://www.nobelprize.org/uploads/2023/10/advanced-chemistryprize2023.pdf>
3. [Attosecond spectroscopy in condensed matter, Nature 449, 1029 \(2007\)](#)
4. [دیود نورگسیل#ال\\_ئی\\_دی\\_آبی](https://fa.wikipedia.org/wiki/دیود_نورگسیل#ال_ئی_دی_آبی)
5. [Zeptosecond birth time delay in molecular photoionization, Science 370, 6514 \(2020\)](#)
6. [Imaging the charge distribution within a single molecule, Nature Nanotech. 7, 227 \(2012\)](#)