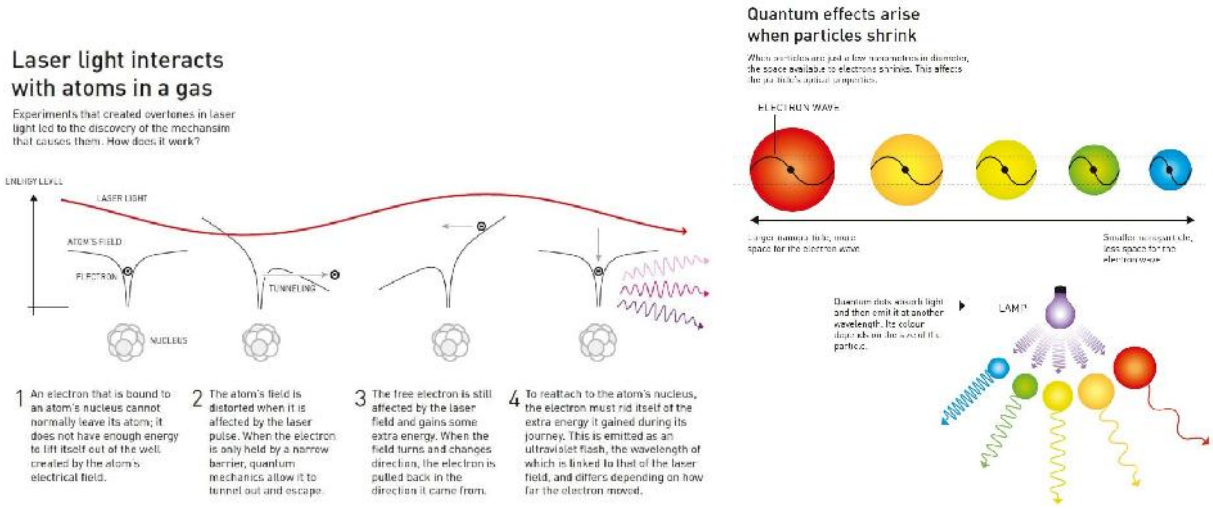
تند و ریز؛ جوایز نوبل فیزیک و شیمی ۲۰۲۳

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.[۱و۲] 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 ثانیه) 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 پالسهای نوری به پهنای حدود ۱۰۰ آتوثانیه، پی‌یر آگوستینی، فرنس کراوس و آن لوییلیه، جایزه نوبل فیزیک ۲۰۲۳ را بردند[۱]. مسیر رسیدن به این دستاورد شگرف طولانی و آموزنده 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، توضیح نظری پدیده «تولید هماهنگهای بالا» هم آسان نبود. حل عددی در چارچوب مکانیک کوانتومی و تلاشهای مستمر تجربی بعدی روشن کرد که این پدیده ناشی از بازگشت الکترون به قید همان هسته‌ای که با تابش لیزر از آن جدا شده بود 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 با بسامدهایی چندین مرتبه بزرگتر اما متناسب با بسامد لیزر اولیه گسیل می‌کند. اگر اتمهای تابش کننده همدوس (هم‌گام) شوند، از تداخل آنها پالسهای کوتاه 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 که البته خیلی کوتاهتر از دوره تناوب لیزر اولیه (فمتوثانیه) است. در گام بعدی، جدا کردن یک تک پالس از بقیه پالسهای فوق‌کوتاه و اندازه‌گیری دقیق پهنای زمانی آن، کاری دشوار و پیشرفتی خلاقانه‌ای بود. امروزه تولید و به‌کارگیری پالسهای نوری آتوثانیه‌ای دیگر 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 که به عنوان یک کاربرد بالقوه در تشخیص پزشکی مطرح است. با دسترسی به پالسهای 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 غالبا فقط اثر متوسط آن آشکار می‌شود. 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، پالسهای آتوثانیه‌ای هم به ما امکان ردیابی جابجا شدن الکترونها از یک سر یک مولکول به سر دیگر و یا اندازه‌گیری زمان جدا شدن الکترونها از قید هسته اتم را داده است: با تاباندن دو پالس آتوثانیه‌ای پشت سرهم به سطح تنگستن (اولی تحریک کننده 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 پالسهای نوری آتوثانیه‌ای «مشاهده» کرد.



https://www.nobelprize.org\

از سوی دیگر کشف و کنترل‌پذیر کردن تولید ساختارهای حالت جامد در ابعاد حدود ده نانومتر (نقاط 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: دیود نورگسیل (LED، موضوع جایزه نوبل فیزیک ۲۰۱۴) نور آبی تولید می‌کند [۴] که بخشی از آن به کمک نقاط کوانتومی (Q) جذب و به جایش نور قرمز و سبز تولید می‌شود. «وابسته به اندازه بودن» ویژگیهای نقاط 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 یک‌دست 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.

در نتیجه بیش از چهار دهه تلاش گروه‌های پژوهشی و شرکتهای دانش‌بنیان، توانایی‌های تجربی و نظری در هر دو زمینه مربوط به این دو جایزه نوبل رشد چشمگیری داشته 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 اندازه‌گیری کرد. 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 بپیماید[۵]. جالب است که همزمان قدرت تفکیک فضایی میکروسکوپهای نیروی اتمی امروزی هم به کسری از آنگستروم رسیده است و می‌توانند توزیع فضایی اوربیتالها را با جزئیات به تصویر بکشند [۶]. به عبارتی دیگر نسبت قدرت تفکیک مکانی و زمانی که

فعلا در دسترس ماست تقریباً برابر سرعت نور است. گرچه بر مبنای فیزیک نظری، کوتاهترین بازه زمانی که به طور بنیادی قابل دستیابی است (زمان پلانک) و کوچکترین فاصه 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 این رفتار الکترون‌ها در بستر آتوثانیه و نانومتر است که ویژگیهای الکتریکی، مغناطیسی، اپتیکی، گرمایی و مکانیکی مواد را تعیین می‌کند.

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. https://fa.wikipedia.org/wiki/دیود_نورگسیل#ال‌ئی‌دی_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)

علی صادقی

دانشکده فیزیک دانشگاه شهید بهشتی