مرزهای فیزیک

تازه‌ترین اخبار پژوهشی

دکتر منیژه رهبر

جایزهٔ نوبل فیزیک سال ۲۰۱۸

◀ دونا استریکلند / متولد سال ۱۹۵۹ گوئلف، کانادا
دکترا سال ۱۹۸۲ دانشگاه راچستر ایالات متحده
◀ ژرار مورو / متولد سال ۱۹٤٤ آلبرت ویل فرانسه
دکترا سال ۱۹۷۳ اکول پلی تکنیک، فرانسه
◀ آرتور اشکین / متولد سال ۱۹۲۲، نیویورک
دکترا ۱۹۵۲ دانشگاه کورنل، ایالت متحده

جایزهٔ نوبل فیزیک سال ۲۰۱۸ برای «اختراع‌های خلاقانه در رشتهٔ فیزیک لیزر» به این صورت تقسیم شد که نیمی از آن برای «انبرک‌های نوری و کاربرد آن‌ها در دستگاه‌های زیست‌شناختی» به آرتور اشکین[1] اعطا شد و نیم دیگر به خاطر «روش تولید تپ‌های لیزری بسیار کوتاه و با شدت زیاد» بین ژرارمورو[2] و دونا استریکلند[3] تقسیم‌شد.

اشکین پژوهشگر آزمایشگاه‌های بل در نیوجرسی «انبرک‌های نوری» باریکه‌های کانونی‌شدهٔ نور را اختراع کرده است که می‌توان از آن‌ها برای گرفتن ذرات، اتم‌ها و حتی سلول‌های زنده استفاده کرد و اکنون به طور گسترده برای مطالعه دستگاه‌های زنده به کار می‌رود.

مورو از اکول پلی تکنیک فرانسه و دانشگاه میشیگان و استریکلند از دانشگاه واترلد در کانادا راه را برای توانمندترین لیزرهایی هموار ساختند که بشر با استفاده از روشی به وجود آورده است که باریکه نور را ابتدا می‌کشد و سپس تقویت می‌کند.

میلیون‌ها نفر هر روز از دیسک گردان‌های نوری، چاپگرهای لیزری و اسکنرهای نوری استفاده می‌کنند. میلیون‌ها نفر مورد جراحی لیزری قرار می‌گیرند. بنابراین لیزر در واقع یکی از مثال‌های بارزی است که نشان می‌دهد چگونه یک کشف علمی زندگی روزمرهٔ ما را دگرگون ساخته است.

استریکلند سومین زنی است که جایزهٔ نوبل فیزیک را دریافت می‌کند. پیش از او، ابتدا ماری کوری در سال ۱۹۰۳ (برای کار روی پرتوزایی) و سپس ماریا گوپرت مایر در سال ۱۹۶۳ (برای کار روی ساختار هستهٔ اتم) این جایزه را دریافت کرده بودند.

اشکین ۹۶ ساله مسن‌ترین فردی است که تاکنون جایزهٔ نوبل گرفته است. او هنوز هم سخت روی پروژه‌هایش کار می‌کند. از سال ۱۹۶۰ که لیزر اختراع شد، دانشمندان حدس می‌زدند که می‌توان از انرژی این باریکه‌های متمرکز برای جابه‌جا کردن اجسام استفاده کرد، اما این موضوع برای مدتی طولانی به صورت موضوعی علمی - تخیلی باقی ماند. اشکین با مطالعات گسترده خود متوجه شد که می‌توان اجسام را به طرف مرکز باریکه که تابش شدید است کشید و با کانونی کردن بیشتر نور توسط یک عدسی «تله‌ای نوری» به وجود آورد که جسم در مرکز آن معلق باشد. اشکین از این روش ابتدا برای نگه داشتن یک ذره، سپس یک اتم، و سرانجام در سال ۱۹۸۷ برای گرفتن یک باکتری استفاده کرد. اشکین حتی نشان داد که از این ابزار می‌توان برای ورود به یک سلول بدون آسیب رساندن به دستگاه زندهٔ آن استفاده کرد.

مورو و استریکلند که با هم در دانشگاه راچتر کار می‌کردند می‌خواستند مسئله‌ای را حل کنند که پژوهشگران لیزر را دهه‌ها به خود مشغول کرده بود: باریکه‌های لیزر با شدت زیاد ماده‌ای را که برای تقویت آن‌ها به کار می‌رفت نابود می‌کردند. مثل آن بود که دانشمندان آب را در ظرفی بجوشانند که تاب تحمل دماهای زیاد را نداشت.

این پژوهشگران روشی ظریف را ابداع کردند که آن را «تقویت مداوم تپ» نامیدند. آن‌ها ابتدا باریکه را با یک تار نوری به طور یک مایل گسترش می‌دادند تا شدت آن را کم کنند و سپس پیش از متراکم کردن آن به صورت یک تپ بسیار کوتاه و توانمند که فقط کسری از ثانیه دوام می‌آورد، آن را تا سطح مطلوب تقویت‌می‌کردند.

در آن زمان استریکلند دانشجوی تحصیلات تکمیلی بود و مقاله‌ای که در سال ۱۹۸۵ این دستاورد را اعلام کرد اولین مقالهٔ علمی او بود.

پی‌نوشت‌ها
1. Arthur Ashkin
2. Gerard Mourou
3. Donna Strickland
4. Maria Goeppert - Mayer
5. Marie - Curie

اختراع‌هایی که امسال مورد تشویق قرار گرفتند فیزیک لیزر را متحول ساخته‌اند. اجسام بی‌نهایت کوچک و فرایندهای بسیار سریع اکنون به صورتی جدید ظاهر می‌شوند. نه‌تنها فیزیک، بلکه شیمی، زیست‌شناسی و پزشکی نیز اکنون دارای وسایل دقیق برای کار در پژوهش‌های بنیادی و کاربردهای عملی شده‌اند.

آرتور اشکین انبرک‌های نوری را اختراع کرد که با انگشتان متشکل از باریکه‌های لیزری خود ذرات، اتم‌ها و مولکول‌ها را می‌گیرند. همچنین می‌توانند ویروس‌ها، باکتری‌ها و دیگر سلول‌های زنده را هم بگیرند، و بدون آسیب رساندن به آن‌ها مورد بررسی قرار دهند. انبرک‌های اشکین موقعیت‌های کاملاً جدیدی را برای مشاهده و کنترل تشکیلات زندگی فراهم ساخته است.

ژرار مورو و دونا استریکلند راه را برای تولید تپ‌های لیزری ساخت بشر که بسیار کوتاه و دارای بیشترین شدت است هموار ساختند، روش ابداعی ایشان زمینه‌های پژوهش جدید را فراهم آورده است که بیشترین کاربردها را در پزشکی و صنعت دارد، مانند میلیون‌ها جراحی چشم که همه ساله با باریکه‌های لیزر بسیار نوک‌تیز انجام می‌شود.

سفر در باریکه‌های نور

آرتور اشکین رویایی داشت؛ تصور کنید که بتوان از باریکه‌های نور برای جابه‌جا کردن اجسام استفاده کرد. در سریال تلویزیونی پیشتازان فضا که در سال ۱۹۶۰ شروع شد امکان استفاده از یک باریکه نور برای پیدا کردن و آوردن اجسام، حتی سیارک‌ها، بدون لمس کردن آن‌ها وجود داشت. البته، این موضوع کاملاً علمی ـ تخیلی به نظر می‌رسد. می‌توانیم حس کنیم که باریکه‌های نور خورشید حامل انرژی‌اند ـ در نور آفتاب گرم می‌شویم ـ گرچه فشار این باریکه برای اینکه حتی یک سیخونک کوچک را حس کنیم بسیار کم است. اما آیا نیروی آن برای به حرکت درآوردن ذرات بسیار کوچک و اتم‌ها کافی نیست؟

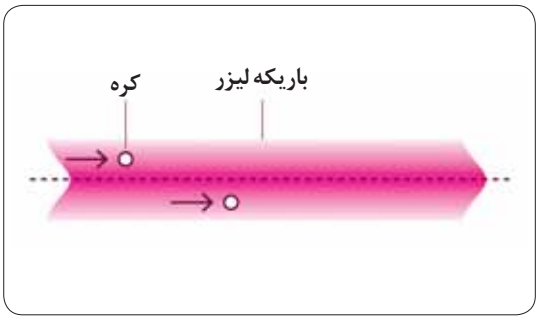
بلافاصله پس از اختراع اولین لیزر در سال ۱۹۶۰، اشکین در آزمایشگاه‌های بل در خارج نیویورک، شروع به آزمایش با این ابزار جدید کرد. در لیزر، برخلاف نور سفید معمولی که در آن مخلوطی از همهٔ رنگ‌های رنگین‌کمان وجود دارد و در همه جهت‌ها پخش می‌شود، امواج نور به‌صورت همدوس حرکت می‌کنند.

اشکین متوجه شد که لیزر ابزاری کامل برای به دست آوردن باریکه‌های نور جهت به حرکت درآوردن ذرات است. او آن را به کره‌های شفاف میلی‌متری تاباند و البته، کره‌ها بلافاصله به حرکت درآمدند. همزمان با آن، اشکین با تعجب دریافت که کره‌ها به طرف مرکز باریکه، که شدت آن بیشینه بود، کشیده می‌شوند. توجیه این موضوع آن است که باریکه لیزر هر چقدر هم که نوک‌تیز باشد، شدت آن از مرکز به طرف لبه‌ها کم می‌شود. بنابراین، فشار تابش نور لیزر به ذرات هم تغییر می‌کند و آن‌ها را به وسط باریکه‌ای که آن‌ها را نگه داشته است می‌راند.

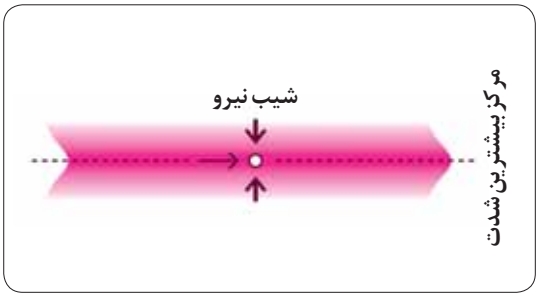
اشکین برای نگه داشتن ذرات در جهت باریکه، یک عدسی قوی را برای کانونی کردن نور لیزر به‌کار برد. در نتیجه ذرات به نقطه‌ای کشیده شدند که بیشترین شدت را داشت. به این ترتیب که یک تله نوری به وجود آمد، این تله به انبرک‌های نوری معروف شد.

اشکین تله نوری‌اش را به وجود می‌آورد

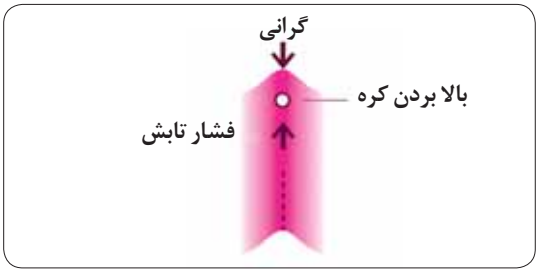
۱. کره‌های کوچک شفاف با تاباندن نور لیزر به آن‌ها به حرکت درمی‌آیند. سرعت آن‌ها با برآورد نظری اشکین متناظر است، که نشان می‌دهد درواقع فشار تابش، آن‌ها را به پیش می‌راند.



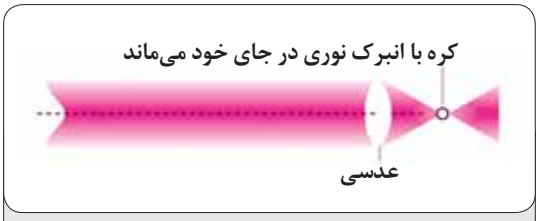
۲. یک اثر غیرمنتظره شیب نیرویی بود که کره‌ها را به مرکز باریکه می‌راند که شدت نور در آنجا بیشینه بود. زیرا با حرکت به طرف خارج شدت کم می‌شود و مجموع همه نیروها کره‌ها را به مرکز باریکه می‌راند.



۳. اشـــکین با گرفتن باریکه لیزر به طرف بالا کره‌ها را بلند می‌کند. فشار تابش درخلاف جهت گرانی است.



۴. باریکه لیزر با یک عدســی کانونی می‌شود. نور، ذرات و حتی باکتری‌های زنده و سلول‌ها را با انبرک نوری می‌گیرد.



▲ شـــکل ۱. اشـــکین یک تلهٔ نوری به وجود می‌آورد که به انبرک نوری معروف می‌شود.

نور باکتری‌های زنده را گیر می‌اندازد

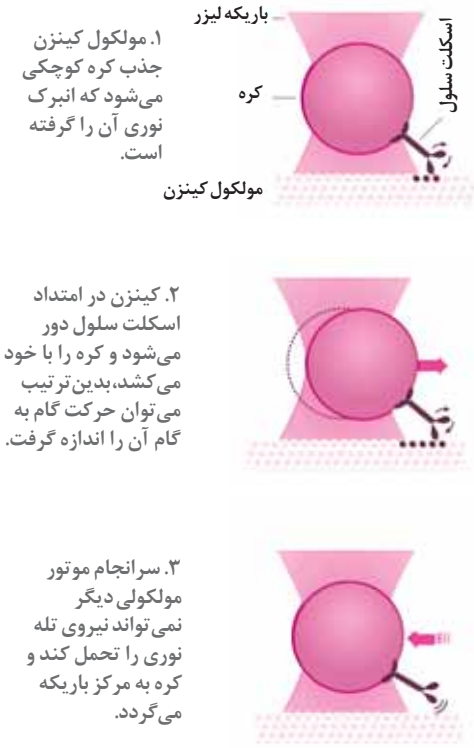
پس از گذشت چند سال و عقب‌نشینی‌های بسیار، تک‌تک اتم‌ها هم در تله به دام افتادند. مشکلات بسیاری وجود داشت: یکی از آن‌ها ایـــن بود که برای گرفتن اتم‌ها، انبرک نوری به نیروهای شـــدیدتر نیاز داشت و مشکل دیگر ارتعاش‌های اتم بـــود. باید راهی برای کند کردن اتم‌هـــا و قرار دادن آن‌ها در ســـطحی کوچک‌تر از نقطه پایان این جمله وجود می‌داشت. همه چیز وقتی در ســـال ۱۹۸۶ در جای خود قرار گرفت که انبرک نوری توانست با روش متوقف کردن و به دام انداختن اتم‌ها ترکیب شود.

در حالی‌که کند کردن اتم‌ها یک حوزهٔ پژوهشـــی خاص شده بود، آرتور اشـــکین کاربرد کاملاً جدیدی برای انبرک‌های نوری خود کشف کرد که مطالعهٔ دستگاه‌های زیست‌شناختی بود. بخت او را به آنجا کشـــاند. در تلاش جهت گیر انداختن ذرات هرچه کوچک‌تر، او از نمونه‌هایی استفاده می‌کرد که تلفیقی از ویروس‌ها بودند. پس از اینکه اتفاقاً آن‌ها را در طول شب باز گذاشت، متوجه شـــد نمونه پر از ذراتی است که این‌سو و آن‌ســـو می‌روند. او با استفاده از یک میکروسکوپ کشف کرد که این ذرات باکتری‌هایی بودند که آزادانه شناور نیستند ـ وقتی این ذرات به باریکهٔ لیزر نزدیک شدند در تله نوری به دام افتادند. با این همه، باریکه لیزر ســـبز او باکتری‌ها را می‌کشت، بنابراین، برای بقای آن‌ها باریکه ضعیف‌تری لازم بود. در نور فروســـرخ نامرئی باکتری‌ها آسیب ندیدند و توانستند در تله تولیدمثل کنند.

در نتیجه، مطالعات اشکین روی باکتری‌های دیگر، ویروس‌ها و سلول‌های زنده متمرکز شد. ســـپس او نشان داد می‌توان بدون آسیب رساندن به غشاء سلول وارد آن شد.

اشـــکین یک دنیا کاربرد جدید برای انبرک‌های نوری خود یافت. یک تحول مهم توانایی بررســـی ویژگی‌های مکانیکی موتورهای مولکولی بـــود، مولکول‌های بزرگی که کار حیاتی در داخل سلول‌ها انجام می‌دهند. اولین موردی که با استفاده از انبرک نوری به دقت نگاشته شد موتور پروتئین، کینزن، و حرکت گام به گام آن در امتداد ریزلوله‌هایی بود که بخشـــی از اسکلت سلول‌اند.

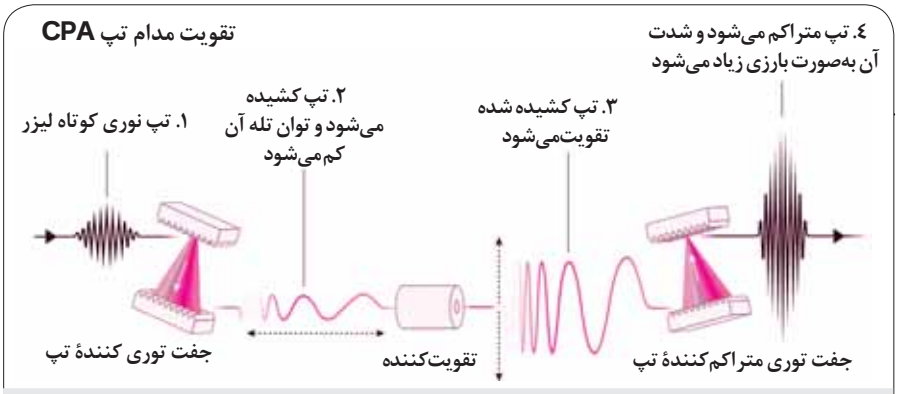
یک موتور مولکولی در داخل تله نوری قدم می‌زند



▲ شکل ۲. انبرک نوری به نگاشت موتور مولکولی کینزن در هنگام حرکت آن در امتداد اسکلت سلول می‌پردازد.

از داســـتان علمی ـ تخیلی تا کاربردهای عملی

در چند سال اخیر، بســـیاری از پژوهش‌های دیگر با الهام از روش‌های اشـــکین و در جهت بهتر شدن آن‌ها صورت گرفته است. توسعه کاربردهای بی‌شمار انبرک‌های نوری اکنون امکان مشـــاهده، چرخاندن، فشار دادن و کشـــیدن را بدون تماس با جسم مورد نظر فراهم ساخته است. در بسیاری از آزمایشگاه‌ها، انبرک‌های نوری وسیلهٔ اســـتاندارد جهت مطالعهٔ فرایندهای



▲ شکل ۳. روش CPA فناوری لیزر را متحول ساخت. این روش امکان گسیل تپ‌های کوتاه نور با استفاده از روشی پیچیده را برای اجتناب از نابودی مادهٔ تقویت‌کننده فراهم ساخت. به جای تقویت مستقیم تپ نوری، این تپ ابتدا برحسب زمان کشیده می‌شود. قلهٔ آن کاهش می‌یابد. سپس تپ تقویت می‌شود و پس از متراکم شدن دارای شدتی بیشتر از مقدار اول می‌شود ـ شدت تپ نور بسیار زیاد می‌شود.

زیست‌شناختی مانند پروتئین‌ها، موتورهای مولکولی، DNA یا زندگی درونی سلول‌ها هستند. تمام‌نگاری اپتیکی در بین جدیدترین این تحولات است که در آن هزاران انبرک، مثلاً برای جدا کردن سلول‌های خونی سالم از سلول‌های آلوده، همزمان مورد استفاده قرار می‌گیرند. چیزی که می‌توان در مبارزه با مالاریا به‌صورت گسترده به‌کار برد.

آرتور اشکین هرگز از شگفت‌زده شدن در مورد توسعه انبرک‌های نور خود دست نکشیده است، ماجرایی علمی ـ تخیلی که اکنون صورت واقعیت به خود گرفته است. بخش دوم جایزهٔ نوبل امسال ـ اختراع تپ لیزری بسیار کوتاه و با شدت زیاد ـ نیز متعلق به پژوهشگرانی است که بصیرتی بلندپروازانه از آینده داشته‌اند.

فناوری جدید برای باریکه‌های بسیار کوتاه با شدت زیاد

الهام‌بخش این پژوهش یک مقالهٔ علمی همگانی بود که رادار و امواج رادیویی بلند آن را توصیف می‌کرد. با این همه، تعمیم دادن آن به ایدهٔ امواج نوری با طول موج کوتاه‌تر، هم به لحاظ نظری و هم در عمل، دشوار بود. کار مربوط به این موفقیت در مقاله‌ای در دسامبر سال ۱۸۹۵ چاپ شد که اولین مقاله علمی دونا استریکلند بود. او از کانادا به دانشگاه راچستر در ایالات متحده آمده بود و باریکه‌های لیزر سبز و قرمزی که مثل درخت کریسمس آزمایشگاه را روشن می‌کردند توجه او را به فیزیک لیزر جلب کرده بود، البته رویاهای استاد راهنمایش ژرار مورو در این مورد بی‌تأثیر نبود. یکی از این رویاها اکنون واقعیت یافته است: ایدهٔ تقویت تپ‌های کوتاه لیزری تا سطح‌های بی‌سابقه.

نور لیزر در یک واکنش زنجیره‌ای تولید می‌شود که در آن ذرات نور یعنی فوتون‌ها، فوتون‌های بیشتری را تولید می‌کنند. این فوتون‌ها به‌صورت تپ‌هایی گسیل می‌شوند. از زمان اختراع لیزر، در تقریباً ۶۰ سال پیش، پژوهشگران در پی آن بودند که تپ‌های با شدت بیشتری را تولید کنند. با این همه، در اواسط سال‌های ۱۹۸۰، به پایان راه رسیدند. زیرا امکان افزایش شدت تپ‌های کوتاه بدون نابود کردن مادهٔ تقویت‌کننده وجود نداشت.

روش استریکلند و مورو که به تقویت مداوم تپ[1]، CPA معروف است هم ساده و هم ظریف است. تپ کوتاهی را در نظر بگیرید آن را در طول زمان بکشید، و دوباره کنار هم بگذارید. وقتی تپی برحسب زمان کشیده شود، قله توان آن پایین می‌آید که به معنی آن است که می‌توان آن را بدون آسیب رساندن به تقویت‌کننده بسیار تقویت کرد، یعنی نور در سطح بسیار کوچکی از فضا متراکم می‌شود و شدت تپ به میزان بسیار زیاد افزایش می‌یابد.

چند سال طول کشید تا استریکلند و مورو همه چیز را به‌طور موفقیت‌آمیز با هم ترکیب کنند. طبق معمول، تعداد زیادی از جزئیات علمی و مفهومی مشکلاتی را به وجود آوردند. به‌عنوان مثال، قرار بود تپ با استفاده از یک کابل نوری به طول ۲/۵ km که تازه به دست آمده بود کشیده شود. اما هیچ نوری از آن بیرون نیامد ـ کابل جایی در وسط آن شکسته شده بود. پس از دردسرهای بسیار، معلوم شد که ۱/۴ km هم کافی است.

یک چالش مهم همگام‌سازی مرحله‌های مختلف در دستگاه بود تا ابزار باریکه‌کش با متراکم‌ساز همساز شود. این مسئله حل شد و استریکلند و مورو در سال ۱۹۸۵ توانستند ثابت کنند که رویای زیبایشان عملاً هم کار می‌کند.

روش CPA که استریکلند و مورو اختراع کردند فیزیک لیزر را متحول ساخت. این روش به‌صورت استانداردی برای تمام لیزرهای با شدت زیاد درآمد و راه ورود به حوزه‌هایی جدید و کاربردهای فراوان در فیزیک، شیمی و پزشکی شد. اکنون می‌توان کوتاه‌ترین تپ‌های لیزری را با بیشترین شدت در آزمایشگاه تولید کرد.

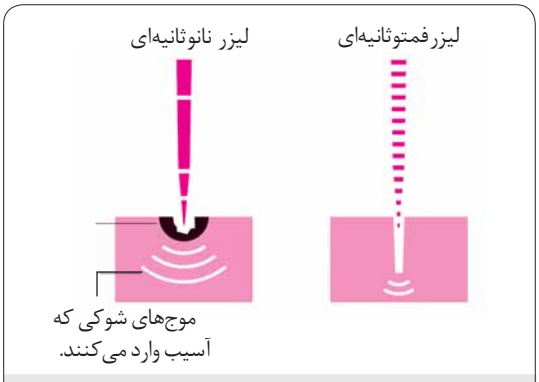
سریع‌ترین دوربین فیلم‌برداری جهان

از این تپ‌های بسیار کوتاه و دارای شدت زیاد چگونه استفاده می‌شود؟ یک حوزهٔ جدید بهره‌برداری از آن‌ها روشن کردن سریع رویدادهایی بود که مدام در جهان میکروسکوپی بین مولکول‌ها و اتم‌ها رخ می‌دهد. وقایع به سرعت اتفاق می‌افتند، به قدری سریع که برای مدتی زیاد فقط توصیف آنچه پیش و پس از آن‌ها رخ می‌دهد امکان‌پذیر بود. اما با تپ‌های فمتوثانیه‌ای، یعنی میلیونیم یک میلیاردیم ثانیه، می‌توان رویدادهایی را مشاهده کرد که پیش از این آنی به نظر می‌رسید.

شدت بسیار زیاد لیزر نور آن را برای تغییر دادن ویژگی‌های ماده مناسب می‌سازد: عایق‌های الکتریکی را می‌توان به رسانا تبدیل کرد؛ و با باریکه‌های بسیار نوک‌تیز می‌توان برش‌ها یا سوراخ‌های بسیار دقیق در مواد ـ حتی ماده زنده ـ به وجود آورد.

به‌عنوان مثال، می‌توان از لیزرها برای ذخیره‌سازی کارآمدتر داده‌ها استفاده کرد، زیرا ذخیره‌سازی نه فقط در سطح ماده بلکه در سوراخ ریز عمیقی که در محیط ذخیره‌سازی به وجود

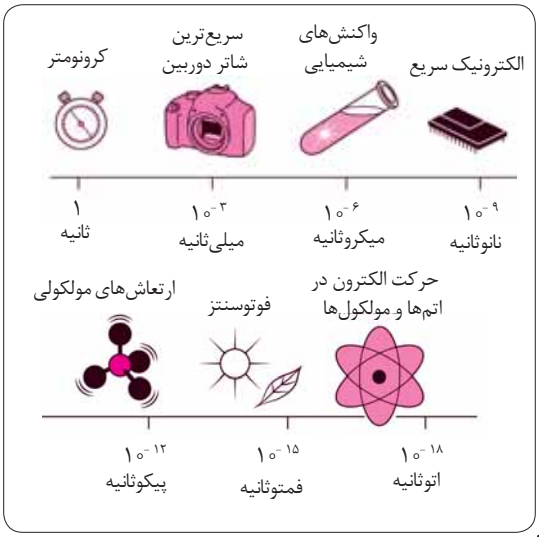
آمده اســت هم امکان‌پذیر است. از این فناوری برای ساخت اســتنت‌های جراحی ـ استوانه‌های میلی‌متری از فلز کشیده شده که رگ‌های خونی، مجاری ادرار و دیگر راه‌های عبور در داخل بدن را گشاد و محکم می‌کند ـ استفاده می‌شود.



▲ شکل ۴. تپ‌های کوتاه از یک لیزر فمتوثانیه‌ای (طرف راست) آســیبی کمتر از تپ‌های یک میلیون بــار طولانی‌تر یک لیزر نانوثانیه‌ای (طرف چپ) به مــاده وارد می‌کنند. از این تپ‌های بسیار کوتاه و با شدت زیاد در جراحی چشم، ذخیره‌سازی داده و ساخت استنت‌های پزشــکی برای جراحی در رگ‌های بدن استفاده می‌شود.

حوزه‌های کاربرد بی‌شــماری وجود دارنــد که هنوز کاملاً بررسی نشده‌اند. هرگام به جلو به پژوهشگران امکان می‌دهد بصیرت بیشــتری دربارهٔ دنیاهای جدید به دست آورند و هم حوزه پژوهش و هم کاربردهای عملی را تغییر دهند.

یکی از حوزه‌های جدید پژوهش که در ســال‌های اخیر به وجود آمده فیزیک اتوثانیه اســت. تپ‌های لیزری کوتاه‌تر از یک صد اتوثانیه (هر اتوثانیــه یک میلیاردیم یک میلیاردیم ثانیه اســت) جهان شــورانگیز الکترون‌ها را نمایان می‌سازد. الکترون‌ها اسب‌های بارکش شــیمی هستند؛ آن‌ها مسئول ویژگی‌هــای اپتیکــی و شــیمیایی همهٔ مــواد و پیوندهای شــیمیایی هستند. اکنون نه‌تنها می‌توان آن را مشاهده کرد، بلکه کنترل آن‌ها هم امکان‌پذیر است.



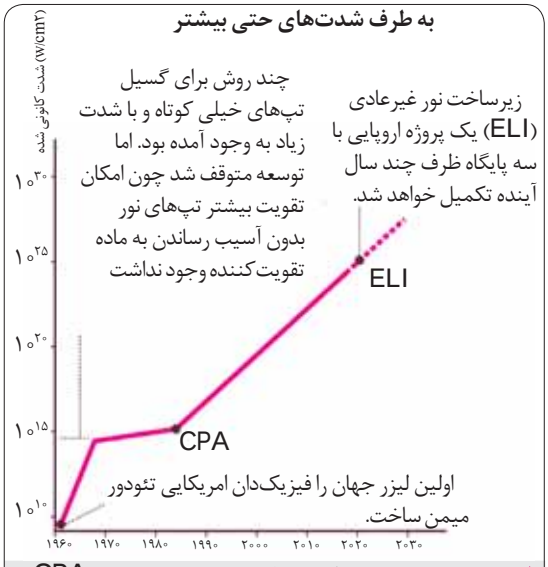
به سوی نور حتی غیرعادی‌تر

بســیاری از کاربردهــای این روش‌های جدیــد در لیزر در انتظار ماست مانند الکترونیک سریع‌تر، سلول‌های خورشیدی کارامدتر، کاتالیزگرهای بهتر، شتابدهنده‌های توانمندتر، منابع جدید انرژی، یا داروهای طراحی شده. تعجبی ندارد که رقابت در فیزیک لیزر بسیار شدید است.

دونا اســتریکلند اکنون کار پژوهش خــود را در کانادا دنبال می‌کند، در حالی‌که ژرار مورو که به فرانســه بازگشــته است، درگیر یــک فعالیت اروپایــی در فناوری لیزر در بین ســایر فعالیت‌هاســت. او بنیان‌گــذار و هدایت‌کنندهٔ توســعهٔ اولیه زیرساخت نور غیرعادی[2] (ELI) است. سه پایگاه در جمهوری چک، مجارستان و رومانی طی چند سال آینده تکمیل خواهند شــد. قله توان پیش‌بینی شده ۱۰ پتاوات است که هم‌ارز یک درخش بسیار کوتاه از صدهزار میلیارد لامپ است.

این پایگاه‌ها در حوزه‌های مختلف تخصص خواهند داشت ـ اتوثانیه در مجارستان، فیزیک هسته‌ای در رومانی و باریکه‌های ذره پرانــرژی در جمهوری چک. امکاناتی حتی توانمندتر در چین، ژاپن، ایالات متحده و روسیه برنامه‌ریزی شده‌اند.

حدس و گمان‌هایی دربــارهٔ گام بعدی وجود دارد: افزایش ده‌برابری توان، تا ۱۰۰ پتاوات، رویاهای مربوط به آیندهٔ لیزر در اینجا متوقف نمی‌شــود. چرا به توان زتاوات (یک میلیون پتاوات، ۱۰۲۱ وات) دست پیدا نکنیم، یا تپ‌های زپتوثانیه‌ای، که با زمــان باورنکردنی 10^{-21} ثانیه هم‌ارزند؟ افق‌های جدید در برابرمان گشوده می‌شــوند، از مطالعات فیزیک کوانتومی در خلأ تــا تولید باریکه پروتون با شــدت زیاد که می‌توانند در از بین بردن ســلول‌های ســرطانی در بدن مورد استفاده قرار بگیرند. با این همه، حتی همین حالا هم این اختراع‌های بلندآوازه امکان آن را فراهم کرده‌اند که در جهت اهداف عالی آلفرد نوبل ـ یعنی بیشــترین منفعت برای بشــر ـ در جهان کوچک مقیاس به کندوکاو بپردازیم.



▲ شــکل ۶. توسعه تپ لیزری با بیشترین شدت. روش CPA امسال به‌عنوان شالوده توسعه انفجاری تپ‌های لیزری با شدت فزاینده پاداش گرفت.

پی‌نوشت‌ها
1. Chirped Pulse Amplification
2. Extreme Light Infrastructure