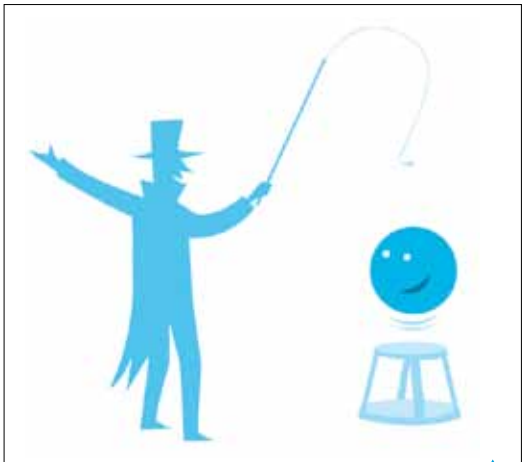
کنترل ذره در جهان کوانتومی

جایزه نوبل فیزیک ۲۰۱۲

منیژه رهبر

کلیدواژه‌ها: کنترل ذره، جهان کوانتومی، جایزه نوبل فیزیک ۲۰۱۲

سرژ آروش[۱] و **دیوید واینلند**[۲] به شکل مستقل از هم روش‌هایی نوین برای اندازه‌گیری و دستکاری تک‌تک ذرات با حفظ سرشت کوانتوم مکانیکی آن‌ها را به گونه‌ای ابداع کرده و توسعه داده‌اند که پیش از این دست‌نیافتنی تصور می‌شد.



▲ **شکل ۱. جایزه نوبل برای تسلط برذرات اهدا شده است. برندگان موفق شده‌اند. تک‌تک ذرات به دام افتاده را وادار سازند تا از قواعد مکانیک کوانتومی پیروی کنند.**

آروش و واینلند با نمایش مشاهدهٔ مستقیم دستگاه‌های کوانتومی بدون از بین بردن آن‌ها، دریچهٔ جدیدی را به دنیای مکانیک کوانتومی باز کردند. آن‌ها با روش‌های تجربی مبتکرانهٔ خود موفق به اندازه‌گیری و کنترل حالت‌های کوانتومی شکننده‌ای شده‌اند که باعث شده است تا حوزهٔ پژوهش آن‌ها اولین گام‌ها را به سوی ساخت رایانه‌های اَبَرسریع مبتنی بر فیزیک کوانتومی بردارد. این روش‌ها به ساخت ساعت‌های بسیار دقیق هم انجامیده است که می‌تواند در آینده مبنایی برای استاندارد جدید زمان، با دقتی بیش از صد برابر ساعت‌های سزیمی فعلی باشد.

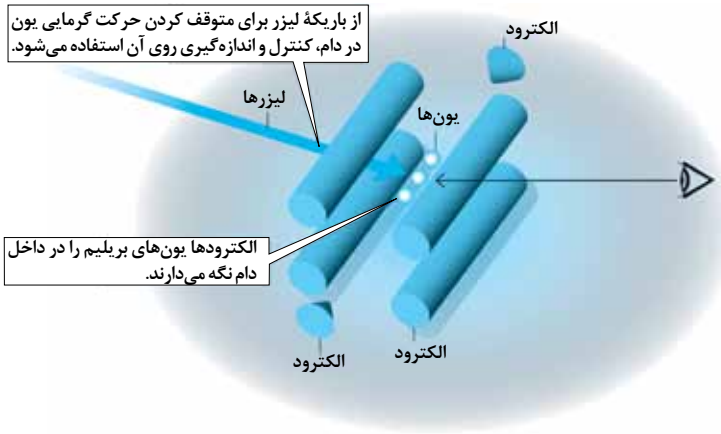
تک‌ذره‌های نور و ماده، دیگر از قانون‌های فیزیک کلاسیک پیروی نمی‌کنند و فیزیک کوانتومی کارها را به دست می‌گیرد. اما تک‌ذره‌ها را نمی‌توان به‌راحتی از محیط اطراف‌شان جدا ساخت و به محض برهم کنش با جهان خارج ویژگی‌های کوانتومی اسرارآمیز خود را از دست می‌دهند. بنابراین بسیاری از پدیده‌های ظاهراً عجیب پیش‌بینی شده توسط مکانیک کوانتومی را نمی‌توان مستقیماً مشاهده کرد و پژوهشگران در گذشته فقط می‌توانستند از آزمایش‌های فکری، برای آشکارسازی این پدیده‌های عجیب و غریب استفاده کنند.

هر دو برنده در حوزهٔ اپتیک کوانتومی کار می‌کنند و بر هم کنش‌های بین نور و ماده را بررسی می‌کنند که از اواسط دههٔ ۱۹۸۰ پیشرفت‌های زیادی در آن صورت گرفته است. روش مورد استفادهٔ آن‌ها ویژگی‌های مشترک زیادی دارد. دیوید واینلند اتم‌های دارای بارالکتریکی، یا یون‌ها را به دام می‌اندازد و آن‌ها را با نور یا فوتون‌ها، کنترل می‌کند و اندازه می‌گیرد. سرژآروش رهیافت مخالف را اختیار می‌کند: او فوتون‌های به دام افتاده، یا ذرات نور، را با فرستادن اتم‌ها به دام کنترل می‌کند و اندازه می‌گیرد.

کنترل تک‌یون‌ها در دام

در آزمایشگاه دیوید واینلند در بولدر، کلرادو[۳]، اتم‌های باردار یا یون‌ها را با احاطه کردن با میدان‌های الکتریکی به دام می‌اندازند. با انجام آزمایش‌ها در خلأ و در دماهای بسیار کم، ذرات از گرما و تابش محیط در امان می‌مانند.

یکی از اسرار روش نوین واینلند هنر به کارگیری باریکه‌های



▲ شکل ۲ . در آزمایشگاه دیوید واینلند در بولدر، کلرادو، اتم‌های دارای بار الکتریکی یا یون‌ها را با محاصره کردن توسط میدان‌های الکتریکی در داخل دام نگه می‌دارند. یکی از اسرار روش نوین واینلند مهارت در هنر استفاده از باریکه‌های لیزر و تولید تپ‌های لیزری است. از یک لیزر برای قرار دادن یون در پایین تراز انرژی آن و امکان بررسی پدیده‌های کوانتومی با یون به دام افتاده شده استفاده می‌شود.

لیـــزر و تولید پتهای لیزری اســـت. یک لیزر بـــرای متوقف کردن حرکـــت گرمایی یـــون در دام به کار می‌رود، و یون را در پایین‌ترین حالت انرژی قرار می‌دهد تا امکان مطالعهٔ پدیده‌های کوانتومی با این یون به دام افتاده فراهم گردد. سپس می‌توان از یک تپ لیزری دقیقاً تنظیم شـــده برای قرار دادن یون در حالت برهم نهی استفاده کرد، که وجود همزمان دو حالت کاملاً متفاوت است. به‌عنوان مثال، یون را می‌توان طوری آماده ســـاخت تا همزمان دو تراز انرژی را اشـــغال کند. در شـــروع کار یون در پایین‌ترین تراز انرژی است و تپ‌لیزر با سیخونکی یون را به طرف تراز بالاتر می‌راند، به‌طوری که در بر هم نهی از حالت‌های انرژی بین دو تراز باقی بماند، و احتمال اینکه به هر یک از آن‌ها برود برابر باشد. به این ترتیب می‌توان بر هم نهشی کوانتومی از حالت‌های انرژی را بررسی کرد.

کنترل تک‌فوتون‌ها در دام

سرژ آروش و گروه پژوهشی او برای نمایان ساختن اسرار جهان کوانتومـــی از روش دیگری اســـتفاده می‌کنند. در آزمایشـــگاه او در پاریس فوتون‌های ریز موج در کاواک کوچکی بین دو آینه به فاصلهٔ حدود سه سانتی‌متر جلو و عقب می‌جهند.

آینه‌ها از مواد اَبَررسانا ساخته شده‌اند و تا دمای نزدیک به صفر مطلق سرد شده‌اند.

ایـــن آینه‌های اَبَررســـانا درخشـــان‌ترین آینه‌هـــای موجود در جهان‌اند و بازتابندگی آن‌ها به اندازه‌ای است که یک فوتون می‌تواند پیش از تلف یا جذب شدن به مدت تقریباً یک دهم ثانیه در کاواک عقب و جلو برود. این طول عمر زیاد به معنی آن اســـت که فوتون مسافت ۴۰/۰۰۰ کیلومتر، یا برابر یک بار گردش دور کرهٔ زمین، را طی کرده باشد. شعاع یک اتم ریدبرگ* در حدود ۱۲۵ نانومتر یعنی تقریباً ۱۰۰۰ برابر اتم معمولی اســـت. این اتم‌های ریدبرگ غول‌آسا به شکل دونات با سرعت‌هایی به دقت انتخاب شده تک‌تک به داخل کاواک فرستاده می‌شوند، به‌طوری که بر هم کنش با فوتون ریزموج به صورتی کاملاً کنترل شده صورت می‌گیرد.

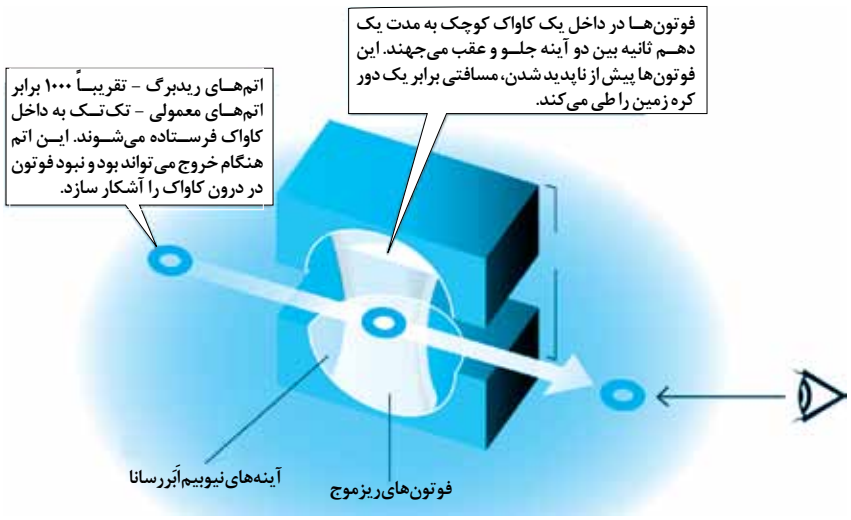
اتم ریدبرگ از کاواک عبور کرده و از آن خارج می‌شود، و فوتون ریزمـــوج را به جا می‌گذارد. اما بر هم کنش بین فوتون و اتم تغییر فازی در حالت کوانتومی اتم به وجود می‌آورد. اگر حالت کوانتومی اتم را یک موج در نظر بگیرید، قله‌ها و فرورفتگی‌های موج جابه‌جا می‌شوند. سپس می‌توان این تغییر فاز را هنگام خروج اتم از کاواک اندازه گرفت و در نتیجه به بود و نبود فوتون در داخل کاواک پی برد. اگر فوتونی وجود نداشته باشد، تغییر فازی صورت نمی‌گیرد. به این ترتیب آروش می‌تواند بدون از بین بردن فوتون روی آن اندازه‌گیری انجام دهد.

آروش و گروهـــش می‌تواننـــد فوتون‌هـــای درون کاواک را به همان ترتیبی بشـــمارند کـــه کودکی تیله‌هـــای درون یک پیاله را می‌شمارد. شاید این کار آسان به نظر برسد، اما به مهارت و چالاکی خارق‌العاده‌ای نیاز دارد زیرا فوتون‌ها، برخلاف تیله‌های معمولی، در تمـــاس با جهان خارج بلافاصله از بین می‌روند. آروش و همکارانش برای شـــمارش فوتون‌ها روش‌هایی را ابـــداع کرده‌اند که تحول هر حالت کوانتومی را در زمان واقعی گام‌به‌گام دنبال می‌کند.

پارادوکس‌های مکانیک کوانتومی

مکانیک کوانتومی جهانی میکروسکوپی را توصیف می‌کند که نمی‌توان با چشم غیرمسلح دید، و در آن رویدادها برخلاف انتظار و تجربه های ما از پدیده‌های فیزیکی در جهان کلاسیک ماکروسکوپی است. فیزیک در جهان کوانتومی دارای نوعی عدم قطعیت و کاتورگی ذاتی است. یک مثال این رفتار متضاد برهم نهشی است، که در آن یک ذرهٔ کوانتومی می‌تواند هم‌زمان در چند حالت مختلف باشـــد. معمولاً فکر نمی‌کنیم که یک تیله هم‌زمان هم «اینجا» باشد و هم «آنجا»، اما اگر تیله کوانتومی بود می‌توانست چنین باشد. بر هم نهی کوانتومی این تیله دقیقاً به ما می‌گوید که اگر بخواهیم مکان آن را اندازه بگیریم، چقدر احتمال دارد که اینجا یا آنجا باشد.

چـــرا هرگـــز از این واقعیت‌هـــای عجیب در جهـــان خود آگاه



شـکل ۳ .در آزمایشگاه سـرژ آروش در پاریس، در خلأ و دمای نزدیک به صفر مطلق، فوتون‌های ریزموج در یک کاواک کوچک بین دو آینه جلو و عقب می‌جهند. آینه‌ها چنان بازتابنده‌اند که یک فوتون به مدت یک‌دهم ثانیه پیش از نابودی دوام می‌آورد. در طی این مدت دستکاری‌های کوانتومی زیادی را می‌توان بدون نابود کردن روی آن انجام داد.

نمی‌شویم؟ چرا نمی‌توانیم بر هم نهش تیلهٔ کوانتومی را در زندگی روزمره مشاهده کنیم؟

اروین شرودینگر[۴] فیزیک‌دان اتریشی برندهٔ جایزه نوبل (فیزیک ۱۹۳۳) با این پرسـش دسـت‌وپنجه نرم کرد. او مثل بسیاری دیگر از پیشـگامان نظریهٔ کوانتومی، کوشید که این نوع مفاهیم را درک و تفسـیر کند. او در سال ۱۹۵۲ نوشت: «ما هرگز با تنها یک الکترون یا اتم یا مولکول (کوچک) آزمایش نمی‌کنیم. گاهی در آزمایش‌های فکری فرض می‌کنیم که این کار صورت می‌گیرد؛ این موضوع همواره پیامدهای مضحکی به دنبال دارد... .»

شـرودینگر بـرای پیامدهـای مضحـک حرکت بیـن جهان میکروسکوپی فیزیک کوانتومی و جهان روزمره، یک آزمایش فکری با گربه را توصیف کرد. گربهٔشرودینگر کاملاً جدا از جهان خارج در درون جعبه‌ای قرار دارد. این جعبه حاوی یک شیشهٔ سیانید کشنده نیز هست که پس از واپاشی یک اتم پرتوزا، که آن هم درون جعبه است، آزاد می‌شود. واپاشـی پرتوزا از قانون‌های مکانیک کوانتومی پیروی می‌کند که طبق آن مادهٔ پرتوزا در بر هم نهشی از حالت‌های واپاشیده و هنوز وانپاشیده قرار دارد. بنابراین، گربه هم باید در برهم نهشی از حالت‌های زنده و مرده باشد. حال اگر زیرچشمی به درون جعبه نگاه کنید، این خطر وجود دارد که گربه را بکشید، زیرا برهم نهش کوانتومی به بر هم کنش با محیط چنان حسـاس اسـت که کوچک‌ترین تلاش در در جهت مشاهدهٔ گربه بلافاصله باعث خواهد شـد که «حالت گربه» به یکی از دو نتیجهٔ ممکن - زنده یا مرده - «فرو بپاشـد». از نظر شرودینگر این آزمایش فکری به نتیجه‌گیری نامعقول می‌انجامد، و گفته‌اند که بعدها سعی کرد به‌خاطر افزودن به سردرگمی کوانتومی عذرخواهی کند.

هر دو برندهٔ جایزهٔ نوبل سال ۲۰۱۲ موفق به نگاشت حالت گربه در برخورد با جهان خارج شـده‌اند. آن‌ها آزمایش‌های مبتکرانه‌ای را ابداع کردند و توانسـتند به تفصیل نشـان دهنـد چگونه عمل اندازه‌گیری درواقع باعث می‌شـود که حالت کوانتومی فرو بپاشد و ویژگی بر هم نهشـی خود را از دسـت بدهد. آروش و واینلند ذرات کوانتومی را به دام انداختند و آن‌ها را در حالت‌های برهم نهشی قرار دادند. این اجسام کوانتومی واقعاً مثل گربه ماکروسکوپی نیستند، اما هنوز با توجه به استانداردهای کوانتومی کاملاً بزرگ هستند.

در داخـل کاواک ریزموج آروش، فوتون‌ها هم‌زمان مانند گربه در حالت‌های با فاز مخالف قرار می‌گیرند، مثل کرونومتری که عقربهٔ آن هم‌زمان بتواند در دو جهت سـاعتگرد و پاد سـاعتگرد بچرخد. میـدان ریزموج داخل کاواک سـپس با اتم‌هـای ریدبرگ کاویده می‌شود. نتیجه یک اثر کوانتومی نامفهوم دیگر به نام درهم تنیدگی است. اروین شرودینگر در هم تنیدگی را هم توصیف کرده است که می‌تواند بین دو یا چند ذرهٔ کوانتومی رخ دهد که در تماس مستقیم با یکدیگر نیستند اما هنوز می‌توانند ویژگی‌های یکدیگر را بخوانند و برهم تأثیر بگذارند. در هم تنیدگی میدان ریزموج و اتم‌های ریدبرگ به آروش امکان داد تا نقشه مرگ و زندگی حالت گربه را مانند درون کاواک رسـم و آن را گام‌به‌گام، اتم‌به‌اتم، در گذر از حالت‌های برهم نهش کوانتومی تا حالت خوش تعریف فیزیک کلاسیک دنبال کند.

در آستانهٔ انقلاب رایانه‌ای جدید

یک کاربرد ممکن دام‌های یونی که بسیاری از دانشمندان رؤیای آن را در سر می‌پرورانند رایانهٔ کوانتومی است. در رایانه‌های کلاسیک کنونی کوچک‌ترین واحد اطلاعاتی یک بیت است که می‌تواند مقدار ۱ یا ۰ را اختیار کند. اما، در رایانهٔ کوانتومی واحد بنیادی اطلاعات - بیت یا کوبیت کوانتومی - می‌تواند هم‌زمان ۱ و ۰ باشد. دو بیت کوانتومی می‌توانند هم‌زمان چهار مقـدار - ۰۰، ۰۱، ۱۰، و ۱۱- را اختیـار کنند و هر کوبیت اضافی مقدار حالت‌های ممکن را دوبرابر می‌کند. برای n بیت کوانتومی حالت‌های ممکن 2^n اسـت و رایانهٔ کوانتومی فقط بـا ۳۰۰ کوبیت می‌تواند هم‌زمان 2^{300} مقدار را نگه

شکل ۴ . گربهٔ شرودینگر. در سال ۱۹۳۵ شرودینگر فیزیک‌دان اتریشی و برندهٔ جایزه نوبل آزمایش فکری گربهٔ درون جعبه را توصیف کرد تا پیامدهای حرکت بین جهان میکروسکوپی فیزیک کوانتومی و جهان روزمره را نشان دهد. یک دستگاه کوانتومی، ذرات، اتم‌ها و دیگر چیزهای جهان میکروسکوپی می‌تواند هم‌زمان در دو حالتی باشد که فیزیک‌دان‌ها آن را حالت‌های برهم‌نهی می‌نامند. در آزمایش فکری شرودینگر گربهٔ در جعبه در حالت بر هم‌نهی است و در نتیجه باید هم مرده باشد و هم زنده. حال اگر زیرچشمی به درون جعبه بنگرید، این خطر وجود دارد که گربه را بکشید زیرا حالت برهم‌نهی کوانتومی به برهم کنش با محیط بسیار حساس است و کوچک‌ترین تلاش در جهت مشاهدهٔ گربه باعث می‌شود که حالت گربه بلافاصله به یکی از دو نتیجهٔ ممکن- زنده یا مرده- «فرو بپاشد».

شکل ۵ .ساعت اپتیکی - یک استفاده عملی از یون‌های به دام افتاده، ساخت ساعتی است که صدها بار از ساعت‌های مبتنی بر سزیم که فعلاً استاندارد اندازه‌گیری زمان است دقیق‌ترند. از دو یون، یکی به عنوان ساعت و دیگری برای خواندن ساعت بدون از بین بردن حالت و یا از دست دادن تیک آن، استفاده می‌شود.

دارد که بیش از تعداد اتم‌های موجود در عالم است.

گروه واینلند اولین گروه در جهان بود که عملیات کوانتومی با دو بیت کوانتومی را به نمایش گذاشت. چون عملیات کنترل با چند کوبیت قبلاً انجام شده است، اصولاً دلیلی وجود ندارد که فکر کنیم این عملیات با کوبیت‌های بیشتر امکان‌پذیر نباشند. اما ساخت این رایانه کوانتومی چالش عملی عظیمی است. زیرا دو شرط مخالف هم را ایجاب می‌کند: کوبیت‌ها باید به اندازهٔ کافی از محیط اطراف خود جدا باشند تا ویژگی‌های کوانتومی‌شان از بین نرود، در عین حال باید بتوانند با جهان خارج ارتباط برقرار کنند تا نتیجهٔ محاسبات را به آن منتقل کنند. شاید رایانهٔ کوانتومی در این قرن ساخته شود. اگر چنین شود، زندگی ما را همان‌قدر تغییر خواهند داد که رایانه‌های کلاسیک در قرن گذشته آن را متحول ساختند.

ساعت‌های جدید

دیوید واینلند و اعضای گروهش از یون‌های به دام افتاده برای ساخت ساعتی استفاده کرده‌اند که صدها بار از ساعت‌های اتمی فعلی مبتنی بر سزیم که استاندارد اندازه‌گیری زمان‌اند دقیق‌تر است. زمان با تنظیم یا هم‌زمان کردن همهٔ ساعت‌ها با ساعت استاندارد تنظیم می‌شود. ساعت‌های سزیمی در گسترهٔ ریزموج کار می‌کنند، در حالی که ساعت‌های یونی واینلند نور مرئی را به‌کار می‌گیرند، در نتیجه نامشان ساعت‌های اپتیکی است. یک ساعت اپتیکی می‌تواند فقط از یک یا دو یون به دام افتاده تشکیل شده باشد. با دو یون، یکی از آن‌ها به‌عنوان ساعت به کار می‌رود و دیگری برای خواندن آن بدون از بین بردن حالت یا از دست رفتن تیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. دقت ساعت اپتیکی بهتر از یک بخش در 10^{17} است، یعنی اگر کسی در شروع عالم در مهبانگ حدود ۱۴ میلیارد سال پیش شروع به اندازه‌گیری زمان کرده بود، اختلاف ساعت او با مقدار واقعی اکنون فقط حدود پنج ثانیه می‌شد، با این اندازه‌گیری دقیق زمان، می‌توان برخی پدیده‌های ظریف و زیبای طبیعت، مانند تغییرات جریان زمان، تغییرات اندک گرانی و بافت فضا زمان را مشاهده کرد. طبق نظریهٔ نسبیت اینشتین، زمان از حرکت و گرانی تأثیر می‌پذیرد. هرچه سرعت بیشتر و گرانی شدیدتر باشد، گذر زمان کندتر می‌شود، شاید متوجه این آثار نشویم، اما آن‌ها در واقع به‌صورت بخشی از زندگی روزمرهٔ ما در آمده‌اند. وقتی با استفاده از GPS راه خود را پیدا می‌کنیم متکی به سیگنال‌های زمانی هستیم که آن‌ها را ماهواره‌هایی با ساعت‌هایی می‌فرستند که مدام مدرج می‌شوند، زیرا گرانی در ارتفاع چندصدکیلومتری تا اندازه‌ای ضعیف‌تر است. با ساعت اپتیکی می‌توان اختلاف گذر زمان را وقتی اندازه گرفت که سرعت ساعت کمتر از ۱۰ متردر ثانیه، یا گرانی بر اثر اختلاف ارتفاع فقط ۳۰ سانتی‌متر تغییر کرده است.

پی‌نوشت

1. Serge Haroche
2. David J.Wineland
3. Boulder, Colorado

* اتم ریدبرگ اتمی است که الکترون‌های ظرفیت آن در حالت با عدد کوانتومی اصلی، n، بسیار بزرگ قرار دارند. در این اتم الکترون‌های مرکزی عملاً حفاظی برای الکترون‌های خارجی در برابر میدان هسته به‌وجود می‌آورند. در نتیجه الکترون خارجی معمولاً هسته‌ای با فقط یک الکترون «می‌بیند»(م)

۴. Erwin schrodinger

برای اطلاعات بیشتر می‌توانید از منابع زیر استفاده کنید.

http:/kva.se
http:/nobelprize.org
www.nobelmuseet.se
- **Monroe,C.R and Wine land D.J.** (2008) Quantum Computing with ions, Scientific American, August.
- **Yam**, P (1997) Bringing Schrodinger Cat to Life, Scientific American, June.

برندگان

۱. سرژ آروش شهروند فرانسه، متولد ۱۹۴۴، کازابلانکا، مراکش. Ph.D سال ۱۹۷۱ از دانشگاه پی‌یرومماری کوری، پاریس، فرانسه. استاد کالج دوفرانس و اکول نرمال سوپریور، پاریس، فرانسه.
www.college-de-France.Fr/site/en-Serge-haroche/biography.htm

۲. دیوید.جی.واینلند شهروند ایالات متحده. متولد سال ۱۹۴۴ در میلواکی. ایالات متحده. Ph.D سال ۱۹۷۰ از دانشگاه هاروارد، ماساچوست، ایالت متحده، رهبر گروه و عضو NIST انستیوی ملی استانداردها و فناوری (NIST) و دانشگاه کلرادو در بولدر
www.nist.gov/pm1/div688/grp10/index.cfm