مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۲۵، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۴۰۴

CC BY NC

سرمقاله

جایزه نوبل فیزیک ۲۰۲۵، به چه کسانی و در چه موضوعی اعطا شد؟

در ۷ اکتبر ۲۰۲۵، سه دانشمند برجسته، جان کلارک[۱]، میشل دیوورت[۲] و جان مارتینیس[۳]، به‌عنوان برندگان جایزه نوبل فیزیک معرفی شدند. این جایزه به پاس پژوهش‌های پیشگامانه‌ای به آنان اهدا شد که نشان داد پدیده‌ها و قوانین حاکم بر فیزیک کوانتومی، که معمولاً به مقیاس‌های زیراتمی محدود می‌شوند، می‌توانند در سامانه‌هایی به اندازه‌ای بزرگ که با چشم غیرمسلح نیز قابل مشاهده‌اند، تحقق یابند.

نتایج اولیه این تحقیقات در قالب سه مقاله در مجله Physical Review Letters طی سال‌های ۱۹۸۴ و ۱۹۸۵ منتشر شد. هدایت این فعالیت‌های پژوهشی بر عهده جان کلارک، استاد بازنشسته دانشگاه کالیفرنیا در برکلی، بود. ایشان همکاری فعالی با پروژه تجربی Axion Dark Matter دارند؛ پروژه‌ای که در آن از ابزارهای ابررسانای کوانتومی برای آشکارسازی نوع جدیدی از ذرات بنیادی در کیهان بهره گرفته می‌شود. افزون بر این، جان کلارک مخترع دستگاه SLUG[4] است که برای جداسازی و کاهش نوفه‌های مایکروویوی کاربرد دارد.

میشل دیوورت در زمان انجام این پژوهش‌ها پژوهشگر پسادکتری در گروه جان کلارک بود و بعدها به‌عنوان استاد در دانشگاه ییل فعالیت کرد و اکنون بازنشسته است. تمرکز اصلی تحقیقات ایشان بر مدارهای الکتریکی کوانتومی بوده و نقش مهمی در توسعه آزمایش‌های بنیادین در این حوزه ایفا کرده است.

جان مارتینیس نیز در آن زمان دانشجوی دکتری بود و ساخت سامانه آزمایشی مورد نیاز این پژوهش‌ها را بر عهده داشت. ایشان در سال ۱۹۸۷ فارغ‌التحصیل شد و پس از گذراندن دوره پسادکتری در گروه میشل دیوورت در فرانسه و فعالیت در چند مؤسسه تحقیقاتی، در سال ۲۰۰۴ به دانشگاه کالیفرنیا در سانتا باربارا پیوست. در آنجا آزمایشگاهی پیشرو در زمینه ساخت و مطالعه کیوبیت‌های کوانتومی بنیان نهاد.

جان مارتینیس در سال ۲۰۱۴ موفق به دریافت جایزه Fritz London شد. در همان سال، شرکت گوگل ایشان و اعضای گروه تحقیقاتی‌شان را به استخدام درآورد و پژوهش در زمینه کیوبیت‌های کوانتومی در قالب پروژه‌های صنعتی ادامه یافت. در سال ۲۰۲۱ نیز جایزه John Stewart Bell به ایشان اهدا شد. پس از آن، وی فعالیت‌های علمی خود را در شرکت خصوصی QoLab، که خود بنیانگذاری کرده و در حوزه محاسبات کوانتومی فعال است، ادامه داد.

در فیزیک مادهٔ چگال، نمونه‌های متعددی از مواد و سامانه‌هایی وجود دارند که در مقیاس ماکروسکوپی، رفتارهای کوانتومی خود را به‌روشنی بروز می‌دهند. از جمله این سامانه‌ها می‌توان به ابررساناها، ابرشاره‌ها و شبکه‌های بلوری اشاره کرد. با این حال، یک پرسش بنیادین مطرح می‌شود: آیا می‌توان شیئی ماکروسکوپی ساخت که به‌صورت یکپارچه رفتار کوانتومی از خود نشان دهد؟ به بیان دیگر، آیا ممکن است سامانه‌ای وجود داشته باشد که کل آن همانند یک اتم منفرد عمل کند؟

---

۱. John Clarke

۲. Michel Devoret

۳. John Martinis

۴. Superconducting Low-Inductance Undulatory Galvanometer

این پرسش نخستین‌بار در سال‌های ۱۹۷۹ و ۱۹۸۰ توسط آنتونی لگت[۱]، برنده جایزه نوبل فیزیک سال ۲۰۰۳، مطرح شد. وی در مجموعه‌ای از مقالات نظری، با انجام محاسبات نسبتاً دقیق و در نظر گرفتن اثرات اتلاف انرژی و ناهمدوسی، امکان مشاهده پدیدهٔ تونل‌زنی کوانتومی در یک سامانهٔ ماکروسکوپی را بررسی کرد. لگت در این مطالعات نشان داد که هرچند تحقق تجربی چنین الگویی از نظر مهندسی و کنترل شرایط آزمایشگاهی بسیار دشوار است، اما از دیدگاه اصول فیزیکی، غیرممکن به شمار نمی‌آید.

دستگاهی که بعدها توسط برندگان جایزه نوبل طراحی و ساخته شد، شامل یک اتصال جوزفسون با ابعاد تقریبی ۱۰×۱۰ میلی‌متر مربع بود که درون محفظه‌ای مسی قرار داشت. این محفظه به یک منبع مایکروویو و یک منبع تغذیه جریان الکتریکی متصل می‌شد. برای کاهش اثرات نوفه و نوسانات ناخواسته، کل سامانه توسط محیطی حاوی پودر مس احاطه شده بود تا میرایی و اغتشاشات الکترومغناطیسی به حداقل برسد.

انتخاب اتصال جوزفسون به این دلیل صورت گرفت که پدیدهٔ تونل‌زنی کوانتومی در این ساختار به‌طور بارزی قابل مشاهده است. در این اتصال، جریان ابررسانا، چه مستقیم و چه متناوب، به‌صورت تابعی سینوسی از اختلاف فاز بین دو ابررسانا توصیف می‌شود، به‌گونه‌ای که اختلاف فاز، پارامتر بنیادی دینامیک سامانه به شمار می‌آید. انرژی الکترواستاتیک اتصال جوزفسون نیز به‌صورت تابعی غیرخطی از اختلاف فاز و جریان اعمال‌شده بیان می‌شود و همین غیرخطی‌بودن سبب می‌گردد فاصلهٔ بین ترازهای انرژی سامانه یکنواخت نباشد. به‌طور مشخص، فاصلهٔ کوانتومی میان نخستین و دومین تراز انرژی بزرگ‌تر است و با افزایش شمارهٔ ترازها، این فاصله به‌تدریج کاهش می‌یابد. از این‌رو، با انتخاب مناسب پارامترهای کنترلی، می‌توان این سامانه را به‌طور مؤثر به یک سامانه کوانتومی دوترازه فروکاست.

در سال‌های اخیر، حسگرهای فوق‌حساس و سامانه‌های برداشت انرژی مبتنی بر اتصال جوزفسون جایگاه ویژه‌ای در فیزیک مادهٔ چگال و فناوری‌های کوانتومی یافته‌اند. اتصال جوزفسون که از دو ابررسانا جداشده توسط یک سد نازک عایق تشکیل شده است، امکان عبور جریان ابررسانا را بدون افت ولتاژ فراهم می‌کند. به‌کارگیری این اتصال در مدارهای کوانتومی مجتمع، شرایط لازم برای استفاده در محاسبات کوانتومی را فراهم می‌سازد؛ زیرا انرژی غیرخطی سامانه دارای ترازهای انرژی گسسته، شامل حالت پایه و نخستین حالت برانگیخته است. در نتیجه، می‌توان مدار را در حالت‌های اولیهٔ مختلف آماده‌سازی کرد، کیوبیت‌های همدوس ایجاد نمود و عملیات دروازه‌ای و فرآیند خوانش را به‌طور کنترل‌شده به اجرا درآورد.

در توصیف کوانتومی اتصال جوزفسون، اختلاف فاز حالت میکروسکوپی دو ابررسانا را می‌توان به‌عنوان متغیر دینامیکی متناظر با تکانهٔ جرم مرکزی زوج‌های کوپر تعبیر کرد و برای آن یک تابع موج تعریف نمود. پتانسیل مؤثر مدار کوانتومی مورد استفاده در این آزمایش، که مستقیماً از ویژگی‌های اتصال جوزفسون ناشی می‌شود، دارای کمینه‌های موضعی متعددی است که رفتار سامانه را بر حسب اختلاف فاز تعیین می‌کنند. حالت کوانتومی سامانه در هر یک از این کمینه‌ها با بسامد پلاسما مشخص می‌شود. چنانچه انرژی گرمایی محیط به‌مراتب کوچک‌تر از انرژی پلاسما باشد، سامانه وارد حوزه کوانتومی می‌شود.

در این شرایط، ترازهای انرژی درون هر کمینه پتانسیل به‌صورت گسسته ظاهر می‌شوند و حتی در غیاب میدان مایکروویو خارجی، سامانه می‌تواند از طریق تونل‌زنی کوانتومی به کمینه‌های مجاور گذار کند. افزون بر این، با اعمال میدان مایکروویو خارجی با بسامدی نزدیک به بسامد پلاسمای سامانه، حالت‌های تشدیدی ایجاد می‌شود که سامانه را به حالت‌های برانگیخته منتقل می‌کند. نتایج تجربی این آزمایش وجود سه قلهٔ مشخص در میرایی کوانتومی به‌عنوان تابعی از جریان اعمال‌شده را نشان داد؛ پدیده‌ای که هم گسسته بودن ترازهای انرژی و هم وقوع تونل‌زنی کوانتومی در این سامانهٔ ماکروسکوپی را به‌طور مستقیم تأیید می‌کند.

۱. Anthony Leggett

امروزه دسترسی و کنترل حالت کوانتومی یک سامانه به‌طور مؤثر از طریق ساختارهایی نظیر جعبهٔ زوج کوپر[۱] امکان‌پذیر شده است و بر این اساس، گونه‌های متنوعی از دستگاه‌های کوانتومی مبتنی بر مدارهای الکترونیکی کوانتومی توسعه یافته‌اند. این پیشرفت‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در گذار از مطالعات صرفاً بنیادی به کاربردهای فناورانه ایفا کرده‌اند.

در این میان، توسعهٔ اسکوئیدها[۲]، که بر پایهٔ دو اتصال جوزفسونِ کوپل‌شده با یکدیگر عمل می‌کنند، دامنهٔ گسترده‌ای از کاربردها را در حوزه‌های مختلف فراهم آورده است. این کاربردها از جست‌وجوی مادهٔ تاریک و پیاده‌سازی معماری‌های محاسبات کوانتومی گرفته تا ساخت حسگرهای فوق‌حساس میدان مغناطیسی را در بر می‌گیرد. چنین حسگرهایی قادر به اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی در حد $۱۰^{-۱۸}$ تسلا هستند و در زمینه‌هایی چون اکتشاف منابع نفتی و معدنی، مطالعات زمین‌شناسی، و همچنین توسعهٔ ابزارهای پزشکی پیشرفته برای تشخیص نارسایی‌های مغزی و قلبی به کار گرفته می‌شوند. افزون بر این، این سامانه‌ها در شناسایی سلول‌های سرطانی از طریق اندازه‌گیری میرایی سیگنال‌های مغناطیسی نانومواد نقش مؤثری ایفا می‌کنند.

در مجموع، اتصال جوزفسون به‌منزلهٔ پلی میان فیزیک بنیادی و فناوری‌های آینده عمل می‌کند. این سامانه‌ها نه‌تنها بستری منحصربه‌فرد برای آزمون و بررسی عمیق‌ترین مفاهیم مکانیک کوانتومی فراهم می‌آورند، بلکه مسیر توسعهٔ حسگرهای فوق‌حساس و رایانه‌های کوانتومی نسل آینده را نیز هموار می‌سازند.

رضا عسگری
سردبیر مجله
۱۱ دی ۱۴۰۴

۱. Cooper Pair Box

۲. SQUIDs