در جهان کوانتومی چیزهای عجیبی رخ می‌دهد

درهم‌تنیدگی کوانتومی، نگینی بر پیشانی مکانیک کوانتومی

محمد انصاری

کارشناس ارشد فیزیک اتمی مولکولی، دبیر فیزیک استان فارس

چکیده

بی‌شک مکانیک کوانتومی در پیشبرد اهداف بشر امروز نقش بی‌بدیلی را به خود اختصاص داده است. در میان پدیده‌های بسیار مهم و متعددی که این شاخه از علم فیزیک به دنیای علم معرفی کرده است، پدیدهٔ درهم تنیدگی کوانتومی جایگاه بسیار مهمی دارد. این پدیده به همبستگی بین دستگاه‌های کلاسیک و کوانتومی برمی‌گردد و به واسطهٔ کاربردهای بسیار زیاد آن در زندگی کنونی بشر به موضع مهمی برای مطالعهٔ علاقه‌مندان به علم فیزیک تبدیل شده است. در این مقاله به معرفی این موضوع جالب و مهم فیزیکی و برخی از کاربردها و تأثیر آن در پیشرفت زندگی بشر کنونی می‌پردازیم.

کلیدواژه‌ها: درهم‌تنیدگی کوانتومی، برهم‌نهش کوانتومی، قضیهٔ بل، پادهمبسته

این‌روزها مکانیک کوانتومی نقش مؤثری در معرفی هرچه بیشتر قدرت فیزیک دارد و می‌توان گفت مکانیک کوانتومی چون نگینی بر پیکرهٔ علم فیزیک خودنمایی می‌کند که یکی از نمودهای خاص آن، پدیده درهم‌تنیدگی[1] است.

این پدیده را که تقریباً هیچ مشابهی در فیزیک کلاسیک ندارد، اولین‌بار اینشتین، پودولسکی و روزن در مقالهٔ معروف EPR[2] در سال ۱۹۵۳ معرفی کردند و توضیح مفاهیم متفاوت بین فیزیک کلاسیک و فیزیک کوانتومی را مبنای کار قرار دادند. به‌واقع، می‌توان گفت اینشتین و کسانی که به آیین علمی وی معتقد بودند، وجود پدیده‌ای چون درهم‌تنیدگی را از جمله ایرادهای وارد بر مکانیک کوانتومی می‌دانستند.

در سال‌های اخیر مبحث درهم‌تنیدگی مورد توجه قرار گرفته است و این بیش از همه به کاربرد این موضوع برمی‌گردد؛ زیرا درهم‌تنیدگی کوانتومی نقش انکارناپذیری در فرایندهای اطلاعات کوانتومی دارد و این نقش با گذشت زمان پررنگ‌تر شده است که از آن جمله می‌توان به محاسبات کوانتومی، کدگذاری فشرده، اجرای الگوریتم‌ها، انتقال از راه دور و غیره اشاره کرد.

درهم‌تنیدگی کوانتومی وقتی رخ می‌دهد که ذرات فوتون، الکترون، مولکول یا ذرات بزرگ‌تری مانند فولرن با هم برهم‌کنش کنند و سپس از هم جدا شوند. این نوع برهم‌کنش به‌گونه‌ای است که هر یک از دو ذرهٔ موجود در یک زوج با توصیف کوانتوم مکانیکی یکسان (موسوم به حالت) توصیف می‌شوند که برحسب عوامل مهمی چون مکان، تکانه، اسپین، قطبش و غیره **نامعین** است.

طبق تفسیر کپنهاکی مکانیک کوانتومی، حالت مشترک تا زمانی که اندازه‌گیری روی آن صورت نگرفته، نامعین است. درهم‌تنیدگی نوعی برهم‌نهش کوانتومی است. اندازه‌گیری باعث می‌شود که یک عضو از این زوج مقداری معین به خود بگیرد. عضو دیگر زوج هم در هر زمان پس از آن مقدار همبستهٔ معینی را اختیار خواهد کرد.

دستگاه‌های کوانتومی می‌توانند در برهم‌کنش‌های مختلف درهم‌تنیده شوند. اگر این کار صورت گیرد، یک جسم را نمی‌توان بدون در نظر گرفتن جسم (یا اجسام) دیگر کاملاً توصیف کرد. آن‌ها در حالت برهم‌نهش کوانتومی هستند و تا انجام اندازه‌گیری روی آن‌ها در یک حالت کوانتومی باقی می‌مانند.

یک مورد درهم‌تنیدگی وقتی صورت می‌گیرد که ذرات زیراتمی به سایر ذرات واپاشیده شوند. این رویدادهای واپاشی از قانون‌های پایستگی مختلفی پیروی می‌کنند و در نتیجه ذرات تولید شده فقط در حالت‌های کوانتومی خاصی تشکیل می‌شوند. به‌عنوان مثال، یک زوج از این ذرات فقط می‌توانند در

حالت اسپین، یکی سربالا و دیگری سرپایین باشند. این زوج درهم‌تنیده را که در آن ذرات دارای اسپین‌های مخالف هستند، مورد پاد همبسته می‌نامند، و اگر احتمال اندازه‌گیری هر نوع اسپین برابر باشد، می‌گویند زوج در حالت تک‌تایه است.

اگر دو نفر در آزمایش‌های فرضی اسپین یک زوج درهم‌تنیده را اندازه بگیرند و یکی از آن‌ها اسپین ذره‌اش را اندازه بگیرد، نتیجهٔ اندازه‌گیری کاملاً غیرقابل پیش‌بینی است، احتمال سربالا یا سرپایین بودن اسپین هر یک ۵۰ درصد است، اما اگر نفر دیگر پس از آن اسپین ذره‌اش را اندازه بگیرد، نتیجه کاملاً قابل پیش‌بینی و مخالف اندازه‌گیری اول است.

با این همه، با درهم‌تنیدگی کوانتومی، اندازه‌گیری اسپین ذرات در جهت‌هایی غیر از سربالا و سرپایین، با آنچه از نامساوی بل انتخاب شده است، همواره به نوعی همبستگی می‌انجامد که بسیار شدیدتر از مقدار قابل دستیابی در فیزیک کلاسیک است. در اینجا شبیه‌سازی کلاسیک آزمایش فرو می‌ریزد؛ زیرا در آن هیچ «جهتی» غیر از شیر یا خط اندازه‌گیری شده با سکه موجود نیست.

شاید فکر کنید که استفاده از تاس به جای سکه مسئله را حل کند، اما تفاوت اساسی اندازه‌گیری اسپین در جهت‌های مختلف آن است که این اندازه‌گیری‌ها نمی‌توانند هم‌زمان مقادیر متفاوت داشته باشند؛ زیرا ناسازگارند. این موضوع در فیزیک کلاسیک بی‌معنی است؛ چون در آن هر تعداد از ویژگی‌ها را می‌توان هم‌زمان با دقت دلخواه اندازه گرفت.

قضیهٔ بل* ایجاب می‌کند و به صورت ریاضی ثابت شده است که اندازه‌گیری‌های سازگار نمی‌توانند همبستگی بل‌گونه از خود نشان دهند و در نتیجه درهم‌تنیدگی اصولاً پدیده‌ای غیرکلاسیک است.

درهم‌تنیدگی درواقع به همبستگی بین دستگاه‌های متفاوت و تفاوت‌های اساسی بین دستگاه‌های کلاسیک و کوانتومی برمی‌گردد. به‌طور کلی، می‌توان گفت دستگاه‌های کوانتومی توانایی‌هایی دارند که دستگاه‌های کلاسیک فاقد آن‌ها هستند؛ از جمله این ویژگی‌ها حالت‌های درهم تنیده‌اند که نمی‌توان آن‌ها را به صورت حاصل‌ضرب حالت‌هایی از زیر دستگاه‌ها نوشت.

موضوع درهم‌تنیدگی مدت‌های زیادی به‌عنوان یک بحث شگفت‌انگیز و نادر مطرح بود. این موضوع از علم اطلاعات کوانتومی شروع شد و به‌عنوان یک موضوع نوپا به عرصهٔ علم گذاشت. هدف از علم اطلاعات کوانتومی درواقع استخراج ترکیباتی از مکانیک کوانتومی است که با فیزیک کلاسیک متفاوت است.

اینشتین و همکارانش بر این باور بودند که با استفاده از متغیر پنهان[3] می‌توان نظریهٔ کاملی بدون تأثیرهای ناجایگزیدگی[4] به‌وجود آورد. با این توصیف، عده‌ای در راه بسط و توسعهٔ متغیر پنهان گام برداشتند. در سال ۱۹۶۴، جان بل بیان کرد که نظریاتی که براساس اصل موضعیت اینشتین هستند و در نهایت تلاش‌ها برای بسط متغیر پنهان راه به جایی نمی‌برد؛ چرا که مواضع EPR دربارهٔ موضعیت با پیش‌بینی‌های مکانیک کوانتومی سازگاری ندارد (نظریاتی که براساس اصل موضعیت هستند، بین مشاهده‌پذیرهای آزمایش‌های همبستگی اسپین، رابطهٔ نامساوی آزمون‌پذیری را پیش‌بینی می‌کنند که این موضوع با پیش‌بینی‌های مکانیک کوانتومی در تضاد است). جان بل نشان داد که وجود مدلی مبتنی بر متغیر نهان برقراری یک نامساوی را می‌طلبد و این همان نامساوی بل است. بنابراین، پرواضح است که درهم‌تنیدگی به‌عنوان یکی از جذاب‌ترین و جالب‌ترین وجه‌های غیرکلاسیک مکانیک که پایهٔ نظریهٔ اطلاعات کوانتومی را تشکیل می‌دهد. مطرح است و با توجه به نقشی که این پدیده در علم اطلاعات کوانتومی ایفا می‌کند، جایگاه مهمی در مطالعات کوانتومی یافته است.

مسئلهٔ دیگری که در نظریهٔ اطلاعات کوانتومی مطرح است، تعیین مقدار کمّی درهم‌تنیدگی یک حالت درهم‌تنیده است. درواقع، درهم‌تنیدگی کوانتومی همانند پتانسیل در فرایندهای کوانتومی عمل می‌کند. بنابراین، بایستی مانند هر پتانسیلی مقدار کمّی برای آن تعریف نمود. هر تابعی که مقدار کمّی درهم‌تنیدگی کوانتومی را مشخص کند، معیار درهم‌تنیدگی[5] نامیده می‌شود. از جملهٔ مهم‌ترین این سنجه‌ها می‌توان به آنتروپی وان نویمان ماتریس چگالی فروکاستهٔ، نگاتیویته، درهم‌تنیدگی تشکیل و... اشاره کرد. چشمه‌های تولید دستگاه‌های درهم‌تنیده کاربردهای مفیدی در فرایندهای اطلاعات کوانتومی مانند محاسبات کوانتومی دارند. برای مثال، محاسبات کوانتومی این امکان را فراهم می‌سازد که رایانه‌هایی بسازیم که بسیار توانمندتر از رایانه‌های کلاسیک هستند و این یکی از تحولاتی است که محصول پدیدهٔ درهم‌تنیدگی کوانتومی در زندگی بشر امروز است. سال‌ها بود که بشر نیاز به کدگذاری اطلاعات را یکی از نیازهای اساسی خود می‌دید؛ چراکه این موضوع در مسائل نظامی، تجاری و سایر صنایع بیش از پیش خودنمایی می‌کرد. کدگذاری درواقع نوعی به رمز درآوردن اطلاعات است که به کمک بیت‌های کوانتومی انجام می‌گیرد. به‌عنوان مثال، رمزدار کردن اطلاعات کارت‌های اعتباری و سایر مسائل تجاری را در نظر بگیرید که تا چه اندازه در زندگی بشر ایجاد تحول نموده است. همین کاربردهای بسیار مهم درهم‌تنیدگی کوانتومی باعث شده است که امروزه علاقه‌مندان زیادی به مطالعه در این زمینه روی آورند. بنابراین، اگر از پدیدهٔ درهم‌تنیدگی کوانتومی به واسطهٔ نقش انکارناپذیر آن در متحول ساختن زندگی بشر به‌عنوان نگینی بر پیشانی مکانیک کوانتومی نام ببریم، بدون شک سخنی به گزاف نگفته‌ایم.

پی‌نوشت

1. Entanglement
2. Einestein-Podolsky-Rosen
3. Hidden variable
4. Non- locality
5. Entanglement Measure

* قضیهٔ بل بیان می‌کند که: هیچ نظریهٔ فیزیکی مربوط به متغیرهای پنهان هرگز نمی‌تواند تمام پیش‌بینی‌های مکانیک کوانتومی را بازتولید کند.

منابع

1. A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, Phys. Rev 47, (1935)777.
2. A. Al- Qasimi, How does entanglement decay in different two- qubit systems?, Department of Physics, University of Toronto (2004)1.
3. G. Benenti, G. casati, G. Strini, Principle of Quantum Computation and Information ((World Scientific: Singapore (2005)).
4. C. Moura Alves, Detection of quantum entanglement in physical systems, university of oxford (2005)5.
5. C. C. Gerry and P. L. Kingh, Introductory Quantum Optics, Cambridge university press(2005).
6. A. Shields, key to the quantum industry, physics world (2007).
7. E. Tracy, Complementarity and entanglement in quantum information theory, university of New Mexico (2004) 23.
8. M. Avellino, Entanglement and Quantum Information Transfer in Arrays of Interacting, University of London (2009)9.