فیزیک جدید:
اصل عدم قطعیت

سرگذشت علوم

مهدی شیرزاد

دقت یا عدم قطعیت

به‌نظر شما، جدیدترین حدنصاب دوی صدمتر مردان جهان چه‌قدر است؟ در نگاه اول این پرسش بی‌اهمیت جلوه می‌کند. با رجوع به شبکه‌های اینترنتی می‌توان این حدنصاب را دریافت: ۹/۵۸ ثانیه. روشن است که در این اندازه‌گیری زمان تا صدم ثانیه ثبت شده است.

اما «واقعاً» رکورد جهانی دوی صدمتر چه‌قدر است؟ اگر از زمان‌سنج دقیق‌تری استفاده می‌شد، چه بسا این حدنصاب به صورت ۹/۵۸۳ یا ۹/۵۸۳۱ یا ۹/۵۸۳۱۵ یا... ثبت می‌شد. جالب است بدانید که در المپیک اخیر در مسابقات شنا زمان ها تا هزارم ثانیه ثبت می‌شد.

روشن است که برای دقت اندازه‌گیری حد و مرزی وجود ندارد و همگام با تکامل فناوری اندازه‌گیری، می‌توان دقت اندازه‌گیری را بی‌کران افزایش داد. این البته دیدگاهی کلاسیک نسبت به دقت اندازه‌گیری است که در ادامه، بر مبانی آن خدشه‌های جدی وارد خواهد شد.

از دیدگاه فیزیک کلاسیک، خطای اندازه‌گیری از سه ناحیه ناشی می‌شود:

- خطا در ابزار اندازه‌گیری
- خطای شخص اندازه‌گیر
- خطا در محیط اندازه‌گیری

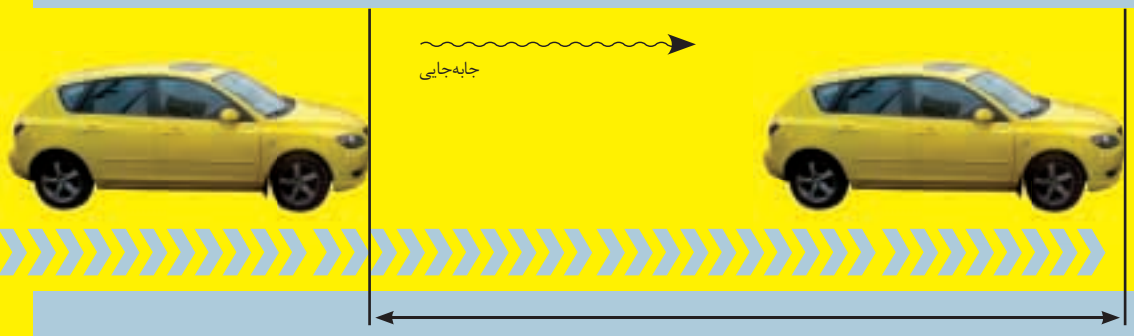
گرچه اندازه‌گیری هیچ کمیتی از خطا مصون نمی‌ماند، اما از لحاظ نظری با بهبود شرایط اندازه‌گیری می‌توان خطا را به دل‌خواه به صفر میل داد؛ یعنی: «**حد نظری خطای اندازه‌گیری صفر است.**»

در فیزیک کلاسیک چنین به‌نظر می‌رسد که هر خاصیت فیزیکی را می‌توان با هر دقتی اندازه گرفت. تنها کافی است برای افزایش دقت، وسیله‌ی دقیق‌تری طراحی کنیم. البته با هر درجه از دقت، در هر زمان، وجود خطا در اندازه‌گیری امری گریزناپذیر و حتمی است.

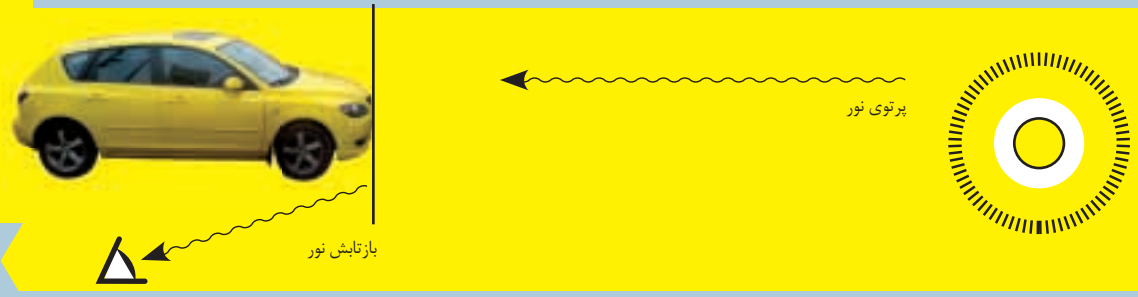
سرعت و مکان در فیزیک کلاسیک

اتومبیلی را تصور کنید که به آهستگی در راستای یک خط مستقیم حرکت می‌کند. در لحظه‌ای معین، مکان قسمت جلوی اتومبیل را با کشیدن خطی روی زمین نشانه‌گذاری می‌کنیم. در همین لحظه یک زمان‌سنج (مثلاً یک کرونومتر) به‌کار می‌افتد. در لحظه‌ای که قسمت جلوی اتومبیل مقابل نشانه‌ی دیگری که روی زمین گذاشته‌ایم، رسید، کرونومتر را متوقف می‌کنیم. سپس مسافت میان دو نشانه را اندازه می‌گیریم و از تقسیم مسافت پیموده شده، بر مدت زمان سپری شده، «سرعت متوسط» را اندازه می‌گیریم.

اگر مراحل بالا را در فاصله‌های کوتاه و کوتاه‌تر تکرار کنیم، می‌توانیم «سرعت لحظه‌ای» در همسایگی هر نقطه‌ی دل‌خواه را به دست آوریم.



حال بیایید فرایند اندازه‌گیری را با دقت بیشتری دنبال کنیم. برای تعیین مکان اتومبیل، ابتدا نورخورشید را در نظر می‌گیریم که پس از برخورد به قسمت جلوی اتومبیل به چشم ما می‌رسد و به این ترتیب ما درمی‌یابیم که چه وقت اتومبیل در مقابل نشانه‌ی روی زمین قرار گرفته است:



دقت کنید نور مرئی طول موجی در محدوده‌ی ۰/۴ میکرومتر (مربوط به نور بنفش) تا ۰/۷ میکرومتر (مربوط به نور قرمز) دارد. حال فرض کنید در همین اندازه‌گیری از یک موج رادیویی با فرکانس ۱۰۰۰KHz استفاده شود. طول موج چنین موجی عبارت است از:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{۳\times۱۰^{۸}}{۱۰۰۰\times۱۰^{۳}} = ۳۰۰\text{m}$$

در رابطه‌ی بالا، c سرعت نور، f فرکانس و λ طول موج پرتو الکترومغناطیس است. طول موج ۳۰۰ متری بسیار بزرگ‌تر از ابعاد یک اتومبیل معمولی است. درواقع، این موج در همه‌ی جهت‌ها از اتومبیل بازتابیده می‌شود و به هیچ وجه نمی‌تواند مکان اتومبیل را دقیقاً اعلام کند. پس برای مکان یابی درست لازم است از موج‌هایی استفاده کنیم که طول موج آن‌ها از ابعاد جسم مورد اندازه‌گیری کوچک‌تر باشد.

مثال: فرض کنید که به جای اتومبیل بخواهیم مکان یک الکترون را مشخص کنیم. در این حالت از نور مرئی نمی‌توانیم استفاده کنیم. ابعاد اتم از مرتبه‌ی

«آنگستروم» $10^{-10}m$ است، حال آن‌که طول موج نور مرئی از مرتبه‌ی «میکرون» $10^{-6}m$ است. یعنی طول موج نور مرئی ۱۰۰۰۰ مرتبه بزرگ‌تر از خانه‌ی الکترون است. لذا برای مکان‌یابی الکترون لازم است از طول موج های $10^{-10}m$ یا حتی کوتاه‌تر استفاده کنیم. اما فوتونی با طول موج λ و بسامد f دارای انرژی و اندازه‌ی حرکت زیر است:

$P=\frac{h}{\lambda}$ (اندازه‌ی حرکت)

$E=hf$ (انرژی)

در این رابطه‌ها، h «**ثابت پلانک**» است.

در برخورد این فوتون با الکترون - طبق دستاورد ماندگار کامپتون- برخورد شدید صورت می‌گیرد و هم الکترون و هم فوتون فرودی پراکنده می‌شوند. پس اگر فوتون پراکنده نشده را دریافت کنیم، می‌توانیم از جهتی که دارد دریابیم که الکترون کجا بوده است. در این صورت، مکان الکترون را به‌دقت درمی‌یابیم. اما دراین فرایند، سرعت الکترون (هم از لحاظ جهت و هم از لحاظ بزرگی) تغییر می‌کند. حال اگر برای اندازه‌گیری، از طول موج‌های بلند استفاده کنیم، آشفتگی الکترون (مطابق با اثر کامپتون) کم‌تر می‌شود. ولی چون طول موج پرتو بزرگ‌تر است، عدم قطعیت در اندازه‌گیری مکان افزایش می‌یابد.

به‌طور خلاصه: «**نمی‌توانیم هم مکان و هم سرعت الکترون را با دقت نامحدود اندازه‌گیری کنیم.**»

دقت کنید، بحث فوق صرفاً یک بررسی نظری است و به هیچ‌روی به محدودیت‌های علمی و خطاهای فناوری اشاره‌ای ندارد. به عبارت دیگر، در هر اندازه‌گیری به دلیل تداخل ابزارهای اندازه‌گیر و شیء مورد اندازه‌گیری، خطا حاصل می‌شود؛ یعنی خطا جزء ذاتی هر اندازه‌گیری است.

ورنر هایزنبرگ

اصل عدم قطعیت

ورنرهایزنبرگ (۱۹۷۶-۱۹۰۱)، از پیشگامان مکانیک کوانتومی و از نام‌آوران فیزیک جدید است. یکی از دو روایت معتبر مکانیک کوانتومی توسط هایزنبرگ ارائه شده است. بیان دقیق اصل عدم قطعیت، از یادگارهای ماندگار او در این حوزه است. وی در سال ۱۹۳۲ برنده‌ی جایزه‌ی نوبل فیزیک شد.

اگر خطای اندازه‌گیری مکان را با Δx و خطای اندازه‌گیری اندازه‌ی حرکت را با ΔP نمایش دهیم، مطابق با محاسبه‌ی هایزنبرگ این دو خطا در نابرابری زیر صدق می‌کنند:

$$(\Delta P)(\Delta x)\geq\frac{h}{2\pi}$$

که در آن h ثابت پلانک است. به‌عبارت دیگر، حاصل‌ضرب این دو خطا همواره از حدی بیشتر است. البته به دلیل کوچکی فوق‌العاده‌ی ثابت پلانک $(h=6/63\times10^{-34}\ j\times s)$، این عدم‌قطعیت تنها خود را در حوزه‌ی میکروفیزیک نشان می‌دهد.

مثلاً فرض کنید، الکترونی به جرم $9/1\times10^{-31}\ kg$ با سرعتی حدود $2\times10^{6}\ m/s$ حرکت کند و بخواهیم سرعت الکترون را با دقتی معادل ۹۰ درصد اندازه‌گیری کنیم؛ یعنی ۱۰ درصد خطای اندازه‌گیری را داشته باشیم:

خطای سرعت $\Delta v=\frac{1}{10}\times2\times10^{6}$

خطای اندازه‌ی حرکت $\Delta p=m\Delta v=1/82\times10^{-25}\ kg\ m/s$

$$(\Delta x)(\Delta p)\geq\frac{h}{2\pi}$$

$$\Delta x\geq5\times10^{-10}m$$

دقت کنید که خطای اندازه‌گیری مکان، ۵ آنگستروم است؛ یعنی پنج برابر مکانی که الکترون در آن زندگی می‌کند. این مشابه آن است که روی قوطی یک کنسرو، به‌عنوان وزن خالص محتویات آن نوشته شده باشد:

$1kg\pm5\ kg$

روشن است که این نوشته مضحک و بی‌معنی است. یعنی با چنین عدم قطعیتی اصلاً ممکن نیست که بدانیم الکترون کجای اتم قرار دارد.

منابع

۱. رادرفودر، هولتون. واستوان. طرح فیزیک هاروارد. ترجمه‌ی هوشنگ شریف‌زاده. انتشارات فاطمی.

۲. هایزنبرگ، ورنر. جزء و کل. ترجمه‌ی حسین معصومی همدانی. انتشارات مرکز نشر دانشگاهی.