پردازش اطلاعات کوانتومی

پاییز ۱۴۰۲

ارائه ۱

دکتر احمد خونساری

در این ارائه با اهمیت پرداختن به پردازش اطلاعات و محاسبات کوانتومی آشنا می‌شوید. از آنجا که دنیای فیزیکی به صورت کوانتومی کار می‌کند، برای درک بهتر آن از طریق شبیه‌سازی نیاز به کامپیوترهای کوانتومی داریم. همچنین، محدودیت‌های فیزیکی محاسبات با قوانین طبیعت و کوانتوم مشخص می‌شود و به این ترتیب پرداختن به این حوزه با اهمیت است. سخنان Richard Feynman و David Deutsch را در صفحات ۲ و ۳ ببینید.

یکی از دغدغه‌های دانشمندان حوزه کوانتوم این است که برای یک مسئله قابل اعتنا نشان دهند که کامپیوترهای کوانتومی می‌توانند به صورت چشمگیری از کامپیوترهای کلاسیک عملکرد بهتری داشته باشند. در اسلاید ۴، مقاله گوگل را ملاحظه می‌کنید که در آن ادعا می‌کند توانسته است این مطلب را نشان دهد. برای آشنایی بهتر، صحت و سقم این ادعا را بررسی نموده و این مقاله را مطالعه کنید و خلاصه‌ای حداکثر یک صفحه‌ای به زبان فارسی از دستاوردهای آن (بدون نیاز به ذکر مفاهیم تکنیکال) در سایت ارسال کنید.

در اسلایدهای ۵ تا ۷ جزئیات بیشتری از درس پیش‌رو در اختیار شما قرار گرفته است که حوزه و اهداف درس را بهتر درک کنید.

در اسلاید ۸ به آزمایش double-slit اشاره شده است. این یکی از آزمایش‌هایی است که نشان می‌دهد دنیای ذرات ریز از قوانین کوانتومی پیروی می‌کند (تأیید کننده سخنان Richard Feynman و David Deutsch در ابتدای ارائه). در این آزمایش ملاحظه می‌شود که حتی پرتاب یک فوتون به سمت یک تشخیص‌گر با وجود یک دیواره جداکننده با دو مجرا الگوی تداخل امواج را ایجاد می‌کند. به این ترتیب که به نظر می‌رسد فوتون قبل از «اندازه‌گیری» رفتار «superposition» داشته و با «خودش» تداخل کرده است. در خصوص مفاهیم «اندازه‌گیری» و «superposition» در ادامه درس بیشتر بحث خواهد شد. ویدئوی زیر در سایت درس را دانلود کنید و آن را حداقل در یک پاراگراف و حداکثر در یک صفحه توضیح دهید:

۱. Double Slit Experiment explained

برای نمایش مفهوم «superposition» از کیوبیت استفاده می‌شود. در اسلاید ۹ می‌بینید که از طریق جمع وزن‌دار (با وزن‌های مختلط) دو بردار پایه ۰ و ۱ می‌توان superposition را نمایش داد. به این ترتیب که «اندازه» عدد مختلط ضریب بردار پایه ۰ احتمال حضور در آن حالت را مشخص می‌کند. و به طور مشابه برای بردار پایه (و حالت) ۱. همچنین، این شرط وجود دارد که جمع اندازه ضرایب برابر یک است (جمع احتمالات حضور در یکی از دو حالت برابر یک است).

در اسلاید ۱۰ نیز با مفهوم «اندازه‌گیری» کیوبیت آشنا می‌شوید. پس از اندازه‌گیری کیوبیت (سیستم) به یکی از حالت‌های پایه (اندازه‌گیری) می‌رود و در آنجا باقی می‌ماند. احتمال رفتن به هر کدام از حالت‌های پایه را نیز همان ضرایب مختلط مشخص می‌کنند. در خصوص اندازه‌گیری به صورت دقیق‌تر وقتی postulates مکانیک کوانتوم را مطالعه کنیم بیشتر توضیح خواهیم داد. نکته پایانی این اسلاید این است که پس از یک بار اندازه‌گیری یک کیوبیت، تمام اندازه‌گیری‌های بعدی همان نتیجه را خواهد داد.

در اسلاید ۱۱ می‌بینید که ضرایب حالات پایه فقط احتمالات مربوط به اندازه‌گیری را مشخص نمی‌کنند، بلکه می‌توانند کاربردهای مختلف و بیشتری داشته باشند. به طول مثال، به چهار کیوبیت اسلاید ۱۱ نگاه کنید. احتمال اینکه هر کدام از این کیوبیت‌ها در حالت ۰ یا ۱ باشند دقیقاً برابر نیم است. یعنی فقط با اندازه‌گیری (در حالت‌های پایه) نمی‌توان آن‌ها را از هم تشخیص داد (این مورد را بررسی کنید).

در اسلاید ۱۲ می‌بینید که اگر این کیوبیت‌ها از Hadamard gate بگذرند خروجی متفاوتی ایجاد می‌کنند. در مورد مفهوم gateهای کوانتومی بعداً بیشتر بحث می‌شود. در حال حاضر فرض کنید مانند اعمال یک gate کلاسیک (مانند NOT) بر روی یک بیت کلاسیک است. در محاسبات کوانتومی، gateها ماتریس‌هایی هستند که ویژگی‌های خاصی دارند که بعداً با آن‌ها آشنا می‌شوید. Hadamard gate (که با حرف H نمایش داده می‌شود) به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \qquad (۱)$$

اسلاید ۱۲ بیان می‌کند که کیوبیت‌ها بسته به اینکه حالت‌های پایه آن‌ها چگونه در حالت superposition با یکدیگر «تداخل» می‌کنند پس از عبور از یک سیستم یکسان ممکن است رفتار متفاوتی را از خود نشان دهند و به روش متفاوتی تغییر کنند. به این ترتیب ملاحظه می‌کنید که ضرایب حالت‌های پایه کاربرد و معنای بیشتری از فقط تعیین احتمالات اندازه‌گیری دارند.

تا اینجا، با مفاهیم «superposition» و «تداخل» آشنا شدید که از مفاهیم مهم در محاسبات کوانتومی هستند. سعی کنید محاسبات اسلاید ۱۲ را یک بار خودتان انجام دهید. یعنی ماتریس H را در بردار نمایشگر کیوبیت ضرب کنید و کیوبیت خروجی را مشخص کنید.

در اسلاید ۱۳ با مبحث «درهم‌تنیدگی» (entanglement) آشنا می‌شوید. درهم‌تنیدگی به این معنی است که دو سیستم (مجموعه‌ای کیوبیت‌ها) به صورت مستقل از هم قابل تعریف شدن نباشند. اگر دو سیستم کوانتومی در حالت «درهم‌تنیده» باشند هر چقدر که از یکدیگر فاصله فیزیکی داشته باشند، باز هم در هنگام اندازه‌گیری یکی از آن‌ها، وضعیت دیگری در لحظه تغییر می‌کند. پدیده درهم‌تنیدگی فقط در فیزیک کوانتوم وجود دارد و وجه تمایز آن با فیزیک کلاسیک است.

Albert Einstein این پدیده را باور نداشت و به آن spooky action at a distance می‌گفت. او اعتقاد داشت که در هنگام ساختن دو سیستم درهم‌تنیده وضعیت آن‌ها در همان لحظه مشخص می‌شود و بعداً در هنگام اندازه‌گیری هر کدام از آن‌ها ما همان مقدار اولیه را مشاهده می‌کنیم. مثالی که در این زمینه زده می‌شود به این ترتیب است: فرض کنید یک جفت دستکش (یک چپ و یک راست) در اختیار دارید. بدون اینکه به آن‌ها نگاه کنید آن‌ها را در جعبه‌های مجزا قرار و در فاصله بسیار زیادی از هم قرار می‌دهید. اما به محض اینکه به داخل یکی از جعبه‌ها نگاه کنید، می‌دانید که در جعبه دیگر کدام دستکش (چپ یا راست) قرار دارد. دیدگاه دیگری که Niels Bohr از آن طرفداری می‌کرد این بود که وضعیت سیستم‌های کوانتومی تا قبل از اندازه‌گیری اصلاً مشخص نیست و در حالت «superposition» قرار دارند. در مثال قبلی به این معنی است که تا قبل از نگاه کردن به داخل جعبه هر دستکش هم چپ است و هم راست. چهارده سال بعد از فوت Albert Einstein، آقای John Stewart Bell با طراحی یکسری معادله و آزمایش به این تفاوت دیدگاه پاسخ داد و نشان داد که در واقع دیدگاه Niels Bohr درست بوده است و درهم‌تنیدگی واقعاً در دنیای ذرات کوانتومی وجود دارد. ویدئوی زیر در سایت درس را دانلود کنید و آن را حداقل در یک پاراگراف و حداکثر در یک صفحه توضیح دهید:

۱. Bell’s Theorem The Quantum Venn Diagram Paradox

در اسلاید ۱۴ یک سیستم درهم‌تنیده که به آن Bell state گفته می‌شود با نمادگذاری Bra-Ket نمایش داده شده است. این سیستم با احتمال نیم در حالت ۰۰ و با احتمال نیم در حالت ۱۱ قرار دارد. دقت کنید که تا قبل از اندازه‌گیری نمی‌دانیم سیستم در کدام حالت قرار دارد. همچنین، حالت هر کدام از کیوبیت‌ها به دیگری وابسته است. یعنی حتی اگر دو کیوبیت را در فاصله‌ی بسیار زیاد از هم قرار دهیم، اگر به کیوبیت اول نگاه کنیم و ۱ باشد، کیوبیت دوم هم در همان لحظه حالت خود را به ۱ تغییر می‌دهد. توجه کنید که این مسئله به ظاهر با تئوری‌های Albert Einstein که حداکثر سرعت انتقال هر چیزی (اطلاعات) را محدود به سرعت نور می‌کند در تناقض است.

در اسلاید ۱۵ نیز به آزمایش فکری Erwin Schrödinger اشاره‌ای شده است. این آزمایش نیز به نوعی در حمایت از دیدگاه Albert Einstein طراحی شده است. در این آزمایش یک گربه به همراه یک ماده رادیواکتیو در یک جعبه قرار گرفته است. واپاشی ماده رادیواکتیو به صورت تصادفی انجام می‌گیرد و نمی‌توان از قبل، زمان آن را تعیین کرد. این واپاشی یک بمب را فعال می‌کند که منجر به مرگ گربه می‌شود. گربه و بمب در حالت درهم‌تنیده قرار دارند. یعنی یا گربه سالم است و بمب منفجر نشده است. یا اینکه گربه مرده و بمب منفجر شده است. اما Schrödinger بحث می‌کند قبل از اینکه ما به داخل جعبه نگاه کنیم گربه هم مرده است و هم زنده است؟

ارائه یک در اینجا به پایان می‌رسد. در اسلاید ۱۶ به شما یادآوری می‌شود که با سه مفهوم مهم «superposition» و «تداخل» و « درهم‌تنیدگی» آشنا شدید. در ادامه درس می‌بینید که چگونه با استفاده از مفهوم کیوبیت می‌توان این مفاهیم فیزیکی را نمایش داد. همچنین می‌بینید که چگونه می‌توان با عملیات بر روی کیوبیت‌ها و استفاده از این مفاهیم، سیستم‌های قدرتمندتری از سیستم‌های کلاسیک طراحی کرد.