

مفاهیم بنیادی مکانیک کوانتومی

اندازه گیری در مکانیک کوانتومی

حسین شناور

گروه فیزیک، دانشکده علوم



دانشگاه هرمزگان

- خواهشمندم هرگونه اشتباه نوشتاری، مفهومی و یا محاسباتی را به آدرس ایمیل من ارسال کنید تا در ویرایش های بعدی تصحیحات لازم اعمال شوند:

h.shenavar@gmail.com

- از همکاران و دانشجویان محترم در دانشگاه هرمزگان، برای همفکری ها، حمایت ها و گوشزد نمودن نکات مفید سپاسگزارم.
- برای ضبط این درس ها از نرم افزار Camtasia استفاده شده است.

- ۱ اندازه گیری در مکانیک کوانتومی
- مفاهیم اندازه گیری در مکانیک کوانتومی
- فرمولبندی اندازه گیری در مکانیک کوانتومی

آنچه گذشت: نمایش ماتریسی فضای حالت و عملگرها

- قضیه: ویژه مقادیر یک عملگر هرمیتی حقیقی اند و ویژه کت های متناظر با ویژه مقادیر متفاوت بر هم عمود هستند.

- ویژه کت های نرمال شده $\langle a'' | a' \rangle = \delta_{a'a''}$

- استفاده از ویژه کت های برای بسط یک حالت کوانتومی دلخواه: $|\alpha\rangle = \sum_{a'} c_{a'} |a'\rangle$ که در آن $c_{a'} = \langle a' | \alpha \rangle$ ضرایب بسط اند.

- رابطه بستار یا تمامیت: $\sum_{a'} |a'\rangle \langle a'| = 1$

- پس عملگر $|a'\rangle \langle a'|$ را عملگر تصویر در جهت $|a'\rangle$ می نامند: $\Lambda_{a'} \equiv |a'\rangle \langle a'|$

- نمایش عملگری ماتریس ها: $X = \sum_{a''} \sum_{a'} |a''\rangle \langle a''| X |a'\rangle \langle a'|$

- با استفاده از تعریف دوگان هرمیتی یک عملگر داریم:

$$\langle a'' | X | a' \rangle = \langle a' | X^\dagger | a'' \rangle^*$$

به ویژه اگر یک عملگر مانند A هرمیتی باشد، آنگاه داریم

$$\langle a'' | A | a' \rangle = \langle a' | A | a'' \rangle^*$$

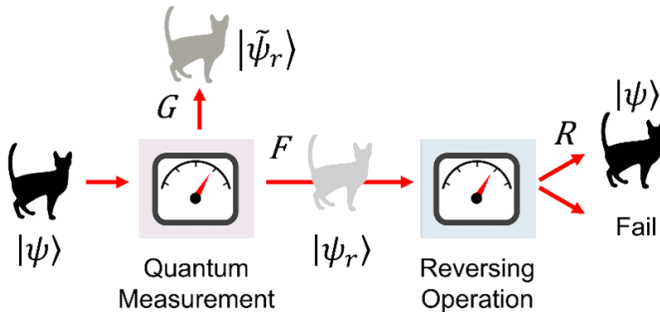
- به همین ترتیب ضرب داخلی و خارجی دو حالت $|\alpha\rangle$ و $|\beta\rangle$ را تعریف کردیم.

- نوشتن یک عملگر به صورت قطری در پایه های خودش: $A = \sum_{a'} a' |a'\rangle \langle a'|$

اهداف این جلسه

- در این جلسه به اصل موضوع اندازه گیری در مکانیک کوانتومی وارد خواهیم شد. این موضوع دو جنبه مفهومی و ریاضیاتی دارد که هر دو را در نظر خواهیم گرفت؛ هرچند فعلا وارد جزئیات چالش برانگیز اندازه گیری سیستم های کوانتومی نخواهیم شد. در جلسات بعد از فرمولبندی اصل اندازه گیری استفاده خواهیم کرد.

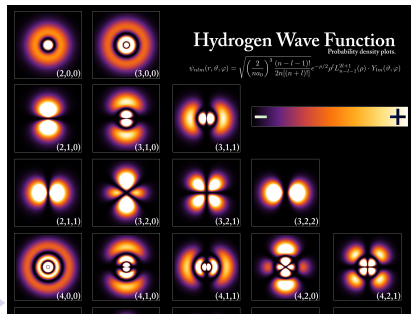
- خلاصه درس: فرایند اندازه گیری در مکانیک کوانتومی عملا یک فرایند فیلترینگ است!



اندازه گیری در مکانیک کوانتومی: مفاهیم

پرسش: فرض کنید می خواهیم یک ویژگی فیزیکی ذره ای (مانند اندازه حرکت خطی و یا اسپین آن) را اندازه بگیریم. بنا به مکانیک کوانتومی، خروجی های ممکن چنین اندازه گیری چه می توانند باشد؟ به عبارت دیگر، آیا می توان مقدار اندازه حرکت ذره را قبل از اندازه گیری آن پیش بینی کرد؟ پاسخ به این سوال اصلا بدیهی نیست، و در واقع این سوال ذات احتمالاتی مکانیک کوانتومی را آشکار می کند.

پاسخ: بنا به مکانیک کوانتومی، ناممکن است که ما نتیجه آزمایش را پیش از اندازه گیری پیش بینی کنیم؛ بلکه فقط می توانیم احتمال رخداد هر خروجی خاص را معین کنیم.



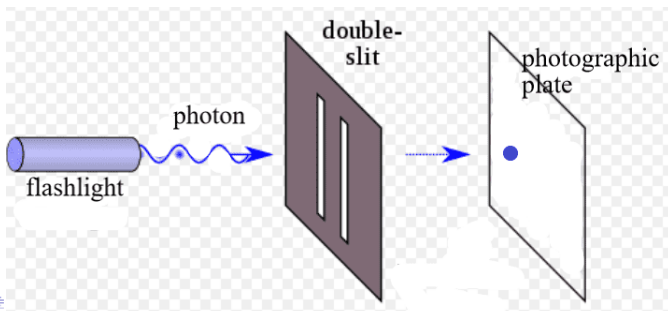
اندازه گیری در مکانیک کوانتومی: مفاهیم

- تاکنون متوجه شده ایم که اگر یک کمیت فیزیکی (مانند موقعیت، تکانه و ...) را با A نشان دهیم، آنگاه این کمیت در مکانیک کوانتومی با یک عملگر هرمیتی توصیف خواهد شد. برای فهم پروسه اندازه گیری مشاهده پذیر A در مکانیک کوانتومی، رابطه ویژه مقداری را در نظر بگیرید:

$$A|a_i\rangle = a_i|a_i\rangle$$

در این معادله، کمیت a_i ویژه مقدار شماره i ام است و $|a_i\rangle$ هم ویژه کت متناظر با آن است.

- اصل موضوعه: در مکانیک کوانتومی، خروجی اندازه گیری یک عملگر مانند A فقط می تواند یکی از ویژه مقادیر آن عملگر (یعنی یکی از مقادیر $a_1, a_2, a_3, \dots$) باشد.



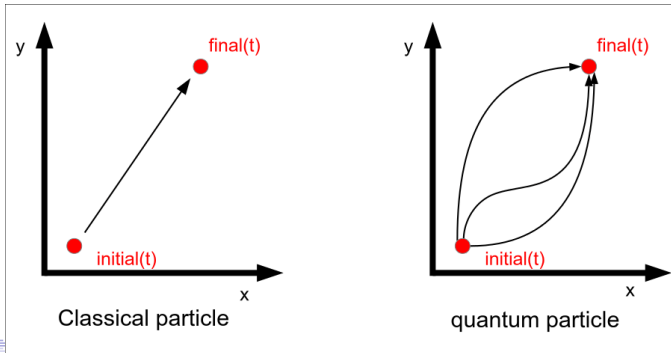
اندازه گیری در مکانیک کوانتومی: مفاهیم

- حالا سوال این است که اگر سیستم در یک حالت دلخواه مانند $|\psi\rangle$ باشد و ما بر روی مشاهده پذیر A اندازه گیری کنیم، کدام ویژه مقدار را به عنوان خروجی خواهیم یافت؟ پاسخ این پرسش را اصل موضوع بعدی می دهد:
- اصل موضوعه: فرض کنید که سیستم در حالت دلخواه و نرمال $|\psi\rangle$ باشد. وقتی بر روی مشاهده پذیر A با ویژه کت های $|a_i\rangle$ و ویژه مقادیر a_i اندازه گیری انجام می دهیم، احتمال یافتن سیستم در حالت $|a_i\rangle$ عبارت است از

$$P(a_i) = |\langle a_i | \psi \rangle|^2$$
- توجه: پس از اندازه گیری مشاهده پذیر A حالت سیستم به فقط یکی از ویژه کت های این مشاهده پذیر، مثلاً $|a_j\rangle$ ، رمبش می کند. همچنین حالت سیستم تغییر نخواهد کرد مگر اینکه تحول زمانی رخ دهد و یا اندازه گیری دیگری بر روی سیستم اعمال شود.
- توجه: خروجی احتمالاتی اندازه گیری از طرفی به ویژگی های ذاتی مشاهده پذیر A وابسته است و از طرف دیگر به حالت سیستم یعنی $|\psi\rangle$ ربط دارد.
- این اصل موضوعه ذات احتمالاتی مکانیک کوانتومی را آشکار می کند: در واقع در هنگام اندازه گیری، به جای یک خروجی معین، ما با احتمال خروجی های متفاوت سروکار خواهیم داشت.

تفاوت اندازه گیری در مکانیک کوانتومی و فیزیک کلاسیک

- در فیزیک کلاسیک اگر مقدار موقعیت و تکانه ذره را با دقت خوبی بدانیم، آنگاه می توانیم موقعیت ذره را در هر لحظه از زمان با دقت پیش بینی کنیم. این ویژگی فیزیک کلاسیک را تعیین پذیری فیزیک کلاسیک می نامند.
- در مکانیک کوانتومی اینطور نیست. یعنی ما باید حتما اندازه گیری انجام دهیم تا حالت نهایی سیستم مشخص شود. البته در مکانیک کوانتومی می توانیم احتمال یافتن سیستم در هر حالت خاص را پیش بینی کنیم. این ویژگی مکانیک کوانتومی را عدم تعیین پذیری می نامند.



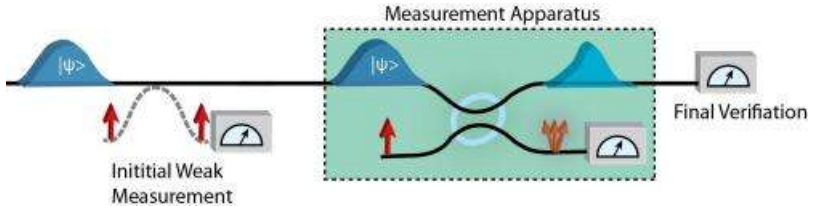
تفاوت اندازه گیری در مکانیک کوانتومی و فیزیک کلاسیک

- تفاوت بنیادی دیگر این است که در اندازه گیری بر روی یک سیستم کلاسیک، می توان بدون اختلال خاصی پارامترهای آن سیستم (مانند موقعیت و سرعت) را اندازه گیری کرد. ولی اندازه گیری بر روی سیستم کوانتومی ذاتا باعث مختل شدن حالت آن سیستم (رمبش تابع موج به یکی از ویژه حالت هایش) خواهد شد.

- این موضوع همچنان محل بحث و جدل است. مقاله زیر را ببینید:

[https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.](https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.109.100404)

109.100404

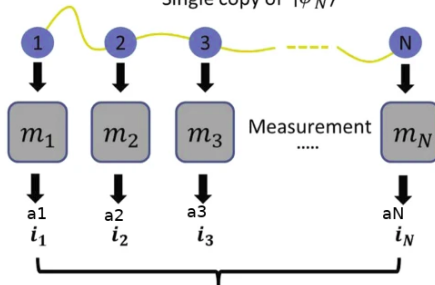


دیدگاه آنسامبلی به سیستم ها

مفهوم این خاصیت احتمالاتی چیست؟ فرض کنید N کپی از یک سیستم تهیه کرده ایم و روی هر کدام مشاهده پذیر A را اندازه می گیریم. در نتیجه این اندازه گیری ها، ویژه مقدار a_1 با تعداد i_1 ، ویژه مقدار a_2 با تعداد i_2 و ... به دست خواهد آمد. بنابراین از لحاظ احتمالاتی احتمال یافتن یک ویژه مقدار خاص مانند a_1 برابر است با $P(a_1) = i_1/N$. اصل موضوعه اخیر به ما می گوید که اگر تعداد کپی ها به سمت بینهایت میل کند آنگاه

$$P(a_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{i_1}{N} = |\langle a_1 | \psi \rangle|^2, \quad P(a_2) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{i_2}{N} = |\langle a_2 | \psi \rangle|^2, \quad \dots$$

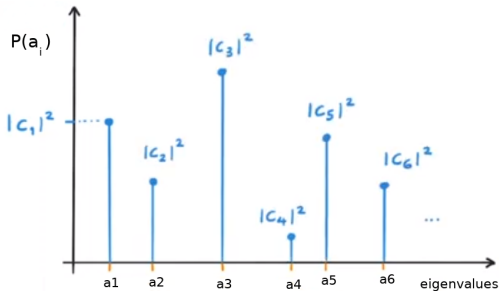
این دیدگاه به مفهوم احتمالات در مکانیک کوانتومی را دیدگاه آنسامبلی می نامند. درباره دیدگاه آنسامبلی و اهمیت آن تحقیق کنید.



معنی احتمالاتی ضرایب بسط

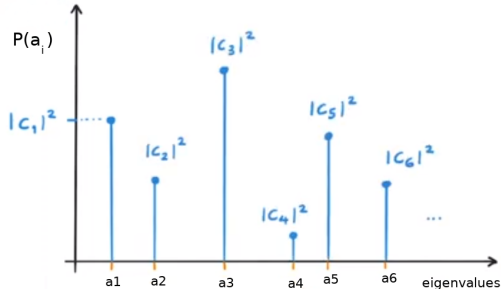
- در درس قبل دیدیم که یک حالت کوانتومی دلخواه را می توان به صورت $|\psi\rangle = \sum_{a'} c_{a'} |a'\rangle$ بر حسب ویژه کت های یک مشاهده پذیر مانند A بسط داد که در آن ضرایب $c_{a'}$ بسط اند. حال یک اندازه گیری بر روی مشاهده پذیر A انجام خواهیم داد. در نتیجه می توان دید که احتمال یافتن مقدار a_j برای مشاهده پذیر A برابر است با $P(a_j) = |\langle a_j | \psi \rangle|^2 = c_j c_j^* = |c_j|^2$

شکل زیر را ببینید. این شکل "توزیع احتمال" در اندازه گیری را نشان می دهد. اصل موضوعه اندازه گیری دقیقاً مقادیر $|c_j|^2$ یا همان توزیع احتمال را به ما می دهد.

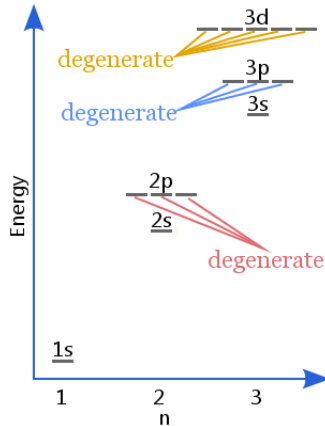


معنی احتمالاتی ضرایب بسط

- توجه: فرض کنید سیستم در یک حالت دلخواه است و ما بر روی مشاهده پذیر A اندازه گیری انجام می دهیم و سیستم به حالت $|a_j\rangle$ منتقل می شود. حال اگر دوباره یک اندازه گیری بر روی مشاهده پذیر A انجام دهیم، آنگاه حتما (با احتمال ۱۰۰ درصد) خروجی اندازه گیری مقدار a_j خواهد بود و احتمال یافتن سیستم در حالت $|a_i \neq j\rangle$ برابر صفر است.
- توجه: اگر می خواهیم بر روی مشاهده پذیر A اندازه گیری انجام دهیم، آنگاه برای سادگی محاسبات بهتر است حالت سیستم را بر حسب ویژه مقادیر A بسط دهیم و نه ویژه کت های دیگر مشاهده پذیرها. با این نکته در محاسبات آینده بسیار برخورد خواهیم کرد.



کاربرد اصل موضوع اندازه گیری در عمل



• تاکنون فرض کرده ایم که

۱ حالت سیستم $|\psi\rangle$ نرمال است، یعنی $\langle\psi|\psi\rangle = 1$.

۲ فرض کرده ایم که ویژه مقادیر سیستم غیر تبه‌گن هستند؛ یعنی مقادیر a_i مربوط به ویژه کت‌های متفاوت با هم برابر نیستند.

۳ فرض کرده ایم که ویژه مقادیر گسسته هستند.

• در ادامه می‌خواهیم این فرضیات را تک به تک بررسی کرده و نحوه بازنویسی اصل موضوعه اندازه گیری وقتی هر کدام از این فرضیات درست نباشند را بیان کنیم.

اگر حالت اولیه سیستم نرمال نباشد؟!

- اگر حالت سیستم نرمال باشد، یعنی $\langle \psi | \psi \rangle = 1$ ، آنگاه احتمال رخداد هر حالت برابر است با

$$P(a_j) = |\langle a_j | \psi \rangle|^2 = c_j c_j^* = |c_j|^2$$

بنابراین برای یک حالت نرمال داریم:

$$\langle \psi | \psi \rangle = \left(\sum_i c_i^* \langle a_i | \right) \left(\sum_j c_j | a_j \rangle \right) = \sum_i \sum_j c_i^* c_j \langle a_i | a_j \rangle = \sum_i \sum_j c_i^* c_j \delta_{ij}$$

و یا به عبارت دیگر مجموع احتمالات برابر یک است:

$$\sum_i |c_i|^2 = \sum_i P(a_i) = 1$$

که البته انتظار آن نیز می رفت (چون مجموع احتمالات باید یک باشد).

- ولی اگر حالت اولیه سیستم نرمال نباشد، یعنی $\langle \psi | \psi \rangle = N$ ، آنگاه باز هم می توان شرط "مجموع احتمالات برابر با یک" را برقرار ساخت:

$$P(a_j) = \frac{1}{N} |\langle a_j | \psi \rangle|^2 = \frac{|\langle a_j | \psi \rangle|^2}{\langle \psi | \psi \rangle}$$

پس اگر حالت اولیه سیستم نرمال نباشد، آنگاه می توان اصل موضوعه اندازه گیری را به صورت بالا تعمیم داد.

اگر حالت اولیه سیستم نرمال نباشد؟!

- تمرین: فرض کنید حالت جدیدی مانند $|\phi\rangle = \text{re}^{i\theta}|\psi\rangle$ را با استفاده از حالت اولیه سیستم یعنی $|\psi\rangle$ تعریف می کنیم که در آن r و θ اعداد حقیقی اند. پس کت حالت $|\phi\rangle$ در طول و یک فاز کلی با کت حالت $|\psi\rangle$ اختلاف دارد. می خواهیم ببینیم نتیجه اندازه گیری ها بر روی این دو کت حالت چه اختلافی با هم خواهند داشت.

اگر حالت اولیه سیستم نرمال نباشد؟!

تمرین: فرض کنید حالت جدیدی مانند $|\phi\rangle = \text{re}^{i\theta}|\psi\rangle$ را با استفاده از حالت اولیه سیستم یعنی $|\psi\rangle$ تعریف می کنیم که در آن r و θ اعداد حقیقی اند. پس کت حالت $|\phi\rangle$ در طول و یک فاز کلی با کت حالت $|\psi\rangle$ اختلاف دارد. می خواهیم ببینیم نتیجه اندازه گیری ها بر روی این دو کت حالت چه اختلافی با هم خواهند داشت.

پاسخ: احتمال یافتن سیستم در ویژه کت $|a_j\rangle$ برابر است با:

$$P(a_j) = \frac{|\langle a_j | \phi \rangle|^2}{\langle \phi | \phi \rangle} = \frac{\text{re}^{i\theta} \text{re}^{-i\theta} \langle a_j | \psi \rangle \langle a_j | \psi \rangle}{\langle \psi | \text{re}^{-i\theta} \text{re}^{i\theta} | \psi \rangle} = \frac{|\langle a_j | \psi \rangle|^2}{\langle \psi | \psi \rangle}$$

پس نتیجه اندازه گیری بر روی حالت های $|\phi\rangle = \text{re}^{i\theta}|\psi\rangle$ و $|\psi\rangle$ همیشه با هم برابر خواهند بود. بنابراین دو حالت $|\phi\rangle$ و $|\psi\rangle$ عملاً از لحاظ فیزیکی هم ارزش هستند. به عبارت دیگر طول کت ها و فاز کلی آنها هیچ تاثیری در نتایج اندازه گیری ها نخواهد داشت.

با ویژه مقادیر تبهگن چه کار کنیم؟

- اگر ویژه کت های یک مشاهده پذیر مانند A تبهگن باشند، و این تبهگنی برای ویژه مقدار a_i a_i گانه باشد، آنگاه برای همه $g_i = 1, 2, \dots, n$ معادله ویژه مقداری به صورت زیر خواهد بود:

$$A|a_i^n\rangle = a_i|a_i^n\rangle$$

به عبارت دیگر، همه ویژه کت های $|a_i^n\rangle$ ویژه مقداری برابر با a_i دارند.

- زیرفضای تبهگنی این عملگر n بُعدی خواهد بود. بعداً خواهیم آموخت که می توان این زیرفضا را بر اساس تعدادی پایه های فضا بسط داده و مشکل تبهگنی را حل کرد. یعنی می توان نوشت

$$|\psi\rangle = \sum_{g_i} \sum_{n=1}^n c_i^n |a_i^n\rangle$$

که در آن $c_i^n = \langle a_i^n | \psi \rangle$. دقت کنید که جمع بندی i را به دسته متفاوت شکسته ایم: جمع بندی بر روی حالت های غیر تبهگن و جمع بندی بر روی حالت های تبهگن (شمارنده n) شکسته ایم.

- نتیجه: اگر ویژه مقدار a_j تبهگن باشد و این تبهگنی نیز g_j گانه باشد، آنگاه احتمال یافتن ویژه مقدار a_j برابر است با مجموع احتمال رخداد حالت های تبهگن:

$$P(a_j) = \sum_{n=1}^{g_j} |\langle a_j^n | \psi \rangle|^2 = \sum_{n=1}^{g_j} |c_j^n|^2$$

بنابراین وقتی ویژه مقادیر تبهگن باشند، اصل موضوعه اندازه گیری به صورت بالا بازنویسی خواهد شد.

استفاده از عملگر تصویر برای اندازه گیری بر روی حالت های تبهگن

- در جلسه پیش آموختیم که عملگر $|a'\rangle\langle a'|$ را عملگر تصویر در جهت $|a'\rangle$ می نامند:

$$\Lambda_{a'} = |a'\rangle\langle a'|$$

- به همین ترتیب می توان عملگر تصویر به زیر فضای g_i بُعدی را به صورت زیر تعریف کرد:

$$\Lambda_i = \sum_{n=1}^{g_i} |a_i^n\rangle\langle a_i^n|$$

وقتی این عملگر بر روی یک حالت دلخواه مانند $|\psi\rangle$ عمل می کند، آن حالت را به زیر فضای تبهگن $|\psi_i\rangle$ تصویر می کند:

$$|\psi_i\rangle = \Lambda_i |\psi\rangle = \sum_{n=1}^{g_i} |a_i^n\rangle\langle a_i^n | \psi\rangle = \sum_{n=1}^{g_i} c_i^n |a_i^n\rangle$$

در نتیجه می توان رابطه زیر را به دست آورد:

$$\langle\psi_i | \psi_i\rangle = \sum_{n=1}^{g_i} |c_i^n|^2$$

این رابطه همان احتمال یافتن ویژه مقدار a_i است.
تمرین: رابطه اخیر را اثبات کنید.

- پس در حالت کلی می توان نوشت:

$$P(a_i) = \langle\psi_i | \psi_i\rangle$$

استفاده از عملگر تصویر برای اندازه گیری

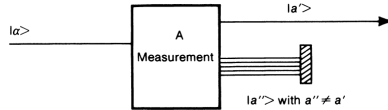
- ولی شکل های دیگری هم برای بازنویسی رابطه بالا وجود دارند. مثلاً

$$P(a_i) = \langle \psi_i | \psi_i \rangle = \langle \psi | \Lambda_i^\dagger \Lambda_i | \psi \rangle = \langle \psi | \Lambda_i | \psi \rangle$$

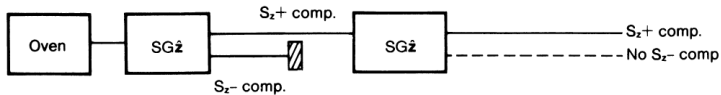
$$\Lambda_i^\dagger \Lambda_i = \Lambda_i \quad \text{زیرا}$$

- تمرین: رابطه $\Lambda_i^\dagger \Lambda_i = \Lambda_i$ را اثبات کنید.

- کار عملگر تصویر این است که اجازه می دهد فقط بخش خاصی از حالت سیستم عبور کرده و بخش های دیگر مسدود شوند. مثلاً در شکل زیر کت $|a'\rangle$ عبور می کند و همه کت های دیگر مسدود می شوند.



- همین وضعیت را در آزمایش اشترن-گرلاخ داشتیم. در این آزمایش کت $|S_z; +\rangle$ عبور می کند و کت $|S_z; -\rangle$ مسدود می شود.



طیف ویژه مقداری پیوسته

- حالا می خواهیم سیستم هایی را بررسی کنیم که در آنها ویژه مقادیر پیوسته هستند. در این حالت معادله ویژه مقداری به صورت زیر نوشته می شود:

$$A|\alpha\rangle = \alpha|\alpha\rangle$$

- در اینجا ویژه مقدار α یک متغیر پیوسته است. حالا می توان حالت دلخواه $|\psi\rangle$ را بر حسب کت های $|\alpha\rangle$ بسط داد و نوشت:

$$|\psi\rangle = \int d\alpha c(\alpha) |\alpha\rangle$$

که در آن $\langle\alpha|\psi\rangle = c(\alpha)$ ضریب بسط است.

- در نظریه احتمال وقتی با متغیرهای پیوسته سر و کار داریم، به جای احتمال از چگالی احتمال صحبت می کنیم.

- به این ترتیب، احتمال اینکه خروجی مد نظر ما در بازه $(\alpha, \alpha + d\alpha)$ باشد برابر است با

$$dP(\alpha) = |\langle\alpha|\psi\rangle|^2 d\alpha = |c(\alpha)|^2 d\alpha$$

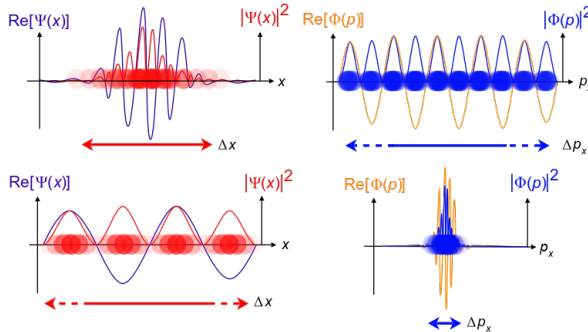
نتیجه: برای متغیرهای پیوسته، ضریب $|c(\alpha)|^2 = \frac{dP(\alpha)}{d\alpha}$ چگالی احتمال رخداد ویژه مقدار α در بازه $(\alpha, \alpha + d\alpha)$ را به دست می دهد.

مثال: نمایش یک کت حالت در فضای موقعیت و تابع موج سیستم

- فرض کنید می خواهیم کت حالت دلخواه $|\psi\rangle$ را در فضای موقعیت بسط دهیم. در اینصورت می توان نوشت:

$$|\psi\rangle = \int dx |x\rangle \langle x | \psi\rangle = \int dx \Psi(x) |x\rangle$$

که در آن $\Psi(x) = \langle x | \psi\rangle$ ضرایب بسط و یا همان تابع موج سیستم است. تابع موج سیستم، احتمال حضور سیستم در موقعیت x را به ما می دهد.



مقدار چشمداشتی یک عملگر

● مقدار چشمداشتی یک عملگر مانند A وقتی سیستم در حالت $|\phi\rangle$ قرار دارد برابر است با

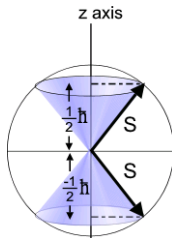
$$\langle A \rangle = \langle \phi | A | \phi \rangle$$

حال بر اساس ویژه کت های گسسته عملگر A می توان نوشت:

$$\langle A \rangle = \sum_i \sum_j \langle \phi | a_i \rangle \langle a_i | A | a_j \rangle \langle a_j | \phi \rangle = \sum_i \sum_j a_i \langle \phi | a_i \rangle \langle a_i | a_j \rangle \langle a_j | \phi \rangle$$

$$\text{و یا} \quad \langle A \rangle = \sum_i \sum_j a_i \delta_{ij} \langle \phi | a_i \rangle \langle a_j | \phi \rangle = \sum_i a_i |\langle a_i | \phi \rangle|^2$$

به عبارت دیگر مقدار چشمداشتی یک جور میانگین گیری آماری است: یعنی اگر تعداد بینهایت زیادی اندازه گیری روی مشاهده پذیر A انجام دهیم، معدل خروجی های این اندازه گیری ها برابر با $\langle A \rangle$ خواهد بود.



نکات مهم این درس

انتظار این است که در انتهای این درس شما بتوانید اصول اندازه گیری در مکانیک کوانتومی و مهم ترین نتایج آن را به درستی توضیح دهید. به ویژه انتظار می رود که بتوانید پرسش های زیر را پاسخ دهید:

- ۱ خروجی اندازه گیری یک عملگر مشاهده پذیر مانند A چه نوع مقادیری است؟
 - ۲ تفاوت اندازه گیری در فیزیک کلاسیک و کوانتوم را به صورت خلاصه شرح دهید.
 - ۳ اصل موضوعه اندازه گیری در مکانیک کوانتومی را بیان کنید.
 - ۴ منظور از رمبش تابع موج چیست؟
 - ۵ اصل موضوع اندازه گیری را با استفاده از دیدگاه آنسامبلی توضیح دهید.
 - ۶ وقتی یک کت دلخواه را بر اساس ویژه کت ها بسط می دهیم، معنی احتمالاتی ضرایب بسط چیست؟
 - ۷ اگر کت حالت اولیه سیستم نرمال نباشد، اصل موضوع اندازه گیری چطور بازنویسی می شود؟
 - ۸ توضیح دهید که چرا تغییر دادن طول و یا فاز کلی یک کت حالت نمی تواند بر روی نتایج اندازه گیری تاثیر داشته باشد.
 - ۹ اگر ویژه پایه های مورد استفاده تبهگن باشند، اصل موضوع اندازه گیری چطور بازنویسی می شود؟
 - ۱۰ چطور می توان با استفاده از عملگر تصویر، اصل موضوع اندازه گیری بر روی ویژه پایه های تبهگن را نوشت.
 - ۱۱ اصل موضوعه اندازه گیری برای طیف های پیوسته چطور بازنویسی می شود؟
 - ۱۲ منظور از تابع موج سیستم چیست؟
 - ۱۳ منظور از مقدار چشمداشتی یک عملگر چیست؟
- اگر درباره هر کدام از مفاهیم یاد شده بالا مشکلی احساس می کنید، لطفا درس را یک بار دیگر مرور کنید.

فراوش نکنیم که بهترین راه برای درک و ”درونی سازی“ مفاهیم ریاضی و فیزیک، حل مساله است. به همین دلیل سعی کنید دانسته های خود را با حل سوالات زیر محک زده و تقویت کنید.

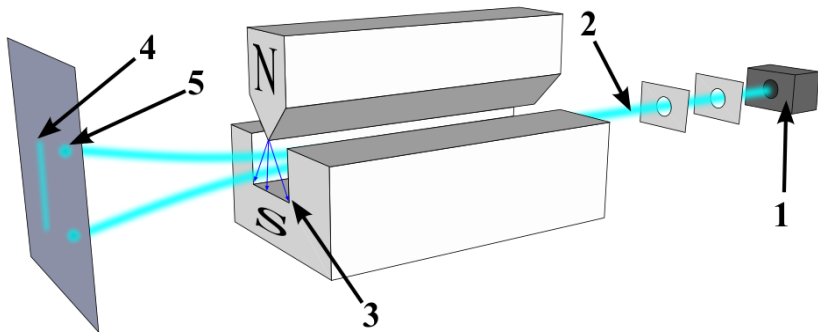


تمرین ها

- تمرین های موجود در متن درس را پاسخ دهید.

مبحث بعدی: مقدمه ای بر سیستم های اسپین ۱/۲

- در جلسه بعد پروسه اندازه گیری در مکانیک کوانتومی را برای سیستم های اسپین ۱/۲ به کار خواهیم بست و برخی نتایج آزمایش اشترن-گرلاخ را به صورت واضح تری توضیح خواهیم داد.



منابع

- ۱ Modern Quantum Mechanics, 3rd Edition, by J. J. Sakurai and Jim Napolitano, Cambridge University Pr.
- ۲ Principles of Quantum Mechanics by Ramamurti Shankar, Plenum Press
- ۳ Quantum Mechanics: Concepts and Applications, 2nd Edition by Nouredine Zettili
- ۴ Introduction to Quantum Mechanics by David J.Griffiths
- ۵ Quantum Mechanics: An Introduction by Walter Greiner
- ۶ Quantum Physics I by Prof. Barton Zwiebach, MIT OpenCourseWare
<https://ocw.mit.edu/courses/8-04-quantum-physics-i-spring-2016/>
- ۷ Quantum Physics II by Prof. Barton Zwiebach, MIT OpenCourseWare
<https://ocw.mit.edu/courses/8-06-quantum-physics-iii-spring-2018/>
- ۸ Professor M does Science,
<https://www.youtube.com/@ProfessorMdoesScience>

با سپاس از توجه شما

