

شناسنامه

The Feynman Lectures on Physics, Vol. 1, Ch. 38

درسنامه‌های فیزیک فاینمن، جلد ۱، فصل ۳۸

مترجم: محمدمسعود هاشمی

ویراستار: مرگان اروجلو

حروف‌چین: علی باقری کوچکسرائی

نسخه‌ی ۱.۰ تابستان ۱۳۹۹

حلقه‌ی مترجمان ژرفا

این اثر با کسب مجوز از ناشر بین‌المللی به منظور انتشار رایگان نسخه‌ی الکترونیکی آن تهیه شده است و حق نشر آن برای انجمن علمی ژرفا مستقر در دانشگاه صنعتی شریف محفوظ می‌باشد. ایرادات این نسخه را با ما در میان بگذارید و در پیشبرد این پروژه‌ی عام‌المنفعه مشارکت کنید. برای دریافت ترجمه‌ی دیگر فصل‌های این کتاب به وبسایت ژرفا مراجعه کنید.

این صفحه از قصد خالی گذاشته شده است.

فصل ۳۸

رابطه‌ی بین دیدگاه‌های موجی و ذره‌ای

۱.۳۸ دامنه‌های موج احتمال^۱

در این فصل ارتباط دیدگاه‌های موجی و ذره‌ای را بحث می‌کنیم. از فصل گذشته می‌دانیم که دیدگاه‌های موجی و ذره‌ای هیچ‌کدام درست نیستند. ما معمولاً سعی می‌کنیم نظریه‌ها را به صورت صحیح^۲، یا حداقل با دقت کافی^۳، ارائه کنیم تا وقتی بیشتر یاد می‌گیریم مجبور نشویم تغییرشان دهیم. نظریه‌ها را می‌توان گسترش داد اما تغییر نه! اما وقتی درباره‌ی تصویر موجی یا ذره‌ای صحبت می‌کنیم هردو تقریبی بوده و تغییر خواهند کرد. بنابراین آنچه در این فصل می‌آموزیم به یک معنی صحیح نمی‌باشد، بلکه نوعی استدلال نیمه‌شهودی است که بعداً دقیق‌تر خواهد شد. اما پدیده‌های معینی را وقتی به درستی در مکانیک کوانتوم تفسیر کنیم تغییر کمی خواهند کرد. البته دلیل انجام چنین کاری این است که قصد نداریم مستقیماً وارد مکانیک کوانتوم شویم، بلکه می‌خواهیم از انواع آثاری که پیدا خواهیم کرد، ایده‌ای داشته باشیم. به علاوه تمام آزمایش‌های ما با امواج و ذرات اند و بنابراین نسبتاً مناسب و ساده است تا قبل از اینکه ریاضیات کامل دامنه‌های مطرح در مکانیک کوانتوم را بدانیم، از ایده‌های موج و ذره استفاده کنیم تا از آنچه در محیط معین اتفاق می‌افتد، درکی داشته باشیم. سعی می‌کنیم همچنان که پیش می‌رویم، ضعیف‌ترین جاها را نشان دهیم. بیشتر مباحثی که عنوان می‌کنیم با تقریب خوبی درست‌اند، اما فقط موضوعاتی تفسیری هستند.

اول از همه، می‌دانیم که روش و چارچوب جدید توصیف جهان در مکانیک کوانتوم نسبت دادن دامنه به هر رویدادی است که می‌تواند اتفاق بیفتد، و اگر این رویداد شامل دریافت یک ذره باشد می‌توانیم این دامنه را برای پیدا کردن ذره در مکان‌ها و زمان‌های متفاوت نسبت دهیم؛ در این صورت احتمال پیدا کردن ذره

¹Probability wave amplitudes

²accurately (صحت یعنی انطباق داشتن با واقعیت - مترجم -)

³precisely (دقت یعنی نزدیک بودن مقادیر اندازه‌گیری به هم‌دیگر، اعم از اینکه این مقادیر منطبق با واقعیت باشد یا نباشد. تعبیر صحت و دقت مکرر در این فصل به کار رفته اند - مترجم -)

فصل ۳۸. رابطه‌ی بین دیدگاه‌های موجی و ذره‌ای

متناسب با مجذور قدر مطلق دامنه است. به‌طور کلی، دامنه‌ی پیدا کردن ذره در مکان‌ها و زمان‌های متفاوت، با مکان^۴ و زمان تغییر می‌کند.

در مورد خاصی مانند $e^{i(\omega t - k \cdot r)}$ ، دامنه به‌صورت سینوسی با مکان و زمان تغییر می‌کند (فراموش نکنید که این دامنه‌ها اعداد مختلط‌اند نه اعداد حقیقی) و شامل بسامد معین ω و عدد موج معین k می‌شود. این حالت متناظر با یک موقعیت محدودکننده‌ی کلاسیک است که ذره‌ای با انرژی معلوم E داریم که توسط معادله‌ی زیر با بسامد مربوط می‌شود:

$$E = \hbar\omega, \quad (۱.۳۸)$$

تکانه‌ی P ذره نیز معلوم بوده توسط رابطه‌ی زیر با عدد موج مرتبط می‌باشد:

$$p = \hbar k. \quad (۲.۳۸)$$

این یعنی ایده‌ی ذره محدودیت دارد. ایده‌ی ذره، مکان^۵ آن، تکانه‌اش و غیره که تا این اندازه استفاده می‌شود، از بعضی جهات رضایت‌بخش نیست. برای مثال، اگر دامنه‌ی پیدا کردن ذره در مکان‌های متفاوت با $e^{i(\omega t - k \cdot r)}$ ، که مجذور قدر مطلق آن مقداری ثابت است داده‌شود، به این معنی است که احتمال پیدا کردن ذره در تمام نقاط یکسان است. یعنی ما نمی‌دانیم ذره کجاست، ذره می‌تواند هرجایی باشد و عدم قطعیت^۶ بزرگی در مکانش وجود دارد.

از طرف دیگر، اگر مکان ذره کمابیش معلوم باشد و ما بتوانیم آن را نسبتاً به‌صورت صحیح پیش‌بینی نماییم، آنگاه احتمال پیدا کردن ذره در مکان‌های مختلف باید به ناحیه‌ی معینی، که طولش را Δx می‌نامیم، محدود باشد. بیرون از این ناحیه، احتمال صفر است. این احتمال مجذور قدر مطلق دامنه است، و اگر مجذور قدر مطلق صفر باشد دامنه نیز صفر است، به‌طوری که قطار موجی^۷ به طول Δx داریم (شکل ۱.۳۸)، و طول موج این قطار موج (فاصله‌ی بین گره‌های موج در قطار) متناظر با تکانه‌ی ذره می‌باشد. در این‌جا با چیز عجیبی راجع به امواج روبه‌رو می‌شویم، چیز بسیار ساده‌ای که موکداً ارتباطی با مکانیک کوانتوم ندارد. چیزی که هرکسی که با امواج سروکار دارد، حتی اگر مکانیک کوانتوم نداند آن را می‌داند: یعنی ما نمی‌توانیم طول موج منحصر به فردی برای قطار موج کوتاه تعریف کنیم. چنین قطار موجی طول موج معینی ندارد؛ پس عدم قطعیتی^۸ در عدد موج وجود دارد که وابسته به طول محدود قطار است، و بنابراین عدم قطعیتی در تکانه وجود دارد.

^۴position

^۵location

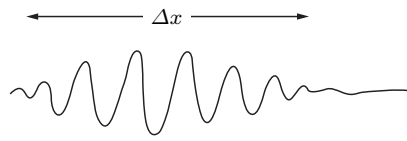
^۶uncertainty

^۷wave train (در این‌جا قطار موجی با طول کوتاه Δx در نظر گرفته شده است که بسته موج نامیده می‌شود، ر.ک. به شکل

۱.۳۸ – مترجم –)

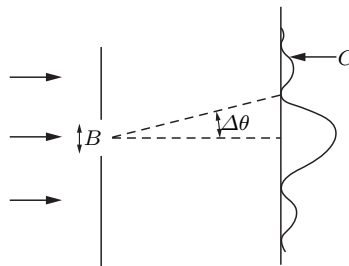
^۸indefiniteness (در این فصل از کلمات متفاوت مشابه‌ای که می‌توان عدم قطعیت، نامعینی و مانند آن ترجمه نمود استفاده

شده است؛ ما تمام آن‌ها را همان عدم قطعیت ترجمه کرده‌ایم – مترجم –)

۱.۳۸. بسته‌ی موج با طول Δx .

۲.۳۸ اندازه‌گیری مکان و تکانه

اکنون دو نمونه از این ایده را در نظر می‌گیریم، تا ببینیم چرا اگر مکانیک کوانتوم درست باشد عدم قطعیت در مکان و یا تکانه وجود دارد. قبلاً هم دیدیم که اگر این عدم قطعیت وجود نداشته باشد و اندازه‌گرفتن مکان و تکانه‌ی چیزی به‌طور هم‌زمان ممکن باشد، پارادوکس^۹ خواهیم داشت، خوشبختانه چنین پارادوکسی نداریم، و این واقعیت که عدم قطعیت به‌طور طبیعی از تصویر موجی حاصل می‌شود نشان می‌دهد که ناسازگاری‌ای وجود ندارد.



۲.۳۸. پراش ذرات در حال عبور از یک شکاف.

در این جا یک مثال است که ارتباط بین مکان و تکانه را در شرایطی که درک آن آسان است نشان می‌دهد. فرض کنید یک شکاف داریم و ذراتی با انرژی معین از راه بسیار دوری می‌آیند، به‌طوری که تمام آن‌ها به ناچار به‌صورت افقی می‌آیند (شکل ۲.۳۸). می‌خواهیم روی مولفه‌های عمودی تکانه تمرکز کنیم. همه‌ی این ذرات در مفهوم کلاسیک دارای تکانه‌ی افقی معین p_x هستند. بنابراین در مفهوم کلاسیک، تکانه‌ی عمودی p_y ، قبل از اینکه ذره وارد روزنه شود مشخصاً معلوم است. ذره بالا و پایین نمی‌رود، زیرا از چشمه‌ی خیلی دوری می‌آید و در نتیجه تکانه‌ی عمودی آن صفر است. اما حالا فرض کنید ذره از روزنه‌ای با پهنای B عبور می‌کند. در این صورت بعد از اینکه ذره از روزنه خارج شد، مکان عمودی آن، y را با دقت قابل توجهی می‌دانیم، یعنی $\pm B$ *. یعنی عدم قطعیت در مکان، Δy ، از مرتبه‌ی B است. اکنون چون می‌دانیم تکانه مطلقاً افقی می‌باشد، ممکن است هم‌چنین بخواهیم بگوییم که Δp_y برابر صفر است؛ اما این اشتباه است.

⁹paradox

* به‌طور دقیق‌تر، خطا در دانش ما از y ، $\pm B/2$ است؛ اما در حال حاضر فقط به ایده‌ی کلی علاقه‌مند هستیم، بنابراین نگرانی‌ای در مورد عامل ۲ نداریم.

فصل ۳۸. رابطه‌ی بین دیدگاه‌های موجی و ذره‌ای

ما یک بار می‌دانستیم که تکانه افقی بوده، ولی بیشتر نمی‌دانیم. قبل از اینکه ذرات از روزنه عبور کنند مکان‌های عمودی‌شان را نمی‌دانستیم. اکنون که مکان عمودی را با بیرون آمدن ذره از روزنه پیدا کرده‌ایم، اطلاعات مان در مورد تکانه‌ی عمودی را از دست داده‌ایم! چرا؟ بنابه نظریه‌ی موجی، پس از عبور امواج از شکاف، پخش‌شدگی یا پراش امواج رخ می‌دهد، دقیقاً همان‌طور که برای نور اتفاق می‌فتد. بنابراین احتمال معینی وجود دارد که ذراتی که از شکاف خارج می‌شوند دقیقاً به صورت مستقیم خارج نشوند. الگوی^{۱۰} حاصل توسط اثر پراش پخش شده‌است، و زاویه‌ی پخش‌شدگی که می‌توانیم به عنوان زاویه‌ی اولین کمینه^{۱۱} تعریف کنیم، اندازه‌ای از عدم قطعیت در زاویه‌ی نهایی است.

این الگو چگونه پخش می‌شود؟ پخش‌شدگی الگو به این معنی است که ذره برای بالا و پایین رفتن یعنی داشتن مولفه‌ی بالایی یا پایینی تکانه مقداری شانس دارد. می‌گوییم شانس و ذره زیرا می‌توانیم این الگوی پراش را با یک شمارنده‌ی ذره آشکار کنیم، و وقتی شمارنده ذره را دریافت می‌کند، مثلاً در نقطه‌ی C در شکل ۲.۳۸، کل ذره را دریافت می‌کند، به‌طوری که به مفهوم کلاسیک، ذره برای رسیدن از شکاف به C ، تکانه‌ی عمودی دارد.

برای بدست آوردن ایده‌ای تقریبی از پخش‌شدگی تکانه، می‌گوییم تکانه‌ی عمودی p_y پخش‌شدگی‌ای برابر با $p \cdot \Delta\theta$ دارد، که p تکانه‌ی افقی است. بزرگی $\Delta\theta$ در الگوی پخش‌شدگی چقدر است؟ می‌دانیم اولین کمینه در زاویه‌ی $\Delta\theta$ رخ می‌دهد به‌طوری که امواج از یک لبه‌ی شکاف باید به اندازه‌ی مسافت یک طول موج بیشتر از امواج طرف دیگر حرکت کنند، در این باره قبلاً بحث کردیم (فصل ۳۰). بنابراین $\Delta\theta$ برابر است با λ/B ، و در نتیجه در این آزمایش Δp_y برابر با $p \cdot \lambda/B$ می‌باشد. توجه شود که اگر B را کوچک‌تر کنیم و اندازه‌گیری صحیح‌تری از مکان ذره انجام دهیم، الگوی پراش پهن‌تر می‌شود. یادآوری می‌کنیم هنگامی که در آزمایش با میکروموج‌ها شکاف‌ها را بستیم، در فواصل دورتر شدت بیشتری داشتیم. پس با باریک‌تر کردن شکاف، الگوی پهن‌تری حاصل می‌شود، و احتمال بیشتری وجود دارد که ذره تکانه‌ی عرضی داشته‌باشد. بنابراین عدم قطعیت در تکانه‌ی عمودی نسبت معکوس با عدم قطعیت y دارد. در واقع می‌بینیم که حاصل ضرب این دو برابر $p \cdot \lambda$ است. اما λ طول موج و p تکانه است، و بنابر مکانیک کوانتوم، حاصل ضرب طول موج در تکانه برابر با ثابت پلانک h است. پس این قاعده را بدست می‌آوریم که حاصل ضرب عدم قطعیت‌های تکانه‌ی عمودی و مکان عمودی، از مرتبه‌ی h می‌باشد:

$$\Delta y \Delta p_y \geq \hbar/2. \quad (۲.۳۸)$$

ما نمی‌توانیم دستگاهی^{۱۲} تهیه‌کنیم که در آن مکان عمودی ذره را بدانیم و بتوانیم با قطعیتی بیشتر از رابطه‌ی (۲.۳۸) پیش‌بینی کنیم که به‌طور عمودی چگونه حرکت می‌کند؛ یعنی عدم قطعیت در تکانه‌ی عمودی باید بیشتر از $\hbar/2 \Delta y$ باشد که Δy عدم قطعیت در دانش ما از مکان است.

¹⁰pattern

¹¹minimum

¹²system

گاهی اوقات مردم می‌گویند مکانیک کوانتومی به‌طورکل اشتباه است. وقتی ذره‌ای از طرف چپ وارد می‌شود، تکانه‌ی عمودی آن صفر بوده و اکنون که از شکاف خارج شده‌است، مکان آن معلوم است. به‌نظر می‌رسد مکان و تکانه، هردو، با صحت دلخواه معلوم هستند. این کاملاً درست است که ما می‌توانیم ذره را دریافت کنیم، و موقع دریافت ذره تعیین می‌کنیم که مکان آن کجاست و تکانه‌ی آن موقع ورود به شکاف چقدر باید بوده‌باشد. این درست است، اما این، آن چیزی نیست که رابطه‌ی عدم قطعیت (۳.۳۸) به آن اشاره می‌کند. معادله‌ی (۳.۳۸) به قابلیت پیش‌بینی^{۱۳} موقعیت^{۱۴} اشاره می‌کند، نه به گذشته‌ی آن. این خوب نیست که بگوییم ”من قبل از اینکه ذره از میان شکاف عبور کند تکانه را می‌دانستم و اکنون مکان آن را می‌دانم“، زیرا اکنون دانش مربوط به تکانه از بین رفته‌است. این واقعیت که ذره از میان شکاف عبور کرده است دیگر به ما اجازه نمی‌دهد تکانه‌ی عمودی را پیش‌بینی کنیم. ما درباره‌ی نظریه‌ی پیش‌گویانه^{۱۵} صحبت می‌کنیم، نه فقط اندازه‌گیری‌های بعد از رویداد. بنابراین باید درباره‌ی آنچه می‌توانیم پیش‌بینی کنیم صحبت نماییم.

حالا بیایید موضوع را به روش دیگری بررسی کنیم. مثال دیگری از همین پدیده را که اندکی کمی‌تر است درنظر می‌گیریم. در مثال قبلی تکانه را به روش کلاسیک اندازه‌گیری کردیم. یعنی، جهت و سرعت و زاویه‌ها و غیره را درنظر گرفتیم، بنابراین تکانه را با تجزیه و تحلیل کلاسیک بدست آوردیم؛ اما چون تکانه وابسته به عدد موج است، در طبیعت راه دیگری هم برای اندازه‌گیری تکانه‌ی ذره، فوتون یا ذره‌ای دیگر، وجود دارد که هیچ مشابه کلاسیکی ندارد، زیرا از معادله‌ی (۲.۳۸) استفاده می‌شود. در این روش طول موج‌های امواج را اندازه می‌گیریم. اکنون تکانه را با این روش اندازه می‌گیریم.

فرض کنید توری‌ای با تعداد زیادی خطوط داریم (شکل ۳.۳۸)، و باریکه‌ای از ذرات به توری می‌فرستیم. ما غالباً این مسئله را بحث کرده‌ایم: اگر ذرات تکانه‌ی معینی داشته‌باشند، آنگاه به علت تداخل^{۱۶} الگوی بسیار تیزی در جهت معینی خواهیم داشت. همچنین درباره‌ی اینکه با چه صحتی می‌توانیم تکانه را تعیین نماییم، یعنی توان تفکیک^{۱۷} چنین توری‌ای چقدر است بحث کرده‌ایم. به‌جای محاسبه‌ی دوباره، به فصل ۳۰ مراجعه می‌کنیم. در آن‌جا می‌یابیم که عدم قطعیت نسبی در طول موج که می‌توانیم با یک توری معین اندازه بگیریم برابر $1/Nm$ است، که N تعداد خطوط روی توری و m مرتبه‌ی الگوی پراش است. یعنی،

$$\Delta\lambda/\lambda = 1/Nm. \quad (۴.۳۸)$$

این فرمول را می‌توانیم به‌صورت زیر بازنویسی کنیم:

$$\Delta\lambda/\lambda^2 = 1/Nm\lambda = 1/L, \quad (۵.۳۸)$$

در این فرمول L فاصله‌ی نشان داده‌شده در شکل ۳.۳۸ است. این فاصله تفاضل کل مسافتی است که ذره یا موج یا هرچیز دیگری اگر از پایین توری بازتابیده شود باید طی کند، از مسافتی که اگر از بالای توری بازتابیده

¹³predictability

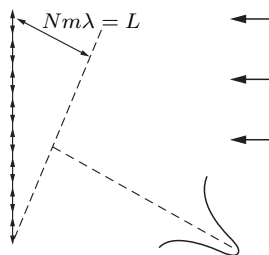
¹⁴situation

¹⁵predictive theory

¹⁶interference

¹⁷resolving power

فصل ۳۸. رابطه‌ی بین دیدگاه‌های موجی و ذره‌ای



۳.۳۸. تعیین تکانه با استفاده از توری پراش.

شود باید طی کند. یعنی امواجی که الگوی پراش را تشکیل می‌دهند امواجی هستند که از قسمت‌های متفاوت توری می‌آیند. اولین امواجی که می‌رسند امواجی هستند که از انتهای پایینی توری می‌آیند یعنی از ابتدای قطار موج، و بقیه‌ی آن‌ها از قسمت‌های بعدی قطار موج، قسمت‌های مختلف توری می‌آیند، تا وقتی که سرانجام آخرین موج می‌رسد. این موج دربرگیرنده‌ی نقطه‌ای در قطار موج است که در فاصله‌ی L پشت اولین نقطه قرار دارد. بنابراین برای اینکه در طیف خط تیزی داشته باشیم که متناظر با تکانه‌ی معین با عدم قطعیتی است که توسط رابطه‌ی (۴.۳۸) داده می‌شود، باید قطار موجی با طول حداقل L داشته باشیم. اگر قطار موج بیش از حد کوتاه باشد از کل توری استفاده نمی‌کنیم؛ اگر قطار موج بیش از حد کوتاه باشد امواجی که طیف را تشکیل می‌دهند فقط از قسمت بسیار کوچکی از توری بازتابیده شده‌اند، و توری درست کار نمی‌کند، در نتیجه پخش شدگی زاویه‌ای بزرگی پیدا خواهیم کرد. برای بدست آوردن پخش شدگی زاویه‌ای باریک‌تر، باید از کل توری استفاده کنیم، به طوری که حداقل در بعضی از لحظات کل قطار موج به طور هم‌زمان از تمام قسمت‌های توری پراکنده شود. پس برای اینکه عدم قطعیت در طول موج کمتر از چیزی باشد که با رابطه‌ی (۵.۳۸) داده می‌شود، قطار موج باید به طول L باشد. ضمناً:

$$\Delta\lambda/\lambda^2 = \Delta(1/\lambda) = \Delta k/2\pi. \quad (۶.۳۸)$$

بنابراین

$$\Delta k = 2\pi/L. \quad (۷.۳۸)$$

که در این رابطه، L طول قطار موج است.

این بدین معنی است که اگر قطار موجی داشته باشیم که طولش کمتر از L باشد، عدم قطعیت در عدد موج باید از $2\pi/L$ بیشتر باشد. یا عدم قطعیت در عدد موج ضرب در طول قطار موج، که برای لحظه‌ای Δx می‌نامیم، باید از 2π بیشتر باشد. طول قطار موج را Δx نامیدیم زیرا عدم قطعیت در موقعیت ذره است. اگر قطار موج فقط در یک طول محدود وجود داشته باشد، این طول همان جایی است که می‌توانیم ذره را، با عدم قطعیت Δx ، در آن پیدا کنیم. اکنون این ویژگی امواج، که طول قطار موج ضرب در عدم قطعیت عدد موج همراه با آن حداقل برابر با π است، ویژگی‌ای است که برای هرکسی که آن‌ها را مطالعه کرده است شناخته شده می‌باشد. این ویژگی ارتباطی با مکانیک کوانتوم ندارد؛ به طور ساده اگر قطار موج محدودی

داشته باشیم، نمی‌توانیم امواج را خیلی دقیق بشماریم. بیاید روش دیگری برای پیدا کردن دلیل آن بیابیم. فرض کنید ما قطار موج محدودی به طول L داریم؛ به علت نحوه‌ی کاهشی که باید در دو انتهایش پیدا کند، همان‌طور که در شکل ۱۰۳۸ نشان داده شده، تعداد موج‌ها در طول L با چیزی مانند ± 1 عدم قطعیت دارد. اما تعداد موج‌ها در طول L برابر است با $kL/2\pi$. بنابراین k نامعین می‌باشد، و دوباره به نتیجه‌ی (۷.۳۸) می‌رسیم، که ویژگی‌ای صرفاً از موج‌ها است. چه امواج در فضا باشند و k عدد رادیان‌ها بر سانتی‌متر و L طول قطار موج باشد، و چه امواج در زمان باشند و ω تعداد نوسان‌ها بر ثانیه و T «مدت زمان» دوام قطار موج باشد این موضوع صادق است. یعنی اگر قطار موجی داشته باشیم که فقط برای زمان معین T دوام داشته باشد، آنگاه عدم قطعیت در بسامد با رابطه‌ی زیر داده می‌شود:

$$\Delta\omega = 2\pi/T. \quad (۸.۳۸)$$

ما سعی کردیم تأکید کنیم که این‌ها فقط ویژگی‌های امواج‌اند، و مثلاً در نظریه‌ی صوت به خوبی شناخته شده هستند.

نکته این‌جا است که در مکانیک کوانتوم عدد موج را به عنوان اندازه‌ای از تکانه‌ی ذره تفسیر می‌کنیم، با این قاعده که $p = \hbar k$ ، به‌طوری که بنابر رابطه‌ی (۷.۳۸)، $\Delta p \approx \hbar/\Delta x$. پس این محدودیتی از ایده‌ی کلاسیک تکانه است (به‌طورطبیعی، اگر بخواهیم ذرات را با امواج نشان دهیم باید به طریقی محدودیت وجود داشته باشد!). خوب است قاعده‌ای پیدا کرده‌ایم که وقتی ایده‌های کلاسیک شکست می‌خورد ایده‌ای به ما می‌دهد.

۳۰۳۸ پراش بلور^{۱۸}

حال بازتاب امواج ذره از بلور را در نظر می‌گیریم. بلور شیء ضخیمی است که تعداد زیادی اتم‌های مشابه، که بعضی از پیچیدگی‌های آن را بعداً در نظر می‌گیریم، در آرایه‌ای زیبا دارد. سوال این است که آرایه را چگونه بچینیم که در یک جهت معین برای باریکه‌ای معین، مثلاً نور (پرتو x)، الکترون‌ها، نوترون‌ها یا هرچیز دیگری، بازتاب قوی بیشینه‌ای داشته باشیم. برای بدست آوردن بازتاب قوی، پراکندگی^{۱۹} از تمام اتم‌ها باید هم‌فاز^{۲۰} باشد. تعداد پراکندگی‌های هم‌فاز و ناهم‌فاز نمی‌تواند برابر باشد وگرنه امواج توسط هم‌دیگر خنثی می‌شوند. روش چیدمان، پیدا کردن نواحی با فاز ثابت است که، همان‌طور که قبلاً توضیح داده‌ایم؛ صفحاتی هستند که با جهت‌های اولیه و نهایی زاویه‌های برابر می‌سازند (شکل ۴.۳۸).

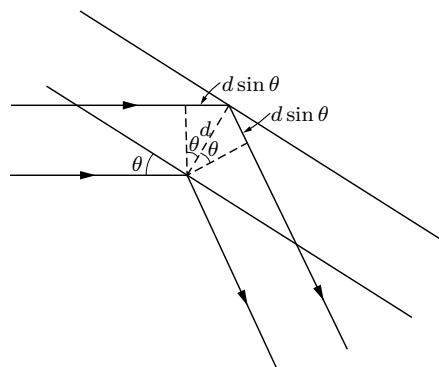
اگر دو صفحه‌ی موازی مانند شکل ۴.۳۸ را در نظر بگیریم، به شرط آنکه اختلاف مسافت طی شده توسط جبهه‌ی موج برابر با عدد درستی از طول موج‌ها باشد، امواج پراکنده شده از دو صفحه هم‌فاز می‌باشند.

^{۱۸}Crystal diffraction

^{۱۹}scattering

^{۲۰}in phase

فصل ۳۸. رابطه‌ی بین دیدگاه‌های موجی و ذره‌ای



۴.۳۸. پراکندگی امواج توسط صفحات بلور.

می‌توان نشان داد این اختلاف برابر با $2d \sin \theta$ ، که d فاصله‌ی عمودی بین دو صفحه است. بنابراین شرط بازتاب همدوس^{۲۱} این است:

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (n = 1, 2, \dots). \quad (9.38)$$

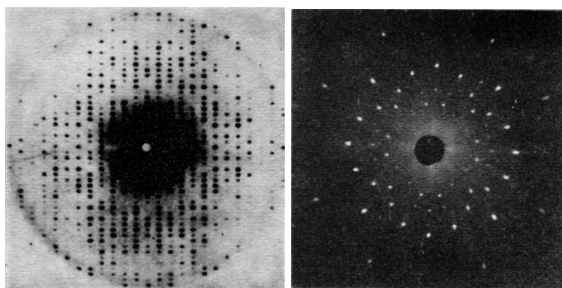
برای مثال، اگر بلور به گونه‌ای است که اتم‌ها روی صفحاتی منطبق با شرط (۹.۳۸) با $n = 1$ قرار داشته باشند، آنگاه بازتابی قوی وجود خواهد داشت. از سوی دیگر اگر اتم‌های دیگری با همان ماهیت (چگالی برابر) در نیمه‌راه بینابین وجود داشته باشند، پس صفحات میانی نیز با شدتی برابر پراکنده می‌کنند و امواج با یکدیگر تداخل کرده، اثری ایجاد نمی‌کنند. بنابراین در رابطه‌ی (۹.۳۸) d باید به صفحات مجاور مربوط باشد؛ ما نمی‌توانیم صفحه‌ای را پنج لایه عقب‌تر در نظر بگیریم و از این فرمول استفاده کنیم! جالب است که بلورهای واقعی معمولاً به سادگی نوعی اتم منفرد که به صورت معینی تکرار شده، نیستند. در عوض، اگر مشابه دوبعدی ایجاد کنیم، بلورها بسیار شبیه کاغذدیواری‌اند، که در آن نوعی شکل است که در سراسر کاغذدیواری تکرار می‌شود. در مورد اتم‌ها، منظورمان از «شکل» نوعی چینش است – مثلاً برای کربنات کلسیم، کلسیم و کربن و سه اکسیژن و غیره – که ممکن است شامل تعداد نسبتاً زیادی اتم باشد. اما هر چه که باشد، شکل در الگو تکرار می‌شود. این شکل بنیادی سلول واحد^{۲۲} نامیده می‌شود.

الگوی بنیادی تکرار چیزی را که ما نوع شبکه^{۲۳} می‌نامیم تعریف می‌کند؛ نوع شبکه را می‌توان فوراً با نگاه به بازتاب‌ها و دیدن تقارن آن‌ها تعیین نمود. به عبارت دیگر، جایی که ما تمام بازتاب‌ها را پیدا می‌کنیم نوع شبکه را تعیین می‌کند، اما برای تعیین اینکه در هر جزء تشکیل‌دهنده شبکه چه چیزی است، باید شدت پراکندگی در جهات مختلف را در نظر بگیریم. جهت پراکندگی به نوع شبکه بستگی دارد، اما شدت آن با آنچه درون هر سلول یک‌ه است، و اینکه ساختار بلورها به چه صورتی عمل می‌نماید تعیین می‌شود.

²¹coherent reflection

²²unit cell

²³lattice type

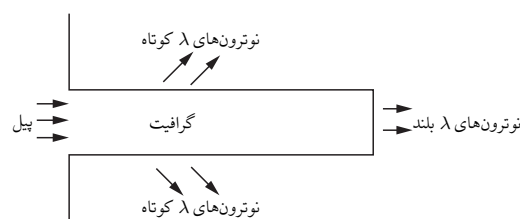


شکل ۵.۳۸

شکل ۶.۳۸

دو عکس از الگوهای پراش پرتو x در شکل‌های ۵.۳۸ و ۶.۳۸ نشان داده شده‌اند؛ که به ترتیب پراکندگی از سنگ نمک و میوگلوبین^{۲۴} را نشان می‌دهند.

ضمناً، اگر فاصله‌ی نزدیک‌ترین صفحات کمتر از $\lambda/2$ باشد اتفاق جالبی رخ می‌دهد. در این حالت، معادله‌ی (۹.۳۸) جوابی برای n ندارد. در نتیجه اگر λ بزرگ‌تر از دوبرابر فاصله‌ی بین صفحات مجاور باشد آنگاه الگوی پراش عرضی وجود ندارد، و نور یا هر چیز دیگری که باشد، مستقیماً بدون بیرون‌جهیدن یا منحرف‌شدن از ماده عبور می‌کند. بنابراین در مورد نور، که λ بسیار بزرگ‌تر از فاصله‌ی مذکور است، قطعاً از ماده عبور می‌کند و الگوی بازتاب از صفحات بلور وجود ندارد.

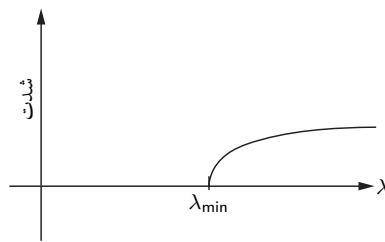


۷.۳۸. پخش نوترون‌های پیل اتمی از طریق بلوک گرافیت.

این واقعیت نتیجه‌ی جالبی نیز در مورد پیل‌های اتمی که تولید نوترون می‌کنند دارد (به عقیده‌ی همه، این نوترون‌ها به‌وضوح ذرات هستند!). اگر اجازه دهیم این نوترون‌ها به یک بلوک طولانی گرافیت وارد شوند، پخش شده و به راه خود ادامه می‌دهند (شکل ۷.۳۸). نوترون‌ها پخش می‌شوند زیرا طبق نظریه‌ی موجی به علت پراش از صفحات بلور به‌شدت توسط اتم‌ها برگردانده می‌شوند. به نظر می‌رسد که اگر قطعه‌ای بسیار طولانی از گرافیت داشته باشیم، تمام نوترون‌هایی که از انتهای دورتر می‌آیند طول موج‌های بلند دارند! در واقع، اگر شدت را به‌صورت تابعی از طول موج رسم کنیم، به‌جز برای طول موج‌های بلندتر از یک کمینه‌ی معین، چیزی نخواهیم داشت (شکل ۸.۳۸). به عبارت دیگر، می‌توانیم نوترون‌های خیلی‌کند

²⁴myoglobin

فصل ۳۸. رابطه‌ی بین دیدگاه‌های موجی و ذره‌ای



۳۸.۸. شدت نوترون‌های خارج شده از میله‌ی گرافیت به صورت تابعی از طول موج.

را از آن راه دریافت کنیم. فقط کمترین نوترون‌ها عبور می‌کنند؛ این نوترون‌ها توسط صفحات بلور گرافیت پراشیده یا پراکنده نمی‌شوند، بلکه مانند عبور نور از میان شیشه حرکت مستقیم داشته، و به اطراف پراکنده نمی‌شوند. نمودهای بسیار دیگری از واقعیت امواج نوترون و امواج ذرات دیگر وجود دارد.

۴.۳۸ اندازه‌ی اتم

اکنون کاربرد دیگری از رابطه‌ی عدم قطعیت (۳.۳۸) را در نظر می‌گیریم. این کاربرد نباید بیش از حد جدی گرفته شود، چون ایده‌ی درستی است اما تجزیه و تحلیل آن خیلی درست نیست. این ایده باید با تعیین اندازه‌ی اتم‌ها سروکار داشته باشد، و این واقعیت که از دید فیزیک کلاسیک الکترون‌ها نور تابش کرده، به طرف هسته حرکت مارپیچ می‌کنند تا اینکه درست روی هسته قرار می‌گیرند. اما از دید مکانیک کوانتوم چنین چیزی نمی‌تواند درست باشد؛ زیرا در این صورت ما می‌دانیم هر الکترون کجا بوده و با چه سرعتی حرکت می‌کرده است.

فرض کنید یک اتم هیدروژن داریم، و مکان الکترون را اندازه می‌گیریم؛ نباید بتوانیم پیش‌بینی کنیم الکترون دقیقاً کجا خواهد بود، وگرنه تکانه پهنای بی‌نهایت خواهد داشت. هروقت به الکترون نگاه می‌کنیم در یک جایی قرار دارد، اما دامنه‌ای برای حضور در جاهای متفاوت دارد به طوری که احتمال اینکه در جاهای متفاوت یافته شود وجود دارد. همه‌ی این جاها نمی‌توانند در هسته باشند؛ فرض می‌کنیم پهنایی از مرتبه‌ی a در مکان وجود دارد. یعنی فاصله‌ی الکترون از هسته معمولاً حدود a است؛ ما a را با کمینه کردن انرژی کل اتم بدست خواهیم آورد.

بنابر رابطه‌ی عدم قطعیت، پهنای تکانه تقریباً $\hbar/a$ است، به طوری که اگر سعی کنیم تکانه‌ی الکترون را به طریقی اندازه بگیریم، مثلاً با پراکندگی پرتوهای x و جستجوی اثر دوپلر از پراکننده‌ی متحرک، انتظار داریم که هیچ وقت صفر بدست نیاید – الکترون هنوز نایستاده است – اما تکانه‌ها باید از مرتبه‌ی $p \approx \hbar/a$ باشند. بنابراین انرژی جنبشی تقریباً برابر است با $\frac{1}{2}mv^2 = p^2/2m = \hbar^2/2ma^2$. (به یک معنا این نوعی تجزیه و تحلیل ابعادی^{۲۵} است، برای پیدا کردن اینکه انرژی جنبشی به چه صورتی به ثابت کاهیده‌ی

²⁵dimensional analysis

پلانک^{۲۶}، m ، و اندازه‌ی اتم وابسته است، نیازی نیست پاسخ ما مبتنی بر عوامل و ضرایبی مانند π ، 2 و غیره باشد؛ ما حتی a را به‌طور خیلی دقیق تعریف نکرده‌ایم). حال انرژی پتانسیل برابر است با منهای e^2 تقسیم بر فاصله از مرکز یا a/e^2 - . یادآوری می‌کنیم e^2 مجذور بار الکترون تقسیم بر $4\pi\epsilon_0$ است. در این‌جا نکته این است که اگر a کوچک‌تر شود، انرژی پتانسیل کاهش می‌یابد^{۲۷}، اما به‌علت اصل عدم قطعیت، a ی کوچک‌تر مستلزم تکانه‌ی بزرگ‌تر و در نتیجه انرژی جنبشی بیشتر است. انرژی کل برابر است با

$$E = \hbar^2/2ma^2 - e^2/a. \quad (۱۰.۳۸)$$

ما نمی‌دانیم a چیست، اما می‌دانیم اتم تمایل دارد خود را در وضعیتی قرار دهد که انرژی آن تا جای ممکن کم باشد. برای کمینه‌کردن E ، از آن نسبت به a مشتق گرفته و برابر صفر قرار می‌دهیم و معادله را برای a حل می‌کنیم. مشتق E برابر است با

$$dE/da = -\hbar^2/ma^3 + e^2/a^2, \quad (۱۱.۳۸)$$

و با قراردادن $dE/da = 0$ ، مقدار زیر برای a بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} a_0 &= \hbar^2/me^2 = 0.528 \text{ آنگستروم}, \\ &= 0.528 \times 10^{-10} \text{ متر}. \end{aligned} \quad (۱۲.۳۸)$$

این فاصله‌ی خاص شعاع بور^{۲۸} نامیده می‌شود، و با این حساب ما آموخته‌ایم که ابعاد اتمی از مرتبه‌ی آنگستروم است. این بسیار خوب و درواقع شگفت‌انگیز است، چون ما تاکنون هیچ پایه و اساسی برای درک اندازه‌ی اتم‌ها نداشته‌ایم! اتم‌ها از دیدگاه کلاسیک کاملاً غیرممکن هستند، زیرا طبق این دیدگاه الکترون‌ها به‌طور ماریپیچ به طرف هسته حرکت خواهند کرد.

اگر برای بدست‌آوردن انرژی، مقدار a_0 را از رابطه‌ی (۱۲.۳۸) در (۱۰.۳۸) قرار دهیم خواهیم داشت:

$$E_0 = -e^2/2a_0 = -me^4/2\hbar^2 = -13.6 \text{ eV}. \quad (۱۳.۳۸)$$

انرژی منفی به چه معنی است؟ انرژی منفی یعنی الکترون در اتم نسبت به زمانی که آزاد است انرژی کمتری داشته باشد؛ این یعنی الکترون مقید است، یعنی برای بیرون‌انداختن الکترون انرژی مصرف می‌شود. انرژی از مرتبه‌ی 13.6 eV مصرف می‌شود تا اتم هیدروژن یونیزه شود. باتوجه به نحوه‌ی استدلالی که کرده‌ایم، ممکن است تصور کنیم دلیلی ندارد این انرژی موردنیاز دو یا سه برابر یا نیمی از این یا $(1/\pi)$ نباشد. اما

^{۲۶} reduced Planck constant (یعنی همان نماد $\hbar$ که برابر است با $h/2\pi$ و h ثابت پلانک است. وجه تسمیه‌ی آن باتوجه تعریفش واضح می‌باشد - مترجم -)

^{۲۷} با توجه به منفی بودن آن - مترجم -

این تصور اشتباه است، زیرا ما در این روش از تمام ثابت‌ها استفاده نموده‌ایم و در نتیجه عدد درستی استنتاج شده‌است! این عدد $۱۳/۶$ الکترون‌ولت، انرژی ریدبرگ نامیده شده و انرژی یونیزاسیون هیدروژن است. بنابراین اکنون می‌فهمیم که چرا داخل زمین فرو نمی‌رویم. وقتی راه می‌رویم، کفش‌های ما با جرم‌های اتم‌های خود به کف زمین با جرم اتم‌های آن فشار وارد می‌کنند. برای اینکه الکترون‌ها اتم‌ها را به هم فشرده‌تر کنند در فضای کوچک‌تری محدود می‌شوند. پس به علت اصل عدم قطعیت، میانگین تکانه‌ها باید بزرگ‌تر باشد و این به معنی انرژی بالاتر است. این مقاومت در برابر تراکم اتمی یک اثر کلاسیکی نیست، بلکه اثری کوانتومی است. از دیدگاه کلاسیک، انتظار داریم که اگر تمام الکترون‌ها و پروتون‌ها را به هم نزدیک‌تر سازیم انرژی باز هم بیشتر کاهش یابد و بهترین آرایش بارهای مثبت و منفی در فیزیک کلاسیک وقتی است که همه در بالای یکدیگر باشند. این موضوع در فیزیک کلاسیک به خوبی شناخته شده بوده و به علت وجود اتم، معمایی بوده‌است. البته، دانشمندان گذشته برای خروج از این مشکل راه‌حل‌هایی را ابداع کردند، اما این اهمیتی ندارد، اکنون راه‌حل درست را داریم! (شاید)

ضمناً معلوم شده‌است در وضعیتی که تعداد زیادی الکترون وجود دارد، الکترون‌ها سعی می‌کنند خود را از یکدیگر دور نگه دارند، گرچه در حال حاضر دلیلی برای درک این موضوع نداریم. اگر یک الکترون فضای معینی را اشغال نماید، الکترون دیگر همان فضا اشغال نمی‌کند. به‌طور دقیق‌تر، دو حالت اسپین وجود دارد، طوری که دو الکترون می‌توانند روی یکدیگر قرار گرفته، هرکدام در یک جهت بچرخند؛ اما پس از آن نمی‌توانیم الکترون بیشتری در آن‌جا قرار دهیم، ما مجبوریم الکترون‌های دیگر را در جای دیگر قرار دهیم، و دلیل واقعی اینکه ماده دارای استحکام است همین است. اگر می‌توانستیم تمام الکترون‌ها را در همان‌جا قرار دهیم ماده بیشتر از آنچه هست چگالیده^{۲۹} می‌شد. این واقعیت که همه‌ی الکترون‌ها نمی‌توانند روی یکدیگر قرارگیرند، علت ایجاد و تشکیل میزها و هر چیز جامد دیگر است. واضح است که برای درک خواص ماده نیاز به استفاده از مکانیک کوانتوم داریم و مکانیک کلاسیک کافی نیست.

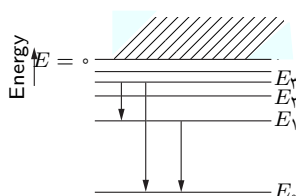
۵.۳۸ ترازهای انرژی^{۳۰}

ما درباره‌ی اتم در شرایط کمترین انرژی ممکن‌اش صحبت کردیم، اما معلوم شده که الکترون می‌تواند کارهای دیگری هم انجام دهد. الکترون می‌تواند با انرژی بیشتری جهش داشته باشد، و در نتیجه بسیاری از حرکات ممکن متفاوت برای اتم وجود دارد. بر اساس مکانیک کوانتوم، در شرایط مانا^{۳۱} فقط انرژی‌های معینی برای یک اتم می‌تواند وجود داشته‌باشد. نموداری می‌کشیم (شکل ۹.۳۸) که در آن انرژی را به صورت عمودی ترسیم کرده، و برای هر مقدار مجاز انرژی خطی افقی رسم می‌کنیم. هنگامی که الکترون آزاد است،

²⁹condense

³⁰Energy levels

³¹stationary condition



۹.۳۸. نمودار انرژی اتم، که چندین تراز ممکن را نشان می‌دهد.

یعنی وقتی انرژی‌اش مثبت است، می‌تواند هر انرژی‌ای داشته‌باشد یا با هر تندی‌ای حرکت کند. اما انرژی‌های مقید دلخواه نیستند. اتم باید یکی از مقادیر مجاز انرژی را داشته‌باشد، مانند آنچه در شکل ۹.۳۸ نشان داده شده‌است.

مقادیر مجاز انرژی را E_0, E_1, E_2, E_3 می‌نامیم. اگر اتم در ابتدا در یکی از «حالت‌های برانگیخته»^{۳۲} E_1, E_2 و غیره باشد، برای همیشه در آن حالت نمی‌ماند. اتم دیر یا زود به حالت پایین‌تر فروافت کرده و انرژی را به صورت نور تابش می‌نماید. بسامد نوری که گسیل می‌شود از قانون بقای انرژی به علاوه‌ی این استنتاج مکانیک کوانتومی که بسامد نور توسط رابطه‌ی (۱۰.۳۸) به انرژی مربوط می‌شود، تعیین می‌شود. بنابراین بسامد نوری که برای مثال در گذار از انرژی E_3 به E_1 آزاد می‌شود برابر است با

$$\omega_{31} = (E_3 - E_1)/\hbar. \quad (14.38)$$

پس این بسامد مشخصه‌ی اتم است و خط گسیل طیفی را تعریف می‌کند. گذار ممکن دیگر از E_3 به E_0 خواهد بود که بسامد متفاوت زیر را دارد:

$$\omega_{30} = (E_3 - E_0)/\hbar. \quad (15.38)$$

امکان دیگر این است که اگر اتم به حالت E_1 برانگیخته شود می‌تواند با گسیل فوتونی با بسامد زیر به حالت زمینه E_0 فروافت نماید:

$$\omega_{10} = (E_1 - E_0)/\hbar. \quad (16.38)$$

علت اینکه سه گذار را مطرح کردیم این است که به رابطه‌ی جالبی اشاره نماییم. از روابط (۱۴.۳۸)، (۱۵.۳۸) و (۱۶.۳۸) به سادگی دیده می‌شود که

$$\omega_{30} = \omega_{31} + \omega_{10}. \quad (17.38)$$

به‌طور کلی، اگر ما دو خط طیفی پیدا کنیم، انتظار داریم خط دیگری در مجموع فرکانس‌های آن دو (یا در تفاضل فرکانس‌های‌شان) پیدا شود. همچنین انتظار داریم تمام خطوط با پیدا کردن مجموعه‌ای از ترازها قابل

³²excited states

درک باشد به‌طوری که هر خط متناظر با اختلاف انرژی یک جفت از ترازها باشد. به این اتفاق قابل توجه در بسامدهای طیفی قبل از کشف مکانیک کوانتوم توجه شده بود و اصل ترکیبی ریتز^{۳۳} نامیده می‌شود. باز این موضوع از دیدگاه مکانیک کلاسیک اسرارآمیز است. اجازه دهید بر این که مکانیک کلاسیک در حوزه‌ی اتمی شکست می‌خورد تأکید نکنیم؛ به نظر می‌رسد آن را به خوبی نشان داده‌ایم.

ما پیش از این در مورد اینکه مکانیک کوانتوم توسط دامنه‌هایی نشان داده می‌شود که شبیه امواجی با بسامدها و عدد موج‌های معینی رفتار می‌کنند بحث کرده‌ایم. حال ببینیم از دیدگاه دامنه‌ها چه اتفاقی می‌افتد که منجر به حالت‌های انرژی معین اتم می‌شود. این را از آنچه تاکنون گفته‌ایم نمی‌توانیم درک نماییم، اما همه‌ی ما با این واقعیت که امواج محبوس بسامدهای معینی دارند آشنا هستیم. برای مثال اگر صوت در یک لوله‌ی ارگ یا چیزی مانند آن محبوس باشد، برای ارتعاش آن بیش از یک راه وجود دارد، اما برای هر راهی بسامد معینی وجود دارد. بنابراین شیئی که امواج در آن محبوس‌اند بسامدهای تشدید^{۳۴} معینی دارد. پس این خاصیتی از امواج در فضای محدود است – موضوعی که بعداً به تفصیل با فرمول بحث می‌کنیم – که فقط در بسامدهای معینی وجود دارند. و چون رابطه‌ای کلی بین بسامدهای دامنه و انرژی وجود دارد، پیدا کردن انرژی‌های معین مرتبط با الکترون‌های مقید در اتم‌ها برای ما تعجب‌آور نیست.^{۳۵}

۶.۳۸ پیامدهای فلسفی^{۳۶}

در این جا به‌طور خلاصه بعضی از پیامدهای فلسفی مکانیک کوانتوم را در نظر می‌گیریم. مثل همیشه، دو جنبه از مسئله وجود دارد: یکی پیامد فلسفی آن برای فیزیک، و دیگری ندانسته‌یابی^{۳۷} موضوعات فلسفی به زمینه‌های دیگر. هنگامی که ایده‌های فلسفی مرتبط با علم به زمینه‌ی دیگری کشیده می‌شوند، معمولاً به‌طور کامل تحریف می‌گردند. بنابراین باید ملاحظات مان را تا آن جا که ممکن است به خود فیزیک محدود نماییم.

اول از همه جالب‌ترین جنبه، ایده‌ی اصل عدم قطعیت است؛ اینکه عمل مشاهده پدیده را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همیشه معلوم بوده است که عمل مشاهده، پدیده را تحت تأثیر قرار می‌دهد، اما نکته این است که این اثر نمی‌تواند نادیده گرفته شود یا به حداقل برسد یا با چیش مجدد دستگاه به‌طور دلخواه کاهش داده شود. هنگامی که به پدیده‌ی معینی نگاه می‌کنیم، نمی‌توانیم کمکی به انجام آن کنیم اما آن را به مقدار حداقل معینی مختل می‌کنیم، و این اختلال و آشفتگی برای سازگاری دیدگاه‌ها لازم می‌باشد. در فیزیک پیش کوانتومی گاهی اوقات ناظر اهمیت دارد، اما فقط در یک مفهوم نسبتاً بدیهی. این مسئله مطرح شده بود: اگر درختی در یک

³³Ritz combination principle

³⁴resonance frequencies

^{۳۵}به‌طور خلاصه: الکترون‌های مقید در اتم، یعنی امواجی در فضای محدود، پس یعنی بسامدهای معین و در نتیجه انرژی‌های معین – مترجم –

³⁶Philosophical implications

^{۳۷}extrapolation (تعمیم دانسته‌هایمان به محدوده‌هایی که نمی‌دانیم – مترجم –)

جنگل بیفتد و کسی نباشد صدای آن را بشنود آیا ایجاد سروصدا می‌کند؟ البته درختی واقعی که در جنگل واقعی بیفتد تولید صدا می‌کند، حتی اگر کسی آن‌جا نباشد. حتی اگر کسی آن‌جا نباشد تا صدا را بشنود، افتادن درخت آثار دیگری از خود باقی می‌گذارد. صدا بعضی از برگ‌ها را تکان می‌دهد و اگر به اندازه‌ی کافی دقیق باشیم ممکن است جایی را پیدا کنید که خارهایی به یک برگ مالیده شده و خراش کوچکی به وجود آمده است و غیر از اینکه فرض کنیم برگ ارتعاش داشته است توضیحی برای آن وجود ندارد. بنابراین به یک معنی مجبوریم اعتراف کنیم که صدایی تولید شده است. در مسئله‌ی مورد بحث ممکن است بپرسیم: آیا صدا احساس می‌شود؟ نه، احساس‌ها احتمالاً باید با هوشیاری انجام شوند. اینکه آیا مورچه‌ها هوشیارند و آیا مورچه‌هایی در جنگل بوده‌اند یا آیا درخت هوشیار بوده، ما نمی‌دانیم. این مسئله را تا همین‌جا رها می‌کنیم.

چیز دیگری که مردم از زمان تکوین و تکامل مکانیک کوانتوم بر آن تأکید دارند این ایده است که ما نباید در مورد آن چیزهایی که نمی‌توانیم اندازه‌گیری کنیم صحبت نماییم (در واقع نظریه‌ی نسبیت نیز همین را می‌گوید). تا زمانی که چیزی را نتوانیم با اندازه‌گیری تعریف کنیم، جایی در یک نظریه ندارد. و چون مقدار صحیح تکانه‌ی ذره‌ی جای‌گزیده را نمی‌توانیم با اندازه‌گیری تعریف کنیم بنابراین جایی در نظریه ندارد. این ایده که، این اشکال نظریه‌ی کلاسیک بوده است، موضعی نادرست و تجزیه و تحلیل غیردقیقی از وضعیت است. صرف اینکه نمی‌توانیم مکان و تکانه را دقیقاً اندازه‌گیری کنیم پیشاپیش به این معنی نیست که نمی‌توانیم در مورد آن‌ها صحبت کنیم، بلکه فقط به معنی آن است که نیازی نداریم در مورد آن‌ها صحبت کنیم. وضعیت در علوم این است: مفهوم یا ایده‌ای که نمی‌تواند اندازه‌گیری شود یا نمی‌تواند مستقیماً به آزمایش نسبت داده شود، ممکن است مفید باشد یا نباشد. نیازی نیست این مفهوم یا ایده در نظریه وجود داشته باشد. به عبارت دیگر، فرض کنید نظریه‌ی کلاسیک جهان را با نظریه‌ی کوانتومی جهان مقایسه کنیم، و فرض کنید از دید آزمایشگاهی، درست است که می‌توانیم مکان و تکانه را فقط به صورت غیردقیق اندازه‌گیری کنیم. سوال این است که آیا ایده‌های مکان و تکانه‌ی دقیق یک ذره معتبر است یا نه. نظریه‌ی کلاسیک این ایده‌ها را می‌پذیرد، اما نظریه‌ی کوانتوم نه. این به خودی خود به این معنی نیست که فیزیک کلاسیک اشتباه است. هنگامی که نظریه‌ی جدید مکانیک کوانتوم کشف شد، فیزیک‌دانان کلاسیک که شامل همه به جز هایزنبرگ، شرودینگر و بورن می‌شد، گفتند: «توجه کنید، نظریه‌ی شما اصلاً خوب نیست چرا که نمی‌توانید به سوالات خاصی مانند: مکان دقیق یک ذره کجاست؟ ذره از کدام روزنه عبور می‌کند؟ و بعضی سوالات دیگر جواب دهید». پاسخ هایزنبرگ این بود: «لازم نیست من به چنین سوالاتی پاسخ دهم زیرا شما نمی‌توانید چنین سوالاتی را از دید آزمایشگاهی طرح نمایید». این چیزی است که ما مجبور به انجام آن نیستیم. دو نظریه‌ی (الف) و (ب) را در نظر بگیرید؛ نظریه‌ی (الف) شامل ایده‌ای است که نمی‌تواند مستقیماً بررسی شود اما در تجزیه و تحلیل استفاده می‌شود، نظریه‌ی دیگر (ب) شامل این ایده نمی‌شود. اگر آن‌ها در پیش‌بینی‌های خود توافق ندارند، کسی نمی‌تواند ادعا کند که (ب) نادرست است چون نمی‌تواند این ایده را که در (الف) است توضیح دهد؛ زیرا این ایده از چیزهایی است که نمی‌تواند به طور مستقیم

فصل ۳۸. رابطه‌ی بین دیدگاه‌های موجی و ذره‌ای

بررسی شود. همیشه خوب است بدانیم کدام ایده‌ها نمی‌توانند به‌طور مستقیم بررسی شوند، اما لزومی به حذف همه‌ی آن‌ها نیست. این درست نیست که ما می‌توانیم علم را فقط با مفاهیمی که مستقیماً در معرض آزمایش هستند به‌طور کامل دنبال کنیم.

در خود مکانیک کوانتومی دامنه‌ی تابع موج، پتانسیل و مفاهیم متعددی وجود دارد که نمی‌توانیم مستقیماً اندازه‌گیری کنیم. اساس علم توانایی آن برای پیش‌بینی کردن است؛ پیش‌بینی یعنی گفتن اینکه در آزمایشی که هرگز انجام نشده است چه اتفاقی می‌افتد. این کار را چطور می‌توانیم انجام دهیم؟ با فرض کردن اینکه، مستقل از آزمایش، می‌دانیم چه چیزی در آن‌جا وجود دارد. باید آزمایش‌ها را به ناحیه‌ای که در آن‌جا انجام نشده‌اند ندانسته‌یابی کنیم؛ باید مفاهیم موردنظرمان را به جاهایی که هنوز بررسی نشده‌اند تعمیم دهیم. اگر این کار را نکنیم، پیش‌بینی‌ای نداریم. بنابراین برای فیزیک‌دانان کلاسیک کاملاً معقول بود با خوشحالی فرض کنند مکان، که به وضوح مثلاً به معنی چیزی برای بازی بیس‌بال است، به معنی چیزی برای الکترون هم هست. این اشتباه نیست و رویه‌ای معقول است. امروزه تصور می‌کنیم قانون نسبیت در تمام انرژی‌ها درست باشد، اما ممکن است روزی کسی بگوید ما چقدر در اشتباه بوده‌ایم. ما نمی‌دانیم کجا «در اشتباه» بوده‌ایم تا زمانی که خطر کنیم و نظری جدید مطرح نماییم که شاید مورد قبول دیگران نباشد. اساساً همه‌ی این‌ها به منظور ارائه‌ی نظراتی است که دیگران جرئت ارائه‌ی آن را نداشته‌اند، و تنها راه برای فهمیدن اینکه در اشتباه هستیم این است که پیش‌بینی‌های ما چه هستند. این موضوع برای ساختن مفاهیم، کاملاً ضروری است.

ما تاکنون ملاحظات چند در مورد عدم قطعیت^{۳۸} مکانیک کوانتوم داشته‌ایم؛ یعنی اینکه اکنون در شرایط فیزیکی معینی که تا حد امکان به دقت مرتب شده، نمی‌توانیم پیش‌بینی کنیم از لحاظ فیزیکی چه اتفاقی خواهد افتاد. اگر اتمی داشته باشیم که در حالت برانگیخته است و می‌خواهد یک فوتون گسیل کند، نمی‌توانیم بگوییم چه زمانی فوتون را منتشر می‌کند. اتم دامنه‌ی معینی برای گسیل فوتون در هر زمان دارد، و ما فقط می‌توانیم احتمال گسیل را پیش‌بینی کنیم؛ اما نمی‌توانیم آینده را دقیقاً پیش‌بینی نماییم. این موضوع منجر به طرح انواع مطالب بی‌معنی و سوالاتی در مورد معنی آزادی اراده، و ایده‌ی عدم قطعیت جهان شده است.

البته باید تاکید کنیم که فیزیک کلاسیک هم به یک معنی عدم قطعیت^{۳۹} دارد. معمولاً تصور می‌شود که این عدم قطعیت، که ما نمی‌توانیم آینده را پیش‌بینی کنیم، یک ایده‌ی مهم مکانیک کوانتوم است، و بر این اساس تلاش شده است رفتار ذهن، احساس آزادی اراده، و غیره توضیح داده شود. اما اگر جهان کلاسیک بود – یعنی اگر قوانین مکانیک، کلاسیک بودند – کاملاً واضح نیست که ذهن کمابیش همان چیز را احساس نمی‌کرد. از نظر کلاسیک درست است که اگر مکان و سرعت هر ذره را در جهان، یا در یک جعبه‌ی گاز می‌دانستیم، می‌توانستیم دقیقاً پیش‌بینی کنیم چه اتفاقی خواهد افتاد. در نتیجه جهان کلاسیک قطعیت دارد. با این حال فرض کنید صحت محدودی داریم و دقیقاً نمی‌دانیم یک اتم که مثلاً یک قسمت در میلیارد است کجاست. سپس همین که این اتم پیش می‌رود، به اتم دیگری برخورد می‌کند و چون ما مکان اتم را

³⁸uncertain

³⁹indeterminate

بیشتر از اینکه مثلاً یک قسمت در میلیارد است نمی‌دانیم، پس از برخورد خطای بزرگ‌تری پیدا خواهیم کرد. البته این خطا در برخورد بعدی تقویت می‌شود، به‌طوری که اگر فقط با خطای کوچکی شروع کنیم سریعاً به عدم قطعیت بسیار بزرگی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال: اگر آب به بالای یک سد برسد، سرازیر می‌شود. اگر ما در آن نزدیکی ایستاده باشیم، در آن لحظه و لحظات بعد قطره‌ی آبی روی بینی ما می‌ریزد. این کاملاً تصادفی^{۴۰} به نظر می‌رسد، و درعین حال چنین رفتاری صرفاً با قوانین مکانیک کلاسیک پیش‌بینی می‌شود. موقعیت دقیق تمام قطره‌ها بستگی به چگونگی حرکت دقیق آب قبل از اینکه به بالای سد برسد دارد. چگونه؟ کوچک‌ترین بی‌نظمی‌ها در زمان سرازیر شدن تقویت می‌شوند، به‌طوری که تصادفی بودن کامل خواهیم داشت. به‌وضوح، مکان قطره‌ها را واقعاً نمی‌توانیم پیش‌بینی کنیم مگر اینکه حرکت آب را به‌صورت کاملاً دقیق بدانیم.

به بیان دقیق‌تر، با یک صحت دلخواه معین، بدون توجه به میزان دقت، می‌توان زمان طولانی کافی که ما نمی‌توانیم پیش‌بینی‌های معتبری برای آن زمان طولانی کنیم، پیدا کرد. حال نکته این است که این مدت زمان، بسیار طولانی نیست. این زمان میلیون‌ها سال نیست، اگر میزان صحت یک قسمت در میلیارد باشد. در واقع زمان فقط به‌صورت لگاریتمی با خطا پیش می‌رود، و معلوم شده است که فقط در زمانی بسیار بسیار کوتاه تمام اطلاعات مان را از دست می‌دهیم. اگر صحت را یک قسمت در میلیارد و میلیارد و میلیارد بگیریم، مهم نیست چند میلیارد به شرط آنکه جایی متوقف شویم، آن‌گاه می‌توانیم زمانی پیدا کنیم که کمتر از زمانی که طول می‌کشد تا صحت را بیان نماییم باشد و بعد از آن دیگر نمی‌توانیم پیش‌بینی کنیم چه اتفاقی رخ داده است! بنابراین منصفانه نیست که بگوییم از آزادی ظاهری و عدم قطعیت ذهن انسان، باید متوجه شده باشیم که فیزیک «دارای قطعیت» کلاسیک هرگز نمی‌تواند امیدوار باشد آن را درک نماید، و از مکانیک کوانتوم به عنوان آزادی از جهان «کاملاً مکانیکی» استقبال کنیم؛ برای اینکه قبلاً در مکانیک کلاسیک از دیدگاه عملی قابلیت عدم قطعیت وجود داشته‌است.

⁴⁰random-indeterminacy