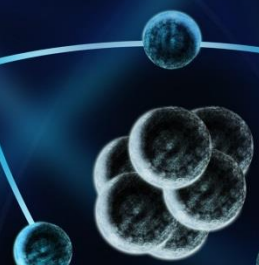
جهان کوانتومی

و چرا هر چیزی که احتمال وقوع دارد، اتفاق می افتد



نویسندگان: برایان کاکس و جف فورشاو
مترجم: سیامک عطاریان

جهان کوانتومی

و چرا هر چیزی که احتمال وقوع دارد، اتفاق می افتد

عنوان اصلی : THE QUANTUM UNIVERSE

And Why Anything That Can Happen, Does

نویسندگان : Brian Cox & Jeff Forshaw

مترجم : سیامک عطاریان

ناشر الکترونیکی : سایت علمی بیگ بنگ (www.bigbangpage.com)

تاریخ انتشار : مهر ۱۳۹۳

استفاده از مطالب کتاب با ذکر منبع بلامانع است

فهرست مطالب

مقدمه مترجم IV

فصل اول – اتفاق عجیبی در جریان است..... ۱

فصل دوم – حضور همزمان در دو مکان..... ۲۱

فصل سوم – ذره چیست؟..... ۸۸

فصل چهارم – هرچیزی که احتمال وقوع دارد، اتفاق می افتد..... ۱۴۴

فصل پنجم – توهم حرکت..... ۲۳۹

فصل ششم – موسیقی اتم‌ها..... ۲۸۷

فصل هفتم – جهان بر روی نوک سوزن
(و چرا ما به درون زمین رسوخ نمی کنیم) ۳۶۳

فصل هشتم – ارتباط دوطرفه..... ۴۲۹

فصل نهم – دنیای مدرن ۴۹۷

فصل دهم – اندرکنش ۵۳۷

فصل یازدهم – فضای خالی، خالی نیست ۶۰۵

سخن پایانی – مرگ ستارگان..... ۶۶۴

برای مطالعه بیشتر ۷۵۶

مقدمه مترجم

علم را می‌توان به‌عنوان نتایج تلاشی قلمداد کرد که بشریت در راستای فهم جهان پیرامونش انجام می‌دهد. از قرن هفدهم میلادی به بعد علم، آرام‌آرام راه خود را از فلسفه جدا کرده و به حوزه‌های وسیعی منشعب شد. یکی از این حوزه‌ها فیزیک است که خود شامل مکانیک، الکترومغناطیس، اپتیک، ترمودینامیک و ... می‌شود. علم مکانیک در فیزیک که تقریباً عموم مردم آن را با قوانین سه‌گانه نیوتون می‌شناسند، یکی از بزرگ‌ترین دستاوردهای بشر است. این قوانین می‌توانند بسیاری از اتفاقات پیرامون ما را توضیح داده و هنوز هم کاربرد گسترده‌ای دارند: از ساخت آسمان‌خراش‌های عظیم گرفته تا

پرتاب فضاپیماها. ملموس بودن این قوانین و همچنین کاربردی بودن آن‌ها باعث مقبولیت زیادشان شده است.

اشتیاق بشر برای گسترش دانش خود درباره طبیعت، او را با پدیده‌هایی مواجه کرد که قادر به توجیه آن‌ها نبود. تعدد این پدیده‌ها و همچنین روش‌های غیرمعمولی که برای توجیه آن‌ها استفاده می‌شد، آرام‌آرام به انسان‌ها فهماند لزومی ندارد قوانینی که برای ما قابل‌لمس هستند، در همه حوزه‌ها صادق باشند و برعکس قوانینی وجود دارند که برای ما مستقیماً قابل‌لمس نبوده، اما واقعاً در جهانی که در آن زندگی می‌کنیم جریان دارند. نتایج آزمایشات و کاربردی بودن آن قوانین می‌توانند معیاری برای درستی‌شان باشند. نظریات نسبیت و کوانتوم محصول همین تفکرات در قرن بیستم‌اند.

نظریه کوانتوم در ابتدا برای توضیح رفتار ذرات در مقیاس‌های اتمی به وجود آمد، اما ازآنجایی‌که جهان بزرگ‌مقیاس نیز خود از همین ذرات به وجود آمده، می‌توان گفت این نظریه حاکم بر کل اتفاقات جهان است. حتی رفتار اجرام بزرگ مانند ستارگان نیز تنها با اصول نظریه کوانتوم قابل توضیح است. در مقیاس‌های اتمی، ذرات از خود رفتاری نشان می‌دهند که قابل توضیح با مکانیک نیوتونی نیست. همین باعث می‌شود تا توضیحی که برای رفتار این ذرات به کار برده شود (یعنی نظریه کوانتوم)، اصطلاحاً با عقل جور درنیاید، زیرا درک ذاتی ما از طبیعت به همان صورتی است که مکانیک نیوتونی می‌گوید.

سخت بودن درک این نظریه مختص انسان‌های عادی نیست؛ خود فیزیکدانان و حتی بنیان‌گذاران این نظریه نیز حین مواجهه با آن، متعجب بوده‌اند. حتی انیشتین نیز تا آخر عمر با دیده شک به این نظریه می‌نگریست. اما کاربرد این نظریه و قدرت بالایش برای توضیح پدیده‌ها، جای هیچ شک و شبهه‌ای را در مورد صحتش باقی نمی‌گذارد. به قول ریچارد فاینمن: درواقع تناقض موجود در این نظریه، اختلافی است بین حقیقت دنیا و حقیقت به آن صورت که ما دوست داریم باشد.

نویسندگان این کتاب سعی کرده‌اند تا به ساده‌ترین حالت و بدون ورود به مباحث ریاضی، مفهوم نظریه کوانتوم را تشریح کنند. بااین‌حال قسمت‌های زیادی در کتاب وجود دارد که

شما باید دست از خواندن کشیده و شروع به تفکر و تجزیه تحلیل مطالب در ذهن خودتان کنید. همچنین ممکن است نیاز داشته باشید بعضی نکات کلیدی را دو بار بخوانید. در بخش پایانی این کتاب نویسندگان با استفاده از ریاضیات ساده اقدام به بررسی مراحل پایانی عمر ستارگان کرده و سرنوشت‌های مختلفی که در پایان عمر ستارگان در انتظارشان است را بررسی کردند. این بخش از کتاب می‌تواند قدرت نظریه کوانتوم را برای کسانی که به آن شک دارند نشان دهد.

در متن کتاب گاهی اوقات از شماره صفحه های قبلی نام برده شده است. این شماره صفحه ها مربوط به نسخه بزرگ کتاب بوده و با نسخه موبایلی کتاب همخوانی ندارند. خوانندگان عزیز می‌توانند جهت ارسال پیشنهادات خود با آدرس camc_1987@yahoo.com در تماس باشند.

سیامک عطاریان

۹۳/۰۷/۲۱

فصل اول

اتفاق عجیبی در جریان است

کوانتوم[۱]. این واژه همزمان مهیج، گیج‌کننده و افسون‌گر است. بسته به دیدگاه شما، این [نظریه] نمادی از موفقیت عمیق علمی است یا نمادی از درک ذاتی محدود ما انسان‌ها که در کشمکش برای فهم دنیای عجیب زیراتمی هستیم. ازنظر یک فیزیکدان، مکانیک کوانتومی[۲] یکی از سه ستون

---

۱. Quantum

۲. Quantum Mechanics

مستحکمی است که دانش ما از جهان طبیعی بر روی آن‌ها استوار است که دوتای دیگر نیز نظریات نسبیت خاص و عام انیشتین[۱] هستند. نظریات انیشتین درباره فضا، زمان و نیروی گرانش است. مکانیک کوانتومی درباره بقیه چیزهاست و ممکن است کسی مدعی شود که این‌همه هیجان، ابهام و شگفتی بیهوده است؛ این نظریه یکی از نظریات فیزیک است (مثل بقیه نظریات) که نحوه رفتار اشیا را توضیح می‌دهد. اما قدرت توضیح اتفاقات و دقت این نظریه خیره‌کننده است. الکترودینامیک کوانتومی[۲] که قدیمی‌ترین و شناخته‌شده‌ترین قسمت از نظریات مدرن کوانتومی است، آزمون‌هایی دارد که

[۱] . Einstein’s Special And General Relativity

[۲] . Quantum Electrodynamics

در رابطه با اندازه‌گیری رفتار الکترون در اطراف آهن‌ربا است. فیزیکدانان نظری سالیان متمادی با استفاده از قلم و کاغذ و رایانه‌ها تلاش کردند که نتیجه این آزمایشات را پیش‌بینی کنند. آزمایشگران نیز آزمایشات زیبایی را به راه انداختند تا جزئیات طبیعت این وقایع را آشکار کنند. هر دو گروه به‌طور مستقل کار کرده و زمانی که نتایجشان را باهم مقایسه کردند، مثل این بود که فاصله لندن تا نیویورک را با دقت چند سانتی‌متر اندازه گرفته باشند. به طرز جالب‌توجهی اعداد به‌دست‌آمده از آزمایشات و محاسبات نظری دقیقاً باهم یکسان بودند؛ اندازه‌گیری‌ها و محاسبات در توافق کامل به سر می‌بردند.

این شگفت‌انگیز است، اما اگر تنها جنبه نظریه کوانتوم توضیح جهان‌های کوچک باشد، شما ممکن است تعجب کنید و بگویید دیگر این‌همه سروصدا ندارد! علم، لزوماً همواره کاربردی نیست، اما بسیاری از تغییرات تکنولوژیکی و اجتماعی که زندگی ما را متحول کرده‌اند، از همین تحقیقات بنیادی و در خلال اکتشافات جدید نشأت گرفته‌اند و انگیزه این اکتشافات تنها فهم بهتر جهان اطرافمان بوده. این سفرهای اکتشافی در تمامی عرصه‌های علمی که کنجکاوی عامل تمام آن‌ها است، افزایش امید به زندگی، مسافرت بین‌قاره‌ای هوایی، ارتباطات جدید مخابراتی، رهایی از کشت محصولات خانگی و همچنین نگاهی فروتنانه و الهام‌بخش به جهانمان در میان دریای بیکرانی از ستارگان را برای ما به

ارمغان آورده است؛ اما این‌ها حاشیه کار است. قصد اصلی ما از اکتشافات، ارضای حس کنجکاوی است، نه اینکه بخواهیم دیدمان را نسبت به واقعیات گسترش دهیم، یا مثلاً به امکانات بهتری دسترسی پیدا کنیم.

نظریه کوانتوم احتمالاً اولین مثالی است که در آن چیزی که برای ما بسیار مبهم بوده، امروزه شدیداً کاربردی شده است. مبهم ازاین‌جهت که این نظریه، جهانی را برای ما توضیح می‌دهد که در آن یک ذره واقعاً می‌تواند در یک‌لحظه در نقاط مختلفی حضور داشته باشد و زمانی که از جایی به جای دیگری جابجا می‌شود، همزمان تمامی مسیرهای ممکن بین آن دونقطه را طی می‌کند. کاربردی نیز از این بابت که فهمیدن رفتار کوچک‌ترین اجزای تشکیل‌دهنده جهان، بنیانی

برای فهمیدن بقیه چیزهاست. این ادعا مغرورانه به نظر می‌رسد، زیرا جهان مملو از پدیده‌های گوناگون و پیچیده است. علی‌رغم این پیچیدگی، ما کشف کردیم که هر چیزی از تعداد محدودی ذرات تشکیل‌شده که با توجه به قوانین مکانیک کوانتومی درحرکت هستند. این قوانین آن‌قدر ساده‌اند که در چند سطر می‌توان خلاصه‌شان کرد و این واقعیت که ما برای توضیح طبیعت اطرافمان، نیاز به کتابخانه‌هایی پر از کتاب نداریم، یکی از بزرگ‌ترین معماهاست.

به نظر می‌آید هرقدر دانش ما درباره بنیادی‌ترین قسمت‌های طبیعت بیشتر می‌شود، طبیعت ساده‌تر به نظر می‌رسد. در کتاب پیش رو ما می‌خواهیم این قوانین بنیادی را تشریح کنیم و بگوییم اجزای بنیادی چگونه با گرد هم

آمدنشان جهان ما را تشکیل داده‌اند. اما زمانی که به این سادگی جهان خیره شدیم یک‌چیزی نباید یادمان برود: گرچه قواعد اساسی بازی ساده‌اند، اما نتایج آن‌ها لزوماً به‌سادگی قابل‌محاسبه نیستند. تجربه روزمره ما از جهان بر اساس روابطی است که بین مجموعه وسیعی از میلیاردها اتم برقرار است و تلاش برای استخراج رفتار سیارات و انسان‌ها بر اساس روابط اولیه ابلهانه است. پذیرفتن این مطلب چیزی از ارزش کار نمی‌کاهد – تمامی پدیده‌ها واقعاً بر اساس فیزیک کوانتومی ذرات ریز عمل می‌کنند.

جهان اطرافتان را در نظر بگیرید. شما کتابی در دستتان است که از کاغذ ساخته شده و آن‌هم از مخلوط خردشده

چوب درخت تشکیل شده است[۱]. درختان ماشین‌هایی هستند که مقداری اتم و مولکول می‌گیرند، ساختار آن‌ها را شکسته و نظمی دوباره می‌دهند و تبدیل به اجتماعی از میلیاردها اتم می‌کنند که باهم همکاری دارند. آن‌ها این کار را با استفاده از مولکولی به نام کلروفیل[۲] انجام می‌دهند که این مولکول از صدها اتم کربن، هیدروژن و اکسیژن تشکیل شده که به همراه مقداری منیزیم و نیتروژن با ساختار پیچیده‌ای درهم‌تنیده‌اند. این سیستم ذرات می‌تواند نوری که با فاصله ۹۳ میلیون مایل از سمت خورشید، تنوری هسته‌ای که حجمی برابر با

البته اگر شما نسخه الکترونیکی کتاب را مطالعه می کنید باید گفته های ما را تصور کنید .[۱]

[۲]. Chlorophyll

یک‌میلیون کره زمین دارد، به ما می‌رسد را جذب کرده و انرژی‌اش را وارد قلب سلول‌ها کند و در اینجا مولکول‌هایی با استفاده از دی‌اکسیدکربن و آب بسازند و نهایتاً اکسیژن حیات‌بخش را متصاعد کنند. چنین مولکول‌های زنجیره‌ای‌یی هستند که ساختار درختان و تمامی موجودات زنده و همچنین کاغذ کتاب شما را تشکیل داده‌اند. شما می‌توانید کتاب را بخوانید و بفهمید، زیرا چشم‌هایی دارید که می‌توانند نوری که از صفحه پراکنده‌شده را تبدیل به پالس‌های الکتریکی کنند و این پالس‌ها توسط مغز شما که پیچیده‌ترین ساختار شناخته‌شده در جهان است، تفسیر شوند. ما کشف کردیم که تمام این‌هایی که گفتیم چیزی فراتر از اجتماع اتم‌ها نیستند و تمامی این اتم‌های گوناگون تنها از ۳ ذره

تشکیل شده‌اند: الکترون‌ها، پروتون‌ها و نوترون‌ها. ما همچنین کشف کردیم که خود پروتون‌ها و نوترون‌ها از اجزای ریزتری به نام کوارک‌ها[۱] ساخته شده‌اند و تا جایی که می‌توانیم امروزه بگوییم، اینجا دیگر انتهای ریز شدن است. اساس تمامی این‌ها، نظریه کوانتوم است.

بنابراین همان‌طور که توسط فیزیک مدرن آشکار شده، تصویر جهانی که ما در آن زندگی می‌کنیم یکی از سادگی‌های موجود است: پدیده‌های زیبا [و کوچک] از چشم ما دورمانده و گوناگونی جهان بزرگ‌مقیاس را به نمایش می‌گذارند. احتمالاً این اوج دستاوردهای علم مدرن است؛ کاهش پیچیدگی

[۱] . Quarks

موجود در جهان، به انضمام انسان‌ها، و توضیح آن توسط تعداد محدودی ذرات زیراتمی و چهار نیرو که بین آن‌ها برقرار است. بهترین شرحی که ما از سه تا از این نیروها داریم، یعنی نیروهای هسته‌ای قوی و ضعیف که در اعماق هسته اتم فعالیت دارند و نیروی الکترومغناطیسی که اتم‌ها و مولکول‌ها را به هم می‌چسباند، توسط نظریه کوانتوم ارائه شده است. تنها گرانش، که ضعیف‌ترین اما شناخته‌شده‌ترین آن‌هاست، هنوز توضیح کوانتومی رضایت بخشی ندارد.

نظریه کوانتوم واقعاً به عجیب بودن شهرت یافته و درباره اسمش، صفحات زیادی از حرف‌های بیهوده نوشته شده است. گربه‌ها می‌توانند همزمان مرده و زنده باشند؛ ذرات می‌توانند همزمان در دو جا باشند؛ هایزنبرگ می‌گوید هر چیزی

غیرقطعی است. تمامی این حرف‌ها درست است، اما نتیجه‌ای که غالباً از این حرف‌ها می‌گیرند این است که - چون اتفاق عجیبی در جهان کوچک‌مقیاس در جریان است، ما داریم به سمت معماها سرازیر می‌شویم – مطلقاً این‌طور نیست. ادراک فراحسی، شفا دادن مرموز، دستبندهای مرتعش که ما را از تشعشعات در امان می‌دارند و خدا می‌داند که دیگر چه شایعه‌هایی تحت نام کوانتوم ساخته شده‌اند. این حرف‌های بیهوده ناشی از یا فقدان تفکر صحیح است، یا تفکر آرزومندانه، یا سوءتفاهم‌های عمدی یا سهوی، یا احتمالاً مخلوطی از علل ذکرشده. نظریه کوانتوم با ریاضیاتی به محکمی نظریاتی که توسط گالیله و نیوتون ارائه شد، جهان را به‌دقت تشریح می‌کند. به همین دلیل است که ما می‌توانیم

پاسخ مغناطیسی الکترون را با دقتی صریح به‌دست آوریم. همان‌طور که خواهیم فهمید نظریه کوانتوم توضیحی از طبیعت می‌دهد که پیش‌بینی‌های دقیق و قدرت تشریح فوق‌العاده‌ای دارد و این نظریه بازه وسیعی از پدیده‌ها را از چیپ های سیلیکونی[۱] تا ستارگان در بر می‌گیرد.

هدف ما از نوشتن این کتاب این است که نظریه کوانتوم را آشکارا بیان کنیم؛ یک ساختار نظریاتی که معروف است آدم را گیج می‌کند، حتی کاربران اولیه‌اش را [دانشمندان ابتدایی قرن بیستم]. روش ما این‌گونه است که ازنقطه‌نظری جدید به این نظریه ورود کنیم که یک قرن توسعه نظری و ادراک بهتر

[۱] . Silicon Chips

را به همراه خود دارد. اما برای شروع، قصدمان سفری است به ابتدای قرن بیستم و بررسی مسائلی است که فیزیکدانان را مجبور کرد تغییر بنیادینی در دیدگاه‌های قدیمی خود به وجود آورند.

نظریه کوانتوم مانند سایر موارد متداول در علم، با کشف پدیده‌هایی طبیعی که با دانش آن زمان قابل توجیه نبود، قدم به عرصه علم گذاشت. برای نظریه کوانتوم این پدیده‌ها زیاد و متفاوت بودند. آبشاری از نتایج غیرقابل توضیح که هیجان و ابهامی را به وجود آوردند و انگیزه‌ای برای دوره‌ای از آزمایشات و نظریات خلاقانه شدند که واقعاً برچسب کلیشه‌ای "عصر طلایی" شایسته آن دوران است. نام پیشکسوتان عرصه کوانتوم در ذهن هر دانشجوی فیزیک حک شده و هنوز هم

این اسامی در مقالات روزمره دانشجویان دوره لیسانس کاربرد دارند: رادرفورد، بور، پلانک، انیشتین، پاولی، هایزنبرگ، شرودینگر، دیراک. شاید دیگر هرگز دوره‌ای در تاریخ وجود نداشته باشد که این‌همه نام پر ابهت علمی را در تعقیب یک هدف، به ترتیب بی آوریم؛ هدفی که به نظریه جدیدی در باب اتم‌ها و نیروهایی که جهان فیزیکی را ساخته‌اند، ختم شد. با نگاهی به دهه‌های اولیه نظریه کوانتوم، در سال ۱۹۲۴ ارنست رادرفورد[۱] فیزیکدان متولد نیوزیلند که در منچستر هسته اتم را کشف کرد نوشت: "سال ۱۸۹۶ ... شایسته است که با عنوان آغاز عصر قهرمانانه علوم فیزیکی نام‌گذاری شود. هرگز کسی در تاریخ فیزیک به یاد ندارد که در دوره‌ای، این‌همه فعالیت و

[۱] . Ernest Rutherford

اکتشافاتی با اهمیت بنیادین، یکی پس از دیگری و با سرعتی سرسام‌آور رخ دهد."

اما قبل از اینکه ما به پاریس قرن نوزدهم برویم و به تولد نظریه کوانتوم بپردازیم، خود واژه "کوانتوم" از کجا آمد؟ این واژه در سال ۱۹۰۰ و از کار ماکس پلانک[۱] وارد فیزیک شد. پلانک درگیر یافتن توضیحی نظری درباره تشعشع ساطع‌شده از اجسام داغ بود – که نامش را تابش جسم سیاه[۲] گذارده‌اند – گویا او از طرف یک شرکت سازنده چراغ الکتریکی مأمور به این کار شده بود: درهایی رو به جهان گاهی اوقات بی‌دلیل به روی شما باز می‌شوند. ما بینش بزرگ پلانک را با جزئیات

[۱] . Max Planck

[۲] . Black Body Radiation

بیشتری بعداً در این کتاب به بحث خواهیم گذاشت، اما برای هدف این قسمت که معرفی کوتاه است، کافی است که بگوییم او فهمید تنها زمانی می‌تواند مشخصات تابش جسم سیاه را توضیح دهد که فرض کند نور در بسته‌های کوچک انرژی گسیل می‌شود و او نام این بسته‌ها را "کوانتا[۱]" نامید. معنی خود این واژه "بسته" یا "گسسته" است. در ابتدا او گمان کرد که این فرض صرفاً یک حقه ریاضیاتی است، اما کار متعاقبی که انیشتین در سال ۱۹۰۵ در رابطه با پدیده‌ای به نام اثر فتوالکتریک[۲] انجام داد، از فرضیه کوانتوم پشتیبانی کرد. این

[۱]. Quanta

[۲]. Photoelectric Effect

نتایج وسوسه‌انگیز بود، زیرا بسته‌های کوچک انرژی می‌تواند مترادف با ذرات باشد.

این ایده که نور از جریانی از ذرات تشکیل شده است تاریخی دراز و درخشان دارد که به تولد فیزیک مدرن و اسحاق نیوتون[۱] بازمی‌گردد. اما جیمز کلرک ماکسول[۲]، فیزیکدان اسکاتلندی در سال ۱۸۶۴ در مجموعه مقالاتی که آلبرت انیشتین[۳] از آن‌ها به‌عنوان عمیق‌ترین و مثمرثمرترین مقالاتی که فیزیک از زمان نیوتون تاکنون به خود دیده است، یاد کرده است، ظاهراً به‌طور کامل هرگونه شک باقیمانده‌ای

[۱]. Isaac Newton

[۲]. James Clerk Maxwell

[۳]. Albert Einstein

را در این زمینه از بین برد. ماکسول نشان داد که نور نوعی موج الکترومغناطیسی است که از درون فضا عبور می‌کند، بنابراین نور به‌عنوان یک موج، معصومیت داشت و ظاهراً از اتهامات مصون بود. بااین‌حال در مجموعه آزمایشاتی که از سال ۱۹۲۳ تا ۱۹۲۵ در دانشگاه سنت لوییز در واشینگتن صورت گرفت، آرتور کامپتون[۱] و همکارانش موفق شدند که کوانتایی از نور را به الکترون‌ها برخورد داده و بازگشتن (کمانه کردن) آن را ببینند. هر دو شبیه به توپ‌های بیلیارد رفتار کردند و مدرک مستدلی بودند بر اینکه حدس نظری پلانک در دنیای واقعی نیز پایه و اساس محکمی دارد. در سال ۱۹۲۶

[۱] . Arthur Compton

به کوانتای نور نام فوتون[۱] را اختصاص دادند. شواهد مسلم بود: نور هم شبیه به موج هم به‌مانند ذره رفتار می‌کند و این علامتی بود برای پایان فیزیک کلاسیک و پایانی بر آغاز نظریه کوانتوم.

[۱]. Photon

فصل دوم

حضور همزمان در دو مکان

ارنست رادرفورد از سال ۱۸۹۶ به‌عنوان انقلاب کوانتومی نام برد زیرا در این سال هنری بکرل[۱] که در آزمایشگاهش در پاریس کار می‌کرد، رادیواکتیویته را کشف کرد. بکرل در تلاش بود تا از ترکیبات اورانیوم برای تولید اشعه ایکس که چند ماه قبل‌تر توسط ویلهلم رانتگن[۲] در ورزبورگ کشف شده بود،

---

۱. Henry Becquerel

۲. Wilhelm Rontgen

استفاده کند. در عوض او فهمید که ترکیبات اورانیوم چیزی با عنوان "امواج اورانیوم[۱]" گسیل می‌کنند که می‌تواند صفحات عکاسی را تاریک کند، حتی اگر به دور این ترکیبات کاغذ ضخیمی بپیچیم که نور نتواند از آن عبور کند. اهمیت امواج برکل در مقاله‌ای نوشته دانشمند بزرگ هنری پوانکاره[۲] در سال ۱۸۹۷ فهمیده شد که او با اطمینان خاطری درباره این کشف نوشته بود " امروز می‌توان اندیشید که این کشف دری را رو به دنیای جدید برای ما باز خواهد کرد که کسی فکرش را هم نمی‌کرد". مسئله مرموزی که درباره واپاشی

[۱] . Les Rayons Uraniques

[۲] . Henri Poincare

رادیواکتیو[۱] وجود داشت، و خبر از اتفاقات جدید می‌داد، این بود که گویا هیچ‌چیزی گسیل این اشعه را راه نیانداخته بود؛ آن‌ها به‌طور خودبه‌خودی و غیرقابل‌پیش‌بینی از این مواد خارج می‌شدند.

در سال ۱۹۰۰ رادرفورد به این نکته پی برد: " تمام اتم‌هایی که همزمان به وجود آمده‌اند، در بازه زمانی مشخصی نیز از بین خواهند رفت. بااین‌حال این مطلب در تضاد با قانون تبدیل[۲] بود که می‌گفت اتم‌ها عمری از صفر تا بینهایت دارند." این حالت تصادفی در رفتارهای جهان کوچک‌مقیاس تکان‌دهنده بود، زیرا تا آن زمان علم قطعیت داشت. عقیده بر

[۱] . Radioactive Decay

[۲] . Law of Transformation

این بود که اگر در لحظه‌ای از زمان شما از تمامی شرایط یک چیز اطلاع می‌داشتید، می‌توانستید با قطعیت تمام آینده آن چیز را پیش‌بینی کنید. سقوط چنین قابلیت پیش‌بینی‌ای ویژگی اصلی نظریه کوانتوم است: این نظریه بیشتر با احتمالات سروکار دارد تا با قطعیت‌ها، و این نه به خاطر فقدان دانش کامل ماست، بلکه به خاطر بعضی جنبه‌های موجود در قلب طبیعت است که تحت سیطره احتمال قرار دارد. اینک ما به‌سادگی درک کردیم که نمی‌توان زمان دقیق زوال (واپاشی) یک اتم را پیش‌بینی کرد. واپاشی رادیواکتیو اولین رویارویی ما با تاس طبیعت بود و برای مدت مدیدی فیزیکدان‌ها را متحیر نگه داشت.

گرچه ساختار داخلی اتم‌ها هنوز به‌طور کامل شناخته نشده بود، به‌وضوح اتفاق جالبی درون آن‌ها رخ می‌داد. اکتشافی کلیدی در سال ۱۹۱۱ توسط رادرفورد صورت گرفت که با استفاده از منبعی رادیواکتیو اقدام به بمباران یک ورق نازک طلا با نوعی از تشعشع که به ذرات آلفا[۱] معروف‌اند، کرد (امروزه می‌دانیم که آن‌ها اتم‌های هلیوم هستند). رادرفورد با همکاری هانس گایگر[۲] و ارنست مارسدن[۳] با شگفتی تمام کشف کردند که یکی از هر ۸۰۰۰ ذره آلفا از درون ورقه طلا عبور نکرده و مستقیماً برمی‌گردد. رادرفورد بعداً این لحظه را

[۱]. Alpha Particles

[۲]. Hans Geiger

[۳]. Ernest Marsden

با زبانی جالب بیان کرد: "این قطعاً شگفت‌انگیزترین اتفاقی بود که در طول زندگی برای من من رخ داد. مثل این می‌ماند که شما به سمت یک ورقه نازک دستمال‌کاغذی گلوله‌ای به قطر ۱۵ اینچ شلیک کنید و این گلوله برگشته و به شما برخورد کند". بدون شک رادرفورد شخص متعهد و صادقی بود: او یک‌بار یک مقام رسمی ازخودراضی را این‌گونه تشبیه کرد "مانند نقطه اقلیدسی می‌ماند: موقعیتی (مقامی) دارد اما ارزشی ندارد"

رادرفورد محاسبه کرد که نتایج تجربی‌اش زمانی قابل توضیح است که اتم، هسته‌ای کوچک در مرکزش داشته باشد و الکترون‌هایی که به دور هسته بچرخند. در آن زمان او احتمالاً سیستمی مشابه با گردش سیارات به دور خورشید در

ذهن داشت. هسته تقریباً تمامی جرم اتم را در خود دارد و به همین دلیل است که گلوله‌های ۱۵ اینچی آلفا، خود را نگه داشته و بازمی‌گردانند. هیدروژن، ساده‌ترین عنصر، هسته دارای یک پروتون به شعاع تقریباً $۱/۷۵ \times ۱۰^{-۱۵}$ متر دارد. اگر شما با این نمادها آشنایی ندارید این یعنی ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۱۷۵ متر یا به‌عبارت‌دیگر کمتر از ۲ تقسیم‌بر هزار میلیون میلیون متر. تا جایی که ما امروزه می‌توانیم بگوییم، یک الکترون تنها شبیه مقام رسمی ازخودراضی است که رادرفورد گفت؛ نقطه مانند است و به دور هسته هیدروژن می‌چرخد، با فاصله‌ای ۱۰۰۰۰۰ برابر قطر هسته. هسته بار الکتریکی مثبت دارد و الکترون بار منفی، یعنی جاذبه‌ای بین آن دو برقرار است، شبیه به گرانشی که

زمین را در مدار خورشید نگه داشته است. این به‌نوبه خود یعنی قسمت اعظم اتم‌ها فضای خالی است. اگر شما هسته اتم را برابر با توپ تنیسی فرض کنید، در آن صورت الکترون به‌اندازه ذره‌ای غبار است که به فاصله یک کیلومتر به دور توپ می‌گردد. این تصورات واقعاً شگفت‌انگیزند زیرا اجسام جامد واقعاً احساس خالی بودن را نمی‌دهند.

اتم هسته‌ای رادرفورد مجموعه از مسائل را برای فیزیکدانان آن زمان به وجود آورد. برای مثال آن‌ها می‌دانستند که الکترون حین گردش به دور هسته باید انرژی از دست بدهد، زیرا تمامی اجسام باردار حین حرکتشان در مسیرهای منحنی از خود انرژی ساطع می‌کنند. همین مطلب روش کار فرستنده‌های رادیویی است، که الکترون‌های درون آن‌ها وادار

به جابجایی می‌شوند و به‌عنوان نتیجه از خود امواج الکترومغناطیسی رادیویی ساطع می‌کنند. هنریش هرتز[۱] فرستنده رادیویی را در سال ۱۸۸۷ اختراع کرده بود و زمانی که رادرفورد هسته اتم را کشف کرد، یک ایستگاه رادیویی تجاری وجود داشت که پیغام‌هایی را از میان اقیانوس اطلس از ایرلند به کانادا می‌فرستاد. پس به‌وضوح ایرادی در نظریه ذرات باردار گردان و تشعشع امواج رادیویی وجود نداشت و این مطلب برای کسانی که قصد توضیح پایداری الکترون‌ها در مدار هسته را داشتند، مشکل‌ساز بود.

[۱] . Heinrich Herts

مشابه با آن، این پدیده غیرقابل توضیح بود که اتم‌ها زمانی که گرم می‌شوند از خود نور ساطع می‌کنند. سال ۱۸۵۳ دانشمند سوئدی به نام آندرس جونز آنگستروم[۱] جرقه‌ای را توسط بادکنکی از گاز هیدروژن تولید کرد و نور ساطع‌شده را تحلیل کرد. ممکن است کسی فکر کند که گاز درخشان می‌تواند تمامی رنگ‌های رنگین‌کمان را تولید کند، آخر مگر خورشید توپی از گاز درخشان نیست؟ در عوض آنگستروم مشاهده کرد که هیدروژن سه رنگ مجزا را تولید می‌کند: قرمز، سبز-آبی و بنفش. مانند رنگین‌کمانی با سه رنگ نازک و قابل‌تفکیک. اندکی بعد کشف شد که هر عنصر شیمیایی رفتار مشابهی دارد و مجموعه‌ای از رنگ‌های منحصربه‌فرد را مانند

[۱] . Anders Jonas Angstrom

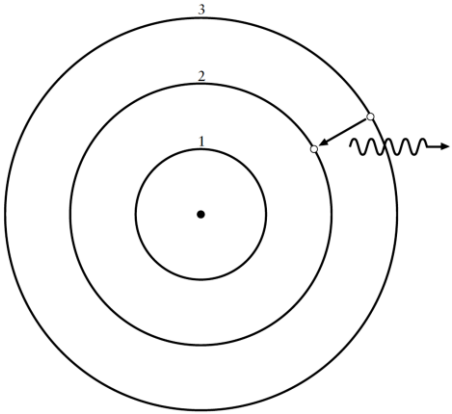
بارکُد (خطوط رمز) ساطع می‌کند. زمانی که بحث اتم هسته‌ای رادرفورد به میان آمده بود، دانشمندی به نام هنریش گوستاو یوهانس کیسر[۱] کتاب مرجعی ۶ جلدی و ۵۰۰۰ صفحه‌ای با نام کتاب راهنمای طیف‌سنجی[۲] را تألیف کرده بود و در آن تمامی خطوط رنگی ناشی از عناصر شناخته‌شده آن زمان را طبقه‌بندی کرده بود. سؤال این بود که چرا؟ نه‌تنها چرا پروفسور کیسر؟ بلکه "چرا فراوانی این خطوط رنگی"؟ برای بیش از ۶۰ سال علم طیف‌سنجی[۳]، همان‌طوری که

[۱] . Heinrich Gustav Johannes Kayser

[۲] . Handbuch Der Spectroscopie

[۳] . Spectroscopy

شناخته شده بود، یک پیروزی مشاهده‌ای (تجربی) و همزمان یک شکست نظری بود.



شکل ۲-۱: مدل اتمی بور؛ در تصویر، گسیل یک فوتون (خط موج‌دار) دیده می‌شود که در طی افتادن یک الکترون از مدار بالا به مدار پایین (که با فلش نشان داده شده است) اتفاق می‌افتد.

در مارس سال ۱۹۱۲ فیزیکدان دانمارکی، نیلز بور[۱]، که شیفته مسئله ساختار اتم شده بود، برای ملاقات با رادرفورد به منچستر سفر کرد. او بعدها گفت که تلاش برای رمزگشایی از کارکرد درونی اتم‌ها توسط طیف‌سنجی مثل این می‌ماند که بخواهیم بنیان زیست‌شناسی را با توجه به رنگ بال‌های پروانه استخراج کنیم. مدل منظومه شمسی رادرفورد از اتم، سرنخ موردنیاز را به دست بور داد و در سال ۱۹۱۳ او اولین نظریه کوانتوم را از ساختار اتم ارائه داد. این نظریه مسلماً مشکلات خود را داشت، اما نکات کلیدی زیادی را در خود داشت که آغازگر نظریه کوانتوم مدرن شدند. بور نتیجه گرفت که الکترون‌ها تنها می‌توانند در مدارهای معینی به دور هسته

[۱] . Niels Bohr

بگردند و کم انرژی ترین این مدارها، نزدیک‌ترینشان به هسته است. او همچنین گفت که الکترون‌ها می‌توانند بین این مدارها جهش کنند. زمانی که یک الکترون انرژی دریافت کند (مثلاً از یک جرقه‌ای در بادکنک)، از مدار پایین به مدار بالا میرد و وقتش که رسید دوباره به مدار پایین برگشته و نور ساطع می‌کنند. رنگ نور مستقیماً توسط اختلاف انرژی بین دو مدار تعیین می‌شود. شکل ۲-۱ ایده اولیه را نشان می‌دهد؛ فِلِش الکترونی را نشان می‌دهد که از سطح انرژی سوم به دوم می‌پرد و از خود نور ساطع می‌کند (که با خط موج‌دار نشان داده شده است). در مدل بور، الکترون تنها مجاز است که بر روی این مدارات مخصوص کوانتیده[۱] (کوانتیزه شده) حرکت

[۱] . Quantized

کند. حرکت مارپیچی به درون ممنوع است. در این حالت مدل بور اجازه می‌دهد تا طول‌موج نوری را که توسط آنگستروم مشاهده‌شده را محاسبه کنیم (یعنی رنگ‌ها را). آن طول‌موج‌ها یکی مربوط به پرش الکترون از مدار پنجم به دوم بود (رنگ بنفش)، از چهارم به دوم (رنگ آبی-سبز) و از سوم به دوم (رنگ قرمز). همچنین مدل بور به‌درستی پیش‌بینی کرد که هنگام پرش الکترون‌ها به مدار اول نیز نوری تابیده می‌شود. این نور همان قسمت ماورای بنفش طیف است که برای چشم انسان آشکار نیست و توسط آنگستروم نیز مشاهده نشد. به‌هرحال این موج نیز در سال ۱۹۰۶ توسط فیزیکدانی

از دانشگاه هاروارد به نام تئودور لیمان[۱] یافت شد و مدل بور به زیبایی داده‌های لیمان را توضیح می‌داد.

گرچه بور برای ارتقاء مدلش فراتر از هیدروژن تلاشی نکرد، این ایده را می‌توان به سایر عناصر نیز تعمیم داد. خصوصاً زمانی که فرض کنیم اتم هر عنصر مجموعه‌ای منحصربه‌فرد از مدارات را دارد که درنتیجه تنها می‌تواند رنگ‌های مشخصی را بتاباند. بنابراین رنگ‌های ساطع‌شده از هر اتم را می‌توان به‌عنوان اثرانگشت آن اتم به‌حساب آورد و اخترشناسان نیز بیکار ننشسته و شروع به تعیین ترکیبات شیمیایی ستارگان با استفاده از خطوط طیفی رسیده از آن‌ها کردند.

---

۱. Theodore Lyman

مدل بور شروع خوبی بود، اما به‌وضوح ارضاکننده نبود: با علم بر اینکه الکترون‌ها حین چرخش به دور هسته باید امواج الکترومغناطیسی ساطع کرده و انرژی از دست دهند، چرا الکترون‌ها از حرکت مارپیچی به سمت هسته منع شده‌اند؟ ایده‌ای که به‌طور محکمی در زندگی واقعی باوجود دستگاه‌هایی مثل رادیو در جریان بود. و اصلاً چرا الکترون‌ها محدود به مدارهای کوانتیده هستند؟ و این مدل درباره اتم‌های سنگین‌تر از هیدروژن چه حرفی برای گفتن دارد؟ چگونه کسی می‌تواند با استفاده از این مدل ساختار آن اتم‌ها را نیز بفهمد؟

گرچه نظریه بور نیم‌پز بود، اما قدم بزرگی بود و مثالی است از اینکه دانشمندان چگونه پیش روی می‌کنند. اینکه در مقابل

شواهد گیج‌کننده همین‌جور سردرگم بمانیم هیچ فایده‌ای ندارد. در چنین مواردی دانشمندان شروع به گمانه‌زنی[۱] می‌کنند، البته حدس‌های علمی، و بحث را ادامه می‌دهند تا نتایج آن حدس را ببینند. اگر حدسشان جواب داد، در آن صورت به ابتدای حدس بازگشته و آن را با جزئیات بیشتری بررسی می‌کنند. گمانه بور برای ۱۳ سال موفق اما غیرقابل توضیح بود.

ما در ادامه کتاب دوباره به بررسی تاریخچه ایده‌های اولیه کوانتوم بازخواهیم گشت، اما فعلاً حجم زیادی از نتایج عجیب و سؤالات بی‌پاسخ را برای بعد باقی خواهیم گذاشت، زیرا برای

---

[۱] . Make an Ansatz

بنیان‌گذاران نظریه کوانتوم نیز به همین منوال پیش رفت. به‌طور خلاصه، پس از پلانک، انیشتین این ایده را مطرح کرد که نور از ذرات تشکیل شده است، اما ماکسول نشان داده بود که نور رفتار موج‌مانند نیز دارد. رادرفورد و بور، مدلی برای فهم ساختار اتم‌ها ارائه دادند، اما از نتایج مدل آن‌ها این بود که الکترون‌ها منطبق با نظریه‌های شناخته‌شده آن زمان رفتار نمی‌کردند. همچنین پدیده‌های گوناگونی با نام رادیواکتیویته که در آن اتم‌ها بدون هیچ دلیل مشخصی شکافته می‌شدند نیز به‌عنوان معمایی باقی ماند و البته به طرز ابهام‌آمیزی عنصر تصادفی‌ای را وارد دنیای فیزیک کرد. هیچ شکی وجود نداشت: اتفاق عجیبی در دنیای زیراتمی در جریان بود.

اولین گام به سمت یک جواب متحد و سازگار را به فیزیکدان آلمانی، ورنر هایزنبرگ[۱] نسبت می‌دهند و کاری که او انجام داد چیزی کمتر از معرفی روش کاملاً جدیدی برای حل نظریه ماده و نیروها نبود. در جولای سال ۱۹۲۵ هایزنبرگ مقاله‌ای به چاپ رساند که در آن مجموعه‌ای از ایده‌ها و نظریات ناقص را دور ریخت که شامل مدل اتمی بور نیز می‌شد و روش کاملاً جدیدی به علم فیزیک معرفی کرد. او این‌گونه آغاز کرد: "در این مقاله در تلاشیم تا بنیانی برای مکانیک نظری کوانتومی به دست آوریم که این نظریه منحصراً بر پایه کمیت‌هایی است که به‌طورکلی قابل‌مشاهده هستند". این گامِ بسیار مهمی است، زیرا هایزنبرگ می‌گوید لزومی

[۱] . Werner Heisenberg

ندارد که ریاضیات نهفته در نظریه کوانتوم را حتماً به چیزهایی که با آن‌ها آشنا هستیم ربط دهیم. وظیفه نظریه کوانتوم این است که اتفاقات قابل‌مشاهده را پیش‌بینی کند، مانند رنگ نور ساطع‌شده از اتم‌های هیدروژن. نباید انتظار داشته باشیم که این نظریه تصویر ذهنی ارضاکننده‌ای را از عملکرد داخلی اتم‌ها برای ما فراهم کند، زیرا چنین چیزی نیاز نیست و شاید اصلاً امکان‌پذیر نباشد. طی یک حرکت انتحاری! هایزنبرگ این تصور مغرورانه را که هر عملکردی در طبیعت باید طبق ادراک عمومی ما باشد، کنار گذاشت. منظور این نیست که نباید انتظار داشته باشیم تا جهان زیراتمی شبیه به تجربیات روزمره ما در توصیف حرکت اجسام بزرگ مانند توپ تنیس و هواپیما باشد. اما ما باید آماده شویم که

تعصباتمان را کنار بگذاریم و درصورتی‌که مشاهدات تجربی چیز دیگری به ما می‌گویند، فکر نکنیم که رفتار اجسام ریز باید مانند نسخه کوچک‌شده اجسام بزرگ باشد.

شکی نیست که نظریه کوانتوم زیرکانه است و مطلقاً شکی وجود ندارد که روش هایزنبرگ زیرکانه‌تر است. استیون واینبرگ[۱]، برنده جایزه نوبل و یکی از بزرگ‌ترین فیزیکدانان در قید حیات، درباره مقاله سال ۱۹۲۵ هایزنبرگ نوشته است:

> اگر خواننده درباره کاری که هایزنبرگ کرده، گیج شده است، او تنها نیست. من بارها تلاش کردم تا مقاله هایزنبرگ را که در بازگشت از هلیگولند نوشته بود، بخوانم و گرچه احتمالاً من

[۱] . Steven Weinberg

مکانیک کوانتومی را فهمیده‌ام، هرگز انگیزه هایزنبرگ برای این گام ریاضیاتی که در این مقاله برداشته است را نفهمیدم. فیزیکدانان نظری در موفق‌ترین کارهایشان تمایل دارند یکی از دو نقش زیر را بازی کنند: آن‌ها یا شخصیت حکیم داستان‌اند، یا جادوگر داستان. معمولاً فهمیدن مقالات فیزیکدانان حکیم سخت نیست اما مقالات فیزیکدانان جادوگر دور از فهم است. در این مورد، مقاله سال ۱۹۲۵ هایزنبرگ یک جادوی خالص است.

بااین‌حال فلسفه هایزنبرگ جادوی خالص نیست. این فلسفه ساده بوده و در قلب روشی که ما در این کتاب ارائه خواهیم کرد قرار دارد: وظیفه نظریاتِ در باب طبیعت این است که پیش‌بینی‌هایی از کمیت‌ها انجام دهند که بتوان با نتایج تجربی مقایسه‌شان کرد. ما مجبور نیستیم نظریاتی بسازیم که حتماً ارتباطی با جهان بزرگ‌مقیاسی که می‌بینیم داشته

باشند. خوشبختانه گرچه ما فلسفه هایزنبرگ را به کار خواهیم برد، ما روش واضح‌تر ریچارد فاینمن[۱] به جهان کوانتومی را نیز دنبال خواهیم کرد.

ما در چند صفحه اخیر آزادانه از واژه "نظریه" استفاده کردیم؛ قبل از اینکه در راستای ساخت نظریه کوانتومی حرکت کنیم، بهتر است که نظریه ساده‌تری را با جزئیاتش بررسی کنیم. یک نظریه علمی خوب مجموعه‌ای از قوانینی را مشخص می‌کند که این قوانین می‌گویند در فلان قسمت جهان چه اتفاقاتی باید بی افتد و چه ها نباید. این قوانین باید پیش‌بینی‌هایی را ارائه دهند که بتوان با مشاهدات آن‌ها را

[۱] . Richard Feynman

آزمود. اگر پیش‌بینی‌ها غلط از آب درآیند، نظریه اشتباه بوده و باید عوض شود. اگر پیش‌بینی‌ها و مشاهدات همخوانی داشته باشند، نظریه باقی می‌ماند. هیچ نظریه‌ای "درست" نیست؛ یعنی همواره این احتمال وجود دارد که باطل شود. به گفته توماس هاکسلی[۱] روانشناس: "علم مجموعه‌ای مرتب‌شده از ادراکات ماست که ممکن است در آن نظریه زیبایی توسط واقعیتی زشت از بین برود". نظریه‌ای که قابل رد نباشد نظریه علمی نیست. در حقیقت می‌توان پا را فراتر گذاشت و گفت هیچ اطلاعات قابل‌اطمینانی وجود ندارد. اعتماد به این نظریات گول زننده باعث شده تا نظریات علمی متمایز از نظرات شخصی باشند. البته این تعریف علمی واژه "نظریه" با

[۱] . Thomas Huxley

مفهومش در مکالمات عامیانه که میزانی از تفکر را می‌رساند، متفاوت است. نظریات علمی ممکن است تا زمانی که با شواهد تجربی رویارو نشده باشند، در حد همان تفکرات باقی بمانند، اما نظریات موردقبول آن‌هایی هستند که شواهد زیادی در تأییدشان موجود باشد. دانشمندان در تلاش برای ارائه نظریاتی هستند که بازه وسیعی از پدیده‌ها را پوشش دهند و مخصوصاً فیزیکدانان اشتیاق زیادی دارند تا هر چیزی که در جهان مادی اتفاق می‌افتد را با مجموعه قوانین محدودی توضیح دهند.

یک مثال خوب از نظریاتی که کاربردهای فراوانی دارد، نظریه گرانش اسحاق نیوتون است که در تاریخ ۵ جولای

۱۶۸۷ در کتاب *اصول ریاضی فلسفه طبیعی*[۱] منتشر شد. این اولین نظریه مدرن علمی بود و گرچه در ادامه مشخص شد که تحت شرایط خاصی دقیق نیست، آن‌قدر خوب است که هنوز استفاده می‌شود. انیشتین نظریه دقیق‌تری درباره گرانش ارائه داد؛ نسبیت عام در سال ۱۹۱۵.

توضیح گرانش نیوتون را می‌توان در معادله ریاضی ساده‌ای نشان داد:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

[۱] . Phylosophiae Naturalis Principia Mathematica

با توجه به پیشینه ریاضیاتی شما، ممکن است این معادله ساده یا پیچیده باشد. ما در طول این کتاب هرازگاهی از ریاضیات استفاده خواهیم کرد. برای خوانندگانی که ریاضیات برایشان سخت است، توصیه می‌کنیم که از آن قسمت‌ها بدون نگرانی زیادی عبور کنند. ما همواره تلاش می‌کنیم تا ایده‌های کلیدی را بدون اتکا به ریاضیات بیان کنیم. ریاضیات به ما کمک می‌کند تا واقعاً نشان دهیم، چرا اتفاقات به همان صورتی هستند که هستند. در غیر این صورت ما مجبور خواهیم شد به طرز فکرهای جادویی فیزیکی پناه ببریم که در آن صورت باید واقعیت‌های عمیق طبیعت را بدون پشتوانه به شما ارائه دهیم و هیچ نویسنده‌ای دوست ندارد کارش را این‌گونه پیش برد.

حال بیایید به معادله نیوتون بازگردیم. تصور کنید که سیبی به‌طور ناپایدار از شاخه‌ای آویزان است. بر اساس قصه‌های عامیانه، ایده نیروی گرانش ازاینجا ناشی شد که سیبی رسیده در یک بعدازظهر تابستانی بر روی سر نیوتون افتاد و نیوتون را به سمت این نظریه هدایت کرد. نیوتون گفت که سیب تحت نیروی گرانش قرار گرفته و سمت زمین کشیده شده است و این نیرو در معادله بالا با نماد F نشان داده شده است. پس اولاً اگر شما عبارات قسمت راست معادله را بدانید، این معادله اجازه می‌دهد تا نیروی وارده به سیب را محاسبه کنید. حرف r نماینده فاصله بین مرکز سیب و مرکز کره زمین است. به این دلیل به‌صورت r^2 نوشته شده که نیوتون فهمید نیروی گرانش بستگی به مجذور فاصله بین اجسام دارد. به زبان غیر

ریاضیاتی، اگر شما فاصله بین سیب و مرکز زمین را دوبرابر کنید، نیروی گرانش ۴ برابر کمتر می‌شود. اگر ۳ برابر کنید، نیروی گرانش تقسیم‌بر ۹ می‌شود و به همین ترتیب. فیزیکدانان به این رفتار قانون عکس مجذور فاصله[۱] می‌گویند. نمادهای $m_۱$ و $m_۲$ نماینده جرم‌های سیب و زمین هستند و نحوه قرارگیری آن‌ها نشان می‌دهد که نیوتون فهمید نیروی گرانش بین دو جسم بستگی به حاصل‌ضرب جرم آن دو دارد. در ادامه این سؤال پیش می‌آید که جرم چیست؟ این به‌خودی‌خود سؤال جالبی است و برای [شنیدن] دقیق‌ترین جوابی که امروزه برای این سؤال وجود دارد باید تا زمانی که

[۱] . Inverse Square Law

درباره ذره کوانتومی بوزون هیگز[۱] صحبت کنم صبر کنید. بخواهم کلی‌گویی کنم، به مقدار ماده (چیز) موجود در یک جسم، جرم می‌گویند. زمین سنگین‌تر از سیب است. بااین‌حال بیان چنین گزاره‌ای خیلی هم خوب نیست. خوشبختانه نیوتون همچنین راهی را فراهم کرد که بتوان مستقل از نیروی گرانش جرم یک جسم را اندازه گرفت که این راه در قانون دوم از سه قانون حرکت او آمده است؛ قوانینی که موردعلاقه تمامی دانش آموزان دبیرستانی فیزیک است:

[۱] . Higgs Boson

۱. تا زمانی که نیرویی به جسمی وارد نشود، جسم یا در حالت ساکن باقی‌مانده، یا با سرعتی ثابت [که از قبل داشت] در مسیر مستقیمی حرکت خواهد کرد.

۲. اگر نیروی F را به جسمی به جرم m وارد کنیم، جسم شتابی برابر با a به خود می‌گیرد. به‌صورت معادله می‌شود F=ma

۳. برای هر عمل (کنش)، عکس‌العملی (واکنشی) برابر و در خلاف جهتش وجود دارد.

قوانین سه‌گانه نیوتون ساختاری را برای توضیح حرکت اجسام تحت تأثیر نیروها فراهم کرد. قانون اول می‌گوید که اگر نیرویی وارد نشود، چه اتفاقی می‌افتد: جسم یا ساکن

مانده یا با سرعت ثابتی در مسیر مستقیم حرکت خواهد کرد. ما بعداً به دنبال گزاره معادل با این برای ذرات کوانتومی خواهیم بود و صرفاً این را بگوییم که ذرات نمی‌توانند همین‌طور سر جایشان بنشینند. حتی اگر نیرویی وجود نداشته باشد، آن‌ها دائماً در حال تغییر مکان‌اند. در حقیقت ایده "نیرو" در نظریه کوانتوم وجود ندارد و قانون دوم نیوتون را باید به دور انداخت. البته جمله قبل را جدی گفتم و همه قوانین نیوتون را باید کنار بگذاریم، زیرا تنها به‌طور تقریبی درست‌اند. درست است که در خیلی از شرایط جواب می‌دهند اما زمانی که صحبت از پدیده‌های کوانتومی است، کاملاً ناکارآمد هستند. قوانین نظریه کوانتوم جایگزین قوانین نیوتون شده و توضیح دقیق‌تری از جهان می‌دهند. فیزیک نیوتونی در

اصل از توضیحات کوانتومی نشأت می‌گیرد و مهم است که بدانید ماجرا این نیست که "نیوتون برای اجسام بزرگ است و کوانتوم برای اجسام کوچک": کل ماجرا کوانتوم است.

گرچه ما وارد بحث قانون سوم نیوتون نخواهیم شد، اما شایسته است که برای خوانندگان مشتاق، یکی دو جمله نیز راجع به آن بگوییم. قانون سوم می‌گوید که نیروها به‌صورت جفت وارد می‌شوند؛ اگر من از جایم برخیزم، پاهایم به روی زمین فشار می‌آورند و زمین نیز با فشار متقابلی پاسخ می‌دهد. این یعنی در یک سیستم بسته، نیروی خالص وارد بر آن صفر است و متقابلاً این یعنی کل تکانه[۱] سیستم پایسته است. ما از

[۱] . Momentum

ایده تکانه در کل این کتاب استفاده خواهیم کرد و [بدانید که] برای یک ذره، این کمیت به‌صورت حاصل‌ضرب سرعت در جرم ذره تعریف می‌شود که این‌گونه نوشته می‌شود: p=mv. جالب است که گرچه ایده نیرو در نظریه کوانتوم مفهومی ندارد، پایستگی تکانه مفهوم دارد.

فعلاً قانون دوم نیوتون در مرکز توجه ماست. F=ma می‌گوید اگر شما نیروی معینی را بر جسمی وارد کنید و شتاب جسم را اندازه بگیرید، نسبت بین نیرو و شتاب برابر با جرم جسم خواهد بود. این جمله فرضش این است که ما نحوه تعیین مقدار نیرو را می‌دانیم، که البته کار سختی نیست. یک روش ساده و نه خیلی دقیق و عملی این است که نیرو را با توجه به کششی که توسط چیز معینی وارد شده حساب کرد.

مثلاً یک لاک‌پشت متوسط که در خط مستقیمی حرکت می‌کند و جسمی را که توسط طنابی به او وصل شده، می‌کشد. ما می‌توانیم لاک‌پشت متوسط را "لاک‌پشت SI" بنامیم و آن را در محفظه‌ای امن قرار داده و در اداره اوزان و مقادیر در سور فرانسه نگه‌داری کنیم. دو لاک‌پشت افسار بندی شده، دو برابر نیرو تولید می‌کنند و ۳ تای آن‌ها سه برابر و به همین ترتیب. پس‌ازآن ما می‌توانیم درباره هر کشش یا فشاری با تعداد لاک‌پشت‌های متوسط موردنیاز برای تولید آن صحبت کنیم.

با داشتن چنین سیستمی، که البته آن‌قدر عجیب است که توسط کمیته بین‌المللی استاندارد موافقت نخواهد شد[۱]، ما می‌توانیم جسمی را به پشت یک لاک‌پشت ببندیم و پس از حرکت، شتاب آن را اندازه بگیریم و متعاقب آن با استفاده از قانون دوم نیوتون جرم جسم را محاسبه کنیم. می‌توان فرایند مشابهی را بر روی جسم دیگری به کار برد و جرمش را محاسبه کرد و نهایتاً این دو جرم را وارد قانون گرانش کرده و نیروی گرانشی بینشان را به دست آورد. برای اینکه نیروی گرانش بین دو جرم نیز از واحدی مرتبط با لاک‌پشت باشد، ما

[۱]. البته اگر بدانید که یکی از متداول ترین واحد های توان که حتی امروزه نیز به کار می رود، اسب بخار است، خیلی هم متعجب نخواهید شد

نیازمندیم که کل سیستم را نسبت به نیروی گرانش تنظیم (کالیبره) کنیم. اینجا نماد G به میان می‌آید.

G عدد بسیار مهمی است که ثابت گرانشی نیوتون نام دارد و نیروی گرانش را تبدیل می‌کند. اگر ما G را دوبرابر کنیم، نیرو نیز دوبرابر می‌شود و این باعث می‌شود که سیب با شتابی دوبرابر به سمت زمین حرکت کند. بنابراین این نماد یکی از خصوصیات بنیادی جهانمان را توصیف می‌کند و اگر این ثابت عدد دیگری به خود می‌گرفت، ما در جهانی بسیار متفاوت زندگی می‌کردیم. تا به امروز عقیده بر این بوده است که G در هرکجای دنیا مقدار ثابتی دارد و در طول تاریخ نیز ثابت بوده است (این ثابت در نظریه گرانش انیشتین نیز حضور دارد که آنجا نیز ثابت است). طبیعت ثابت‌های دیگری نیز دارد که در

ادامه کتاب با آن‌ها آشنا خواهیم شد. در مکانیک کوانتومی، مهم‌ترینشان ثابت پلانک[۱] است که به‌افتخار پیشگام کوانتوم، ماکس پلانک، نام‌گذاری شده و نماد h را به آن اختصاص داده‌اند. ما همچنین به سرعت نور، c، نیز احتیاج خواهیم داشت که نه‌تنها سرعت حرکت نور در خلأ است، بلکه یک حد سرعت جهانی است. وودی آلن[۲] می‌گفت: "حرکت با سرعتی بیش از سرعت نور، امکان‌ناپذیر است و مسلماً خوشایند هم نخواهد بود، زیرا کلاهتان هی خواهد افتاد".

قوانین سه‌گانه نیوتون و همچنین قانون گرانش تمام آن چیزی است که ما برای فهمیدن حرکت در حضور گرانش به

[۱]. Planck's Constant

[۲]. Woody Allen

آن نیازمندیم. قوانین مخفی دیگری وجود ندارند که ما اشاره نکرده باشیم – تنها همین سه قانون کار ما را راه می‌اندازند و برای مثال به ما این امکان را می‌دهند که مدار سیارات را در منظومه شمسی‌مان بفهمیم. این قوانین در کنار هم مسیرهای ممکن برای حرکت اجسام تحت تأثیر گرانش را شدیداً محدود می‌کنند. می‌توان تنها با استفاده از قوانین نیوتون ثابت کرد که تمامی سیارات، ستاره‌های دنباله‌دار، سیارک‌ها و شهاب‌سنگ‌ها در منظومه شمسی ما تنها مجازند بر روی مسیرهایی حرکت کنند که به مقاطع مخروطی معروف‌اند. ساده‌ترین آن‌ها که همان مسیری است که زمین از آن پیروی کرده و به دور خورشید می‌گردد، با تقریب خوبی دایره است. عموماً سیارات و اقمار در مدارهای بیضی‌شکل حرکت می‌کنند

که همان دایره‌های کشیده شده‌اند. دو مقطع مخروطی دیگر سهمی و هذلولی هستند. سهمی، مسیری است که گلوله توپ پس از پرتاب طی می‌کند. آخرین مقطع مخروطی یعنی هذلولی، مسیری است که دورترین دستگاه ساخته دست بشر در فضای بین ستاره‌ای در حال طی کردنش است. در لحظه نوشتن این کتاب، وویجر ۱[۱] حدوداً ۱۷۶۱۰۰۰۰۰۰ کیلومتر از زمین فاصله دارد و با سرعت ۵۳۸۰۰۰۰۰۰ کیلومتر در سال از منظومه شمسی دور می‌شود. این دستاورد زیبای مهندسی در سال ۱۹۷۷ پرتاب شد و هنوز با زمین در ارتباط است و بادهای خورشیدی را اندازه گرفته، روی نواری ضبط کرده و با توان ۲۰ وات به زمین می‌فرستد. وویجر ۱ و

[۱]. Voyager 1

خواهرش وویجر ۲ نمادی از اشتیاق انسان‌ها برای کاوش جهان هستند. هر دو فضاپیما از مشتری و زحل بازدید کرده و وویجر ۲ به سمت بازدید از اورانوس و نپتون رفت. آن‌ها منظومه شمسی را به‌دقت جستجو کردند و از گرانش [سیارات] مثل تیرکمانی استفاده کرده تا خود را به محدوده میان ستاره‌ای و خارج از سیارات است پرتاب کنند. هدایت‌کنندگان این فضاپیماها بر روی زمین، برای نقشه‌کشی مسیر آن‌ها در داخل و خارج سیارات و در فضای میان ستاره‌ای تنها از قوانین نیوتون استفاده کردند. وویجر ۲ در کمتر از ۳۰۰۰۰۰ سال به نزدیکی‌های شباهنگ[۱] که روشن‌ترین ستاره آسمان شب است حرکت خواهد کرد. تمام

[۱]. Sirius

این چیزهایی که می‌دانیم و کارهایی که انجام دادیم به خاطر نظریه گرانش نیوتون و قوانین حرکت اوست.

قوانین نیوتون تصویری قابل‌قبول و خوشایند از جهان برای ما فراهم می‌کند. همان‌طور که دیدیم این قوانین به شکل معادلاتی – روابط ریاضی بین کمیت‌های قابل‌اندازه‌گیری - ظاهر می‌شوند که به ما این امکان را می‌دهند که به‌دقت نحوه حرکت اجسام را پیش‌بینی کنیم. این قوانین در ساختارشان این پیش‌فرض را دارند که اجسام در هر فاصله‌ای که باشند، در یک مکان قرار گرفته‌اند و به‌مرورزمان آن جسم می‌تواند از جایی به جای دیگر نقل‌مکان کند. این مطلب به‌وضوح درست است و حتی ارزش تأکید نداشت، اما بدانید که چنین ذهنیتی تعصب‌آمیز است. آیا ما با قطعیت می‌توانیم بگوییم که اجسام،

اینجا یا آنجا هستند و همزمان در دو جا نیستند؟ مسلماً؛ کلبه داخل باغ شما هیچ‌گونه شکی در آدم ایجاد نمی‌کند که همزمان در دو جا باشد – اما درباره الکترون داخل اتم چه می‌توان گفت؟ آیا می‌تواند همزمان هم اینجا باشد هم آنجا؟ در این لحظه چنین حرفی کمی ناعاقلانه به نظر می‌رسد، زیرا ما نمی‌توانیم با چشمِ ذهنمان آن را تصور کنیم، اما در ادامه خواهیم دید که دقیقاً چنین عملکردی در جریان است. در این قسمت از داستان هدف ما از مطرح کردن چنین حرف عجیبی این بود که بگوییم قوانین نیوتون بر پایه درک ذاتی ما (عقل سلیم) ساخته شده‌اند، و تا زمانی که بحث بر سر فیزیک بنیادی است، مثل این می‌ماند که خانه‌ای روی ماسه ساخته شود. [منظور اینکه استحکام ندارد]

آزمایش ساده‌ای وجود دارد که اولین بار توسط کلینتون دیویسون[۱] و لستر جرمر[۲] در آزمایشگاه بِل در آمریکا انجام شد و نتایجش در سال ۱۹۲۷ به چاپ رسید که نشان می‌داد تصویر غریزیِ نیوتونی ما از جهان اشتباه است. گرچه سیب‌ها، سیارات و مردم قطعاً رفتاری به شیوه قوانین نیوتون دارند و با گذر زمان به‌طور پیش‌بینی‌شده‌ای از جایی به جای دیگر حرکت می‌کنند، آزمایش آن‌ها نشان داد بنیادی‌ترین اجزای سازنده ماده مطلقاً چنین رفتاری ندارند.

مقاله دیویسون و جرمر این‌گونه آغاز می‌شود: "شدت پراکندگی یک پرتو همگن از الکترون‌هایی با سرعت

---

۱. Clinton Davisson

۲. Lester Germer

تنظیم‌شده بر روی کریستالی از نیکل، به‌عنوان تابعی از جهت اندازه‌گیری شد." خوشبختانه راهی برای درک مطلب کلیدی یافته‌های آن‌ها با نسخه ساده‌تری از آزمایششان وجود دارد که "آزمایش دو شکاف[۱]" نام دارد. این آزمایش به این صورت است که الکترون‌هایی از یک منبع به سمت مانعی پرتاب می‌شوند که دارای دو شکاف نازک است (یا دو سوراخ). در پشت سر مانع صفحه‌ای وجود دارد که حین برخورد الکترون‌ها روشن می‌شود. مهم نیست که منبع الکترون‌ها چه چیزی است، اما به‌طور عملی می‌توان فرض کرد که این منبع

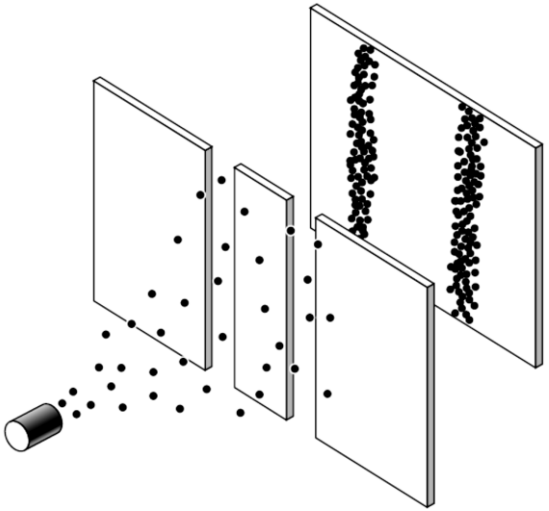
[۱] . Double-Slit Experiment

سیمی داغ است که در طول آزمایش کشیده شده است[۱]. ما آزمایش دو شکاف را در شکل ۲-۲ نشان داده‌ایم.

فرض کنید دوربینی در مقابل این آزمایش قرار دادید و شاتر دوربین را برای ثبت تصویری طولانی‌تر [ازلحاظ زمانی] باز نگه داشته‌اید که باعث شود هر نقطه کوچکی که جرقه می‌زند [براثر برخورد الکترون با صفحه پشتی] در عکس شما بی افتد. الگویی ساخته می‌شود و سؤال ساده این است که این الگو چگونه است؟ با این فرض که الکترون‌ها ذرات کوچکی

[۱]. زمانی تلویزیون ها با همین ایده کار می کردند. جریانی از الکترون ها که توسط یک سیم داغ تولید شده بود، جمع شده، متمرکز شده و تبدیل به پرتویی می شدند که توسط یک میدان مغناطیسی به سمت صفحه نمایش پرتاب می شدند و حین برخورد با صفحه ، تولید رنگ می کردند

هستند که مانند سیب یا سیاره رفتار می‌کنند، انتظار ما این است که الگویی مانند شکل ۲-۲ تشکیل شود. تعداد کمی از الکترون‌ها از درون شکاف‌ها عبور کنند و اکثراً رد نشوند. آن‌هایی که عبور می‌کنند ممکن است به لبه شکاف‌ها برخورد کرده و کمی انحراف یابند، اما اکثر الکترون‌ها پس از عبور، دو خط موازی با شکاف‌ها را روی صفحه پشتی می‌سازند.



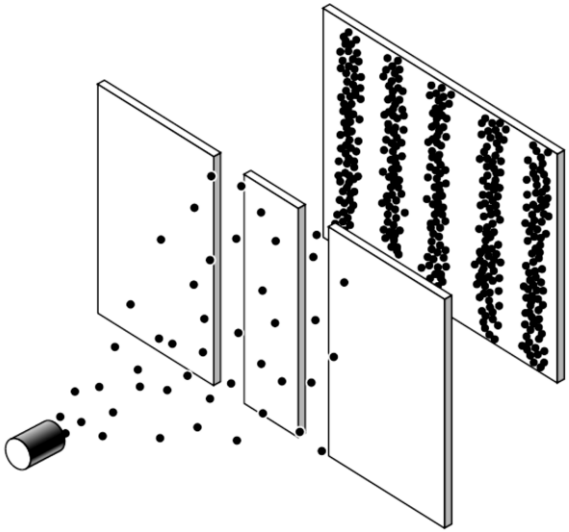
شکل ۲-۲: تفنگی الکترونی به سمت جفت شکاف‌ها شلیک می‌کند. اگر رفتار الکترون‌ها "متداول" باشد، ما انتظار داریم همانند شکل الکترون‌ها در دو ردیف موازی به صفحه پشتی برخورد کنند، اما به‌طور شگفت‌انگیزی این اتفاق نمی‌افتد.

اما اتفاقی که می‌افتد این نیست. به‌جای آن، تصویر ۳-۲ اتفاق می‌افتد. دیویسون و جرمر الگویی شبیه به آن را در مقاله سال ۱۹۲۷ شان ارائه دادند. در ادامه دیویسون جایزه نوبل سال ۱۹۳۷ را به دلیل "کشف انکسار[۱] (پراش) الکترون توسط کریستال‌ها" از آن خود کرد. او این جایزه را نه با جرمر، بلکه با جورج پجت تامسون[۲] تقسیم کرد که او نیز در آزمایشی در دانشگاه آبردین به‌طور مستقل الگوی مشابهی را کشف کرده بود. خطوط راه‌راه روشن و تاریک را الگوی تداخل می‌نامند و تداخل معمولاً به امواج نسبت داده می‌شود. برای

[۱]. Diffraction

[۲]. George Paget Thomson

فهمیدن علت این انتساب، بیایید به‌جای الکترون‌ها امواج آب را در نظر بگیرید.



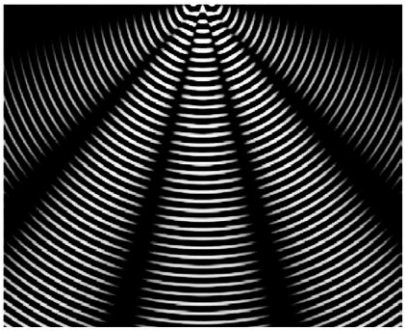
شکل ۳-۲: در واقعیت الکترون‌ها در دو خط موازی با شکاف‌ها برخورد نمی‌کنند. در عوض آن‌ها الگویی راه‌راه تشکیل می‌دهند: این الگو در طول زمان با برخورد تک‌تک الکترون‌ها تشکیل می‌شود.

منبع آبی را در نظر بگیرید که در وسطش دیواره‌ای قرار داشته و دو شکاف در خود دارد. به‌جای صفحه پشتی و دوربین، باید از آشکارگرهای ارتفاع موج استفاده کرد و به‌جای سیم داغ، باید از جسمی استفاده کرد که موج تولید می‌کند؛ یک‌تکه چوب در طول منبع به موتوری وصل شده و باعث می‌شود تا این سر این چوب به‌طور متوالی وارد آب شده و خارج شود، تا بدین طریق تولید موج کند. امواج تولیدی زیر این چوب شروع به حرکت کرده و تا جایی پیش می‌روند که به دیواره برخورد کنند. زمان برخورد این امواج به دیواره، اکثرشان برمی‌گردند، اما دو قسمت کوچک آن از شکاف‌ها عبور می‌کنند. این دو موج جدید به سمت خارج از شکاف‌ها پراکنده شده و به سمت آشکارگرهای ارتفاع موج می‌روند.

دقت کنید که ما اینجا از واژه "پراکنده شدن" استفاده کردیم، زیرا موج پس از عبور از شکاف، منحصراً در خطوط صاف حرکت نمی‌کند. در عوض دو شکاف منبع دو موج جدید می‌شوند که هرکدام شبه‌دایره‌هایی را به وجود می‌آورند. شکل ۴-۲ اتفاقی که می‌افتد را نشان می‌دهد.

این شکل توضیح تصویری خوبی از رفتار امواج آب نشان می‌دهد. مناطقی وجود دارد که موجی در آن‌ها وجود ندارد و مانند پره‌های یک چرخ می‌ماند که از شکاف‌ها آغازشده‌اند و سایر نقاط تصویر از قله‌ها و دره‌های موج تشکیل شده‌اند. خطوط موازی دیده‌شده توسط دیویدسون و جرمر قابل‌توجه است. در مثالِ الکترون‌ها و صفحه پشتی، مناطقی که تعدادی الکترون یافت شده است همان مناطقی هستند که سطح آب

صاف مانده است – همان پره‌هایی که از شکاف‌ها بیرون آمده‌اند.



شکل ۴-۲. نمایی هوایی از امواج آب که از دونقطه در داخل منبع آب نشأت می‌گیرند (این دونقطه در بالای تصویر قرار دارند). دو موج دایروی در نقاطی باهم همپوشانی و تداخل دارند. خطوط تاریک در تصویر نقاطی هستند که دو موج اثر همدیگر را دفع کرده و آب آن نقاط دست‌نخورده باقی می‌ماند.

در یک منبع آب فهمیدن علت تشکیل این پره‌ها راحت است: این ناشی از اختلاط دو موج تشکیل‌شده از شکاف‌هاست. ازآنجایی‌که امواج قله و دره (حداقل و حداکثر) دارند، هنگام برخورد دو موج، آن‌ها یا باهم جمع شده یا از هم کم می‌شوند. اگر دو موج در حالتی به هم برخورد کنند که قله یکی با دره دیگر همزمان شود آن‌ها همدیگر را خنثی کرده و در آن نقطه موجی ایجاد نمی‌شود. در نقاط دیگر ممکن است امواج با قله‌هایشان به هم برخورد کنند که موج بزرگ‌تری را می‌سازند. در هر نقطه‌ای با هر فاصله‌ای از شکاف‌ها، موج‌ها با مدل‌های مختلفی به هم برخورد می‌کنند که در بعضی قله‌ها یا دره‌ها همزمان می‌شوند و در بقیه مجموعی از دو حالت

میانی اتفاق می‌افتد. نتیجه به صورت الگویی جایگزین خواهد بود؛ الگوی تداخل.

برعکس امواج آب، فهم این واقعیت آزمایشگاهی که الکترون‌ها نیز الگوی تداخل ایجاد می‌کنند، بسیار سخت است. با توجه به نیوتون و همچنین عقل سلیم، الکترون‌ها از منبع سرچشمه می‌گیرند، در مسیر مستقیمی به سمت شکاف‌ها حرکت می‌کنند (زیرا نیرویی به آن‌ها وارد نمی‌شود – قانون اول نیوتون را به یاد آورید)، از میان شکاف‌ها با اندکی انحراف احتمالی که می‌تواند ناشی از لبه‌ها باشد عبور کرده و در مسیر مستقیم به حرکتشان ادامه داده و به صفحه برخورد می‌کنند. اما چنین اتفاقی نمی‌تواند الگوی تداخل را پدید آورد – بلکه دو خط موازی شکل ۲-۲ را خواهد ساخت. حال می‌توان

فرض کرد که سازوکار هوشمندانه‌ای وجود دارد که طبق آن، الکترون‌ها نیرویی به همدیگر اعمال می‌کنند و در طی حرکتشان به سمت شکاف‌ها، همدیگر را از خطوط مستقیم منحرف می‌کنند. اما این فرض رد می‌شود، زیرا ما می‌توانیم آزمایشی طراحی کنیم که در آن به‌جای پرتویی از الکترون‌ها، آن‌ها را دانه به دانه به سمت صفحه بفرستیم. شما باید صبر کنید، اما به‌آرامی و مطمئناً هرقدر که الکترون‌ها یکی پس از دیگری به صفحه می‌خورند، دوباره همان الگوی راه‌راه تشکیل می‌شود. بسیار عجیب است زیرا الگوی راه‌راه مختص زمانی است که امواج تداخل می‌کنند، اما در اینجا با فرستادن الکترون‌ها به‌صورت تک‌تک، دوباره با همان الگو مواجه شدیم.

آزمایش ذهنی خوبی است که تلاشی برای تصور این مسئله کنید که چطور با فرستادن ذره به ذره یک‌چیز از میان شکاف‌ها، می‌توان الگوی تداخلی ساخت. از این بابت تمرین خوبی است چون بی‌فایده است؛ پس از چند ساعت تلاش و تقلای فکری شما خواهید فهمید که نمی‌توانید الگوی راه‌راه به دست آورید. آن ذراتی که به صفحه می‌خورند، هر چه که هستند رفتار "متداول" ندارند. مثل این است که الکترون‌ها باهم تداخل دارند. حال چالش پیش روی ما این است که نظریه‌ای برای تشریح این اتفاق ارائه دهیم.

آخرین قسمت این داستان جالب است و چالش فکری‌ای را نشان می‌دهد که پس از مطرح‌شدن آزمایش دو شکاف ایجاد

شد. جورج پجت تامسون پسر جی.جی.تامسون[۱] بود که خود او در سال ۱۸۹۹ به خاطر کشف الکترون جایزه نوبل دریافت کرد. تامسون [پدر] نشان داد که الکترون ذره ایست که بار الکتریکی خاص و جرم خاصی دارد. ذره‌ای نقطه مانند از ماده. پسر او ۴۰ سال بعد نشان داد که الکترون آن‌گونه که پدرش انتظار داشت رفتار نمی‌کند. تامسون بزرگ اشتباه نمی‌کرد؛ الکترون جرم و بار الکتریکی مشخصی دارد و زمانی که یکی از آن‌ها را می‌بینیم، خود را به‌صورت نقطه‌ای از ماده نشان می‌دهد. اما همان‌طور که دیویسون، جرمر و تامسون کوچک کشف کردند، رفتاری مانند یک ذره معمولی از خود نشان نمی‌دهد. مهم‌تر از آن این ذره رفتار کاملاً مشابه با موج نیز

[۱] . J.J.Thomson

ندارد، زیرا این الگو از زوال آرام انرژی نیز ساخته نشده است [منظور دفع قله‌ها و دره‌های موج توسط هم]؛ در عوض از تعداد ذره‌های کوچک زیادی ساخته شده است. ما همواره الکترون‌های نقطه مانند تامسون بزرگ را خواهیم دید.

احتمالاً تا الآن فهمیده‌اید که نیازمندیم تا خود را درگیر روش فکری هایزنبرگ کنیم. چیزهایی که ما می‌بینیم ذرات هستند، پس بهتر است نظریه‌ای برای ذرات بسازیم. نظریه ما همچنین باید بتواند الگوی تداخلی ناشی از عبور دانه به دانه الکترون‌ها از میان شکاف‌ها و برخوردشان با صفحه را پیش‌بینی کند. جزئیات چگونگی حرکت الکترون‌ها از منبع به سمت شکاف‌ها و [ازآنجا] به سمت صفحه، چیزی نیست که ما بتوانیم مشاهده کنیم، پس نباید آن را شبیه به تجربه‌ای در

زندگی روزمره بدانیم. در حقیقت "سفر" الکترون‌ها چیزی نیست که اصلاً نیازی به صحبت درباره آن داشته باشیم. کاری که ما باید بکنیم یافتن نظریه ایست که بتواند الگوی تشکیل‌شده از برخورد الکترون‌ها به صفحه در آزمایش دو شکاف را پیش‌بینی کند. این چیزی است که ما در فصل آینده انجام خواهیم داد.

مبادا فکر کنید که این اتفاق صرفاً واقعه جالبی است که در دنیای کوچک‌مقیاس اتفاق می‌افتد و ارتباط کمی به دنیای بزرگ‌مقیاس دارد. باید بگوییم نظریه کوانتوم ذرات که ما برای توضیح آزمایش دو شکاف ساخته‌ایم، می‌تواند پایداری اتم‌ها، رنگ ساطع‌شده از عناصر مختلف، واپاشی رادیواکتیو و بسیاری از معماهای بزرگی که در اوایل قرن بیستم دانشمندان را

سردرگم کرده بود را تشریح کند. این واقعیت که ساختار ما می‌تواند رفتار الکترون‌هایی که داخل مواد محبوس شده‌اند را توضیح دهد همچنین به ما این امکان را می‌دهد که عملکرد احتمالاً مهم‌ترین اختراع قرن بیستم را نیز بفهمیم: ترانزیستور.

در آخرین بخش این کتاب، یکی از کاربردهای تکان‌دهنده نظریه کوانتوم را خواهیم دید که به زیبایی هرچه‌تمام‌تر قدرت تحلیل‌های منطقی علم را نشان می‌دهد. عجیب‌ترین پیش‌بینی‌های نظریه کوانتوم معمولاً خود را در رفتار اجسام ریز نشان می‌دهند. اما ازآنجایی‌که اجسام بزرگ خود از اجسام کوچک‌تر تشکیل شده‌اند، شرایط خاصی وجود دارد که در آن ما برای توضیح بعضی مشخصات برخی از سنگین‌ترین اجسام

جهان مجبوریم به نظریه کوانتوم متوسل شویم. منظورمان ستارگان هستند. خورشید ما در نبردی دائمی با گرانش قرار دارد. این توپ گازی که ۳۳۳۰۰۰ بار سنگین‌تر از سیاره ماست، در سطح خود گرانشی ۲۸ بار بزرگ‌تر از سطح زمین دارد که قابلیت خوبی را برای فروپاشی‌اش به درون خود فراهم می‌کند. این فروپاشی توسط فشار به سمت بیرون ناشی از گداخت هسته‌ای مقابله می‌شود؛ این گداخت در هسته خورشید اتفاق می‌افتد که در هر ثانیه ۶۰۰ میلیون تن هیدروژن تبدیل به هلیوم می‌شود. گرچه خورشید ما بزرگ است، سوختنش با چنین سرعت بالایی عواقبی را نیز به دنبال دارد و روزی منبع سوخت خورشید تمام می‌شود. در آن زمان فشار رو به بیرون متوقف شده و نیروی گرانش فشار به داخل

خود را بدون مانع می‌یابد. ظاهراً چیزی در طبیعت نمی‌تواند جلوی این فروپاشی وحشتناک را بگیرد.

در واقعیت، فیزیک کوانتومی وارد کار شده و راه نجات را نشان می‌دهد. ستارگانی که توسط این اثرات کوانتومی نجات یافته‌اند، کوتوله‌های سفید[۱] نامیده می‌شوند و سرنوشت خورشید ما نیز یکی از همین‌هاست. در پایان این کتاب ما دانش مکانیک کوانتومی‌مان را به کار گرفته و بیشترین جرم یک ستاره کوتوله سفید را محاسبه خواهیم کرد. این محاسبه اولین بار در سال ۱۹۳۰ توسط اخترفیزیکدان هندی سابرامانیان چاندراسخار[۲] انجام شده است و این عدد ۱/۴ برابر

[۱]. White Dwarves

[۲]. Subrahmanyan Chandrasekhar

جرم خورشید به دست آمده است. بسیار جالب است که این عدد تنها با محاسبه جرم یک پروتون و مقادیر سه ثابت طبیعت که با آن‌ها آشنا شدیم به دست می‌آید: ثابت گرانشی نیوتون، سرعت نور و ثابت پلانک.

ظهور و توسعه نظریه کوانتوم و اندازه‌گیری این چهار عدد بدون حتی نگاه کردن به ستاره‌ها قابل‌محاسبه است. می‌توان یک تمدن بخصوص انزواطلب را تصور کرد که خود را در غارهای تاریک زیر سطح سیاره خودشان محبوس کرده‌اند. آن‌ها هیچ تصوری از آسمان ندارند، اما به نظریه کوانتوم دست یافته‌اند. محض تفریح، آن‌ها دست به محاسبه بیشترین جرم یک توپ گازی می‌کنند. حال تصور کنید روزی یک کاشف دلیر، ریسک می‌کند و برای اولین بار به بالای سطح می‌آید و

با حیرت به آسمان بالای سرش خیره می‌شود: آسمانی پر از نور؛ کهکشانی از صدها میلیارد ستاره که از افق تا افق کشیده شده‌اند. همانند ما که بر روی زمین قرار داریم، این کاشف نیز خواهد فهمید که از میان بسیاری از ستارگان مرده تاریک باقی‌مانده، هیچ‌کدام جرمی بالاتر از حد چاندراسخار ندارند.

فصل سوم

ذره چیست؟

روش ما در نظریه کوانتوم بر مبنای کار ریچارد فاینمن قرار دارد. وی یک طبل‌زن نیویورکی و برنده جایزه نوبل بود که با توجه به توصیفات دوست و همکارش فریمن دایسون[1] " نصف نابغه و نصف لوده (آدم بذله‌گو) بود". دایسون بعدها نظرش را عوض کرد: فاینمن را می‌توان دقیق‌تر توصیف کرد: "او یک نابغه تمام‌عیار و یک لوده تمام‌عیار بود". ما روش او را در این

[1] . Freeman Dyson

کتاب پیگیری خواهیم کرد، زیرا جالب است و احتمالاً ساده‌ترین راه برای شناخت جهان کوانتومی‌مان است.

ریچارد فاینمن علاوه بر اینکه مسئول ساده‌ترین فرمول‌بندی مکانیک کوانتومی است، معلم فوق‌العاده‌ای هم بود و می‌توانست عمیق‌ترین مفاهیم فیزیکی مدنظرش را در یک مقاله یا سخنرانی، کاملاً واضح و بدون هیچ نقصی بیاورد. روش کار او برای کسانی که دوست دارند فیزیک را پیچیده‌تر از چیزی که نیاز است کنند، اهانت‌آمیز است. حتی در ابتدای مجموعه نوشته‌های فیزیک‌اش برای دانشجویان لیسانس، "گفتارهای فاینمن در باب فیزیک[1]" او نیاز دید تا درباره

[1] . The Feynman Lectures on Physics

ماهیت غیرعادی مکانیک کوانتومی صادقانه صحبت کند. فاینمن نوشته بود "ذرات زیراتمی مانند امواج رفتار نمی‌کنند، مانند ذرات نیز رفتار نمی‌کنند و نه مانند ابرها یا توپ‌های بیلیارد یا جرم روی فنر؛ مانند هیچ‌چیزی که تابه‌حال دیده‌اید نیستند" بیایید تا مدلی بسازیم و رفتار دقیق آن‌ها را بررسی کنیم.

به‌عنوان نقطه شروع ما فرض خواهیم کرد که کوچک‌ترین عناصر سازنده طبیعت، به‌صورت ذره هستند. این مسئله نه‌تنها با آزمایش دو شکاف تأیید شده است که در آن الکترون‌ها به نقاط خاصی از صفحه می‌رسند، بلکه بسیاری از آزمایشات

دیگر نیز این را می‌پذیرند. در حقیقت "فیزیک ذرات[1]" بی‌دلیل نام‌گذاری نشده. سؤالی که باید پاسخ داده شود این است که: ذرات چگونه حرکت می‌کنند؟ البته ساده‌ترین فرض این است که آن‌ها در خطوط مستقیم حرکت می‌کنند یا مثلاً وقتی‌که به آن‌ها نیرو وارد شود در خطوط منحنی که توسط نیوتون بر آن‌ها تحمیل شده است. اما هیچ‌کدام از این‌ها درست نیستند، زیرا آزمایش دو شکاف را هرطور که بخواهیم توجیه کنیم، نیاز داریم تا "تداخل الکترون‌ها با خودشان" حین عبور از شکاف‌ها را در نظر بگیریم و در چنین حالتی آن‌ها باید گسترش پیدا کنند. پس چالش اصلی این است: نظریه‌ای بسازیم که در آن ذرات نقطه‌ای بتوانند گسترش پیدا

[1] . Particle Physics

کنند. این مطلب آن‌قدرها هم که به نظر می‌آید پیچیده نیست: اگر ما اجازه دهیم تا یک ذره ***در یک لحظه در چند مکان قرار داشته باشد***، می‌توانیم این نظریه را بسازیم. مسلماً این قضیه هنوز هم غیرممکن به نظر می‌رسد، اما این موضوع که یک ذره همزمان باید در چند مکان حضور داشته باشد واقعاً گزاره درستی است، گرچه احمقانه به نظر می‌رسد. از این به بعد، ما به این ذرات غیرعادیِ نقطه مانند که گسترش می‌یابند، ذرات کوانتومی می‌گوییم.

با این پیشنهاد که "یک ذره می‌تواند همزمان در چند مکان باشد"، ما از تجربیات روزمره‌مان دوری گزیده و وارد محدوده‌های ناشناخته می‌شویم. یکی از موانع بزرگی که بر

سر توسعه و فهم نظریه کوانتوم وجود دارد، سردرگمی‌ای است که پس از چنین تفکراتی ایجاد می‌شود. برای جلوگیری از این سردرگمی ما باید از هایزنبرگ پیروی کرده و یاد بگیریم که با دیدگاه‌هایی از جهان که با تجربیات ملموس ما در تضاد است کنار بیاییم."کنار آمدن" را با "سردرگم ماندن" یکی نگیرید، زیرا بسیاری از دانشجویان فیزیک کوانتوم همواره در تلاش‌اند تا برای فهم اتفاقات کوانتومی، با استفاده از اتفاقات روزمره خود را توجیه کنند. مقاومت در برابر ایده‌های جدید است که باعث این سردرگمی می‌شود، نه دشواری ذاتی خود این ایده‌ها، زیرا جهان واقعی شبیه به چیزی که روزانه می‌بینیم رفتار نمی‌کند. پس ما باید چشممان را باز کرده و در مواجهه با این اتفاقات عجیب، مضطرب نشویم. شکسپیر از زبان هملت

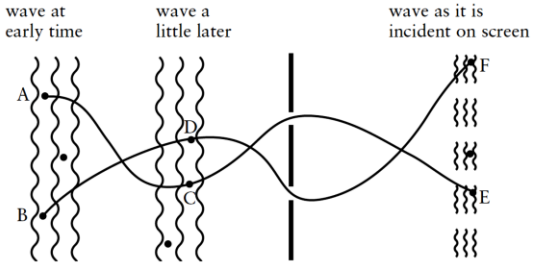
به‌درستی بیان می‌کرد که "و بنابراین یک غریبه به آن خوشامد می‌گوید. هوراتیو، چیزهای زیادی در زمین و بهشت وجود دارند که فراتر از رویاهای فلسفی توست".

یک راه خوب برای شروع این است که ما درباره آزمایش دو شکاف که بر روی امواج آب انجام شده به‌دقت فکر کنیم. هدف ما این است که بفهمیم چه خاصیتی در موج‌هاست که باعث الگوی تداخلی[1] می‌شود. سپس باید مطمئن شویم که نظریه‌مان درباره ذرات کوانتومی این رفتار را در خود دارد و ما این شانس را داریم که آزمایش دو شکاف را در مورد الکترون‌ها نیز توضیح دهیم.

[1] . Interference Pattern

دو دلیل وجود دارد که عبور امواج از این دو شکاف باعث تداخلشان می‌شود. اولین دلیل این است که موج [اولیه] ***همزمان از دو شکاف عبور می‌کند*** که باعث می‌شود دو موج جدید شروع به حرکت کرده و باهم اختلاط یابند. واضح است که یک موج توانایی چنین رفتاری دارد. ما مشکلی در تصور کردن یک موج دراز در اقیانوس را نداریم که به سمت خشکی آمده و به ساحل برخورد می‌کند. این یک دیواری از آب است؛ یعنی یک چیز گسترده در حال حرکت. بنابراین ما باید ببینیم که چگونه می‌توان ذره کوانتومی‌مان را به‌عنوان "چیز گسترده در حال حرکت" در نظر گرفت. دلیل دوم این است که دو موج تولیدشده در شکاف‌ها توانایی جمع شدن باهم یا خنثی شدن توسط هم را حین اختلاطشان دارند. این

توانایی تداخل دو موج، کاملاً می‌تواند الگوی تداخلی را توضیح دهد. حالت خاصش زمانی است که قله یکی از موج‌ها با دره موج دیگر به هم برسند که در این حالت کاملاً همدیگر را خنثی می‌کنند. پس ما لازم داریم که ذره کوانتومی‌مان بتواند به‌نوعی با خود تداخل داشته باشد. آزمایش دو شکاف رفتار الکترون‌ها و رفتار امواج را به هم پیوند می‌دهد، پس بیایید ببینیم این پیوند را تا کجا می‌توانیم ادامه دهیم. به شکل ۱-۳ نگاهی بی‌اندازید و یک‌لحظه به خطوطی که A را به E و B را به F وصل کردند و امواج را متمرکز کردند، توجه نکنید.



شکل ۱-۳: چگونه موجی که یک الکترون را توضیح می‌دهد، از منبع به سمت صفحه پشتی می‌رود و چگونه می‌تواند تمامی مسیرهایی که الکترون در آن‌ها حرکت می‌کند را تفسیر کند. مسیرهای A به C به E و B به D به F، دو تا از بینهایت مسیرهای ممکن که یک الکترون می‌تواند بپیماید را نشان می‌دهد.

در آن صورت این شکل می‌تواند تانکر آبی را نشان دهد که خطوط موجی که در آن از چپ به راست قرار دارند بیانگر حرکت موج آب در طول تانکرند. فرض کنید در لحظه‌ای که

تخته چوب به سمت چپ تانکر ضربه وارد می‌کند و موج تولید می‌کند، عکس بگیرید. این عکس موج جدیدی را نشان می‌دهد که از بالا به پایین در تصویر گسترده شده است. بقیه آب موجود در تانکر هنوز در حالت سکون قرار دارند. عکس دوم نشان خواهد داد که موج آب به سمت شکاف‌ها حرکت کرده‌اند و آب صافی را پشت سر خود باقی گذاشته‌اند. پس‌ازآن موج آب از جفت شکاف‌ها عبور کرده و الگوی تداخلی راه‌راهی را که در قسمت راست تصویر نشان داده شده است، تشکیل می‌دهد. حال بیایید پاراگراف آخر را دوباره بخوانیم اما این بار به‌جای "موج آب" از "موج الکترونی[1]" استفاده کنیم و ببینیم معنی‌اش چه می‌شود. اگر یک موج

[1] . Electron Wave

الکترونی را به‌طور مناسبی تعریف کنیم، این قابلیت را خواهد داشت که همانند آزمایش امواج آب، الگوی راه‌راه را توضیح دهد. اما ما [همزمان] می‌خواهیم توضیح دهیم که چرا الگوی الکترون‌ها پس از برخورد به صفحه پشتی به‌صورت نقطه‌نقطه است. در نگاه اول، این مطلب در تضاد با موج ملایم به نظر می‌رسد، اما این‌طور نیست. قسمت هوشمندانه ماجرا این است که بدانیم برای ارائه یک توضیح می‌توان موج الکترون را نه به شکل یک آشفتگی مادی تفسیر کرد (که در مورد موج آب این‌گونه است)، بلکه به‌عنوان چیزی در نظر گرفت که به ما می‌گوید آن الکترون احتمالاً در کجا حضور دارد. دقت کنید که از لفظ "آن" الکترون استفاده کردیم، زیرا موج قرار است رفتار یک الکترون تنها را توضیح دهد – در این حالت

می‌توانیم علت بروز آن نقاط را توضیح دهیم. این یک موجِ الکترون [یا الکترون موج شکل] است، نه موجی از الکترون‌ها: هرگز نباید در دام تعریف دوم بی افتید. اگر ما عکسی از موج را در یک‌لحظه تصور کنیم، ما [آن عکس را] این‌گونه تفسیر خواهیم کرد که هرجا که مقدار موج بیشتر باشد، احتمال حضور آن الکترون در آنجا بیشتر است و هرجا که مقدار موج کمتر باشد، احتمال حضور آن الکترون نیز کمتر است. زمانی که نهایتاً موج خود را به صفحه پشتی می‌رساند، یک نقطه ظاهر می‌شود که محل آن الکترون را به ما نشان خواهد داد. تنها وظیفه موج الکترون این است که به ما امکان محاسبه احتمال برخورد الکترون در قسمت موردنظر از صفحه را می‌دهد. اگر ما درباره ماهیت واقعی موج الکترون مشکلی

نداشته باشیم، مشکل حل می‌شود، زیرا زمانی که [معادله] موج را بدانیم می‌توانیم احتمال حضور الکترون را در یک نقطه بگوییم. ماجرا وقتی جالب‌تر می‌شود که بفهمیم این پیشنهاد موج الکترون، چه نکاتی را در طی حرکت الکترون از شکاف به صفحه، به‌طور ضمنی در خود دارد.

قبل از انجام این کار، می‌ارزد که پاراگراف بالا را دوباره بخوانید زیرا بسیار مهم است. این مطلب مطلقاً نه برای ما از قبل آشکار بوده و نه به‌طور ذاتی آن را می‌دانستیم. پیشنهاد "موج الکترون" تمامی خصوصیات موردنیاز را برای توضیح الگوی تداخل که در آزمایشات دیده‌شده دارد، اما فقط در حد یک حدس است. به‌عنوان یک فیزیکدان خوب ما باید عواقب

این حدس را ببینیم و بررسی کنیم که آیا این عواقب با طبیعت همخوانی دارند یا نه.

با بازگشت به شکل ۱-۳ ما پیشنهاد دادیم که در هرلحظه، الکترون با یک موج مشخص می‌شود، همانند امواج آب. در لحظه اول موج الکترون در قسمت چپ شکاف‌ها قرار دارد. در لحظه‌ای بعد، موج به سمت شکاف‌ها پیش روی خواهد کرد، همان‌طور که امواج آب همین کار را کردند و پس‌ازآن الکترون جایی در موج جدید قرار خواهد گرفت. ما می‌گوییم که الکترون می‌تواند ابتدا در A بوده و سپس به C برسد، یا می‌تواند اول در B بوده و سپس در D باشد، یا مثلاً ابتدا در A بوده و بعد در D باشد و به همین ترتیب. این تفکر را برای لحظه‌ای در ذهن خود نگه‌دارید و به لحظه دیگری بی اندیشید

که موج از شکاف‌ها عبور کرده و به صفحه رسیده است. حال الکترون یا می‌تواند در E باشد یا در F. منحنی‌هایی که ما روی نمودار کشیده‌ایم دو مسیر ممکن که الکترون می‌تواند طی کند را نشان داده‌اند که از منبع شروع شده، از شکاف‌ها عبور کرده و به صفحه پشتی می‌رسند. این الکترون می‌تواند از A به C و به E بروند، یا از B به D و سپس به F برود. این‌ها تنها دو مسیر از بینهایت مسیر ممکن برای حرکت این الکترون هستند.

نکته حساس اینجاست که نباید بگوییم "الکترون می‌توانست در هرکدام از این مسیرها حرکت کند، اما در حقیقت از روی یکی از آن‌ها حرکت کرده است". اگر بگوییم الکترون از روی فقط یکی از این مسیرها حرکت کرده، دیگر

امکان توضیح الگوی تداخلی را نداریم و مثل این می‌ماند که در مثال امواج آب، یکی از شکاف‌ها را بسته باشیم. ما نیازمندیم که اجازه دهیم موج از هر دو شکاف بگذرد تا بتوانیم الگوی تداخلی به دست آوریم و این یعنی ما باید اجازه دهیم الکترون از تمامی مسیرهای ممکنش از منبع تا صفحه را حرکت کند. به‌عبارت‌دیگر، وقتی می‌گوییم الکترون "در جایی از موج قرار دارد" منظور واقعی ما این است که الکترون همزمان در همه جای موج قرار دارد. ما باید به همین طریق فکر کنیم، زیرا اگر تصورمان این باشد که الکترون دقیقاً در جای خاصی قرار دارد، دیگر موجی برای انتشار وجود نداشته و ما تشبیه موج آب را از دست خواهیم داد و نهایتاً نخواهیم توانست الگوی تداخلی را توضیح دهیم.

می‌ارزد که استدلال بالا را دوباره بخوانید، زیرا پایه‌ای برای اکثر بحث‌های آتی ماست. هیچ‌گونه تردستی‌ای انجام ندادیم: چیزی که می‌گوییم این است که ما نیازمندیم تا موجی گسترش‌یافته را تعریف کنیم که همزمان الکترونی نقطه‌ای است و یکی از روش‌های رسیدن به این هدف این است که بگوییم الکترون تمامی مسیرهای بین منبع و صفحه را همزمان طی می‌کند.

این یعنی ما باید موج الکترون را طوری تفسیر کنیم که انگار یک الکترون از منبع به صفحه بینهایت مسیر را طی می‌کند. به‌بیان‌دیگر پاسخ صحیح به این سؤال که "الکترون چگونه خود را به صفحه رساند" این است که " آن [الکترون] تمامی بینهایت مسیر ممکن را طی کرد که بعضی از آن‌ها از

شکاف بالا رد شده و بعضی‌شان از شکاف پایین عبور کرده‌اند". مسلماً "آن" که به الکترون اشاره دارد، ذره‌ای معمولی و روزمره نیست. به همین دلیل نام این ذره‌ها را ذره کوانتومی گذاشتیم.

با این تصمیم که برای الکترون‌ها توضیحی یافتیم که از بسیاری از جهات رفتار موجی دارند، ما باید روش دقیق‌تری را برای صحبت راجع به امواج به کار بریم. ما با این توضیح شروع می‌کنیم که زمانی که در داخل تانکر آب دو موج به هم می‌رسند، اختلاط یافته و تداخل می‌کنند چه اتفاقی می‌افتد. برای این کار باید روش مناسبی را برای نشان دادن مکان قله‌ها و دره‌های هرکدام از موج‌ها بیابیم. در متون فنی این‌ها

فاز[۱] نام دارند. اصطلاحاً دو چیز هم‌فاز[۲] نامیده می‌شوند، اگر به‌نوعی همدیگر را تقویت کنند و ناهم‌فاز[۳] نامیده می‌شوند، اگر همدیگر را خنثی کنند. این واژه همچنین برای توضیح ماه نیز استفاده می‌شود: در طول هر ۲۸ روز، ماه از حالت هلال به بَدر رفته و دوباره بازمی‌گردد. ریشه واژه "فاز" به واژه یونانی "فازیس" برمی‌گردد که به معنی ظاهر شدن و از بین رفتن یک پدیده نجومی است و ظهور و غیب شدن سطح روشن ماه باعث شد تا در قرن بیستم به‌عنوان مثالی از یک اتفاق دوره‌ای از آن استفاده شود. این سرنخی است از اینکه ما چگونه

---

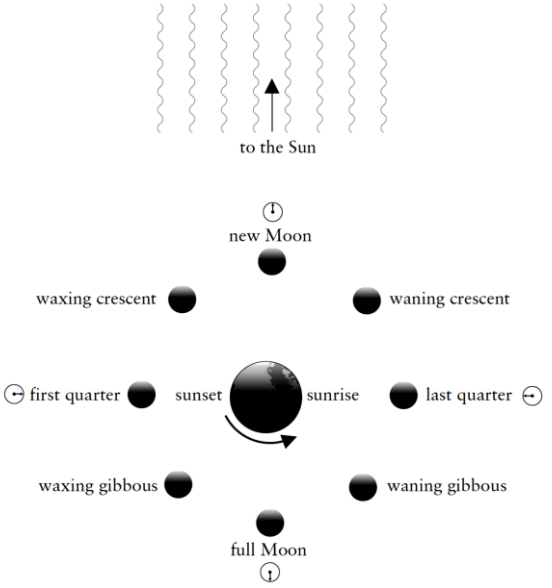
۱. Phase

۲. In Phase

۳. Out of Phase

می‌توانیم نمایشی از موقعیت‌های قله و دره امواج آب را تصور کنیم.

به شکل ۲-۳ نگاه کنید. یکی از روش‌های نمایش فاز با استفاده از صفحه ساعت با یک عقربه است که می‌چرخد. این سیستم به ما امکان نمایش ۳۶۰ درجه از احتمالات را به‌طور تصویری می‌دهد: عقربه ساعت می‌تواند بر روی ۱۲، ۳، ۹ یا هر عددی مابین این‌ها باشد. در مورد ماه، شما می‌توانید هلال ماه را معادل ساعت ۱۲ در نظر بگیرید، هلال رشد کرده را معادل با ۱:۳۰، ربع اول را معادل ۳ (زمانی که نیمی از ماه روشن است)، حالت برآمده را ساعت ۴:۳۰ و ماه کامل را ساعت ۶.



شکل ۲-۳: فازهای ماه

کاری که ما انجام دادیم این بود که برای توضیح چیز واقعی از یک چیز انتزاعی (مفهومی) استفاده کردیم؛ استفاده از صفحه ساعت برای توصیف فازهای ماه. در این روش، شما می‌توانید ساعتی رسم کنید که عقربه‌اش عدد ۱۲ را نشان دهد و سریعاً بفهمید که این ساعت نشان‌دهنده ماه هلال است. گرچه ما اشاره نکردیم، شما خودتان خواهید دانست که ساعت ۵ یعنی ماه دارد به قرص کاملش نزدیک می‌شود. استفاده از نمادها یا تصاویر انتزاعی برای نمایش چیزهای واقعی، یکی از اصول بنیادی فیزیک است – به همین دلیل است که فیزیکدانان از ریاضیات استفاده می‌کنند. قدرت این روش زمانی خود را نشان می‌دهد که تصاویر انتزاعی بتوانند با استفاده از قوانینی ساده، بازی داده شوند و پیش‌بینی‌هایی

درباره دنیای واقعی انجام دهند. همان‌طور که اندکی بعد خواهیم دید، ساعت‌ها به ما اجازه می‌دهند چنین کاری کنیم، زیرا آن‌ها می‌توانند موقعیت نسبی قله‌ها و دره‌های امواج را ثبت کنند. درنتیجه این امکان را خواهیم داشت که محاسبه کنیم که آیا امواج در حین برخورد همدیگر را خنثی کرده یا تقویت می‌کنند.

شکل ۳-۳ تصویری از دو موج را در یک‌لحظه نشان می‌دهد. بیایید حداکثرهای (قله‌های) امواج را با ساعت ۱۲ و حداقل‌ها (دره‌ها) را با ساعت ۶ نشان دهیم. همچنین می‌توانیم نقاط مابین حداقل و حداکثرها را با ساعت‌های مابین ۱۲ و ۶ نشان دهیم، همان‌طور که برای حالات بین هلال و بدر ماه این کار

را کردیم. فاصله بین دو قله یا دو دره متوالی در یک موج عدد مهمی است؛ به آن طول‌موج[1] می‌گویند.

دو موج شکل ۳-۳ در حالت ناهم‌فاز قرار دارند؛ یعنی قله‌های موج بالا با دره‌های موج پایین هم‌راستا هستند و برعکس. نتیجه این می‌شود که در صورت جمع این دو موج، کاملاً همدیگر را خنثی می‌کنند. این حالت در پایین شکل نشان داده شده است که "موج" به‌صورت یک خط درآمده است. به زبان ساعت‌ها، تمامی ساعت‌های ۱۲ موج بالایی که نشان از قله موج است، با ساعت‌های ۶ موج پایینی که دره موج را نشان می‌دهد، همزمان شده‌اند. در حقیقت هرکجا که

[1] . Wave Lenght

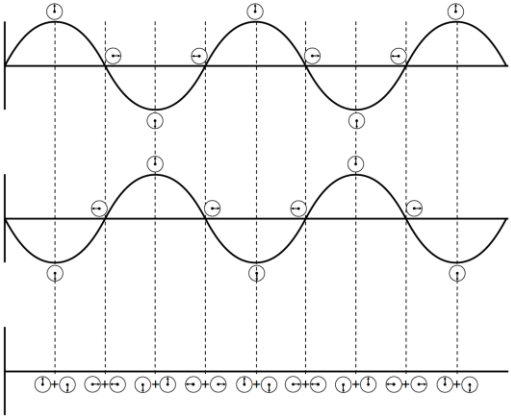
بنگرید ساعت موج بالایی جهت معکوسی با ساعت موج پایینی دارد.

استفاده از ساعت‌ها برای توضیح امواج در این قسمت ظاهراً مسئله را پیچیده‌تر می‌کند. مسلماً اگر ما بخواهیم دو موج را باهم جمع کنیم، تمام کاری که باید بکنیم این است که ارتفاع هر قسمت را با قسمت متناظرش جمع بزنیم و مطلقاً نیاز به ساعت نداریم. این قضیه برای امواج آب دقیقاً درست است، اما کار ما اشتباه نبود، زیرا ساعت‌ها را برای دلیل بسیار خوبی معرفی کردیم. ما به‌زودی کشف خواهیم کرد که زمانی که به توصیف ذرات کوانتومی خواهیم پرداخت، انعطاف زیادی که ساعت‌ها در اختیار ما قرار می‌دهند شدیداً به کار ما خواهد آمد.

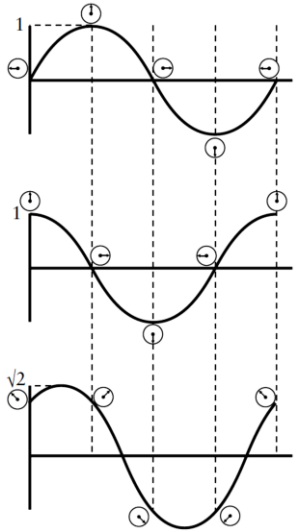
با دانستن این مطلب، حال اندک زمانی را برای طراحی یک روش دقیق برای جمع ساعت‌ها اختصاص می‌دهیم. در مورد شکل ۳-۳ این قانون باید باعث شود تا ساعت‌ها همدیگر را خنثی کرده و چیزی باقی نگذارند: ساعت ۱۲، ساعت ۶ را از بین برده، ۳، ۹ را و به همین ترتیب. البته این خنثی‌سازی کامل برای حالت خاصی است که امواج نیز به‌طور کامل ناهم‌فاز باشند. بیایید به دنبال قانون جامع‌تری برای جمع‌کردن بگردیم تا برای هر دو موجی با هر مقدار ناهم‌فازی و شکلی جوابگو باشد.

شکل ۴-۳ دو موج دیگر را نشان می‌دهد که به شکل دیگری کنار هم قرار گرفته‌اند که یکی اندکی بیشتر از دیگری پیش‌روی دارد. ما دوباره قله‌ها و دره‌ها و نقاط میانی را با

ساعت‌ها برچسب‌گذاری کرده‌ایم. حال ساعتی که در موج بالایی عدد ۱۲ را نشان می‌دهد، با ساعتی از موج پایین که عدد ۳ را نشان می‌دهد، هم‌ردیف هستند.



شکل ۳-۳: دو موج که طوری قرار گرفته‌اند که کاملاً همدیگر را خنثی می‌کنند. موج بالا نسبت به موج پایین ناهم‌فاز است؛ یعنی قله‌های یکی با دره‌های دیگری هم زمان شده‌اند. زمانی که دو موج را باهم جمع کنیم هم دیگر را خنثی کرده و چیزی باقی نمی‌گذارند – در پایین صفر خط صاف برابر با حاصل جمع دو موج است.



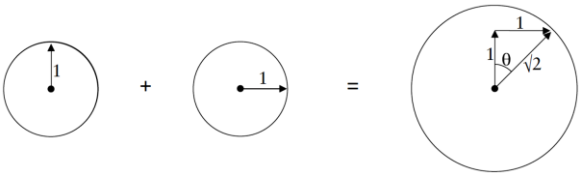
شکل ۴-۳: دو موج که نسبت به هم جابجایی دارند. موج سوم از جمع دو موج بالا ساخته شده است.

ما قانونی را خواهیم ساخت که این دو ساعت را باهم جمع بزند. قانون این است که عقربه دو ساعت را گرفته و سر یکی را به ته دیگری وصل می‌کنیم. در ادامه با کشیدن خطی که دو عقربه را به هم وصل می‌کند، مثلث را تکمیل می‌کنیم. ما این قانون را در شکل ۵-۳ نشان داده‌ایم. عقربه جدید طولی متفاوت از دو عقربه قبلی خواهد داشت و در جهت‌گیری‌اش نیز متفاوت خواهد بود؛ این یک ساعت جدید است که جمع دو ساعت قبلی را نشان می‌دهد.

حال ما می‌توانیم دقیق‌تر شده و با استفاده از مثلثات ساده اثرات جمع هر جفت ساعتی را محاسبه کنیم. در شکل ۵-۳ ما ساعت ۱۲ را با ساعت ۳ جمع کرده‌ایم. فرض کنیم طول عقربه ساعت‌های اولیه ۱ cm باشد (مثل‌اینکه ارتفاع قله امواج

آب ۱ cm باشد). زمانی که ما عقربه‌ها را از سر به ته به هم وصل می‌کنیم، ما مثلث قائم‌الزاویه‌ای به دست خواهیم آورد که دو ضلع قائم آن ۱ cm هستند. طول عقربه ساعت جدید برابر با ضلع سوم مثلث خواهد بود: قضیه فیثاغورث می‌گوید مجذور وتر برابر با جمع مجذور دو ضلع دیگر است: $h^۲=x^۲+y^۲$. در صورت عددگذاری: $h^۲=۱^۲+۱^۲=۲$. پس طول عقربه ساعت جدید برابر با جذر ۲ می‌شود که تقریباً برابر است با ۱/۴۱۴ cm. جهت عقربه جدید به چه سمتی خواهد بود؟ برای این ما باید زاویه θ که در شکل نشان داده شده است را بدانیم. برای حالت خاص دو ضلع با طول برابر که یکی ۱۲ را نشان داده و دیگری ۳ را، شما احتمالاً بدون دانستن مثلثات نیز جواب را می‌دانید. به‌وضوح وتر زاویه ۴۵ درجه را به خود

خواهد گرفت، پس ساعت جدید در وسط ساعت‌های ۱۲ و ۳ قرار خواهد گرفت، یعنی ۱:۳۰. البته این مثال خاص است. ما ساعت‌هایی را انتخاب کردیم که طول عقربه‌هایشان باهم برابر بوده و باهم زاویه قائمه می‌ساختند تا محاسبات ریاضی را ساده‌تر کنیم. اما مشخص است که می‌توان طول عقربه و زمان حاصل از جمع هر دو ساعت دلخواهی را به دست آورد.



شکل ۵-۳: قانون جمع ساعت‌ها

حال دوباره به شکل ۴-۳ نگاه کنید. در هر نقطه‌ای از موج جدید، ما می‌توانیم ارتفاع موج را با توجه به قانونی که الآن گفتیم با جمع‌کردن ساعت‌ها به دست آوریم و بپرسیم که عقربه جدید به چه میزان در جهت ساعت ۱۲ قرار دارد. زمانی که ساعت عدد ۱۲ را نشان دهد مطلب واضح است – طول‌موج برابر با طول عقربه ساعت است. مشابه با آن در ساعت ۶ نیز همین قضیه برقرار است، زیرا این موج دره‌ای دارد که عمقش برابر با طول عقربه است. همچنین کاملاً واضح است که زمانی که ساعت عدد ۳ (یا ۹) را نشان می‌دهد ارتفاع موج صفر می‌شود، زیرا عقربه ساعت نسبت به راستای ساعت ۱۲ زاویه قائمه دارد. برای محاسبه ارتفاع موج که توسط ساعت مشخصی توصیف شده است، ما باید طول عقربه، h، را

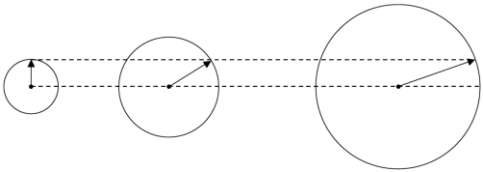
در کسینوس زاویه‌ای که عقربه با راستای ساعت ۱۲ می‌سازد، ضرب کنیم. برای مثال ساعت ۳ با ساعت ۱۲ زاویه ۹۰ درجه دارد که کسینوسش صفر می‌شود و این یعنی ارتفاع موج صفر است. به‌طور مشابه ساعت یک و نیم، زاویه‌اش ۴۵ درجه است که کسینوسش تقریباً برابر با ۰/۷۰۷ است و ارتفاع موج برابر با ۰/۷۰۷ ضرب‌در طول عقربه ساعت می‌شود. (دقت کنید که ۱/۷۰۷ همان $\frac{۱}{\sqrt{۲}}$ است). اگر اطلاعات مثلثاتی شما در حد چند خط بالا نیست، از آن گفته‌ها چشم‌پوشی کنید. قسمت مهم گفته‌های ما قانونی بود که مطرح کردیم که با داشتن طول عقربه ساعت و راستای آن، می‌توانیم ارتفاع موج را حساب کنیم – و حتی اگر شما با مثلثات آشنایی نداشته

باشید، شما می‌توانید با رسم دقیق عقربه‌های ساعت و انداختن تصویر عقربه ساعت بر روی راستای ساعت ۱۲ با استفاده از یک خط کش، اعداد موردنظر را به دست آورید. (ما دوست داریم برای هر دانش‌آموزی که این کتاب را می‌خواند روشن کنیم که این روش آخر را توصیه نمی‌کنیم: فهمیدن سینوس و کسینوس، کار را بسیار ساده می‌کنند.)

این قانون جمع ساعات است که به‌خوبی کار می‌کند و در پایین سه تصویر شکل ۴-۳ نشان داده شده است که ما به‌طور مکرر این قانون را برای نقاط مختلف امواج اعمال کردیم.

در این توصیف امواج آب، مهم‌ترین چیز تصویر "زمان" بر روی ساعت ۱۲ است که بیانگر عدد خاصی است: ارتفاع موج.

به همین دلیل استفاده از ساعت‌ها برای توصیف امواج آب، واقعاً ضروری نیست. نگاهی به سه ساعت نشان داده‌شده در شکل ۶-۳ بی اندازید: تمامی این‌ها، مربوط به ارتفاع موج یکسانی هستند و هرکدامشان روش مشابهی برای نمایش یک ارتفاع موج است. اما مشخصاً خود این ساعت‌ها متفاوت‌اند و همان‌طور که خواهیم دید، زمانی که هدف ما توصیف ذرات کوانتومی باشد، این تفاوت‌ها اهمیت دارد، زیرا برای این ذرات، طول عقربه ساعت (یا به‌عبارت‌دیگر اندازه ساعت)، تفسیر مهمی دارد.



شکل ۶-۳: سه ساعت متفاوت که تصویر برابری در راستای ساعت ۱۲ دارند.

در بعضی جاهای این کتاب و مخصوصاً همین‌جا، توضیحات ما انتزاعی (ذهنی) اند. برای اینکه ما نوع ابهاممان را از حالت تسلیم‌کننده به گیج‌کننده تقلیل دهیم، ما باید همواره تصویر بزرگ‌تر را به خاطر داشته باشیم. نتایج آزمایشگاهی دیویدسون، جرمر و تامسون و شباهت این نتایج به رفتار امواج آب، باعث شد که ما دست به گمانه‌زنی کنیم: ما باید یک ذره را به‌صورت یک موج نمایش دهیم و خود این موج می‌تواند با

ساعت‌های زیادی نمایش داده شود. ما تصور می‌کنیم که موج الکترون مانند موج آب انتشار می‌یابد، اما جزئیاتش را مشخص نکردیم. حتی نگفتیم که موج آب چگونه انتشار می‌یابد. چیزی که در این لحظه مهم است این است که ما شباهت با امواج آب را فهمیدیم و همچنین این ایده را که الکترون را می‌توان در هرلحظه مانند امواج آبی که انتشار و تداخل می‌یابند، توصیف کرد. در فصل بعد ما بهتر از این عمل خواهیم کرد و درباره حرکت الکترون در طول زمان دقیق‌تر خواهیم شد. در طی انجام آن کار ما با مجموعه‌ای از یافته‌های ارزشمند ازجمله اصل معروف عدم قطعیت هایزنبرگ مواجه خواهیم شد.

قبل از پرداختن به آن بحث، می‌خواهیم زمان اندکی را به صحبت درباره ساعت‌هایی که پیشنهاد دادیم برای نمایش رفتار الکترون به کارمان می‌آیند، بپردازیم. گفتیم که این ساعت‌ها به‌هیچ‌وجه واقعی نیستند و عقربه ساعت شمار آن‌ها هیچ ارتباطی به زمان ندارد. این نحوه استفاده از مجموعه ساعت‌ها برای توصیف پدیده‌های فیزیکی آن‌قدرها که به نظر می‌رسد هم عجیب نیست. فیزیکدانان برای توصیف چیزهای زیادی در طبیعت، از این روش بهره می‌برند و تا اینجا دیدیم که چگونه می‌توان برای توصیف امواج آب این ساعت‌ها را به کار گرفت.

مثال دیگری از این نوع انتزاع؛ توصیف دما در یک اتاق است که می‌توان آن را با مجموعه‌ای از اعداد بیان کرد. این اعداد

نیز مانند ساعت‌های ما، هیچ‌گونه خاصیت فیزیکی‌ای ندارند. در عوض این مجموعه از اعداد و ارتباطشان با نقاط داخل اتاق، روش مناسبی برای بیان دماست. فیزیکدان‌ها نام "میدان[۱]" را برای این ساختار فیزیکی نهاده‌اند. میدان دما یک مجموعه ساده‌ای از اعداد است؛ هرکدام مختص یک نقطه. در مورد ذرات کوانتومی، میدان پیچیده‌تر می‌شود، زیرا به‌جای عدد، برای هر نقطه یک ساعت را اختصاص می‌دهیم. این میدان معمولاً با نام تابع موج[۲] آن میدان نامیده می‌شود. این واقعیت که ما برای توصیف تابع موج نیاز به مجموعه‌ای از ساعت‌ها داریم اما اعدادِ تنها برای توصیف میدان دمایی یا

---

۱. Field

۲. Wave Function

امواج آب کفایت می‌کنند، تفاوت مهمی است. در اصطلاحات فیزیکی، ما از ساعت‌ها استفاده می‌کنیم، چون تابع موج میدان "پیچیده" است، اما دما یا ارتفاع امواج آب، میدان‌های "واقعی" هستند. ما نیاز به این اصطلاحات نداریم، چون سروکارمان با خود ساعت‌هاست.[۱]

این‌که نمی‌توانیم برعکس میدان دمایی درک مستقیمی از تابع موج داشته باشیم، جای نگرانی ندارد، این که ما نتوانیم آن را لمسش کنیم، ببوییم یا مستقیماً ببینیم، مطلب مهمی

[۱] . برای کسانی که با ریاضیات آشنایی دارند، واژه ها را اینگونه جابجا کنید: "ساعت" را با "عدد مختلط"، "اندازه ساعت" را با "قدر مطلق (مدول) عدد مختلط" و "راستای عقربه ساعت" را با "فاز". قانون جمع ساعت ها چیزی فراتر از قانون جمع اعداد مختلط نیست

نیست. در حقیقت اگر ما درکمان از جهان را محدود به توضیح چیزهای قابل‌رؤیت با چشم غیرمسلح کنیم، فیزیک محل پیشرفت زیادی ندارد.

در بحثمان درباره آزمایش دو شکاف برای الکترون‌ها، گفتیم که موج الکترون جایی بزرگ‌ترین است که احتمال حضور الکترون در آن بیشترین باشد. این تفسیر به ما اجازه داد تا الگوی تداخلی که به‌صورت نقطه‌به‌نقطه حین رسیدن الکترون‌ها تشکیل می‌شود را بفهمیم. اما این گزاره دقیقی برای مقصود ما نیست. ما می‌خواهیم احتمال حضور الکترون در یک نقطه مشخص را بدانیم – می‌خواهیم عددی را به آن اختصاص دهیم. اینجاست که ساعت‌ها لازم می‌شوند، زیرا احتمالی که مدنظر ماست به‌سادگی ارتفاع موج نیست. کار

درست این است که مجذور طول عقربه ساعت را به‌عنوان احتمال یافت ذره تفسیر کنیم. به همین دلیل است که ما به انعطاف بیشتری که ساعت در اختیار ما می‌گذارد نیاز داریم. می‌دانیم تفسیری که الآن ارائه شد است اصلاً واضح نیست و ما نمی‌توانیم توضیح مناسبی را برای درست بودنش ارائه دهیم. در انتها درستی این حرف را خواهیم پذیرفت، زیرا پیش‌بینی‌هایی می‌کند که با نتایج تجربی همخوانی دارد. این تفسیر تابع موج یکی از آزاردهنده‌ترین مسائلی بود که پیشگامان نظریه کوانتوم با آن مواجه بودند.

تابع موج (که مجموعه ساعت‌های ماست) در طی مجموعه مقالاتی در سال ۱۹۲۶ توسط فیزیکدان استرالیایی اروین شرودینگر[1] وارد نظریه کوانتوم شد. مقاله ۲۱ ژوئن او معادله‌ای دارد که باید در ذهن هر دانشجوی فیزیکی حک شود. ذاتاً اسم این معادله نیز معادله شرودینگر است:

$$i\bar{h}\frac{\partial}{\partial x}\Psi = \hat{H}\Psi$$

علامت یونانی Ψ (که "سای" تلفظ می‌شود) نماینده معادله موج است و معادله شرودینگر تغییر این تابع را در طول زمان نشان می‌دهد. جزئیات این معادله در راستای هدف ما موردنیاز نیست، زیرا قصدمان در این کتاب دنبال کردن روش

[1] . Erwin Scchrodinger

شرودینگر نیست. قسمت شگفت‌انگیز این است که گرچه شرودینگر معادله درستی را برای تابع موج نوشت، او در ابتدا تفسیر اشتباهی از آن کرد. این ماکس بورن[1] – یکی از قدیمی‌ترین کسانی که بر روی نظریه کوانتوم کار می‌کرد – بود که در سال ۱۹۲۶ در سن ۴۳ سالگی تفسیر درستی را در مقاله‌ای دقیقاً ۴ روز پس از مقاله شرودینگر ارائه داد. ما سن او را ذکر کردیم زیرا نظریه کوانتوم در سال‌های میانی دهه ۱۹۲۰ نام مستعار Knabenphysik را گرفته بود یعنی "فیزیک پسرانه"، زیرا عمده پیشگامان این بحث جوان بودند. در سال ۱۹۲۵ هایزنبرگ ۲۳ سال داشت، ولفگانگ پاولی[2] که

[1] . Max Born
[2] . Wolfgang Pauli

با اصل طرد معروف او در ادامه کتاب آشنا خواهیم شد ۲۲ سال داشت. پاول دیراک[1]، فیزیکدان انگلیسی که اولین بار معادله درستی را برای توضیح الکترون نوشت نیز هم سن پاولی بود. عقیده بر این است که جوانی آن‌ها باعث شده بود که ذهنشان از تفکر به سبک قدیمی آزاد باشد و تصویر بنیادی جدیدی از جهان را که نظریه کوانتوم نشان می‌داد، در آغوش بگیرند. شرودینگر، در سن ۳۷ سالگی، در جمع آن‌ها مُسِن محسوب می‌شد و این مطلب واقعیت دارد که او هیچ‌گاه نتوانست با نظریه‌ای که خودش در توسعه آن نقش اساسی ایفا کرد، ارتباط خوبی برقرار کند.

[1] . Paul Dirac

تفسیر بنیادی بورن از تابع موج که به خاطر آن موفق به کسب جایزه نوبل فیزیک در سال ۱۹۵۴ شد، این بود که مجذور (مربع) طول عقربه ساعت در هر نقطه بیانگر احتمال یافت ذره‌ای در آنجاست. برای مثال اگر عقربه ساعت در نقطه‌ای، طولی برابر با ۰/۱ داشته باشد، مجذور آن می‌شود ۰/۰۱. این یعنی احتمال یافتن آن ذره در آن نقطه برابر با ۰/۰۱ است یعنی یک درصد. ممکن است بپرسید چرا بورن در همان ابتدا طول عقربه ساعت‌ها را به‌طور مجذور انتخاب نکرده بود تا مثلاً در نمونه‌ای که ذکر کردیم، عقربه ساعت به‌خودی‌خود طول ۰/۰۱ را داشته باشد. این روش جواب نمی‌دهد، زیرا برای محاسبه تداخل، ما نیازمندیم تا ساعت‌ها را باهم جمع بزنیم و جمع ۰/۰۱ و ۰/۰۱ (که می‌شود ۰/۰۲)

برابر با جمع ۰/۱ و ۰/۱ و مجذور کردن حاصل آن (که می‌شود ۰/۰۴) نیست.

ما می‌توانیم این ایده کلیدی در نظریه کوانتوم را با مثال دیگری نشان دهیم. تصور کنید در حال کار بر روی ذره‌ای هستید که با آرایه خاصی از ساعت‌ها تعریف‌شده است. همچنین تصور کنید دستگاهی در اختیار داریم که بتواند موقعیت ذرات را اندازه بگیرد. دستگاهی که فرض کردنش راحت، اما ساختش دشوار است، جعبه کوچکی است که بتوان آن را به‌سادگی در هر نقطه‌ای از فضا قرار داد. اگر نظریه به ما بگوید که احتمال یافت ذره در نقطه مشخصی برابر با ۰/۰۱ است (زیرا طول عقربه ساعت در آنجا ۰/۱ است)، در آن صورت اگر ما جعبه را در آن نقطه قرار دهیم، به میزان ۱٪

احتمال دارد که ذره را در آن نقطه بیابیم. این یعنی بعید است که بتوانیم چیزی درون جعبه پیدا کنیم. بااین‌حال اگر ما دوباره همان سیستم را به طریقی بچینیم که شرایط را بتوان با همان ساعت‌های قبلی تشریح کرد، می‌توانیم آزمایش را به هر تعدادی که می‌خواهیم انجام دهیم. حال، در هر ۱۰۰ تکرار به‌طور متوسط باید یک‌بار ذره‌ای درون جعبه قرار داشته باشد – و در ۹۹ مورد دیگر، جعبه خالی خواهد بود.

فهمیدن اینکه چرا طول عقربه را به توان دو رساندیم تا احتمال یافت ذره را در نقطه مشخصی به دست آوریم، خیلی سخت نیست، اما به نظر می‌آید که ما (یا به‌طور دقیق‌تر ماکس بورن) کاملاً اتفاقی آن را مطرح کرده باشیم. در حقیقت، از دید تاریخی، پذیرفتن این مطلب برای دانشمندان

بزرگ آن زمان مانند انیشتین و شرودینگر بسیار سخت بود. دیراک با نگاه به عقب به تابستان ۱۹۲۶، پنجاه سال بعد نوشت" مسئله فهمیدن تفسیر آن [مطلب] نسبتاً سخت‌تر از حل معادله‌اش است". علی‌رغم پیچیدگی‌اش خوب است بدانید در پایان سال ۱۹۲۶، طیف نوری تابیده‌شده از هیدروژن که یکی از معماهای بزرگ قرن نوزدهم در فیزیک بود، با هر دو معادله هایزنبرگ و شرودینگر قابل‌محاسبه بود (دیراک نهایتاً اثبات کرد که این دو روش در تمامی جنبه‌ها کاملاً معادل هم هستند)

اعتراض انیشتین به طبیعت احتمالاتی مکانیک کوانتومی که طی نامه‌ای در دسامبر ۱۹۲۶ به بورن بیان شده بود، معروف است. " این نظریه مطالب زیادی دارد، اما واقعاً کمکی

به نزدیک‌تر شدن ما به قدیمی‌ترین معمایمان نمی‌کند. من با ضرس قاطع معتقدم ***او*** تاس نمی‌ریزد". مسئله این بود که تا آن زمان تصور می‌شد فیزیک کاملاً قطعیت دارد. البته ایده احتمالات صرفاً خاص نظریه کوانتوم نیست. این نظریه (احتمالات) مرتباً در موقعیت‌های مختلفی استفاده می‌شود، از شرطبندی بر روی مسابقات اسب‌دوانی گرفته تا علم ترمودینامیک که رد پای تمامی مهندسان ویکتورین[1] در آن دیده می‌شود. اما دلیل این تصور بیشتر، فقدان دانش درباره آن قسمت از جهان بود که مسئله به آن مرتبط می‌شد و نه بنیادی بودن این مطلب. به پرتاب سکه فکر کنید - اولین نمونه بازی تصادفی. ما کاملاً با احتمالات در این زمینه

[1] . Victorian

آشنایی داریم. اگر ما سکه را ۱۰۰ مرتبه پرتاب کنیم، انتظار داریم که به‌طور متوسط ۵۰ بار پشت سکه به زمین بیایید و ۵۰ بار روی سکه. قبل از نظریه کوانتوم، ما قطعاً می‌گفتیم اگر ما همه‌چیز را درباره سکه بدانیم - نحوه دقیق پرتاب آن به هوا، کشش زمین، جریان هوای داخل اتاق، دمای اتاق و ... – ما می‌توانیم به‌طورکلی بفهمیم که سکه به پشت می‌افتد یا به رو. بُروز احتمالات در این زمینه ناشی از فقدان دانش ما درباره سیستم بود و ربطی به خاصیت ذاتی این سیستم نداشت.

احتمالات موجود در نظریه کوانتوم مطلقاً از این جنس نیست؛ این احتمالات بنیادی‌اند. این‌گونه نیست که ما تنها بتوانیم احتمال حضور ذره درجایی را پیش‌بینی کنیم، چون دانشمان کافی نیست. ما به‌طورکلی نمی‌توانیم موقعیت یک

ذره را تعیین کنیم. چیزی که ما به‌دقت می‌توانیم پیش‌بینی کنیم، احتمال حضور ذره در نقطه خاصی است، اگر به دنبالش باشیم. علاوه بر آن ما با دقت کاملی تغییرات این احتمال را در طول زمان نیز می‌توانیم محاسبه کنیم. بورن در سال ۱۹۲۶ این مطلب را به زیبایی بیان کرد "حرکت ذرات، از قوانین احتمالاتی تبعیت می‌کنند، اما خود احتمالات با توجه به قانون علیت خود را گسترش می‌دهد". این دقیقاً کاری است که معادله شرودینگر می‌کند: این معادله‌ای است که به ما اجازه می‌دهد به‌دقت شکل تابع موج را در آینده با توجه به شکلش در گذشته، محاسبه کنیم. در این حالت مشابه با قوانین نیوتون عمل می‌کند. تفاوتشان این است که قوانین نیوتون به ما اجازه می‌دهند تا موقعیت و سرعت یک ذره را در زمان

مشخصی تعیین کنیم، اما مکانیک کوانتومی تنها به ما اجازه محاسبه احتمال حضور یک ذره در مکان خاصی را می‌دهد.

این فقدان قدرت پیش‌بینی دقیق چیزی بود که انیشتین و بسیاری از همکارانش را آزار می‌داد. به لطف ۸۰ سال مباحث فکری و حجم زیادی از تلاش‌های جدی، این چالش امروزه دیگر بی‌معنی است و می‌توان به‌سادگی گفته‌های بورن، هایزنبرگ، پاولی و دیراک را پذیرفت و دانست که شرودینگر، انیشتین و سایر قدیمی‌ها اشتباه می‌کردند. اما یقیناً آن زمان قابل‌قبول بود که تصور شود نظریه کوانتوم به‌نوعی ناکامل است و این احتمالات، مانند ترمودینامیک یا پرتاب سکه، ناشی از فقدان دانش کافی ما درباره ذرات است. امروزه این ایده هوادار کمی دارد - پیشرفت‌های نظری و تجربی نشان

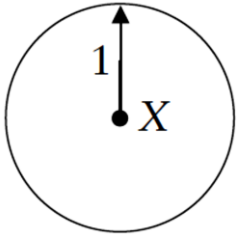
می‌دهد که طبیعت واقعاً از اعداد تصادفی بهره می‌گیرد و فقدان قطعیت در پیش‌بینی موقعیت ذرات، خصوصیت ذاتی جهان فیزیکی است: احتمالات بهترین کاری است که از ما برمی‌آید.

فصل چهارم

هر چیزی که احتمال وقوع دارد، اتفاق می‌افتد

تا اینجا چهارچوبی ساختیم که ما را قادر می‌سازد تا نظریه کوانتوم را با جزئیات بررسی کنیم. ایده‌های کلیدی بسیار ساده‌ای در متون فنی آن‌ها وجود دارد، اما این ایده‌ها به طرز ماهرانه‌ای ما را در مقابل تعصبی که نسبت به جهانمان داریم به چالش می‌کشند. گفتیم که یک ذره را می‌توان با تعدادی از ساعت‌های کوچک نشان داد که طول عقربه ساعت در هر نقطه (به توان دو) بیانگر احتمال حضور ذره در آن نقطه است. نکته اصلی مسئله ساعت‌ها نیستند – آن‌ها فقط ابزاری ریاضیاتی هستند که برای به دست آوردن شانس وجود ذره در

نقاط کاربرد دارند. همچنین قانونی را برای جمع‌کردن ساعت‌ها باهم ارائه دادیم که برای توضیح پدیده تداخل موردنیاز بود. حال ما باید گره آخر [کفشمان] را ببندیم و به دنبال قانونی باشیم که نحوه تغییر ساعت‌ها را از لحظه‌ای به لحظه دیگر مشخص می‌کند. این قانون قرار است جایگزین قانون اول نیوتون شود، یعنی می‌خواهد بگوید اگر ما یک ذره را به حال خود رها کنیم، چه‌کار می‌کند. بیایید از ابتدا شروع کنیم و فرض کنیم ذره‌ای را در نقطه‌ای قراردادیم.



شکل ۱-۴: یک ساعت که نشان می‌دهد ذره‌ای به‌طور حتم در این نقطه از فضا قرار دارد

می‌دانیم که چطور باید ذره‌ای را در یک نقطه نشان داد؛ در شکل ۱-۴ این مطلب نمایش داده شده است. در آن نقطه، ساعتی با طول عقربه ۱ وجود دارد (زیرا مجذور ۱ همان ۱ می‌شود و این یعنی احتمال یافتن ذره در آن نقطه برابر با ۱ است، یعنی ۱۰۰٪). بیایید فرض کنیم که ساعت عدد ۱۲ را

نشان می‌دهد، گرچه این انتخاب کاملاً اختیاری است. تا زمانی که احتمالات مهم باشند، عقربه ساعت می‌تواند در هر جهتی قرار بگیرد، اما چون ما مجبوریم برای شروع، عددی را انتخاب کنیم، همان ۱۲ را انتخاب می‌کنیم. سؤالی که می‌خواهیم جواب دهیم این است: احتمال این‌که ذره در لحظه دیگری در نقطه دیگری وجود داشته باشد چقدر است؟ به‌عبارت‌دیگر، ما در لحظه بعد به چه تعداد ساعت نیاز داریم، و آن‌ها را باید کجاها قرار دهیم؟ برای اسحاق نیوتون، این سؤال احمقانه به نظر می‌رسد؛ اگر ذره‌ای را در مکانی قرار دهید و هیچ عملی را بر روی آن انجام ندهید، از جایش تکان نخواهد خورد. اما طبیعت کاملاً خلاف این را می‌گوید. در حقیقت نیوتون عمراً بتواند نظری اشتباه‌تر از این داشته باشد!

جواب صحیح این است: *ذره می‌تواند در لحظه بعدی در هرکجای جهان حضور داشته باشد.* این یعنی ما باید بینهایت ساعت بکشیم و هرکدام را در هر نقطه قابل‌دسترسی از جهان قرار دهیم. می‌ارزد که این جمله را بارها بخوانید. احتمالاً نیاز باشد که دوباره آن را بگوییم.

اجازه حضور ذره در هر نقطه، اصلاً معادل با این نیست که شما برای ذره حرکتی لحاظ کنید. گرچه تمایلی ذاتی برای این تصور وجود دارد، این بدترین کاری است که می‌توان کرد. البته قبول داریم که این گفته با عقل سلیم و همچنین قوانین فیزیک جور درنمی‌آید.

ساعت بیانگر چیزی قطعی است – احتمال حضور یک ذره در نقطه‌ای که ساعت قرار دارد. اگر ما بدانیم که ذره‌ای دقیقاً در یک‌لحظه در جای مشخصی قرار دارد، ما آن را با ساعتی در آن نقطه نشان خواهیم داد. پیشنهاد این است که اگر ما با یک ذره، در زمان صفر و در جای مشخص شروع کنیم، در لحظه "صفر + زمان اندک" ما باید آرایه‌ای با تعداد وسیع و بینهایتی از ساعت‌های جدید را رسم کنیم که کل جهان را پر می‌کنند. این گفته، این مطلب را می‌پذیرد که ذره در هرلحظه به *همه‌جا* می‌پرد. ذره ما همزمان در یک نانومتر جلوتر و یک میلیارد سال نوری دورتر از ما در قلب ستاره‌ای در کهکشان دیگری قرار دارد. این گفته به نظر احمقانه می‌آید. اما بگذارید واضح‌تر بیان کنیم: این نظریه باید توانایی تشریح آزمایش دو

شکاف را داشته باشد و همانند موجی که در اثر برخورد انگشت ما با آب شروع به گسترش می‌کند، الکترونی که در یک لحظه در جایی قرار دارد نیز باید در گذر زمان گسترش یابد. چیزی که ما باید بفهمیم، نحوه گسترش آن است.

برخلاف موج آب، ما پیشنهاد می‌دهیم که موج الکترون چنان گسترش می‌یابد که در یک‌لحظه کل جهان را در بر می‌گیرد. به عبارت بهتر ما می‌گوییم قانون گسترش ذرات با قانون گسترش امواج تفاوت دارد، اما هر دو با توجه به "معادله موج" گسترش می‌یابند. معادله امواج آب، متفاوت از معادله امواج ذرات است (که همان معادله معروف موج شرودینگر است که در فصل قبل مطرح کردیم)، اما هر دو در رابطه با فیزیک امواج هستند. تفاوتشان در جزئیات نحوه انتشارشان از

جایی به جای دیگر است. برحسب اتفاق اگر شما اندکی درباره نظریه نسبیت انیشتین اطلاعاتی داشته باشید احتمالاً با شنیدن اینکه ذرات در یک‌لحظه از این سر جهان به آن سر جهان می‌پرند، احساس ناخوشایندی بهتان دست دهد، زیرا این قضیه مستلزم آن است که چیزی سریع‌تر از سرعت نور حرکت کند. در حقیقت این ایده که ذره‌ای می‌تواند اینجا بوده و لحظه‌ای بعد در فاصله بسیار دوری قرار بگیرد به‌خودی‌خود در تضاد با نظریات انیشتین نیست، زیرا گزاره صحیح این است که *اطلاعات* نمی‌تواند سریع‌تر از سرعت نور حرکت کند، و نظریه کوانتوم نیز مقید به آن است. همان‌طور که در ادامه یاد خواهیم گرفت، دینامیک مرتبط با جهش الکترون‌ها در عرض جهان کاملاً برخلاف دینامیک انتقال اطلاعات است، زیرا ما از

قبل نمی‌دانیم که ذره به کجا خواهد پرید. ظاهراً ما در حال ساخت نظریه‌ای بر پایه بی‌نظمی کامل هستیم و طبیعتاً شما نگران این هستید که طبیعت یقیناً چنین رفتاری ندارد. اما به‌مرور در این کتاب خواهیم دید نظمی که در این جهان در زندگی روزمره‌مان می‌بینیم ناشی از رفتار بسیار عجیبی است.

اگر در هضم این پیشنهاد مشوّش – که ما باید جهان را پر از ساعت‌های کوچک کنیم تا بتوانیم رفتار یک ذره زیراتمی را از لحظه‌ای به لحظه بعد تشریح کنیم – مشکل دارید، در وضعیت خوبی به سر می‌برید. شفاف‌سازی نظریه کوانتوم و تلاش برای تفسیر کارکرد درونی آن، گیج‌کننده است. نیلز بور جمله معروفی دارد که می‌گوید "کسانی که در برخورد اول با مکانیک کوانتومی گیج نشده‌اند، هرگز آن را نخواهند فهمید"

و ریچارد فاینمن، جلد سوم کتاب *گفتارهای فاینمن درباره فیزیک* را با این کلمات آغاز کرد که "فکر کنم می‌توانم با اطمینان بگویم که کسی مکانیک کوانتومی را نمی‌فهمد". خوشبختانه دنبال کردن قوانین [مکانیک کوانتومی] بسیار ساده‌تر از تلاش برای تصور کردن مفهوم واقعی آن است. توانایی دنبال کردن نتایج مجموعه‌ای از فرض‌ها، بدون گیرکردن در عواقب فلسفی‌شان، یکی از مهم‌ترین مهارت‌هایی است که فیزیکدان‌ها یاد می‌گیرند. این کاملاً شیوه برخورد هایزنبرگ بود: بیایید مجموعه‌ای از مفروضات اولیه بسازیم و نتایجشان را محاسبه کنیم. اگر با این کار به مجموعه‌ای از پیش‌بینی‌ها برسیم که با جهان اطرافمان مطابقت دارد، ما باید نظریه‌مان را "خوب" ارزیابی کنیم.

بسیاری از مسائل آن‌قدر دشوارند که هرگز با یک گام فکری حل نخواهند شد و فهم عمیق، به‌ندرت در لحظاتِ "اورِکا[1]" رخ می‌دهد. روش کار بدین‌گونه است که مطمئن شویم تک‌تک گام‌ها را فهمیده‌ایم و پس از تعداد گام کافی، تصویر بزرگ‌تری را به دست خواهیم آورد. در غیر این صورت [پس از مدتی] خواهیم فهمید که به بیراهه می‌رویم و باید دوباره به نقطه اولمان بازگردیم. گام‌های کوچکی که تا اینجا مطرح کردیم به‌خودی‌خود سخت نیستند، اما این ایده که ما تصمیم گرفتیم یک ساعت را به تعداد بی‌شماری ساعت تبدیل کنیم، قطعاً زیرکانه (یا دشوارتر) است، مخصوصاً اینکه شما تلاش

[1]. یافتم. کلمه‌ای که ارشمیدس پس از کشف ناگهانی‌اش درباره جرم حجمی فریاد کشید.

کنید تمام این ساعت‌ها را تصور کنید. به قول وودی آلن[1]، ابدیت زمان بسیار درازی است، مخصوصاً وقتی‌که به اواخرش نزدیک شود. توصیه ما این است که نگران نشوید و انصراف ندهید و بدانید که قسمت بینهایت، صرفاً یکی از جزئیات بود. گام بعدی ما این است که قانونی را بسازیم که به ما بگوید، پس از لحظه‌ای از قرار دادن ذره در جای خود، ساعت‌ها به چه شکلی درمی‌آیند.

قانونی که به دنبالش هستیم یکی از قوانین ضروری نظریه کوانتوم است، بااین‌حال زمانی که بخواهیم وجود ذرات دیگر [به‌جز آن یک ذره موردنظر] را در جهان لحاظ کنیم، مجبور

[1] . Woody Allen

به اضافه کردن قانون دومی هستیم. خب پس از ابتدا شروع کنیم: فعلاً تمرکزمان را بر این مطلب قرار می‌دهیم که تنها یک ذره در جهان وجود دارد – کسی ما را مجبور به پیچیده کردن مسائل نکرده است. در لحظه‌ای از زمان، فرضمان بر این است که می‌دانیم این ذره دقیقاً کجاست که به‌تبع آن موقعیت ذره را می‌توان با تنها یک ساعت نشان داد. هدف ما این است که قانونی بیابیم که به ما بگوید هرکدام از ساعت‌های جدیدی که در لحظه بعد در جهان پراکنده خواهند شد، چه شکلی خواهند بود.

ما ابتدا بدون هیچ توضیحی قانون را می‌گوییم. پس از چند پاراگراف به علت اینکه چرا این قانون این‌گونه است خواهیم پرداخت، اما فعلاً آن را به‌عنوان یکی از قواعد بازی مطرح

می‌کنیم. قانون این است: در زمان t در آینده، ساعتی که در فاصله x از ساعت اصلی قرار دارد، عقربه‌اش در خلاف جهت عقربه‌های ساعت با مقداری متناسب با x^2 می‌چرخد. همچنین مقدار این چرخش متناسب با جرم ذره m نیز می‌باشد و با زمان t رابطه معکوسی دارد. به زبان نمادین قصد ما چرخاندن عقربه ساعت با عددی متناسب با mx^2/t است. یعنی برای ذرات سنگین‌تر یا نقاط با فاصله بیشتر از ساعت اولیه، باید عقربه را بیشتر بچرخانیم. هرقدر نیز زمان بیشتری بگذرد، از مقدار چرخش عقربه کاسته می‌شود. این یک الگوریتم است – یا مثلاً یک دستورالعمل – که به ما دقیقاً می‌گوید با مجموعه‌ای از ساعت‌ها که در اختیار داریم، در لحظات بعدی چه‌کار کنیم. در هر نقطه‌ای از جهان، ما ساعت

جدیدی با عقربه‌اش که میزان چرخشش را با قانونمان محاسبه خواهیم کرد، رسم می‌کنیم. این مطلب ادعای ما را به‌حساب می‌آورد که گفتیم یک ذره می‌تواند از موقعیت اولیه‌اش به تمام نقاط جهان بپرد و در حقیقت این کار را انجام می‌دهد و وجود ذره در هر نقطه، ساعت جدیدی را نیز به آن نقطه اختصاص می‌دهد.

برای ساده‌سازی ما تنها یک ساعت اولیه را تصور کردیم، اما مسلماً در هرلحظه باید تعداد زیادی ساعت وجود داشته باشد تا این واقعیت را بیان کنند که ذره در مکان دقیقی قرار ندارد. از کجا بفهمیم که با مجموعه‌ای از ساعت‌ها چه باید بکنیم؟ جواب این است که ما باید همان کاری را بکنیم که برای همان یک ساعت کردیم و این کار را برای تک‌تک ساعت‌های

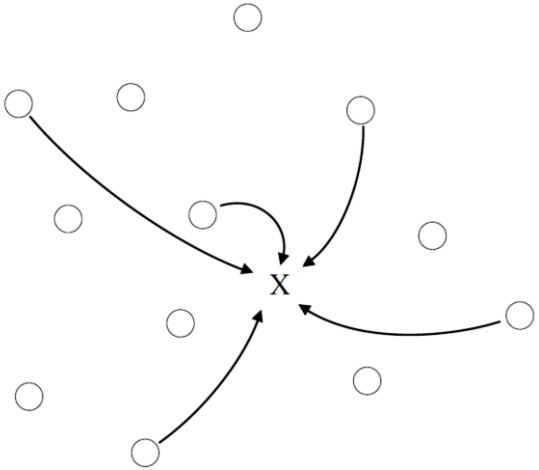
موجود در مجموعه انجام دهیم. شکل ۲-۴ این ایده را نشان می‌دهد. مجموعه ساعت‌های اولیه با تعدادی دایره نشان داده شده‌اند و فلش‌ها مشخص می‌کنند که ذره از موقعیت هرکدام از ساعت‌های اولیه به سمت X جهش کرده است و در طی این فرایند، ساعت جدیدی را [در محل جدید] قرار می‌دهد. البته این کار برای هر ساعت اولیه‌ای، ساعت جدیدی را به X اختصاص می‌دهد، و ما باید تمامی این ساعت‌ها را باهم جمع زده و ساعت نهایی را برای X به دست آوریم. طول عقربه این ساعت جدید، احتمال یافت ذره در نقطه X را در زمان بعدی نشان می‌دهد.

خیلی هم عجیب نیست که زمانی که از سمت‌های زیادی [ساعت‌ها] به آن نقطه می‌رسند، ساعت‌ها را باید باهم جمع

کرد. هر ساعت نشان‌دهنده مسیر متفاوتی است که ذره برای رسیدن به X آن را طی کرده است. این نوع جمع بستن ساعت‌های زمانی قابل‌فهم است که ما دوباره به آزمایش دو شکاف فکر کنیم؛ ما در تلاشیم تا توضیح موج را این بار با ساعت‌ها بیان کنیم. ما می‌توانیم دو ساعت اولیه را تصور کنیم که هرکدام بر روی یکی از شکاف‌ها قرار داشته باشند. هرکدام از این ساعت‌ها، در زمان بعدی به هر نقطه خاصی ساعتی را می‌فرستند و ما برای به دست آوردن الگوی تداخل باید این دو ساعت را در آن نقطه خاص جمع ببندیم[۱]. به‌طور خلاصه، قانونی که برای به محاسبه ساعت در هر نقطه وجود دارد این

[۱] .اگر با این جمله آخر مشکل دارید می توانید به جای واژه ساعت از واژه موج استفاده کنید.

است که باید تمام ساعت‌های اولیه را به آن نقطه ببریم، یک‌به‌یک، و آن‌ها را با استفاده از قانون جمعی که در فصل پیش اشاره کردیم، جمع بزنیم.



شکل ۲-۴: جهش ساعت. دایره‌ها نشان‌دهنده موقعیت ذره در هر نقطه‌ای از زمان است؛ ما باید برای هر نقطه ساعتی را اختصاص دهیم. برای محاسبه احتمال یافت ذره در نقطه X ما باید اجازه دهیم تا ذره، از تمامی نقاط قبلی به آنجا جهش کند. تعداد کمی از جهش‌ها با فلش نشان داده شده‌اند. شکل این فلش‌ها مفهوم خاصی ندارد و قطعاً به این معنی نیست که ذره در طول این مسیر، از محل ساعت اولیه به سمت X حرکت کرده است.

ازآنجایی‌که ما این زبان را برای توصیف انتشار امواج توسعه دادیم، می‌توانیم درباره موج‌های آشناتری با همین ادبیات صحبت کنیم. کل این ایده به زمان بسیار قبل‌تری برمی‌گردد. فیزیکدان هلندی کریستین هایگنز[1]، در توصیف معروفی انتشار امواج نور را در دهه ۱۶۹۰ شرح داده است. او درباره ساعت‌های تخیلی صحبتی نکرده، اما تأکید کرده است که هر

[1] . Christiaan Huygens

نقطه‌ای از موج نور، خود منبعی برای امواج ثانویه است (همان‌طور که هر ساعت، ساعت‌های جدیدی را تولید می‌کند). این امواج جدید [در هر نقطه] جمع شده و موج نهایی جدیدی را می‌سازند. این فرایند خود را تکرار می‌کند تا هر نقطه از موج جدید به‌عنوان منبعی برای موج‌های بعدی عمل کند، که دوباره جمع بسته می‌شوند و به همین ترتیب امواج پیش می‌روند.

حال ما می‌توانیم به چیزی بازگردیم که منطقاً شما را آزار می‌داد. چرا ما mx^2/t را برای تعیین میزان چرخاندن عقربه ساعت‌ها انتخاب کردیم؟ این کمیت نامی دارد: نام آن

"کنش[1]" است و تاریخچه طولانی و قابل‌احترامی در فیزیک دارد. کسی واقعاً نمی‌داند که چرا طبیعت ما را مجاب می‌کند تا از این تابع به شکل بنیادینی استفاده کنیم، یعنی کسی نمی‌تواند توضیح دهد که چرا ساعت‌ها باید با این مقدار چرخانده شوند. حال این سؤال پیش می‌آید: چه کسی اولین بار فهمید که این [رابطه] مهم است؟ این کنش برای اولین بار توسط فیلسوف و ریاضیدان آلمانی گوتفرد لایبنیتز[2] در یک مقاله چاپ‌نشده‌ای در سال ۱۶۶۹ معرفی شده، گرچه او راهی برای استفاده از این رابطه در معادلات پیدا نکرد. این رابطه دوباره توسط دانشمند فرانسوی پیر لوییس موری دو

1 . Action
2 . Gottfried Leibniz

موپرتوس[1] در سال ۱۷۴۴ معرفی شد، و متعاقب آن برای فرمول‌بندی قانون جدید و قدرتمندی در طبیعت توسط دوستش، لئونارد اویلر[2] ریاضیدان، استفاده شد. توپی را تصور کنید که در فضا در حال حرکت است. اویلر فهمید که توپ در مسیری حرکت خواهد کرد که کنشی که بین هر دو نقطه مسیر محاسبه می‌شود همواره حداقل حالت ممکن را دارد. در مورد توپ، این کنش مرتبط با تفاوت بین انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل آن است. این قضیه به‌عنوان "اصل حداقل کنش[3]" شناخته می‌شود و این اصل می‌تواند به‌عنوان جایگزینی برای قوانین حرکت نیوتون استفاده شود. در نگاه

[1] . Pierre-Louis Moreau de Maupertuis
[2] . Leonard Euler
[3] . The Principle of Least Action

اول، این قانون قدیمی به نظر می‌رسد زیرا برای پرواز در مسیری که کنش را به حداقل برساند، توپ باید قبل از حرکتش بداند که چه مسیری را طی خواهد کرد. با چه روش دیگری این توپ می‌تواند مسیر را طی کند که پس از اتمام کار، کمیتِ کنش حداقل باشد؟ مطرح کردن این بحث به این طریق تا حدودی غایت شناسانه[1] به نظر می‌آید – یعنی ظاهراً اتفاقات به این دلیل می‌افتند که به هدف از پیش تعیین‌شده‌ای برسند. به‌طورکلی ایده‌های غایت شناسانه نسبتاً در علم بدنام هستند و معلوم است که چرا. در زیست‌شناسی، تشریح غایت شناسانه به وجود آمدن مخلوقات پیچیده برابر خواهد بود با استدلالی برای وجود یک ناظم، درحالی‌که نظریه

[1] . Teleological

فرگشت[۱] (یا تکامل) داروین[۲] به طریق انتخاب طبیعی[۳]، توضیح ساده‌تری را فراهم می‌آورد که به زیبایی با داده‌های موجود مطابقت می‌کند. هیچ‌گونه جزء غایت شناسانه‌ای در نظریه داروین وجود ندارد – جهش‌های تصادفی باعث ایجاد تغییرات در ارگانیسم‌ها می‌شود و فشار بیرونی ناشی از محیط و سایر موجودات زنده، تعیین می‌کند که کدام‌یک از این تغییرات به نسل بعدی منتقل شود. این فرایند به‌تنهایی می‌تواند پیچیدگی‌ای که امروزه در حیات موجود در جهان را می‌بینیم را ایجاد کند. به‌عبارت‌دیگر، نیازی به یک برنامه بزرگ از پیش تعیین‌شده نیست و هیچ‌گونه تمایل تدریجی

[1] . Evolution
[2] . Darwin
[3] . Natural Selection

برای رسیدن یک گونه به سمت کمال وجود ندارد. در عوض فرگشت حیات مانند قدم زدنی اتفاقی است که به‌وسیله کپی شدن ناقص ژن‌ها در محیط دائماً در حال تغییر به وجود آمده است. زیست‌شناس فرانسوی و برنده جایزه نوبل جاکوس مونود[1] تا جایی پیش رفت که پایه‌های زیست‌شناسی مدرن را بنا نهاد با این مضمون که "دانش علمی‌ای که می‌تواند بر اساس تکذیب اصولی یا بدیهی نظریاتی که به‌طور واضح یا ضمنی قانون غایت شناسانه‌ای را در خود دارند، به دست آورد"

[1] . Jacques monod

تا جایی که به فیزیک ربط دارد هیچ شکی در رابطه با درستی قانون حداقل کنش نداریم، زیرا این قانون امکان محاسباتی را به ما می‌دهد که به‌درستی طبیعت را تشریح می‌کنند و این هم به‌نوعی سنگ‌بنای فیزیک است. می‌توان استدلال کرد که قانون حداقل کنش به‌هیچ‌وجه غایت‌شناسانه نیست، اما به‌هرحال زمانی که به روش فاینمن در مکانیک کوانتومی متوسل شویم، چنین بحثی (درباره غایت شناسانه بودن قانون حداقل کنش) کاملاً خنثی می‌شود. توپی که در هوا در حال حرکت است می‌داند که چه مسیری را انتخاب کند، زیرا درواقع به‌طور مخفیانه‌ای تمامی مسیرها را می‌پیماید.

این مطلب که چرخش ساعت‌ها باید ربطی به این کمیتی که کنش نامیده شده، داشته باشد، از کجا کشف شد؟ ازنقطه‌نظر تاریخی، دیراک اولین کسی بود که به دنبال فرمول‌بندی‌ای از نظریه کوانتوم بود که کنش را نیز در آن دخیل کند اما به طرز عجیبی او تصمیم گرفت تا مقاله‌اش را در یک مجله در کشور شوروی به چاپ برساند تا حمایتش را از علم شوروی نشان دهد. نام مقاله این بود " اصول لاگرانژی در مکانیک کوانتومی[1]" که در سال ۱۹۳۳ به چاپ رسید و تا سال‌ها در تاریکی باقی ماند. در بهار ۱۹۴۱، ریچارد فاینمن جوان در فکر این بود که چگونه می‌تواند با استفاده از فرمول‌بندی لاگرانژی مکانیک کلاسیک، روش جدیدی را برای

[1] . The Lagrangian in Quantum Mechanics

نظریه کوانتوم به دست آورد (که همان فرمول‌بندی‌ای است که از اصل حداقل کنش استخراج می‌شود). او عصر یک روز در مهمانی آبجویی که در دانشگاه پرینستون برگزار شده بود با هربرت ژهل[1] فیزیکدان اروپایی ملاقات کرد و مانند فیزیکدانان که تمایل دارند حین نوشیدن، در باب ایده‌های جدید فیزیکی بحث کنند، آن‌ها نیز به این کار پرداختند. ژهل، آن مقاله خاک خورده دیراک را به خاطر داشت و روز بعد آن‌ها این مقاله را در کتابخانه پرینستون یافتند. فاینمن به‌سرعت شروع به محاسبات با استفاده از فرمول‌بندی دیراک کرد و تا عصر آن روز در حضور ژهل، توانست معادله موج شرودینگر را با استفاده از اصل حداقل کنش استخراج کند.

[1] . Herbert Jehle

این یک گام بزرگی بود، بااین‌حال فاینمن در ابتدا فرض کرد که دیراک نیز چنین محاسباتی را انجام داده، زیرا کار ساده‌ای بود. البته به شرطی ساده که شما فاینمن باشید. فاینمن نهایتاً با اندکی پیش‌روی‌های ریاضیاتی از دیراک پرسید که آیا می‌دانست که مقاله سال ۱۹۳۳ اش چنین کاربردی دارد یا نه. فاینمن بعداً دوباره با دیراک تماس گرفت و دیراک که پس از یک درس دادن بی‌رمق در پرینستون بر روی چمن‌ها دراز کشیده بود پاسخ داد "نه نمی‌دانستم. این فوق‌العاده است". دیراک یکی از بزرگ‌ترین فیزیکدانان تمامی ادوار بود، اما بسیار مرد کم‌حرفی بود. یوجین ویگنر[1]، که خودش هم یکی

[1] . Eugene Wigner

از بزرگان است، گفته بود "فاینمن، دیراک دوم است، البته این بار به‌صورت آدمیزاد".

به‌طور خلاصه: ما قانونی را شروع کردیم که به ما اجازه می‌دهد تا مجموعه‌ای از ساعت‌هایی را بنویسیم که وضعیت یک ذره را در هر لحظه‌ای از زمان ارائه دهند. قانون عجیبی است – جهان را با بینهایت ساعت پرکنیم که همگی نسبت به هم مقداری اختلاف دارند و این مقدار مرتبط با کمیتی است که اهمیت تاریخی دارد و نامش کنش است. اگر دو یا چند ساعت در نقطه مشترکی قرار داشته باشند، باید آن‌ها را باهم جمع کرد. این قانون بر این منطق استوار است که ما باید به یک ذره اجازه دهیم در زمان بینهایت کوتاهی، آزادانه از هر نقطه‌ای به هر نقطه دیگر در جهان جهش کند. در ابتدا گفتیم

که این ایده‌های عجیب‌وغریب باید در طبیعت آزمایش شوند تا معلوم شود نتیجه ملموسی از آن‌ها به دست می‌آید یا نه. برای شروع کار بیایید ببینیم چطور چنین چیزی که یکی از سنگ بناهای نظریه کوانتوم است، از حالتی که ظاهراً شبیه به هرج‌ومرج می‌ماند، خود را نشان می‌دهد: اصل عدم قطعیت هایزنبرگ[1].

اصل عدم قطعیت هایزنبرگ

اصل عدم قطعیت هایزنبرگ یکی از بزرگ‌ترین قسمت‌های نظریه کوانتوم است که همواره بد فهمیده می‌شود؛ دروازه‌ای که هر شارلاتان و یاوه‌گویی برای توجیه تفکرات فلسفی خود

[1] . Heisenberg’s Uncertainty Principle

از زیر آن رد می‌شود. او این اصل را در سال ۱۹۲۷ در مقاله‌ای با عنوان

Uber den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik

ارائه داد که ترجمه‌اش به انگلیسی بسیار سخت است. واژه سختش anschaulich است که مفهومی شبیه به "فیزیکی" یا "ذاتی" دارد [ترجمه به فارسی‌اش تقریباً می‌شود: درباره محتوای فیزیکی مکانیک و سینماتیک (حرکت شناسی) کوانتومی]. ظاهراً هایزنبرگ از این بابت ناراحت بود که نسخه مستقیم‌تر نظریه کوانتوم که توسط شرودینگر ارائه شده بود، بیشتر از نسخه ارائه‌شده توسط هایزنبرگ مقبولیت داشت، گرچه هر دو ساختار نتیجه یکسانی می‌دادند. در بهار ۱۹۲۶

شرودینگر متقاعد شد معادلات تابع موج او، تصویری فیزیکی از اتفاقات درون اتم به دست می‌دهد. او گمان می‌کرد تابع موجش چیزی است که تنها می‌توانید تصور کنید و مربوط به توزیع بار الکتریکی درون اتم می‌شود. این گمان اشتباه از آب درامد، اما در طی ۶ ماه اول ۱۹۲۶ فیزیکدانان را راضی نگه داشته بود، تا اینکه بورن تفسیر احتمالاتی آن را ارائه کرد.

از طرف دیگر هایزنبرگ، نظریه‌اش را بر پایه ریاضیات محض بنا نهاده بود که نتایج آزمایشات را کاملاً موفقیت‌آمیز پیش‌بینی می‌کرد، اما نمی‌توانست تفسیر فیزیکی ملموسی را ارائه دهد. هایزنبرگ مراتب ناراحتی‌اش را در نامه‌ای به تاریخ ۸ ژوئن ۱۹۲۶ به پاولی بیان می‌کند؛ دقیقاً چند هفته قبل از اینکه بورن روش مستقیم شرودینگر را اصطلاحاً آچارکشی

کند. "هرقدر من بیشتر درباره قسمت فیزیکی نظریه شرودینگر فکر می‌کنم، آن را زشت‌تر می‌یابم. چیزی که شرودینگر درباره Anschaulichkeit نظریه‌اش می‌نویسد ... در نظر من Mist است". ترجمه واژه آلمانی Mist چیزی شبیه به "مزخرف" یا "به‌دردنخور" یا "بیهوده" است.

چیزی که هایزنبرگ قصد داشت انجام دهد این بود که نشان دهد "تصویر ذاتی یا مستقیم" یا Anschaulichkeit یک نظریه فیزیکی به چه معنی است. او از خود پرسید نظریه کوانتوم چه نظری درباره مشخصات آشنای یک ذره مثلاً موقعیتش دارد؟ در بطن نظریه اصلی‌اش، او پیشنهاد داد زمانی موقعیت یک ذره مفهوم دارد که مشخص کنیم چگونه قرار است اندازه‌گیری شود. پس تا زمانی که شما طریقه کسب

اطلاعاتتان (یا ابزار کارتان) را مشخص نکنید، نمی‌توانید در مورد موقعیت دقیق الکترون در داخل اتم هیدروژن سؤالی بپرسید. شاید این جملات شبیه به بازی با کلمات باشد، اما واقعاً این‌طور نیست. هایزنبرگ متوجه شد عملی که برای اندازه‌گیری انجام می‌شود با خود اختلالی را نیز به همراه خواهد داشت و این باعث می‌شود ما محدودیتی درباره "شناخت" واقعی الکترون داشته باشیم. مخصوصاً در مقاله اصلی‌اش، هایزنبرگ توانست رابطه‌ای بین میزان دقتی که ما برای اندازه‌گیری همزمان موقعیت و تکانه یک ذره می‌توانیم داشته باشیم، تخمین زد. در قانون معروف عدم قطعیتش، او نوشت که اگر Δx میزان عدم قطعیت اطلاعات ما درباره موقعیت یک ذره باشد (واژه یونانی Δ به‌صورت "دلتا" تلفظ

می‌شود پس Δx را به‌صورت "دلتا ایکس" می‌خوانیم). و Δp عدم قطعیت مرتبط با تکانه باشد درنتیجه:

$$\Delta x \Delta p \sim h$$

که h ثابت پلانک است و ~ یعنی "مقدارش مشابه است با". یعنی حاصل‌ضرب عدم قطعیت در موقعیت یک ذره و عدم قطعیت در تکانه آن، تقریباً برابر با ثابت پلانک است. این یعنی هرقدر ما موقعیت (مکان) یک ذره را دقیق‌تر محاسبه کنیم، دقتمان در دانستن مقدار تکانه آن کمتر می‌شود و برعکس. هایزنبرگ با تفکر درباره گسیل فوتون‌ها از الکترون‌ها به این نتیجه رسید. فوتون‌ها ابزاری هستند که به‌وسیله آن‌ها می‌توانیم الکترون‌ها را ببینیم، دقیقاً مثل سایر اشیای روزمره

که فوتون‌های پراکنده‌شده از آن‌ها توسط چشم ما جمع‌آوری می‌شود. عموماً نوری که از اشیا خارج می‌شود به‌طور نامحسوسی بر روی آن شیء اثر می‌گذارد، اما چنین توضیحی نباید باعث عدم توانایی ما برای جداسازی ابزار اندازه‌گیری‌مان از شیء مورداندازه‌گیری شود. ممکن است کسی به این فکر کند که می‌توان با طراحی آزمایشی هوشمندانه بر محدودیت‌های اندازه‌گیری غلبه کند. در ادامه نشان خواهیم داد که اصلاً قضیه این نیست و اصل عدم قطعیت، اصلی بنیادی است و ما هم‌اینک آن را با استفاده از نظریه ساعت‌هایمان به دست خواهیم آورد.

استخراج اصل عدم قطعیت هایزنبرگ با استفاده از نظریه ساعت‌ها

به‌جای شروع با ذره‌ای در نقطه‌ای مشخص، بیایید درباره موقعیتی فکر کنیم که ما تقریباً می‌دانیم آن ذره کجاست، اما دقیقاً نمی‌دانیم. اگر بدانیم که در محدوده کوچکی از فضا، ذره‌ای وجود دارد، ما باید آن ذره را با مجموعه‌ای از ساعت‌ها در آن محدوده نشان دهیم. در هر نقطه‌ای از محدوده، ساعتی وجود خواهد داشت و هر ساعت نشان‌دهنده احتمال حضور ذره در آن نقطه خواهد بود. اگر ما طول عقربه تمام آن ساعت‌ها را به توان دو

رسانده و باهم جمع بزنیم، به عدد ۱ می‌رسیم. یعنی احتمال یافتن ذره در جایی در داخل محدوده ۱۰۰٪ خواهد بود.

تا لحظاتی دیگر ما از قواعد کوانتومی‌مان استفاده خواهیم کرد تا محاسباتی جدی را انجام دهیم، اما قبل از آن، این مطلب را متذکر شوم که ما نکته‌ای مهمی درباره قانون چرخش ساعت‌هایمان را از قلم انداختیم. ما به دلیل جزئیات فنی‌اش نخواستیم آن را قبلاً معرفی کنیم، اما در صورت چشم‌پوشی از آن، حین محاسبه احتمالات واقعی، به جواب درستی نخواهیم رسید. این مطلب مربوط به گفته‌های ما در آخر پاراگراف قبل می‌شود.

اگر ما با یک ساعت شروع کنیم، طول عقربه باید ۱ باشد، زیرا ذره باید با احتمال ۱۰۰٪ در موقعیت ساعت یافت شود. قانون کوانتومی ما نیز خواهد گفت، برای تشریح این ذره در لحظه‌ای دیگر باید این ساعت را به تمامی نقاط جهان انتقال داد که متناظر با جهش ذره از نقطه اولیه‌اش است. مسلماً ما نمی‌توانیم طول عقربه ساعت‌ها را برابر با ۱ باقی گذاریم زیرا در آن صورت تفسیر احتمالاتی ما ساقط می‌شود. برای مثال تصور کنید که ذره با ۴ ساعت تشریح می‌شود، یعنی در چهار نقطه قرار دارد. اگر هرکدام از ساعت‌ها طولی برابر با یک می‌داشت، احتمال حضور ذره دریکی از آن نقاط برابر با

۴۰۰٪ می‌شد که مسلماً این حرف درستی نیست. برای حل این مشکل ما باید ساعت‌ها را با استفاده از چرخاندن عقربه‌شان در خلاف جهت عقربه‌های ساعت، کوچک کنیم. این قانون "کوچک کردن[1]" بدین‌صورت است که پس از پخش شدن تمام ساعت‌های جدید، هرکدام از ساعت‌ها به نسبت جذر (ریشه دوم) مجموع تعداد ساعت‌ها کوچک شود. مثلاً برای ۴ ساعت این‌گونه باید عمل کنیم که طول عقربه هرکدام از ساعت‌های جدید را تقسیم‌بر $\sqrt{۴}$ کنیم، که با این حساب هرکدام از عقربه‌ها نصف می‌شوند. در آن صورت در موقعیت هرکدام از

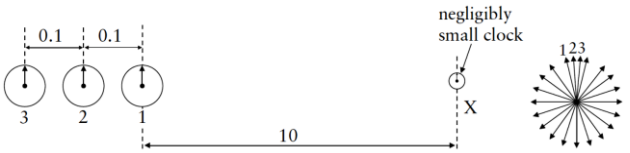
[1] . Shrink Rule

ساعت‌ها $\frac{۱}{۲}^{۲}$ =۲۵٪ احتمال یافتن ذره وجود دارد. با این روش ساده می‌توانیم مطمئن باشیم که احتمال اینکه ذره در جای یافت شود همواره درمجموع ۱۰۰٪ است. البته ممکن است بینهایت موقعیت وجود داشته باشد، که در آن‌ها مقدار ساعت برابر با صفر باشد و اندکی هشداردهنده به نظر آیند، اما ریاضیات از پسشان برمی‌آید. برای مقصودِ ما، همواره فرض خواهیم کرد که تعداد ساعت‌ها محدود است و همچنین نیازی به دانستن میزان کوچک‌شدگی آن‌ها نداریم.

بیایید به تصور قبلی‌مان برگردیم که در آن ذره‌ای در جهان وجود داشت که موقعیتش به‌طور دقیق مشخص نبود. شما ممکن است ریاضیات این قسمت را کمی معمایی بیابید – احتمالاً بار اولی که آن را بخوانید کمی زیرکانه و گیج‌کننده باشد، اما به خواندن دوباره‌اش می‌ارزد و اگر توانستید اصل مطلب را دریابید، خواهید فهمید که اصل عدم قطعیت از کجا ناشی می‌شود. برای ساده‌سازی ما فرض کردیم که ذره تنها در یک بعد حرکت می‌کند، یعنی بر روی یک خط قرار دارد. مدل سه‌بعدی این مطلب تفاوت اساسی‌ای با گفته ما نخواهد داشت – صرفاً تصور کردنش مشکل‌تر است. در شکل ۳-

۴ ما این موقعیت را ترسیم کردیم و ذره‌ای را نشان دادیم که بر روی خطی با ۳ ساعت قرار دارد. ما باید تصور کنیم که تعداد زیادی از این‌ها وجود دارند – در هر نقطه‌ای که ذره امکان حضور داشته باشد، یک ساعت وجود دارد – اما رسم چنین شکلی مشکل است. ساعت ③ در سمت چپ مجموعه ساعت‌های اولیه نشسته است و ساعت ① در سمت راست. برای تکرار مجدد، این شکل موقعیتی را نشان می‌دهد که در آن ما می‌دانیم ذره در لحظه اول، جایی بین ساعت‌های ① و ③ قرار داشته است. نیوتون خواهد گفت درصورتی‌که ما کاری بر روی ذره انجام ندهیم، در جای خود باقی خواهد ماند، اما قانون کوانتومی

چه می‌گوید؟ ازاینجا به بعد جالب می‌شود – ما قرار است با قانون ساعت‌ها بازی کنیم تا جواب این سؤال را بیابیم.



شکل ۳-۴: خطی متشکل از ۳ ساعت که همگی زمان ثابتی را نشان می‌دهند: این شکل ذره‌ای را در لحظه اولش توصیف می‌کند که در محدوده‌ای بین این ساعت‌ها قرار دارد. ما کنجکاویم که بدانیم احتمال یافتن ذره در نقطه X در لحظات بعد چقدر است.

بیایید به ساعت‌ها اجازه دهیم که روبه‌جلو تیک بزنند و ببینیم چه اتفاقی برای خط ساعت‌ها می‌افتد. ما با درنظر گرفتن نقطه مشخصی، که در شکل با X نشان داده شده است

و در فاصله بسیار دوری از مجموعه ساعت‌های اولیه قرار دارد، شروع می‌کنیم. ما بعداً درباره اینکه "فاصله‌ای بسیار دور" در چه حد می‌تواند باشد صحبت خواهیم کرد، اما فعلاً منظور ما این است که باید ساعت را زیاد بچرخانیم.

با اعمال قواعد بازی، ما باید هرکدام از ساعت‌های مجموعه اولیه را به نقطه X برده و عقربه‌شان را بچرخانیم که متعاقب آن کوچک خواهند شد. ازلحاظ فیزیکی این قضیه شبیه به جهش ذرات از نقطه اولیه داخل مجموعه به نقطه X می‌شود. از هرکدام از ساعت‌های روی خط، ساعت‌های جدیدی به X می‌رسند و ما باید آن‌ها را باهم جمع ببندیم. پس از اتمام این کار، مجذور طول عقربه ساعت نهایی در X احتمال حضور ذره را در نقطه X به ما می‌دهد.

حال بیایید با عددگذاری ببینیم نحوه عملکرد این روش چگونه است. بیایید فرض کنیم نقطه X به فاصله "۱۰ واحد" از ساعت ① قرار دارد و مجموعه اولیه، عرضی برابر با ۰/۲ واحد دارد. پاسخ به این سؤال واضح: " ۱۰ واحد چقدر است"، باعث ورود ثابت پلانک به داستان ما می‌شود، اما فعلاً این مطلب را کنار گذاشته و ۱ واحد را برابر با ۱ دور کامل چرخش ساعت (۱۲ ساعت) معرفی خواهیم کرد. این یعنی نقطه X برابر با ۱۰۰=$۱۰^{۲}$ چرخش کامل از مجموعه اولیه فاصله دارد (قانون چرخش ساعت‌ها را به یادآورید). ما همچنین فرض خواهیم کرد که ساعت‌های موجود در مجموعه اولیه، مقداری برابر دارند و همگی بر روی عدد ۱۲ هستند. فرض برابر بودن مقدار ساعت‌ها یعنی احتمال حضور ذره در

هرکدام از نقاط بین ① و ③ موجود در شکل باهم برابر است و اهمیت برابر بودن این مقادیر در ادامه کار مشخص می‌شود.

برای انتقال ساعت از نقطه ① به نقطه X، طبق قانونمان باید عقربه آن ساعت را ۱۰۰ دور کامل در جهت خلاف عقربه‌های ساعت بچرخانیم. خب حال به نقطه ③ برویم که ۰/۲ واحد دورتر است، و این ساعت را نیز به X انتقال دهیم. ساعت باید ۱۰/۲ واحد جابجا شود پس باید عقربه‌اش را بیش از ساعت قبلی بچرخانیم، یعنی $۱۰/۲^{۲}$، که بسیار نزدیک به ۱۰۴ است، دور کامل.

حال ما دو ساعت داریم که به نقطه X رسیده‌اند و متناظر با پرش ذره از نقاط ① به X و ③ به X هستند و ما برای به

دست آوردن ساعت نهایی، باید این دو ساعت را باهم جمع بزنیم. ازآنجایی‌که اعدادی که برای چرخش این دو ساعت به دست آمدند تقریباً نزدیک به اعداد طبیعی بودند، هر دو ساعت تقریباً دوباره روی عدد ۱۲ قرار خواهند گرفت (منظور اینکه تعداد چرخش‌هایمان تقریباً همگی دور کامل بود و عقربه به‌جای خود بازمی‌گشت) مجموعشان نیز در همان جهت عدد ۱۲ اما با عقربه‌ای بزرگ‌تر قرار خواهد گرفت. دقت کنید که تنها جهت نهایی هرکدام از ساعت‌ها برای ما مهم است. نیازی نداریم که بدانیم عقربه‌ها چند دور کامل چرخیده‌اند تا به آن عدد برسند. تا اینجا که خوب پیش رفت، اما کارمان هنوز تمام نشده زیرا ساعت‌های کوچک زیادی بین دو کران مجموعه اولیه وجود دارند.

حال اولین چیزی که نظر ما را جلب می‌کند، ساعتی است که در میانه مجموعه قرار دارد، یعنی ساعت ②. این ساعت فاصله‌ای برابر با ۱۰/۱ واحد از نقطه X دارد که به این معنی است که باید ساعت را $۱۰/۱^{۲}$ دور بچرخانیم. این عدد بسیار نزدیک به ۱۰۲ دور کامل است – یعنی دوباره ساعتمان دور کامل زد. ما باید این ساعت را با دوتای قبلی جمع بزنیم که باعث می‌شود عقربه ما بزرگ‌تر شود. همین‌طور که ادامه دهیم، ساعتی نیز بین نقاط ① و ② قرار خواهد داشت که ۱۰۱ دور کامل خواهد زد که دوباره طول عقربه ساعت نهایی‌مان را افزایش خواهد داد. حال اگر ما دوباره بین این دو نقطه جدید نیز ساعتی قرار دهیم، این بار به ساعتی می‌رسیم که باید آن را ۱۰۰/۵ دور بچرخانیم تا به برسانیم. یعنی پس

از انتقال، عقربه ساعت جدید ما عدد ۶ را نشان خواهد داد و اگر این ساعت جدید را با قبلی‌ها جمع بزنیم، طول عقربه نهایی را کاهش خواهد داد. کمی تفکر شما را قانع خواهد کرد که گرچه ساعت‌های روی نقاط ①،② و ③ پس از جابجایی، روی عدد ۱۲ قرار خواهند گرفت و گرچه اعداد وسطی بازه‌های ①-② و ②-③ نیز همین خاصیت را خواهند داشت، اما نقاطی که به فاصله $\frac{۱}{۴}$ و $\frac{۳}{۴}$ از دو بازه ذکرشده قبلی قرار دارند پس از انتقال، عقربه ساعتشان بر روی ۶ قرار خواهد گرفت. درمجموع عقربه ۵ تا از ساعت‌هایمان به سمت بالا و ۴ تایشان به سمت پایین قرار گرفته است. زمانی که ما این ساعت‌ها را جمع بزنیم، ساعتی در X به دست خواهیم

آورد عقربه کوچکی دارد، زیرا تقریباً تمامی ساعت‌ها همدیگر را خنثی کرده‌اند.

زمانی که ما کل نقاط مابین ① و ③ را لحاظ کنیم، این "خنثی شدن ساعت‌ها" مفهوم واقعی‌تری به خود می‌گیرد. مثلاً در همان بازه ①-② عددی که به میزان $\frac{۱}{۸}$ اندازه این بازه از ① قرار داشته باشد، پس از انتقال عقربه‌اش روی ۹ قرار خواهد گرفت و برای $\frac{۳}{۸}$ نیز عقربه به روی ۳ می‌رود – یعنی دوباره این دو ساعت همدیگر را خنثی خواهند کرد. نهایتاً ساعت‌هایی که از نقطه‌ای در داخل مجموعه به نقطه X حرکت می‌کنند (تمامی مسیرها را طی می‌کنند)، همدیگر را خنثی می‌کنند. این خنثی‌سازی در راست‌ترین قسمت شکل

نشان داده شده است. فلش‌ها نشان‌دهنده عقربه‌های ساعت‌هایی هستند که از نقاط مختلف مجموعه اولیه به X رسیده‌اند. اثر خالص جمع‌بندی این فلش‌ها با یکدیگر این است که همدیگر را خنثی می‌سازند. دانستن این نکته حیاتی است.

مجدداً بگوییم، ما نشان دادیم که با داشتن مجموعه به‌اندازه کافی بزرگ از ساعت‌ها و نقطه X به‌اندازه کافی دور، برای هر ساعتی که پس از رسیدن به X عدد ۱۲ را نشان بدهد، ساعتی نیز وجود دارد که حین رسیدن، عدد ۶ را نشان می‌دهد و ساعت قبلی را خنثی می‌کند. برای هر ساعتی که حین رسیدن، عقربه‌اش بر روی ۳ باشد، ساعتی نیز خواهد رسید که عقربه‌اش بر روی ۹ است و خنثی خواهند شد و به

همین ترتیب. این خنثی‌سازی کلی به‌خوبی نشان می‌دهد که هیچ شانسی برای یافت ذره‌ای در فاصله X وجود ندارد. این بسیار جالب و امیدوارکننده به نظر می‌رسد، زیرا شبیه به توضیح ذره‌ای به نظر می‌رسد که حرکت نمی‌کند. گرچه ما ابتدای مطلب را این‌گونه آغاز کردیم که یک ذره از نقطه‌ای که در آن قرار دارد، پس از چند لحظه می‌تواند در تمامی جهان قرار بگیرد، اما حال فهمیدیم که اگر با مجموعه‌ای از ساعت‌ها شروع کنیم، چنین اتفاقی نمی‌افتد. برای یک مجموعه ساعت، چون ساعت‌ها باهم تداخل دارند، ذره این شانس را ندارد که در فاصله دوری از مکان قبلی‌اش، قرار بگیرد. به زبان جیمز

بینی[1]، استاد دانشگاه استنفورد، نتیجه این بحث مانند "همهمه‌ای از تداخلات کوانتومی است".

برای تشکیل همهمه تداخل کوانتومی و متعاقباً خنثی‌سازی ساعت‌های آن‌ها، نقطه X باید به‌اندازه‌ای از مجموعه اولیه ساعت‌ها دور باشد که ساعت‌ها زمانی کافی برای چندین بار گردش را داشته باشند. چرا؟ زیرا اگر نقطه X خیلی نزدیک باشد، در آن صورت ساعت‌ها لزوماً این شانس را نخواهند داشت که یک دور کامل را بزنند و این یعنی فرایند خنثی‌سازی به‌خوبی صورت نخواهد گرفت. برای مثال فرض کنید فاصله نقطه X از نقطه ①، به‌جای ۱۰ برابر با ۰/۳

[1] . James Binney

باشد. حال ساعت قرارگرفته در ابتدای مجموعه چرخش کمتری نسبت به گذشته خواهد یافت – به میزان $۰/۰۹=۰/۳^۲$ دور که می‌شود اندکی جلوتر از عدد ۱ بر روی ساعت است. مشابه با همین، ساعت رسیده از نقطه ③ در انتهای مجموعه برابر با $۰/۲۵=۰/۵^۲$ دور خواهد چرخید که عقربه آن ساعت هم عدد ۳ را بر روی ساعت نشان خواهد داد. متعاقباً پس از رسیدن ذره ما از نقاط داخل مجموعه به نقطه X، عقربه‌هایشان عددی بین ۱ الی ۳ را بر روی ساعت نشان خواهند داد که این یعنی آن‌ها همدیگر را خنثی نکرده و در عوض باهم جمع شده و جهت عقربه را به نزدیکی‌های عدد ۲ خواهد برد. مفهوم تمامی این گفته‌ها این است که احتمال خوبی برای حضور ذره در نزدیکی‌ها، اما خارج از مجموعه

اولیه‌اش وجود دارد. منظور از "نزدیکی‌ها"، مکان‌هایی است که در آن‌ها ساعت‌ها نتوانند یک دور کامل را بزنند. به نظر کمی بحث اصل عدم قطعیت شروع به خودنمایی کرده است، اما مطلب هنوز گنگ است و ما دقیقاً باید منظورمان از مجموعه اولیه "به‌اندازه کافی بزرگ" و نقطه "به‌اندازه کافی دور" را شرح دهیم.

با توجه به گفته‌های دیراک و فاینمن، گمان اول ما بر این بود که زمانی که ذره‌ای به جرم m در زمان t به فاصله x جهش می‌کند، میزان چرخش عقربه ساعت‌ها باید متناسب با کنش باشد؛ یعنی میزان این چرخش باید با mx^2/t متناسب باشد. اگر بخواهیم به‌طور واقعی اعداد را به دست آوریم، گفتن اینکه مقدار چرخش باید "متناسب باشد" کافی نیست. ما باید

دقیقاً بدانیم که میزان چرخش چقدر باید باشد. در فصل ۲ ما قانون گرانش نیوتون را به بحث گذاشتیم و برای انجام پیش‌بینی‌های عددی ثابت گرانش نیوتون را معرفی کردیم که شدت نیروی گرانش را تعیین می‌کرد. با اضافه کردن ثابت نیوتون، اعداد می‌توانستند وارد معادله شوند و اتفاقات واقعی را محاسبه کنند، مثلاً دوره تناوب ماه یا مسیر طی شده توسط فضاپیمای وویجر ۲ در عرض منظومه شمسی. ما اکنون چیز مشابهی را برای مکانیک کوانتومی نیاز داریم – ثابتی از طبیعت که "مقیاس را تنظیم کند" و به ما اجازه دهد که با استفاده از کنش، ادعای دقیقی را درباره میزان چرخش ساعت‌ها وقتی‌که بخواهیم در زمان مشخصی از موقعیت

اولیه‌شان آن‌ها را جابجا کنیم، مطرح کنیم. آن ثابت، ثابت پلانک است.

تاریخچه مختصری از ثابت پلانک

در طی یک سلسله نبوغ تخیلاتی در عصر روز هفتم اکتبر سال ۱۹۰۰، ماکس پلانک توانست نحوه تابش انرژی اجسام داغ را شرح دهد. در طی نیمه دوم قرن نوزدهم، رابطه دقیق بین توزیع طول‌موج‌های نور ساطعه از اجسام داغ و دمای آن‌ها یکی از معماهای بزرگ فیزیک بود. هر جسم داغی از خود نور ساطع می‌کند و هرقدر که دما افزایش می‌یابد، مشخصات نور ساطعه نیز تغییر می‌کند. ما با نور مرئی آشنایی داریم و آن‌ها را با رنگ‌های رنگین‌کمان می‌شناسیم، اما نور

می‌تواند طول‌موجی کوتاه‌تر یا بلندتر داشته باشد که برای چشم انسان مرئی نباشد. نوری که طول‌موجش بلندتر از نور قرمز باشد، "مادون‌قرمز[۱]" (فروسرخ) نامیده می‌شود و می‌توان آن را با استفاده از دوربین‌های دید در شب مشاهده کرد. طول‌موج‌های بلندتر از آن به امواج رادیویی مربوط می‌شوند. مشابه با آن، نوری که طول‌موجش از آبی کوتاه‌تر باشد، "ماورای بنفش[۲]" (فرابنفش) نامیده می‌شود و کوتاه‌ترین طول‌موج‌ها را با عنوان "امواج گاما[۳]" می‌شناسیم. یک ذغال خاموش در دمای اتاق از خود امواجی ساطع می‌کند که در محدوده مادون‌قرمز طیف قرار دارند. زیرا با افزایش دمای

[1] . Infra-Red
[2] . Ultra-Violet
[3] . Gamma Radiations

ذغال، طول‌موج ساطعه از آن نیز افزایش می‌یابد و نهایتاً به محدوده‌ای وارد می‌شود که چشم ما می‌تواند ببیند. قانون به این صورت است که هرقدر جسمی داغ‌تر باشد، طول‌موج کوتاه‌تری ساطع می‌کند. با افزایش دقت اندازه‌گیری‌ها در آزمایشات در قرن نوزدهم، مشخص شد که هیچ‌کس فرمول ریاضی دقیقی برای توصیف این قبیل مشاهدات ندارد. این مسئله معمولاً با عنوان "مسئله جسم سیاه[1]" بیان می‌شود، زیرا فیزیکدانان به اجسام ایده آلی که کاملاً تابش‌ها را جذب کرده و دوباره می‌تابانند، "اجسام سیاه" می‌گفتند. این مسئله بسیار مهم بود، زیرا ما را از فهم مشخصات نوری که از اجسام تابیده می‌شد، ناتوان می‌ساخت.

[1] . Black Body Problem

پلانک قبل از اینکه استاد فیزیک نظری در دانشگاه برلین شود، در این مورد و موارد مرتبط با آن در زمینه‌های ترمودینامیک و الکترومغناطیس، بسیار اندیشیده بود. این پست قبل از او به بولتزمان[1] و هرتز[2] نیز پیشنهاد شده بود که هر دو رد کرده بودند. این قضیه کاملاً اتفاقی بود، زیرا برلین در آن زمان مرکز مطالعات آزمایشگاهی درباره تابش جسم سیاه بود و غرق شدن پلانک در اعماق کار آزمایشگاهی، کلیدی شد تا او نظریه متعاقبش را با نبوغ و تلاش فراوان به دست آورد. فیزیکدانان معمولاً بهترین ایده‌ها را زمانی

[1] . Boltzmann
[2] . Hertz

می‌دهند که بحثی کاملاً آزاد و بدون برنامه با همکارانشان داشته باشند.

ما زمان الهام [نظریه] پلانک را دقیقاً با تاریخ و ساعتش می‌دانیم چون او و خانواده‌اش عصر روز هفتم اکتبر ۱۹۰۰ را با همکارش هاینریش روبنز[1] می‌گذراندند. در طول ناهار آن‌ها درباره اشکالات مدل‌های نظری روز برای تشریح جزئیات تابش جسم سیاه بحث می‌کردند. هنگام عصر، پلانک در پشت یک کارت‌پستال باعجله فرمولی نوشت و به روبنز فرستاد. ازقضا این فرمول کاملاً درست اما واقعاً عجیب بود. پلانک بعدها ماجرا را این‌گونه شرح داد که "از سر ناچاری" و پس از

[1] . Heinrich Rubens

امتحان تمام روش‌های ممکن دیگر که به ذهنش رسیده بود، به این فرمول دست یافته بود. جداً هنوز مبهم است که پلانک چگونه به این فرمول دست‌یافت. در زندگینامه عالی آلبرت انیشتین، *خدا زیرک است*[1]، آبراهام پایس[2] می‌نویسد: " استدلال او دیوانه‌وار بود، اما جنون او از آن جنس الهامات غیبی بود که تنها توسط شخصیت‌های انقلابی وارد علم می‌شود". پیشنهاد پلانک همزمان غیرقابل توضیح و انقلابی بود. او فهمید که می‌تواند طیف جسم سیاه را تنها در صورتی توجیه کند که فرض کند انرژی ساطعه از نور از تعداد زیادی "بسته" های انرژی تشکیل شده باشد. به‌عبارت‌دیگر کل

[1] . Subtle is the Lord
[2] . Abraham Pais

انرژی به واحدهای بنیادی جدیدی کوانتیده می‌شد (گسسته می‌شد) که باید یکی از ثوابت طبیعت می‌بودند و پلانک آن‌ها را " کوانتوم کنش[1]" نامید. امروزه ما آن را ثابت پلانک می‌نامیم.

چیزی که فرمول پلانک به‌طور ضمنی اشاره می‌کند، که البته خود او در آن زمان نفهمیده بود، این بود که نور *همواره* در بسته‌ها یا کوانتا ها تابیده‌شده یا جذب می‌شود. به نمادهای امروزی این بسته‌ها انرژی‌ای معادل $E=hc/\lambda$ دارند که λ طول‌موج نور است (و به‌صورت لامبدا (لاندا) تلفظ می‌شود)، c سرعت نور است و h ثابت پلانک. نقش ثابت پلانک در این

[1] . The Quantum of Action

معادله، ضریب تبدیل بین طول‌موج نور و انرژی کوانتوم مرتبط با آن است. فهم این مطلب که گسسته بودن انرژی نور تابیده‌شده، همان‌طور که پلانک مشخص کرد، ناشی از ذره‌ای بودن خود نور است، در ابتدا به‌صورت تجربی توسط آلبرت انیشتین پیشنهاد شده بود. او این پیشنهاد را در سال ۱۹۰۵ که فوران خلاقیتش بود ارائه داد – سالی که معروف به سال معجزه[1] است که در آن سال نظریه نسبیت خاص و معروف‌ترین رابطه تاریخ فیزیک یعنی $E=mc^2$ را نیز ارائه داد. انیشتین جایزه نوبل فیزیک سال ۱۹۲۱ را از آن خود کرد (که به خاطر کاغذبازی‌های محرمانه کمیته نوبل، در سال ۱۹۲۲ به او داده شد) که این جایزه به خاطر کارهای او در

[1] . Annus Mirabilis

رابطه با اثر فوتوالکتریک بود، نه نظریه‌های معروف‌تر نسبیتش. انیشتین پیشنهاد داد که نور را می‌توان به‌عنوان جریانی از ذرات در نظر گرفت (او در آن زمان از واژه "فوتون" استفاده نکرد) و او به‌درستی فهمید که انرژی هرکدام از ذرات نسبت معکوسی با طول‌موج نور دارد. این فرض انیشتین، منبع یکی از بزرگ‌ترین و معروف‌ترین پارادوکس‌های در نظریه کوانتوم شد – ذرات مانند امواج رفتار می‌کنند و برعکس.

پلانک با نشان دادن این مطلب که نور ساطعه از اجسام داغ تنها زمانی قابل توجیه است که آن را بتوان در کوانتاها تاباند، اولین آجرها را از زیر پایه‌های دیدگاه ماکسول از نور برداشت. این انیشتین بود که آجرهایی را برداشت که کل عمارت فیزیک کلاسیک فروریخت. تفسیر او از اثر فوتوالکتریک

نیازمند این بود که نه‌تنها نور در بسته‌های کوچکی ساطع شود، بلکه با ماده نیز به شکل بسته‌های متمرکز اندرکنش داشته باشد. به‌عبارت‌دیگر نور واقعاً رفتاری شبیه به جریانی از امواج داشته باشد.

این ایده که نور از ذرات تشکیل‌شده – یا به‌بیان‌دیگر "میدان الکترومغناطیسی کوانتیده است" – بسیار بحث‌برانگیز شد و دهه‌ها پس از پیشنهاد انیشتین پذیرفته نشد. بی‌میلی همکاران انیشتین برای پذیرفتن ایده فوتون را می‌توان در پیشنهادی – که پلانک نیز در نوشتن آن سهیم بود- که برای عضویت انیشتین در آکادمی معتبر پروسی در سال ۱۹۱۳ نوشته شده بود مشاهده کرد؛ هشت سال تمام پس از معرفی فوتون توسط انیشتین:

درمجموع می‌توان گفت از میان بزرگ‌ترین مسائل فیزیک که فیزیک مدرن سرشار از آن‌هاست، تعداد کمی‌شان هستند که انیشتین در آن‌ها سهم مهمی ایفا نکرده. زیرا او گاهی اوقات حین تفکرات عمیق، مسیرش را گم می‌کند، مثلاً در پیشنهاد او درباره کوانتای نور، نمی‌توان خیلی هم به او بدبین بود زیرا به‌هرحال بدون ریسک‌پذیری نمی‌توان ایده‌های جدید را حتی در علومِ قطعی معرفی کرد.

به‌عبارت‌دیگر، کسی باورش نمی‌شد که فوتون‌ها واقعی باشند. اعتقاد بر این است که پلانک در حاشیه امنی بود، زیرا پیشنهاد او بیشتر درباره مشخصات مواد بود – نوسانگرهایی (مولدهایی) که نور تولید می‌کردند – تا اینکه درباره خود نور باشد. بسیار دشوار می‌نمود که نظریه‌ای از ذرات را جایگزین معادلات زیبای موج ماکسول کنیم.

ما این تاریخچه را تقریباً به این دلیل بیان کردیم که با دشواری‌های پذیرفتن نظریه کوانتوم آشنا شوید. غیرممکن است که بتوانید چیزی درباره این نظریه را تصور کنید، مثلاً یک الکترون یا فوتون که اندکی مانند ذره رفتار می‌کنند، اندکی مانند موج و اندکی مانند هیچ‌کدام. انیشتین تا آخر عمرش درگیر همین مسائل بود. در سال ۱۹۵۱، درست ۴ سال قبل از مرگش، او نوشت: "تمامی این پنجاه سال تفکر مرا اندکی نیز نزدیک به پاسخ این سؤال نکرد که کوانتای نور چیست؟"

شصت سال بعد، چیزی که واضح است این است که نظریه‌ای که ما اکنون در حال توسعه‌اش با استفاده از آرایه‌ای از ساعت‌های کوچک هستیم، با دقتی خدشه‌ناپذیر تمامی

آزمایشاتی که تاکنون برای آزمودن آن طرح شده است را توضیح داده است.

بازگشت به اصل عدم قطعیت هایزنبرگ

مطالبی که گفتیم، تاریخچه معرفی ثابت پلانک بود. اما برای اهداف ما، مهم‌ترین نکته قابل‌توجه این است که ثابت پلانک واحدی از "کنش" است؛ یعنی نوع این کمیت برابر با همان کمیتی است که ما در چرخش ساعت‌هایمان استفاده می‌کردیم. مقدار ثابت پلانک (آخرین مقدار به‌دست‌آمده) برابر است با $۶/۶۲۶۰۶۹۵۷۲۹ \times ۱۰^{-۳۴}$ $kg\ m^۲/s$ که با هر معیاری که مقایسه کنیم، بسیار کوچک است. به همین دلیل است که

ما تأثیرات همه‌جانبه آن را در زندگی روزمره‌مان متوجه نمی‌شویم.

به خاطر آورید که ما کنش مرتبط با ذره‌ای که از جایی به جای دیگر می‌پرد را به‌صورت جرم آن ذره ضرب‌در فاصله جهشش به توان دو تقسیم‌بر بازه زمانی‌ای که جهش در آن اتفاق افتاده است، تعریف کردیم. واحد این کمیت برابر با $kg\ m^2/s$ است که مشابه با واحد ثابت پلانک است و اگر ما این کنش را تقسیم‌بر ثابت پلانک کنیم، واحدها همدیگر را خنثی کرده و به اعداد خالصی دست پیدا می‌کنیم. به قول فاینمن، این عدد خالص، مقداری است که باید برای جهش ذره از جایی به جای دیگر، ساعت را بچرخانیم. برای مثال اگر

این عدد ۱ باشد، به معنی ۱ دور کامل است و اگر عدد $\frac{۱}{۲}$ باشد، یعنی نیم دور و به همین ترتیب. به‌طور نمادین، مقدار دقیقی که باید عقربه‌های ساعت را برای یافتن احتمال جهش ذره به فاصله x در زمان t، بچرخانیم برابر است با $mx^۲/(۲ht)$. دقت کنید که ضریب $\frac{۱}{۲}$ وارد معادله شد. شما می‌توانید آن را به این صورت تصور کنید که این عدد برای توافق با آزمایشات وارد معادله شده، یا اینکه با توجه به تعریف کنش خود را نشان داده است. هر دو قابل‌قبول است. حال که ما مقدار ثابت پلانک را می‌دانیم، واقعاً می‌توانیم مقدار چرخش را محاسبه کنیم و به مطلبی که قبلاً ذکر شده بود، پاسخ دهیم. یعنی مفهوم جهش به میزان "۱۰" واحد دقیقاً یعنی چه؟

بیایید ببینیم نظریه ما درباره چیزی که نسبت به تمامی استانداردهای روزمره‌مان کوچک است چه می‌گوید: یک‌دانه ماسه. نظریه مکانیک کوانتومی‌ای که ما توسعه دادیم می‌گوید اگر ما دانه ماسه‌ای را در جایی قرار دهیم، در لحظات بعد این دانه *می‌تواند* در هرجایی از جهان قرار داشته باشد. اما به‌واقع این چیزی نیست که برای دانه‌های ماسه اتفاق بی افتد. ما تاکنون راهی را برای فرار از این مشکل بالقوه یافته‌ایم، زیرا اگر به میزان کافی بین ساعت‌هایی که متناظر با جهش دانه ماسه از نقاط اولیه مختلف هستند، تداخل وجود داشته باشد، آن‌ها همدیگر را خنثی کرده و ماسه را در جای خود باقی می‌گذارند. اولین سؤالی که باید پاسخ دهیم این است که: اگر ما ذره‌ای به جرم دانه ماسه را به فاصله‌ای مثلاً ۰/۰۰۱

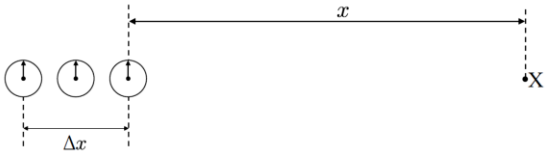
میلی‌متر در زمان یک ثانیه انتقال دهیم، عقربه ساعت‌ها را چقدر باید بچرخانیم؟ ما نمی‌توانیم چنین فاصله ریزی را ببینیم، اما در مقیاس اتمی، این فاصله بسیار بزرگ است. شما می‌توانید این محاسبات را به‌سادگی با استفاده از واردکردن اعداد به قانون چرخش فاینمن انجام دهید. جواب تقریباً معادل با صدها میلیون سال چرخش ساعت است. تصور کنید که عددی به این میزان، چقدر می‌تواند تداخل ایجاد کند. خلاصه کلام اینکه دانه ماسه سر جای خودش باقی‌مانده و تقریباً هیچ احتمالی وجود ندارد که به مکان قابل‌تشخیصی بپرد، گرچه ما برای رسیدن به این نتیجه باید این احتمال را در نظر می‌گرفتیم که ماسه به‌طور مخفیانه‌ای به تمام نقاط دنیا جهش کرده است.

این نتیجه بسیار مهمی است. اگر شما در معادله عددگذاری کرده باشید خواهید فهمید که چرا این‌گونه است؛ علت این مسئله، کوچک بودن ثابت پلانک است. این عدد به‌صورت کامل به شکل زیر است:

۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۶۶۲۶۰۶۹۵۷۲۹ kgm^2/s

هر عدد روزمره‌ای را بر عدد بالا تقسیم کنید، باعث ایجاد مقدار بسیار زیادی چرخش در ساعت‌ها می‌شود و که متعاقب آن، تداخلات را بیشتر می‌کند و نهایتاً سفر عجیب ماسه به اقصا نقاط جهان را خنثی می‌کند. ما این سفر در فضای بیکران را به‌صورت ماسه‌ای ساکن در کنار ساحل می‌بینیم.

البته علاقه ما بیشتر معطوف به شرایطی است که در آن ساعت‌ها همدیگر را خنثی نکرده و همان‌طور که دیدیم این اتفاق زمانی می‌افتد که ساعت‌ها بیشتر از یک دور نزنند. در آن حالت، آن تداخلات (که منجر به حذف می‌شوند) اتفاق نمی‌افتد. بیایید به‌طور عددی ببینیم این گفته‌هایمان یعنی چه.



شکل ۴-۴: مشابه با شکل ۳-۴ اما با این تفاوت که این بار عرض مجموعه اولیه ساعت‌ها و همچنین فاصله X را محدود به عدد خاصی نکردیم.

ما به مجموعه ساعت‌هایی که در شکل ۴-۴ رسم کرده‌ایم باز خواهیم گشت، اما این بار تحلیلمان انتزاعی‌تر خواهد بود و با اعداد قطعی سروکار نداریم. ما فرض خواهیم کرد که طول مجموعه برابر با Δx و فاصله نزدیک‌ترین قسمت مجموعه تا نقطه X برابر با x است. در این حالت، Δx برابر با عدم قطعیتی خواهد بود که ما درباره موقعیت اولیه ذره داریم؛ ذره در جایی داخل مجموعه‌ای به طول Δx شروع کرده است. با شروع از نقطه ① که نزدیک‌ترین نقطه به X است، ما باید برای جهش از این نقطه به X، ساعت را به میزان زیر بچرخانیم:

$$W_۱ = \frac{mx^۲}{۲ht}$$

حال بیایید به دورترین نقطه، یعنی نقطه ③ برویم. زمانی که بخواهیم ساعت را از این نقطه به X انتقال دهیم، این ساعت میزان چرخش بیشتری خواهد داشت، یعنی:

$$W_۳ = \frac{m(x + \Delta x)^۲}{۲ht}$$

حال ما می‌توانیم دقیق‌تر شده و شرایطی را بیابیم که در آن همه ساعت‌های پراکنده‌شده از مجموعه، همدیگر را در X خنثی نکنند: بین ساعت‌های ① و ③ باید کمتر از یک دور چرخش ساعت اتفاق بی افتد، یعنی:

$$W_۳ - W_۱ < \text{یک دور}$$

که اگر این را به شکل کامل بنویسیم می‌شود:

$$\frac{m(x+\Delta x)^۲}{۲ht} - \frac{mx^۲}{۲ht} < ۱$$

حال ما شرایط خاصی را در نظر خواهیم گرفت که در آن عرض مجموعه Δx، بسیار کوچک‌تر از فاصله x باشد. یعنی می‌خواهیم ببینیم اگر ذره قصد جهش به فاصله بسیار دوری از محدوده اولیه‌اش داشته باشد، چه اتفاقی می‌افتد. در این حالت، شرایطی که ساعت‌ها همدیگر را خنثی نکنند، مستقیماً از معادله قبل به شکل زیر می‌شود:

$$\frac{mx\Delta x}{ht} < ۱$$

اگر شما اندکی ریاضی بدانید، می‌توانید این معادله را با بسط عبارت داخل پرانتز و حذف عباراتی که $\Delta x^۲$ دارند به دست آورید. این حرکت درستی است، زیرا ما فرض کردیم که Δx نسبت به x بسیار کوچک است و مجذور یک عدد کوچک، بسیار کوچک‌تر می‌شود [و آن را برابر با صفر قرار می‌دهیم].

این معادله مربوط به حالتی است که در آن هیچ‌گونه خنثی‌سازی ساعت‌ها در X اتفاق نمی‌افتد. می‌دانیم که اگر ساعت‌ها در نقطه خاصی خنثی نشوند، احتمال خوبی وجود دارد که ما بتوانیم ذره را در آنجا بیابیم. پس ما کشف کردیم

درصورتی‌که معادله بالا ارضا شود، اگر ذره‌ای در ابتدا در محدوده‌ای به‌اندازه Δx قرار داشته باشد، درزمانی به‌اندازه t، احتمال خوبی وجود دارد که آن را در فاصله x از محدوده اولیه بیابیم. علاوه بر این، این فاصله با زمان افزایش پیدا می‌کند، زیرا در فرمول ما، آن را تقسیم‌بر t می‌کنیم. به‌عبارت‌دیگر هرقدر زمان بیشتری بگذرد، احتمال حضور ذره در فاصله‌ای دورتر از محدوده اولیه‌اش بیشتر می‌شود. همچنین دقت کنید که هرقدر ما اندازه محدوده Δx را کوچک‌تر کنیم - یعنی هرقدر عدم قطعیت درباره مکان اولیه ذره کمتر باشد- احتمال یافت ذره در فاصله بسیار دور، بیشتر می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، هرقدر ما بتوانیم مکان اولیه ذره را دقیق‌تر مشخص کنیم، آن ذره سریع‌تر از جای اولیه‌اش

می‌پرد. حال این بیشتر شبیه به اصل عدم قطعیت هایزنبرگ شد.

به‌عنوان حرکت پایانی، بیاید اندکی شکل معادله را تغییر دهیم. دقت کنید برای اینکه یک ذره از هر نقطه‌ای در محدوده اولیه بتواند در زمان t خود را به نقطه X برساند، باید مسیر x را طی کند. اگر شما واقعاً ذره را در X اندازه‌گیری کرده باشید، طبیعتاً سرعت ذره را برابر با x/t به دست خواهید آورد. ضمناً به یاد آورید که جرم ضرب‌در سرعت ذره، تکانه آن ذره است، پس کمیت mx/t، تکانه محاسبه‌شده ذره می‌باشد. حال می‌توانیم پیش روی کرده و معادله را به‌صورت زیر ساده کنیم:

$$\frac{p\Delta x}{h} < ۱$$

که p همان تکانه است. پارامترهای این معادله را می‌توان جابجا کرده و به‌صورت زیر نوشت:

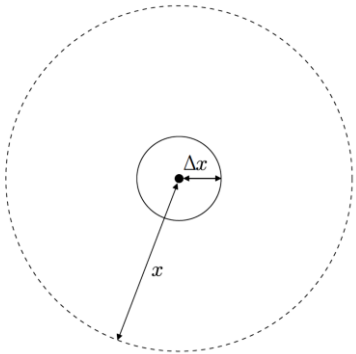
$$p\Delta x < h$$

و این آن‌قدر مهم است که ارزش بحث بیشتری دارد، زیرا بسیار شبیه به اصل عدم قطعیت هایزنبرگ است.

این پایان قسمت ریاضی ما تا اینجاست، و اگر شما به‌دقت آن را دنبال نکرده‌اید، ازاینجا به بعد بحث با ما همگام شوید.

اگر ما با ذره که در حبابی به‌اندازه Δx قرار دارد آغاز کنیم، همین‌الان کشف کردیم که پس از گذر اندکی زمان، می‌توان

آن را در حبابی به‌اندازه Δx یافت. این موقعیت در شکل ۵-۴ نشان داده شده است.



شکل ۵-۴: محدوده اولیه در طول زمان رشد می‌کند و این متناظر است با ذره‌ای که در ابتدا مکان متمرکزی داشته اما با گذر زمان، پراکنده می‌شود.

به بیان دقیق‌تر، یعنی اگر ما در ابتدا دنبال ذره باشیم، احتمال بیشتری برای یافت ذره در حباب داخلی وجود دارد. اگر اندازه‌گیری نکرده و اندکی صبر کنیم، احتمال یافت ذره در حباب بزرگ‌تر بیشتر می‌شود. یعنی ذره می‌تواند از موقعیتی داخل حباب کوچک وارد موقعیتی در حباب بزرگ‌تر شود. البته الزامی به حرکت وجود ندارد و هنوز هم احتمال حضور ذره در محدوده کوچک‌تر Δx وجود دارد. اما این احتمال هم وجود دارد که اندازه‌گیری نشان دهد ذره فراتر از مرز حباب بزرگ‌تر قرار داشته باشد. اگر این حالت نادر (شدید) توسط اندازه‌گیری مشخص شود، می‌توانیم نتیجه‌گیری کنیم ذره، در حال حرکت با تکانه‌ای است که توسط رابطه به‌دست‌آمده توسط ما به دست می‌آید (و اگر شما

ریاضیات ارائه‌شده را دنبال نکرده باشید، باید در این قسمت به ما اعتماد کنید)، یعنی $p=h/\Delta x$.

حال می‌توانیم دوباره از ابتدا شروع کنیم و همه‌چیز را دقیقاً مانند قبل تنظیم کنیم که ذره در حباب کوچکی به‌اندازه Δx قرار داشته باشد. حین اندازه‌گیری ذره، ما احتمالاً ذره را در حباب بزرگ‌تری بیابیم و نه مرز شدید، و بنابراین نتیجه بگیریم که تکانه‌اش کوچک‌تر از مقدار شدید می‌باشد.

اگر ما این آزمایش را به‌طور مکرر انجام دهیم، پس از اندازه‌گیری تکانه ذره‌ای که از محدوده کوچکی به‌اندازه Δx شروع کرده است، به‌طورمعمول باید اعدادی را در محدوده صفر تا مقدار شدید $h/\Delta x$ به دست آوریم. گفتن این جمله که

"در صورت تکرار آزمایش، من پیش‌بینی می‌کنم که شما تکانه را بین صفر و $h/\Delta x$ به دست آورید" به این معنی است که "تکانه ذره عدم قطعیتی به‌اندازه $h/\Delta x$ دارد". دقیقاً مانند عدم قطعیتی که در اندازه‌گیری موقعیت وجود داشت، فیزیکدان‌ها نماد Δp را برای این عدم قطعیت اختصاص داده‌اند و می‌نویسند $\Delta p \Delta x \sim h$. علامت ~ نشان می‌دهد که حاصل‌ضرب عدم قطعیت در موقعیت و تکانه تقریباً برابر با ثابت پلانک است – ممکن است اندکی کوچک‌تر یا بزرگ‌تر باشد. با کمی ریاضیات محتاط‌تر می‌توانیم این معادله را به‌طور دقیق به دست آوریم. نتیجه، بستگی به جزئیات مجموعه اولیه ساعت‌ها دارد، اما دیگر نمی‌ارزد که برای به دست آوردنش

تلاش بیشتری کنیم، چون در همین حد که پیش رفتیم، با ایده‌های اصلی موردنیازمان آشنا شدیم.

این گزاره که عدم قطعیت موقعیت ذره ضرب‌در عدم قطعیت تکانه‌اش (تقریباً) برابر با ثابت پلانک است، احتمالاً آشناترین شکل اصل عدم قطعیت هایزنبرگ است. این اصل به ما می‌گوید با علم بر اینکه ذره در لحظه اول در محدوده‌ای قرار دارد، اندازه‌گیری موقعیت ذره در لحظه‌ای بعد نشان می‌دهد که ذره با تکانه‌ای در حال حرکت است که مقدارش را نمی‌توان دقیق‌تر از "عددی بین صفر و $h/\Delta x$" به دست آورد. به‌عبارت‌دیگر هرقدر ما با ذره‌ای شروع کنیم که اندازه محدوده‌اش کوچک‌تر و کوچک‌تر باشد، این ذره تمایل دارد که از آن محدوده به فاصله‌ای دورتر و دورتر بپرد. این خیلی

مهم است و می‌ارزد که برای بار سوم تأکید کنیم: هرقدر شما در لحظه‌ای موقعیت یک ذره را دقیق‌تر بدانید، دقتتان در دانستن سرعت حرکت آن ذره کم‌تر می‌شود و درنتیجه دقتتان در دانستن موقعیت بعدی ذره نیز کاسته می‌شود.

این دقیقاً بیان هایزنبرگ از اصل عدم قطعیت است. این اصل در قلب نظریه کوانتوم جای دارد، اما باید بدانیم که خود این گزاره هیچ‌گونه ابهامی ندارد. این گزاره درباره عدم توانایی ما برای ردیابی دقیق ذرات است، و در این زمینه مکانیک کوانتومی توانایی بیشتری نسبت به مکانیک نیوتونی ندارد. کاری که ما در چند صفحه آخر انجام دادیم، استخراج اصل عدم قطعیت هایزنبرگ از قوانین بنیادین فیزیک کوانتومی است که شامل قانون چرخش ساعت‌ها است، یعنی کوچک

کردن و جمع‌کردن ساعت‌ها. در حقیقت منشأ این اصل در این پیشنهاد نهفته است که یک ذره می‌تواند اندکی پس از اندازه‌گیری موقعیتش، در تمامی جهان قرار بگیرد. علت این پیشنهاد عجیب اولیه ما که ذره بتواند در هرجایی و همه جای جهان قرار داشته باشد ناشی از همهمه تداخل کوانتومی است و اصل عدم قطعیت به‌نوعی تمام آن چیزی ست که از همهمه اولیه باقی می‌ماند.

نکته مهمی وجود دارد که ما قبل از عبور از این مطلب، باید درباره تفسیر اصل عدم قطعیت بگوییم. ما نباید دچار این اشتباه شویم که فکر کنیم ذره واقعاً در یک نقطه مشخص قرار دارد و نیز اینکه فراوانی ساعت‌های اولیه نشان‌دهنده محدودیت ما در فهم آن است. اگر این‌گونه فکر کنیم،

نخواهیم توانست اصل عدم قطعیت را به‌درستی محاسبه کنیم، زیرا ما نخواهیم پذیرفت که باید ساعت‌ها را از تمامی نقاط ممکن داخل مجموعه اولیه به فاصله X انتقال دهیم و آن‌ها را باهم جمع ببندیم. انجام همین کار بود که برای ما نتیجه‌بخش بود، یعنی ما باید فرض کنیم، ذره با استفاده از جمع شدن مسیرهای زیادی، به X می‌رسد. ما بعداً از اصل هایزنبرگ در مثال‌های واقعی استفاده خواهیم کرد. فعلاً، در همین حد کفایت می‌کند که ما یکی از نتایج کلیدی نظریه کوانتوم را با استفاده از بازی ساده با ساعت‌های خیالی به دست آوردیم.

بیایید با اندکی عددگذاری، درک بهتری از مطلبمان به دست آوریم. چقدر باید صبر کنیم تا احتمالی قابل‌قبول برای جهش یک‌دانه ماسه به خارج از قوطی کبریت داشته باشیم؟

بیایید فرض کنیم که قوطی کبریت ابعادی ۳ سانتی‌متر در هر جهت داشته باشد و دانه ماسه جرمی برابر با ۱ میکروگرم داشته باشد. به خاطر آورید شرایطی که در آن احتمال قابل قبولی برای جهش دانه ماسه به فاصله مشخصی وجود داشته باشد، با معادله زیر مشخص می‌شود:

$$\frac{mx\Delta x}{ht} < ۱$$

که Δx برابر با اندازه قوطی کبریت است. بیایید حساب کنیم که t چقدر باید باشد تا دانه ماسه به فاصله ۴ سانتی‌متری جهش کند که از ابعاد قوطی بزرگ‌تر است. با انجام محاسبات جبری ساده ما به دست خواهیم آورد:

$$t > \frac{mx\Delta x}{h}$$

و با عددگذاری خواهیم فهمید که t باید تقریباً بزرگ‌تر از $۱۰^{۲۱}$ ثانیه باشد. این عدد برابر با ۶×۱۰^{۱۳} سال است که بیش از ۱۰۰۰ برابر سن کنونی جهان است. پس اتفاق نمی‌افتد. مکانیک کوانتومی عجیب است، اما نه آن‌قدر که اجازه دهد یک‌دانه ماسه بدون دلیل به بیرون از قوطی کبریت بپرد.

برای نتیجه‌گیری از این فصل و آماده‌سازی برای فصل بعد، ما یک مشاهده نهایی انجام خواهیم داد. به دست آوردن اصل عدم قطعیت بر پایه ساختار ساعت‌هایی بود که در شکل ۴-۴ نشان داده شده‌اند. خصوصاً ما مجموعه اولیه‌ای از ساعت‌ها را چیدیم که همگی هم‌اندازه بوده و زمان یکسانی را نشان

می‌دادند. این چیدمان خاص مربوط به ذره‌ای می‌شود که در ابتدا به‌طور ساکن درون محدوده مشخصی از فضا می‌شود – مثلاً یک‌دانه ماسه درون یک قوطی کبریت. گرچه ما کشف کردیم که احتمالاً ذره ساکن نخواهد ماند، این را نیز فهمیدیم که برای اجسام بزرگ – مانند دانه ماسه آن‌قدر که ازلحاظ کوانتومی بسیار بزرگ است – این حرکت کاملاً غیرقابل مشاهده است. پس در نظریه ما مقداری حرکت وجود دارد، اما این حرکت برای اجسام به‌اندازه کافی بزرگ نامحسوس است. به‌وضوح ما به مطلب نسبتاً مهمی توجه نکردیم، زیرا اجسام بزرگ واقعاً حرکت می‌کنند و به یادآورید که نظریه کوانتوم، نظریه‌ای برای تمام اجسام ریزودرشت است. حال باید به این مشکل پاسخ دهیم: ما حرکت را چگونه توجیه می‌کنیم؟

فصل پنجم

توهم حرکت

در فصل قبل ما اصل عدم قطعیت هایزنبرگ را با در نظر گرفتن چیدمان اولیه‌ای از ساعت‌ها استخراج کردیم – یک مجموعه کوچکی از آن‌ها که طول عقربه یکسانی داشته و در جهت یکسانی قرار داشتند. ما فهمیدیم که این [مجموعه] نماینده ذره‌ای است که تقریباً ثابت است، گرچه قوانین کوانتومی اشاره می‌کنند که این ذره اندکی جنب‌وجوش دارد. این بار قصدمان چیدمان کاملاً متفاوتی است؛ می‌خواهیم ذره‌ای در حال حرکت را تشریح کنیم. در شکل ۱-۵ ما ساختار جدیدی از ساعت‌ها را نشان دادیم. دوباره، این

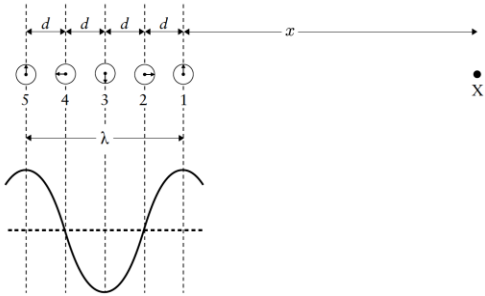
مجموعه‌ای از ساعت‌هاست که متناظر با ذره‌ای است که به‌طور اولیه در محدوده ساعت‌ها قرار دارد. مثل قبل، ساعتی که در موقعیت ① قرار دارد عدد ۱۲ را نشان می‌دهد، اما عقربه سایر ساعت‌های مجموعه همگی با مقادیر مختلفی به جلو چرخش یافته‌اند. ما این بار ۵ ساعت رسم کرده‌ایم، زیرا استدلال ما را شفاف‌تر می‌کند، بااین‌حال مانند گذشته ساعت‌هایی را نیز لابه‌لای آن‌هایی که کشیدیم، تصور خواهیم کرد – برای هر نقطه‌ای داخل مجموعه. بیایید قانون کوانتومی را مانند گذشته اعمال کنیم و این ساعت‌ها را به نقطه X که نقطه‌ای بسیار دورتر از مجموعه است انتقال دهیم و نهایتاً توضیح دهیم که چه راه‌هایی برای پریدن ذره از درون مجموعه به نقطه X وجود دارد.

در طی روندی که امیدواریم برای شما عادی شده باشد، بیایید ساعت روی نقطه ① را به نقطه X منتقل کنیم، و در طی انتقال، عقربه آن را نیز تغییر دهیم. این عقربه به میزان زیر خواهد چرخید:

$$W_{۱} = \frac{mx^{۲}}{۲ht}$$

حال بیایید ساعت نقطه ② را نیز به X انتقال دهیم. این ساعت اندکی دورتر است، مثلاً در حد d، پس چرخش آن نیز اندکی بیشتر خواهد بود:

$$W_{۲} = \frac{m(x+d)^{۲}}{۲ht}$$



شکل ۱-۵: مجموعه اولیه (که با ساعت‌های ۱ تا ۵ نشان داده شده است) از ساعت‌هایی تشکیل شده که هرکدام زمان متفاوتی را نشان می‌دهند – هرکدام از آن‌ها ۳ ساعت باهمسایگانشان اختلاف دارند. قسمت پایین تصویر تغییرات ساعت‌ها را در طول مجموعه نشان می‌دهد.

این دقیقاً کاری بود که در فصل پیش انجام دادیم، اما شما خواهید دید که اتفاق متفاوتی برای این پیکره‌بندی از ساعت‌ها اتفاق خواهد افتاد. ما سیستم را طوری چیدیم که ساعت ② در ابتدا نسبت به ساعت ① به میزان ۳ ساعت *جلو* کشیده شده است، یعنی از ساعت ۱۲ به ساعت ۳. اما برای انتقال ساعت② به X ما باید آن را به میزان بیشتری از ساعت ① به *عقب* بچرخانیم که به دلیل فاصله بیشتری به میزان d است که باید سفر کند. اگر ما طوری زمان ساعت‌های اولیه را بچینیم که میزان جلو افتادگی اولیه ساعت ②، برابر با میزان عقب‌افتادگی‌اش پس از انتقال به X باشد، در این حالت این ساعت پس از رسیدن به X دقیقاً عدد ساعت ① را نشان خواهد داد. این یعنی نه‌تنها خنثی‌سازی اتفاق

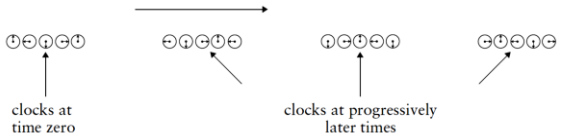
نمی‌افتد، بلکه این مقدار با ساعت ① نیز جمع شده و ساعت بزرگ‌تری را می‌سازد، که این هم به‌نوبه خود یعنی احتمال زیادی برای یافتن ذره در X وجود خواهد داشت. این کاملاً متفاوت از موقعیت همهمه تداخل کوانتومی بود که ما با ساعت‌هایی که عدد یکسانی را نشان می‌دادند، شروع کرده بودیم. حال بیایید ساعت③ را در نظر بگیریم که ما آن را ۶ ساعت نسبت به ساعت شماره ① جلو کشیده‌ایم. این ساعت باید فاصله اضافی ۲d را برای رسیدن به X بپیماید و دوباره به دلیل اختلاف‌زمانی، این ساعت موقع رسیدن بر روی عدد ۱۲ خواهد بود. اگر ما تمامی اتلافات زمانی را به همین صورت تنظیم کنیم، این اتفاق برای تمامی ساعت‌های داخل مجموعه

خواهد افتاد و تمامی ساعت‌ها به‌طور سازنده‌ای در نقطه X باهم جمع بسته می‌شوند.

این یعنی با احتمال بالایی ذره ما در لحظات بعد در نقطه X یافت خواهد شد. مسلماً نقطه X نقطه خاصی است، زیرا نقطه‌ای است که تمامی ساعت‌های مجموعه در آن نقطه برای یکسان شدن عددشان با یکدیگر هم‌پیمان می‌شوند. اما نقطه X تنها نقطه مخصوص نیست – تمامی نقاط سمت چپ X که فاصله‌ای برابر با طول مجموعه اولیه دارند نیز همین خصوصیت را از خود نشان می‌دهند که ساعت‌ها حین رسیدن به آنجا باهم جمع می‌شوند. برای دیدن این قضیه، دقت کنید که ما می‌توانیم ساعت شماره ② را به‌اندازه d به سمت چپ X انتقال دهیم. این متناظر با جابجایی به میزان x است که

دقیقاً همان فاصله‌ای است که ما ساعت ① را به X بردیم. سپس می‌توانیم ساعت شماره ③ را با جابجایی به میزان x+d به همان نقطه ببریم که برابر با مقدار فاصله‌ای است که ساعت ② را در حالت قبل جابجا کرده بودیم. بنابراین این دو ساعت باید عدد مشابهی را حین رسیدن به آن نقطه نشان دهند و باهم جمع شوند. ما می‌توانیم این کار را برای تمامی ساعت‌های مجموعه انجام دهیم، به شرطی که به فاصله‌هایی در سمت چپ X به‌اندازه مجموعه اصلی برسیم. خارج از این محدوده خاص، ساعت‌ها به میزان زیادی همدیگر را خنثی می‌کنند، زیرا دیگر از همهمه تداخل کوانتومی در امان

نیستند[۱]. تفسیرش ساده است: همان‌طور که در شکل ۲-۵ نشان داده شده است، مجموعه ساعت‌ها حرکت می‌کنند.



شکل ۲-۵: مجموعه ساعت‌ها با سرعت ثابت به سمت راست حرکت می‌کند. زیرا همان‌طور که در متن گفته شد ساعت های مجموعه اصلی نسبت به همدیگر چرخش دارند.

این نتیجه جالبی است. به‌جای ساعت‌های یکسان، با تنظیم مجموعه‌ای از ساعت‌ها که نسبت به هم اختلاف دارند، ما به

[۱]. اگر دلتان خواست درباره‌اش فکر کنید

توصیف ذره متحرک رسیدیم. همچنین می‌توانیم ارتباط بسیار مهمی را بین ساعت‌های اختلاف دارد و رفتار امواج به دست آوریم.

به خاطر آورید که هدف ما از معرفی ساعت‌ها در فصل ۲ این بود که رفتار موجی‌شکل ذرات را در آزمایش دو شکاف شرح دهیم. دوباره به شکل ۳-۳ در صفحه ۴۳ نگاه کنید، که ما چیدمانی از ساعت‌ها را رسم کردیم که یک موج را توصیف می‌کرد. این دقیقاً مانند چیدمان ساعت‌ها در مجموعه متحرک است. ما موج متناظر را نیز زیر شکل ۱-۵ با همان روش قبلی رسم کردیم: ساعت ۱۲ نشان‌دهنده قله موج است، ساعت ۶ دره موج را نشان می‌دهد و ساعت‌های ۳ و ۹

نشان‌دهنده قسمت‌هایی از موج هستند که ارتفاع موج صفر است.

همان‌طور که می توان انتظار داشت، ظاهراً تفسیر ذره متحرک، ارتباطی با موج دارد. موج، طول‌موج دارد و این متناظر با اختلاف بین ساعت‌هاست که زمان‌های مشابهی را در مجموعه نشان می‌دهند. ما همچنین این را با علامت λ در شکل نشان دادیم.

حال می‌توانیم حساب کنیم که نقطه X از مجموعه چه فاصله‌ای باید داشته باشد تا ساعت‌های همجواری داشته باشیم که به‌طور سازنده جمع شوند. این مطلب ما را به سمت نتیجه بسیار مهمی در مکانیک کوانتومی هدایت می‌کند، و

رابطه بین ذرات کوانتومی و امواج را واضح‌تر می‌کند. نوبت به ریاضیات رسید.

اولاً ما باید معادله‌ای را بنویسیم که مقدار اضافی چرخش ساعت ② نسبت به ساعت ① را ناشی از مقدار حرکت اضافی‌اش، به ما بدهد. با استفاده از نتایج صفحه ۸۸ این معادله به‌صورت زیر است:

$$W_۲ - W_۱ = \frac{m(x+d)^۲ - mx^۲}{۲ht} \simeq \frac{mxd}{ht}$$

می‌توانید خودتان این معادله را با بسط دادن پرانتزها و حذف عبارت $d^۲$ به دست آورید، زیرا d (فاصله بین ساعت‌ها)

نسبت به x (فاصله تا نقطه X که بسیار دور از مجموعه اصلی است) بسیار کوچک است.

همچنین به‌سادگی می‌توان معیاری را برای ساعت‌ها نوشت که زمان یکسانی را نشان دهند؛ ما می‌خواهیم میزان اضافی چرخش ساعت ② ناشی از انتقال آن [که در جهت عکس عقربه‌های ساعت است] دقیقاً با مقدار اضافی که در ابتدا به آن داده بودیم [که در جهت حرکت عقربه‌های ساعت بود] خنثی شود. برای مثال همان‌طور که در شکل ۱-۵ نشان داده شده، مقدار چرخش اضافی در ساعت ② برابر با $\frac{1}{4}$ است، زیرا ما ساعت را به میزان ربع دور به سمت جلو چرخانده‌ایم. به‌طور مشابه ساعت ③ چرخشی به میزان $\frac{1}{2}$ دارد زیرا آن را

نصف دور به جلو برده‌ایم. به‌طور نمادین، ما می‌توانیم کسری از دور کامل بین دو ساعت را به‌طورکلی به‌صورت d/λ نشان دهیم که d فاصله بین دو ساعت و λ طول‌موج است. اگر موفق به فهم آن نشدید، به حالتی فکر کنید که فاصله بین دو ساعت برابر با طول‌موج است. در آن حالت $d=\lambda$ است و بنابراین $d/\lambda=1$ که یک دور کامل است و هر دو ساعت زمان مشابهی را نشان خواهند داد.

با جمع‌بندی تمام این گفته‌ها، می‌توانیم بگوییم برای اینکه دو ساعت مجاور پس از رسیدن به نقطه X عدد یکسانی را نشان دهند، ما نیازمندیم تا چرخش اضافی که در ابتدا به ساعت‌ها دادیم با چرخش ناشی از انتشار آن‌ها به نقطه X برابری کند:

$$\frac{mxd}{ht} = \frac{d}{\lambda}$$

ما می‌توانیم این معادله را همانند گذشته ساده‌سازی کنیم. دقت کنید که mx/t برابر با تکانه ذره p می‌باشد. پس با اندکی تغییر پارامتر می‌توان نوشت:

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

این نتیجه آن‌قدر مهم است که ارزش نام‌گذاری دارد و به آن معادله دو بروگلی می‌گویند، زیرا اولین بار در سپتامبر ۱۹۲۳ توسط فیزیکدان فرانسوی لوییس دو بروگلی[۱] پیشنهاد

[۱]. Louis de Broglie

شد. ازاین‌جهت مهم است که در ارتباط با طول‌موج ذره‌ای است که تکانه‌اش را می‌دانیم. به‌عبارت‌دیگر این معادله بیانگر رابطه‌ای عمیق بین خصوصیتی است که عموماً برای ذره‌ها قائل می‌شویم (تکانه) و خصوصیتی که معمولاً به موج‌ها اختصاص دارد (طول‌موج). در این حالت، دوگانگی ذره-موج مکانیک کوانتومی از بازی ما با ساعت‌ها استخراج شد.

معادله دو بروگلی یک گام بزرگ ادراکی را به همراه آورد. در مقاله اصلی‌اش، او آورده بود "موج مرتبط ساختگی" را باید به همه ذره‌ها اختصاص داد، مانند الکترون، و آن جریان

الکترون‌ها که از شکاف عبور می‌کنند "باید پدیده انکسار[۱] (پراش) را از خود نشان دهند". در ۱۹۲۳ این تفکری نظری بود، زیرا دیویدسون و جرمر تا سال ۱۹۲۷، الگوی تداخلی پرتوهای الکترون‌ها را مشاهده نکرده بودند. در همان زمان‌ها، انیشتین پیشنهاد مشابهی با دو بروگلی را با استدلال متفاوتی ارائه داده بود و این دو نتیجه نظری انگیزه‌ای شد تا شرودینگر مکانیک موجی خود را توسعه دهد. در آخرین مقاله قبل از اینکه او معادله خود را ارائه دهد، شرودینگر نوشت: " چیزی که این مقاله می‌گوید این است که معادله موج بروگلی-انیشتین برای ذرات متحرک را باید جدی گرفت"

[۱]. انکسار واژه‌ای است که برای توصیف نوع خاصی از تداخل استفاده می‌شود و یکی از خصوصیات موج است.

ما می‌توانیم برای به دست آوردن اندکی ذهنیت درباره معادله بروگلی، دست به کاهش طول‌موج بزنیم که متناظر است با افزایش میزان اختلاف بین ساعت‌های مجاور. به‌عبارت‌دیگر، ما فاصله بین نقاطی که در آن‌ها ساعت‌ها زمان مشابهی نشان می‌دهند را کاهش می‌دهیم. بنابراین ما باید فاصله x را افزایش دهیم تا کاهش λ را جبران کنیم. به‌عبارت‌دیگر برای اینکه این چرخش‌های بزرگ‌شده خنثی شوند، نقطه X باید دورتر شود. این قضیه به ذره‌ای مربوط می‌شود که سرعت بیشتری دارد: طول‌موج کوتاه‌تر متناظر با تکانه بیشتر است و این دقیقاً چیزی است که معادله دو بروگلی می‌گوید. اینکه توانستیم حرکت معمولی را با شروع از آرایه ثابتی از ساعت‌ها استخراج کنیم (زیرا مجموعه ساعت‌ها

به‌طور آرامی در طول زمان حرکت می‌کند)، نتیجه دوست‌داشتنی‌ای است.

بسته‌های موج

حال ما قصد داریم به مسئله مهمی برگردیم که در اوایل فصل از رویش پریدیم. گفتیم که مجموعه اولیه کلاً در حال حرکت به سمت محدوده نقطه X است، اما تنها به‌طور تقریبی می‌تواند پیکره‌بندی اولیه‌اش را حفظ کند. منظور ما از چنین گزاره مبهمی چه بود؟ جواب این سؤال، دوباره به اصل عدم قطعیت هایزنبرگ مرتبط می‌شود و همچنین نکات جدیدی را نیز به ما می‌آموزد.

ما در حال تشریح این مطلب بودیم که چه اتفاقی برای مجموعه ساعت‌هایی خواهد افتاد که نماینده ذره‌ای هستند که می‌توان درون محدوده کوچکی از فضا آن را یافت. این همان محدوده‌ای است که توسط پنج ساعت شکل ۱-۵ گسترده شده است. مجموعه‌ای مانند این را با عنوان بسته موج[۱] می‌شناسند. اما تا اینجا متوجه شده‌ایم که محصور کردن یک ذره به محدوده‌ای در فضا، عواقبی دارد. ما نمی‌توانیم مانع یک ذره متمرکز شویم تا ضربه هایزنبرگی نبیند (یعنی به دلیل متمرکز بودنش، تکانه‌اش عدم قطعیت دارد)، و با گذر زمان این باعث می‌شود که ذره به بیرون از محدوده‌ای که از ابتدا در آن بود نشت کند. این اثر را هم برای حالتی که تمام ساعت‌ها

[۱] . Wave Packet

عدد یکسانی را نشان می‌دادند و هم برای مجموعه در حال حرکت، معرفی کردیم. این اثر تمایل دارد تا بسته موج را در طی سفرش پراکنده سازد، دقیقاً مانند ذره ساکن که در طول زمان پراکنده می‌شود.

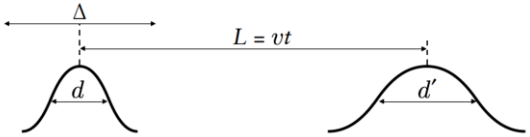
اگر ما به‌اندازه کافی صبر کنیم، بسته موج متناظر با مجموعه ساعت‌ها، کاملاً تجزیه شده و ما توانایی پیش‌بینی موقعیت دقیق ذره را از دست خواهیم داد. این واقعیت به‌وضوح بر روی هر تلاشی که برای اندازه‌گیری سرعت ذره‌مان می‌کنیم، تأثیرگذار است. بیایید ببینیم چه اتفاقی می‌افتد.

یک راه خوب برای اندازه‌گیری سرعت یک ذره این است که در دو زمان مختلف موقعیت آن را اندازه‌گیری کنیم. سپس

می‌توانیم با تقسیم فاصله طی شده در دو زمان اندازه‌گیری، بر اختلاف‌زمان اندازه‌گیری، سرعت را به دست آوریم. با توجه به گفته‌هایمان تا اینجا، این ظاهراً روش خطرناکی به نظر می‌آید، زیرا هرقدر ما بخواهیم موقعیت ذره را دقیق‌تر اندازه‌گیری کنیم، ما تحت این ریسک قرار داریم که بسته موجش را تحت‌فشار قرار دهیم و این متعاقباً بر حرکت بعدی ذره تأثیرگذار است. اگر بخواهیم که ضربه هایزنبرگی قابل‌توجهی به ذره ندهیم (یعنی یک تکانه زیاد، زیرا Δx را بسیار کوچک کرده‌ایم)، باید مطمئن باشیم که اندازه‌گیری موقعیت را به‌اندازه کافی مبهم (غیردقیق) انجام داده‌ایم. واژه مبهم، خودش مبهم است، پس بیایید آن را آشکارتر کنیم. اگر ما از دستگاه ردیابی ذره‌ای استفاده کنیم که دقت ۱ میکرومتر

داشته باشد و بسته موج ما عرضی برابر با ۱ نانومتر داشته باشد، در آن صورت دستگاه ردیاب ما تأثیر خاصی بر روی ذره نخواهد گذاشت. ممکن است آزمایشگر پس از اندازه‌گیری با استفاده از ردیاب، به خاطر داشتن دقت یک میکرون بسیار خوشحال باشد، اما ازنظر الکترون، کاری که ردیاب انجام داد این بود که به آزمایشگر گفت ذره در جعبه بسیار بزرگی قرار دارد که ۱۰۰۰ بار بزرگ‌تر از بسته موج واقعی است. در این حالت ضربه هایزنبرگی که ناشی از فرایند اندازه‌گیری است، بسیار کوچک‌تر از حالتی است که از اندازه محدود خود بسته موج ناشی می‌شود. منظور ما از "به‌اندازه کافی مبهم" نیز همین است.

ما این وضعیت را در شکل ۳-۵ نشان داده‌ایم و عرض اولیه بسته موج را با d و دقت آشکارگرمان (دستگاه ردیاب) را با Δ نشان دادیم. همچنین بسته موج را در لحظه بعد نیز نشان داده‌ایم. این بسته اندکی عریض‌تر و عرض آن برابر با d' می‌باشد که از d بزرگ‌تر است. در بازه زمانی t، قله بسته موج به میزان L با سرعت v حرکت کرده است. از این بابت عذرخواهی می‌کنیم که نحوه تدریس و همچنین مبحثی که در حال تشریح آن هستیم، شما را یاد دوران مدرسه‌تان و آن صندلی‌های چوبی که با بی‌حوصلگی روی آن می‌نشستید دارد و نیز صدای معلمی که شما را به خواب می‌برد. ما قصد خوبی از بیان این مطالب داریم و امیدواریم که نتیجه‌گیری این بخش، شما را از خواب بپراند.



شکل ۳-۵: یک بسته موج در دو زمان مختلف. بسته به سمت راست حرکت کرده و در طول زمان پراکنده می‌شود. بسته به این دلیل حرکت می‌کند چون ساعت‌هایی که آن را تشکیل داده‌اند، نسبت به یکدیگر چرخش دارند (دو بروگلی) و به دلیل اصل عدم قطعیت پراکنده می‌شوند. شکل بسته زیاد هم مهم نیست اما برای کامل بودن بحث باید بگوییم که هرجا بسته بزرگ باشد، ساعت‌ها نیز بزرگ هستند و هرجا بسته کوچک باشد، ساعت‌ها نیز کوچک‌اند.

با تجدید نیرو، بازگردیم به آزمایشگاه تخیلی‌مان. ما در تلاشیم تا سرعت v بسته موج را توسط اندازه‌گیری موقعیت آن در دو زمان مختلف به دست آوریم. این کار L را به ما می‌دهد، یعنی فاصله‌ای که بسته موج در زمان t طی کرده است. اما آشکارگر ما دقتی به‌اندازه Δ دارد، به همین دلیل به‌طور دقیق نخواهیم توانست L را به دست آوریم. به‌طور نمادین می‌توانیم بگوییم که سرعت اندازه‌گیری شده برابر است با:

$$v = \frac{L \pm \Delta}{t}$$

که علامت مثبت‌منفی برای این است که به ما بگوید اگر ما دو اندازه‌گیری از موقعیت بسته انجام داده باشیم، عموماً L را

به دست نخواهیم آورد و در عوض "L بعلاوه عددی اندک" یا "L منهای عددی اندک" را خواهیم داشت که این "مقدار اندک" ناشی از این واقعیت است که ما تصمیم گرفتیم اندازه‌گیری کاملاً دقیقی از موقعیت ذره نداشته باشیم. مهم است که بدانیم L چیزی نیست که بتوان واقعاً اندازه گرفت: ما همواره عددی درون بازه $L\pm\Delta$ اندازه خواهیم گرفت. همچنین به یاد آورید که ما نیاز داشتیم که Δ بسیار بزرگ‌تر از اندازه بسته موج باشد، زیرا در غیر این صورت [اندازه‌گیری ما] ذره را تحت‌فشار قرار داده و از هم می‌پاشد.

بیایید معادله قبل را اندکی باز کنیم و ببینیم که داخل آن چه می‌گذرد:

$$v = \frac{L}{t} \pm \frac{\Delta}{t}$$

ظاهراً اگر ما t را بسیار بزرگ در نظر بگیریم، در آن صورت ما سرعت v=L/t را با پراکندگی کمتری اندازه خواهیم گرفت، زیرا می‌توانیم به مقدار زیادی صبر کنیم و با این کار t را هرقدر که بخواهیم افزایش دهیم و متعاقباً Δ/t به‌موازات کوچک خواهد شد، حتی اگر Δ نسبتاً بزرگ هم باشد. به نظر می‌آیید که ما روش خوبی برای اندازه‌گیری دقیق اختیاری از سرعت یک ذره بدون آشفتنش در اختیار داریم؛ تنها نیاز داریم که بین دو اندازی گیری، زمان زیادی را صبر کنیم. این یک حس غریزی خوبی را نیز در ما بیدار می‌کند. تصور کنید که شما در حال سنجش سرعت یک ماشینِ در حال حرکت

در جاده هستید. اگر شما مقدار سفر این ماشین را در طول یک دقیقه حساب کنید، اندازه‌گیری شما دقیق‌تر از حالتی خواهد بود که مثلاً شما حرکت ماشین را در یک ثانیه اندازه گرفته باشید. آیا ما به هایزنبرگ جای خالی دادیم؟

البته که نه – ما یادمان رفت که چیزی را به‌حساب آوریم. این ذره توسط بسته موجی تعریف شده است که در گذر زمان پراکنده می‌شود. با داشتن زمان کافی، این پراکندگی می‌تواند خود را کامل کند و این یعنی ذره می‌تواند هر جایی باشد. این اتفاق باعث می‌شود تا ما بازه‌ای از مقادیر را برای اندازه‌گیری‌مان از L به دست آوریم و توانایی ما را برای اندازه‌گیری دقیق اختیاری سرعت از بین می‌برد.

برای ذره‌ای که توسط بسته موج توصیف شده است، ما هنوز کاملاً مقید به اصل عدم قطعیت هستیم. ازآنجایی‌که ذره در ابتدا در محدوده‌ای به‌اندازه d محصور شده، هایزنبرگ به ما می‌گوید که تکانه این ذره به همان نسبت و به مقدار h/d نادقیق است.

بنابراین تنها یک روش وجود دارد که ما ساختاری از ساعت‌ها بسازیم که ذره‌ای که با تکانه دقیقی در حال حرکت است را نشان دهیم – ما باید d، اندازه بسته موج، را خیلی بزرگ در نظر بگیریم. هرقدر این عدد بزرگ‌تر باشد، عدم قطعیت در دانستن تکانه‌اش کم می‌شود. مطلب واضح است: ذره‌ای که تکانه مشخصی دارد، با مجموعه بزرگی از ساعت‌ها

شناسایی می‌شود[۱]. به‌طور دقیق، ذره‌ای که تکانه‌اش دقیقاً مشخص باشد، با مجموعه‌ای از بینهایت ساعت توصیف می‌شود، که این یعنی بسته موج بینهایت بزرگ.

ما استدلال کردیم که بسته موجی که اندازه محدودی دارد، نمی‌تواند مرتبط با ذره‌ای باشد که تکانه‌اش را دقیقاً بدانیم. این یعنی اگر تکانه تعداد زیادی از ذرات را اندازه بگیریم که همگی‌شان با بسته موج یکسانی تعریف شده باشند، ما هر دفعه جواب یکسانی را به دست نخواهیم آورد. در عوض با گستره‌ای از جواب‌ها روبرو خواهیم شد و هیچ ارتباطی به این

[۱]. مسلماً زمانی که d خیلی بزرگ باشد، این سوال پیش می‌آید که اصلاً تکانه را چگونه می‌توان حساب کرد. این نگرانی با این راه حل برطرف می‌شود که هرقدر d بزرگ باشد، L بسیار بزرگ‌تر از آن است.

ندارد که چقدر در فیزیک آزمایشگاهی ماهر باشیم؛ [دقت] این گستره نمی‌تواند پایین‌تر از h/d باشد.

بنابراین می‌توانیم بگوییم که یک بسته موج، ذره‌ای را تشریح می‌کند که با گستره‌ای از تکانه‌ها در حال حرکت است. اما معادله بروگلی به ما می‌گوید که می‌توانیم در جمله آخر به‌جای "تکانه‌ها" از واژه "طول‌موج‌ها" استفاده کنیم، زیرا تکانه یک ذره مرتبط با موجی از یک طول‌موج مشخص است. خود این یعنی یک بسته موج باید از طول‌موج‌های مختلفی تشکیل شده باشد. مشابه با همین، اگر ذره‌ای توسط موجی با طول‌موج مشخصی توصیف شود، آن موج لزوماً باید بینهایت بزرگ باشد. گویا به سمت این نتیجه‌گیری کشیده می‌شویم که یک بسته موج کوچک از بینهایت موج بلند با

طول‌موج‌های مختلف ساخته شده است. ما واقعاً به این سمت کشیده شدیم و چیزی که توصیف کردیم برای ریاضیدانان، فیزیکدانان و مهندسین بسیار آشناست. این توضیحات مربوط به قسمتی از ریاضیات می‌شود که آنالیز فوریه[۱] نام دارد و به خاطر فیزیکدان و ریاضیدان فرانسوی جوزف فوریه نام‌گذاری شده است.

فوریه مردی برای تمام فصول بود. در میان دستاوردهای زیادش، او فرماندار منصوب ناپلئون در مصر جنوبی بود و همچنین کاشف اثر گلخانه‌ای. ظاهراً او علاقه بسیاری به پیچیدن ملحفه به دور خود داشت، که نهایتاً منجر به مرگش

[۱] . Fourier Analysis

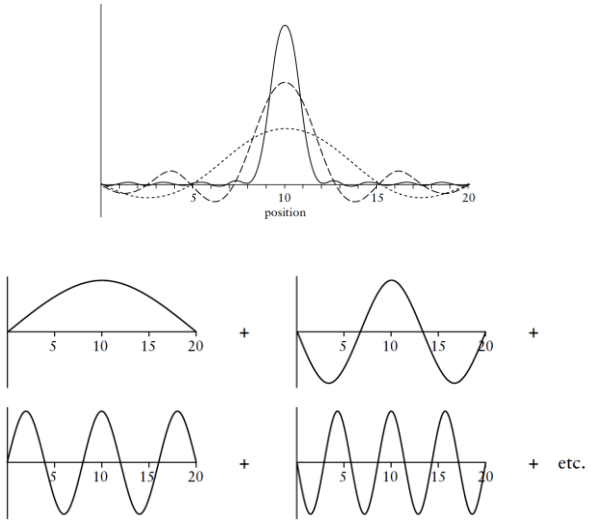
در سال ۱۸۳۰ شد که با همان حالت ملافه پیچ محکم، از پله‌ها به پایین افتاد. مقاله کلیدی او درباره تحلیل فوریه، موضوع انتقال حرارت در جامدات را موردبحث قرار داده بود و در سال ۱۸۰۷ چاپ شد، گرچه ایده اصلی به زمان بسیار قبل‌تری برمی‌گردد.

فوریه نشان داد که هر موجی که شکل و اندازه دلخواهی دارد را می‌توان با استفاده از جمع‌کردن تعدادی موج سینوسی که طول‌موج‌های متفاوتی دارند، ساخت. این نکته در تصاویر بهتر دیده می‌شود. در شکل ۴-۵ منحنی نقطه‌چین با جمع‌کردن دو موج اول سینوسی در شکل پایینی ساخته شده است. شما تقریباً می‌توانید این جمع‌بندی را در ذهنتان انجام دهید – دو موج بیشترین ارتفاعشان را در وسط دارند که

متعاقباً در اینجا همدیگر را تقویت می‌کنند و درعین‌حال در نقاط انتهایی همدیگر را خنثی می‌کنند. منحنی خط‌چین نشان می‌دهد که در صورت جمع بستن هر چهار موج شکل پایینی چه اتفاقی می‌افتد – اینجا قله‌ای که در مرکز وجود دارد برجسته‌تر دیده می‌شود. نهایتاً منحنی پیوسته جمع‌بندی ۱۰ موج اول را نشان می‌دهد، یعنی ۴ موج نشان داده‌شده و ۶ موجی که به ترتیب، طول‌موجشان کاهش می‌یابد. هر تعداد موجی که به این مخلوط اضافه کنیم، جزئیات بیشتری را در موج نهایی خواهیم داشت. بسته موجی که در شکل بالایی وجود دارد، می‌تواند یک ذره متمرکز را نشان دهد که نسبتاً شبیه به بسته موج شکل ۳-۵ است. در این صورت، ساخت امواج با هر شکل دلخواهی واقعاً امکان‌پذیر است – این کار با

استفاده از جمع‌بندی تعدادی موج سینوسی ساده اتفاق می‌افتد.

معادله دو بروگلی به ما می‌گوید که هرکدام از امواج نمودار پایینی شکل ۴-۵، متناظر با ذره‌ای با تکانه کاملاً مشخص است و تکانه با کاهش طول‌موج افزایش می‌یابد. تقریباً می‌توانیم ببینیم که چرا زمانی که یک ذره را با مجموعه‌ای متمرکز از ساعت‌ها توصیف می‌کنیم، این ذره باید از گستره‌ای از تکانه‌ها تشکیل شده باشد.



شکل ۴-۵: نمودار بالا: جمع‌کردن تعدادی موج سینوسی برای ساختن یک بسته موجی که قله تیزی دارد. منحنی نقطه‌چین تعداد موج کمتری نسبت به منحنی خط‌چین دارد و آن‌هم تعداد موج کمتری نسبت به منحنی پیوسته دارد. نمودارهای پایینی: اولین چهار موجی که برای ساخت بسته موج‌های نمودارهای بالا استفاده شده است.

برای اینکه واضح‌تر بگوییم، فرض کنید ذره را با مجموعه‌ای از ساعت‌ها توصیف کنیم که توسط منحنی پیوسته در نمودار بالایی شکل ۴-۵ نشان داده شده است[۱]. ما همین‌الان یاد گرفتیم که این ذره را همچنین می‌توان با یک سری مجموعه‌های ساعت‌های بزرگ‌تر نشان داد. اولین موج شکل پایینی به علاوه دومین موج شکل پایینی به علاوه سومین موج شکل پایینی و به همین ترتیب. در این نوع نگرش، در هر نقطه ساعت‌های زیادی وجود دارد (که هرکدام مربوط به یکی از مجموعه‌های بلند است)، که ما باید باهم جمع بسته و به یک مجموعه ساعت برسیم که در نمودار بالایی شکل ۴-۵

[۱]. زمانی که ما موج‌ها را رسم می‌کنیم یادتان باشد ، آن ها یک تصور خوب از تصویر عقربه ساعت در راستای ساعت ۱۲ به ما می‌دهند.

نشان داده شده است. تصمیم بر اینکه چگونه درباره ذره فکر کنید، بر عهده خود شماست. شما می‌توانید نگاهتان به آن ذره به‌صورت یک ساعت در هر نقطه باشد، که مقدار ساعت سریعاً به شما احتمال حضور ذره را می‌دهد، یعنی در محدوده قله در نمودار بالایی شکل ۴-۵. به طریق دیگر نیز می‌توانید در مورد ذره اینگونه فکر کنید که می‌توان آن را با مجموعه‌ای از ساعت‌ها در هر نقطه توصیف کرد که هرکدام مربوط به یکی از مقادیر تکانه ذره باشد. در این حالت ما به خاطر می‌آوریم که ذره‌ای که در محدوده کوچکی متمرکز شده است، تکانه مشخصی ندارد. نبود امکان ساخت یک بسته موج فشرده از یک طول‌موج، یکی از ویژگی‌های مشهود ریاضیات فوریه است.

این نوع نگرش، دیدگاه جدیدی از اصل عدم قطعیت هایزنبرگ پیش روی ما می‌گذارد. این [نگرش] می‌گوید که ما نمی‌توانیم یک ذره را با استفاده از امواجی با طول‌موج یکسان، به‌صورت مجموعه‌ای متمرکز از ساعت‌ها توصیف کنیم. در عوض، برای اینکه ساعت‌هایی داشته باشیم که در خارج محدوده خنثی شوند، ما لزوماً باید طول‌موج‌های مختلفی را باهم جمع ببندیم، یعنی تکانه‌های مختلف را. پس هزینه‌ای که ما برای متمرکز کردن یک ذره در یک محدوده در فضا می‌پردازیم این است که ندانیم تکانه‌اش دقیقاً چقدر است. علاوه بر آن، هرقدر ما ذره را محدودتر کنیم، نیاز به جمع‌بندی امواج بیشتری داریم و این یعنی اطلاعمان از تکانه ذره کمتر است. این دقیقاً محتوای اصل عدم قطعیت است، و

خیلی خوب است که برای رسیدن به همان نتیجه، راه دیگری را نیز یافتیم.[۱]

برای جمع‌بندی این فصل، باید اندک زمانی را به فوریه اختصاص دهیم. راه بسیار قدرتمندی برای تصور نظریه کوانتوم وجود دارد که دقیقاً مرتبط با ایده‌هایی است که هم‌اینک به بحث گذاردیم. نکته مهم این است که هر ذره کوانتومی، در حال هر کاری که باشد، با یک تابع موج توصیف می‌شود. همان‌طور که تا اینجا معرفی کردیم، تابع موج آرایه ساده‌ای از ساعت‌های کوچک است که هرکدام برای نقطه‌ای از فضا است و اندازه ساعت نشان‌دهنده احتمال حضور ذره در آن

[۱]. این روش به دست آوردن اصل عدم قطعیت برپایه معادله دو بروگلی است تا بتوان بین طول موج یک ساعت‌موج و تکانه آن ارتباط برقرار کرد.

نقطه است. این نوع معرفی ذره "تابع موج فضای مکان[۱]" نام دارد زیرا کاملاً در ارتباط با موقعیت‌های ممکنی است که ذره می‌تواند داشته باشد. بااین‌حال روش‌های زیادی برای نمایش ریاضیاتی تابع موج وجود دارد، و ورژن ساعت‌های کوچک در فضا، تنها یکی از آن‌هاست. مثلاً ما گفتیم که می‌توان ذره را به‌صورت جمع تعدادی موج سینوسی توصیف کرد. اگر شما برای لحظه‌ای در این نکته تعمق کنید، متوجه خواهید شد که مشخص کردن لیست کاملی از امواج سینوسی در حقیقت توصیف کاملی از آن ذره را به ما می‌دهد (زیرا با جمع‌کردن این امواج، می‌توانیم ساعت‌های متناظر با تابع موج فضای مکان را به دست آوریم). به‌عبارت‌دیگر، اگر ما مشخص کنیم

[۱]. Position Space Wavefunction

که برای ساعت بسته موج دقیقاً به چه موج‌هایی نیاز داریم، و دقیقاً چقدر از هرکدام از این موج‌های سینوسی را نیاز داریم که شکل را کاملاً درست به دست آوریم، در این حالت ما توصیفی کاملاً متفاوت اما معادل بسته موج خواهیم داشت. مسئله جالب این است که خود هر موج سینوسی را می‌توان با یک ساعت خیالی توصیف کرد: اندازه ساعت، بیشترین ارتفاع موج را نشان می‌دهد و فاز موج در هر نقطه را می‌توان با زمانی که آن ساعت نشان می‌دهد، فهمید. این یعنی ما می‌توانیم ذره را نه به‌صورت ساعت‌هایی در فضا، بلکه با ساعت‌های جایگزینی که هرکدام متناظر با یکی از تکانه‌های ذره هستند، نمایش داد. این توصیف به همان اندازه توصیف "ساعت‌های در فضا" به‌صرفه است و به‌جای اینکه به‌طور

صریح مکان احتمال ذره را بدانیم، ما صریحاً تکانه احتمالی ذره را خواهیم دانست. این آرایه جایگزین ساعت‌ها به‌عنوان تابع موج فضای تکانه[۱] شناخته می‌شود و دقیقاً همان اطلاعاتی را در خود دارد که تابع موج فضای مکان داشت.[۲]

این احتمال خیلی انتزاعی به نظر می‌آید، اما شما احتمالاً از فناوری‌هایی که بر پایه ایده‌های فوریه هستند در زندگی روزمره‌تان استفاده می‌کنید، زیرا تجزیه یک موج به موج‌های سینوسی، اساس تکنولوژی فشرده‌سازی صوت و تصویر است. به امواج صوتی‌ای دقت کنید که برایتان خوشایند است. این

---

[۱] . Momentum Space Wavefunction

[۲]. در اصطلاحات علمی، تابع موج‌های فضای تکانه که مربوط به ذره ای با تکانه قطعی هستند، به "ویژه حالت" معروفند.

موج پیچیده، همان‌طور که یاد گرفتیم، می‌تواند به یک سری عدد تجزیه شود که هرکدام سهم نسبی تعداد عظیمی از امواج سینوسی خالص را برای تشکیل دادن آن صدا نشان می‌دهند. گرچه شما ممکن است به مجموعه وسیعی از موج‌های سینوسی مستقل نیاز داشته باشید که موج صوتی اصلی را دوباره بسازید، اما می‌توان بدون اینکه تغییری در کیفیت صدای خروجی ایجاد شود تعداد زیادی از آن‌ها را کنار گذاشت. مخصوصاً آن دسته از امواج سینوسی که در ساخت امواج صوتی‌ای سهیم می‌شوند که گوش انسان قادر به شنیدنشان نیست، حفظ نمی‌شوند. این اتفاق، میزان داده موردنیاز برای ذخیره‌سازی یک فایل صوتی را کاهش می‌دهد

– بنابراین نیازی نیست که MP3 پلیر شما خیلی بزرگ باشد.

همچنین ما ممکن است بپرسیم این نسخه متفاوت و انتزاعی‌تر تابع موج چه کاربرد احتمالی‌ای می‌تواند داشته باشد؟ خب به ذره‌ای فکر کنید که در موقعیت فضایی توسط یک ساعت نمایش داده شده است. این توصیف‌کننده یک ذره است که در موقعیت مشخصی در جهان قرار دارد؛ یک ذره در نقطه‌ای که ساعت نشسته است. حال به ذره‌ای فکر کنید که توسط یک ساعت نمایش داده می‌شود، اما این بار در فضای تکانه. این توصیف‌کننده یک ذره‌ای است که تکانه مشخصی دارد. توصیف چنین ذره‌ای با تابع موج فضای مکان، به‌طور متضاد نیازمند بینهایت ساعت هم‌اندازه است، زیرا با توجه به

اصل عدم قطعیت، ذره‌ای با تکانه مشخص، می‌تواند همه‌جا یافت شود. به‌عنوان نتیجه گاهی اوقات ساده‌تر است که مستقیماً دست به محاسباتی با استفاده از تابع فضای تکانه بزنیم.

در این فصل، ما فهمیدیم که توصیف یک ذره با استفاده از ساعت‌ها، می‌تواند چیزی که ما عموماً با نام "جابجایی" می‌شناسیم را نشان دهد. یاد گرفتیم که درکمان از حرکت آرام اجسام از نقطه‌ای به نقطه دیگر، از دیدگاه نظریه کوانتوم یک توهم است. این مطلب که فرض کنیم ذرات حین حرکت از A به B تمامی مسیرهای ممکن را طی می‌کنند، نزدیک‌تر به واقعیت است. تنها زمانی که ما تمامی احتمالات را باهم جمع بزنیم، حرکتی که مدنظر ما است، خود را نشان می‌دهد.

همچنین صریحاً دیدیم که توصیف ساعت‌ها چگونه می‌تواند فیزیک امواج را کدگذاری کند، گرچه ما تنها بر روی ذرات نقطه‌ای شکل کار کردیم. حال زمان آن فرارسیده که در طی پاسخ به یک سؤال مهم، واقعاً شباهت‌های بحثمان را با فیزیک امواج کشف کنیم: نظریه کوانتوم چگونه ساختار اتم‌ها را توضیح می‌دهد؟

فصل ششم

موسیقی اتم‌ها

داخل اتم دنیای عجیبی است. اگر شما بر روی یک پروتون بایستید و به فضای داخل اتم بنگرید، شما تنها فضای خالی می‌بینید. حتی اگر الکترون‌ها به شما نزدیک شده و لمسشان کنید هنوز هم بسیار ریز هستند، که البته ندرتاً چنین کاری می‌کنند. قطر پروتون حدوداً $۱۰^{-۱۵}$ متر است، یعنی ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۱ متر و در مقایسه با الکترون‌ها شبیه به غولی کوانتومی دیده می‌شود. اگر شما بر روی

پروتونی در گوشه انگلستان در منطقه وایت کلیف در داوِر بایستید، مرز مبهم اتم‌ها، حول‌وهوش جایی در مزارع شمالی فرانسه قرار دارد. اتم‌ها پهناور و خالی هستند و این یعنی شمایی که از اتم‌ها تشکیل شده‌اید نیز عمدتاً خالی هستید. هیدروژن ساده‌ترین اتم است که از یک پروتون و از یک الکترون تشکیل شده است. الکترون، که تا جایی که ما می‌دانیم بسیار کوچک است، ظاهراً عرصه وسیعی برای حرکت دارد، اما در حقیقت این‌طور نیست؛ بلکه مقید به پروتونش است و جاذبه الکترومغناطیس مابین آن‌ها عامل به دام افتادنش می‌باشد. اندازه این زندان وسیع عاملی است برای بارکُد رنگین‌کمانی و نورانی اتم‌ها. همان‌هایی که در کتاب

راهنمای طیف‌سنجی دوست قدیمی‌مان پروفسور کیسر به‌دقت آمده‌اند.

حال ما در موقعیتی هستیم که می‌توانیم دانشی که کسب کردیم را برای پاسخ به سؤالی که رادرفورد، بور و دیگران را در دهه‌های اولیه قرن بیستم به‌شدت گیج کرده بود، استفاده کنیم: دقیقاً چه اتفاقی داخل اتم می‌افتد؟ اگر به یاد داشته باشید، مسئله این بود که رادرفورد کشف کرد که اتم به‌نوعی شبیه به منظومه شمسی در مقیاس کوچک است، با هسته سنگین خورشیدمانند و الکترون‌هایی سیاره‌مانند که در مدارهایی با فواصل دور در حال گردش هستند. رادرفورد می‌دانست که این مدل نمی‌تواند درست باشد، زیرا الکترون‌هایی که به دور هسته می‌گردند باید متناوباً از خود

نور ساطع کنند. نتیجه این کار برای اتم زیان‌بار خواهد بود، زیرا اگر الکترون‌ها دائماً در حال تابش نور باشند، انرژی‌شان کاسته شده و به‌طور مارپیچ به سمت هسته حرکت خواهند کرد و نهایتاً به پروتون برخورد می‌کنند. اما می‌دانیم که چنین اتفاقی نمی‌افتد؛ اتم‌ها پایدار به نظر می‌رسند. پس مشکل این توصیف چیست؟

این فصل اهمیت بسزایی در این کتاب دارد، زیرا اولین باری است که قرار است نظریه‌مان را برای تشریح پدیده‌های دنیای واقعی به کار بریم. تمام تلاشی که تا اینجا کرده بودیم برای این بود که ساختار موردنیاز را به دست آوریم تا بتوانیم راهی برای تفکر راجع به یک ذره کوانتومی داشته باشیم. اصل عدم قطعیت هایزنبرگ و معادله دو بروگلی اوج دستاوردهای

ماست، اما در طی این فرایند ما کمی ساده‌سازی کردیم و تصور کردیم که کل جهان تنها یک ذره دارد. حال زمان آن فرارسیده که نشان دهیم نظریه کوانتوم، چگونه دنیایی که در آن زندگی می‌کنیم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ساختار اتم چیزی واقعی و قابل‌درک است. شما از اتم‌ها تشکیل شده‌اید: ساختار آن‌ها ساختار شماست و پایداری آن‌ها پایداری شما. آن‌چنان هم اغراق نمی‌کنیم که می‌گوییم شناخت ساختار اتم‌ها یکی از مهم‌ترین پیش‌نیازها برای فهم کل جهان است. درون یک اتم هیدروژن، الکترون در مداری به دور پروتون به دام افتاده است. ما با این تصور شروع می‌کنیم که الکترون درون جعبه‌ای محصور است که البته خیلی هم از واقعیت دور نیست. خصوصاً ما بررسی خواهیم کرد که الکترونی که درون

یک جعبه محصور است، تا چه حد می‌تواند ویژگی‌های مهم یک اتم واقعی را نمایندگی کند. ما با استفاده از مطالبی که در فصل قبل درباره خصوصیات موج‌مانند ذرات کوانتومی آموختیم پیش خواهیم رفت، زیرا زمانی که قصد توصیف اتم‌ها را داشته باشیم، تصور موجی کارمان را بسیار ساده می‌کند و ما بدون نگرانی از کوچک کردن، چرخاندن و جمع‌کردن ساعت‌ها، می‌توانیم پیش‌روی قابل‌توجهی داشته باشیم. بااین‌حال همواره به خاطر داشته باشید که امواج، ابزار خوبی برای توصیف اتفاقاتی است که "در خفا" (درون اتم) می‌افتند.

ازآنجایی‌که ساختاری که ما برای ذرات کوانتومی توسعه دادیم بسیار شبیه به چیزی است که برای تشریح امواج آب، امواج صوتی و امواج روی سیم‌های گیتار، استفاده می‌شود،

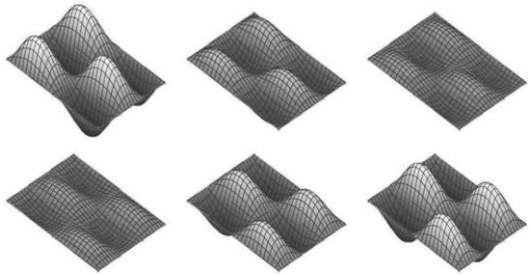
ابتدا بررسی می‌کنیم که اگر امواج چنین مواد آشنایی را به‌نوعی محصور کنیم، چه اتفاقی می‌افتد.

به‌طورکلی امواج، چیزهای پیچیده‌ای هستند. تصور کنید که به داخل استخری پر از آب شیرجه زدید. امواج به همه طرف رفته و به دیواره‌ها می‌خورند و بیهوده است اگر تلاش کنیم این اتفاق را به شکل ساده توصیف کنیم. بااین‌حال در درون این پیچیدگی، نوعی سادگی نهفته است. نکته کلیدی این است که آب درون استخر محصور است و این یعنی تمامی امواج محدود به حرکت داخل استخر هستند. این نکته، بحثی به نام "امواج ایستا[۱]" را باز می‌کند. امواج ایستا درون

[۱] . Standing Waves

آشفتگی‌ای که ناشی از پریدن ما به درون آب اتفاق افتاده، مخفی شده اند، اما می‌توان آب را طوری حرکت داد که به‌طور منظم نوسان کرده و الگوی امواج ایستا را تکرار کند. شکل ۱-۶ نشان می‌دهد که سطح آب تحت چنین نوسانی چگونه به نظر می‌رسند. قله‌ها و دره‌ها بالا و پایین می‌روند، اما نکته مهم این است که آن‌ها در مکان ثابتی بالا و پایین می‌روند. امواج ایستای دیگری نیز وجود دارند، مثلاً زمانی که آب درون یک تانکر به‌طور متناوب بالا و پایین برود. ما معمولاً این امواج بخصوص را نمی‌بینیم زیرا تولیدشان سخت است، اما نکته مهم این است که هرگونه ایجاد آشفتگی در آب – حتی همانی که ما با شیرجه زدنمان به درون آب تولید کردیم – را می‌توان با جمع‌کردن تعدادی موج ایستاده بیان کرد. چنین

رفتار مشابهی را قبلاً دیده‌ایم: این کار تعمیم ایده‌های فوریه است که در فصل قبل با آن‌ها مواجه شدیم. در آنجا ما دیدیم که هر بسته موجی را می‌توان

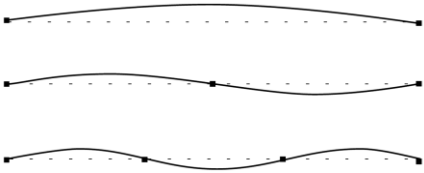


شکل ۱-۶: شش تصویر پشت سر هم از یک موج ایستا درون تانکر آب. گذر زمان از قسمت چپ بالا به سمت راست پایین است.

با ترکیبی از امواجی که طول‌موجشان مشخص است، تولید کرد. این امواج مخصوص که نشان‌دهنده وضعیت‌های یک ذره با تکانه معین می‌باشند، سینوسی هستند. در مورد امواج آب محصورشده، این ایده تعمیم‌یافته و می‌توان هر آشفتگی‌ای را با استفاده از ترکیب امواج ایستا توصیف کرد. ما در ادامه این فصل خواهیم دید که امواج ایستا تفسیر مهمی در نظریه کوانتوم دارند و در حقیقت نقشی کلیدی در فهم ما از ساختار اتم ایفا می‌کنند. با دانستن این مطلب، بیایید تا با جزئیات بیشتری بررسی‌شان کنیم.

شکل ۲-۶ مثال دیگری از امواج ایستا در طبیعت را نشان می‌دهد: سه موج ایستای ممکن بر روی سیم‌های گیتار. حین ضربه به سیم‌های گیتار، نُتی که می‌شنویم معمولاً مربوط به

موجی ایستا با بیشترین طول‌موج است – اولین موج از بین امواج موجود در شکل. این موج هم در فیزیک و هم در موسیقی به‌عنوان "پایین‌ترین هارمونی[۱]" یا "[هارمونی] بنیادین[۲]" شناخته می‌شوند.



شکل ۲-۶: سه موجی که بیشترین طول‌موج را دارند و می‌توانند روی سیم‌های گیتار تشکیل شوند. بیشترین طول‌موج (بالاترین سیم) متناظر با پایین‌ترین هارمونی (بنیادین) است و بقیه، هارمونی‌های بالاتر را نشان می‌دهند. (صداهای فرعی)

[۱] . Lowest Harmonic

[۲] . Fundamental Harmonic

سایر طول‌موج‌ها نیز معمولاً حضور دارند، و به‌عنوان صداهای فرعی یا هارمونی‌های بالاتر[۱] شناخته می‌شوند. موج‌های دیگری که در شکل نشان داده شده‌اند بین صداهای فرعی، بیشترین طول‌موج را دارند. گیتار مثال خوبی است، زیرا به‌سادگی می‌توان در آن دید که چرا یک سیم گیتار تنها می‌تواند در این طول‌موج‌های مخصوص ارتعاش کند. علت این امر این است که این سیم از هر دو طرف ثابت نگه داشته شده است (بسته شده‌است) – یک سرش متصل به انتهای گیتار است و یک سمتش توسط انگشتان شما که در نقاط مختلف سیم به آن فشار می‌آورید، ثابت می‌ماند. این یعنی سیم نمی‌تواند در این دو نقطه حرکت کند و این کار طول‌موج

[۱] . Overtones or Higher Harmonics

مجاز را مشخص می‌کند. اگر شما گیتارزن باشید، به‌طور غریزی این فیزیک [نهفته در مطلب] را می‌فهمید؛ هرقدر که شما انگشتان چسبیده به گیتارتان را به سمت سر گیتار می‌کشید، طول سیم را کاهش می‌دهید و باعث می‌شوید تا با طول‌موج‌های کوتاه‌تر و کوتاه‌تر ارتعاش یابد که متناظرند با نت‌های نازک‌تر.

کوتاه‌ترین هارمونیک موجی است که تنها دو نقطه ثابت یا اصطلاحاً "گره[۱]" دارد؛ این هارمونیک تمام طولش به‌جز این دو گره حرکت می‌کند. همان‌طور که در شکل می‌توانید ببینید، این موج، طول‌موجی دو برابر طول سیم دارد. دومین

[۱]. Node

طول‌موج بلند (یا هارمونیک کوتاه) برابر با طول سیم است، زیرا می‌توانیم یک گره در وسط سیم قرار دهیم. در مرحله بعد می‌توانیم طول‌موجی برابر با $\frac{۲}{۳}$ طول سیم بدست آوریم، و به همین ترتیب.

به‌طورکلی، دقیقاً مشابه با آبی که درون استخر محبوس است، سیم به‌صورت ترکیبی از چند موج ایستای ممکن، ارتعاش می‌یابد و این بستگی به ضربه‌ای دارد که به آن وارد شده است. شکل واقعی سیم را همواره می‌توان با جمع‌کردن موج‌های ایستای مرتبط با هرکدام از هارمونیک‌های حاضر در آن، به دست آورد. هارمونیک‌ها و مقدار نسبی آن‌ها (درصد وزنی مشارکت آن‌ها)، مشخصات صدای تولیدشده را تعیین

می‌کنند. گیتارهای مختلف، توزیع‌های مختلف از هارمونیک‌ها دارند و بنابراین صداهای مختلفی دارند اما C میانه[۱] (هارمونیک خالص) یک گیتار، همواره مشابه با C میانه سایر گیتارهاست. در مورد گیتار، شکل موج ایستا بسیار ساده است. این موج‌ها از نوع سینوسی خالص هستند که طول‌موجشان با توجه به طول سیم ثابت می‌شوند. برای استخر شنا، امواج ایستا پیچیده‌ترند، همان‌طور که در شکل ۱-۶ نشان داده شده است، اما ایده تشکیلشان یکسان است.

ممکن است کنجکاو شده باشید که چرا به این‌ها "موج ایستا" می‌گویند. علتش این است که این امواج، شکلشان را

[۱] . Middle C

تغییر نمی‌دهند. اگر ما دو عکس از یک گیتار، حین ارتعاش سیمش با یک موج ایستا بگیریم، این دو تصویر تنها در اندازه کلی موج (ارتفاع موج در نقاط آن) باهم تفاوت خواهند داشت. قله‌ها همواره در جای مشخصی قرار دارند و گره‌ها نیز همین‌طور، زیرا با توجه به نقاطی که سیم به آن‌ها بسته شده مشخص می‌شوند، یا در مورد استخر، دیوارهای آن. ازلحاظ ریاضی می‌گوییم موجی که در این دو عکس قرار دارند، در حد یک ضریب باهم اختلاف دارند. این ضریب در طول زمان به‌طور متناوب تغییر می‌کند، و بیانگر ارتعاش ریتمیک سیم است. همین اتفاق برای استخر شکل ۱-۶ می‌افتد که هرکدام از تصاویر با ضریبی کلی باهم اختلاف دارند. برای مثال، تصویر

آخر را می‌توان از ضرب ارتفاع موج در هر نقطه تصویر اول در عدد (۱-) به دست آورد.

به‌طور خلاصه، امواجی که به نحوی محصور شوند را می‌توان با استفاده از امواج ایستا (امواجی که شکلشان را تغییر نمی‌دهند) تولید کرد و همان‌طور که گفتیم، دلایل بسیار خوبی برای اختصاص این میزان زمان برای فهم آن‌ها وجود دارد. مهم‌ترین این دلایل این است که امواج ایستا کوانتیده هستند. این مطلب برای موج‌های ایستای سیم‌های گیتار واضح است: [هارمونیک] بنیادین طول‌موجی دو برابر سیم گیتار دارد و دومین طول‌موج بلند مجاز، هم‌اندازه با طول سیم است. هیچ‌گونه موج ایستایی با طول‌موج مابین این دو وجود

ندارد و بنابراین ما می‌توانیم بگوییم که طول‌موج‌های مجاز بر روی سیم‌های گیتار کوانتیده هستند.

بنابراین امواج ایستا این واقعیت را بیان می‌کنند که زمانی که امواج را محصور کنیم، چیزی کوانتیده می‌شود. در مورد سیم‌های گیتار، این چیز به‌وضوح طول‌موج است. در مورد الکترون درون جعبه، امواج کوانتومی متناظر با الکترون نیز محصور می‌شوند و در صورت مقایسه ما باید انتظار داشته باشیم که تنها امواج ایستای مشخصی درون جعبه حضور خواهند داشت و بنابراین چیزی کوانتیده خواهد بود. سایر امواج وجود نخواهند داشت، دقیقاً مانند گیتار که سایر نت‌های اُکتاو را همزمان نمی‌تواند بنوازد، و ارتباطی به نحوه ضرب شما به سیم ندارد. همچنین دقیقاً مانند صدای گیتار،

وضعیت عمومی الکترون، با ترکیبی از امواج ایستا تشریح می‌شود. این امواج ایستای کوانتومی به نظر جذاب می‌آیند و انگیزه‌ای می‌شوند تا تحلیلمان را آغاز کنیم.

برای پیش‌روی، ما باید در مورد شکل جعبه‌ای که الکترونمان درون آن جای خواهد گرفت، واضح‌تر صحبت کنیم. برای ساده‌سازی، فرض می‌کنیم که الکترون مجاز است درون محدوده‌ای به‌اندازه L جهش کند، اما خارج از این محدوده نباید برود. ما نیازی به توضیح اینکه چگونه می‌خواهیم از پرسه زدن الکترون در خارج از محدوده ممانعت کنیم نداریم – اما اگر قرار باشد این [توصیف] مدلی ساده از اتم باشد، باید تصور کنیم که نیرویی که از هسته باردار با بار الکتریکی مثبت به الکترون وارد می‌شود، مسئول این ممانعت

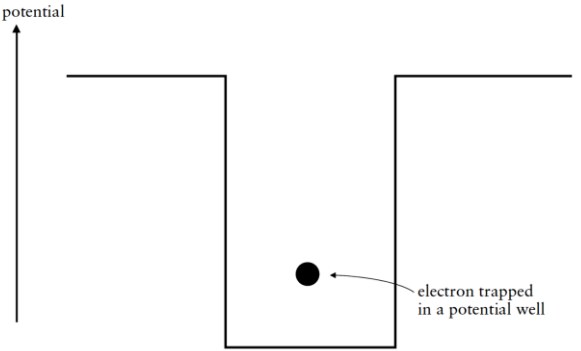
است. به اصلاح به آن "پتانسیل چاه مربعی[۱]" می‌گویند. ما این شرایط را در شکل ۳-۶ نشان دادیم که دلیل این نام‌گذاری را نیز مشخص می‌کند.

این ایده که ذره‌ای را در پتانسیلی محصور کنیم بسیار مهم است و ما دوباره از آن استفاده خواهیم کرد، پس بیایید برای مفهوم کاملش اقدام کنیم. ما دقیقاً چگونه یک ذره را به دام می‌اندازیم (محبوس می‌کنیم)؟ این دقیقاً یک سؤال هوشمندانه‌ای است؛ برای درک عمیق آن ما نیازمندیم که بدانیم ذرات چگونه با یکدیگر اندرکنش[۲] (تعامل) دارند، که ما

[۱]. Square Well Potential

[۲]. Interaction

این کار را در فصل ۱۰ انجام خواهیم داد. بااین‌وجود، ما بدون اینکه سؤال‌های زیادی بپرسیم می‌توانیم پیش روی کنیم.



شکل ۳-۶: الکترونی که درون پتانسیل چاه مربعی به دام افتاده است

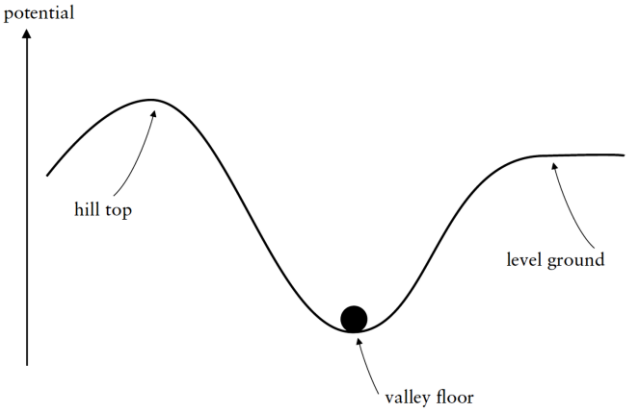
این توانایی که "سؤالات زیادی نپرسیم"، یکی از مهارت‌های موردنیاز در فیزیک است زیرا ما برای جواب به هر سؤالی باید بین آن سؤال و سایر سؤالات خطی بکشیم [منظور این است که نمی‌توان هم‌زمان به همه سؤالات پاسخ داد. باید برای شروع، هر سؤال را بدون در نظر گرفتن سایر سؤالات پاسخ داد]؛ هیچ سیستم ذراتی کاملاً ایزوله شده نیست. منطقی به نظر می‌آید که اگر بخواهیم طرز کار فرهای مایکروویو را بفهمیم، دیگر نباید نگران ترافیکی باشیم که در بیرون خانه وجود دارد. ترافیک بیرون، تأثیر بسیار ناچیزی بر عملکرد مایکروویو دارد. تنها می‌تواند ارتعاشاتی را در هوا و زمین ایجاد کند که آن‌ها نیز اندکی فر را بلرزانند. همچنین ممکن است یک میدان مغناطیسی منحرف‌شده‌ای نیز وجود داشته باشد

که تجهیزات الکترونیکی داخل فر را تحت تأثیر قرار دهد و در این مورد پوشش دستگاه کمکی به جلوگیری از این اتفاق نمی‌کند. ممکن است که چشم‌پوشی از این چیزها باعث بروز اشتباهاتی شود و ممکن است جزئیات تأثیرگذاری در این موارد وجود داشته باشد که ما آن را ندید گرفته‌ایم. اگر این‌طور باشد ما جواب اشتباهی خواهیم داد و نیاز به تجدید نگرش در فرضیاتمان داریم. این مسئله خیلی مهم است و در قلب پیشرفت‌های علم قرار دارد. تمامی فرضیات نهایتاً توسط آزمایشات رد شده یا تأیید می‌شوند. طبیعت قاضی نهایی است، نه احساس رضایت انسان. راهکار ما این است که از جزئیات سازوکاری که الکترون را به دام می‌اندازد چشم‌پوشی کنیم و آن را با چیزی به نام پتانسیل مدل‌سازی کنیم.

"پتانسیل" در اینجا واقعاً به معنی " اثری فیزیکی بر روی ذره است که ما نیازی به توضیح جزئیاتش نداریم". ما نحوه اندرکنش ذرات را بعداً بررسی خواهیم کرد، اما فعلاً به زبان پتانسیل صحبت خواهیم کرد. اگر برایتان عجیب است، بگذارید مثالی بزنم تا نحوه استفاده از پتانسیل‌ها را در فیزیک نشان دهم:

شکل ۴-۶، توپی را نشان می‌دهد که درون یک دره محبوس شده است. اگر ضربه‌ای به این توپ وارد کنیم به بالای دره حرکت می‌کند اما تا جایی می‌رود و دوباره به پایین می‌غلتد. این بهترین مثالی از یک ذره است که توسط یک پتانسیل محبوس شده است. در این حالت میدان گرانشی زمین تولید پتانسیل می‌کند و شیب تپه‌ها، پتانسیل شیب

ایجاد می‌کند. باید بدانید که ما می‌توانیم جزئیات حرکت توپ به دور دره را بدون دانستن جزئیات اندرکنش سطح دره با توپ، محاسبه کنیم – برای این کار باید با نظریه الکترودینامیکی کوانتومی آشنایی داشته باشیم. اگر معلوم شود که جزئیات اندرکنش بین-اتمی بین اتم‌های توپ و اتم‌های سطح دره، بر روی حرکت توپ اثر قابل‌توجهی می‌گذارد،



شکل ۴-۶: توپی بر روی سطح دره‌ای قرار دارد. ارتفاع زمین از سطح دریا دقیقاً متناسب با پتانسیلی است که ذره حین غلتیدنش تجربه می‌کند.

پیش‌بینی‌های ما اشتباه از آب درمی‌آیند. در حقیقت اندرکنش‌های بین-اتمی مهم است چون باعث اصطکاک می‌شوند، اما می‌توانیم بدون ورود به نمودارهای فاینمن این را مدل کنیم. اما از موضوع دور خواهیم شد.

این مثال بسیار ملموس بود، زیرا واقعاً می‌توانستیم شکل پتانسیل را ببینیم[۱]. بااین‌حال این ایده کلی‌تر است و برای پتانسیل‌هایی به‌غیراز گرانش و دره نیز جواب می‌دهد. مثلاً الکترونی که درون یک چاه مربعی محبوس شده است. برخلاف مثال توپ درون دره، ارتفاع این دره واقعاً ارتفاعِ چیز خاصی نیست؛ بلکه بیانگر سرعت موردنیاز برای حرکت

[۱]. علت اینکه پتانسیل گرانشی دقیقا به شکل سطح زمین است این است که در نزدیکی‌های سطح زمین پتانسیل گرانشی متناسب با ارتفاع از سطح است.

الکترون است که از چاه فرار نکند. در مورد دره، این اتفاق مشابه با غلتاندن توپ به حدی است که از بدنه دره بالا رفته و خود را به بیرون از آن بی اندازد. اگر الکترون با سرعت کمی حرکت کند، ارتفاع واقعی پتانسیل خیلی هم مهم نیست و ما می‌توانیم مطمئن باشیم که الکترون درون چاه محبوس خواهد ماند.

حال بیایید بر روی الکترونی متمرکز شویم که درون جعبه‌ای که با پتانسیل چاه مربعی توصیف شده، به دام افتاده است. ازآنجایی‌که الکترون نمی‌تواند از جعبه فرار کند، امواج کوانتومی در لبه‌های جعبه باید صفر باشند. در آن صورت ۳ موج ممکن کوانتومی با بیشترین طول‌موج‌ها، مشابه با امواج سیم‌های گیتاری خواهد بود که در شکل ۲-۶ نشان داده شده

اند: بزرگ‌ترین طول‌موج ممکن دو برابر اندازه جعبه خواهد بود ۲L؛ طول‌موج بزرگ بعدی برابر با اندازه جعبه خواهد بود L؛ و طول‌موج بعدی نیز برابر با $\frac{۲L}{۳}$ خواهد بود. به‌طورکلی ما می‌توانیم الکترون‌هایی با طول‌موج $\frac{۲L}{n}$ را درون جعبه جای دهیم که n=۱،۲،۳،۴،... .

خصوصاً برای جعبه مربعی، امواج الکترون دقیقاً به شکل امواج سیم‌های گیتار خواهند بود؛ آن‌ها موج‌های سینوسی‌ای هستند که طول‌موج‌های مجاز خاصی دارند. حال می‌توانیم پیش برویم و معادله دو بروگلی را که در فصل قبل معرفی شد به‌کارگیریم و طول‌موج این امواج سینوسی را به تکانه الکترون با رابطه $p=h/\lambda$ ربط دهیم. در این مورد، امواج ایستاده

الکترونی را تشریح می‌کنند که مجاز است تکانه‌های خاصی را داشته باشد و آن‌ها با رابطه $p=nh/(2L)$ به دست می‌آیند، کار ما این بود که طول‌موج‌های مجاز را وارد معادله دو بروگلی کردیم.

بنابراین به این طریق نشان دادیم که تکانه یک الکترون درون یک چاه مربعی کوانتیده است. این مطلب مهمی است. بااین‌حال باید مراقب باشیم. پتانسیل شکل ۳-۶ مورد خاصی است و برای سایر پتانسیل‌ها لزوماً امواج ایستا، سینوسی نیستند. شکل ۵-۶ امواج ایستای روی یک طبل را نشان می‌دهد. روی سطح طبل ماسه پاشیده شده است که در گره‌های امواج ایستا تجمع خواهند کرد. ازآنجایی‌که مرز محصورکننده طبل مرتعش به‌جای مربع، دایروی است، امواج

ایستا دیگر سینوسی نیستند.[۱] این یعنی هرقدر که ما بخواهیم به درک واقعی‌تری از الکترونی که توسط پروتون محبوس شده برسیم، به نظر می‌آید که امواج ایستایش سینوسی نباشند. این هم به‌نوبه خود یعنی رابطه بین طول‌موج و تکانه از بین می‌رود. پس ما چگونه این امواج ایستا را تفسیر کنیم؟ پس اگر تکانه را کنار بگذاریم، چه کمیت دیگری از ذرات محبوس، کوانتیده می‌ماند؟

[۱]. در حقیقت آنها با توابع بسل توصیف می‌شوند

شکل ۵-۶: یک طبل مرتعش که با ماسه پوشیده شده است. ماسه بر روی گره‌های امواج ایستا جمع می‌شود.

ما این جواب را با دقت در پتانسیل چاه مربعی پاسخ خواهیم داد که اگر تکانه الکترون کوانتیده شود، انرژی آن نیز

کوانتیده خواهد شد. این حرف ساده‌ای است و اطلاعات مهم جدیدی را به ما نمی‌دهد چون انرژی و تکانه با رابطه ساده‌ای باهم ارتباط دارند. به‌طور خاص $E=p^2/2m$ که E انرژی، p تکانه الکترون محبوس و m جرم آن است[1]. اما برخلاف ظاهرش، این حرف بی‌ارزش نیست، زیرا برای پتانسیل‌هایی که به‌سادگی چاه مربعی نیستند، هر موج ایستایی همواره مرتبط با یک ذره با انرژی مشخصی است.

این تفاوت مهم بین انرژی و تکانه به این دلیل است که $E=p^2/2m$ تنها زمانی درست است که پتانسیل در محدوده‌ای

[1]. این مطلب از اینجا استخراج می شود که انرژی برابر است با $(1/2)mv^2$ و $p=mv$. البته این معادلات طبق نسبیت خاص تصحیح می شوند، اما اثر آن برای الکترونی که درون اتم هیدروژن است، قابل اغماض است.

که ذره وجود دارد، تخت باشد و این باعث می‌شود که ذره آزادانه حرکت کند، مانند تیله‌ای بر روی میز، یا دقیق‌تر، الکترونی درون چاه مربعی. به‌طورکلی انرژی ذره همواره برابر با $E=p^2/2m$ نخواهد بود؛ بلکه برابر با حاصل جمع انرژی جنبشی و پتانسیلش است. این واقعیت، رابطه ساده بین انرژی و تکانه را از بین می‌برد.

ما می‌توانیم این مطلب را با تفکری دوباره درباره توپ درون دره که در شکل ۴-۶ نشان داده شده، بررسی کنیم. اگر ما با توپی شروع کنیم که بر روی سطح دره ساکن است، هیچ

اتفاقی نخواهد افتاد[۱]. برای اینکه آن را مجاب به حرکت به بالای دره کنیم باید به آن ضربه‌ای وارد کنیم که معادل با این است که باید به آن انرژی بدهیم. لحظه‌ای پس از ضربه به توپ، تمام انرژی آن به‌صورت انرژی جنبشی خواهد بود. در طی بالا رفتن از دیواره دره سرعت توپ کم می‌شود و نهایتاً در ارتفاعی بالاتر از سطح دره، قبل از افتادنش متوقف می‌شود و سپس به پایین غلتیده و از آن‌طرف دره بالا می‌رود. در لحظه‌ای که در ارتفاعی بالاتر از کف دره می‌ایستد، هیچ‌گونه انرژی جنبشی نداشته، اما نباید فکر کرد که انرژی ناگهان

[۱]. این توپ بزرگ است و ما را نگران جنب‌وجوش های کوانتومی نمی کند. اما اگر این ایده از ذهنتان گذشت، علامت خوبی است: غریزه‌تان دارد کوانتیزه می‌شود.

غیبش زده است. کل انرژی جنبشی تبدیل به انرژی پتانسیل شده که برابر با mgh است. [در این معادله] g برابر با شتاب گرانش در سطح زمین و h ارتفاع توپ بالاتر از سطح ته دره است. پس‌ازاینکه توپ شروع به غلتیدن دوباره به سمت ته دره می‌کند این انرژی پتانسیل ذخیره‌شده دوباره به‌تدریج تبدیل به انرژی جنبشی می‌شود و دوباره سرعت توپ افزایش می‌یابد. بنابراین در طی حرکت توپ از این سمت دره به آن سمت دره، کل انرژی ثابت می‌ماند اما متناوباً بین انرژی جنبشی و پتانسیل در حال تبدیل است. به‌وضوح تکانه توپ نیز دائماً در حال تغییر است، اما انرژی‌اش ثابت می‌ماند (ما فرض کردیم که اصطکاکی وجود ندارد که سرعت توپ را کم کند. اگر ما

اصطکاک را هم لحاظ کنیم، کل انرژی دوباره ثابت می‌ماند اما با در نظر گرفتن انرژی تلف‌شده ناشی از اصطکاک).

حال ما می‌خواهیم رابطه بین امواج ایستا و ذرات با انرژی معین را به طریق دیگری کشف کنیم، بدون اینکه تمایل به حالات خاصی مثل چاه مربعی داشته باشیم. ما این کار را با استفاده از همان ساعت‌های کوچک کوانتومی انجام خواهیم داد.

اولاً دقت کنید که اگر یک الکترون در لحظه‌ای از زمان با یک موج ایستا توصیف شود، در لحظه دیگری نیز باهمان موج ایستا تعریف خواهد شد. منظور ما از "همان" این است که شکل موج تغییر نمی‌کند، دقیقاً مانند موج ایستای آب در

شکل ۱-۶. مسلماً منظور ما این نیست که موج اصلاً تغییر نمی‌کند. ارتفاع آب تغییر می‌کند اما مکان‌هایی که در آن‌ها قله‌ها و گره‌ها اتفاق افتاده ثابت می‌مانند. این باعث می‌شود که بفهمیم توصیف ساعت کوانتومی از موج ایستا چه شکلی خواهد بود که در شکل ۶-۶ برای موج ایستای بنیادین نشان داده شده است. اندازه ساعت در نقاط مختلف موج نشان‌دهنده موقعیت قله‌ها و گره‌هاست و سرعت چرخش عقربه در همه ساعت‌ها یکسان است. امیدواریم که بفهمید چرا چنین الگوی خاصی از ساعت‌ها را رسم کرده‌ایم. گره‌ها همواره باید گره بمانند، و قله‌ها نیز باید همواره قله باشند و جایشان ثابت باشد. این یعنی ساعت‌هایی که در نزدیکی‌های گره‌ها قرار دارند، همواره باید بسیار کوچک باشند و ساعت‌هایی که

نماینده قله‌ها هستند باید همواره بزرگ‌ترین عقربه را داشته باشند. بنابراین تنها اختیاری که ما داریم این است که اجازه دهیم ساعت‌ها سر جایشان باقی بمانند و همزمان بچرخند.

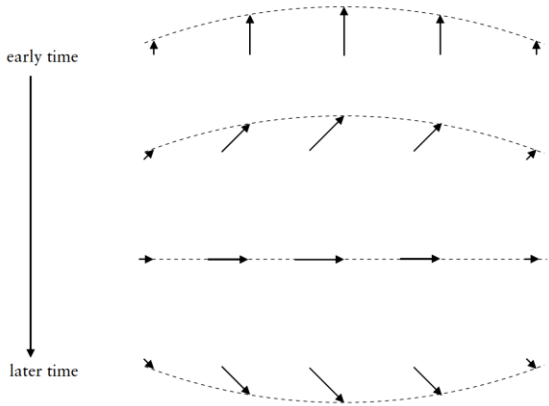
اگر ما روش فصل‌های گذشته را پیش بگیریم، اینک باید از پیکره‌بندی ساعت‌های نشان داده‌شده در ردیف بالای شکل ۶-۶ شروع کنیم و با استفاده از قوانین کوچک کردن و چرخاندن، سه ردیف پایینی را در زمان‌های بعدی تولید کنیم. این تمرین جهش ساعت‌ها فراتر از این کتاب است، اما انجام‌شدنی است و بحث فرعی خوبی است، زیرا برای انجام درست این کار باید این امکان را نیز در نظر گرفت که ذره می‌تواند قبل از جهشش به نقطه مقصد "از دیواره‌های جعبه خارج شود". اتفاقاً ازآنجایی‌که ساعت‌های وسطی بزرگ‌تر

هستند، ما سریعاً نتیجه می‌گیریم که الکترونی که توسط این آرایه از ساعت‌ها توصیف شد به‌احتمال‌زیاد در وسط جعبه یافت شود و نه در گوشه‌های آن.

فهمیدیم که الکترون محبوس شده با آرایه‌ای از ساعت‌ها توصیف می‌شود که با نرخ یکسانی می‌چرخند. نه فیزیکدانان و نه قطعاً موسیقیدانان این‌گونه صحبت می‌کنند؛ به گفته آن‌ها امواج ایستا امواجی با فرکانس مشخص هستند[۱]. امواج فرکانس بالا متناظر با ساعت‌هایی هستند که سرعت چرخششان بیشتر از ساعت‌های امواج فرکانس پایین است. شما می‌توانید این را بفهمید، زیرا اگر ساعتی سرعت چرخش

[۱]. البته احتمالا موسیقیدانان و مخصوصا طبل زن ها چنین حرفی نزنند ، زیرا واژه فرکانس بیش از دو بخش (سیلاب) است.

زیادی داشته باشد، زمانی که برای تبدیل یک قله به دره و دوباره قله صرف می‌شود (که مترادف با یک دور کامل ساعت



شکل ۶-۶: چهار تصویر لحظه‌ای از یک موج ایستا که لحظه‌به‌لحظه پیش روی می‌کند. فلش‌ها نماینده عقربه ساعت‌ها هستند و خط نقطه‌چین تصویری از جهت "ساعت ۱۲" است. چرخش ساعت‌ها هم آهنگ است.

است) کمتر است. در مورد امواج آب، امواج ایستای فرکانس بالا سرعت بالا و پایین رفتنشان سریع‌تر از امواج فرکانس پایین است. در موسیقی گفته می‌شود که C میانی فرکانسی برابر با ۲۶۲ Hz (هرتز) دارد که این یعنی در یک گیتار، سیم ۲۶ بار در هر ثانیه بالا و پایین می‌رود. A بالای C میانی فرکانسش ۴۴۰ هرتز است، پس سریع‌تر مرتعش می‌شود (این استاندارد موردتوافق برای ارکسترها و دستگاه‌های موسیقی در سراسر دنیاست).بااین‌حال همان‌طور که گفتیم این تنها مربوط به امواج سینوسی خالص می‌شود که این امواج با فرکانس معین، طول‌موج معینی نیز دارند. به‌طورکلی *فرکانس* کمیتی بنیادین است که امواج ایستا را توصیف می‌کند.

سؤال میلیون دلاری این است که "الکترونی با فرکانس مشخص یعنی چه؟". یادآوری کنیم که این وضعیت‌های الکترون به این دلیل برای ما جذابیت دارند که کوانتیده هستند و الکترون در چنین وضعیتی همواره باقی می‌ماند (مگر اینکه چیزی وارد محدوده پتانسیل شود و ضربه‌ای به الکترون وارد کند)

جمله آخر سرنخی بزرگ برای فهم اهمیت "فرکانس" است. ما با اصل پایستگی انرژی کمی قبل‌تر در همین فصل مواجه شدیم و این یکی از معدود قوانین بی‌چون‌وچرای فیزیک است. پایستگی انرژی مشخص می‌کند که اگر الکترونی درون یک اتم هیدروژن (یا یک چاه مربعی) انرژی بخصوصی داشته باشد، آن انرژی تغییر نمی‌کند، مگر اینکه "اتفاقی بی افتد".

به‌عبارت‌دیگر یک الکترون نمی‌تواند بی‌دلیل انرژی‌اش را تغییر دهد. این گفته جالب نیست و در تضاد با الکترونی است که می‌دانیم در یک نقطه قرار دارد. همان‌طور که به‌خوبی می‌دانیم، الکترون در یک‌لحظه به کل دنیا جهش می‌کند و بینهایت ساعت را پراکنده می‌کند. اما الگوی ساعت موج ایستا متفاوت است. [این موج] شکلش را حفظ می‌کند و ساعت‌ها دائماً در حال چرخش هستند، مگر اینکه چیزی این حرکت را مختل کند. بنابراین ماهیت تغییرناپذیر امواج ایستا، آن‌ها را گزینه خوبی برای توصیف یک الکترون که در انرژی معین است می‌کند.

حال که ما فرکانس یک موج را به انرژی یک ذره اختصاص دادیم، می‌توانیم از دانشمان درباره سیم‌های گیتار استفاده

کرده و بگوییم که فرکانس‌های بالاتر باید با انرژی‌های بالاتر مرتبط باشند. زیرا فرکانس بالا به معنی طول‌موج پایین است (زیرا سیم‌های کوچک سریع‌تر مرتعش می‌شوند) و با توجه به دانش ما در مورد خاص پتانسیل چاه مربعی، ما انتظار داریم که طول‌موج کوتاه‌تر با توجه به رابطه دو بروگلی متناظر با انرژی بالاتر باشد. بنابراین مهم‌ترین نتیجه و همچنین تنها چیزی که باید برای ادامه کار در خاطر داشته باشید این است که *امواج ایستا، ذرات با انرژی معین را توصیف می‌کنند . هرقدر انرژی بیشتر باشد، سرعت چرخش ساعت‌ها بیشتر می‌شود.*

به‌طور خلاصه ما نتیجه گرفتیم که اگر یک الکترون توسط پتانسیلی محبوس شده باشد، انرژی‌اش کوانتیده است.

به‌اصطلاح فیزیکی ما می‌گوییم که یک الکترونِ به دام افتاده تنها می‌تواند در "سطوح انرژی[۱]" مشخصی قرار داشته باشد. پایین‌ترین انرژی‌ای که الکترون می‌تواند داشته باشد به‌تنهایی با موج ایستای "بنیادین" توصیف می‌شود[۲] و این سطح انرژی را معمولاً "حالت پایه[۳]" می‌گویند. سطوح انرژی متناظر با امواج ایستای فرکانس‌های بالاتر با عنوان "حالات برانگیخته[۴]" یاد می‌شوند.

---

۱. Energy Levels

۲. یعنی n=۱ در مثال پتانسیل چاه مربعی است.

۳. Ground State

۴. Excited States

بیایید الکترونی در انرژی مشخصی را تصور کنیم که در یک پتانسیل چاه مربعی محصور است. ما می‌گوییم "این الکترون در سطح انرژی مشخصی نشسته است" و موج کوانتومی آن توسط یکی از مقادیر n (صفحه ۱۱۵ را ببینید) تعیین می‌شود. این جمله که "در سطح انرژی مشخصی نشسته است" این واقعیت را می‌رساند که الکترون در غیاب تأثیرات خارجی، هیچ حرکتی انجام نمی‌دهد. به‌طورکلی الکترون را می‌توان با تعداد زیادی موج ایستا توصیف کرد، دقیقاً مانند صدای گیتار که در یک‌لحظه از چند هارمونیک تشکیل می‌یابد. این یعنی الکترون عموماً انرژی واحدی ندارد.

قطعاً اندازه‌گیری انرژی الکترون باید همواره مقداری برابر با یکی از امواج ایستای نسبت داده شد به آن، به ما بدهد. برای

محاسبه احتمال یافت الکترون با انرژی مشخص، ما باید ساعت‌هایی مرتبط با سهم موج ایستای متناظر از کل تابع موج را در نظر گرفته، همگی را به توان دو رسانده و باهم جمع ببندیم. عدد حاصله احتمال حضور الکترون در این سطح انرژی خاص را به ما می‌گوید. مجموع چنین احتمالاتی (هرکدام مربوط به سهم یکی از امواج ایستا) باید به عدد ۱ برسد و این یعنی آن الکترون انرژی‌ای متناظر با موج ایستاده خاصی دارد.

بیایید آشکار بگوییم: الکترون می‌تواند همزمان انرژی‌های متفاوت زیادی داشته باشد و این به همان اندازه عجیب است که می‌گفتیم الکترون موقعیت‌های مختلفی دارد. البته در این مقطع کتاب چنین نکته‌ای نباید حیرت‌انگیز باشد اما با توجه

به اتفاقات روزمره ما عجیب است. دقت کنید که تفاوت مهمی بین یک ذره کوانتومی به دام افتاده با امواج ایستای درون استخر شنا یا سیم‌های گیتار وجود دارد. در مورد امواج روی سیم‌های گیتار، این مطلب که این امواج کوانتیده هستند عجیب نیست، زیرا موج واقعی که ارتعاش این سیم را توصیف می‌کند همزمان از تعداد زیادی از امواج ایستای متفاوت تشکیل شده است و هرکدام از آن موج‌ها به‌طور فیزیکی در انرژی کل موج سهیم هستند. ازآنجایی‌که آن‌ها می‌توانند بدین طریق باهم ترکیب شوند، انرژی واقعی سیم مرتعش می‌توان هر مقداری را به خود بگیرد. بااین‌حال برای الکترونی که درون یک اتم محبوس است، سهم نسبی هرکدام از امواج ایستا، احتمال وجود الکترون با آن انرژی خاص را توصیف می‌کند.

تفاوت مهم ازآنجا ناشی می‌شود که امواج آب، امواجی از مولکول‌های آب است اما امواج الکترون مسلماً امواجی از الکترون نیستند.

بررسی‌ها نشان داده‌اند که انرژی یک الکترون درون اتم، کوانتیده است. این یعنی الکترون نمی‌تواند انرژی‌ای مابین مقادیر مجاز داشته باشد. مانند این است که بگوییم یک ماشین می‌تواند سرعتی برابر با ۱۰ مایل بر ساعت یا ۴۰ مایل بر ساعت داشته باشد، اما نمی‌تواند با سرعتی بین این دو حرکت کند. این نتیجه‌گیری عجیب سریعاً توضیحی به ما ارائه می‌دهد که بفهمیم چرا اتم‌ها به‌طور مداوم و به خاطر حرکت مارپیچی الکترون به سمت اتم، از خود نور ساطع نمی‌کنند. زیرا الکترون راهی ندارد که به‌طور پیوسته و دانه به دانه از

خود انرژی پراکنده کند. در عوض، تنها راهی که برای تابش انرژی دارد این است که در یک گام، مقدار زیادی انرژی را یکجا بتاباند.

همچنین می‌توانیم چیزی که اکنون یاد گرفتیم را به مشخصات مشاهده‌شده اتم‌ها ربط دهیم و رنگ‌های مخصوصی که هر اتم از خود ساطع می‌کند را توضیح دهیم. شکل ۷-۶ نور مرئی‌ای که از ساده‌ترین اتم، هیدروژن، ساطع شده است را نشان می‌دهد. این نور از ۵ رنگ مجزا ساخته شده است، یک خط قرمز روشن که به نوری با طول‌موج ۶۵۶ نانومتر مربوط است، یک خط آبی کم‌رنگ با طول‌موج ۴۸۶ نانومتر و سه خط بنفش دیگر که به سمت ماورای بنفش طیف رفته و محو می‌شوند. این مجموعه از خطوط رنگی به‌افتخار فیزیکدان

و ریاضیدان سوییسی یوهان بالمر[۱] که فرمولی در سال ۱۸۸۵ برای توصیف آن‌ها نوشت، با نام سری‌های بالمر[۲] شناخته می‌شوند. بالمر هیچ ایده‌ای نداشت که چرا فرمولش درست جواب می‌دهد، زیرا نظریه کوانتوم هنوز کشف نشده بود – او صرفاً نظمی که در الگو موجود بود را با یک فرمول ساده ریاضی بیان کرد. اما ما می‌توانیم بهتر عمل کنیم و بگوییم همه این‌ها به خاطر موج‌های مجاز کوانتومی است که داخل اتم هیدروژن جای دارند.

[۱] . Johann Balmer

[۲] . Balmer Series

شکل ۷-۶: سری بالمر برای هیدروژن: این اتفاقی است که هنگام عبور نور ناشی از گاز هیدروژن از درون منشور می‌افتد.

می‌دانیم که نور را می‌توان به‌عنوان جریانی از فوتون‌هایی در نظر گرفت که هرکدام انرژی $E=hc/\lambda$ دارند که λ طول‌موج نور است[۱]. بنابراین این مشاهده که اتم‌ها تنها رنگ‌های خاصی از نور را از خود ساطع می‌کنند به این معنی است که آن‌ها

[۱]. بر حسب اتفاق اگر شما بدانید که برای ذرات بدون جرم $E=cp$ که یکی از نتایج نظریه نسبیت خاص انیشتین است، $E=hc/\lambda$ سریعا با استفاده از معادله دو بروگلی بدست می آید.

تنها می‌توانند فوتون‌هایی را با انرژی مشخصی گسیل کنند. ما همچنین یاد گرفتیم که الکترونی که درون یک اتم به دام افتاده است تنها می‌تواند انرژی‌های خاصی را به خود بگیرد. اینک یک گام کوچک نیاز است تا معمای قدیمی نور تابیده‌شده از اتم‌ها را شرح دهیم: این رنگ‌های متفاوت، متناظر با تابش فوتون‌هایی هستند که الکترون‌ها حین افتادن از یک سطح انرژی به سطح انرژی پایین‌تر، گسیل می‌کنند. این ایده به‌طور ضمنی می‌گوید انرژی فوتون‌های مشاهده‌شده، باید همواره متناظر با اختلاف بین یک جفت از انرژی‌های مجاز الکترون‌ها باشد. این شیوه توصیف فیزیک به‌خوبی ارزش بیان کردن وضعیت الکترون به‌وسیله انرژی‌های مجازش را نشان می‌دهد. اگر ما به‌جای آن تصمیم گرفته بودیم که درباره

تکانه‌های مجاز الکترون صحبت کنیم، ماهیت کوانتوم خیلی هم آشکار نمی‌شد و ما نمی‌توانستیم به این سادگی‌ها نتیجه بگیریم که اتم تنها می‌تواند تابش‌هایی در طول‌موج‌های مشخصی را جذب و گسیل کند.

مدل "ذره درون جعبه اتم" آن‌قدر دقیق نیست که به ما اجازه محاسبه انرژی‌های الکترون در یک اتم واقعی را بدهد و این چیزی است که ما نیاز داریم. اما اگر ما پتانسیلی که در محدوده پروتون، الکترون را به دام انداخته دقیق‌تر مدل کنیم، می‌توانیم محاسبات دقیق‌تری را انجام دهیم. همین کافی است که بگوییم این محاسبات بدون هیچ شبهه‌ای تأیید می‌کنند که آن رفتار (کوانتیده بودن) عامل اصلی خطوط رازآلود طیفی است.

احتمالاً دقت کرده‌اید که ما توضیح ندادیم چرا الکترون با گسیل فوتون انرژی از دست می‌دهد. برای اهداف این فصل، نیازی به چنین توضیحی نداریم. اما "چیزی" باید باعث شود تا الکترون تحریک شده و از آن موج ایستای خاص خود خارج شود و این "چیز" موضوع فصل ۱۰ ماست. فعلاً این‌طور می‌گوییم که "برای توضیح الگوهای مشاهده‌شده نور گسیل‌شده از اتم‌ها لازم است که فرض کنیم این نور زمانی گسیل می‌شود که الکترون از یک سطح انرژی به سطح انرژی پایین‌تر می‌افتد". این سطوح انرژی مجاز با شکل جعبه محصورکننده مشخص می‌شوند و آن‌ها از اتم به اتم تغییر می‌کنند، زیرا هر اتم محیط متفاوتی برای محصور کردن الکترون‌های درونش ارائه می‌دهد.

تا اینجا ما با استفاده از تصویر ساده‌ای از اتم، تلاش خوبی برای توضیح اتفاقات کردیم اما این توضیح برای وانمود کردن اینکه الکترون‌ها به‌راحتی درون یک جعبه محصور حرکت می‌کنند، خیلی هم خوب نیست. آن‌ها در محدوده تعدادی پروتون و سایر الکترون‌ها حرکت می‌کنند و برای فهم واقعی اتم‌ها ما نیازمند این هستیم که بدانیم چگونه محیط اتم‌ها را می‌توان دقیق‌تر توصیف کرد.

جعبه اتمی

با در دست داشتن ایده پتانسیل، ما می‌توانیم در توصیفمان از اتم دقیق‌تر عمل کنیم. بیایید با ساده‌ترینِ اتم‌ها، هیدروژن، آغاز کنیم. اتم هیدروژن تنها از دو ذره تشکیل یافته است: یک

الکترون و یک پروتون. پروتون تقریباً ۲۰۰۰ برابر سنگین‌تر از الکترون است، پس می‌توانیم تصور کنیم که حرکت زیادی انجام نداده و سر جای خود باقی می‌ماند و پتانسیلی تولید می‌کند که الکترون در آن محبوس بماند.

پروتون بار الکتریکی مثبت دارد و الکترون بار برابر اما منفی. این را نیز بدانید که دلیل برابری دقیق بار الکتریکی پروتون و الکترون یکی از بزرگ‌ترین معماهای فیزیک است. احتمالاً این امر دلیل خوبی داشته و شاید بتوان آن را توسط نظریه‌ای از ذرات زیراتمی توضیح داد، اما اینک که من این کتاب را می‌نویسم، چنین دلیلی یافت نشده است.

چیزی که می‌دانیم این است که چون بارهای مخالف همدیگر را جذب می‌کنند، پروتون الکترون را به سمت خود خواهد کشید و تا جایی که فیزیک پیش از کوانتوم می‌دانست، این نیرو می‌توانست الکترون را به‌طور دلخواه به فاصله‌های نزدیک خود بکشد. مقدار این نزدیکی بستگی به ماهیت دقیق پروتون دارد؛ آیا پروتون مانند یک توپ پُر است یا ابر مانند است؟ این سؤال بی‌ربط است، زیرا تا جایی که ما دیدیم یک سطح انرژی حداقلی وجود دارد که الکترون می‌تواند در آن باشد و این سطح انرژی توسط بلندترین طول‌موج موج کوانتومی که درون پتانسیلی که توسط پروتون تولیدشده جای می‌گیرد، تعیین می‌شود. ما پتانسیل تولیدشده توسط پروتون را در شکل ۸-۶ نشان داده‌ایم. این "حفره" عمیق شبیه به

پتانسیل چاه مربعی که قبلاً دیدیم عمل می‌کند با این تفاوت که شکلش به آن سادگی نیست.

این شکل به پتانسیل کولمب[۱] معروف است، زیرا با توجه به قانونی که برای اندرکنش بین دو بار الکتریکی وجود دارد تعیین می‌شود که اولین بار در سال ۱۷۸۳ توسط چالرز آگوستین دو کولمب[۲] نوشته شد. چالش قبلی هنوز پابرجاست: ما باید بدانیم که چه موج‌های کوانتومی‌ای می‌تواند درون پتانسیل جای بگیرد و این‌ها سطوح انرژی مجاز اتم هیدروژن را تعیین می‌کنند.

---

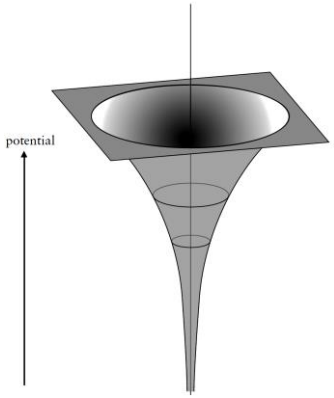
۱. Coulomb Potential

۲. Charles-Augustin de Coulomb

صریحاً بگوییم راه انجام این کار این است که "معادله موج شرودینگر را برای چاه پتانسیل کولمب" حل کنیم که این کار یکی از روش‌های اجرای قوانین جهش ساعت‌هاست. جزئیات این کار فنی است، حتی برای چیزی به‌سادگی اتم هیدروژن، اما خوشبختانه [حل این مسئله] چیز زیادی به ما یاد نمی‌دهد که بخواهیم واردش شویم. به همین دلیل ما مستقیماً به جواب آن می‌پریم و شکل ۹-۶ تعدادی از امواج ایستای نتیجه شده را برای الکترونی درون اتم هیدروژن نشان می‌دهد. چیزی که نشان داده شده است، نقشه احتمال یافت الکترون در جایی است. محدوده‌های روشن مکان‌هایی هستند که احتمال حضور الکترون در آن‌ها بیشتر است. البته اتم واقعی هیدروژن سه‌بعدی است و این تصاویر مربوط به برش‌هایی از

مرکز اتم است. شکل سمت چپ در بالا، تابع موج حالت پایه است و به ما می‌گوید که در این حالت احتمالاً در محدوده‌ای به شعاع ۱×۱۰^{-۱۰} از پروتون یافت شود. انرژی امواج ایستا به ترتیب از سمت چپ بالا به سمت راست پایین افزایش می‌یابد. مقیاس نیز با ضریب ۸ از چپ بالا به راست پایین افزایش می‌یابد – در حقیقت محدوده روشن که تصویر چپ بالا را پوشانده تقریباً برابر با نقطه روشنی است که در مرکز دو تصویر سمت راستی قرار دارد. این یعنی زمانی که الکترون در سطح انرژی بالاتر باشد، احتمال دارد دورتر از پروتون قرار داشته باشد (و بنابراین تقیّد ضعیف‌تری نسبت به آن دارد). واضح است که این امواج سینوسی نیستند و این یعنی متناظر

با تکانه مشخصی نیستند. اما همان‌طور که تلاش کرده بودیم تا تأکید کنیم، آن‌ها مرتبط با وضعیت انرژی معینی هستند.

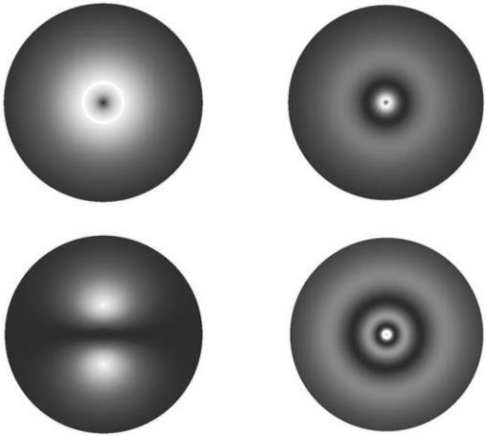


شکل ۸-۶: چاه پتانسیل کولمب به دور یک پروتون. چاه در جایی عمیق‌تر است که پروتون حضور دارد.

شکل مشخص امواج ایستا بستگی به شکل چاه و بعضی ویژگی‌هایی دارد که می‌ارزد راجع بهشان بیشتر بگوییم. واضح‌ترین ویژگی چاه دور پروتون این است که تقارن کروی دارد. این یعنی از هر زاویه‌ای که به آن نگاه کنید، همواره یکسان دیده می‌شود. برای تصور این مطلب، توپ بسکتبالی را بدون نوشته‌های روی آن تصور کنید: این توپ یک کره کامل است و هرقدر هم آن را بچرخانید، به یک‌شکل دیده می‌شود. احتمالاً ما الکترون درون اتم هیدروژن را مانند چیزی تصور خواهیم کرد که درون یک توپ بسکتبال محصور است. این مطلب پذیرفتنی‌تر از این است که بگوییم الکترون درون یک چاه مربعی محصور است، اما شباهتی بین این دو وجود دارد. شکل ۱۰-۶ در سمت چپ، دو تا از کم انرژی ترین امواج

ایستای صوتی را نشان می‌دهد که می‌توانند درون توپ بسکتبال تولید شوند.

دوباره بگوییم که ما (برای نشان دادن شکل) برشی از وسط توپ زده‌ایم و فشار هوای درون توپ از مشکی به سفید افزایش می‌یابد. در سمت راست دو موج ایستای الکترون محتمل در اتم هیدروژن قرار دارند. تصاویر یکسان نبوده، اما شبیه به هم هستند. پس خیلی هم احمقانه نیست که الکترونی که درون اتم هیدروژن را شبیه به چیزی بدانیم که درون یک توپ بسکتبال به دام افتاده است. هدف اصلی این تصویر به نمایش کشیدن رفتار



شکل ۹-۶: چهار تا از امواج کوانتومی کم انرژی که الکترون درون اتم هیدروژن را نشان می‌دهند. محدوده‌های روشن‌تر مناطقی هستند که احتمال حضور الکترون در آن‌ها بیشتر است و پروتون در مرکز است. اشکال راست بالا و چپ پایین با ضریب ۴ نسبت به شکل اول کوچک

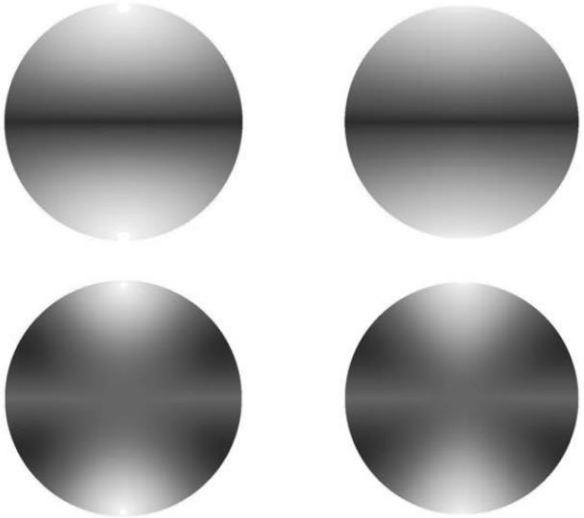
نمایی شده‌اند و شکل راست پایین با ضریب ۸ . اندازه شکل اول حدوداً ۳×۱۰^{-۱۰} متر است.

موج‌مانند ذرات کوانتومی است و خوشبختانه کمی ابهامات را می‌زداید: فهم [رفتار] الکترون درون اتم پیچیده‌تر از فهم نحوه ارتعاش هوای درون توپ بسکتبال نیست.

قبل از اینکه اتم هیدروژن را رها کنیم، می‌خواهیم اندکی درباره پتانسیلی که توسط پروتون به وجود می‌آید و نحوه جهش الکترون از سطوح انرژی بالاتر به پایین و گسیل فوتون، مطالبی را عنوان کنیم.

ما در طی معرفی ایده پتانسیل از هرگونه توضیح درباره نحوه برقراری ارتباط بین الکترون و پروتون خودداری کردیم.

این ساده‌سازی به ما اجازه داد تا کوانتیده شدن انرژی در ذرات به دام افتاده را بفهمیم. اما اگر ما خواستار درک جدی‌تری از اتفاقی که می‌افتد هستیم، ما باید تلاش کنیم تا مکانیزم موجود در به دام انداختن ذرات را بفهمیم. در مورد حرکت یک



شکل ۱۰-۶: دو عدد از ساده‌ترین امواج ایستا درون توپ بسکتبال (چپ) در مقایسه با موج الکترون متناظر آن‌ها در اتم هیدروژن (راست).

آن‌ها بسیار شبیه به هم هستند. شکل بالا برای هیدروژن تصویری است از قسمت مرکزی شکل چپ پایین در شکل ۹-۶

ذره درون یک جعبه، ما احتمالاً دیوارهای نفوذناپذیری را تصور می‌کنیم که از اتم‌ها تشکیل شده است و ذره به دلیل اندرکنشی که با اتم‌های درون دیوار دارد، نمی‌تواند از آن عبور کند. درک صحیح از "نفوذناپذیری" از دانستن نحوه اندرکنش ذرات با یکدیگر حاصل می‌شود.به همین ترتیب، ما گفتیم که پروتون درون اتم هیدروژن "پتانسیلی ایجاد می‌کند" که الکترون درون آن حرکت می‌کند و همچنین گفتیم که این پتانسیل، الکترون را به طریقی مشابه با ذره محبوس شده درون یک جعبه، به دام می‌اندازد. چنین تشبیهی، مشکل عمیق‌تری ایجاد می‌کند، زیرا به‌وضوح الکترون با پروتون

اندرکنش دارد و این اندرکنش است که نحوه محبوس ماندن الکترون را تعیین می‌کند [و نه دیوارهای خیالی دور اتم].

در فصل ۱۰ خواهیم دید که نیاز داریم قوانین کوانتومی‌ای که تا اینجا ساختیم را با تعدادی قانون جدید که در ارتباط با اندرکنش ذرات است، ادغام کنیم. در این لحظه ما قوانین بسیار ساده‌ای داریم: ذرات به اطراف می‌جهند و با خود ساعت‌هایی خیالی را حمل می‌کنند که [عقربه] این ساعت‌ها به میزان مشخصی با توجه به مقدار جهش می‌چرخند. تمامی جهش‌ها مجازند که این یعنی یک ذره می‌تواند از A به B توسط تمامی بینهایت مسیر متفاوت ممکن بپرد. هر مسیری، ساعت کوانتومی خاص خود را به B می‌برد و ما باید ساعت‌ها را باهم جمع بسته و ساعت نهایی را به دست آوریم. آن ساعت

نهایی به ما خواهد گفت که احتمال یافتن آن ذره در نقطه B چقدر است. اضافه کردن اندرکنش‌ها به بازی بسیار ساده خواهد بود. ما قانون جدیدی را به قانون جهش ضمیمه خواهیم کرد که می‌گوید یک ذره می‌تواند ذره دیگری را گسیل یا جذب کند. اگر ما یک ذره در ابتدای اندرکنش داشته باشیم، درنهایت می‌توانیم دو ذره به دست آوریم؛ اگر قبل از اندرکنش دو ذره داشته باشیم، این امکان وجود دارد که در آخر یک ذره باقی بماند. مسلماً اگر بخواهیم درست پیش برویم باید نسبت به این مطلب که کدام ذرات می‌توانند باهم همجوشی کنند یا واپاشیده شوند دقیق‌تر باشیم و باید بگوییم زمانی که اندرکنشی اتفاق می‌افتد، چه بلایی بر سر ساعتی می‌آید که ذره حمل می‌کرد. این مطالب مربوط به

فصل ۱۰ می‌شوند، اما اثراتشان بر روی اتم‌ها باید واضح باشد. اگر قانونی داشته باشیم که بگوید الکترون می‌تواند با گسیل فوتون، اندرکنش کند، این امکان را خواهیم داشت که الکترون اتم هیدروژن فوتونی گسیل کرده، از انرژی‌اش کاسته شده و به سطح انرژی پایین‌تری سقوط کند. همچنین می‌تواند با جذب فوتون، انرژی به دست آورده و به سطح انرژی بالاتری بپرد.

وجود خطوط طیفی مشخص می‌کند که چنین اتفاقی می‌افتد و این فرایند معمولاً به‌شدت یک‌طرفه است. یعنی الکترون همواره می‌تواند فوتونی را گسیل کرده و انرژی از دست بدهد، اما تنها زمانی می‌تواند انرژی به دست آورد که فوتونی (یا یک منبع انرژی دیگر) آماده برخورد با آن الکترون

باشد. در گاز هیدروژن چنین فوتون‌هایی اندک و در لابه‌لای گاز پراکنده‌اند و اتمی که در حالت برانگیختگی قرار دارد بیشتر تمایل به تابش فوتون دارد تا جذب آن. اثر خالص این است که اتم‌های هیدروژن تمایل به خروج از حالت برانگیختگی دارند و این یعنی تابش به جذب غلبه کرده و پس از مدتی اتم خودش را به حالت n=۱ که همان حالت پایه است، می‌رساند. البته همواره این‌گونه نیست، زیرا شما می‌توانید طوری برنامه‌ریزی کنید که همواره با دادن انرژی به‌صورت کنترل‌شده‌ای، اتم‌ها را به‌طور مداوم برانگیخته کنید. این روش اساس تکنولوژی‌ای است که امروزه همه‌جا استفاده می‌شود: لیزر. ایده اساسی لیزر بدین گونه است که به اتم‌ها انرژی داده، آن‌ها را برانگیخته کرده و فوتون‌هایی که پس از از

دست دادن انرژی الکترون‌ها به دست می‌آید را جمع‌آوری می‌کنند. این فوتون‌ها ابزار بسیار خوبی برای خواندن داده‌ها با دقت بالا از روی سطح CD و DVD هستند. مکانیک کوانتومی از هزاران طرف زندگی ما را تحت تأثیر خود قرار داده است.

در این فصل ما موفق شدیم تا منشأ خطوط طیفی را با استفاده از ایده ساده انرژی کوانتیده شرح دهیم. این‌طور به نظر می‌آید که ما روشی برای تفکر درباره اتم‌ها در دست داریم که جواب می‌دهد. اما چیزی وجود دارد که هنوز کاملاً درست نیست. ما قطعه نهایی این پازل را هنوز به دست نیاوردیم و بدون آن شانسی برای توضیح ساختار اتم‌های سنگین‌تر از هیدروژن نداریم. بدتر از آن ما نخواهیم توانست

بفهمیم که چرا به درون زمین رسوخ نمی‌کنیم [زیرا بیش از ۹۹ درصد فضای اتم‌ها و به‌تبع آن بدن ما و سطح زمین خالی است] و این قضیه معضلی برای بهترین نظریه ما درباره طبیعت است. نکته‌ای که به دنبال آن هستیم، توسط کار فیزیکدان استرالیایی ولفگانگ پاولی[۱] پاسخ داده شده است.

[۱] . Wolfgang Pauli

فصل هفتم

جهان بر روی نوک سوزن (و چرا ما به درون زمین رسوخ نمی‌کنیم)

اینکه چرا ما به درون زمین رسوخ نمی‌کنیم، یکی از معماهاست. اگر بگوییم زمین "جامد" است، کمک زیادی به پاسخ آن نمی‌کند زیرا رادرفورد کشف کرد که فضای اتم‌ها تقریباً به‌طور کامل خالی است. حتی زمانی که فهمیدیم ذرات بنیادی طبیعت اندازه‌ای ندارند، مسئله عجیب‌تر شد.

مواجهه با ذراتی که "اندازه‌ای ندارند" ظاهراً مشکل‌ساز است و احتمالاً غیرممکن. اما هیچ‌کدام از مطالبی که در

فصول قبل مطرح کردیم الزامی به فیزیکی بودن ذرات نداشتند. ایده اجسام (ذرات) نقطه‌مانند نباید اشتباه باشد، حتی اگر در تضاد با باور عمومی ما باشد – البته اگر تا اینجای کتاب که درباره نظریه کوانتوم است، باوری برای خواننده باقی مانده باشد. البته کاملاً ممکن است که آزمایشات آینده، مثلاً برخورددهنده بزرگ هادرونی نشان دهد که الکترون‌ها و کوارک‌ها شبیه به نقاط بینهایت کوچک نیستند، اما تا به امروز آزمایشات چنین نتیجه‌ای نداده‌اند و در معادلات بنیادین فیزیک ذرات، جایی برای "اندازه" وجود ندارد. البته معنی این حرف این نیست که ذرات نقطه‌ای شکل مشکلات خاص خود را ندارند – مثلاً این ایده که بار الکتریکی معینی در حجمی به‌اندازه بینهایت ریز گنجانده شده، خودش مسئله

آزاردهنده‌ای است - اما تا به امروز از کنار تله‌های نظری به‌طور میانبر عبور کرده‌ایم. احتمالاً بزرگ‌ترین مسئله فیزیک بنیادین یعنی توسعه نظریه کوانتومی گرانش، قائل به عرصه محدودی [و نه بینهایت ریز] باشد، اما شواهد فعلی هنوز فیزیکدانان را مجبور به کنار گذاشتن ایده ذرات بنیادین نکرده است. برای تأکید بیشتر: ذرات نقطه‌ای واقعاً اندازه (ابعاد) ای ندارند و نمی‌توان پرسید "اگر الکترون را به دو قسمت تقسیم کنیم چه اتفاقی می‌افتد" زیرا [وقتی‌که ذره‌ای مانند الکترون، بُعد نداشته باشد] مطرح کردن ایده "نصف الکترون" مفهومی نخواهد داشت.

یکی از امتیازات کار کردن با بنیادی‌ترین اجزای ماده که مطلقاً بعد نداشته باشند این است که ما مشکلی با این تصور

نداریم که روزی کل جهان قابل‌رؤیت در محدوده‌ای به‌اندازه یک گریپ‌فروت یا اصلاً به‌اندازه یک سرسوزن، فشرده بوده است. گرچه این تصور انسان را به فکر فرومی‌برد – حتی تصور اینکه یک کوه را بتوان به‌اندازه یک نخود فشرده کرد نیز سخت است، چه برسد به یک ستاره، یا یک کهکشان یا ۳۵۰ میلیارد کهکشان بزرگ در جهان قابل‌رؤیت – اما هیچ دلیلی برای غیرممکن بودن این تصور وجود ندارد. در حقیقت نظریات امروز ما در باب مبدأ ساختار جهان، درگیر مسائلی مانند مشخصات جهان در چنین مقیاس‌های فشرده نجومی هستند. چنینی نظریاتی در عین عجیب بودن، شواهد مشاهداتی محکمی را در تأیید خود دارند. در فصل آخر ما با اجسامی روبرو خواهیم شد که چگالی‌شان اگر به‌اندازه کل

جهان در یک سرسوزن نباشد، حداقل به‌اندازه یک کوه فشرده‌شده به‌اندازه نخود است" کوتوله‌های سفید[۱] اجسامی هستند که جرمی برابر یک ستاره اما ابعادی به‌اندازه کره زمین دارند؛ همچنین ستاره‌های نوترونی[۲] همان جرم را در کره‌ای به بزرگی یک شهر، جای‌داده‌اند. این اجسام علمی تخیلی نیستند؛ اختر شناسان آن‌ها را رصد کرده و اندازه‌گیری‌های دقیقی از آن‌ها در دست دارند و نظریه کوانتوم به ما اجازه محاسبه مشخصات آن‌ها را می‌دهد تا با داده‌های مشاهداتی مقایسه کنیم. به‌عنوان اولین گام در مسیر شناخت کوتوله‌های سفید و ستاره‌های نوترونی، ما باید به این سؤال ظاهراً

[۱]. White Dwarves

[۲]. Neutron Stars

کلیشه‌ای که در ابتدای فصل مطرح شده پاسخ دهیم: اگر کف خانه ما عمدتاً از فضای خالی تشکیل شده، چرا ما از درون آن رد نمی‌شویم؟

این سؤال تاریخ دراز و پرآوازه‌ای دارد و پاسخ آن به طرز عجیبی تا همین اواخر نامعلوم بود و در سال ۱۹۶۷ در مقاله‌ای نوشته فریمن دایسون[۱] و اندرو لنارد[۲] بیان شد. تلاش آن‌ها زمانی آغاز شد که یکی از همکارانشان برای کسی که بتواند ثابت کند چرا مواد به درون خود فروریزش ندارند، یک بطری شامپاین انگور به‌عنوان جایزه تعیین کرده بود. دایسون پاسخ این سؤال را بسیار پیچیده، سخت و مبهم عنوان کرد،

[۱]. Freeman Dyson

[۲]. Andrew Lenard

اما چیزی که آن‌ها نشان دادند این بود که ماده تنها در صورتی پایدار است که الکترون‌ها از چیزی به نام اصل طرد پاولی[۱] تبعیت کنند و این یکی از شگفت‌انگیزترین جنبه‌های جهان کوانتومی ماست.

ما پاسخمان را با رمزگشایی از اعداد آغاز خواهیم کرد. ما در فصل قبل دیدیم که ساختار ساده‌ترین اتم، هیدروژن، را می‌توان با جستجو به دنبال موج‌های کوانتومی مُجازی که می‌توان درون چاه پتانسیل پروتون جای داد، درک کرد. این باعث که ما حداقل به‌طور کیفی، طیف مجزای نور تابیده‌شده از اتم‌های هیدروژن را بفهمیم. اگر وقت داشتیم، می‌توانستیم

[۱] . Pauli Exclusion Principle

سطوح انرژی درون اتم هیدروژن را حساب کنیم. هر دانشجوی فیزیک ای در طول دوران تحصیلش این محاسبات را انجام می‌دهد و حاصل آن‌ها به زیبایی با نتایج آزمایشگاهی توافق دارد. تا جایی که به فصل قبل مربوط می‌شد، ساده‌سازی "ذره درون جعبه" به‌اندازه کافی خوب بود، زیرا تمامی نکاتی که ما قصد تأکید بر روی آن‌ها را داشتیم را شامل می‌شد. بااین‌حال محاسبات کامل این مطلب ویژگی‌ای دارد که ما به آن نیاز داریم و علت نیاز ما این است که اتم واقعی هیدروژن در سه بعد گسترش یافته است. در مثال ذره درون جعبه، ما تنها یک بعد را در نظر گرفتیم و یک سری سطوح انرژی به ترتیب اعداد n به دست آوردیم. پایین‌ترین سطح انرژی را n=۱ نامیدیم، بعدی را n=۲ و به همین ترتیب.

زمانی که محاسباتمان را به سمت دنیای واقعی سه‌بعدی ببریم معلوم می‌شود که باید برای سطوح انرژی مجاز، از سه عدد بهره بگیریم. این اعداد به‌طور سنتی با حروف n، l و m برچسب‌گذاری می‌شوند و به آن‌ها اعداد کوانتومی می‌گویند (در این فصل، m را نباید با جرم ذره اشتباه بگیریم). عدد کوانتومی n همتای همان عدد n برای ذره درون جعبه است. این حرف، اعداد طبیعی را به خود می‌گیرد (n=۱،۲،۳...) و هرقدر n بالاتر برود، انرژی ذرات نیز بالاتر می‌رود. مقادیر ممکن l و m نیز به n بستگی دارد. l باید از n کوچک‌تر بوده و می‌تواند صفر نیز باشد. برای مثال اگر n=۳، l می‌تواند ۰، ۱ یا ۲ باشد. m نیز می‌تواند تمامی مقادیر بین l– و l+ باشد (البته اعداد صحیح). پس اگر l=۲، m می‌تواند برابر با یکی از

اعداد ۲-، ۱-، ۰، ۱ و ۲ باشد. ما توضیح نخواهیم داد که این اعداد از کجا آمدند زیرا دانشی به ما اضافه نمی‌کند. در همین حد بگوییم که ۴ موجی که شکل ۹-۶ آمده‌اند (n،l) ای به ترتیب برابر با مقادیر (۱،۰)، (۲،۰)، (۲،۱) و (۳،۰) دارند. (m در تمام آن‌ها صفر است).[۱]

همان‌طور که گفتیم عدد کوانتومی n اصلی‌ترین عددی است که مقادیر انرژی‌های مجاز الکترون‌ها را کنترل می‌کند. البته وابستگی ضعیفی نیز بین انرژی‌های مجاز و مقدار l

[۱]. همانطور که در فصل قبل گفتیم، چون به لحاظ فنی چاه پتانسیل دور پروتون از لحاظ کروی متقارن بوده و به صورت مربع نیست، حل معادله شرودینگر نیز باید متناسب با هارمونیک کروی باشد. وابستگی‌های زاویه‌ای اختصاص داده شده باعث می شوند که اعداد l و m نیز بوجود آیند. وابستگی شعاعی راه‌حل نیز عدد کوانتومی مهم m را ناشی می شوند.

وجود دارد که تنها در آزمایشات دقیق نور تابیده‌شده خود را نشان می‌دهد. زمانی که بور اولین بار انرژی خطوط طیفی هیدروژن را محاسبه می‌کرد، چنین چیزی را در نظر نگرفت و کل فرمول اصلی او مبتنی بر n بود. هیچ‌گونه وابستگی‌ای بین انرژی الکترون و مقدار m وجود ندارد، مگر اینکه اتم هیدروژن را در میدان مغناطیسی قرار دهید (در حقیقت m را به‌عنوان "عدد کوانتوم مغناطیسی[۱]" می‌شناسند)، اما این حرف یقیناً به این معنی نیست که این عدد را مهم ندانیم. برای دانستن علت این امر، بیایید رمزگشایی اعدادمان را ادامه دهیم.

[۱]. Magnetic Quantum Number

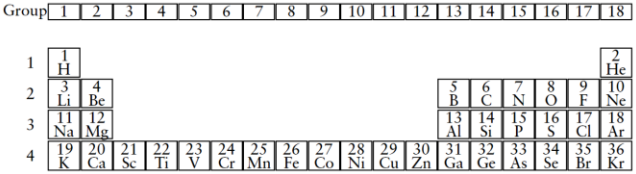
اگر n=۱، چه تعداد سطوح انرژی می‌تواند وجود داشته باشد؟ با اعمال کردن قوانینی که هم‌اینک گفته شد، اگر n برابر با ۱ باشد، l و m تنها مقدار صفر را می‌توانند به خود بگیرند و تنها یک سطح انرژی می‌تواند وجود داشته باشد.

حال بیایید این کار را برای n=۲ انجام دهیم. l می‌تواند دو مقدار ۰ و ۱ را بپذیرد. اگر l=۱، m می‌تواند هرکدام از اعداد ۱-، ۰ و ۱+ باشد که ۳ سطح انرژی جدید ایجاد می‌شود و درمجموع ۴ سطح انرژی وجود خواهد داشت.

برای n=۳، l می‌تواند ۰، ۱ یا ۲ باشد. برای l=۲، m می‌تواند برابر با ۲-، ۱-، ۰، ۱+ یا ۲+ باشد که ۵ سطح به ما خواهد داد.

پس درمجموع ۹=۵+۳+۱ سطح برای n=۳ خواهیم داشت و به همین ترتیب.

آن اعداد را برای سه مقدار اول به یاد داشته باشید. ۱، ۴ و ۹. حال به شکل ۱-۷ نگاه کنید که چهار سطر اول جدول تناوبی عناصر شیمیایی را نشان می‌دهد و بشمارید که چه تعداد عنصر در هر سطر وجود دارد. آن عدد را بر ۲ تقسیم کنید که ۱، ۴، ۴ و ۹ را به شما می‌دهد. اهمیت این حرف‌ها به‌زودی مشخص می‌شود.



شکل ۱-۷: چهار سطر اول جدول تناوبی

معمولاً شیمیدان روسی، دیمیتری مندلیف[۱]، را به‌عنوان سازنده جدول عناصر بدین نظم می‌شناسند که در تاریخ ۶ مارس ۱۸۶۹ آن را به جامعه شیمی روسیه ارائه داد و این جدول قبل از اینکه دانشمندان بفهمند چگونه می‌توان سطوح انرژی اتم هیدروژن را شمرد، سال‌های خوبی را رقم زد. مندلیف عناصر را بر اساس جرم اتمی‌شان منظم کرد که به

[۱] . Dmitri Mendeleev

زبان جدید این متناظر با تعداد پروتون‌ها و نوترون‌های درون هسته اتم است، که البته او در آن زمان این را نمی‌دانست. ترتیب قرارگیری عناصر در حقیقت مرتبط با تعداد پروتون‌های درون اتم آن‌هاست (تعداد نوترون‌ها بی‌ربط است)، اما برای عناصر سبک‌تر، تفاوتی نمی‌کند که البته مندلیف این مطلب را نیز به‌درستی فهمیده بود. او تصمیم گرفت که عناصر را هم به‌طور سطری و هم ستونی سامان دهد، زیرا متوجه شد که بین عناصر خاصی، خصوصیات شیمیایی مشابهی وجود دارد گرچه وزن اتمی متفاوتی دارند؛ ردیف‌های عمودی (ستون‌ها) چنین عناصری را در یک گروه قرار می‌دهند – هلیم، نئون، آرگون و کریپتون در سمت راست جدول همگی گازهای نجیب هستند. مندلیف نه‌تنها الگو را به‌درستی کشف

کرد، بلکه وجود بعضی عناصر جدید را نیز برای پر کردن جدولش پیش‌بینی کرد: عناصر ۳۱ و ۳۲ (گالیوم و ژرمانیوم) در سال‌های ۱۸۷۵ و ۱۸۸۶ کشف شدند. این اکتشافات تأیید کردند که مندلیف چیز عمیقی را درباره ساختار اتم‌ها آشکار کرده است، اما کسی نمی‌دانست آن چیز چیست.

نکته جالب این است که ۲ عنصر در سطر اول، ۸ تا در سطرهای دوم و سوم و ۱۸ تا در سطر چهارم وجود دارد و این اعداد دقیقاً دو برابر اعدادی هستند که ما با شمارش سطوح انرژی مجاز هیدروژن به دست آوردیم. چرا این‌گونه است؟

همان‌طور که اشاره کردیم، عناصر جدول تناوبی از چپ به راست با توجه به تعداد پروتون‌های درون هسته‌شان چیده

شده‌اند، که برابر با تعداد الکترون‌هایشان نیز است. به یاد آورید که تمامی اتم‌ها ازلحاظ الکتریکی خنثی هستند – بار الکتریکی مثبت پروتون‌ها دقیقاً با بار منفی الکترون‌ها در تعادل است. به‌وضوح چیز جالبی در جریان است که خصوصیات شیمیایی عناصر را به سطوح انرژی مجازی که الکترون‌ها برای گردش به دور هسته می‌توانند داشته باشند، ربط می‌دهد.

می‌توان تصور کرد که اتم‌های سنگین‌تر را با اضافه کردن همزمان پروتون، نوترون و الکترون به اتم‌های سبک‌تر ساخت با علم بر اینکه با اضافه کردن هر پروتون به هسته، باید یک الکترون نیز به یکی از سطوح انرژی اضافه کنیم. تمرین رمزگشایی از اعداد، الگوی مشاهده‌شده در جدول تناوبی را به

وجود می‌آورد، به شرطی که ما در هر سطح انرژی تنها و تنها ۲ الکترون قرار دهیم. بیایید ببینیم قضیه چیست.

هیدروژن تنها یک الکترون دارد که وارد سطح n=۱ می‌شود. هلیوم دو الکترون دارد که هر دو در سطح n=۱ قرار می‌گیرند. حال سطح n=۱ پر شده است. ما برای ساختن لیتیم باید یک الکترون دیگر اضافه کنیم، اما این الکترون باید به سطح n=۲ برود. ۷ الکترون بعدی که متناظر با هفت عنصر بعدی هستند (بریلیوم، بورون، کربن، نیتروژن، اکسیژن، فلوئور و نئون)، نیز می‌توانند در سطحی با n=۲ بنشینند، زیرا چهار مکان (سطح) قابل استفاده دارد [و هرکدام ۲ الکترون می‌پذیرند] و متناظرند با l=۰ و l=۱ با ۱+ و ۰، ۱- =m. (برای درک بهتر به شکل ۲-۷ نگاه کنید.) بدین ترتیب ما می‌توانیم این سطوح را

به‌حساب تمامی عناصر تا نئون بگذاریم. با نئون، تمام سطوح n=۲ پر شده و باید به n=۳ برویم که با سدیم آغاز می‌شود. ۸ الکترون بعدی به ترتیب شروع به پر کردن سطوح n=۳ می‌کنند؛ ابتدا الکترون‌ها وارد l=۰ می‌شوند و سپس l=۱. این جایگذاری تمامی عناصر سطر سوم تا آرگون را شامل می‌شود. سطر چهارم جدول را می‌توان این‌گونه توضیح داد که فرض کنیم تمامی الکترون‌های موجود در سطوح باقی‌مانده در n=۳ را شامل می‌شوند (یعنی ۱۰ الکترون در l=۲) و همچنین الکترون‌های موجود در n=۴ با l=۰ و l=۱ (که برابر است با ۸ الکترون) که درمجموع عدد جادویی ۱۸ الکترون را می‌سازد. در شکل ۲-۷، ما نشان دادیم که الکترون‌ها چگونه سطوح

انرژی را برای سنگین‌ترین عنصر جدولمان یعنی کریپتون (که ۳۶ الکترون دارد)، پر می‌کنند.

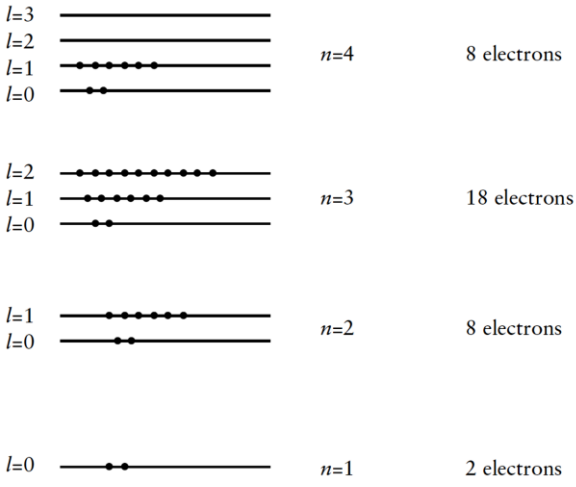
برای اینکه گفته‌هایمان را از عدد شناسی محض خارج کرده و جنبه علمی به آن دهیم، نیاز به توضیحاتی داریم. در ابتدا باید توضیح دهیم که چرا خصوصیات شیمیایی عناصر موجود در یک ستون مشابه است. چیزی که از روش ما واضح است این است که عناصر موجود در ستون اول سه سطر اول، فرایند پر کردن سطوح را در n جدیدی آغاز می‌کنند. در ابتدا هیدروژن تنها الکترونش را در سطح خالی n=۱ جای می‌دهد، لیتیوم با قرار دادن یک الکترون در سطح n=۲ سطر دوم را آغاز می‌کند و سدیم سطر سوم را با قرار دادن یک الکترون در اولین سطح خالی n=۳ آغاز می‌کند. سطر سوم اندکی عجیب

است، زیرا سطح n=۳ می‌تواند ۱۸ الکترون را جای دهد، اما در سطر سوم ۱۸ عنصر قرار ندارند. البته می‌توانیم حدس بزنیم که ماجرا از چه قرار است – ۸ الکترون اول سطوح n=۳ را با l=۰ و l=۱ پر می‌کنند و سپس (به دلیل خاصی) ما باید به سطر چهارم برویم. حال سطر چهارم شامل بقیه ۱۰ الکترونی که از سطوح n=۳ در l=۲ باقی‌مانده بود می‌شود و همچنین ۸ الکترون از سطوح n=۴ با l=۰ و l=۱. این نکته که سطرها کاملاً مرتبط با مقادیر n نیستند نشان می‌دهد که ارتباط بین خصوصیات شیمیایی و شمردن سطوح انرژی آن‌قدرها هم که ما می‌گوییم، ساده نیست. بااین‌حال امروزه می‌دانیم که پتاسیم و کلسیم، دو عنصر اول سطر چهارم، در n=۴، l=۰

دارای الکترون هستند و بقیه ۱۰ عنصر (از اسکاندیوم تا روی) الکترون‌هایشان را در n=۳، l=۲ قرار می‌دهند.

برای اینکه بدانیم چرا پر شدن سطوح n=۳ و l=۲، به بعد از کلسیم موکول می‌شود باید توضیحی دهیم که چرا سطوح n=۴، l=۰، که الکترون‌های پتاسیم و کلسیم را جای دادند، انرژی کمتری نسبت به سطوح n=۳، l=۲ دارند. به خاطر آورید که "حالت پایه" اتم با پیکره‌بندی‌ای که در آن الکترون‌ها پایین‌ترین انرژی را دارند تعریف می‌شود، زیرا هر حالت برانگیخته دیگری می‌تواند با گسیل فوتون انرژی‌اش را کم کند. پس وقتی‌که ما می‌گوییم "این اتم شامل این الکترون‌ها می‌شود که بر آن سطوح انرژی نشسته‌اند" منظورمان پیکره‌بندی انرژی حداقل است. البته ما هیچ تلاشی

برای به دست آوردن واقعی سطوح انرژی نکردیم، پس در مقامی قرار نداریم که بخواهیم آن‌ها را بر اساس انرژی‌شان مرتب کنیم. در حقیقت محاسبه انرژی‌های مجاز الکترون در اتم‌های با بیش از دو الکترون، کار سختی است و حتی همان دو الکترون نیز (هلیم) آن‌چنان ساده نیست. این ایده ساده که سطوح را بر اساس عدد n مرتب کنیم، ناشی از محاسبات ساده‌ای است که برای هیدروژن انجام شده است که به‌درستی n=۱ پایین‌ترین انرژی را داشته و پس‌ازآن سطوح n=۲ آمده، سپس n=۳ آمده و به همین ترتیب.



شکل ۲-۷: پر شدن سطوح انرژی کریپتون. نقطه‌ها نماینده الکترون‌ها هستند و خطوط نماینده سطوح انرژی و با اعداد کوانتومی n، l و m نام‌گذاری شده‌اند. ما سطوحی که مقدار m متفاوت اما مقادیر n و l یکسان دارند را در یک گروه قرار دادیم.

نتیجه واضحی که از گفته ما می‌توان گرفت این است که عناصر موجود در آخرین ستون قسمت راست جدول مربوط به اتم‌هایی می‌شود که مجموعه‌ای از سطوح را به‌طور کامل پرکرده‌اند. مثلاً در هلیم سطح n=۱ پر است و برای نئون n=۲ پر است و برای آرگون نیز این مطلب در رابطه با n=۳ صدق می‌کند، حداقل برای l=۰ و l=۱. ما می‌توانیم این ایده‌ها را اندکی جلوتر ببریم و بعضی ایده‌های مهم شیمی را بفهمیم. خوشبختانه ما در حال نوشتن کتاب شیمی نیستیم پس می‌توانیم مختصراً توضیح داده و نگران این نباشیم که یک پاراگراف توضیحات برایمان کفایت نکند.

کلیدی‌ترین مشاهده ما این است که اتم‌ها با به اشتراک‌گذاری الکترون‌ها به هم متصل می‌شوند – ما با این

ایده در فصل بعد حین توضیح نحوه پیوند دو اتم هیدروژن به‌منظور ساخت یک مولکول هیدروژن، مطرح خواهیم کرد. قانون کلی این است که عناصر "تمایل دارند" که سطوح انرژی‌شان را به‌طور منظمی پر کنند. در مورد هلیم، نئون، آرگون و کریپتون، سطوح کاملاً پر هستند و آن‌ها اصطلاحاً به‌خودی‌خود "خوشحال" هستند – آن‌ها به خود زحمت نمی‌دهند که با دیگر عناصر واکنش نشان دهند. در مورد سایر عناصر، آن‌ها "تلاش می‌کنند" تا سطوحشان را با به اشتراک‌گذاری الکترون با سایر عناصر پر کنند. به‌عنوان‌مثال هیدروژن برای پر کردن سطح $n=1$ اش نیاز به یک الکترون اضافی دارد. این اتم می‌تواند با به اشتراک‌گذاری الکترونش با اتم هیدروژن دیگر، به این خواسته‌اش برسد. با انجام این کار

یک مولکول هیدروژن تولید خواهد شد که با نماد شیمیایی $H_۲$ نشان داده می‌شود. این متداول‌ترین حالت برای گاز هیدروژن است. کربن از ۸ الکترون ممکن در سطوح n=۲ با l=۰ و l=۱، ۴ الکترون کم دارد و تمایل دارد که جای خالی آن‌ها را پر کند. این اتم می‌تواند خلاء اش را با پیوند با ۴ اتم هیدروژن و تشکیل $CH_۴$، یعنی گاز متان، پر کند. همچنین این کار را می‌تواند با دو اتم اکسیژن نیز انجام دهد که خود اکسیژن‌ها نیز هرکدام به ۲ الکترون برای پر کردن سطح n=۲ شان نیاز دارند. این کار منجر به تولید $CO_۲$ – دی‌اکسید کربن می‌شود. اکسیژن همچنین می‌تواند با دو اتم هیدروژن پیوند یافته و $H_۲O$ – آب را تشکیل دهد. و به همین ترتیب. این مطلب، اساس علم شیمی است: اتم‌ها تمایل دارند سطوح

انرژی‌شان را با الکترون پر کنند، حتی اگر این کار را با به اشتراک‌گذاری با سایر اتم‌ها انجام دهند. این "تمایل" که کاملاً ناشی از این قانون است که اجسام دوست دارند در پایه‌ای‌ترین حالتشان باشند، باعث به وجود آمدن همه‌چیز شده است، از آب تا DNA. حال می‌فهمیم که در جهانی مملو از هیدروژن، اکسیژن و کربن، چرا دی‌اکسید کربن، آب و متان فراوان است.

این گام بزرگی بود، اما هنوز یک قطعه از پازل ما باقی‌مانده که باید توضیح دهیم: چرا تنها دو الکترون می‌توانند هر سطح انرژی موجود را پر کنند؟ این گزاره معادل با اصل طرد پاولی است و برای اینکه تمامی گفته‌های ما به هم مرتبط شوند ضروری است. بدون آن، الکترون‌ها همگی در پایین‌ترین سطح

انرژی نزدیک به هسته تجمع یافته و باعث می‌شوند دیگر علم شیمی وجود نداشته باشد. این اتفاق بدی است زیرا در این حالت مولکولی وجود نخواهد داشت و به‌تبع آن حیات نیز در جهان شکل نخواهد گرفت.

این ایده که ۲ و تنها ۲ الکترون می‌تواند هر سطح انرژی را پر کند، کاملاً اختیاری به نظر می‌رسد و به‌طور تاریخی تا قبل از پیشنهاد این مطلب، کسی به آن فکر نکرده بود. اولین حرکت مهم در این راستا توسط ادموند استونر[۱] صورت گرفت، پسر یکی از بازیکنان حرفه‌ای بازی کریکت (که در سال ۱۹۰۷ در مقابل تیم آفریقای جنوبی ۸ امتیاز کسب کرد) و

[۱]. Edmund Stroner

دانشجوی سابق رادرفورد که بعدها دانشکده فیزیک دانشگاه لیدز را مدیریت کرد. در اکتبر ۱۹۲۴ استونر پیشنهاد داد که در هر سطح انرژی (n،l،m) باید تنها ۲ الکترون مجاز باشد. پاولی پیشنهاد استونر را در سال ۱۹۲۵ توسعه داد و قانونی ارائه کرد که یک سال بعد دیراک آن قانون را به نام او نام‌گذاری کرد. اصل طرد در ابتدا توسط پاولی پیشنهاد شد که می‌گوید هیچ دو الکترونی در اتم نمی‌توانند اعداد کوانتومی یکسانی را بپذیرند. مشکلی او با آن مواجه شده بود این بود که ظاهراً دو الکترون *می‌توانستند* هر سری از اعداد n، l و m را باهم به اشتراک بگذارند. پاولی این مشکل را با معرفی عدد کوانتومی جدیدی دور زد. این یک گمان بود؛ او نمی‌دانست که این عدد چه چیزی را نشان خواهد داد، اما الکترون باید

تنها یکی از دو عدد ممکن را بپذیرد. پاولی نوشت "ما نمی‌توانیم علت دقیق‌تری برای این قانون عنوان کنیم". اطلاعات بعدی در سال ۱۹۲۵ در مقاله‌ای نوشته جرج آلنبک[۱] و ساموئل گودسمیت[۲] ارائه شد. آن‌ها که توسط اندازه‌گیری‌های دقیق طیف اتمی انگیزه یافته بودند، عدد کوانتومی اضافی پاولی را به‌عنوان یک مشخصه فیزیکی واقعی شناسایی کردند که به نام اسپین[۳] شناخته می‌شود.

ایده اولیه اسپین کاملاً ساده است و به سال ۱۹۰۳ یعنی پیش از نظریه کوانتوم برمی‌گردد. چند سال پس از کشفش،

---

۱. George Ahlenbeck

۲. Samuel Goudsmit

۳. Spin

فیزیکدان آلمانی ماکس آبراهام[۱] پیشنهاد داد که الکترون، کره‌ای کوچک، ازلحاظ الکتریکی باردار و در حال چرخش است. اگر این گفته‌ها درست می‌بود، الکترون‌ها باید تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار می‌گرفتند و این تأثیر بستگی به جهت میدان نسبت به محور اسپین داشت. در مقاله ۱۹۲۵ شان که ۳ سال پس از مرگ آبراهام چاپ شد، آلنبک و گودسمیت بیان کردند که برای توضیح داده‌های مشاهده‌شده، مدل توپ در حال چرخش درست نیست، زیرا در این حالت الکترون باید سریع‌تر از سرعت نور به دور خود بچرخد. اما مفهوم این ایده درست بود – الکترون واقعاً دارای مشخصه‌ای به نام اسپین است و واقعاً رفتارش را تحت تأثیر میدان

[۱] . Max Abraham

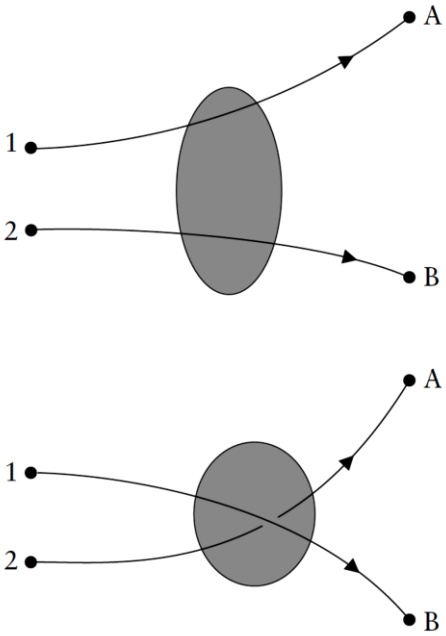
مغناطیسی قرار می‌دهد. بااین‌حال منشأ اصلی این ایده را مستقیماً و با اندکی زیرکی می‌توان از نظریه نسبیت خاص انیشتین نتیجه گرفت و این قضیه بعدها در سال ۱۹۲۸ که پاول دیراک برای توصیف رفتار کوانتومی الکترون معادله‌ای را نوشت، درک شد. برای مقاصد ما، تنها نیازمندیم که بدانیم الکترون‌ها در دو نوع وجود دارند و با نام‌های "اسپین بالا" و "اسپین پایین" شناخته می‌شوند و این دو با توجه به مقادیر برعکس تکانه زاویه‌ای‌شان متمایز می‌شوند. یعنی انگار این دو در جهت‌های مخالفی به دور خود می‌چرخند. افسوس که آبراهام چند سال قبل از آشکار شدن ماهیت واقعی اسپین الکترون درگذشت، زیرا او هرگز از اعتقاد راسخش که الکترون کره‌ای کوچک است، دست نکشید. در آگهی درگذشتش در

سال ۱۹۲۳، ماکس بورن و ماکس وون لو[۱] نوشتند "او حریفی محترم بود که با اسلحه منصفانه‌ای به مبارزه پرداخت و هرگز با استفاده از استدلالات غلط و التماس و زاری پیروز نشد ... او عاشق ایده اتر مطلقش، معادلات میدانش و الکترون صلبش بود دقیقاً مشابه با جوانی که به معشوقش عشق می‌ورزد. خاطره او هرگز از یاد نمی‌رود". ای‌کاش رقبای هرکسی شبیه به آبراهام بودند.

هدف ما در ادامه این فصل این است که توضیح دهیم چرا الکترون‌ها به این شکل عجیب که توسط اصل طرد بیان شده،

[۱] . Max Von Laue

رفتار می‌کنند. همانند گذشته، ما باید استفاده مناسبی از آن ساعت‌های کوانتومی بکنیم.



شکل ۳-۷: پراکنده شدن دو الکترون

ما می‌توانیم برای ورود به این سؤال، درباره این فکر کنیم که زمانی که دو الکترون به هم برخورد کرده و از هم دور می‌شوند (کمانه می‌کنند)، چه اتفاقاتی می‌افتد. شکل ۳-۷ یک سناریوی خاصی را نشان می‌دهد که در آن دو الکترون با برچسب‌های "۱"و "۲" از جایی شروع کرده و به جای دیگری می‌روند. ما موقعیت‌های پایانی را با A و B نشان داده‌ایم. دایره‌های خاکستری‌رنگ برای این رسم شده که بگوید ما هنوز نمی‌دانیم زمانی که دو الکترون باهم اندرکنش می‌کنند، چه اتفاقی می‌افتد (برای مقاصد این بحث، نیازی نیست که وارد جزئیات شویم). تنها چیزی که باید تصور کنیم این است که الکترون شماره ۱ از نقطه شروعش به نقطه‌ای به نام A می‌پرد. مشابه با آن الکترون شماره ۲ نیز به نقطه B می‌پرد.

این، چیزی است که در تصویر بالای شکل قبل نشان داده شده است. در حقیقت استدلالی که ما ارائه خواهیم داد، حتی اگر الکترون‌ها باهم اندرکنش هم نداشته باشند، جوابگو خواهد بود. در آن حالت الکترون شماره ۱ صرف‌نظر از مسیر حرکت الکترون شماره ۲، به A می‌پرد و احتمال یافتن ۱ در A و ۲ در B به‌سادگی برابر با حاصل‌ضرب این دو احتمال مستقل است.

برای مثال فرض کنید احتمال جهش الکترون ۱ به A برابر با ۴۵٪ و الکترون ۲ به B برابر با ۲۰٪ باشد. احتمال یافتن الکترون ۱ در A و ۲ در B (به‌طور همزمان) برابر با ۰/۴۵×۰/۲=۰/۰۹=٪۹ می‌باشد. تنها کاری که ما اینجا کردیم، استفاده از این منطق بود که می‌گفت احتمال اینکه همزمان

سکه و تاسی را پرتاب کنیم و سکه سمت پشت و تاس عدد ۶ را نشان دهد برابر با حاصل‌ضرب یک‌دوم در یک‌ششم است که می‌شود $\frac{۱}{۱۲}$ (یعنی اندکی بیش از ۸ درصد).[۱]

همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، راه دومی برای رفتن الکترون‌ها به A و B وجود دارد. این امکان وجود دارد که الکترون ۱ به B و الکترون ۲ به A بپرد. فرض کنید احتمال یافتن الکترون ۱ در B برابر با ۵٪ و احتمال یافت الکترون ۲

[۱]. ما در فصل ۱۰ خواهیم آموخت که در نظر گرفتن احتمال اندرکنش دو الکترون به این معنی است که ما باید احتمال یافتن الکترون ۱ در A و ۲ در B را به طور "همزمان" محاسبه کنیم، زیرا نمی‌توان این حالت را تبدیل به دو حالت احتمالاتی مستقل کرد. این نکته فعلا در مورد مطالب این قسمت (این فصل) کاربردی ندارد.

در A برابر با ۲۰٪ باشد. در این حالت احتمال یافت همزمان الکترون ۱ در B و ۲ در A برابر است با ۰/۰۵×۰/۲=۰/۰۱=٪۱.

بنابراین ما دو راه داریم که الکترون‌هایمان را به A و B برسانیم – یکی با احتمال ۹٪ و دیگری با ۱٪. احتمال اینکه یک الکترون در A و یک الکترون در B باشد، اگر برای ما مهم نباشد که کدام به کجا می‌رود، برابر است با ٪۹+٪۱=٪۱۰. ساده؛ اما غلط!

اشتباه کار اینجاست که فرض می‌کنیم می‌توانیم بگوییم کدام الکترون به A رفته و کدام به B. اگر الکترون‌ها از هر لحاظ شبیه به هم باشند چه؟ این ظاهراً سوال بی‌ربطی است،

اما این‌طور نیست. برحسب اتفاق، این پیشنهاد که ذرات کوانتومی ممکن است شدیداً باهم یکسان باشند، اولین بار در ارتباط با قانون تابش جسم سیاه پلانک مطرح شد. فیزیکدان نامعروفی به نام لادیسلاس ناتانسون[۱] حول‌وهوش سال ۱۹۱۱ بیان کرد که قانون پلانک با این فرض که فوتون‌ها را می‌توان به‌عنوان ذرات قابل‌شناسایی در نظر گرفت، در تضاد است. به‌عبارت‌دیگر، اگر شما یک فوتون را علامت‌گذاری کنید و مسیر حرکت آن را ردیابی کنید، به قانون پلانک نمی‌رسید.

اگر الکترون‌های شماره ۱ و ۲ کاملاً مشابه باشند، ما باید فرایند پراکندگی را به‌صورت زیر توصیف کنیم: در ابتدا دو

[۱] . Ladislas Natanson

الکترون وجود دارد، و اندکی بعد هنوز دو الکترون، اما در مکان‌های دیگری وجود دارند. همان‌طور که یاد گرفتیم، ذرات کوانتومی در مسیر معینی حرکت نمی‌کنند و این یعنی به‌طورکلی نمی‌توان آن‌ها را ردیابی کرد. بنابراین معنی نمی‌دهد که بگوییم الکترون ۱ در A ظاهر شد و الکترون ۲ در B. ما نمی‌توانیم بگوییم و به همین دلیل برچسب‌گذاری آن‌ها (اعداد ۱ و ۲) نیز کاری بی‌معنی است. مفهوم دو ذره‌ای که "همانند" هستند، در نظریه کوانتوم به همین صورت است. چنین منطقی ما را به کجا می‌برد؟

دوباره به شکل نگاه کنید. برای این فرایند خاص، دو احتمالی که ما به دو شکل نسبت می‌دهیم (۹۰٪ و ۱۰٪) اشتباه نیستند. اما آن‌ها کل ماجرا نیستند. ما می‌دانیم که ذرات

کوانتومی با ساعت‌ها توصیف می‌شوند، پس ما باید ساعتی را برای رسیدن الکترون ۱ به A با اندازه‌ای برابر با جذر ۴۵٪، نسبت دهیم. به همین شکل ساعتی نیز برای رسیدن الکترون ۲ به B با اندازه جذر ۲۰٪ وجود خواهد داشت.

حال قانون کوانتومی جدید می‌آید – این قانون می‌گوید که ما باید ساعتی را به‌کل فرایند نسبت دهیم؛ یعنی ساعتی وجود دارد که اندازه‌اش برابر با احتمال یافت الکترون ۱ در A و الکترون ۲ در B می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر، تنها یک ساعت را می‌توان به تصویر بالایی شکل ۳-۷ نسبت داد. می‌توانیم ببینیم که اندازه این ساعت باید برابر با جذر ۹٪ باشد، زیرا این عدد، احتمال وقوع این فرایند است. اما این ساعت، چه عددی را نشان خواهد داد؟ پاسخ به این سؤال در حیطه مباحث فصل

۱۰ است و ضرب ساعت‌ها را شامل می‌شود. تا جایی که به این فصل ربط دارد، ما نیازی به دانستن زمان [نشان داده شده توسط ساعت] نداریم. ما تنها نیاز به قانون مهم جدیدی داریم که الآن گفتیم و ارزش تأکید مجدد دارد، چون گزاره بسیار متداولی در نظریه کوانتوم است: ما برای اتفاق یک *فرایند کلی* باید یک ساعت را برای هر مسیر ممکن آن اختصاص دهیم. ساعتی که ما برای یافتن یک ذره در یک مکان اختصاص می‌دهیم، ساده‌ترین شکل این قانون است و ما تا اینجای کتاب، فعلاً این‌قدر پیش‌روی کردیم. اما این یک حالت خاص است و به‌محض اینکه ما درباره بیش از یک ذره فکر کنیم، نیازمند تعمیم این قانون هستیم.

این یعنی ساعتی به‌اندازه ۰/۳ وجود دارد که می‌توان آن را به شکل بالایی نسبت داد. به همین ترتیب ساعت دومی به‌اندازه ۰/۱ مرتبط با ساعت پایینی شکل نیز وجود دارد (زیرا مجذور ۰/۱ می‌شود ۰/۰۱ که همان ۱٪ است). بنابراین ما دو ساعت داریم و می‌خواهیم راهی برای استفاده از آن‌ها به‌منظور تعیین احتمال یافتن الکترون یکی در A و دیگری در B بیابیم. اگر این دو الکترون قابل‌تمایز بودند، پاسخ ساده بود: ما تنها نیاز به جمع دو احتمال این تصاویر داشتیم (و نه ساعت‌هایشان). در آن صورت ما به عدد ۱۰٪ می‌رسیدیم.

اما اگر هیچ راهی برای فهمیدن اینکه کدام شکل اتفاق افتاده است وجود نداشته باشد، که همان حالتی است که الکترون‌ها غیرقابل‌تمایز هستند، با استفاده از منطقی که قبلاً

در رابطه با جهش ذره از نقطه‌ای به نقطه دیگر داشتیم، ما باید روشی برای ترکیب ساعت‌ها به دست آوریم. چیزی که به دنبالش هستیم، تعمیم این قانون است که می‌گفت: به‌منظور تعیین احتمال حضور یک ذره در یک نقطه خاص، ما باید تمام ساعت‌هایی که مربوط به مسیرهای مختلف رسیدن ذره به آن نقطه است را باهم جمع ببندیم. برای یک سیستمی از تعدادی ذره مشابه، ما باید تمام ساعت‌هایی را که مربوط به تمامی مسیرهای مختلفی که ذرات می‌توانند به آن مجموعه نقاط برسند، هستند را ترکیب کنیم تا احتمال یافتن ذرات در آن نقاط را تعیین کنیم. این مطلب به‌قدری مهم است که ارزش چند بار خواندن را دارد – واضح است که این قانون جدید در حقیقت تعمیم قانون قبلی ماست که برای یک ذره

به کار می‌بردیم. ممکن است دقت کرده باشید که ما در به کار بردن واژه‌ها نیز مراقب بوده‌ایم. ما نگفتیم که ساعت‌ها لزوماً باید باهم جمع بسته شوند – گفتیم که باید باهم ترکیب شوند. دلیل خوبی برای احتیاط ما وجود دارد.

واضح‌ترین کاری که باید انجام شود، جمع‌کردن ساعت‌ها باهم است. اما قبل از اینکه وارد بحث شویم، باید بپرسیم که آیا دلیل موجهی وجود دارد که [نشان دهد] این کار درست است یا نه. این مثال خوبی است از اینکه در فیزیک، هیچ‌چیز دست‌کم گرفته نمی‌شود – کاوش فرضیاتمان همواره باعث بینش‌های جدید می‌شود، همان‌طور که در این مثال نیز خواهیم دید. بیایید یک گام عقب‌تر رفته و درباره یک چیزی فکر کنیم که عموماً تصور می‌شود. می‌خواهیم این اجازه را

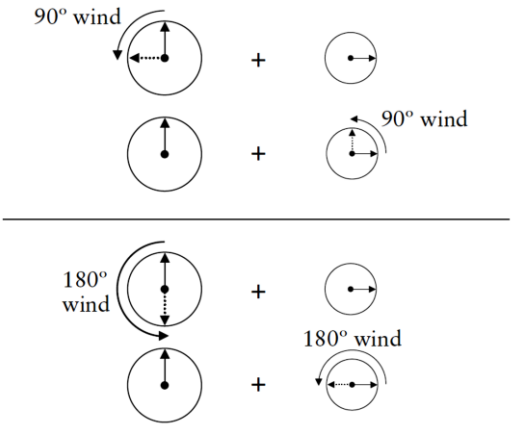
بدهیم که قبل از جمع ساعت‌ها، یکی از آن‌ها بچرخد، یا کوچک شود (یا بزرگ شود). بیایید این امکان را با جزئیاتش بررسی کنیم.

چیزی که گفتیم بدین شکل است که "من دو ساعت دارم و می‌خواهم آن‌ها را به‌منظور ساخت یک ساعت جدید ترکیب کنم تا نهایتاً از آن استفاده کرده و بدانم که احتمال یافتن دو الکترون در A و B چقدر است. چگونه آن‌ها را ترکیب کنم؟" ما هنوز جواب را نمی‌دانیم و می‌خواهیم بدانیم که آیا جمع‌کردن ساعت‌ها قانونی است که باید استفاده کنیم یا نه. ظاهراً ما هیچ اختیاری از خود نداریم و جمع‌کردن ساده ساعت‌ها یکی از *دو* راه پیش روی ماست.

برای تفهیم بهتر این بحث بیایید ساعتی که مربوط به جهش ذره ۱ به A و ذره ۲ به B است را ساعت ۱ بنامیم. این ساعتی است که به تصویر بالا در شکل ۳-۷ مربوط می‌شود. ساعت ۲ نیز به گزینه دیگر مربوط می‌شود، که ذره ۱ به B و ذره ۲ به A می‌پرد. واقعیت مهمی در اینجا وجود دارد: اگر ما قبل از اینکه ساعت ۱ را با ساعت ۲ جمع ببندیم، کمی آن را بچرخانیم، احتمالی که به دست می‌آوریم باید برابر با حالتی باشد که قبل از جمع بستن ساعت ۲ با ۱، آن (ساعت ۲) را به همان میزان بچرخانیم.

برای فهمیدن آن، دقت کنید که جابجایی برچسب‌های A و B در تصاویر، تأثیری در نتیجه نهایی نداشته و تنها راه دیگری برای توصیف این فرایند است. تغییر برچسب‌های A و

B در حقیقت جای دو شکل بالا و پایین را عوض می‌کند و این یعنی اگر ما بخواهیم ساعت ۱ (مرتبط به تصویر بالا) را قبل از جمع بستن با ساعت ۲، بچرخانیم، نتیجه این کار باید دقیقاً معادل این باشد که پس از جابجایی تصویر بالا و پایین، ساعت ۲ را قبل از جمع بستن با ساعت ۱، بچرخانیم. استدلالی که اینجا مطرح کردیم مهم است و بهتر است به حافظه‌تان بسپارید. ازآنجایی‌که فرض کردیم راهی برای تمایز دو ذره وجود ندارد، ما مجازیم که برچسب‌ها را جابجا کنیم. این یعنی چرخاندن ساعت ۱ باید دقیقاً همان پاسخ را بدهد که ساعت ۲ را به همان میزان بچرخانیم، زیرا راهی برای اعلام ساعت‌ها به‌طور مجزا وجود ندارد.



شکل ۴-۷: قسمت بالای تصویر نشان می‌دهد که جمع بستن ساعت‌های ۱ و ۲ پس از چرخاندن ساعت ۱ به میزان ۹۰ درجه مشابه با این نیست که قبل از جمع بستن ساعت ۲ را بچرخانیم. قسمت پایینی این امکان جالب را نشان می‌دهد که می‌توانیم قبل از جمع بستن، یکی از ساعت‌ها را ۱۸۰ درجه بچرخانیم

این صرفاً یک مشاهده بی‌خاصیت نیست – نتیجه بسیار مهمی دارد، زیرا تنها دو راه وجود دارد که قبل از جمع ساعت‌ها، با چرخاندن و کوچک کردن، با آن‌ها بازی کنیم و نهایتاً به ساعتی برسیم که برایش مهم نباشد کدام‌یک از ساعت‌ها در مرحله قبل تغییر کرده است.

این مطلب در شکل ۴-۷ نشان داده شده است. قسمت بالای شکل نشان می‌دهد که اگر ما ساعت ۱ را ۹۰ درجه بچرخانیم و سپس با ساعت ۲ جمع کنیم، نتیجه کار بااین‌حالت که ابتدا ساعت ۲ را ۹۰ درجه چرخانده و سپس با ساعت ۱ جمع کنیم، فرق خواهد کرد. می‌توانید در شکل ببینید که اگر ابتدا ساعت ۱ را بچرخانیم، عقربه جدید که با نقطه‌چین نشان داده شده است، در جهت مخالف عقربه ساعت

۲ قرار می‌گیرد و درنتیجه تا حدی همدیگر را خنثی می‌کنند. اگر به‌جای این کار ابتدا ساعت ۲ را به همان میزان بچرخانیم، عقربه جدید، هم‌جهت با عقربه ساعت ۱ می‌شود که مجموعشان عقربه بزرگ‌تری را می‌سازد.

واضح است که زاویه ۹۰ درجه عدد خاصی نیست و سایر زاویه‌ها نیز چنین نتیجه‌ای می‌دهند و جواب پایانی را وابسته به چرخش یکی از ساعت‌های ۱ یا ۲ می‌کنند.

استثنای آشکاری نیز وجود دارد که صفر درجه است، زیرا چرخاندن ساعت ۱ به میزان صفر درجه و جمع بستن آن با ساعت ۲، همان نتیجه را می‌دهد که ابتدا ساعت ۲ را صفر درجه بچرخانیم و سپس با ساعت ۱ جمع کنیم. این یعنی

جمع ساعت‌ها بدون چرخش یک امکان همیشگی است. به‌طور مشابه، چرخاندن همزمان هر دو ساعت به میزان مشابه نیز قابل‌قبول بوده و مشابه نچرخاندن ساعت‌ها خواهد بود، زیرا مثل این می‌ماند که مکان عدد "ساعت ۱۲" را دوباره تعریف کنیم (تغییر دهیم). این مشابه این است که بگوییم ما همواره آزادیم که هر ساعتی را به هر میزانی که بخواهیم بچرخانیم، به شرطی که همان کار را برای تمامی ساعت‌های دیگر انجام دهیم. این کار تأثیری بر احتمالاتی که حساب می‌کنیم نمی‌گذارد.

تصویر پایینی شکل ۴-۷ نشان می‌دهد که احتمالاً به طرز جالبی، روش دیگری برای ترکیب ساعت‌ها وجود دارد. ما می‌توانیم یکی از آن‌ها را قبل از جمع‌بندی، به میزان ۱۸۰

درجه بچرخانیم. این کار باعث به وجود آمدن دقیقاً همان ساعت نمی‌شود، اما ساعتی با اندازه مشابه خواهد ساخت و این یعنی احتمال یافت یک الکترون در A و دیگری در B یکسان خواهد بود.

مجموعه استدلالات مشابهی نیز امکان کوچک را بزرگ کردن یکی از ساعت‌ها را قبل از جمع‌بندی ممنوع می‌کند، زیرا اگر ما ساعت ۱ را با نسبتی کوچک کنیم و سپس با ساعت ۲ جمع ببندیم، معمولاً این کار مشابه با این نخواهد بود که ابتدا ساعت ۲ را به همان میزان کوچک کرده و سپس با ساعت ۱ جمع کنیم و همچنین استثنایی برای این قانون وجود ندارد.

پس ما نتیجه جالبی خواهیم گرفت: گرچه ما کار خود را با آزادی مطلق شروع کردیم، کشف کردیم که چون نمی‌توان ذرات را به‌طور مجزا تعیین کرد، تنها دو راه برای جمع‌بندی ساعت‌ها وجود دارد: ما یا آن‌ها را باید مستقیماً جمع کنیم، یا اینکه می‌توانیم قبل از جمع‌بندی یکی‌شان را ۱۸۰ درجه بچرخانیم. اتفاقی که در واقعیت می‌افتد این است که طبیعت هر دو راه را می‌پیماید.

برای الکترون‌ها، ما باید چرخش اضافی را قبل از جمع‌کردنشان لحاظ کنیم. برای ذراتی مانند فوتون‌ها یا بوزون‌های هیگز، ما باید ساعت‌ها را بدون چرخش جمع ببندیم. به همین دلیل ذرات طبیعت به دو دسته تقسیم

می‌شوند: آن‌هایی که نیاز به چرخش دارند و نامشان فرمیون[۱] است و آن‌هایی که چرخش نمی‌خواهند و نامشان بوزون[۲] است. چه چیزی تعیین می‌کند که یک ذره بوزون است یا فرمیون؟ اِسپین آن ذره.

اسپین (به معنی چرخش به دور خود)، همان‌طور که از نامش برمی‌آید اندازه‌ای از تکانه زاویه‌ای[۳] یک ذره است. یکی از واقعیت‌های موجود این است که فرمیون‌ها همواره اسپینی دارند که برابر با نصف یک عدد صحیح است[۴]، اما بوزون‌ها

---

۱. Fermion

۲. Boson

۳. Angular Momentum

۴. و واحد آن، ثابت پلانک تقسیم بر 2π می‌باشد.

اسپینشان همواره صحیح است. ما می‌گوییم الکترون اسپین-نیم دارد، فوتون اسپین-یک و بوزون هیگز اسپین-صفر. ما در این کتاب وارد جزئیات اسپین نشده‌ایم، زیرا در اکثر مواقع جزئیات فنی دارد. بااین‌حال زمانی که جدول تناوبی را توضیح می‌دادیم، ما به این نتیجه نیاز داشتیم که الکترون‌ها می‌توانند ۲ نوع داشته باشند که مرتبط با ۲ مقدار ممکن برای تکانه زاویه‌ای‌شان است (اسپین بالا و اسپین پایین). این مطلب مثالی از این قانون کلی است که می‌گوید ذراتی با اسپین S عموماً در 2S+1 نوع می‌آید. مثلاً ذرات اسپین $\frac{۱}{۲}$ (مانند الکترون‌ها) دو نوع دارند، ذرات اسپین ۱، ۳ نوع دارند و ذرات اسپین صفر، یک نوع دارند. رابطه بین تکانه زاویه‌ای یک ذره و روشی که ما ساعت‌ها را جمع می‌کنیم با عنوان قضیه اسپین-

آمار[۱] شناخته می‌شود و این قضیه زمانی خود را نشان می‌دهد که ما نظریه کوانتوم را طوری فرمول‌بندی کنیم که با نظریه نسبیت خاص انیشتین سازگاری داشته باشد. مخصوصاً این مطلب یکی از نتایج مستقیم این است که ما مطمئن شویم قانون علیت نقض نمی‌شود. متأسفانه استخراج قضیه اسپین-آمار فراتر از سطح این کتاب است – در حقیقت فراتر از سطح بسیاری از کتاب‌هاست. در کتاب *گفتارهای فاینمن در باب فیزیک*، ریچارد فاینمن می‌گوید:

> ما عذرخواهی می‌کنیم که نمی‌توانیم توضیحی ابتدایی به شما بدهیم. شرح این مطلب توسط پاولی با استدلالاتی پیچیده از نظریه میدان کوانتومی و نسبیت انجام شده است. او نشان داده

[۱] . Spin-Statistics Theorem

است که این دو نظریه باید باهم ادغام شوند، اما ما قادر به توضیح دوباره این مطلب به شکل ساده نیستیم. ظاهراً این یکی از معدود جاهایی در فیزیک است که قاعده‌ای با بیان ساده وجود دارد، اما کسی توضیح ساده‌ای برای علتش نیافته است.

این را بدانید که ریچارد فاینمن این مطلب را در کتابی در سطح دانشگاه نوشته بود، پس همان بهتر که ما بی‌خیال این قضیه شویم. اما قانون ساده است و شما باید حرف ما را قبول کنید که این قانون اثبات شده است: فرمیون‌ها نیاز به چرخش دارند اما بوزون‌ها نه. ظاهراً این چرخش دلیلی برای اصل طرد است به‌تبع آن برای ساختار اتم‌ها. پس از کارهایی که تا اینجا انجام دادیم، حال می‌توانیم آن را به‌سادگی توضیح دهیم.

تصور کنید که نقاط A و B در شکل ۳-۷ را به هم نزدیک‌تر و نزدیک‌تر کنیم. زمانی که این دو نقطه بسیار به هم نزدیک شدند، ساعت‌های ۱ و ۲ باید تقریباً اندازه مشابهی داشته و عدد مشابهی را نشان دهند. زمانی که A و B روی‌هم بیافتند، ساعت‌های باید یکسان شوند. این مسئله واضح است، زیرا ساعت ۱ مربوط به ذره ۱ است که به نقطه A می‌رود و ساعت ۲ هم، در این مورد خاص، دقیقاً همان چیز را نمایندگی می‌کند، زیرا نقاط A و B روی‌هم افتاده‌اند. بااین‌حال ما هنوز دو ساعت داریم و باید آن‌ها را با یکدیگر جمع کنیم. نکته کار اینجاست: برای فرمیون‌ها، ما باید به یکی از ساعت‌ها، چرخشی به‌اندازه ۱۸۰ درجه اعمال کنیم. این یعنی زمانی که نقاط A و B روی‌هم بیافتند، ساعت‌ها

همواره دقیقاً زمان‌های "برعکس" را نشان می‌دهند – اگر یکی روی ۱۲ باشد، دیگری روی ۶ خواهد بود – و بنابراین جمع‌بندی آن‌ها همواره ساعتی به‌اندازه صفر را نتیجه خواهد داد. این نتیجه‌گیری شگفت‌انگیز است، و به این معنی است که هیچ شانسی برای یافتن دو الکترون در یک نقطه وجود ندارد: قوانین فیزیک کوانتوم باعث دور شدن آن‌ها از هم می‌شوند. هرقدر که آن‌ها به هم نزدیک شوند، ساعت حاصله کوچک‌تر می‌شود و احتمال وقوع این اتفاق را کم می‌کند. این یکی از راه‌های بیان قانون معروف پاولی است: الکترون‌ها همدیگر را طرد می‌کنند.

در اصل ما بیان کردیم که هیچ دو الکترون یکسانی نمی‌توانند در یک سطح انرژی در اتم هیدروژن قرار گیرند.

هنوز کاملاً نشان ندادیم که این مطلب درست است، اما این ایده که الکترون‌ها همدیگر را طرد می‌کنند، اثراتی ضمنی بر روی اتم‌ها دارد و همچنین عاملی است برای اینکه ما به درون زمین نفوذ نکنیم. حال می‌توانیم ببینیم که نه‌تنها الکترون‌های اتم‌های کفش ما به دلیل دافعه الکتریکی با الکترون‌های کف زمین مقابله می‌کنند، بلکه به‌طور ذاتی طبق اصل طرد پاولی، همدیگر را دفع می‌کنند. همان‌طور که دایسون و لنارد ثابت کرده‌اند، مشخص شده است که این دافعه بین الکترون‌هاست که واقعاً عامل عدم نفوذ و عبور ما از درون زمین می‌شود و همچنین (دافعه ذکرشده) عاملی است برای اینکه اتم‌ها سطوح انرژی مختلفی را پر کنند، به اتم‌ها ساختار مشخصی دهند و نهایتاً منجر به عناصر شیمیایی

فراوانی شوند که در طبیعت می‌بینیم. به‌وضوح این قسمت از فیزیک عواقب مهمی در زندگی روزمره ما دارد. در فصل پایانی این کتاب، نشان خواهیم داد که اصل پاولی چگونه نقشی حیاتی در جلوگیری از فروپاشی بعضی ستارگان، تحت تأثیر جاذبه خودشان ایفا می‌کند.

برای حسن ختام، باید توضیح دهیم که چگونه است که هیچ دو الکترونی نمی‌توانند همزمان در یک مکان قرار گیرند، یعنی هیچ دو الکترونی نمی‌توانند اعداد کوانتومی مشابهی داشته باشند و این هم یعنی آن‌ها نمی‌توانند انرژی و اسپین یکسان داشته باشند. اگر ما دو الکترون با اسپین یکسان را در نظر بگیریم، می‌خواهیم نشان دهیم که این دو نمی‌توانند در سطح انرژی یکسانی قرار بگیرند. اگر آن‌ها در سطح انرژی

یکسانی باشند، لزوماً هرکدام از این دو دقیقاً با آرایه یکسانی از ساعت‌ها را در فضا توصیف می‌شوند (که مربوط به موج ایستای مرتبطشان می‌شود). برای هر جفت نقطه در فضا – بیایید از نام‌های X و Y استفاده کنیم – دو ساعت وجود دارد. ساعت ۱ مربوط به "الکترون ۱ در X" و "الکترون ۲ در Y" می‌شود و ساعت ۲ مربوط به "الکترون ۱ در Y" و "الکترون ۲ در X" است. با توجه به بررسی‌های قبلی می‌دانیم که این دو ساعت را باید پس از چرخاندن یکی از آن‌ها به میزان ۶ ساعت، باهم جمع ببندیم تا احتمال یافتن یک الکترون در X و دیگری در Y را بیابیم. اما اگر این دو الکترون انرژی یکسانی داشته باشند، ساعت‌های ۱ و ۲ قبل از آن چرخش اضافی باید مقادیر یکسانی داشته باشند. پس از

چرخش آن‌ها زمان‌های "مخالفی" را نشان می‌دهند و جمعشان برابر با صفر می‌شود. این اتفاق برای هر دو نقطه X و Y رخ می‌دهد و بنابراین هیچ راهی برای یافتن یک جفت الکترون با ساختار موج ایستای یکسان و بنابراین انرژی یکسان وجود ندارد. این واقعیت مسئول پایداری اتم‌های درون بدن شماست.

فصل هشتم

ارتباط دوطرفه

تا اینجا تمرکز ما بر روی فیزیک کوانتومی ذرات و اتم‌ها بود. ما یاد گرفتیم که الکترون‌ها در وضعیت‌هایی با انرژی معین به نام وضعیت‌های سکون (حالات ایستاده) قرار گرفته‌اند، گرچه اتم‌ها ممکن است به‌صورت ترکیبی از چنین وضعیت‌هایی باشند. همچنین یاد گرفتیم که یک الکترون ممکن است با گسیل فوتون از یک وضعیت انرژی به وضعیت انرژی دیگری برود. بدین طریق گسیل فوتون‌ها وضعیت‌های انرژی را برای

ما ملموس می‌کند؛ ما به‌طور روزمره رنگ‌های خاص تغییرات درون اتمی را می‌بینیم. تجربه فیزیکی ما، ناشی از مجموعه وسیعی از اتم‌های به‌هم‌پیوسته است و به همین دلیل باید در مورد اتصال اتم‌ها به همدیگر نیز بی‌اندیشیم.

تفکر درباره مجموعه اتم‌ها ما را وارد مسیری می‌کند که با پیوندهای شیمیایی، تفاوت بین اجسام رسانا و عایق و نهایتاً نیمه‌رساناها آشنا شویم. این مواد شگفت‌انگیز خصوصیاتی دارند که می‌توانند برای ما وسایلی بسازند تا ما از آن‌ها برای عملکردهای منطقی استفاده کنیم. به آن‌ها ترانزیستور[۱] می‌گویند و با اتصال میلیون‌ها عدد از آن‌ها می‌توان

[۱] . Transistor

میکروچیپ[۱] ها را ساخت. همان‌طور که خواهیم دید نظریه ترانزیستورها کاملاً کوانتومی است. بدون نظریه کوانتوم بسیار سخت است که بدانیم آن‌ها چگونه اختراع شدند و همچنین مشکل است دنیای مدرن امروز را بدون آن‌ها تصور کنیم. ترانزیستور یکی از مثال‌های اولیه‌ای است که مزایای علم را نشان می‌دهد؛ کنجکاوی‌ای که باعث شد ما زمان زیادی را برای کشف جزئیات درونی طبیعت صرف کنیم و نهایتاً انقلابی در زندگی روزمره‌مان ایجاد کنیم. خطری که در طبقه‌بندی و کنترل تحقیقات علمی وجود دارد به زیبایی توسط ویلیام

[۱] . Microchip

شاکلی[۱]، یکی از مخترعین ترانزیستور و رئیس گروه فیزیک حالت جامد در آزمایشگاه‌های تلفن بل، خلاصه شده است:

> می‌خواهم نقطه نظرات خودم را درباره واژه‌هایی که معمولاً برای طبقه‌بندی انواع تحقیقات فیزیکی استفاده می‌شود ابراز کنم؛ به‌عنوان‌مثال: محض، کاربردی، نامحدود، بنیادی، پایه، آکادمیک، صنعتی، عملی، و ... . احساسم بر این است که واژه‌های پرکاربرد از بین آن‌ها، معمولاً با حالتی موهن استفاده می‌شوند؛ ازیک‌طرف برای تحقیر اهداف عملی برای تولید چیزهای مفید و از طرف دیگر برای حذف تحقیقات دامنه‌داری که ممکن است هنوز کاربردی برایشان پیش بینی نشده باشد. معمولاً از من پرسیده می‌شود که آیا آزمایشاتی که طراحی می‌کنم، محض هستند یا کاربردی؛ برای من مهم این است که

[۱] . William Shockley

آزمایشی که طراحی می‌کنم دانش جدیدی را درباره طبیعت برایم آشکار کند. اگر چنین دانشی به دست آید، به نظر من اسم آن یک تحقیق بنیادین خوب است؛ و این بسیار مهم‌تر از این است که آیا انگیزه انجام آزمایش کاملاً ارضای حس زیباشناختی باشد، یا [مثلاً] بهبود پایداری ترانزیستورهای توان بالا. زمانی که هردوی این انگیزه‌ها وجود داشته باشد، بیشترین بهره از آن آزمایش نصیبمان می‌شود.[۱]

ازآنجایی‌که این حرف‌ها توسط مخترع احتمالاً پرکاربردترین قطعه ساخته‌شده از زمان اختراع چرخ گفته شده است، سیاست‌مداران و مدیران سراسر دنیا، به این گفته‌ها گوش فرا خواهند داد. نظریه کوانتوم جهان را دگرگون کرد و نظریاتی

[۱]. این گفته ها قسمتی از سخنرانی او در حین کسب جایزه نوبل سال ۱۹۵۶ بود.

که در حال خودنمایی در فیزیک مدرن هستند نیز قطعاً زندگی ما را تغییر خواهند داد.

مانند همیشه، ما از ابتدا شروع می‌کنیم و بحثمان که درباره جهانی با یک ذره بود را به دو ذره گسترش می‌دهیم. به‌طور خاص، جهانی ساده را تصور کنید که تنها دو اتم مُجزا هیدروژن دارد؛ دو الکترون که در مدار دو پروتونی که از آن‌ها فاصله بسیاری دارند به دام افتاده‌اند. در طی چند صفحه آتی ما این دو الکترون را به هم نزدیک‌تر می‌کنیم تا ببینیم چه اتفاقی می‌افتد، اما فعلاً تصور کنید که بسیار از هم دورند.

اصل طرد پاولی می‌گوید که دو الکترون نمی‌توانند در وضعیت کوانتومی یکسانی قرار بگیرند، زیرا الکترون‌ها،

فرمیون‌هایی غیرقابل‌تمایزند. شما در ابتدا وسوسه می‌شوید که بگویید اگر اتم‌ها دور از هم باشند، دو الکترون باید در وضعیت کوانتومی بسیار متفاوتی از هم باشند و توضیح بیشتری در این مورد وجود ندارد. اما واقعیات جالب‌تری وجود دارد. فرض کنید الکترون شماره ۱ را در اتم شماره ۱ و الکترون شماره ۲ را در اتم شماره ۲ قرار دادیم. پس از اندکی صبر، گفتن این جمله که "الکترون شماره ۱ هنوز در اتم شماره ۱ قرار دارد"، صحیح نیست. ممکن است در اتم شماره ۲ قرار داشته باشد، زیرا همواره این احتمال وجود دارد که الکترون جهشی کوانتومی انجام دهد. یادتان باشد، هر چیزی که احتمال وقوع داشته باشد، اتفاق می‌افتد و الکترون‌ها آزادند از لحظه‌ای به لحظه دیگر در جهان پرسه بزنند. به زبان ساعت‌های کوچک،

اگر ما در ابتدا با ساعت‌هایی شروع کنیم که یکی از الکترون‌ها را در محدوده یکی از پروتون‌ها توصیف می‌کند، ما مجبوریم لحظاتی بعد ساعت‌هایی نیز [که مربوط به همان الکترون قبلی‌اند] در محدوده پروتون دیگر تعریف کنیم. حتی اگر همهمه تداخل کوانتومی به ما بگوید که ساعت‌های نزدیک به پروتون دیگر بسیار کوچک هستند، به‌هرحال صفر نیستند و همواره احتمالی هرچند ضعیف وجود دارد که الکترون در آن نقاط باشد. راهی که برای درک بهتر تبعات اصل طرد وجود دارد این است که اتم‌ها را به‌عنوان چیزهایی مستقل از هم در نظر نگیریم و کل سیستم را یکجا تصور کنیم: ما دو الکترون و دو پروتون داریم و می‌خواهیم بدانیم آن‌ها چه نظمی به خود می‌گیرند. بیایید برای ساده‌سازی، از اندرکنش

الکترومغناطیس بین دو الکترون چشم‌پوشی کنیم – اگر پروتون‌ها فاصله زیادی از هم داشته باشند، این تقریبِ بدی نخواهد بود و تأثیر مهمی بر استدلال ما نخواهد گذاشت.

ما درباره انرژی‌های مجاز الکترون در دو اتم چه می‌دانیم؟ برای به دست آوردن یک ایده تقریبی نیازی به محاسبات نداریم. می‌توانیم از دانش کنونی‌مان استفاده کنیم. برای پروتون‌هایی که از هم دورند (فرض کنید فاصله‌ای در حد چند مایل دارند)، پایین‌ترین انرژی مجاز الکترون‌ها مسلماً باید شبیه به حالتی باشد که آن‌ها به پروتون‌های خود مقید بوده و دو اتم هیدروژن مجزا را تشکیل می‌دهند. در این حالت، تمایل داریم نتیجه بگیریم که پایین‌ترین وضعیت انرژی برای کل سیستم دو پروتون-دو الکترون، متناظر با دو اتم هیدروژن

است که در پایین‌ترین وضعیت انرژی خود قرار داشته و کاملاً از همدیگر دیگر چشم‌پوشی کرده‌اند. گرچه این حرف درست به نظر می‌آید، در حقیقت درست نیست. ما باید کل سیستم را یکجا ببینیم و دقیقاً مانند اتم مجزای هیدروژن، این سیستم چهار ذره‌ای نیز باید طیف خاص خودش را از انرژی مجاز الکترون‌ها داشته باشد و به دلیل اصل پاولی، هر دو الکترون‌ها نمی‌توانند دقیقاً در سطح انرژی یکسانی به دور هرکدام از پروتون‌ها باشند و با خوش‌بینی وجود همدیگر را نادیده بگیرند.[۱]

[۱]. فعلا از بحث اسپین الکترون‌ها صرف‌نظر می‌کنیم. گفته‌های ما درباره دو الکترون با اسپین یکسان کاربرد دارد.

به نظر می‌آید باید نتیجه بگیریم که جفت الکترون یکسان ما در دو اتم هیدروژن بسیار دور نمی‌توانند انرژی یکسانی داشته باشند، اما ما همچنین گفتیم که انتظار داریم الکترون‌ها در پایین‌ترین سطح انرژی متناظر با یک اتم مجزای ایده‌آل قرار بگیرند. هر دو این گفته‌ها باهم نمی‌توانند درست باشند و اندکی تفکر مشخص می‌کند که راه‌حل خروج از این معضل این است که نه یکی بلکه دو سطح انرژی برای هر سطح، در اتم مجزای ایده‌آل هیدروژن وجود داشته باشد. در این حالت ما قادر خواهیم بود که بدون نقض اصل طرد، دو الکترونمان را جای دهیم. در حقیقت تفاوت این دو انرژی برای اتم‌هایی که از هم دورند باید بسیار ناچیز باشد و می‌توان [با اندکی اغماض] وانمود کرد که این دو اتم همدیگر را نادیده

می‌گیرند. اما واقعیت امر این است که آن‌ها نمی‌توانند هم دیگر را نادیده بگیرند و این به دلیل گستره پیچک‌مانند اصل پاولی است: اگر یکی از الکترون‌ها در یک وضعیت انرژی است دیگری باید در وضعیت انرژی دوم باشد که با اولی متفاوت است و این ارتباط عمیق بین دو اتم مستقل از فاصله آن‌هاست.

این منطق برای بیش از دو اتم نیز تعمیم می‌یابد – اگر ۲۴ اتم هیدروژن در سطح جهان پراکنده باشند، برای هر وضعیت انرژی در هر یک از اتم‌ها، حال ۲۴ وضعیت انرژی وجود خواهد داشت که همه‌شان مقادیر تقریباً – اما نه دقیقاً – یکسانی خواهند داشت. زمانی که یکی از این الکترون‌ها در یکی از این وضعیت‌ها قرار می‌گیرد، "دانش" کاملی از وضعیت

بقیه ۲۳ الکترون دیگر دارد و فاصله‌اش از سایر الکترون‌ها تغییری در کلیت کار ایجاد نمی‌کند. و به همین ترتیب، هر الکترون در این جهان درباره تمامی الکترون‌های دیگر جهان اطلاعات دارد. نباید به همین بسنده کنیم – پروتون‌ها و نوترون‌ها نیز فرمیون هستند و هر پروتون راجع به سایر پروتون‌ها و هر نوترون راجع به سایر نوترون‌ها علم دارد. رابطه عمیقی بین ذراتی که جهان ما را ساخته‌اند وجود دارد که در سراسر جهان گسترده است. البته [این دانش] زودگذر (ناچیز) است، زیرا ذراتی که بسیار از هم دورند، انرژی‌های متفاوتشان آن‌قدر به هم نزدیک است که تفاوت محسوسی را در زندگی روزمره ما ایجاد نمی‌کند.

این یکی از عجیب‌ترین نتایجی است که تا اینجای کتاب با آن مواجه شدیم. گفتن اینکه هر اتمی در این جهان با تک‌تک اتم‌های دیگر در ارتباط است، مانند دریچه‌ای می‌ماند که هر نتیجه بی‌ربطی را از آن استخراج کرد. اما چیزی در اینجا وجود ندارد که قبلاً با آن برخورد نکرده باشیم. درباره پتانسیل چاه مربعی که در فصل ۶ معرفی کردیم فکر کنید. عرض چاه، طیف مجاز سطوح انرژی را تعیین می‌کند و با تغییر اندازه چاه، طیف سطح انرژی نیز تغییر می‌کند. در مورد شکل چاهی که الکترون‌های ما در آن قرار دارند نیز این مطلب صدق می‌کند و بنابراین سطوح انرژی‌ای که آن‌ها مجاز به تصرف کردنشان (جا دادنشان) هستند، با توجه به موقعیت پروتون‌ها تعیین می‌شود. اگر دو پروتون وجود داشته باشد، طیف انرژی

با توجه به موقعیت آن دو تعیین می‌شود و اگر $۱۰^{۸۰}$ پروتون در شکل‌گیری جهان سهیم باشند، موقعیت هرکدام از آن‌ها، شکل چاهی را تحت تأثیر قرار می‌دهد که $۱۰^{۸۰}$ الکترون در آن قرار دارند. تنها یک نمونه از هرکدام از مجموعه سطوح انرژی وجود دارد و زمانی که تغییری ایجاد شود (مثلاً الکترونی از یک سطح انرژی به سطح انرژی دیگر برود)، همه‌چیز (کل دنیا) باید همزمان خود را با آن تطبیق دهد که هیچ دو فرمیونی در سطح انرژی یکسانی قرار نداشته باشند.

این ایده که الکترون‌ها به‌طور لحظه‌ای از وضعیت هم مطلع می‌شوند، ظاهراً این قابلیت را دارد که نظریه نسبیت انیشتین را نقض کند. احتمالاً بتوانیم دستگاه فرستنده‌ای بسازیم که از این خاصیت ارتباط لحظه‌ای استفاده کرده تا اطلاعات را با

سرعت‌های سریع‌تر از نور انتقال دهیم. این مطلب به‌ظاهر متناقض (پارادوکس) اولین بار در سال ۱۹۳۵ توسط انیشتین و به همکاری بوریس پودولسکی[۱] و ناتان روزن[۲] مطرح شد. انیشتین آن را "فعالیتی شبح‌وار در فاصله" نام‌گذاری کرد و از آن خوشش نیامد. مدتی طول کشید که مردم (دانشمندان) فهمیدند علی‌رغم شبح‌وار بودن این خاصیت، نمی‌توان از آن سوءاستفاده کرده و اطلاعات را با سرعتی بیش از سرعت نور انتقال دهند و قانون علت و معلول توانست نفس راحتی بکشد.

این کثرت بی‌رویه سطوح انرژی ابزار محرمانه‌ای نیست که بتوان توسط آن از اصل طرد طفره رفت. در حقیقت این ابزار

---

[۱] . Boris Podolsky

[۲] . Nathan Rosen

مطلقاً محرمانه نیست، زیرا عامل پشت‌صحنه در پیوندهای شیمیایی است. همچنین کلید اصلی پاسخ به این سؤال است که چرا بعضی مواد رسانای الکتریکی و بعضی نارسانا هستند و بدون آن ما نمی‌توانستیم نحوه عملکرد ترانزیستورها را بفهمیم. به‌منظور آغاز سفرمان به سمت ترانزیستورها، می‌خواهیم به عقب برگشته و سراغ اتم "ساده" ای که در فصل ۶ ملاقات کردیم برویم؛ یعنی زمانی که الکترونی را درون یک چاه پتانسیل به دام انداختیم. برای اطمینان، این مدل ساده به ما اجازه نداد تا طیف انرژی‌های درون اتم هیدروژن را به‌طور دقیق محاسبه کنیم، اما درباره رفتار یک اتم تنها، مطالبی را به ما آموخت و اکنون نیز در خدمتمان قرار خواهد گرفت. ما قصد داریم از دو چاه مربعی که به هم

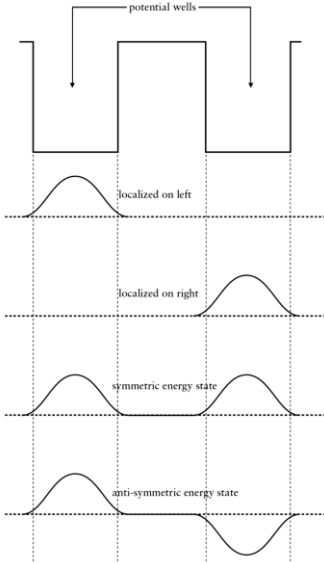
متصل‌اند برای مدل‌سازی دو اتم هیدروژن کنار هم استفاده کنیم. در ابتدا این‌گونه فرض می‌کنیم که تنها یک الکترون در پتانسیلی که توسط این دو پروتون ساخته، حرکت می‌کند. تصویر بالایی شکل ۱-۸ نشان می‌دهد که چگونه این کار را انجام می‌دهیم. این پتانسیل تخت است، مگر در ناحیه‌هایی که برای ساختن چاه آن را حفر کرده‌ایم، که تقلیدی از تأثیر دو پروتون و توانایی آن‌ها برای به دام انداختن الکترون است. مانع میانی، عاملی است که باعث می‌شود الکترون یا در سمت چپ قرار گیرد یا در راست و به اندازه کافی بلند است. به زبان فنی، گفته می‌شود که الکترون ما در پتانسیل دو-چاهی[۱] در حال حرکت است.

[۱] . Double-Well Potential

برنامه اول ما این است که با استفاده از این مدل بفهمیم زمانی که دو اتم هیدروژن را به هم نزدیک می‌کنیم چه اتفاقی می‌افتد – ما خواهیم دید که وقتی آن‌ها به اندازه کافی نزدیک شوند باهم پیوند یافته و مولکول هیدروژن را تشکیل می‌دهند. پس‌ازآن، درباره تعداد اتم‌های بیشتری فکر خواهیم کرد و نهایتاً خواهیم فهمید که درون یک ماده جامد چه اتفاقاتی می‌افتد.

اگر این دو چاه خیلی عمیق باشند، می‌توانیم از نتایج فصل ۶ استفاده کرده و تعیین کنیم که پایین‌ترین سطح انرژی متناظر با چه چیزی خواهد بود. برای یک الکترون درون یک چاه مربعی، پایین‌ترین وضعیت انرژی، با موجی سینوسی توصیف می‌شود که طول‌موجش دو برابر اندازه چاه است.

وضعیت انرژی بعدی نیز موجی سینوسی است که طول‌موجش برابر با اندازه چاه است و به همین ترتیب. اگر ما الکترونی را درون یکی از دو چاه بی اندازیم و اگر این چاه به اندازه کافی عمیق باشد، انرژی‌های مجاز آن باید شبیه به انرژی‌های مجاز همان الکترون اما محصور در تنها یک چاه عمیق باشد و تابع موجش باید کاملاً شبیه به موج سینوسی باشد. یک اتم هیدروژن کاملا ایزوله شده، درمقایسه با اتمی که به فاصله بسیار دوری از جفتش قرار دارد، اختلاف ناچیزی دارد که در ادامه خواهیم دید.



شکل ۱-۸: پتانسیل دو-چاهی در بالا و در زیر آن چهار تابع موج شگفت‌انگیز که الکترون درون پتانسیل را توصیف می‌کنند. تنها دو شکل پایین‌تر مربوط به الکترونی می‌شوند که انرژی معینی دارد.

ما با اطمینان انتظار داریم که دو تابع موجی که در بالای شکل ۱-۸ رسم شده‌اند، مربوط به الکترونی باشند که یک‌بار در چاه راست و یک‌بار در چاه چپ حضور دارد (یادتان باشد که ما از واژه‌های "چاه" و "اتم" به‌طور جایگزین می‌توانیم استفاده کنیم). این امواج تقریباً سینوسی هستند و طولی موجی دو برابر اندازه آن چاه دارند. ازآنجایی‌که تابع موج‌ها ازلحاظ شکلی مشابه‌اند، می‌توانیم بگوییم که آن‌ها متناظر با ذراتی با انرژی برابر هستند. اما این نمی‌تواند درست باشد، زیرا همان‌طور که گفتیم احتمال بسیار اندکی وجود دارد که هرقدر هم که چاه‌ها عمیق بوده و از هم دور باشند، الکترون از یکی به درون دیگری بپرد. ما این مطلب را با کشیدن موج‌های سینوسی که انگار از درون دیوار مابین چاه‌ها عبور

کرده‌اند، نشان داده‌ایم و این شکل‌ها این واقعیت را بازگو می‌کنند که احتمالاً می‌توان در چاه کناری ساعت غیر صفری یافت.

اینکه الکترون همواره بتواند احتمالی برای جهش از یک چاه به چاه دیگر را داشته باشد، به این معنی است که دو تابع موج نشان داده شده در بالای شکل ۱-۸ نمی‌توانند نماینده یک الکترون با انرژی معین باشند، زیرا ما از فصل ۶ می‌دانیم که چنین الکترونی با موج ایستایی توصیف می‌شود که شکلش با زمان تغییر نمی‌کند یا به‌طور معادل مجموعه ساعت‌هایی که اندازه‌شان با گذر زمان ثابت می‌ماند. اگر در گذر زمان، ساعت‌های جدیدی در چاه خالی اولیه پخش شوند، مسلماً تابع موج با زمان تغییر می‌کند. پس وضعیت انرژی معین در

سیستم دو-چاهی به چه شکل است؟ پاسخ این است که این وضعیت‌ها آزادتر هستند و امتیاز برابری را برای حضور الکترون در هر دو چاه می‌دهند. این تنها حالتی است که می‌توان یک موج ایستا ساخت و همزمان از تغییر شکل تابع موج ناشی این‌ور و آن‌ور پریدن الکترون جلوگیری کرد.

دو تابع موج پایینی که در شکل ۱-۸ کشیده‌ایم این خصوصیت را دارند. وضعیت‌های پایین‌ترین انرژی در حقیقت به این شکل هستند. این دو شکل تنها وضعیت‌های ایستایی هستند که می‌توانیم بسازیم تا شبیه به تابع موج "چاه تکی" در هر چاه مجزا باشند و همزمان الکترونی را توصیف کنند که احتمال یکسانی برای حضور در هر یک از چاه‌ها داشته باشد. این‌ها در حقیقت دو وضعیت انرژی‌ای هستند که گفتیم باید

وجود داشته باشند تا بتوانیم دو الکترون را در مدار دو پروتونِ دور از هم قرار دهیم تا به صورتی دو اتم تقریباً مشابه هیدروژن بسازیم که سازگار با اصل پاولی باشد. اگر الکترونی توسط یکی از این دو تابع موج توصیف شود – الکترون دیگر باید با تابع موج دیگر توصیف شود – این اتفاق، شرایط اصل پاولی را ارضا می‌کند[۱]. برای چاه‌های با عمق کافی، یا اتم‌های به اندازه کافی دور، این دو انرژی تقریباً باهم برابر اند و نیز تقریباً برابر با حداقل انرژی ذره‌ای خواهند بود که در یک چاه مجزا به دام افتاده است. نگران نباشید که یکی از موج‌ها به‌طور بالا و پایین است – یادتان باشد که هنگام به دست

[۱]. حواستان باشد که ما دو الکترون یکسان را در نظر گرفتیم؛ یعنی اسپین شان یکسان است.

آوردن احتمال حضور یک الکترون در یک مکان، تنها اندازه ساعت بود که اهمیت داشت. به‌عبارت‌دیگر ما می‌توانیم تمامی تابع موج‌هایی که تاکنون رسم کردیم را معکوس کنیم و هیچ تغییری در محتوای فیزیکی هیچ‌چیزی ایجاد نشود. پس تابع موج "نسبتاً سروته" (که در شکل با عنوان "وضعیت انرژی پادمتقارن[۱]" نشان داده شده است) هنوز به‌طور همزمان الکترونی که در چاه سمت چپ قرار داشته و الکترونی که در چاه سمت راست قرار دارد را توصیف می‌کند. پس توابع موج متقارن و پادمتقارن دقیقاً مشابه نیستند (یعنی نمی‌توانند، چون پاولی را ناامید می‌کنند). برای فهم این مطلب، نیاز داریم

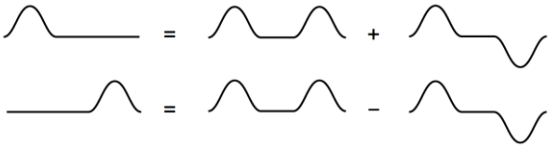
[۱] . Anti-Symmetric Energy State

تا رفتار این دو تابع حداقل انرژی را در محدوده بین چاه‌ها بررسی کنیم.

یکی از توابع نسبت به مرکز (محور مرکزی) دو چاه متقارن است و دیگری پادمتقارن (به همین ترتیب نیز در شکل عنوان گذاری شده‌اند). منظور از "متقارن" این است که موج سمت چپ دقیقاً تصویر آیینه‌ای از موج سمت راست است. منظور از موج "پادمتقارن" نیز این است که موج سمت چپ به شرطی تصویری آیینه‌ای از موج سمت راست می‌سازد که یک‌بار هم به‌طور اضافی در جهت عمود معکوس شود. این اصطلاحات فنی خیلی مهم نیستند و نکته مهم این است که این دو موج در محدوده بین دو چاه متفاوت‌اند. این تفاوت‌هاست که باعث شده این توابع، وضعیت‌هایی با انرژی اندک متفاوتی را توصیف

کنند. در حقیقت موج متقارن انرژی کمتری دارد. پس معکوس کردن یکی از موج‌ها تأثیرگذار است، اما اگر چاه‌ها به اندازه کافی عمیق باشند (یا اتم‌ها به اندازه کافی دور باشند) این تأثیر ناچیز خواهد بود.

اگر بخواهیم مطلب بالا را از دید ذرات با انرژی معین بنگریم سردرگم می‌شویم زیرا همان‌طور که دیدیم، هر دو این ذرات توسط توابع موجی با اندازه برابر در هر دو چاه توصیف می‌شوند. در اصل معنی این حرف این است که احتمال یکسانی برای یافت ذره در هرکدام از چاه‌ها وجود دارد، حتی اگر این دو چاه در فاصله‌ای به عرض کل دنیا از هم دور باشند.



شکل ۲-۸: شکل بالا: الکترونی که در چاه سمت چپ متمرکز شده است را می‌توان توسط مجموع دو وضعیت انرژی کمتر آن درک کرد. شکل پایینی: الکترونی که در چاه سمت راست قرار دارد را می‌توان با تفاوت بین دو وضعیت انرژی‌اش فهمید.

حال چطور این حالت را تصور کنیم که واقعاً یک الکترون را در چاه سمت چپ و الکترون دیگری را در چاه سمت راست قرار دهیم؟ قبلاً گفتیم انتظار داریم که چاهی که در ابتدا خالی بود پر از تعدادی ساعت شود تا این واقعیت را نشان دهد که ذره از یک سمت به سمت دیگر پریده است. ما حتی پاسخ

را به این شکل نشان دادیم که تابع موج بین دو چاه عقب و جلو می‌شود. برای اینکه بدانید چنین چیزی چرا درست است، باید دقت کنیم که می‌توانیم وضعیتی که بر روی یکی از پروتون‌ها متمرکز است را با جمع‌بندی دو تابع موج حداقل بیان کنیم. ما این مطلب را در شکل ۲-۸ نشان دادیم، اما معنی این حرف چیست؟ اگر الکترون در زمان خاصی در یکی از چاه‌ها حضور داشته باشد، این به‌طور ضمنی به این معنی است که انرژی معینی ندارد. منظور اصلی‌مان این است که در صورت اندازه‌گیری انرژی‌اش ما با یکی از دو انرژی ممکن متناظر با دو انرژی معین که توسط تابع موج ساخته می‌شوند مواجه خواهیم شد. بنابراین الکترون همزمان در دو وضعیت

انرژی قرار دارد. امیدواریم که تا اینجای کتاب، این مطلب ایده خیلی جدیدی نباشد.

اما نکته جالب اینجاست. ازآنجایی‌که این دو وضعیت، انرژی کاملاً یکسانی ندارند، ساعتشان با نرخ اندکی متفاوت می‌چرخد (همان‌طور که در صفحات ۱۲۰ و ۱۲۱ صحبتش شد). این واقعیت بر روی ذره‌ای که در ابتدا با تابع موجی متمرکزشده در اطراف یک پروتون توصیف شده است، تأثیری می‌گذارد که پس از گذر زمان کافی با تابع موجی در اطراف پروتون دیگر توصیف شود. قصد نداریم وارد جزئیات کار شویم، اما به همین بسنده می‌کنیم که این پدیده دقیقاً مشابه با حالتی است که دو موج صوتی که تقریباً فرکانس مشابهی دارند پس از رسیدن به یکدیگر و جمع شدن باهم برای تولید

موج جدید، در ابتدا صدای بلندتری داشته (زیرا امواج هم‌فاز هستند) و پس از مدتی ساکت می‌شوند (زیرا ناهم‌فاز می‌شوند). این پدیده با عنوان "ضربان[۱]" شناخته می‌شود. هرقدر که فرکانس موج‌ها نزدیک‌تر و نزدیک‌تر باشد، فاصله بین صدای بلند و خاموشی صدا بیشتر می‌شود و اگر فرکانس‌ها دقیقاً برابر باشند، آن‌ها باهم جمع شده و یک صدای خالص می‌سازند. این پدیده برای هر موسیقیدانی که بدون دانش قبلی از این قسمت از فیزیک امواج استفاده می‌کند و دیاپازون[۲] را به کار می‌برد، کاملاً آشناست. همین اتفاق به‌طور مشابه برای الکترون دوم که در چاه دوم نشسته

---

۱. Beats

۲. Tuning Fork

رخ می‌دهد. این الکترون تمایل دارد که از چاه خود به چاه دیگر بپرد، به شیوه‌ای که رفتار الکترون اول را دقیقاً اجرا کند و پس از مدتی کافی، دو الکترون جایشان را باهم عوض می‌کنند.

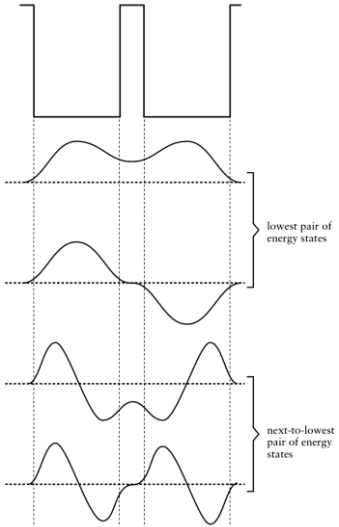
می‌خواهیم از چیزهایی که تا الآن یاد گرفتیم استفاده کنیم. اتفاق جالب‌تر زمانی می‌افتد که ما شروع به نزدیک‌تر کردن اتم‌ها به همدیگر می‌کنیم. در مدل ما، نزدیک کردن اتم‌ها به همدیگر معادل این است که دیوار بین دو چاه را نازک‌تر کنیم. هرقدر این دیوار نازک‌تر شود، توابع موج شروع به ادغام شدن با همدیگر کرده و احتمال حضور الکترون در فضای بین دو پروتون را افزایش می‌دهد. شکل ۳-۸ چهار تابع موج با انرژی حداقل را نشان می‌دهد که مربوط به زمانی است که دیواره

نازک باشد. جالب است که تابع موج با انرژی حداقل شروع به شبیه‌تر شدن به موج سینوسی با انرژی حداقلی می‌کند که ما در صورت وجود یک الکترون و یک چاه عریض داشتیم؛ یعنی دو قله موج باهم ادغام شده و یک قله را تشکیل می‌دهند (که البته گودی اندکی دارد). به همین ترتیب، تابع موج با انرژی حداقل دوم نیز شبیه به موج سینوسی‌ای می‌شود که برای یک الکترون در چاه عریض نقش حداقل انرژی دوم را دارد. این چیزی است که باید انتظارش را می‌داشتیم، زیرا هرقدر دیوار بین چاه‌ها نازک‌تر شود، تأثیرش کمتر می‌شود و نهایتاً زمانی که ضخامتی نداشته باشد، اثری نیز نخواهد داشت و الکترون ما باید دقیقاً مانند حالتی رفتار کند که انگار درون یک چاه قرار دارد.

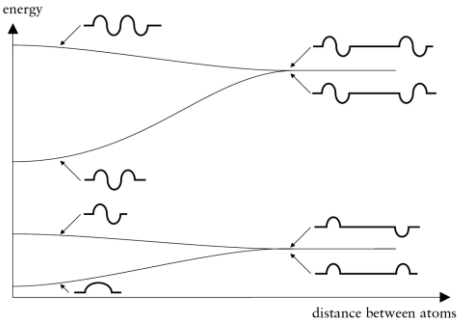
با مطالعه اتفاقات به وقوع پیوسته در دو حالت حدی – یعنی زمانی که چاه‌ها بسیار از هم دورند و زمانی که بسیار نزدیک‌اند – ما می‌توانیم چشم‌اندازمان را کامل کرده و ببینیم که انرژی‌های مجاز الکترون زمانی که فاصله چاه‌ها را تغییر می‌دهیم، چگونه تغییر می‌کنند. ما در شکل ۴-۸ نتایج چهار سطح انرژی حداقل را آورده‌ایم. هرکدام از این چهار خط یکی از چهار سطح انرژی حداقل را نشان می‌دهد و ما تابع موج متناظرشان را در مقابلشان قرار داده‌ایم. سمت راست تصویر تابع موج را در حالتی نشان می‌دهد که چاه‌ها بسیار از هم دورند (همچنین شکل ۱-۸ را نگاه کنید). همان‌طور که انتظار داریم، تفاوت بین سطوح انرژی الکترون‌ها در هر چاه تقریباً غیرقابل‌تمایز است. هرقدر که چاه‌ها به هم نزدیک‌تر می‌شوند،

سطوح انرژی از هم جدا می‌شوند (توابع موج سمت چپ را با آن‌هایی که در شکل ۳-۸ وجود دارند مقایسه کنید). به طرز جالبی سطح انرژی مرتبط با تابع موج پادمتقارن افزایش یافته و سطح انرژی مربوط به تابع موج متقارن کاهش می‌یابد.

این اتفاق برای یک سیستم متشکل از دو پروتون و دو الکترون - یعنی دو اتم هیدروژن نتایج ژرفی دارد. به یاد آورید که در واقعیت دو الکترون به دلیل داشتن اسپین متفاوت



شکل ۳-۸: شبیه به شکل ۱-۸ با این تفاوت که چاه‌ها به هم نزدیک‌تر شده‌اند. "نفوذ" به محدوده بین دو چاه افزایش پیدا می‌کند. برخلاف شکل ۱-۸ ما همچنین توابع موجی را نشان داده‌ایم که متناظر با دو انرژی حداقل بعدی می‌باشند.



شکل ۴-۸: تغییرات انرژی‌های مجاز الکترون وقتی که فاصله بین دو چاه را تغییر می دهیم.

می‌توانند یک سطح انرژی را اشغال کنند. یعنی آن‌ها می‌توانند در سطح انرژی حداقل (متقارن) قرار داشته باشند و هرقدر که اتم‌ها را به هم نزدیک کنیم انرژی این سطح به میزان زیادی کاهش پیدا می‌کند. یعنی ازلحاظ انرژی، دو اتم

دورتر ترجیحشان بر این است که به هم نزدیک شوند و این چیزی است که واقعاً در طبیعت اتفاق می‌افتد[۱]: تابع موج متقارن، نسبت به تابع موج مربوط به اتم‌های دور، سیستمی را توصیف می‌کند که در آن الکترون‌ها به‌طور مساوی‌تری بین دو پروتون به اشتراک گذاشته شده‌اند؛ ازآنجایی‌که این "اشتراک‌گذاری" انرژی پایین‌تری دارد، اتم‌ها تمایل دارند کنار هم قرار گیرند. این جاذبه نهایتاً در جایی متوقف می‌شود، زیرا دو پروتون بار الکتریکی مثبت داشته و همدیگر را دفع می‌کنند (البته دافعه بین الکترون‌ها نیز وجود دارد چون بار موافق دارند)، اما این دافعه تنها در فواصل درون اتمی در حد کمتر از ۰/۱ نانومتر عمل می‌کند (در دمای اتاق). نتیجه این

[۱]. البته اگر پروتون ها با سرعت زیادی نسبت به هم حرکت نکنند.

است که یک جفت اتم هیدروژن ساکن، نهایتاً در کنار هم قرار می‌گیرند. این دو اتم هیدروژن هم آشیانه نامی دارند: مولکول هیدروژن.

ترجیح دو اتم برای چسبیدن به هم که ناشی از به اشتراک‌گذاری الکترون‌هایشان است پیوند کووالانسی[۱] نامیده می‌شود. اگر شما دوباره به تابع موج بالایی شکل ۳-۸ مراجعه کنید، پیوند کووالانسی مولکول هیدروژن، تقریباً چنین شکلی دارد. به یاد آورید که ارتفاع موج متناظر است با احتمال یافتن ذره در آن نقطه[۲]. در بالای هرکدام از چاه‌ها - یعنی در اطراف

[۱]. Covalent Bond

[۲]. این برای امواج ایستا صادق است که اندازه ساعت و تصویر عقربه در راستای ساعت ۱۲، با هم متناسبند.

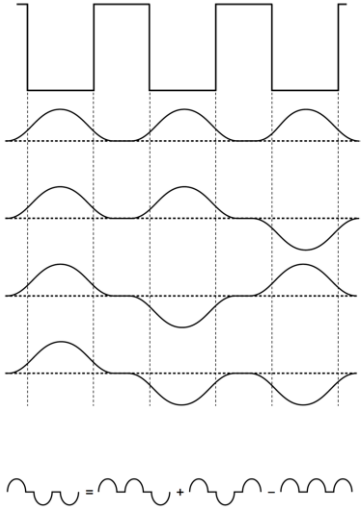
هر پروتون - قله‌ای وجود دارد که به ما می‌گوید احتمال بیشتری برای حضور هر الکترون در محدوده هرکدام از پروتون‌ها وجود دارد. اما هنوز احتمال قابل‌توجهی نیز وجود دارد که الکترون‌ها در محدوده بین پروتون‌ها پرسه بزنند. شیمیدان‌ها به "به اشتراک‌گذاری" الکترون‌ها، پیوند کووالانسی می‌گویند و این چیزی است که ما نیز می‌بینیم، حتی در مدلمان با دو چاه. علاوه بر مولکول هیدروژن، این تمایل اتم‌ها برای به اشتراک‌گذاری الکترون، چیزی بود که ما در صفحات ۱۴۱-۱۴۲ زمانی که درباره واکنش‌های شیمیایی صحبت می‌کردیم، مطرح کردیم.

این نتیجه‌گیری واقعاً ارضاکننده است. ما یاد گرفتیم که برای اتم‌های هیدروژن که از هم دورند، اختلاف ناچیز بین

وضعیت‌های حداقل انرژی تنها ارزش تحقیقاتی دارد، گرچه این را نیز نتیجه گرفتیم که هر الکترونی در جهان درباره تمامی الکترون‌های دیگر اطلاعات دارد که واقعاً شگفت‌انگیز است. از طرف دیگر، هرقدر پروتون‌ها به هم نزدیک‌تر شوند، دو وضعیت با سرعت زیادی از هم جدا می‌شوند و پایین‌ترین (کوچک‌ترین) آن‌ها، وضعیتی خواهد بود که مولکول هیدروژن را توصیف می‌کند و این اتفاق اهمیتی بیشتر از صرفاً تحقیقات علمی دارد، زیرا پیوند کووالانسی عاملی است که شما مجموعه‌ای از اتم‌های درهم‌وبرهم نباشید.

حال می‌توانیم از این ریسمان فکری بالاتر رفته و درباره این فکر کنیم که اگر بیش از دو اتم را به هم نزدیک کنیم، چه اتفاقی می‌افتد. سه بزرگ‌تر از دو است پس بیایید حرکت را

شروع کرده و پتانسیل سه چاهی همانند شکل ۵-۸ در نظر بگیریم. مانند همیشه فرض خواهیم کرد که هر چاه، نماینده یک اتم است. باید سه سطح انرژی حداقل وجود داشته باشد، اما با نگاه به تصویر ممکن است وسوسه شوید که حال ۴ سطح انرژی برای هر سطح از چاه تکی وجود دارد.



شکل ۵-۸: سیستم سه چاهی، که مدل ما برای نشان دادن سه اتم در یک راستا است و همچنین توابع موج حداقل ممکن. در پایین نشان دادیم که چگونه پایین‌ترین این چهار موج، می‌تواند توسط سایر امواج به دست آید.

چهار وضعیتی که در ذهن ماست، در شکل نشان داده شده‌اند و متناظر با تابع موج‌هایی هستند که به‌طور متفاوتی نسبت به مرکز دو دیوار، متقارن یا پادمتقارن‌اند[۱]. این شمارش باید اشتباه باشد، زیرا اگر درست می‌بود، می‌توانستیم ۴ فرمیون مشابه را درون این چهار وضعیت قرار دهیم و اصل پاولی را نقض کنیم. برای اینکه اصل پاولی نیز ارضا شود ما تنها به سه وضعیت انرژی نیاز داریم و البته این، چیزی است که اتفاق می‌افتد. برای اینکه بدانید چرا، این نکته را ذکر کنیم که شما همواره می‌توانید هرکدام از این ۴ تابع موجی که در

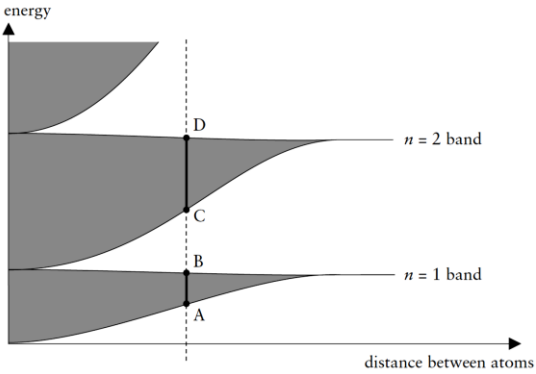
[۱]. ممکن است فکر کنید چهار تابع موج دیگری نیز وجود دارند که از سروته (معکوس) کردن توابعی که در شکل نشان داده شده اند، به دست می‌آیند، اما همان‌طور که گفتیم اینها معادل با همان‌هایی هستند که در شکل آمده‌اند.

شکل نشان داده شده‌اند را توسط ترکیبی از سه تای دیگر بسازید. در پایین تصویر، برای یک مورد خاص نحوه انجام کار آمده است؛ ما نشان داده‌ایم که آخرین تابع موج را چگونه می‌توان از جمع و تفریق کردن سایر توابع موج به دست آورد.

با شناسایی کردن سه وضعیت انرژی حداقل برای ذره‌ای که در یک پتانسیل سه چاهی نشسته است، می‌توان بپرسیم که در این مورد شکل ۴-۸ چگونه خواهد بود و البته نباید هم شگفت‌زده شویم اگر بفهمیم که نسبتاً مشابه با همان تصویر است، به‌جز این قسمت که چیزی که قبلاً یک جفت وضعیت مجاز انرژی بود، اینک به سه وضعیت مجاز تغییر می‌یابد.

بحث سه اتم کافی است – حال ما باید تمرکزمان را به‌سرعت به سمت زنجیره‌ای از اتم‌ها معطوف کنیم. این مطلب بسیار جالب است، زیرا ایده‌های کلیدی‌ای در خود دارد که ما را با اتفاقات درون مواد جامد آشنا می‌کند. اگر N چاه داشته باشیم (برای مدل‌سازی زنجیره‌ای از N اتم)، برای هر انرژی در چاه تکی، حال N انرژی وجود خواهد داشت. اگر N مثلاً به اندازه $۱۰^{۲۳}$ باشد، که یک عدد معمولی برای تعداد اتم‌های موجود در یک‌تکه ماده جامد است، [جداسازی و نشان دادن امواج برای] این عدد بسیار طاقت فرسا است. نتیجه این می‌شود که شکل ۴-۸ حال شبیه به شکل ۶-۸ می‌شود. خط نقطه‌چین عمودی نشان می‌دهد که برای اتم‌هایی که با فواصل متناظری از هم دورند، الکترون‌ها تنها می‌توانند

انرژی‌های مجاز خاصی داشته باشند. البته این شما را شگفت‌زده نمی‌کند (اگر غافلگیر شده‌اید، بهتر است کتاب را دوباره از اول بخوانید)، اما چیز جالب این است که انرژی‌های مجاز به‌طور "نواری" هستند. انرژی‌های A تا B مجازند، اما تا وقتی‌که به C برسیم هیچ انرژی‌ای مجاز نیست و دوباره انرژی‌های بین C تا D مجازند و به همین ترتیب.



شکل ۶-۸: نوارهای انرژی در قطعه‌ای از ماده جامد و نحوه تغییرات آن‌ها با توجه به فاصله بین اتم‌ها

ازآنجایی‌که اتم‌های زیادی در زنجیره وجود دارند، انرژی‌های مجاز زیادی درون این نوارها جای گرفته‌اند. آن‌قدر زیاد که برای یک جامد معمولی می‌توانیم فرض کنیم که انرژی‌های

مجاز، نواری پیوسته و هموار را می‌سازند. این ویژگیِ مدل ما در مواد جامد واقعی وجود دارد – الکترون‌های آن ماده واقعاً انرژی‌هایی دارند که به‌طور گروهی در کنار هم جمع می‌شوند و این عملکرد، تأثیر مهمی بر تفکر ما درباره آن ماده می‌گذارد. مثلاً این نوارها توضیح می‌دهند که چرا بعضی مواد (فلزات) رسانای الکتریکی هستند و بقیه (عایق‌ها) نیستند.

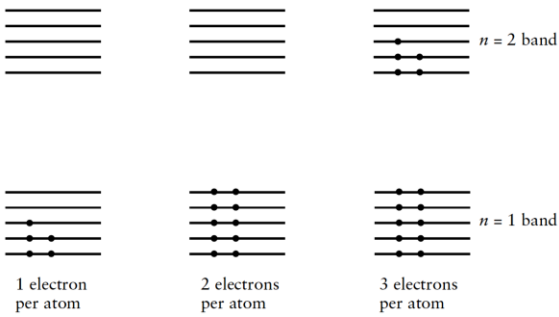
جداً چرا؟ بیایید با در نظر گرفتن یک زنجیره از اتم‌ها آغاز کنیم (که مانند همیشه با زنجیره‌ای از چاه‌ها مدل‌سازی خواهد شد)، اما فرض کنید که هر اتم الکترون‌های زیادی را به خود مقید کرده است. البته این مدل، متداول‌ترین حالت مواد است – تنها هیدروژن است که یک الکترون به دور یک پروتون دارد – و به همین ترتیب ما از بحث زنجیره‌ای از

اتم‌های هیدروژن خارج شده و به زنجیره اتم‌های سنگین خواهیم پرداخت. همچنین باید به یاد داشته باشیم که الکترون‌ها دو نوع هستند؛ اسپین بالا و اسپین پایین و اصل پاولی به ما می‌گوید که ما نمی‌توانیم بیش از دو الکترون را در یک سطح انرژی قرار دهیم. این یعنی برای زنجیره‌ای از اتم‌های که هرکدام یک الکترون دارند (یعنی هیدروژن)، نوار انرژی n=۱ نیمه‌پر است. این مطلب در شکل ۷-۸ نشان داده شده است که در آنجا ما سطوح انرژی را برای ۵ اتم رسم کرده‌ایم. این یعنی هر نوار دارای ۵ انرژی مجاز مجزا است. این ۵ وضعیت انرژی می‌توانند حداکثر ۱۰ الکترون را در خود جای دهند، اما ما تنها ۵ الکترون دم دست داریم، پس در ساختار انرژی حداقل، زنجیره اتم‌ها دارای ۵ الکترون خواهد

بود که نیمه پایینی نوار انرژی n=۱ را پر می‌کنند. اگر ما ۱۰۰ اتم در زنجیره داشتیم، نوار n=۱ می‌توانست ۲۰۰ الکترون در خود جای دهد، اما برای هیدروژن ما تنها ۱۰۰ الکترون داریم و دوباره بگوییم که نوار n=۱ در ساختار انرژی حداقل، نیمه‌پر است. شکل ۷-۸ همچنین نشان می‌دهد زمانی که ۲ الکترون در هر اتم داشته باشیم (هلیم)، چه اتفاقی می‌افتد و همچنین ۳ الکترون در هر اتم (لیتیوم). در مورد هلیوم، ساختار حداقل انرژی متناظر با نوار n=۱ پُر است، و در مورد لیتیوم نیز n=۱ پر و n=۲ نیمه‌پر است. باید واضح باشد که این الگوی پر و نیمه‌پر به صورتی ادامه می‌یابد که اتم‌هایی با تعداد الکترون‌های زوج همواره نوارهای پر دارند و اتم‌های با الکترون‌های فرد، نوارهای نیمه‌پر دارند. همان‌طور که به‌زودی

کشف خواهیم کرد، اینکه نواری پر باشد یا نباشد دلیلی است برای اینکه بعضی مواد رسانا هستند و بعضی عایق.

حال بیایید تصور کنید که دو انتهای زنجیره اتمی‌مان را به دو سر یک باتری وصل کنیم. بنا به تجربه می‌دانیم که اگر این اتم‌ها فلزی باشند، جریان الکتریکی در این زنجیره جاری خواهد شد. اما این گفته به چه معناست و خود را چگونه در اینجای داستان ما نشان می‌دهد؟ خوشبختانه عملکرد دقیق باتری بر روی اتم‌های سیم چیزی نیست که نیاز باشد بدانیم. تنها چیزی که باید بدانیم این است که اتصال به باتری، منبعی از انرژی را فراهم می‌آورد که می‌تواند ضربه‌ای کوچک به الکترون وارد کند و این ضربه همواره در یک‌جهت است.



شکل ۷-۸: نحوه پر شدن الکترون‌ها در پایین‌ترین وضعیت انرژی ممکن در زنجیره‌ای از ۵ اتم، وقتی‌که هر اتم شامل ۱، ۲ یا ۳ الکترون است. نقاط سیاه نشان‌دهنده الکترون‌ها هستند.

سؤال خوبی که می‌توان پرسید این است که باتری چگونه این کار را می‌کند؟ گفتن اینکه "باتری یک میدان الکتریکی درون سیم ایجاد می‌کند و میدان‌های الکتریکی، الکترون‌ها را

هل می‌دهند" کاملاً راضی‌کننده نیست، اما با توجه به مطالب این کتاب [که به‌طور خاص در مورد الکتریسیته نیست] بهتر است راضی‌کننده باشد. نهایتاً می‌توان دست به دامان قوانین الکترودینامیک کوانتومی شد و کل این مطلب را با استفاده از اندرکنش بین الکترون‌ها و پروتون‌ها توضیح داد. اما ما به بحث حاضر مطلب دیگری اضافه نکرده و به همین گفته‌هایمان بسنده می‌کنیم.

الکترونی را تصور کنید که در یکی از آن وضعیت‌های انرژی معین قرار گرفته است. ما با این فرض پیش می‌رویم که عملکرد باتری تنها می‌تواند ضربه کوچکی به الکترون وارد کند. اگر الکترون در وضعیت انرژی حداقل نشسته باشد و الکترون‌های زیادی نیز در نردبان انرژی بالا سرش قرار داشته

باشند (زمان شنیدن این جملات، تصاویر شکل ۷-۸ را تجسم کنید)، آن الکترون نمی‌تواند ضربه ناشی از باتری را به خود بگیرد. راه بسته است، زیرا وضعیت‌های انرژی بالاتر از آن پُرند. برای مثال، باتری ممکن است بتواند الکترون را به سطح انرژی‌ای چند پله بالاتر پرتاب کند، اما اگر تمامی پله‌های در دسترس همگی پر باشند، الکترون ما باید از دریافت انرژی انصراف دهد، زیرا جایی برای پرش نخواهد داشت. یادتان باشد که اصل طرد مانع رفتن الکترون به نقاطی می‌شود که پر شده‌اند. الکترون باید طوری وانمود کند که انگار اتصالی به باتری ندارد. این موقعیت برای الکترون‌هایی که در انرژی‌های بالاتر قرار دارند فرق می‌کند. آن‌ها به نقاط بالایی جمعیت نزدیک‌ترند و می‌توانند ضربه ناشی از باتری را به خود گرفته و

به سطح انرژی بالاتری بپَرند – البته به شرطی که در بالاترین نوار پُر قرار نداشته باشند. با بازگشت به تصویر ۷-۸ می‌بینیم که الکترون‌های دارای بیشتری انرژی، زمانی می‌توانند از باتری جذب انرژی کنند که اتم‌های موجود در زنجیره، تعداد الکترون‌های فرد داشته باشند. اگر تعداد الکترون‌هایشان زوج باشد، الکترون‌های پله آخر نمی‌توانند از جایشان تکان بخورند، زیرا اختلاف بسیار زیادی بین انرژی‌شان با پله‌های بعدی وجود دارد و به شرطی می‌توانند بپَرند که ضربه بزرگی بهشان وارد شود.

این یعنی اگر اتم‌های یک جسم خاصی تعداد الکترون‌های زوج داشت، آن الکترون‌ها طوری رفتار می‌کنند که انگار به باتری وصل نشده‌اند. جریانی در سیم اتفاق نمی‌افتد، زیرا

راهی برای جذب انرژی توسط الکترون‌ها وجود ندارد. در حقیقت این مطلب توصیف مواد عایق است. تنها راه برون‌رفت از این نتیجه‌گیری این است که فاصله بین بالاترین نوار انرژی پرشده و پایین‌ترین نوار خالی بعدی به اندازه کافی کوچک باشد – راجع به این مطلب به‌زودی بیشتر می‌گوییم. به‌طور برعکس اگر اتم‌ها تعداد فردی از الکترون‌ها را داشته باشند، الکترون‌های بالایی همواره برای دریافت ضربه از باتری آزادند. به‌عنوان نتیجه آن‌ها به سطح انرژی بالاتری می‌پرند و ازآنجایی‌که ضربه همواره در یک‌جهت است، اثر خالص به این صورت است که جریانی از این الکترون‌های متحرک ایجاد می‌شود و ما آن را به‌عنوان جریان الکتریکی می‌شناسیم. به‌سادگی می‌توان نتیجه گرفت که اگر جسمی از اتم‌هایی با

تعداد الکترون فرد تشکیل شده باشد، آن الکترون‌ها هادی الکتریسیته خواهند بود.

خوشبختانه دنیای واقعی به این سادگی نیست. الماس، جامدی کریستالی که تماماً از اتم‌های کربنی تشکیل شده که ۶ الکترون دارند، عایق است. از سوی دیگر گرافیت، که آن هم کربن خالص است، رسانا است. در حقیقت قانون تعداد زوج/فرد الکترون‌ها خیلی هم کاربردی نیست و علتش این است که مدل "چاه‌های پشت سر هم" بسیار ناقص است. مطلب کاملاً درست این است که رساناهای خوبِ الکتریسیته با این خاصیت شناسایی می‌شوند که پرانرژی‌ترین الکترون‌هایشان، فضا برای جهش به وضعیت‌های بالاتر انرژی داشته باشند، درحالی‌که عایق‌ها به این دلیل عایق‌اند که

بالاترین الکترون‌هایشان به خاطر فاصله زیادی که تا پله بعدی نردبان انرژی‌های مجاز دارند، به وضعیت‌های پرانرژی‌تر دسترسی ندارند.

این داستان پیچ دیگری دارد که وقتی در مورد جریان در نیمه‌رساناها در فصل بعد توضیح دادیم، به آن‌هم می‌رسیم. بیایید الکترونی را تصور کنیم که آزادانه در حال حرکت است و درون یک نواری نیمه‌پر از ماده کریستالی کاملی قرار دارد. به این دلیل کریستالی می‌گوییم چون می‌خواهیم اشاره‌کنیم که پیوندهای شیمیایی (احتمالاً کووالانسی) بین اتم‌هایش طوری رفتار کرده‌اند که اتم‌ها را در الگوی منظمی قرار دادند. مدل یک‌بعدی ما از ماده‌ای که کریستال است، به این شکل است که چاه‌ها هم‌اندازه بوده و فاصله‌شان یکسان باشد. یک

باتری وصل کنید تا باعث شوید میدان الکتریکی ضربه‌ای به یک الکترون وارد کند و آن الکترون با خوشحالی از یک سطح به سطح دیگر بپرد. در ادامه با جذب بیشتر انرژی توسط الکترون‌ها و افزایش سرعتشان، جریان الکتریکی به‌آرامی افزایش می‌یابد. برای کسی که اندکی با الکتریسیته آشنایی دارد، این جمله کمی عجیب است زیرا هیچ صحبتی از "قانون اُهم" در آن نشد که می‌گوید طبق رابطه $V=I\times R$ که در آن (V) ولتاژ اعمال‌شده و (R) مقاومت سیم است، (I) که نماد شدت‌جریان است، باید ثابت بماند. علت قانون اهم این است که الکترون‌هایی که به پله بالاتر می‌پرند، دوباره می‌توانند با از دست دادن انرژی به پله پایین بپرند – این اتفاق زمانی می‌افتد که شبکه اتم‌ها کاملاً منظم نباشد یا مثلاً ناخالصی‌ای

درون شبکه باشد (یعنی اتم‌های نافرمان که متفاوت از اکثرشان باشند) یا اینکه اتم‌ها جنب‌وجوش زیادی داشته باشند که البته در تمامی دماهای غیر صفر [کلوین]، چنین اتفاقی جریان دارد. نتیجه به این صورت می‌شود که الکترون‌ها اکثر زمانشان را در حال بازی میکروسکوپیک مارپله هستند و دائماً پله‌ها را بالا رفته و دوباره به دلیل اندرکنششان با شبکه ناخالص اتمی پایین می‌آیند. اثر میانگین این اتفاق به این صورت است که یک انرژی الکترونی معمولی تولید شده و باعث ثابت شدن جریان می‌شود. این انرژی الکترونی معمولی تعیین می‌کند که الکترون‌ها با چه سرعتی می‌توانند درون سیم جریان داشته باشند و این چیزی است که شدت‌جریان

نام دارد. مقاومت سیم در حقیقت نمادی از ناخالصی شبکه اتم‌هایی است که الکترون‌ها از درون آن حرکت می‌کنند.

اما پیچ ما اینجا نیست. حتی بدون قانون اهم، شدت‌جریان به‌طور مداوم افزایش پیدا نمی‌کند. زمانی که الکترون‌ها به بالای یک نوار می‌رسند، در حقیقت رفتار بسیار عجیبی دارند، و اثر نهایی این رفتار خود را به‌صورت کاهش جریان و نهایتاً برعکس کردن آن نشان می‌دهد. خیلی عجیب است: گرچه میدان الکتریکی به الکترون‌ها در یک راستا ضربه وارد می‌کند، زمانی که آن‌ها به بالای نوار می‌رسند، جهتشان را عوض می‌کنند. توضیح این اثر عجیب، فراتر از مباحث این کتاب است، و ما تنها می‌گوییم که هسته اتم‌ها که بار الکتریکی مثبت دارد عامل این اتفاق است.

خب حال توضیح می‌دهیم زمانی که فاصله بین آخرین نوار پر و نوار خالی بعدی "به اندازه کافی کوچک باشد" چه طور می‌شود که جسمی که باید عایق می‌بود مانند رسانا رفتار می‌کند. در این مقطع می‌ارزد که یک سری اصطلاحات را تعریف کنیم. آخرین نوار انرژی‌ها (بالاترین انرژی) که کاملاً پر باشد را "نوار ظرفیت[۱]" می‌گویند و نوار بعدی (چه پر باشد چه نیمه‌پر)، "نوار رسانش[۲]" نام دارد. اگر نوارهای رسانش و ظرفیت روی‌هم بی افتند (که یکی از اتفاقات ممکن است)، فاصله‌ای بین آن‌ها وجود نداشته و ماده‌ای که باید عایق می‌بود، مانند رسانا رفتار می‌کند. اگر فاصله وجود داشته باشد،

[۱] . Valence Band

[۲] . Conduction Band

اما "به اندازه کافی کوچک باشد" چه؟ ما ذکر کردیم که الکترون‌ها می‌توانند از باتری انرژی دریافت کنند، پس می‌توانیم فرض کنیم اگر باتری پرتوان باشد، می‌تواند ضربه‌ای وارد کند که الکترون بالایی نوار ظرفیت را به نوار رسانش پرتاب کند. این مطلب امکان‌پذیر است اما زیاد برای ما مهم نیست زیرا باتری‌های معمولی نمی‌توانند چنین ضربه‌ای وارد کنند. مثلاً به زبان اعداد این‌گونه است که میدان الکتریکی درون یک جامد معمولاً در حد چند ولت بر متر است اما ما نیاز به میدان‌هایی به شدت چند ولت بر نانومتر داریم (یعنی یک میلیارد بار بیشتر) تا بتوانیم ضربه‌ای به یک الکترون وارد کرده تا از الکترون‌ولت[۱] بپرد، یا در یک عایق معمولی از نوار

[۱]. الکترون ولت واحد بسیار مناسبی از انرژی برای بحث الکترون‌های درون

ظرفیت به نوار رسانش بپرد. جالب‌تر از آن ضربه‌ای است که یک الکترون می‌تواند از اتم‌هایی که ماده را ساخته‌اند بپذیرد. آن‌ها به‌طور ساکن یکجا ننشسته‌اند و اندکی جنب‌وجوش دارند – هرقدر ماده گرم‌تر باشد اتم‌هایش جنب‌وجوش بیشتری دارند و یک اتم جنبنده انرژی بسیار بیشتری را نسبت به باتری‌های معمولی به الکترون وارد می‌کند؛ به‌قدری کافی که می‌تواند باعث جهش الکترون‌ها به اندازه چند

اتم‌هاست و به کرّات در فیزیک هسته‌ای و فیزیک ذرات به کار برده می‌شود. اگر الکترونی را در اختلاف پتانسیل ۱ ولت شتاب دهیم، مقدار انرژی‌ای که کسب می‌کند برابر با یک الکترون ولت است. خود تعریف مهم نیست، بلکه مطلب مهم این است که این کار، راهی است برای کوانتیزه کردن انرژی. برای اینکه از مقدار این انرژی درکی داشته باشید، انرژی‌ای که لازم است تا یک الکترون را به طور کامل از حالت پایه‌اش در اتم هیدروژن بیرون بکشیم برابر با ۱۳/۶ الکترون ولت است.

الکترون‌ولت شود. در دمای اتاق بسیار نادر است که بتوان چنان ضربه‌ای به الکترون وارد کرد، زیرا در دمای ۲۰ درجه (سانتی‌گراد) انرژی‌های گرمایی در حد $\frac{۱}{۴۰}$ الکترون‌ولت هستند. البته این عدد میانگین بود و ازآنجایی‌که یک جامد اتم‌های بسیار زیادی دارد، هر از چند گاهی این اتفاق می‌افتد. زمانی که افتاد، الکترون‌های می‌توانند از زندان نوار ظرفیتشان به نوار رسانش بپرند و در این حالت اگر باتری‌ای وجود داشته باشد، با گرفتن ضربه‌ای از آن شروع به جریان الکتریکی می‌کنند.

موادی که تعداد الکترون‌های به میزان کافی از آن‌ها در دمای اتاق به همین شیوه از لایه ظرفیت به لایه رسانش می‌پرند نام مخصوص خود را دارند: به آن‌ها نیمه‌رسانا

می‌گویند. در دمای اتاق آن‌ها می‌توانند جریان الکتریکی را حمل کنند اما هرقدر که خنک‌تر شوند و اتم‌هایشان از جنب‌وجوش بی افتند، توانایی‌شان برای رسانایی کاهش‌یافته و به سمت عایق بودن پیش می‌روند. سیلیکون و ژرمانیوم دو مثال کلاسیک از مواد نیمه‌رسانا هستند و به دلیل طبیعت دوگانه‌شان، می‌توان از آن‌ها استفاده‌های بسیار مفیدی کرد. در حقیقت اغراق نمی‌کنیم اگر بگوییم کاربردهای تکنولوژیکی مواد نیمه‌رسانا، جهان را دگرگون کرده است.

فصل نهم

دنیای مدرن

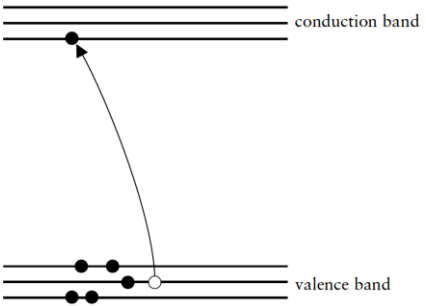
در سال ۱۹۴۷ اولین ترانزیستور جهان ساخته شد. امروزه تولیدکنندگان محصولات الکترونیکی در هرسال بیش از ۱۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰ عدد از این قطعه را تولید می‌کنند که ۱۰۰ برابر بیشتر از تعداد دانه‌های برنج مصرفی یک سال جمعیت ۷ میلیارد نفری دنیاست. اولین کامپیوتر ترانزیستوری دنیا در سال ۱۹۵۳ در منچستر ساخته شد و ۹۲ عدد از این قطعه در خود داشت. امروزه می‌توانید صدها هزار

ترانزیستور را به قیمت یک‌دانه برنج بخرید و حدوداً ۱ میلیارد عدد از آن‌ها درون موبایل شما وجود دارد. در این فصل ما توضیح خواهیم داد که ترانزیستور چگونه کار می‌کند که واقعاً مهم‌ترین کاربرد نظریه کوانتوم است.

همان‌طور که در فصل قبل دیدیم، رسانا به این دلیل رساناست که بعضی الکترون‌هایش در نوار رسانش نشسته‌اند. درنتیجه آن‌ها کاملاً حرکت پذیر بوده و زمانی که سیم به باتری وصل شود می‌توانند جریان یابند. تشبیه این جریان به جریان آب، تشبیه مناسبی است؛ باتری باعث جاری شدن جریان الکتریکی می‌شود. ما همچنین می‌توانیم برای فهم این ایده از "پتانسیل" استفاده کنیم، زیرا باتری پتانسیلی تولید می‌کند که الکترون‌های متحرک تحت تأثیر آن جاری

می‌شوند و پتانسیل به‌نوعی نقش سرپایینی را دارد. پس الکترونی که در نوار رسانش ماده قرار دارد، تحت تأثیر این پتانسیلی که ایجاد شده به پایین قِل می‌خورد و در طی این فرایند، انرژی جذب می‌کند. این هم نوع دیگری از تفکر درباره ضربه‌های کوچکی است که در فصل قبل صحبتش را کردیم – به‌جای اینکه تصور کنیم باتری ضربات کوچکی وارد می‌کند که الکترون‌ها در طول سیم شتاب بگیرند، این تصور کلاسیک را در نظر می‌گیریم که انگار آب در دامنه کوهی جاری می‌شود. این راه خوبی برای تصور کردن جریان الکتریسیته ناشی از الکترون‌هاست و ما در طول این فصل، از این روش بهره خواهیم گرفت.

در ماده‌ای نیمه‌رسانا مثل سیلیکون اتفاق جالبی می‌افتد، زیرا جریان نه‌تنها توسط الکترون‌ها در نوار رسانش حمل می‌شود، بلکه الکترون‌های نوار ظرفیت نیز در حمل جریان سهیم هستند.



شکل ۱-۹: جفت الکترون–حفره در یک نیمه‌رسانا

برای فهم این مطلب به شکل ۱-۹ نظری بی افکنید. بردار، الکترونی را نشان می‌دهد که در ابتدا در نوار ظرفیت به‌طور ساکن نشسته بود و حال انرژی جذب کرده و خود را به نوار رسانش می‌اندازد. مطمئناً این الکترون جهش‌یافته اکنون توانایی حرکت بیشتری دارد اما چیز دیگری نیز متحرک است – حال یک حفره[۱] در نوار ظرفیت ایجاد شده است و این حفره می‌تواند برای سایر الکترون‌های ساکن در نوار ظرفیت اندکی توانایی تحرک ایجاد کند. همان‌طور که دیده‌ایم، اتصال باتری به این نیمه‌رسانا باعث می‌شود تا الکترون‌های نوار رسانش انرژی جذب کرده و جریان الکتریکی را جاری کنند. چه اتفاق برای آن حفره می‌افتد؟ میدان الکتریکی‌ای که

[۱]. Hole

توسط باتری ایجاد شده می‌تواند الکترونی را از وضعیت انرژی پایین‌تری در نوار ظرفیت، به آن حفره خالی بی اندازد. این حفره پر می‌شود، اما حفره جدیدی در قسمت‌های پایین‌تر نوار ظرفیت ایجاد می‌شود. زمانی که الکترون‌های نوار ظرفیت به حفره خالی می‌پرند، حفره نیز جابجا می‌شود.

به‌جای اینکه به دنبال ردیابی حرکت الکترون‌های نوار ظرفیت تقریباً پر باشیم، می‌توانیم مکان حفره را ردیابی کرده و الکترون‌ها را فراموش کنیم. این روش که شبیه به جابجایی کتاب‌ها در قفسه کتابخانه است، روش معمول برای کسانی است که در حوزه فیزیک نیمه‌رساناها کار می‌کنند و واقعاً تفکر بدین‌صورت کار ما را نیز ساده‌تر می‌سازد.

یک میدان الکتریکی اعمال‌شده، الکترون‌های نوار رسانش را تحریک کرده و تولید جریان می‌کند و ما دوست داریم بدانیم چه اتفاقی برای حفره‌های نوار ظرفیت می‌افتد. می‌دانیم که الکترون‌های نوار ظرفیت نمی‌توانند آزادانه حرکت کنند چون مقید به اصل پاولی هستند، اما می‌توانند تحت تأثیر میدان الکتریکی و همچنین حفره‌ای که به‌موازات آن‌ها حرکت می‌کند، جابجا شوند. این گفته اندکی غیرمعمول به نظر می‌رسد که زمانی که الکترون‌ها در نوار ظرفیت به سمت چپ می‌پرند، حفره نیز به سمت چپ حرکت می‌کند و اگر شما در فهم آن مشکل دارید این مثال می‌تواند کمکتان کند. مردمی را تصور کنید که درون یک صف هرکدام به فاصله یک متر از همدیگر ایستاده‌اند، به‌استثنای مکان یک نفر در میانه صف که

خالی است. مردم مشابه با الکترون‌ها هستند و آن مکان خالی متناظر با حفره. حال تصور کنید همگی آن‌ها یک گام به‌اندازه یک متر به جلو برداشته و جای نفر جلویی خود بایستند. خب به‌وضوح آن مکان خالی نیز ۱ متر به سمت جلو منتقل می‌شود که همین اتفاق نیز برای حفره می‌افتد. همچنین می‌توان جریان آب درون یک لوله را در نظر گرفت – حباب کوچکی که درون آب قرار دارد، هم‌جهت با آب به سمت جلو می‌رود و این "فضای بدون آب" مشابه با حفره درون نوار ظرفیت است.

حتی اگر بر این مشکل تصوراتی نیز فائق شویم، یک پیچیدگی مهمی نیز اضافه خواهد شد؛ در انتهای فصل قبل صحبت از "پیچی" در مسیرمان کردیم و اکنون وقتش است

آن قسمت از فیزیک را مطرح کنیم. اگر یادتان باشد، ما گفتیم الکترون‌هایی که نزدیک به سطح بالایی نوار قرار دارند، ناشی از یک میدان الکتریکی، در خلاف جهت الکترون‌های متحرک در پایین نوار، حرکت می‌کنند. این یعنی حفره‌هایی که در بالای نوار قرار دارند نیز در خلاف جهت الکترون‌های پایین نوار حرکت می‌کنند.

منظور اصلی ما این است که می‌توان جریانی از الکترون‌ها را تصور کرد که در یک‌جهت بوده و جریان متناظری از حفره‌ها را در جهت برعکس. می‌توان تصور کرد که حفره نیز دارای بار الکتریکی است اما بار مخالف با الکترون. برای فهم این مطلب یادتان باشد ماده‌ای که الکترون‌ها و حفره‌ها درون آن در جریان هستند به‌طور متوسط ازلحاظ الکتریکی خنثی است.

در یک محدوده معمولی، بار خالصی وجود ندارد زیرا بار منفی الکترون‌ها توسط بار مثبت هسته اتم خنثی می‌شود. اما اگر ما با تحریک یک الکترون و پراندن آن از نوار ظرفیت به نوار رسانش، یک جفت الکترون-حفره به وجود آوریم (همان‌طور که توضیحش را دادیم) ، الکترونی آزاد در حال پرسه زدن وجود خواهد داشت که باعث می‌شود نسبت به حالت خنثای آن محدوده از ماده، بار منفی اضافی‌ای ایجاد شود. مشابه باهمین، حفره نیز مکانی است که الکترونی در آن وجود ندارد و محدوده اطراف آن بار اضافی مثبت دارد. جریان الکتریکی به این صورت تعریف می‌شود: سرعتی که بار الکتریکی مثبت در جریان است[۱]. الکترون‌ها به‌طور منفی سهیم در جریان هستند

[۱]. این تعریف، قراردادی است و ناشی از یک کنجکاوی تاریخی است. ما

و حفره‌ها – اگر هم‌جهت با الکترون‌ها باشند – به‌طور مثبت سهم خود را در جریان ایفا می‌کنند. حال اگر مانند نیمه‌رساناهای ما، الکترون‌ها و حفره‌ها در جهت‌های معکوس حرکت کنند، باهم جمع شده و جریان خالص بزرگ‌تری را می‌سازند.

گرچه مطالبی که مطرح شد کمی پیچیده است، اثر نهایی کاملاً مشخص است: ما باید جریان الکتریسیته درون یک ماده نیمه‌رسانا را به‌عنوان جریان بار الکتریکی تصور کنیم که این جریان می‌تواند از الکترون‌های نوار رسانش تشکیل شود که در یک‌جهت حرکت می‌کند و همچنین حرکت حفره‌های نوار

می‌توانیم جریان را در جهت حرکت الکترون‌های نوار رسانش تعریف کنیم.

ظرفیت که در جهت مخالف حرکت می‌کنند.این مطلب با جریان درون رساناها متفاوت است که در آن، جریان به به‌طور عمده توسط حرکت تعداد زیادی از الکترون‌ها در نوار رسانش اتفاق می‌افتد و جریان اضافی ناشی از جفت الکترون-حفره قابل‌اغماض است.

زمانی کاربرد نیمه‌رساناها را خواهید دانست که بفهمیم جریانی که درون نیمه‌رسانا وجود دارد برخلاف رساناها، مانند سیلی از الکترون‌ها نیست که نتوان کنترلشان کرد. در عوض این جریان شامل ترکیب مناسبی از الکترون‌ها و حفره‌هاست که با اندکی مهندسی هوشمندانه می‌توان از این ترکیب استفاده کرده، قطعات کوچکی بسازیم و به‌طور دقیق این جریان را درون یک مدار کنترل کنیم.

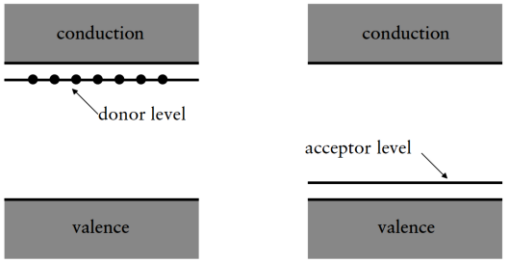
مطلبی که در ادامه می‌آید یکی از مثال‌های زیبای فیزیک کاربردی و مهندسی است. ایده به این شکل است که یک قطعه خالص از سیلیکون یا ژرمانیوم را ناخالص کنیم تا بتوانیم سطوح انرژی جدیدی برای الکترون‌ها ایجاد کنیم. این سطوح جدید به ما اجازه می‌دهند که جریان الکترون‌ها و حفره‌ها را درون نیمه‌رسانا کنترل کنیم، دقیقاً مثل زمانی که جریان آب درون یک شبکه از لوله‌ها را با استفاده از شیرهای مختلف کنترل می‌کنیم. البته قبلاً هم می‌شد جریان الکتریسیته درون یک سیم را کنترل کرد – اتصال را قطع کنید. اما منظور ما از کنترل، قطع اتصال نیست بلکه ما از کلیدهایی صحبت می‌کنیم که جریان را به‌طور دینامیک (پویا) درون سیستم کنترل می‌کنند. این کلیدهای کوچک، عناصر سازنده

دروازه‌های منطقی[۱] هستند و دروازه‌های منطقی، عناصر سازنده میکروپروسسورها[۲]. خب این سیستم چگونه کار می‌کند؟

قسمت چپ شکل ۲-۹ نشان می‌دهد زمانی که یک‌تکه سیلیکون را با فسفر مخلوط کنیم چه اتفاقی می‌افتد. شدت این آلودگی (مخلوط شدگی یا غلظت) را می‌توان به‌دقت کنترل کرد و

[۱] . Logic Gate

[۲] . Microprocessor



شکل ۲-۹: سطوح انرژی جدید که در نیمه‌رسانای نوع n ایجاد شده‌اند (سمت چپ) و نیمه‌رسانای نوع p (سمت راست)

این مطلب بسیار مهم است. فرض کنید گاهی اوقات از درون بلوری از سیلیکون خالص، یک اتم برداشته شده و به‌جای آن اتم فسفر قرار گیرد. اتم فسفر به‌خوبی درون جای خالی که توسط اتم سیلیکون ایجاد شده، جای می‌گیرد و تنها تفاوت امر این است که فسفر یک الکترون بیشتر از سیلیکون دارد.

این الکترون اضافی، پیوند ضعیفی به اتم میزبانش دارد، اما کاملاً هم آزاد نیست و برای خود سطح انرژی‌ای را اشغال می‌کند که دقیقاً زیر نوار رسانش قرار دارد. در دماهای پایین نوار رسانش خالی است و الکترون‌های اضافی که توسط فسفر اهدا شده‌اند، درون همان سطح اهداکننده[۱] باقی می‌مانند که در شکل دیده می‌شود. در دمای اتاق به وجود آمدن جفت الکترون-حفره بسیار نادر است و حدوداً از هر یک تریلیون الکترون، یکی می‌تواند از ارتعاشات گرمایی شبکه اتم‌ها انرژی کسب کرده و از نوار ظرفیت به نوار رسانش بپرد. در مقابل چون الکترون اهداییِ فسفر پیوند ضعیفی با میزبانش دارد، بسیار محتمل است که جهش کوچکی از سطح اهداکننده به

[۱] . Donor Level

نوار رسانش داشته باشد. پس در دمای اتاق برای نسبت غلظت‌های بیشتر از یک اتم فسفر در یک تریلیون اتم سیلیکون، نوار رسانش حضور الکترون‌های اهداشده از اتم‌های فسفر را در خود احساس می‌کند. این یعنی می‌توان به‌سادگی با تغییر غلظت فسفر، تعداد الکترون‌های متحرکی که در نوار رسانش قرار دارند را به‌دقت کنترل کرد. ازآنجایی‌که این الکترون‌ها هستند که با حرکتشان در نوار رسانش جریان را منتقل می‌کنند، به این سیلیکون آلوده‌شده "نوع n" می‌گوییم (n به معنی بار منفی).

قسمت راست شکل ۲-۹ نشان می‌دهد که اگر به‌جای اتم‌های فسفر از اتم‌های آلومینیوم استفاده کنیم چه اتفاقی می‌افتد. این بار هم اتم‌های آلومینیوم به میزان اندکی مابین

اتم‌های سیلیکون قرار می‌گیرند و آن‌ها نیز می‌توانند به‌خوبی خود را درون فضاهای خالی‌شده، جای دهند. تفاوت در اینجاست که آلومینیوم یک الکترون کمتر از سیلیکون دارد. این قضیه، حفره‌هایی را به بلور خالص ما معرفی می‌کند، دقیقاً مثل فسفر که الکترون اضافه کرده بود. حفره‌ها در محدوده اتم‌های آلومینیوم قرار دارند و می‌توانند الکترون‌هایی که از نوار ظرفیت اتم‌های سیلیکون مجاور پریده‌اند، در خود جای دهند. سطح پذیرندهٔ[۱] "حفره پرشده" در شکل نشان داده شده است و این سطح اندکی بالاتر از نوار ظرفیت قرار دارد، زیرا برای الکترون‌های نوار ظرفیت در سیلیکون ساده‌تر است که به حفره‌های ایجادشده توسط اتم‌های آلومینیوم

[۱] . Acceptor Level

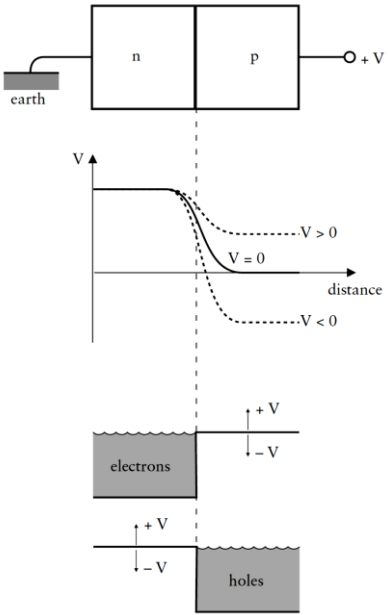
جهش کنند. در این حالت به‌سادگی می‌توانیم جریان الکتریکی به وجود آمده را ناشی از انتشار حفره‌ها بدانیم و به همین دلیل، این نوع از سیلیکون آلوده را "نوع p" می‌نامند (p به دلیل بار مثبت). مشابه به قبل، در دمای اتاق نیازی نیست که میزان غلظت آلومینیوم خیلی بیشتر از ۱ در یک تریلیون باشد زیرا در همین حد هم حرکت حفره‌های آلومینیوم حاکم می‌شود.

تا اینجا ما به‌سادگی توضیح دادیم که می‌توان تکه‌ای سیلیکون درست کرد که بتواند جریان را انتقال دهد؛ چه با استفاده از الکترون‌های اهدایی فسفر که در نوار رسانش جابجا می‌شوند، چه با حفره‌های اهدایی آلومینیوم که در مدار ظرفیت حرکت می‌کنند. خب که چه؟

شکل ۳-۹ هدف ما را به تصویر کشیده است، زیرا نشان می‌دهد اگر ما دو قطعه سیلیکون یکی از نوع n و دیگری از نوع p را به هم بچسبانیم چه اتفاقی می‌افتد. در ابتدا محدوده نوع n لبریز از الکترون‌های فسفر است و محدوده نوع p نیز مملو از حفره‌های آلومینیوم است. درنتیجه الکترون‌های محدوده نوع n به سمت محدوده نوع p رفته و حفره‌های محدوده p به سمت محدوده n می‌روند. فعلاً که این حرف‌ها نکته خاصی ندارند؛ الکترون‌ها و حفره‌ها شروع به جابجایی بین دو ماده از میان محل اتصال[۱] (گره) می‌کنند، دقیقاً مثل یک قطره جوهر که در یک تشت آب پخش می‌شود. اما در طی جابجایی الکترون‌ها و حفره‌ها در جهت‌های مخالف، در

[۱]. Junction

محدوده نوع n بار الکتریکی خالص مثبت، و در محدوده نوع p بار الکتریکی خالص منفی به‌جای می‌ماند. این ساختار بارهای الکتریکی به دلیل قانون "دافعه بارهای همنام" در مقابل مهاجرت الکترون‌ها و حفره‌ها مقاومت نشان می‌دهد و نهایتاً سیستم به تعادل رسیده و مهاجرت دیگری اتفاق نمی‌افتد.



شکل ۳-۹: گِرِهی که از اتصال دو قطعه سیلیکون نوع n و نوع p تشکیل شده است.

دومین تصویر از سه تصویر شکل ۳-۹ نشان می‌دهد که چگونه می‌توان به زبان پتانسیل درباره این واقعه فکر کرد. در این شکل نحوه تغییر پتانسیل در عرض این گره نشان داده شده است. در عمق محدوده نوع n اثرات گرهی مهم نیست و ازآنجاکه گره به وضعیت تعادل رسیده است، هیچ جریانی اتفاق نمی‌افتد. یعنی پتانسیل درون این محدوده ثابت است. قبل از اینکه از این بحث بگذریم، یک‌بار دیگر باید توضیح دهیم که پتانسیل به چه کار ما می‌آید: پتانسیل به ما می‌گوید که چه نیروهایی به الکترون‌ها و حفره‌ها وارد می‌شوند. اگر پتانسیل صاف باشد، مثل توپی که بدون حرکت در یک سطح صاف قرار گرفته، الکترون نیز حرکت نخواهد کرد.

اگر پتانسیل دارای سرازیری باشد، ممکن است تصور کنیم الکترونی که در آن محدوده قرار دارد به داخل "سرازیر" می‌شود. اما به‌طور برعکس، قراردادی که دراین‌باره وجود دارد به این صورت است که پتانسیل "سرازیر مانند" برای الکترون نقش "تپه" را دارد؛ یعنی الکترون به بالای تپه می‌رود. به‌عبارت‌دیگر یک پتانسیل سرازیری، نقش دیوار را برای الکترون ایفا می‌کند و این چیزی است که ما در تصویر کشیده‌ایم. درنتیجهٔ جمع شدن بار منفی که ناشی از مهاجرت الکترون‌های قبلی بود، نیرویی باعث می‌شود که الکترون از محدوده نوع p دور شود. این نیرو ادامه مهاجرت الکترون‌ها از سیلیکون نوع n به نوع p را متوقف می‌کند. استفاده از پتانسیل‌های سرازیری برای نشان دادن حرکت تپه‌ای برای

الکترون آن‌قدرها هم که به نظر می‌آید احمقانه نیست، زیرا از دیدگاه حفره‌ها مطالب مطرح‌شده با معنی به نظر می‌آیند؛ یعنی حفره‌ها به‌طور طبیعی به داخل گودال سرازیر می‌شوند. حال همچنین می‌توانیم ببینیم، طریقه‌ای که ما پتانسیل را رسم کرده‌ایم (که از سطح مرتفع‌تر در سمت چپ به سطح پایین‌تری در راست می‌رود) نیز به‌درستی این واقعیت را نشان می‌دهد که به دلیل پله پتانسیلی که وجود دارد، حفره‌ها از فرار از محدوده نوع p منع می‌شوند.

تصویر سوم در این شکل مثال جریان آب را نشان می‌دهد. الکترون‌های سمت چپ آماده و نیز مشتاق‌اند که به درون سیم بریزند اما توسط دیواری از این کار منع می‌شوند. به همین ترتیب حفره‌های درون محدوده نوع p در طرف اشتباه

دیوار به دام افتاده‌اند؛ دیوار مقابل با آب و پله پتانسیلی دو روش مختلف برای بیان یک مطلب واحد هستند. زمانی هم که یک قطعه سیلیکون نوع p را با نوع n به هم متصل می‌کنیم، چنین اتفاقی می‌افتد. درواقع عمل اتصال این دو به یکدیگر نیاز به‌دقت بیشتر از چیزی دارد که ما بیان می‌کنیم – چسباندن این دو به‌سادگی صورت نمی‌گیرد، زیرا در آن صورت محل اتصال (گره) به الکترون‌ها و حفره‌ها اجازه نخواهد داد که به‌سادگی از یک محدوده به محدوده دیگر بروند.

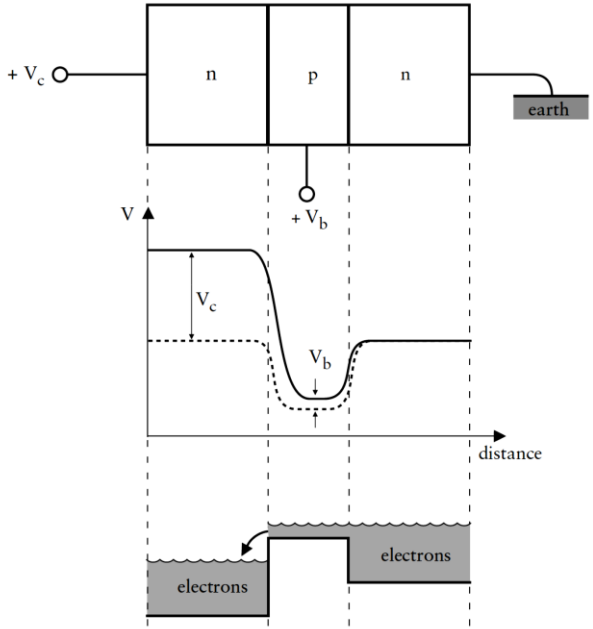
اتفاقات جالب زمانی شروع به رخ دادن می‌کنند که ما این "گره pn" را به باتری وصل کنیم تا به ما اجازه دهد مانع پتانسیلی بین محدوده‌های n و p را بالا و پایین کنیم. اگر ما

پتانسیل محدوده p را پایین بیاوریم، شیب (ارتفاع) پله را بیشتر کرده‌ایم و کار را بر الکترون‌ها و حفره‌ها برای عبور از گره سخت‌تر کرده‌ایم. اما افزایش پتانسیل محدوده نوع p (یا پایین آوردن پتانسیل محدوده نوع n) شبیه به پایین آوردن سدی می‌ماند که جلوی آب را گرفته. الکترون‌ها به‌سرعت از نوع n به نوع p جاری می‌شوند و حفره‌ها نیز در جهت برعکس حرکت می‌کنند. در این حالت گره pn را می‌تواند به‌عنوان دیود[۱] استفاده کرد – این قطعه اجازه عبور جریان را می‌دهد، اما فقط در یک‌جهت. البته دیودها مقصد نهایی بحث نیستند.

---

۱. Diod

شکل ۴-۹ تصویری از قطعه‌ای است که جهان را دگرگون کرد – ترانزیستور. در تصویر نشان داده شده است که اگر ما با قرار دادن یک لایه سیلیکون نوع p بین دو لایه نوع n به‌اصطلاح ساندویچ درست کنیم، چه اتفاقی می‌افتد. توضیحاتی که ما درباره دیود دادیم در اینجا به کمکمان می‌آید زیرا اساساً نحوه عملکردشان یکسان است. الکترون‌ها از محدوده نوع n به محدوده نوع p می‌روند و حفره‌ها نیز جهت معکوس را طی می‌کنند تا جایی که این جابجایی‌ها توسط پله‌های پتانسیل در گره بین لایه‌ها متوقف شوند. به‌طور مجزا شبیه به این است که دو مخزن الکترون توسط مانعی از هم جدا شده‌اند و یک مخزن سرشار از حفره‌ها در بین این دو قرار دارد.

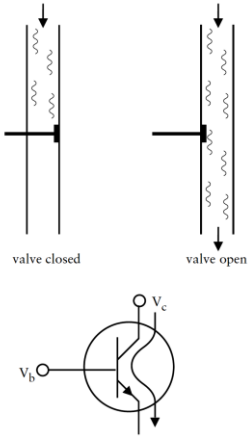


شکل ۴-۹ : یک ترانزیستور

نکته جالب مربوط به زمانی می‌شود که ما ولتاژی را از یک سمت به محدوده نوع p و از سمت دیگر به محدوده نوع n در وسط وارد کنیم. اعمال ولتاژ مثبت باعث می‌شود که سطح صاف سمت چپ شروع به خیزش کند (به میزان V_c) و همین اتفاق برای سطح صاف محدوده نوع p نیز می‌افتد (به میزان V_b). ما این مطلب را با خط پیوسته که در شکل وسطی رسم شده نشان داده‌ایم. چیدن پتانسیل‌ها به این صورت اثر جالبی دارد، زیرا آبشاری از الکترون‌ها می‌سازد که از روی مانع کوتاه وسطی به سمت محدوده n در سمت چپ جریان می‌یابند. (به یاد داشته باشید که الکترون‌ها به سمت بالای سراشیبی حرکت می‌کنند). اگر V_c از V_b بزرگ‌تر باشد جریان الکترون‌ها یک‌طرفه خواهد بود و الکترون‌های سمت چپ

نمی‌توانند از میان محدوده نوع p جریان یابند. شاید این مطلب بی‌فایده به نظر آید اما در حقیقت ما یک سوپاپ الکترونیک (شیر الکترونیک) را برایتان توضیح دادیم. با اعمال ولتاژ به محدوده نوع p ما می‌توانیم جریان الکترون‌ها را قطع و وصل کنیم.

حال قسمت پایانی – ما آماده‌ایم تا توانایی اصلی این ترانزیستورهای زبان‌بسته را درک کنیم. در شکل ۵-۹ ما عملکرد ترانزیستورهای را بار دیگر با استفاده از جریان آب نشان دادیم.



شکل ۵-۹: تشبیه ترانزیستور به لوله آب

حالت "شیر بسته" کاملاً مشابه با زمانی است که هیچ ولتاژی به محدوده نوع p وارد نشود. اعمال ولتاژ شبیه به این است که شیر را باز کنیم. ما همچنین زیر دو لوله نمادی را که

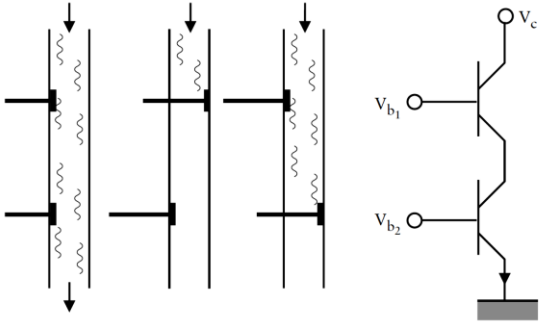
معمولاً برای نشان دادن ترانزیستور استفاده می‌شود را آورده‌ایم و با کمی تخیل واقعاً شبیه به شیر آب نیز است.

حال این شیرها و لوله‌ها به چه درد ما می‌خورد؟ پاسخ این است که ما می‌توانیم با آن‌ها کامپیوتر بسازیم و اگر این لوله‌ها و شیرها را به‌اندازه کافی کوچک کنیم ما واقعاً می تونیم یک کامپیوتر بسازیم. شکل ۶-۹ نشان می‌دهد که ما چگونه می‌توانیم با استفاده از یک لوله و دو شیر چیزی بسازیم که به آن "دروازه منطقی" می‌گویند. هر دو شیر لوله سمت چپ باز است و درنتیجه آب از پایین خارج می‌شود. لوله وسطی و لوله سمت راست هر دو یکی از شیرهایشان بسته است و به‌وضوح آبی از پایین آن‌ها خارج نمی‌شود. ما دیگر به خودمان زحمت ندادیم که حالتی که هر دو شیر بسته‌اند را نشان دهیم. اگر ما

جریان خروجی از پایین لوله را با "۱" و فقدان جریان را با "۰" نشان دهیم و همچنین شیر باز را با "۱" و شیر بسته را با "۰" نمایش دهیم، می‌توانیم عملکرد ۴ لوله (که سه تایشان در تصویر آمده‌اند و یکی نیامده) را با این معادلات خلاصه کنیم: "۱ AND ۱ =۱"، "۱ AND۰=۰"، "۱ AND ۰=۰" و "۰ AND۰=۰". واژه "AND" در اینجا یک عملگر منطقی[۱] است و به‌صورت فنی استفاده شده است – به سیستم لوله‌ها و شیرهایی که در اینجا توضیح داده شده "دروازهٔ AND" ("گیتِ اَند" یا "دروازهٔ وَ") می‌گویند. دروازه دو ورودی می‌گیرد (وضعیت دو شیر) و یک خروجی می‌دهد (وجود یا فقدان جریان) و تنها راه به دست آوردن "۱" این

[۱] . Logical Operation

است که دروازه را با "۱" و "۱" تغذیه کنیم. امیدواریم که تا اینجا معلوم شده باشد که چگونه با استفاده از یک زوج ترانزیستور که به‌طور سری وصل شده‌اند می‌توان یک گیت اند ساخت. شکل مدار نیز در تصویر نشان داده شده است. می‌بینیم تنها زمانی که هر دو ترانزیستور روشن هستند (یعنی با اعمال ولتاژ مثبت V_{b1} و V_{b2} به هر دو محدوده نوع p)، جریان جاری می‌شود و این تنها کاری است که ما برای ساختن یک گیت اند نیازمندیم.



شکل ۶-۹: ساخت یک گیت‌اند با استفاده از یک لوله و دو شیر آب (چپ) یا یک زوج ترانزیستور (راست). دومی برای ساخت کامپیوتر مناسب‌تر است.

شکل ۷-۹ دروازه منطقی متفاوتی را نشان می‌دهد. این بار در صورت باز بودن هرکدام از شیرها، آب از پایین لوله خارج می‌شود و تنها زمانی که هر دو شیر بسته باشند جریان به

وجود نمی‌آید. به این "دروازهٔ OR" ("گیت اُر" یا "دروازهٔ یا") می‌گویند و با استفاده از روشی که قبلاً استفاده کردیم این بار "۱=۱ OR ۱"، "۱=۱ OR ۰"، "۰=۱ OR ۱" و "۰=۰ OR ۰". مدار ترانزیستوری مرتبط نیز در شکل نشان داده شده است و این بار در تمامی حالت‌ها به‌جز حالتی که هر دو ترانزیستور خاموش‌اند، جریان در مدار وجود دارد.

قدرت دستگاه‌های الکترونیکی دیجیتال تکیه بر چنین دروازه‌های منطقی‌ای دارند. با شروع از این اجزای ساده و ترکیب کردن دروازه‌های منطقی می‌توان الگوریتم‌های پیچیده دلخواهی را ساخت. می‌توانیم مجموعه از ورودی‌ها (یعنی مجموعه‌ای از ۰ و ۱ ها) را به‌عنوان ورودی به این مدارات منطقی که ساختاری هوشمندانه از ترانزیستورها هستند داد و

مجموعه از خروجی‌ها را دریافت کرد (یعنی دوباره مجموعه‌ای از ۰ و ۱ ها). بدین‌صورت ما می‌توانیم مدارهایی بسازیم که محاسبات پیچیده ریاضی انجام دهند، یا بر پایه اینکه کدام کلیدها بر روی صفحه‌کلید فشرده شده‌اند، تصمیم‌گیری کنیم و داده حاصل از آن را به دستگاهی بفرستیم که نهایتاً کاراکتر موردنظر را بر روی صفحه‌نمایش نشان دهد، یا مثلاً زمانی که یک مزاحم وارد خانه شد زنگ خطر به صدا درآید یا اینکه جریانی از کاراکترهای متنی را از درون یک فیبر نوری عبور داده و به آن‌سوی دنیا انتقال دهیم (این کاراکترها به‌صورت یک سری ارقام باینری رمزدار شده‌اند) یا .... در حقیقت هر چیزی که فکرش را بکنید [را می‌توان انجام داد]، زیرا تقریباً هر وسیله الکتریکی که می‌خرید پر از ترانزیستور است.

قابلیت استفاده از ترانزیستورها بینهایت است و تا همین‌جا هم ما از ترانزیستورها به حدی استفاده کرده‌ایم که دنیا تغییر کرده است. واقعاً اغراق نیست اگر بگوییم ترانزیستور مهم‌ترین اختراع ۱۰۰ سال اخیر بشر است – دنیای مدرن بر اساس تکنولوژی نیمه‌رساناها شکل یافته است. به‌طور عملی این تکنولوژی‌ها جان میلیون‌ها انسان را نجات داده است – مثلاً می‌توانیم به تجهیزات پزشکی در بیمارستان‌ها اشاره کنیم یا مزایای سیستم‌های ارتباطی سریع و قابل‌اطمینان یا استفاده از کامپیوترها در تحقیقات علمی و در کنترل فرایندهای پیچیده صنعتی.

ویلیام بی.شاکلی، جان باردین[۱] و والتر اچ.براتین[۲] جایزه نوبل فیزیک سال ۱۹۵۶ را به خاطر تحقیقاتشان درزمینه نیمه‌رساناها و کشف اثر ترانزیستورها کسب کردند. احتمالاً به‌جز این مورد تاکنون هیچ جایزه نوبلی برای یافته‌ای که با زندگی انسان‌های بیشماری سروکار داشته باشد،اعطا نشده است.

[۱] . John Bardeen

[۲] . Walter H.Brattain

فصل دهم

اندرکنش

در فصول ابتدایی ما ساختاری را ارائه دادیم که نحوه حرکت ذرات ریز را توضیح می‌داد. بدون هیچ اغراقی آن‌ها جهش کرده و کل عالم را می‌پیمایند و همان‌طور که به‌طور نمادین مطرح کردیم ساعت‌هایشان را نیز با خود حمل می‌کنند. زمانی که ما ساعت‌هایی که هرکدام مربوط به یکی از مسیرهای ذره متحرک ماست را در یک نقطه خاص باهم جمع کنیم، به یک ساعت معینی می‌رسیم که احتمال یافتن

ذره در آنجا را نشان می‌دهد. از همین صحنه درهم‌وبرهم است که خصوصیاتی که ما به‌طور روزمره در مواد می‌بینیم، خود را نشان می‌دهد. به‌نوعی، هر الکترون، هر پروتون و هر نوترون درون بدن شما دائماً در حال کاوش کل عالم است و تنها زمانی که مجموع این کاوش‌ها (جهش‌ها) را باهم جمع بزنیم به دنیایی می‌رسیم که خوشبختانه در آن اتم‌ها تمایل دارند در درون بدن شما باقی بمانند – حداقل برای یک قرن یا بیشتر. چیزی که هنوز مطرح نکردیم نحوه اندرکنش (تعامل) این ذرات با یکدیگر به‌طور جزئی است. ما بدون اینکه در مورد ارتباط ذرات با یکدیگر صحبتی کرده باشیم، تا اینجا پیشرفت زیادی داشتیم خصوصاً درباره مفهوم پتانسیل. اما پتانسیل چیست؟ اگر جهان تنها از ذرات تشکیل شده است، ما یقیناً

باید بتوانیم به‌جای صحبت از این ایده مبهم که ذرات "در پتانسیل تشکیل‌شده از ذرات دیگر" حرکت می‌کنند، از نحوه اندرکنش ذرات با یکدیگر و حرکت آن‌ها سخن بگوییم.

روش جدیدی که در فیزیک بنیادی وجود دارد – و با عنوان نظریه میدان کوانتوم[۱] شناخته می‌شود – علاوه بر قوانین جهش ذرات از مجموعه قوانین جدیدی که نحوه اندرکنش ذرات را با یکدیگر نشان می‌دهد، استفاده می‌کند. خوشبختانه این قوانین پیچیده‌تر از قوانینی که تا اینجا مطرح کردیم نیستند و یکی از شگفتی‌های علم نوین این است که علی‌رغم پیچیدگی جهان طبیعی، تعداد این قوانین زیاد نیست.

[۱] . Quantum Field Theory

انیشتین گفته بود: "معمای ابدی جهان، قابل توضیح بودن آن است" و "این‌که جهان قابل توضیح است، خودش نوعی معجزه است".

بیایید با توضیح اولین نظریه میدان کوانتوم که کشف شد شروع کنیم – الکترودینامیک کوانتومی[۱] یا QED. مبدأ این نظریه را می‌توان تا سال ۱۹۲۰ خصوصاً زمانی که دیراک اولین جرقه‌های موفق در کوانتیزه کردن میدان الکترومغناطیس ماکسول را ایجاد کرد، عقب برد. ما تا اینجا چند بار با کوانتوم میدان مغناطیسی روبرو شدیم – یعنی همان فوتون‌ها – اما آن نظریه مشکلات آشکاری داشت که در

[۱] . Quantum Electrodynamics

طی دهه‌های ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ بی‌پاسخ باقی ماند. مثلاً یک الکترون حین جابجایی بین سطوح انرژی چگونه از خود فوتون گسیل می‌کند؟ یا مثلاً چه اتفاقی برای فوتونی که توسط الکترون جذب‌شده می‌افتد تا الکترون به سطح انرژی بالاتری بپرد؟ به‌وضوح فوتون‌ها در طی فرایندهای اتمی به وجود آمده و از بین می‌روند و علت این اتفاقات در نظریه کوانتوم قدیمی که تا اینجا با آن آشنا شدیم پاسخی نداشتند. در طول تاریخ علم، چند باری پیش آمده است که دانشمندانی افسانه‌ای دورهم جمع شده‌اند؛ ملاقات‌هایی که ظاهراً زمینه علم را تغییر داده‌اند. اما هیچ‌وقت این‌گونه نبوده – یعنی شرکت‌کنندگان در ملاقات [پس‌ازآن] تا چند سال در مورد مسائل پیش رو کار کرده‌اند، اما درباره کنفرانس شلتر آیلند در

ژوئن ۱۹۴۷ که در لانگ آیلند نیویورک برگزار شد، می‌توان ادعا کرد که انگیزه‌ای برای بعضی چیزهای خاص شد. ارزشش را دارد که شرکت‌کنندگان در این کنفرانس را نام ببریم، زیرا تعداد محدودی بوده و مجموعه‌ای از فیزیکدانان بزرگ قرن بیستم در آمریکا هستند. به ترتیب الفبای انگلیسی: هانس بت، دیوید بوهم، گریگوری بریت، کارل دارو، هرمان فشبچ، ریچارد فاینمن، هنردیک کرامرز، ویلیس لمب، دانکن مکینس، رابرت مارشاک، جان ون نیومن، آرنولد نوردزیک، جی رابرت اپنهایمر، آبراهام پایس، لینوس پاولینگ، ایزیدور رابی، برونو روسی، جولیان شوینگر، رابرت سربر، ادوارد تلر، جرج آهلنبک، جان هسبروک ون لک، ویکتور ویسکوف و جان آرچیبالد ویلر. خواننده، بسیاری از این اسامی را در این کتاب دیده است و

احتمالاً دانشجویان فیزیک درباره اکثر افراد این لیست شنیده‌اند. نویسنده آمریکایی دیو بری[۱] گفته است : اگر بخواهید در یک کلمه مشخص کنید که چرا بشریت نتوانسته و نخواهد توانست به حداکثر قابلیتش دست یابد، این کلمه "جلسه" (قرار ملاقات) است. بدون شک این جمله درست است، اما شلتر آیلند استثنا است. این جلسه با معرفی مطلبی که امروزه با نام جابجایی لمب[۲] می‌شناسیم آغاز می‌شود. ویلیس لمب[۳] با استفاده از تکنیک‌های بسیار دقیق ریزموج که در طول جنگ جهانی دوم توسعه یافته بودند، فهمید که طیف

[۱] . Dave Barry

[۲] . Lamb Shift

[۳] . Willis Lamb

هیدروژن دقیقاً به آن صورتی که توسط نظریه کوانتوم قدیمی توصیف شده بود نیست. اندکی جابجایی در سطوح انرژی مشاهده‌شده وجود دارد که توسط نظریه‌ای که تاکنون در این کتاب توضیح دادیم به‌حساب نمی‌آیند. این اثر بسیار جزئی بود اما چالشی بزرگ برای نظریه‌پردازان ایجاد کرد.

ما شلتر آیلند را همین‌جا در سخنرانی لمب ترک می‌کنیم و به نظریه‌ای می‌پردازیم که در طی ماه‌ها و سال‌های آینده آشکار شد. در طی این توضیحات ما علل جابجایی لمب را خواهیم گفت اما برای اینکه اشتیاقتان را بیشتر کنیم این جمله مرموز را به‌عنوان پاسخ بیان خواهیم کرد: پروتون و الکترون درون اتم تنها نیستند.

QED نظریه‌ای است که نحوه تعامل ذرات بارداری مثل الکترون‌ها را با همدیگر و همچنین با ذرات نور (فوتون‌ها) توضیح می‌دهد. این نظریه به‌تنهایی توانایی توضیح تمامی پدیده‌های طبیعی به‌جز گرانش و پدیده‌های هسته‌ای را داراست. ما درباره پدیده‌های هسته‌ای بعداً تمرکز خواهیم کرد و در طی بررسی آن خواهیم فهمید که علی‌رغم وجود تعداد زیادی ذرات باردار مثبت و همچنین حضور ذرات خنثای نوترون، هسته اتم چگونه خود را حفظ می‌کند و ناگهان به دلیل دافعه الکتریکی متلاشی نمی‌شود. تقریباً هر چیزی – یعنی هر چیزی که به‌طور روزمره با آن سروکار دارید – در بنیادی‌ترین حالتش با QED قابل توضیح است. ماده، نور، الکتریسیته و مغناطیس. تمامی این‌ها QED هستند.

بیایید با سیستمی که در این کتاب چند بار به آن برخوردیم شروع کنیم: جهانی با تنها یک الکترون. دایره‌های کوچکی که در شکل جهش ساعت‌ها در صفحه ۵۹ بودند، نشان‌دهنده موقعیت‌های مختلف آن الکترون در لحظه‌ای از زمان هستند. برای اینکه احتمال حضور ذره را در لحظه‌ای بعد در نقطه X حساب کنیم، قوانین کوانتومی به ما می‌گفتند که باید به الکترون اجازه دهیم که از تمامی نقاط شروع ممکن به X بپرد. هر جهشی با خود ساعتی را به X می‌برد و درصورتی‌که ما این ساعت‌ها را باهم جمع ببندیم به مقصودمان می‌رسیم.

حال قرار است کاری بکنیم که در ابتدا شاید پیچیده به نظر آید، اما دلیل خوبی دارد. در طی این کار ما با علائم As، Bs

و Ts روبرو خواهیم شد – یعنی دوباره دست به گچ و تخته‌سیاه خواهیم برد؛ اما زیاد طول نمی‌کشد.

وقتی‌که ذره‌ای در زمان صفر از A حرکت کرده و در طی زمان T به B می‌رود، می‌توانیم با چرخاندن ساعت A به عقب و به میزانی که با استفاده از فاصله بین A تا B و زمان طی شده T به دست می‌آید، ساعت رسیده به B را به دست آوریم. به‌طور خلاصه می‌توان گفت ساعت موجود در B با استفاده از C(A،۰)P(A،B،T) به دست می‌آید که C(A،۰) نماینده ساعت اصلی در لحظه صفر در A است و P(A،B،T)

نقش چرخاننده و کوچک کننده ساعت حین جهش از A به B را ایفا می کند[۱].

ما از P(A،B،T) با عنوان "انتشاردهنده[۲]" از A به B یاد خواهیم کرد. وقتی‌که قانون انتشار از A به B را یاد فهمیدیم، می‌توانیم احتمال حضور ذره در X را بیابیم. به‌عنوان‌مثال در شکل ۲-۴ ما نقاط شروع زیادی داریم پس باید از هرکدام از آن نقاط به X [ذره‌ای را] انتشار دهیم و ساعت‌های حاصله از آن‌ها را باهم جمع ببندیم. با توجه به نمادگذاری‌ای که

[۱]. انتشار دهنده، ساعت ها را طوری کوچک می کند که نهایتا بتوان ذره را با احتمال ۱ و در زمان T در گوشه‌ای از این دنیا پیدا کرد.

[۲]. Propagator

همین‌الان گفتیم رابطه به دست آوردن ساعت نهایی به‌صورت زیر است:

$$C(X,T) = C(X_{1},_{0})P(X_{1},X,T) + C(X_{2},_{0})P(X_{2},X,T) + C(X_{3},_{0})P(X_{3},X,T)+\dots$$

که X_{1}، X_{2}، X_{3} و ... نماینده تمامی موقعیت‌های ذره در لحظه صفر است (یعنی موقعیت تمامی دایره‌های کوچک شکل ۲-۴). برای اینکه شفاف‌سازی کنیم $C(X_{3},_{0})P(X_{3},X,T)$ یعنی "ساعتی را از نقطه X_{3} بردار و آن را در طی زمان T به نقطه X انتشار بده (بفرست)". سردرگم نشوید چون هنوز اتفاق خاصی نیافتاده است. کاری که در اینجا کردیم این بود که مطلبی که قبلاً می‌دانستیم را

به‌صورت شیک و نمادین نوشتیم: "ساعت X۳ و زمان صفر را بگیر و حساب کن برای اینکه این ساعت در زمان T به X برود چقدر باید چرخیده و کوچک شود و سپس این کار را برای تمام ساعت‌های زمان صفر انجام بده و نهایتاً ساعت‌های جدید را جمع کن تا ساعت موردنظر را به دست آوری". مطمئناً شما هم معتقدید که جمله قبل (درون گیومه) بسیار طولانی است و نوشتن این جمله به‌طور نمادین زندگی را ساده‌تر می‌کند.

ما قطعاً می‌توانیم انتشاردهنده را به‌عنوان نمادی از قانون چرخش ساعت‌ها و کوچک کردن آن‌ها محسوب کنیم. ما همچنین می‌توانیم آن را به‌عنوان ساعت در نظر بگیریم. برای واضح کردن منظورمان، فرض کنید ما دقیقاً می‌دانیم که

الکترون در $T=۰$ در نقطه A قرار دارد که در این صورت با ساعتی به‌اندازه ۱ که عدد ۱۲ را نشان می‌دهد، توصیف می‌شود. ما می‌توانیم عمل انتشار را با ساعت دومی نشان دهیم که اندازه‌اش به میزانی است که ساعت اصلی ما نیاز به کوچک شدن دارد و زمانش به‌اندازه‌ای است که برای چرخش ساعت اولیه‌مان نیاز داریم. اگر جهشی از A به B نیازمند کوچک کردن ساعت اولیه با ضریب ۵ و همچنین چرخاندن آن به میزان ۲ ساعت است در این صورت انتشاردهنده $P(A،B،T)$ را می‌توان با ساعتی نشان داد که اندازه‌اش برابر با $\frac{۱}{۵}=۰/۲$ و همچنین ساعت ۱۰ را نشان می‌دهد (یعنی نسبت به ساعت ۱۲، ۲ ساعت عقب کشیده شده است). ساعت روی B

به‌سادگی از ضرب ساعت اصلی A در ساعت انتشاردهنده به دست می‌آید.

برای کسانی که با اعداد مختلط آشنایی دارند، هرکدام از C(X۱،۰) و C(X۲،۰) را می‌توان به‌صورت یک عدد مختلط نوشت و همچنین P(X۱،X،T) و P(X۲،X،T) نیز همین خاصیت را دارند. پس‌ازاینکه آن‌ها را به‌طور مختلط نوشتیم می‌توان طبق قواعد ریاضی ضربشان کرد. برای کسانی که اعداد مختلط را نمی‌شناسند هیچ جای نگرانی نیست، زیرا توصیفی که ما از ساعت‌ها ارائه دادیم به همان میزان دقیق است. کاری که ما کردیم این بود که روش دیگری برای تفکر درباره قانون گردش ساعت‌ها ارائه دادیم: ما می‌توانیم یک ساعت را توسط ساعت دیگری چرخانده و کوچک کنیم.

ما آزادیم که روش ضرب ساعت‌هایمان را طراحی کنیم تا این فرایند را تکمیل کنیم: اندازه دو ساعت را در هم ضرب می‌کنیم (۱×۰/۲=۰/۲) و جمع زدن زمان‌هایمان نیز بدین گونه است که ساعت اول را به میزان "۲ساعت =۱۰ساعت- ۱۲ساعت" می‌چرخانیم. به نظر می‌آید بااینکه یک ذره در اختیار داریم، زیادی زحمت می‌کشیم که آن‌قدرها هم لازم نیست. اما فیزیکدان‌ها به‌قدری تنبل هستند که اگر این قضیه در طولانی‌مدت مفید واقع نمی‌شد، هرگز این عملیات را انجام نمی‌دادند. این قضیه نمادین سازی، زمانی که تعداد ذرات ما زیاد باشد (مثلاً اتم هیدروژن)، بسیار کارآمد خواهد بود.

صرف‌نظر از جزئیات، دو کلید اساسی در روش ما برای فهمیدن احتمال یافتن ذره‌ای در جایی از جهان وجود دارد.

اول اینکه ما باید آرایه ای از ساعت‌های اولیه را تعیین کنیم که اطلاعاتمان را درباره احتمال حضور ذره در لحظه صفر مشخص کند. دوم اینکه ما باید انتشاردهنده $P(A،B،T)$ را بدانیم که خود آن ساعتی است که قانون کوچک‌شدگی و چرخیدن را حین جهش ذره از A به B اعمال می‌کند. هر وقت که انتشاردهنده بین هر زوج نقاط ابتدایی و انتهایی را فهمیدیم، ما هر آنچه که نیاز است را دانسته‌ایم و با قاطعیت می‌توانیم دینامیک جهان کم‌اهمیتی که از یک ذره تشکیل شده است را بفهمیم. بااین‌حال نباید این توانایی‌مان را دست‌کم بگیریم، زیرا اگر اندرکنش ذرات را نیز وارد بازی کنیم، صحنه بازی آن‌چنان هم پیچیده نمی‌شود. پس بیایید این کار را بکنیم.

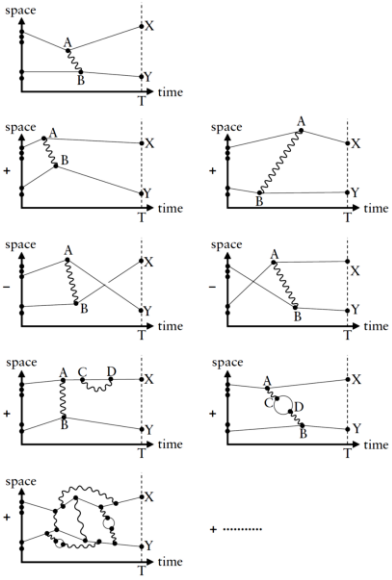
شکل ۱-۱۰ به‌طور تصویری تمامی ایده‌های کلیدی‌ای را که قرار است راجع بهشان بحث کنیم را نشان می‌دهد. این اولین برخورد ما با نمودارهای فاینمن[۱] است که ابزارهای محاسباتی برای فیزیکدانان حرفه‌ای ذرات محسوب می‌شود. وظیفه پیشِ روی ما به دست آوردن احتمال یافتن یک زوج الکترون در نقاط X و Y در زمان T است. همانند قبل ما در لحظه صفر می‌دانیم که الکترون‌ها کجا قرار دارند؛ یعنی ساختار مجموعه ساعت‌های اولیه آن‌ها را می‌دانیم. بررسی این مطلب مهم است زیرا توانایی پاسخ به این نوع سؤال برابر است با توانایی فهم "اتفاقاتی که در جهانی با دو الکترون می‌افتد". شاید این هم پیشرفت زیادی به نظر نیاید اما زمانی که همین را

[۱]. Feynman Diagrams

فهمیدیم دیگر جهان در سیطره ماست زیرا ما فهمیده‌ایم که اجزای بنیادین سازنده طبیعت چگونه باهم اندرکنش دارند.

برای ساده‌سازی تصاویر ما به کشیدن یک بعد در فضا بسنده کردیم و زمان از چپ به راست پیش رَوی می‌کند. این ساده‌سازی هیچ تأثیری در دقت محاسبات ما ندارد. بیایید با توصیف اولین تصویر از این مجموعه در شکل ۱-۱۰ آغاز کنیم. نقطه‌های ریز در T=۰ متناظر با موقعیت‌های ممکن برای دو الکترون در زمان صفر هستند. برای اهداف این مصورسازی، فرض کردیم که الکترون بالایی می‌تواند در یکی از سه نقطه قرار گیرد و الکترون پایینی در یکی از دو نقطه (در دنیای واقعی ما با الکترون‌هایی سروکار داریم که می‌توانند در بینهایت نقطه قرار داشته باشند که اگر می‌خواستیم با

واقعیات پیش برویم و همه‌شان را رسم کنیم، جوهرمان تمام می‌شد).



شکل ۱-۱۰: تعدادی از راه‌هایی که یک زوج الکترون می‌توانند پراکنده شوند. الکترون‌ها از سمت چپ شروع کرده و همواره پس از طی زمان T به دو زوج نقطه مشابه X و Y می‌رسند. این تصاویر مربوط به مسیرهای مختلفی است که ذرات می‌توانند به X و Y برسند.

الکترون بالایی در لحظاتی بعد به A می‌پرد و پس‌ازاین پرش اتفاق جالبی می‌افتد: یک فوتون گسیل می‌کند (که با خط موج‌دار نشان داده شده است). سپس این فوتون به B می‌پرد و توسط الکترون دیگر جذب می‌شود. الکترون بالایی از A به X می‌پرد و الکترون پایینی از B به Y. این تنها یکی از بینهایت راهی است که زوج الکترون اولیه ما می‌توانند به نقاط X و Y برسند. ما به‌کل این فرایند می‌توانیم ساعتی را اختصاص دهیم – مثلاً به آن "ساعت ۱" یا به‌اختصار C۱ بگوییم. وظیفه QED این است که قوانینی برای ما فراهم آورد که به ما اجازه نتیجه گرفتن (به دست آوردن) این ساعت را بدهد.

قبل از ورود به جزئیات، بگذارید بگویم که چگونه قرار است پیش برویم. بالاترین تصویر، یکی از هزاران مسیری است که زوج الکترون اولیه می‌تواند به سمت X و Y طی کند. سایر تصاویر بعضی از مسیرهای دیگر را نشان می‌دهند. نکته مهم این است که برای هر مسیر ممکن که الکترون‌ها می‌توانند خود را به X و Y برسانند، باید یک ساعت کوانتوم را شناسایی کنیم – مثلاً C۱ اولین ساعت از این لیست بلندبالاست[۱]. زمانی که تمام ساعت‌ها را به دست آوردیم، باید آن‌ها را باهم جمع زده و ساعت "اصلی"[۲] را به دست آوریم.

[۱]. ما با این ایده زمانی که در فصل ۷ با اصل طرد پاولی آشنا می شدیم، مواجه شده‌ایم.

[۲]. Master Clock

اندازه آن ساعت (به توان دو) احتمال یافتن جفت الکترون را در نقاط X و Y به ما می‌دهد. یک‌بار دیگر تصور کنید که این دو الکترون برای رفتن به X و Y یک مسیر مشخص ندارند، بلکه همدیگر را از هر راه ممکنی پراکنده[۱] می‌کنند. اگر ما به تصاویر پایینی شکل نگاه کنیم، راه‌هایی برای پراکندگی الکترون‌ها می‌بینیم که جزئیات بیشتری دارند. الکترون‌ها نه‌تنها تبادل فوتون می‌کنند، حتی می‌توانند فوتون گسیل کرده و دوباره خودشان آن را جذب کنند و در دو تصویر پایانی اتفاق بسیار عجیبی می‌افتد. این تصاویر شامل سناریویی می‌شوند که در آن ظاهراً یک فوتون الکترونی گسیل می‌کند که "یک دور زده" و دوباره به جایش

[۱] . Scatter Off

برمی‌گردد. اندکی بد راجع به این مطلب نیز خواهیم گفت. فعلاً باید مجموعه‌ای از تصاویری که رفته‌رفته پیچیده‌تر می‌شوند را تصور کنیم که مربوط به حالاتی می‌شوند که الکترون‌ها تعداد عظیمی فوتون را گسیل و جذب کرده و نهایتاً به X و Y می‌رسند. ما باید تمامی این مسیرهای گوناگون که الکترون‌ها تا X و Y می‌پیمایند را در نظر بگیریم، اما دو قانون کاملاً آشکار وجود دارد: *الکترون‌ها تنها می‌توانند از جایی به جای دیگر بپرند و تنها می‌توانند یک فوتون را جذب یا گسیل کنند*. تنها نکته قابل‌ذکر همین دو تا بود؛ الکترون‌ها می‌توانند بپرند و همچنین منشعب[۱] شوند (فوتون گسیل کنند). نگاه دقیق‌تر نشان می‌دهد که هیچ‌کدام

[۱]. Branch

از تصاویر بالا دو قانون ذکرشده را نقض نمی‌کنند، زیرا این تصاویر پیچیده‌تر از گرهی با دو الکترون و یک فوتون نیستند. حال ما باید توضیح دهیم که چگونه می‌توان برای هرکدام از تصاویر شکل ۱-۱۰ ساعت موردنظر را یافت.

بیایید بر روی بالاترین شکل تمرکز کرده و ببینیم چگونه می‌توان ساعت متناظر با آن را به دست آورد (ساعت C۱). دقیقاً در ابتدای فرایند دو الکترون وجود دارد و هرکدام یک ساعت دارند. ما باید آن‌ها را با توجه به قانون ضرب ساعت‌ها، در هم ضرب کنیم و یک ساعت جدید به دست آوریم و نام C را بر روی آن می‌گذاریم. ضرب آن‌ها توجیه دارد زیرا این ساعت‌ها در حقیقت نماینده احتمال حضور الکترون‌ها هستند و زمانی که ما دو احتمال مستقل داشته باشیم، روش ترکیب

آن دو ضرب کردنشان است. برای مثال احتمال اینکه دو سکه به رو بی افتند برابر است با $\frac{۱}{۴} = \frac{۱}{۲} \times \frac{۱}{۲}$. به همین ترتیب ساعت ترکیب شده یا همان C به ما می‌گوید که احتمال حضور این دو الکترون در جاهای اولیه‌شان چقدر است.

ادامه مطلب در اصل دوباره ضرب ساعت‌هاست. الکترون بالایی به A می‌پرد، پس ساعتی به آن اختصاص می‌یابد؛ بیایید به آن P(۱،A) بگوییم. (یعنی ذره ۱ به A می‌پرد). در همین حال ذره ۲ نیز به B می‌پرد و برای آن نیز ساعتی داریم. نامش را P(۲،B) می‌گذاریم. به همین شکل دو ساعت دیگر نیز داریم که به جهش الکترون‌ها به مقصد نهایی‌شان اختصاص دارد. به آن‌ها نیز P(A،X) و P(B،Y) می‌گوییم.

نهایتاً ما ساعتی نیز برای فوتون داریم که از A به B می‌پرد. ازآنجایی‌که فوتون، الکترون نیست، قانون انتشار فوتون ممکن است با قانون انتشار الکترون فرق کند، پس نماد دیگری به آن اختصاص می‌دهیم. بیایید برای ساعتی که متناظر با جهش فوتون است از علامت L(A،B) استفاده کنیم[۱]. حال ما به‌سادگی تمامی این ساعت‌ها را در هم ضرب می‌کنیم تا ساعت اصلی را به دست آوریم:

$$R=C\times P(۱،A)\times P(۲،B)\times P(A،X)\times P(B،Y)\times L(A،B)$$

[۱]. این نکته فنی مهمی است، زیرا قوانین کوچک‌شدگی و چرخاندنی که تا اینجای کتاب استفاده کردیم، اثرات نسبیت خاص را لحاظ نمی کردند. در نظر گرفتن این اثر، که باید برای فوتون ها لحاظ شود، تفاوتی را در قانون چرخش ساعت ها بین فوتون‌ها و الکترون‌ها ایجاد می کند.

تقریباً کار ما تمام است، فقط یک فرایند اضافی کوچک کردن ساعت نیز باقی‌مانده زیرا قانون QED در مورد گسیل یا جذب فوتون می‌گوید که ما باید یک ضریب کوچک‌شدگی نیز معرفی کنیم: g. در نمودارهای ما الکترون بالایی فوتون گسیل کرده و الکترون پایینی آن را جذب می‌کند – این اتفاق دو فاکتور g را وارد کار می‌کند یعنی $g^۲$. حال دیگر واقعاً کار ما تمام شد و "ساعت ۱" نهایی ما بدین‌صورت محاسبه می‌شود: $C۱=g^۲\times R$

ضریب کوچک‌شدگی g ظاهراً اختیاری به نظر می‌آید، اما تفسیر فیزیکی مهمی دارد. این ضریب کاملاً مرتبط با احتمال گسیل فوتون توسط یک الکترون است و این مطلب شدت نیروی الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد. جایی در

محاسباتمان باید ارتباطی با دنیای واقعی برقرار کنیم، زیرا ما در حال محاسبه چیزهای واقعی هستیم و همان‌طور که ثابت گرانش نیوتون G حامل تمامی اطلاعات درباره شدت گرانش است، g نیز تمامی اطلاعات مرتبط با نیروی الکترومغناطیسی را در خود دارد.[۱]

اگر ما واقعاً محاسبات را به‌طور کامل انجام می‌دادیم، حواسمان به نمودار دوم می‌رفت که راه دیگری برای جهش دو الکترون اولیه به نقاط X و Y را نشان می‌دهد. نمودار دوم بسیار شبیه به نمودار اول است و الکترون‌ها از همان جای یکسان شروع به جهش می‌کنند، اما تفاوتش این است که

---

۱. g متناسب با ضریب ساختار ظریف است: $\alpha = \frac{g^2}{4\pi}$

فوتون از جای دیگری و در زمان دیگری توسط الکترون بالایی گسیل می‌شود و به همین ترتیب در جا و زمان دیگری توسط الکترون پایینی جذب می‌شود. محاسباتی مرتبط با این فرایند دقیقاً مشابه با محاسبات قبلی است و درنهایت "ساعت ۲" را به ما می‌دهد و با C۲ نشان می‌دهیم.

به همین ترتیب ما باید ادامه داده و تمامی نقاط ممکنی را که فوتون می‌تواند گسیل شده و نقاطی که می‌تواند جذب شود را در نظر بگیریم و محاسبات را انجام دهیم. همچنین باید تمام نقاطی که ممکن است الکترون‌های اولیه‌مان ازآنجا شروع کرده باشند را نیز لحاظ کنیم. ایده کلیدی این است که تمامی مسیرهای ممکنی که الکترون‌ها را به X و Y می‌رساند باید در نظر گرفته شوند و برای هرکدام ساعتی اختصاص یابد.

زمانی که تمامی ساعت‌ها را جمع‌آوری کردیم ما "به‌سادگی" آن‌ها را باهم جمع می‌بندیم و ساعت نهایی که به دست می‌آوریم به ما می‌گوید احتمال یافتن یک الکترون در X و الکترون دیگر در Y چقدر است. کار ما اینجا تمام می‌شود – ما خواهیم فهمید که دو الکترون چگونه باهم اندرکنش خواهند داشت زیرا کاری فراتر از محاسبه احتمالات نمی‌توانیم بکنیم.

چیزی که در اینجا تشریح کردیم در قلب QED جای دارد و بقیه نیروهای طبیعت نیز توضیح تقریباً مشابهی دارند. ما به آن‌ها نیز خواهیم رسید، اما هنوز نکاتی مانده که باید ذکر شود.

در ابتدا به این پاراگراف توجه کنید که دو تا از جزئیات کوچک ولی مهم را بیان می‌کند. شماره ۱: ما با چشم‌پوشی از اسپین الکترون‌ها و درنتیجه دو نوع بودن آن‌ها، سعی در ساده‌سازی کردیم. نه‌تنها این، فوتون‌ها نیز اسپین داشته (آن‌ها یکی از بوزون‌ها هستند) و در سه شکل وجود دارند. این خصوصیات باعث پیچیده‌تر شدن محاسبات می‌شود زیرا باید در هر مرحله از جهش و منشعب شدن، بررسی کنیم که با چه نوع فوتون و الکترونی سروکار داریم. شماره ۲: اگر شما به‌دقت مطالعه کرده باشید احتمالاً علامت منفی در بعضی از نمودارهای شکل ۱-۱۰ نظرتان را جلب کرده است. این علامت‌ها به این دلیل وجود دارند که ما درباره دو الکترون همانند که به سمت X و Y جهش می‌کنند صحبت می‌کردیم

و دو نموداری که با علامت منفی مشخص شده‌اند مربوط به حالاتی هستند که الکترون‌ها جای خود را نسبت به سایر نمودارها عوض کرده‌اند؛ یعنی الکترونی که از یکی از مجموعه نقاط بالا جهشش را آغاز کرده است، خود را به Y می‌رساند و دیگری که در پایین بوده به سمت X جهش می‌کند و همان‌طور که در فصل ۷ بحث کردیم این پیکره‌بندی‌های جایگزین زمانی می‌توانند در معادلاتمان جمع شده شوند که یک چرخشی به میزان ۶ ساعت به آن‌ها بدهیم – به همین دلیل علامت منفی وارد کار می‌شود.

همچنین ممکن است شما یک ایراد نیز در هدف ما یافته باشید – بینهایت نمودار وجود دارد که نحوه جهش دو الکترون را به X و Y توصیف می‌کند و جمع‌کردن بینهایت

ساعت در خوش‌بینانه‌ترین حالت کار بسیار دشواری به نظر می‌آید. خوشبختانه هر دفعه که انشعاب الکترون-فوتون اتفاق می‌افتد یک ضریب تازه g وارد محاسبات می‌کند و این باعث کوچک شدن اندازه ساعت می‌شود. این یعنی هرقدر نمودار ما پیچیده‌تر باشد، اندازه ساعتش کوچک‌تر بوده و از اهمیتش حین جمع‌بندی تمام ساعت‌ها کاسته می‌شود. برای QED، g عددی بسیار کوچک است (تقریباً برابر با ۰/۳ است) پس زمانی که تعداد انشعابات زیاد می‌شود کوچک شدن قابل‌ملاحظه‌ای را شاهد خواهیم بود. معمولاً در نظر گرفتن نمودارهایی همانند ۵ تصویر اول کفایت می‌کند که در آن‌ها بیشتر از ۲ انشعاب اتفاق نمی‌افتد و همین کار، حجم محاسبات را به‌شدت پایین می‌آورد.

این فرایند محاسبه ساعت (که در اصطلاحات علمی به آن "دامنه[۱]" می‌گویند) برای هرکدام از نمودارهای فاینمن، جمع‌کردن تمام ساعت‌ها و به توان دو رساندن ساعت نهایی برای به دست آوردن احتمال رخ دادن آن اتفاق، به‌نوعی وسیله امرارمعاش در فیزیک ذرات جدید محسوب می‌شود. اما مسئله جالبی در زیر پوست مطالبی که مطرح کردیم وجود دارد – مسئله‌ای که بعضی فیزیکدانان را به‌شدت اذیت کرده اما برای بعضی نیز مشکلی ایجاد نمی‌کند.

[۱] . Amplitude

مشکل اندازه‌گیری کوانتومی

زمانی که ما ساعت‌های مرتبط با نمودارهای مختلف فاینمن را باهم جمع می‌زنیم، اجازه به وجود آمدن همهمه تداخل کوانتومی را می‌دهیم. دقیقاً مانند آزمایش دو شکاف که ما باید هر مسیر ممکنی را برای ذره در حرکتش از منبع تا صفحه پشتی در نظر می‌گرفتیم، اینجا نیز باید هر مسیر ممکنی را برای رسیدن دو ذره از مکان‌های اولیه‌شان به مکان نهایی‌شان در نظر بگیریم. این حرکت باعث محاسبات درستی می‌شود، زیرا اجازه تداخل بین نمودارهای مختلف را می‌دهد. تنها در پایان فرایند که تمامی ساعت‌ها باهم جمع بسته شدند و کل تداخلات نیز لحاظ شده است، ما اجازه داریم اندازه

ساعت نهایی را به توان دو برسانیم و احتمال وقوع فرایند را محاسبه کنیم. به‌سادگی. اما به شکل ۲-۱۰ نگاه کنید.

اگر ما تلاش کنیم بفهمیم که الکترون‌ها حین جهششان به نقاط X و Y دقیقاً چه‌کار می‌کنند، چه اتفاقی می‌افتد؟ تنها راهی که برای آزمایش اتفاق رخ‌داده داریم این است که با این فرایند با استفاده از قوانین بازی برخورد کنیم. در QED، این به این معنی است که باید به قانون انشعاب الکترون-فوتون پایبند باشیم، زیرا چیز دیگری وجود ندارد. پس بیایید با یکی از فوتون‌هایی که توسط یکی از الکترون‌ها گسیل شده، با ابزار آشکارساز شخصی خودمان – یعنی چشممان – تعامل برقرار کنیم. دقت کنید که ما الآن در حال پرسیدن سؤال دیگری از این نظریه هستیم " احتمال اینکه ما یک الکترون در X و

یک الکترون در Y یافته و همچنین فوتونی را نیز با چشممان ببینیم چقدر است؟" ما می‌دانیم که برای فهمیدن جواب این پرسش چه‌کار باید بکنیم؛ باید تمامی ساعت‌های مرتبط با نمودارهای متفاوتی که با دو الکترون شروع شده و نهایتاً یک الکترون در X و الکترون دیگری در Y دارند و همچنین فوتونی نیز به سمت چشممان می‌فرستند، را باهم جمع بزنیم. دقیق‌تر اینکه ما باید درباره نحوه تعامل فوتون با چشممان صحبت کنیم. گرچه شروع این کار ساده به نظر می‌رسد، اما به‌تدریج سخت می‌شود. به‌عنوان‌مثال فوتون به الکترونی که در یکی از اتم‌های چشم ما قرار دارد برخورد کرده و این اتفاق باعث شروع سلسله اتفاقاتی می‌شود که منجر به درک ما از فوتون شده و ما جرقه نوری را در چشممان می‌بینیم. پس

برای توضیح کامل اینکه چه اتفاقی می‌افتد، باید موقعیت تمامی ذرات درون مغزمان را در نظر رفته و ببینیم چگونه در مقابل برخورد فوتون با چشم واکنش نشان می‌دهند. ما داریم به سمت مشکل اندازه‌گیری کوانتومی نزدیک می‌شویم.

تا اینجای کتاب ما جزئیاتی را درباره محاسبه احتمالات در فیزیک کوانتوم توضیح داده‌ایم. زمانی که آزمایشی انجام می‌دهیم، نظریه کوانتوم به ما اجازه می‌دهد تا احتمال خروجی‌های خاص حاصله از آزمایش را حساب کنیم. تا وقتی که ما به قوانین بازی پایبند باشیم و بدانیم که در حال محاسبه احتمال وقوع اتفاقات هستیم، ابهامی در این فرایند وجود نخواهد داشت. اما نکته‌ای وجود دارند که اندکی آزاردهنده است. فرض کنید آزمایشگری در حال طرح

آزمایشی است که تنها دو خروجی دارد، "بله" یا "خیر". حال فرض کنید که آزمایش را واقعاً انجام داده‌ایم. آزمایشگر قطعاً پس‌ازآنجام آن، خروجی را به‌صورت "بله" یا "خیر" ثبت خواهد کرد و به‌وضوح هر دو حالت نمی‌توانند همزمان به وقوع بپیوندند. خب این تا اینجا.

حال فرض کنید بعدها اندازه‌گیری دیگری (مهم نیست در چه موردی باشد) توسط آزمایشگر دیگری صورت پذیرد. بازهم فرض خواهیم کرد که این آزمایش نیز ساده بوده و خروجی‌اش باعث ایجاد صدای "تیک" می‌شود یا نمی‌شود . قوانین فیزیک کوانتوم ما را مجبور می‌کنند تا احتمال وقوع "تیک" در آزمایش دوم را توسط جمع‌کردن ساعت‌هایی که هرکدام متناظر با احتمال وقوع هرکدام از خروجی‌هاست، به

دست آوریم. حال این احتمالات شامل شرایطی می‌شود که آزمایشگر اول ما خروجی "بله" را ثبت کرده باشد یا خروجی متمم آن یعنی "نه" را. تنها پس ازلحاظ کردن هر دو این حالت‌هاست که ما می‌توانیم احتمال وقوع "تیک" را در آزمایش دوم به‌درستی محاسبه کنیم. آیا این کار درست است؟ آیا ما باید این ایده را بپذیریم که حتی پس از اتمام اندازه‌گیری خروجی یک آزمایشی، بازهم باید همدوسی[۱] (وابستگی تمام اتفاقات) جهان را لحاظ کنیم؟ یا اینکه در این حالت پس از به دست آوردن "بله" یا "خیر" در آزمایش اول، دیگر آزمایشات آینده صرفاً بسته به خروجی اندازه‌گیری شده آزمایش قبلی دارد؟برای مثال فرض کنید آزمایش اول ما

[۱] . Coherence

جوابش "بله" باشد. زمانی که ما قصد محاسبه احتمال خروجی‌های آزمایش دوم را داریم نباید آن را از مجموع همدوس[۱] احتمالات "بله" و "خیر" حساب کنیم، بلکه باید جواب به‌دست‌آمده از آزمایش اول که "بله" است را پذیرفته و تنها مسیرهایی را در آزمایش دوم در نظر بگیریم که "جهان پیرامون پس از به دست آمدن جواب بله در آزمایش اول در اختیار ما قرار می‌دهد". قطعاً خروجی این دو محاسبه باهم متفاوت خواهد بود و ما برای فهم کامل اتفاقات جهان باید بتوانیم کار درست را تشخیص دهیم.

[۱] . Coherent Sum Over

برای دانستن اینکه کدام روش درست است، باید بدانیم آیا خود فرایند اندازه‌گیری نکته خاصی دارد یا نه. آیا اندازه‌گیری ما باعث تغییری در جهان شده و ما را از شر جمع‌کردن سایر دامنه‌های کوانتومی خلاص می‌کند، یا اینکه این اندازه‌گیری صرفاً قسمتی از شبکه بزرگ و پیچیده احتمالات است که تا ابد در حالت برهم‌نهی همدوس باقی می‌ماند؟ ما انسان‌ها وسوسه می‌شویم که فکر کنیم اندازه‌گیری‌ای که الآن می‌کنیم (مثلاً "بله" یا "خیر") قطعاً آینده را تغییر می‌دهد و اگر این حرف درست باشد، هر اندازه‌گیری‌ای که در آینده صورت گیرد [درباره آزمایشات دیگر انجام می‌دهیم] نمی‌تواند همزمان هم از "بله" تأثیر بپذیرد و هم از "خیر". اما خلاف این مطلب به‌وضوح در جریان است زیرا به نظر می‌آید جهان آینده

همواره حالتی دارد که اتفاقاتی که در آن می‌افتد هم می‌تواند "بله" را در خود ببیند و هم "خیر" را. برای چنین حالت‌هایی، قوانین فیزیک کوانتوم، الزاماً این گزینه را پیش روی ما می‌گذارند که احتمال تأثیر هر دو "بله" و "خیر" را در نظر گرفته و با جمع این احتمالات اندازه‌گیری جدیدمان را انجام دهیم. گرچه این حرف عجیب به نظر می‌رسد اما جداً عجیب‌تر از جمع احتمالاتی نیست که در طول این کتاب انجام داده‌ایم. ما باید این ایده را جدی گرفته و خود را آماده کنیم که حتی در مقیاس‌های انسانی هم اثرات این قوانین را در نظر بگیریم. از این دیدگاه "مسئله اندازه‌گیری" دیگر مسئله خاصی نیست. فقط زمانی که ما اصرار داشته باشیم "بله" یا "خیر" یک آزمایش، روند اتفاقات طبیعت را تغییر

می‌دهد است که این مسئله خود را مبهم نشان می‌دهد، زیرا در این صورت ما باید توضیح دهیم چه چیزی عامل تغییر است و همدوسی کوانتومی[۱] را از بین می‌برد.

به این روش مکانیک کوانتومی مطرح شده در بالا که مخالف این ایده است که طبیعت همواره پس‌از انجام یک اندازه‌گیری، مسیر جدید را به‌عنوان "واقعیت" (اتفاقات بعدی) انتخاب می‌کند، تفسیر"جهان‌های چندگانه"[۲] می‌گویند. این

---

۱. Quantum Coherence

۲. Many Worlds Interpretation

در مکالمات غیر فنی، واژه‌ای به نام "جهان‌های موازی" (Parallel Universes) وجود دارد. از دیدگاه مکانیک کوانتومی بحث جهان‌های موازی همین مطلبی است که با عنوان فنی "جهان‌های چندگانه" مطرح شد. در کیهان‌شناسی و در مباحث مربوط به نظریه تورم نیز بحثی با عنوان فنی "چند

ایده بسیار پذیرفتنی است، زیرا اگر بخواهیم قوانینی که رفتار ذرات بنیادی را تعیین می‌کنند، جدی بگیریم و تمامی پدیده‌ها را با توجه به آن‌ها تفسیر کنیم، این پدیده جهان‌های چندگانه یکی از عواقب منطقی آن است. اما چنینی ایده‌ای تکان‌دهنده است، زیرا ما با جهانی مواجه خواهیم بود که در حقیقت برهم‌نهی همدوس[۱] تمامی اتفاقاتی است که ممکن است بیافتند و جهانی که ما درک می‌کنیم (و به‌شدت هم واقعی به نظر می‌رسد) به این دلیل درکش می‌کنیم که اشتباهاً فکر می‌کنیم هر بار که چیزی را اندازه می‌گیریم این

جهانی" (Multiverse) وجود دارد که به آن نیز "جهان‌های موازی" می گویند. دقت کنید که این دو ایده کاملا با هم متفاوت هستند. [مترجم]

[۱] . Coherent Superposition

همدوسی از بین می‌رود [و تبدیل به یک اتفاق مطلق می‌شود]. به‌عبارت‌دیگر ادراک و آگاهی ما نسبت به جهان به‌این‌ترتیب شکل گرفته است که گزینه‌های جایگزین (یا تداخلات بالقوه) را نادیده می‌گیریم، زیرا به‌ندرت ممکن است سایر گزینه‌ها به جهانی که در این لحظه می‌بینیم، منجر شوند.

اما اگر اندازه‌گیری واقعاً نتواند این همدوسی کوانتومی را از بین ببرد، به‌نوعی ما در حال زندگی در یک نمودار فاینمن بزرگ هستیم و تمایل ما به تفکر درباره قطعی بودن اتفاقات جهان، یکی از نتایج درک ناقص ما از جهان است. واقعاً می‌توان تصور کرد که زمانی در آینده، اتفاقی برای ما بیافتد که نیازمند این باشد که ما در گذشته دو عمل متضاد هم را

انجام داده باشیم. به‌وضوح این اثر زیرکانه است زیرا "انتخاب نکردن یک شغل" و "انتخاب کردن آن شغل" [که دو گزینه کاملاً متضاد هستند] تفاوت عمیقی در زندگی ما ایجاد می‌کنند و نمی‌توان به‌سادگی تصور کرد که هرکدام از این دو حالت را که انتخاب کنیم باز ممکن است آینده یکسانی در انتظار ما باشد (به خاطر آورید که [برای وقوع چنین رخدادی] ما تنها نیاز داریم دامنه‌هایی را باهم جمع بزنیم که به خروجی‌های یکسانی منجر شوند). پس در این حالت انتخاب یا عدم انتخاب آن شغل آن‌چنان هم باهم تداخل نداشته و درک ما از جهان به این صورت خواهد بود که انگار یک اتفاقی افتاده و اتفاق دیگری نیافتاده (منظور نویسنده این است که انتخاب یا عدم انتخاب آن شغل به‌مانند اتفاقات دیگری که

ربطی به زندگی ما ندارد خود را بروز خواهند داد). همان‌طور که دیدیم برای اندرکنش‌هایی که در آن تعداد ذرات کمی دخیل هستند، جمع احتمالات کاملاً ضروری است. زمانی که صحبت از تعداد زیادی از ذرات می‌کنیم یعنی همان زندگی روزمره‌مان، بسیار غیرمحتمل است که دو ساختار ذاتی متفاوت از اتم‌ها در یک‌زمان (مثلاً همان انتخاب یا عدم انتخاب شغل) بتوانند سهم تداخلی بسزایی در سناریوهای (اتفاقات) آینده داشته باشند. این یعنی ما می‌توانیم پیش روی کرده و وانمود کنیم پس‌از انجام یک اندازه‌گیری، جهان قطعاً تغییر می‌کند.

اما این حرف‌های جالب، زمانی که ما قصد محاسبه احتمال اتفاقی را پس از یک آزمایش داریم، اهمیت زیادی نخواهند

داشت. زیرا ما قوانین را می‌دانیم و می‌توانیم بدون هیچ مشکلی از آن‌ها استفاده کنیم. اما این خیال راحتی که ما داریم، ممکن است روزی تغییر کند – فعلاً این سؤال که گذشته ما چه تأثیری بر روی آینده‌مان دارد را نتوانستیم توسط آزمایشات بررسی کنیم. تفکر درباره اینکه کدام‌یک از این تفاسیر نظریه کوانتوم را می‌توان از فیزیک حذف کرد امروزه در دانشکده‌های فیزیک مسکوت مانده و باعث شده است که تلاش‌ها درباره فهمیدن واقعیت چیزها بی‌نتیجه باشد.

پادماده[۱]

برگردیم به دنیای خودمان؛ در شکل ۳-۱۰ راه دیگری برای پراکندگی الکترون‌ها نشان داده شده است. یکی از الکترون‌های ورودی، از A به X پریده که در طی حرکتش نیز فوتونی گسیل می‌کند. تا اینجا که مشکلی نیست، اما در ادامه کار این الکترون در زمان به عقب برگشته و به Y می‌رود و فوتونی را جذب می‌کند و سپس دوباره به سمت آینده رفته و نهایتاً در C یافت می‌شود. این نمودار تناقضی با قوانین جهش و انشعاب ما ندارد، زیرا الکترون همان‌طور که توسط نظریه مشخص شده، اقدام به گسیل و جذب فوتون می‌کند. با توجه

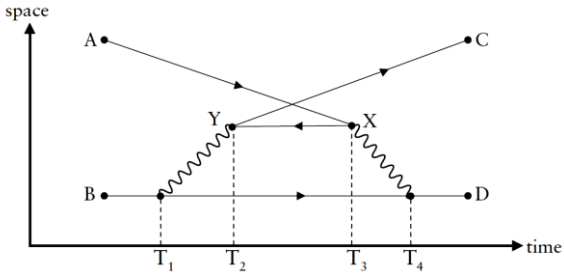
[۱] . Anti Matter

به قوانین چنین اتفاقی مجاز است و با توجه به‌عنوان این کتاب، هر اتفاقی که امکان وقوع داشته باشد، رخ می‌دهد. اما چنین اتفاقی با احساس عمومی ما ناسازگار است، زیرا ما گفتیم که الکترون در زمان به عقب می‌رود. چنین گفته‌ای می‌تواند داستان علمی تخیلی جالبی باشد، اما نقض قانون علت و معلول تحت هیچ شرایطی نمی‌تواند راهی برای ساخت جهان باشد (منظور نویسنده نقض تقدم زمانی بین علت و معلول است). همچنین این گفته می‌تواند بین نظریه کوانتوم و نظریه نسبیت خاص انیشتین تضاد مستقیمی برقرار کند.

به طرز جالبی چنین سفرهایی در زمان برای ذرات زیراتمی ممنوع نیست و این را دیراک در سال ۱۹۲۸ متوجه شد. اگر با توجه به دیدگاهمان که همیشه در زمان به جلو می‌رویم،

شکل ۳-۱۰ را دوباره تفسیر کنیم، می‌توانیم سرنخی بیابیم که مسئله را آن‌چنان هم ایراد دار نشان ندهد. ما باید اتفاقات را از چپ به راست تصویر پیگیری کنیم. بیایید از $T=۰$ شروع کنیم که در آن، در جهانی قرار داریم که تنها دو الکترون در A و B قرار دارند. ما تا رسیدن زمان $T_۱$ که الکترون پایینی فوتونی گسیل می‌کند، با همین جهان دو الکترونی پیش خواهیم رفت؛ بین زمان‌های $T_۲$ و $T_۱$، جهان دارای دو الکترون و یک فوتون است. در زمان $T_۲$ فوتون از بین رفته و با یک الکترون جایگزین می‌شود (که نهایتاً به C می‌رسد) و یک ذره دیگر (که به X می‌رسد). ما مردد هستیم که ذره دوم را الکترون بنامیم، زیرا "این الکترونی است که در زمان به عقب می‌رود". سؤال این است که "از دیدگاه کسی که در

زمان به جلو می‌رود (مثل شما)، الکترونی که به عقب می‌رود چه شکلی است؟"

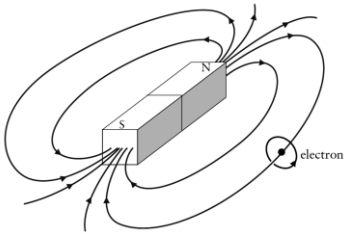


شکل ۳-۱۰: پادماده ... یا الکترونی که در زمان به عقب می‌رود.

برای پاسخ به این سؤال، بیاید تصور کنیم که در حال فیلم‌برداری از الکترونی هستیم که در محدوده یک آهنربا در حال حرکت است که در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است. با

این فرض که سرعت الکترون زیاد نیست، در حالت عادی باید بر روی یک دایره حرکت کند. همان‌طور که قبلاً گفتیم انحراف الکترون‌ها در مجاورت آهنربا، ایده اصلی ساخت تلویزیون‌های قدیمی CRT بود و از آن پیشرفته‌تر شتاب‌دهنده‌های ذرات که شامل برخورددهنده بزرگ هادرونی نیز می‌شود. حال فرض کنید ما این فیلم را به عقب بکشیم. در این صورت برای مایی که در زمان به جلو می‌رویم این فیلم نشان‌دهنده الکترونی است که در زمان به عقب می‌رود. ما خواهیم دید که الکترونی که در زمان به عقب می‌رود، با گذر زمان در همان دایره اما در خلاف جهت حرکت می‌کند. از دیدگاه یک فیزیکدان، این فیلم که در حال پس‌روی است، دقیقاً مشابه ویدیویی است که در آن ذره‌ای دقیقاً مشابه با

الکترون اما با بار الکتریکی مثبت، در حال حرکت در زمان به سمت جلو است. حال ما جواب سؤالمان را یافتیم: الکترون‌هایی که در زمان به عقب می‌روند، برای ما، "شبیه به الکترون‌هایی با بار مثبت هستند"[که به جلو می روند]. بنابراین اگر الکترون‌ها واقعاً در زمان به عقب بروند، ما آن‌ها را به‌عنوان الکترون‌هایی با بار مثبت در نظر خواهیم گرفت.



شکل ۴-۱۰: الکترونی در حال حرکت نزدیک به یک آهنربا

چنین ذراتی واقعاً وجود داشته و به آن‌ها پوزیترون[۱] می‌گویند. این ذرات توسط دیراک در سال ۱۹۳۱ در راستای حل مشکلی در معادله مکانیک کوانتومی‌اش برای الکترون معرفی شدند – معادله‌ای که از وجود انرژی منفی خبر می‌داد. بعدها دیراک دست به تفکرات شگفت‌انگیزی زد، مخصوصاً در راستای عزم راسخش برای تصحیح معادلات ریاضی‌اش: "من به این واقعیت پایبند بودم که نمی‌توان حالت‌های انرژی منفی را از ریاضیات حذف کرد، پس به دنبال راهی برای تفسیر فیزیکی آن‌ها گشتم"

[۱] . Positron

تقریباً یک سال پس‌ازآن کارل اندرسون[۱]، ظاهراً بدون اطلاع از پیش‌بینی دیراک، حین رصد ذرات تشعشعات کیهانی، ردپاهای عجیبی را در دستگاه آزمایشگاهی‌اش مشاهده کرد. نتیجه‌گیری وی این بود که "گویا لازم است به دنبال ذره‌ای هم جرم با الکترون ولی با بار مثبت باشیم" یک‌بار دیگر بگویم که این مطلب قدرت استدلالات ریاضی را نشان می‌دهد. برای اینکه قسمتی از ریاضی بامعنی شود، دیراک ایده‌ای برای یک ذره جدید معرفی نمود – پوزیترون – و چند ماه بعد این ذره که در برخوردهای پرانرژی امواج کیهانی تولیدشده بود یافت شد. پوزیترون اولین مواجهه ما با یکی از پایه‌های داستان‌های علمی تخیلی بود؛ پادماده.

---

[۱] . Carl Anderson

با دانستن این نکته که سفر در زمان الکترون‌ها را می‌توان با پوزیترون‌ها تفسیر کرد، ما می‌توانیم به شکل ۳-۱۰ بازگشته و توضیحاتمان را کامل کنیم. ما باید بگوییم وقتی‌که فوتون در زمان T_2 به Y می‌رسد، تبدیل به یک الکترون و یک پوزیترون می‌شود. هر دو این ذرات به سمت جلوی زمان حرکت می‌کنند تا وقتی‌که در زمان T_3 که پوزیترون Y خود را به X رسانده و با الکترون موجود در بالا دچار همجوشی شده و فوتون دوم را تولید کنند. این فوتون به زمان T_4 رفته و توسط الکترون پایینی جذب می‌شود.

این گفته‌ها کمی غیرقابل‌باور به نظر می‌رسند: پادماده به این دلیل خود را در نظریه ما نشان داد که ما به ذرات اجازه دادیم در زمان به عقب بازگردند. قوانین جهش و انشعاب به

ذرات اجازه می‌دهد که به سمت جلو زمان و چه به عقب آن جهش کنند و برخلاف عقیده ما که این کار را مجاز نمی‌داند، ظاهراً ما نمی‌توانیم جلوی آن‌ها را بگیریم. عجیب‌تر اینکه اگر ما اجازه ندهیم که ذرات در زمان به عقب برگردند، تناقضی در قانون علت و معلول خواهیم دید. این گفته‌ها همگی عجیب هستند و به ما می‌گویند که اتفاقات دنیا برخلاف تصورات ماست.

اینکه تمامی گفته‌های ما [با توجه به توجیهاتی که ارائه می‌دهیم] به‌خوبی پیش می‌روند اتفاقی نیست، بلکه ناشی از ساختار ریاضیاتی عمیق آن‌هاست. در حقیقت ممکن است با خواندن این فصل این احساس به شما دست بدهد که خب قوانین جهش و انشعاب به نظر قوانینی اختیاری بودند. آیا

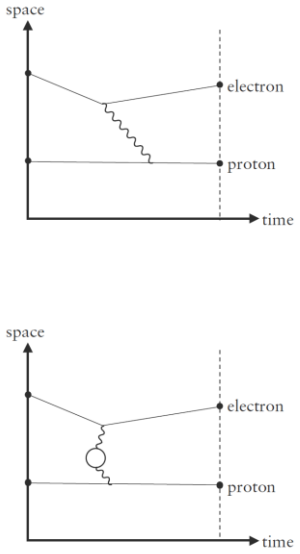
می‌توان قوانین جدیدی برای جهش و انشعاب ارائه داد و عواقب آن‌ها را هم بررسی کرد؟ اگر ما چنین کاری کنیم یقیناً به یک نظریه بد می‌رسیم – مثلاً نظریه‌ای که قانون علت و معلول را بر هم می‌زند. نظریه میدان کوانتوم (QFT) نامی است برای ساختار ریاضیاتی عمیق‌تر [نظریه کوانتوم] که این نظریه است که قوانین جهش و انشعاب را پی‌ریزی کرده است و به طرز شگفت‌انگیزی این تنها نظریه‌ای است که می‌تواند نظریه کوانتومی از ذرات بسازد که با نظریه نسبیت خاص نیز همخوانی داشته باشد. با در دست داشتن دستگاه QFT، قوانین جهش و انشعاب ثابت بوده و ما اختیاری در دست‌کاری آن‌ها نداریم. این حرف برای کسانی که به دنبال قوانین بنیادی می‌گردند مهم است زیرا استفاده از "تقارن" برای

حذف بعضی گزینه‌ها این تصور را به وجود می‌آورد که جهان باید به همین صورت که هست باشد و همین تصور پیشرفتی در فهم ماست. ما در اینجا از واژه "تقارن" استفاده کردیم و مناسب هم بود، زیرا نظریات انیشتین را می‌توان به‌عنوان محدودیت‌های تقارنی‌ای نگاه کرد که بر ساختار فضا و زمان اعمال شده‌اند. سایر تقارنات نیز در ادامه، قوانین جهش و انشعاب را محدود می‌کنند که در فصل بعد مختصراً با آن‌ها سروکار خواهیم داشت.

قبل از ترک QED، ما گره دیگری نیز داریم که باید آن را سفت کنیم. اگر یادتان باشد، اولین سخنرانی صورت گرفته در شلتر آیلند درباره جابجایی لمب بود؛ یک رفتار غیرمتعارف در طیف هیدروژن که نمی‌شد با نظریه کوانتوم شرودینگر و

هایزنبرگ توضیحش داد. به فاصله یک هفته از گردهم‌آیی، هانس بت اولین محاسبات تقریبی را برای به دست آوردن جواب انجام داد. شکل ۵-۱۰ روش QED را برای تصویر کردن یک اتم هیدروژن نشان می‌دهد. اندرکنش الکترومغناطیس که پروتون و الکترون را متصل‌به‌هم نگه می‌دارد را می‌توان با مجموعه‌ای از نمودارهای فاینمن نشان داد که به‌تدریج پیچیده‌تر می‌شوند، همان‌طور که در مورد اندرکنش بین دو الکترون در شکل ۱-۱۰ دیدیم. در شکل ۵-۱۰ ما دو تا از ساده‌ترین نمودارهای ممکن را آورده‌ایم. پیش از QED، محاسبات سطوح انرژی الکترون تنها نمودار بالایی شکل را شامل می‌شد که [این نمودار] فیزیک یک الکترون را نشان می‌دهد که درون یک چاه پتانسیل تولیدشده توسط

پروتون به دام افتاده است. اما همان‌طور که کشف کردیم اتفاقات بسیار زیادی در خلال اندرکنش می‌تواند رخ دهد. نمودار دوم در شکل ۵-۱۰ نشان می‌دهد که فوتون، تبدیل به جفت الکترون-پوزیترون می‌شود و این فرایند نیز باید در محاسبات سطوح انرژی ممکن الکترون لحاظ شود. این و بسیاری از نمودارهای دیگر، وارد محاسبات شده و در نتیجه نهایی تصحیحاتی جزئی را اعمال می‌کنند. بت به‌درستی اثرات مهم نمودارهای "تک حلقه" که در شکل دیده می‌شود را وارد محاسبات کرد و متوجه شد که این کار به میزان جزئی سطوح انرژی را جابجا می‌کند و به‌تبع آن جزئیات طیف نور مشاهده‌شده را نیز تغییر می‌دهد.



شکل ۵-۱۰: اتم هیدروژن

نتایج او با اندازه‌گیری‌های لمب تطابق داشت. به‌عبارت‌دیگر QED ، مجبورمان کرد که اتم هیدروژن را به‌صورت مجموعه‌ای از ذرات زیراتمی تصور کنیم که وزوزکنان (شبیه به صدایی که برای جریان الکتریکی در ذهنمان داریم) دائماً در حال به وجود آمدن و از بین رفتن هستند. جابجایی لمب اولین برخورد مستقیم بشریت با این نوسانات کوانتومی اثیری[۱] (اِتِری – ماده‌ای که تصور می‌شد در فضای خالی وجود دارد) بود.

برای سایر شرکت‌کنندگان شلتر آیلند، ریچارد فاینمن و جولیان شوینگر[۲]، خیلی طول نکشید تا چوب را بگیرند (مثل

[۱] . Ether

[۲] . Julian Schwinger

مسابقات دو امدادی) و پس از گذشت چند سال، QED به‌صورت نظریه‌ای توسعه یافت که امروزه می‌بینیم – نسخه اولیه نظریه میدان کوانتومی و نظریات بعدی که اندرکنش‌های قوی و ضعیف را توضیح می‌دادند. فاینمن، شوینگر و فیزیکدانی ژاپنی به نام سین ایتیرو توموناگا[۱] مشترکا جایزه نوبل سال ۱۹۶۵ را "به خاطر کار بنیادی‌شان در الکترودینامیک کوانتومی که تأثیر عمیقی بر فیزیک ذرات بنیادی داشت" کسب کردند. نتایج تأثیرگذاری که در ادامه خواهیم دید.

[۱] . Sin-Itiro Tomonaga

فصل یازدهم

فضای خالی، خالی نیست

این‌طور نیست که هر چیزی در دنیا از اندرکنش بین ذرات باردار نشأت بگیرد. QED توانایی توضیح فرایندهای "هسته‌ای قوی" که کوارک‌ها را درون پروتون‌ها و نوترون‌ها به هم پیوند می‌دهند ندارد، یا فرایندهای "هسته‌ای ضعیف" که خورشید ما را روشن نگه داشته‌اند. ما نمی‌توانیم کتابی درباره نظریه کوانتوم طبیعت بنویسیم و نیمی از نیروهای بنیادی را

کنار بگذاریم، پس قبل از اینکه وارد مبحث فضای خالی شویم در ابتدای این فصل نکات جامانده را توضیح خواهیم داد.

اولین نکته‌ای که باید تأکید شود این است که نیروهای هسته‌ای قوی و ضعیف دقیقاً باهمان روش نظری میدان کوانتومی تشریح می‌شوند که برای QED استفاده کردیم. به این دلیل است که می‌گوییم کار فاینمن، شوینگر و توموناگا نتایج شگرفی دارد. درمجموع نظریه‌ای که این سه نیرو را توضیح می‌دهد با عنوان نسبتاً ساده "مدل استاندارد فیزیک ذرات"[۱] نام‌گذاری شده است. در طی نوشتن این کتاب، مدل استاندارد توسط بزرگ‌ترین و پیچیده‌ترین ماشین ساخته

[۱] . Standard Model of Particle Physics

دست بشر، تحت شدیدترین آزمون‌ها تا نقطه شکستش قرار دارد: برخورددهنده بزرگ هادرونی سرن. (LHC). "نقطه شکست" واژه درستی است، زیرا در غیاب چیزی که هنوز کشف نشده (بوزون هیگز)، مدل استاندارد نمی‌تواند در انرژی‌هایی که دو پروتون را تقریباً با سرعت نور برخورد می‌دهند، پیش‌بینی‌های معنی‌داری انجام دهد. به زبان این کتاب، قوانین کوانتومی شروع به تولید ساعت‌هایی می‌کنند که طول عقربه‌شان بزرگ‌تر از ۱ است که این یعنی فرایندهای مشخصی که در آن نیروی هسته‌ای ضعیف دخیل است احتمال وقوعی بزرگ‌تر از ۱۰۰٪ خواهند داشت. این حرف کاملاً اشتباه است و به همین دلیل LHC قرار است که چیز جدیدی برای ما کشف کند. رقابت بر سر این است که بتوان از

میان صدها میلیون برخورد پروتون‌ها که در هر ثانیه در عمق ۱۰۰ متری زیر رشته‌کوه جورا اتفاق می‌افتد، این چیز جدید را شناسایی کرد.

مدل استاندارد درمانی برای این بیماری نقص عملکرد احتمالات خود دارد که نام آن را "مکانیزم هیگز" نهاده‌اند. اگر این مکانیزم درست باشد، LHC باید بتواند یک ذره جدیدی از طبیعت را مشاهده کند – بوزون هیگز – و در صورت وجود این ذره، دیدگاه ما نسبت به فضای خالی تغییر عمیقی خواهد کرد. ما بعداً در این فصل درباره مکانیزم هیگز صحبت خواهیم کرد، اما بهتر است قبل از آن مختصری درباره نظریه موفق ولی ناقص مدل استاندارد صحبت کنیم. [در تاریخ ۴ جولای ۲۰۱۲ (چند ماه پس از انتشار این کتاب) پژوهشگران CERN

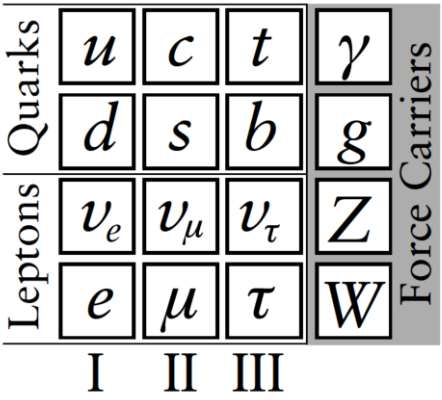
اعلام کردند که بوزون هیگز که وجودش در سال ۱۹۶۴ توسط پیتر هیگز پیشنهاد شده بود را کشف کرده و مدل استاندارد فیزیک را تکمیل کردند]

مدل استاندارد فیزیک ذرات

در شکل ۱-۱۱ ما تمامی ذرات شناخته‌شده را لیست کرده‌ایم. تا زمانی که ما این کتاب را می‌نویسیم، این‌ها اجزای سازنده جهان ما هستند اما انتظار داریم که بیشتر باشند – شاید بوزون هیگز را ببینیم یا ذره‌ای جدید که مرتبط با ماده تاریکی است که فراوان ولی رازآلود است و ما برای توضیح جهان در مقیاس بزرگش به آن نیاز داریم. یا شاید ذرات ابر

متقارن که نظریه ریسمان‌ها[۱] منتظر آن است یا شاید خصوصیاتی از تحریکات کالوزا-کلین[۲] مرتبط با ابعاد دیگر فضا یا تکنی کوارک‌ها[۳] یا لپتو کوارک‌ها[۴] یا .... تفکرات نظری دامنه گسترده‌ای دارند و وظیفه آزمایشگران LHC این است که این دامنه را کوچک‌تر کنند و نظریه‌های اشتباه را رد کرده و مسیر درست را مشخص کنند.

۱. String Theory
۲. Kaluza-Klein
۳. Techniquarks
۴. Leptoquarks



شکل ۱-۱۱: ذرات طبیعت

هر چیزی که شما قادر به دیدن و لمس کردنش هستید؛ هر ماشین بی‌روح و هر موجود زنده، هر سنگ و هر انسانی بر روی کره زمین، هر سیاره و هر ستاره‌ای که در هرکدام از

۳۵۰ میلیارد کهکشان در جهان قابل‌مشاهده وجود دارد، از چهار ذره ستون اول تشکیل شده‌اند. شما تنها از سه تای این ذره‌ها درست شده‌اید: کوارک‌های "بالا"[۱] و "پایین"[۲] و الکترون. کوارک‌ها هسته اتم را ساخته‌اند و همان‌طور که دیدیم الکترون‌ها نقش خود را در واکنش‌های شیمیایی ایفا می‌کنند. ذره دیگری که در ستون اول وجود دارد و الکترون نوترینو[۳] نامیده می‌شود ممکن است برای شما ناآشنا باشد اما در هر ثانیه حدود ۶۰ میلیارد از آن‌ها که از خورشید تابیده شده‌اند، از هر سانتی‌متر مربع بدن شما عبور می‌کنند. آن‌ها

[۱]. Up Quark

[۲]. Down Quark

[۳]. Electron Neutrino

معمولاً مستقیماً بدون هیچ مانعی از بدن شما و حتی از درون زمین عبور می‌کنند که به همین دلیل است که آن‌ها را نه تابه‌حال دیده‌اید و نه حسشان کرده‌اید. اما همان‌طور که در ادامه خواهیم دید آن‌ها نقش مهمی در فرایندهایی که خورشید را به کار می‌اندازند، ایفا می‌کنند و به همین دلیل آن‌ها امکان زندگی را به شما داده‌اند.

این چهار ذره مجموعه‌ای را تشکیل می‌دهند که به نسل اول ماده معروف‌اند و به همراه چهار نیروی بنیادی طبیعت، می‌توانند یک دنیا را بسازند. به دلایلی که هنوز نمی‌دانیم، طبیعت دو نسل دیگر نیز در اختیار ما قرار داده – مشابه با مجموعه اول اما بسیار سنگین‌تر. آن‌ها در ستون‌های دوم و

سوم شکل ۱-۱۱ نشان داده شده‌اند. مخصوصاً کوارک "رو"[۱] بسیار سنگین‌تر از سایر ذرات بنیادی است. این ذره در شتاب‌دهنده تواترون[۲] در فرمی لب نزدیک شیکاگو در سال ۱۹۹۵ کشف شد و جرمش حدوداً ۱۸۰ برابر پروتون است. اینکه چرا کوارک "رو" در عین نقطه‌ای شکل بودنش (مانند الکترون)، چنین جرم سنگینی دارد هنوز یک معما است. گرچه این نسل‌های اضافی ماده نقشی در اتفاقات روزمره جهان ایفا نمی‌کنند، ظاهراً آن‌ها نقش کلیدی خود را در لحظات آغازین انفجار بزرگ ایفا کرده‌اند.... که البته این بحث دیگری است.

---

۱. Top Quark

۲. Tevatron

همچنین در شکل ۱-۱۱ در ستون راست ذرات حمل‌کننده نیرو نشان داده شده‌اند. گرانش در این جدول نشان داده نشده است زیرا هنوز نظریه کوانتومی از گرانش نداریم که بتوانیم به‌سادگی آن را در ساختار مدل استاندارد جای دهیم. البته نه به این معنی که اصلاً وجود نداشته باشد؛ هدف از نظریه ریسمان این است که گرانش را نیز وارد بازی کنیم، اما تا به امروز موفقیت محدودی داشته است. ازآنجایی‌که گرانش بسیار ضعیف است، نقش مهمی در آزمایشات فیزیک ذرات ایفا نمی‌کند و به این دلیلِ عملکردی، ما دراین‌باره بیشتر نخواهیم گفت. در فصل قبل یاد گرفتیم که فوتون‌ها چگونه مسئول هدایت نیروی الکترومغناطیسی بین ذرات باردار هستند و رفتار این ذره با قانون انشعاب توصیف شد. ذرات W و Z

همین کار را برای نیروی ضعیف انجام می‌دهند و گلوئن[۱] نیز نقش هادی نیروی قوی را دارد. اولین تفاوت در توصیفات کوانتومی نیروها ازاینجا ناشی می‌شود که قوانین انشعاب متفاوت است. این قوانین تقریباً به همان سادگی هستند و ما بعضی از آن‌ها را در شکل ۲-۱۱ آورده‌ایم. شباهت نیروهای ضعیف و قوی با QED فهم اصول آن‌ها را ساده‌تر می‌کند؛ ما فقط باید بدانیم که قوانین انشعاب به چه صورت‌اند و سپس می‌توانیم همانند QED در فصل قبل برای آن‌ها نمودارهای فاینمن را رسم کنیم.خوشبختانه تغییر قانون انشعاب عامل تمامی تفاوت‌ها در دنیای فیزیکی است.

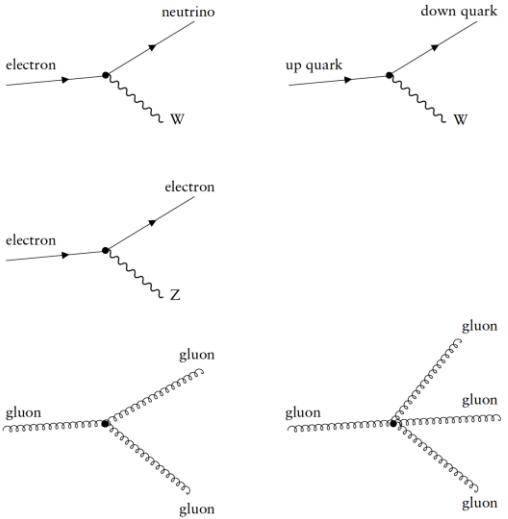
---

[۱] . Gluon

اگر این کتاب مختص فیزیک ذرات بود، ما باید شروع به توضیح تک‌تک قوانین انشعاب در فرایندهای شکل ۲-۱۱ می‌کردیم. این قوانین که با نام قوانین فاینمن[۱] شناخته می‌شوند به شما، یا به یک برنامه کامپیوتری، اجازه می‌دهند که احتمال وقوع یک فرایند را محاسبه کنید، همان‌طور که در فصل قبل ما برای QED محاسبه کردیم. این قوانین یکی از مهم‌ترین چیزهای جهان را محاسبه می‌کنند اما جالبش اینجاست که می‌توان آن‌ها (قوانین) را در چند شکل و قانون ساده خلاصه کرد. اما این کتاب منحصراً درباره فیزیک ذرات نیست، پس به‌جای آن ما توجهمان را به نمودار بالا – راست جلب می‌کنیم، زیرا این انشعابی بسیار مهم برای حیات ما در

[۱]. Feynman Rules

زمین است. این نمودار یک کوارک "بالا" را نشان می‌دهد که پس از گسیل ذره W به یک کوارک "پایین" تبدیل می‌شود (منشعب می‌شود)، و این رفتار عامل اتفاقات درون هسته خورشید است.



شکل ۲-۱۱: تعدادی از قوانین انشعاب برای نیروهای قوی و ضعیف

خورشید دریایی گازی از پروتون‌ها، نوترون‌ها، الکترون‌ها و فوتون‌هاست که حجمی برابر با ۱۰۰۰۰۰۰ زمین دارد و تحت گرانش خود در حال فروپاشی[۱] است. این فشردگی وحشتناک دمای هسته را به ۱۵ میلیون درجه رسانده است و در این دماها، پروتون‌ها شروع به همجوشی کرده و هسته هلیم را تشکیل می‌دهند. فرایندهای همجوشی انرژی ساطع می‌کنند که این انرژی فشار لایه‌های خارجی ستاره را افزایش داده و با فشار ناشی از گرانش تعادل برقرار می‌کنند. ما در فصل بعد (سخن پایانی) در مورد این تعادل بیشتر خواهیم گفت، اما

[۱]. Collapse

فعلاً می‌خواهیم توضیح دهیم معنی اینکه "پروتون‌ها باهم همجوشی[۱] می‌کنند" چیست؟

این جمله ساده به نظر می‌رسد، اما مکانیزم دقیق این همجوشی در هسته خورشید یکی از چالش‌برانگیزترین مباحث علمی در دهه‌های ۱۹۲۰ و ۳۰ بود. دانشمند انگلیسی آرتور ادینگتون[۲] اولین کسی بود که پیشنهاد داد منبع انرژی خورشیدی، همجوشی هسته‌ای است، اما با توجه به قوانینِ تا آن موقع شناخته‌شده فیزیک، سریعاً این ایراد مطرح شد که احتمالاً دما در خورشید بسیار کمتر از چیزی است که برای چنین فرایندهایی نیاز است. ادینگتون بر رو حرفش پافشاری

[۱]. Fuse

[۲]. Arthur Eddington

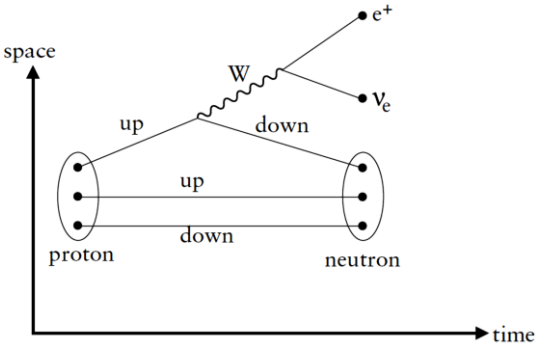
کرد و این‌گونه پاسخ داد " هلیمی که امروزه به کار می‌بریم باید زمانی و در جایی تشکیل شده باشد. ما با منتقدینی که اصرار دارند ستارگان دمای کافی برای این فرایند ندارند، وارد بحث نمی‌شویم. به آن‌ها می‌گوییم که بروید و جای داغ‌تری پیدا کنید".

مشکل این است که زمانی که دو پروتون در هسته خورشید با سرعت زیاد به هم نزدیک می‌شوند، به دلیلی نیروی الکترومغناطیسی همدیگر را دفع می‌کنند (یا به زبان QED با تبادل فوتون). برای اینکه آن‌ها باهم همجوشی کنند، باید آن‌قدر به هم نزدیک شوند که تقریباً همدیگر را لمس کنند و ادینگتون و همکارانش می‌دانستند که پروتون‌های خورشید به اندازه کافی سرعت ندارند (زیرا خورشید به میزان کافی گرم

نیست) تا بتواند بر نیروی دافعه الکترومغناطیس متقابلشان غلبه کند. برای حل این مشکل، ذره W پادرمیانی می‌کند. به‌طور ناگهانی یکی از پروتون‌ها با تبدیل یکی از کوارک‌های بالایش به کوارک پایین (که در قانون انشعاب در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است)، تبدیل به نوترون می‌شود. حال این نوترون جدید و پروتون دومی می‌توانند به‌سادگی به هم نزدیک شوند، زیرا نوترون بار الکتریکی ندارد. به زبان نظریه میدان کوانتومی، هیچ تبادل فوتونی بین نوترون و پروتون صورت نمی‌گیرد که عاملی برای دافعه باشد. با خلاصی از شر نیروی الکترومغناطیسی، پروتون و نوترون می‌توانند همجوشی کنند (در نتیجه نیروی هسته‌ای قوی) و دوترون[۱] را بسازند و

[۱]. Deutron

به‌سرعت این اتفاق باعث تشکیل هلیم می‌شود و انرژی حیات‌بخشی را ساطع می‌کند. این فرایند در شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است که نشان می‌دهد ذره W خیلی هم در محل باقی نمی‌ماند؛ در عوض تبدیل یک پوزیترون و یک نوترینو می‌شود – این اتفاق منبع همان نوترینوهایی است که به مقدار زیادی از درون بدن شما عبور می‌کنند. دفاع محکم ادینگتون از نظرش مبنی بر اینکه انرژی خورشیدی ناشی از همجوشی است درست بود، گرچه راه‌حل مشکل موجود را نمی‌دانست. ذره مهم W و همتای آن Z نهایتاً در سال ۱۹۸۰ در سِرن کشف شدند.



شکل ۳-۱۱: تبدیل پروتون به نوترون ناشی از زوال ضعیف و گسیل پوزیترون و نوترینو. بدون این اتفاق خورشید نخواهد سوخت.

برای نتیجه‌گیری از بررسی ما از مدل استاندارد، ما به نیروی قوی می‌پردازیم. قانون انشعاب به صورتی است که تنها کوارک‌ها می‌توانند به گلوئن ها تبدیل شوند. در حقیقت آن‌ها

بیشتر از هر کار دیگری، این کار را انجام می‌دهند. این تمایل برای گسیل گلوئن دلیل نام‌گذاری نیروی قوی است و همچنین عامل این خاصیت است که انشعاب گلوئن می‌تواند بر دافعه الکترومغناطیسی غلبه کند؛ در غیر این صورت پروتونِ با بار الکتریکی مثبت متلاشی می‌شد. خوشبختانه نیروی قوی نمی‌تواند خود را به دوردست برساند. گلوئن ها قبل از اینکه دوباره منشعب شوند، تمایلی به جابجایی به فاصله‌ای بیشتر از ۱ فمتو متر ($۱۰^{-۱۵}$ متر) ندارند. دلیل اینکه چرا تأثیر گلوئن ها بسیار بُرد کوتاهی دارند اما فوتون‌ها کل دنیا را می‌نوردند این است که گلوئن ها می‌توانند به سایر گلوئن ها منشعب شوند که در دو تصویر پایانی شکل ۲-۱۱ می‌بینیم. این اتفاق باعث تمایز زیادی بین نیروی قوی و

نیروی الکترومغناطیسی می‌شود و به میزان شدیدی فعالیت‌های این نیرو (قوی) را محدود به درون هسته اتم می‌کند. فوتون‌ها چنین انشعاب به خودی ندارند و این از شانس خوب ماست، زیرا در غیر این صورت شما مقابلتان را نمی‌دیدید، زیرا فوتون‌هایی که به سمت شما می‌آمدند با فوتون‌هایی که در اطراف حرکت می‌کردند برخورد کرده و همدیگر را پراکنده می‌کردند. این یکی از شگفتی‌های طبیعت است که ما می‌توانیم ببینیم و یکی از مفاهیمی است که به ما یادآوری می‌کند فوتون‌های بسیار به‌ندرت با یکدیگر اندرکنش دارند.

ما توضیح ندادیم که این قوانین از کجا آمده‌اند و همچنین نگفتیم که چرا جهان چنین ذراتی دارد. دلیل خوبی برایش

داریم: ما جواب واقعی این دو سؤال را نمی‌دانیم. ذراتی که جهان ما را ساخته‌اند – الکترون،نوترینو و کوارک – اولین هنرپیشگانی هستند که قرار است داستان‌های طبیعت را برای ما نشان دهند، اما تا به امروز ما دلیل قانع‌کننده‌ای نیافتیم که چرا این ذرات این نقش‌ها را ایفا می‌کنند.

بااین‌حال چیز درستی که می‌دانیم این است که زمانی که مجموعه‌ای از ذرات را داشته باشیم، انتظار داریم با توجه به قوانین انشعاب رفتار کنند. قوانین انشعاب چیزی نیستند که فیزیکدانان از خودشان درآورده باشند – نظریه‌ای که اندرکنش بین ذرات را توضیح می‌دهد باید شامل نظریه میدان

کوانتومی به انضمام چیزی به نام تقارن پیمانه‌ای[۱] باشد، و این انشعابات ازآنجا ناشی شده‌اند. بحث درباره منشأ قوانین انشعاب ما را به جایی بسیار دورتر از موضوع این کتاب می‌برد اما دوباره متذکر می‌شویم که این قوانین بسیار ساده‌اند: جهان از ذراتی تشکیل شده که حرکت کرده و با توجه به مجموعه‌ای از قوانین جهش و انشعاب باهم اندرکنش دارند. ما می‌توانی از این قوانین استفاده کرده و احتمال "اتفاق افتادن چیزی" را با جمع‌کردن مجموعه‌ای از ساعت‌ها به دست آوریم – برای هر حالتی که یک اتفاق ممکن است بیافتد، یک ساعت خاص وجود دارد.

---

[۱] . Guage Symmetry

منشأ جرم

با معرفی این ایده که ذرات می‌توانند جهش کرده و منشعب شوند، ما وارد حوزه نظریه میدان کوانتومی شدیم و به میزان زیادی این جهش و انشعاب، تمامی داستان است. البته ما نسبتاً در مورد توضیح جرم غافل بودیم که دلیل هم داشت و به دنبال موقعیت مناسبی می‌گشتیم.

فیزیک ذرات نوین به دنبال پاسخ به این سؤال است که "منشأ جرم چیست؟" و پاسخ این سؤال را به طریق زیبا و هوشمندانه‌ای به ذره جدیدی نسبت می‌دهد – جدید به این دلیل که هنوز در این کتاب با آن مواجه نشده‌ایم و همچنین به این دلیل که هنوز کسی به‌طور رودررو با آن مواجه نشده

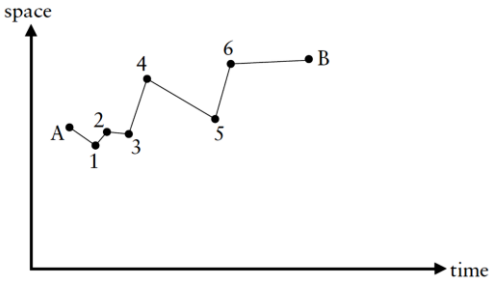
است. این ذره "بوزون هیگز" نام دارد و LHC به‌شدت به دنبال آن است. در زمان نگارش این کتاب در سپتامبر ۲۰۱۱ روزنه‌های امیدی برای وجود ذره‌ای هیگز مانند در داده‌های LHC وجود دارد، اما هنوز تعداد رخداد ها برای تصمیم‌گیری کفایت نمی‌کنند[۱]. ممکن است در زمان خواندن این کتاب توسط شما، این شرایط تغییر کرده باشد و هیگز به واقعیت تبدیل شود. شاید هم این علائم پس از بررسی‌های دقیق‌تر رد شوند. نکته بسیار هیجان‌انگیز درباره سؤال منشأ جرم این

[۱]. منظور از "رخداد"، برخود پروتون-پروتون است. از آنجایی که فیزیک بنیادین مثل بازی شمارش می‌ماند (یعنی با احتمالات سروکار دارد) لازم است که دائما پروتون‌ها را برخورد داده و بتوانیم تعداد کافی از رخدادهای نادر که در آن‌ها ذره هیگز تولید می‌شود را بدست آوریم. "تعداد کافی" بستگی به مهارت آزمایشگران دارد و اینکه چقدر در حذف داده‌های پرت اطمینان داشته باشند.

است که جواب آن بسیار شگفت‌انگیز بوده و فراتر از خواسته ما خواهد بود (یعنی اگر پاسخش را بیابیم، سوای فهمیدن منشأ جرم، ابهامات بسیار زیادی نیز روشن خواهد شد). بیایید این جمله آخر را بیشتر بررسی کنیم.

زمانی که ما در QED درباره فوتون‌ها و الکترون‌ها صحبت کردیم، برای هرکدام قانون انشعابی تعریف کردیم و گفتیم که باهم فرق دارند- ما از P(A،B) برای قانونی که مربوط به جهش الکترون از A به B می‌شد استفاده کردیم و از L(A،B) برای همین قانون در مورد فوتون. حال وقتش است که بگوییم چرا این دو قانون باهم تفاوت دارند. تفاوت به این دلیل است که الکترون‌ها در دو نوع وجود دارند (یعنی به دو طریق متفاوت اسپین دارند) اما فوتون‌ها به سه شکل هستند،

اما این تفاوت خاص در اینجا برای ما مهم نیست. تفاوت دیگرشان در این است که الکترون جرم دارد اما فوتون ندارد. این چیزی است که می‌خواهیم راجع به آن صحبت کنیم.



۴-۱۱: ذره جرم‌داری که از A به B حرکت می‌کند.

شکل ۴-۱۱ روشی را نشان می‌دهد که ما مجازیم درباره انتشار ذرات جرم‌دار بیاندیشیم. در شکل ذره‌ای را می‌بینیم که

از A به B طی مراحلی جهش می‌کند. این ذره از A به نقطه ۱ می‌رود، از ۱ به ۲ و به همین ترتیب ادامه داده تا نهایتاً از ۶ به B می‌پرد. نکته جالب این است که زمانی که به این روش بنویسیم، قانون هر جهش برابر با قانون جهش برای ذره‌ای بدون جرم است، اما با یک تصحیح: هر بار که ذره جهتش را عوض می‌کند، ما باید یک قانون جدید کوچک‌شدگی را اعمال کنیم به این شکل که مقدار این کوچک‌شدگی به‌طور معکوسی با جرم ذره متناسب است. این یعنی در هر حرکت، ساعت‌های ذرات سنگین‌تر نسبت به ساعت‌های ذرات سبک‌تر کوچک‌شدگی کمتری را به خود می‌بینند. باید تأکید کنیم که این قانونِ ویژه‌ای نیست. کوچک‌شدگی و حرکت زیگزاگ، هر دو مستقیماً از قوانین فاینمن برای انتشار ذرات جرم دارد

مشتق می‌شوند و هیچ پیش‌فرض دیگری ندارند[۱]. شکل ۴-۱۱ فقط یکی از راه‌های ممکن برای حرکت ذره سنگین از A به B را نشان می‌دهد، یعنی با ۶ تغییر مسیر و ۶ ضریب کاهنده. برای به دست آوردن ساعت نهایی مرتبط با ذره‌ای که از A به B می‌رود ما باید طبق معمول، بینهایت ساعتی که مربوط به تمامی راه‌های ممکن برای حرکت زیگزاگی ذره از A به B هستند را باهم جمع بزنیم. ساده‌ترین راه، راه مستقیم و بدون هرگونه تغییر جهت است، اما مسیرهایی که تغییر جهت‌های

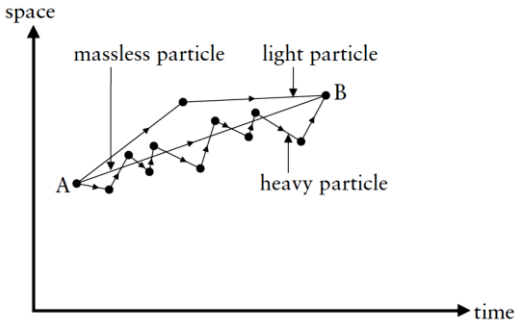
[۱]. توانایی برای تفکر درباره یک ذره سنگین به عنوان ذره بدون جرم بعلاوه یک قانون چرخش، از این‌جا ناشی می‌شود که $P(A,B)=L(A,B)+L(A,1)L(1,B)S+L(A,1)L(1,2)L(2,B)S^2+L(A,1)L(1,2)L(2,3)L(3,B)S^3+....$ که S ضریب کاهنده مرتبط با یک چرخش است و ما می‌دانیم که باید تمام نقاط ممکن میانی ۱، ۲ و ۳ را جمع بزنیم.

زیادی دارند نیز باید در نظر گرفته شوند. برای ذراتی که جرم صفر دارد، ضریب کاهنده برای هر تغییر جهت نابودکننده است، زیرا بینهایت می‌شود. به‌عبارت‌دیگر ما باید پس از اولین تغییر جهت، ساعت را به صفر تقلیل دهیم. پس تنها راهی که برای ذرات بدون جرم وجود دارد راه مستقیم است – هیچ ساعت دیگری برای سایر مسیرها وجود نخواهد داشت. این همان چیزی است که ما انتظارش را داشتیم: این یعنی ما می‌توانیم قانون جهش را برای ذرات بدون جرم استفاده کنیم، زمانی که جرمی ندارند (جمله‌ای که در ابتدای همین پاراگراف مطرح شد). بااین‌حال برای ذرات با جرم غیر صفر، تغییر جهت‌ها مجازند و برای ذرات با جرم ناچیز، ضریب کاهنده آن‌قدر تأثیرگذار است که مسیرهای با تغییر جهت‌های زیاد را

عملاً از بین می‌برد. پس محتمل‌ترین مسیرها آن‌هایی هستند که کمترین تغییر جهت را دارند. به‌طور برعکس ذرات سنگین‌تر خیلی هم تحت تأثیر این کوچک‌شدگی قرار نمی‌گیرند و معمولاً می‌توان آن‌ها را با مسیرهایی پر از زیگزاگ نشان داد. این یعنی می‌توان ذرات سنگین را به این شکل نگاه کرد که انگار همان ذرات بدون جرم هستند ولی با زیگزاگ‌های فراوانی در طول مسیرشان از A به B می‌روند. میزان این زیگزاگ شدگی‌ها (تغییر جهت دادن‌ها) چیزی است که ما جرم می‌نامیم.

این گفته‌ها نسبتاً جالب‌اند، زیرا راه جدیدی برای تفکر درباره جرم یافتیم. شکل ۵-۱۱ سه راه حرکت از A به B را برای سه ذره با جرم افزاینده نشان می‌دهد. در هر مورد برای

هر دانه از تغییر جهت‌ها، قانونی می‌توان استفاده کرد که مشابه با قانون ذرات بدون جرم است (چون هرکدام از تغییر جهت‌ها به‌تنهایی مستقیم هستند) و برای هرکدام از آن‌ها باید به‌عنوان جریمه، ساعت را کوچک کنیم. هنوز زود است که هیجان ذره شویم، زیرا واقعاً مفهوم بنیادی‌ای را توضیح نداده‌ایم. چیزی که فعلاً مطرح کرده‌ایم این است که می‌توان به‌جای واژه "جرم" از "تمایل به حرکت زیگزاگی" استفاده کرد. به این دلیل مجاز به انجام این کار هستیم که برای توضیح انتشار ذرات جرم‌دار، هر دو این‌ها ازلحاظ ریاضیاتی معادل هستند. بااین‌حال، گفته‌های ما جالب به نظر می‌رسند و همان‌طور که در ادامه کشف خواهیم کرد، حقیقت این مطلب فراتر از تنها تشابه ریاضیاتی است.



شکل ۵-۱۱: ذرات با سه جرم متفاوت که از A به B می‌روند. هرقدر ذره سنگین‌تر باشد تعداد تغییر جهت‌هایش بیشتر است.

حال قصد داریم وارد قلمرو تفکرات محض شویم – اگرچه ممکن است تا زمانی که شما این کتاب را می‌خوانید، نظریه‌ای که ما قرار است راجع به آن صحبت کنیم تأیید شده باشد. LHC در حال حاضر مشغول برخورد دادن پروتون‌ها با

مجموع انرژی ۷ TeV است. "TeV" یعنی تِرا الکترون‌ولت و ۷ TeV یعنی اگر الکترون را در اختلاف‌پتانسیل ۷ میلیون میلیون ولت شتاب دهیم، چنین انرژی‌ای کسب می‌کند. برای درک بهتر، به‌طور تقریبی این انرژی برابر با انرژی است که ذرات زیراتمی در یک تریلیونیم ثانیه پس از انفجار بزرگ داشتند و این انرژی برای تولید جرمی برابر با ۷۰۰۰ پروتون کافی است (طبق معادله $E=mc^2$ انیشتین). این انرژی نصف انرژی‌ای است که دستگاه برای تولید آن طراحی شده است؛ اگر لازم باشد LHC بیشتر از این‌ها را تولید خواهد کرد.

یکی از اولین دلایلی که ۸۵ کشور جهان دورهم جمع شده‌اند و چنین آزمایش شجاعانه و عظیمی را ساخته و اجرا می‌کنند این است که می‌خواهند مکانیزمی را بیابند که

مسئول ایجاد جرم در ذرات بنیادی است. موردقبول‌ترین نظریه برای منشأ جرم، نظریه‌ای است که از توضیح حرکت زیگزاگی استفاده می‌کند: این نظریه مدعی است ذره‌ای وجود دارد که ذرات دیگر در طول مسیر حرکتشان در جهان با آن مواجه می‌شوند.

این ذره بوزون هیگز است. با توجه به مدل استاندارد، بدون وجود هیگز،ذرات بنیادی بدون هیچ‌گونه زیگزاگی حرکاتشان را انجام داده و این اتفاق باعث می‌شود که جهان مکان کاملاً متفاوتی باشد. اما اگر ما فضای خالی را با ذرات هیگز پرکنیم، آن‌ها می‌توانند باعث انحراف ذرات شده و مسیر ذرات را زیگزاگی کنند و همان‌طور که یاد گرفتیم این کار باعث تولید جرم می‌شود. مثل این است که بخواهیم از درون میخانه

شلوغی عبور کنیم – اگر کسی بخواهد از در ورودی میخانه تا محل فروش نوشیدنی‌ها حرکت کند، دائماً باید از لابه‌لای مردم عبور کرده و با تغییر جهت‌های فراوانی به جلو برود.

مکانیزم هیگز به‌افتخار نظریه پردار ادینبورگی، پیتر هیگز[۱] نام‌گذاری شده است و این مکانیزم اولین بار در سال ۱۹۶۴ پای خود را به فیزیک ذرات باز کرد. این ایده خیلی پخته و جاافتاده بود، زیرا تا همان زمان اشخاص زیادی نیز چنین ایده‌هایی را مطرح کرده بودند- خود هیگز ، رابرت بروت و فرانکویس انگلرت از بروکسل و جرالد گورالنیک، کارل هگن و

[۱] . Peter Higgs

تام کیبل[۱] از لندن. کار آن‌ها نیز بر پایه کار افراد دیگری از قبل استوار بود ازجمله هایزنبرگ، یوچیرو نامبو، جفری گلدستون، فیلیپ اندرسون و واینبرگ[۲]. فهم کامل این ایده که شلدون گلاشو، عبدالسلام[۳] و واینبرگ به خاطر آن جایزه نوبل ۱۹۷۹ را کسب کردند، همان مدل استاندارد فیزیک ذرات است. این ایده بسیار ساده است – فضای خالی واقعاً خالی نیست و باعث ایجاد زیگزاگ و بنابراین جرم می‌شود. واضح است که باید توضیح بیشتری بدهیم. چطور ممکن است

[۱]. Robert Brout, Francois Englert, Gerald Guralnic, Carl Hagan, Tom Kibble

[۲]. Yoichiro Nambu, Jeffery Goldstone, Philip Anderson, Weinberg

[۳]. Sheldon Glashow, Abdus Salam

فضای خالی پر از ذرات هیگز باشد - آیا ما این ذرات را در زندگی روزمره‌مان احساس نمی‌کنیم و چطور شده است که چنین اتفاقی افتاده است؟ این پیشنهاد عجیب به نظر می‌رسد. ما همچنین نگفتیم که چطور بعضی ذرات (مانند فوتون‌ها) جرم ندارند، اما بعضی دیگر (مانند بوزون‌های W و کوارک‌های رو) جرمی معادل با یک اتم طلا یا نقره دارند؟

پاسخ به سؤال دوم حداقل به‌طور سطحی ساده‌تر از سؤال [های] اول است. ذرات تنها ناشی از قانون انشعاب باهم اندرکنش دارند و این قانون شامل ذرات هیگز نیز می‌شود. قانون انشعاب برای کوارک رو به‌این‌ترتیب است که می‌تواند به یک ذره هیگز بپیوندند و کوچک‌شدگی ساعتش (یادتان باشد که تمامی قوانین انشعاب همراه با یک ضریب کاهنده هستند)

کمتر از زمانی است که این اتفاق برای کوارک‌های سبک‌تر بیافتد. به همین دلیل کوارک "رو" سنگین‌تر از کوارک "بالا" است. البته این توجیه به ما نگفت که چرا قانون انشعاب این‌گونه عمل می‌کند. پاسخ فعلی ما به این شبهه این پاسخ ناامیدکننده است "زیرا این‌گونه است". این سؤال در رده سؤال‌هایی مثل "چرا سه نسل از ذرات وجود دارد" یا "چرا گرانش این‌قدر ضعیف است" قرار می‌گیرد. به همین ترتیب فوتون‌ها قانون انشعابی ندارند که آن‌ها را به ذره هیگز پیوند دهد و درنتیجه با همدیگر اندرکنشی ندارند. همین دلیل باعث می‌شود که آن‌ها در حرکتشان زیگزاگ اتفاق نیافتد و درنتیجه جرم نداشته باشند. گرچه ما تقصیر کار را گردن کس دیگری انداختیم (منشأ جرم را به هیگز ربط دادیم)، این توضیح به

نظر قابل‌قبول می‌آید و اگر بتوانیم ذرات هیگز را در LHC بیابیم و پیوندشان را با سایر ذرات بررسی کنیم، می‌توانیم صریحاً مدعی شویم که بینش جدید و هیجان‌انگیزی درباره نحوه عملکرد جهان به دست آورده‌ایم.

توضیح اولین سؤال از مجموعه سؤال اول ما کمی سخت‌تر است – این سؤال که چرا فضای خالی پر از ذرات هیگز است؟ برای شروع باید یک مسئله را روشن کنیم: فیزیک کوانتوم می‌گوید که چیزی به‌عنوان فضای خالی وجود ندارد. در حقیقت چیزی که ما نامش را "فضای خالی" گذاشته‌ایم دریای جوشانی از ذرات زیراتمی است که تحت هیچ شرایطی نمی‌توان آن‌ها را جارو کرده و فضا را از آن‌ها خالی کرد. زمانی که این را فهمیدیم دیگر خیلی هم فکرمان را درگیر این

مطلب نمی‌کنیم که چرا امکان دارد فضای خالی پر از ذرات هیگز باشد. بگذاریم گام‌به‌گام پیش برویم.

محدوده کوچکی را در فضا تصور کنید که در کهکشانی در گوشه‌ای از جهان به فاصله میلیون‌ها سال نوری قرار دارد. در گذر زمان نمی‌توان از پدیدار و ناپدید شدن ذرات از هیچ‌چیز جلوگیری کرد. چرا؟ زیرا قوانین مرتبط با خلق و زوال زوج ذرات و پاد ذرات امکان وقوع این فرایند را می‌دهد. مثالی از این مطلب را می‌توان در پایین‌ترین نمودار در شکل ۵-۱۰ دید: فرض کنید که عرصه را کاملاً خالی کردید مگر برای حلقه الکترون – در این صورت این نمودار مربوط به الکترون-پوزیترونی می‌شود که از هیچ پدیدار شده و دوباره به هیچ برمی‌گردند. ازآنجایی‌که رسم حلقه هیچ‌کدام از قوانین QED

را نقض نمی‌کند می‌توان قبول کرد که این یکی از اتفاقات ممکن است؛ یادتان باشد هر چیزی که امکان وقوع داشته باشد، اتفاق می‌افتد. این احتمال خاص یکی از بینهایت راه‌هایی است که فضای خالی می‌تواند از هیچ، چیزی ایجاد کند و ازآنجایی‌که ما در یک جهان کوانتومی زندگی می‌کنیم کار درست این است که تمامی احتمالات را باهم جمع ببندیم. به‌عبارت‌دیگر خلأ ساختار بسیارغنی ای دارد که می‌تواند تمامی راه‌های به وجود آوردن ذرات از خودش را امکان‌پذیر سازد.

پاراگراف آخر اقدام به معرفی این بحث کرد که خلأ در حقیقت خالی نیست، اما ما تلاش کردیم تا تصویری عادلانه بسازیم که در آن تمامی ذرات بنیادی نقشی را در آن ایفا

کنند. پس این ذره هیگز چه خصوصیتی دارد که آن را متمایز می‌کند؟ اگر خلأ تنها دریای جوشانی از پدیدار و ناپدید شدن ذرات و پادذرات باشد، تمامی ذرات بنیادی جرمی برابر با صفر خواهند داشت – زیرا حلقه‌های کوانتومی نمی‌توانند به‌خودی‌خود عامل جرم باشند[۱]. در عوض ما باید خلأ را با چیز متفاوتی پرکنیم و اینجا جایی است که حمام ذرات هیگز وارد می‌شود. پیتر هیگز عنوان کرد که فضای خالی مملو از ذرات هیگز است[۲] و خود را مقید به توضیحات جزئی‌تری نکرد که چرا این‌گونه است. ذرات هیگز در خلأ باعث ایجاد مکانیزم

[۱]. این نکته زیرکانه از تقارن پیمانه‌ای گرفته شده است که قوانین جهش و انشعاب را ارائه داده است.

[۲]. البته او بسیار آدم فروتنی و از این واژه استفاده نکرد.

زیگزاگ شدگی می‌شوند و در طول زمان این کار باعث اندرکنش با تمامی ذرات جرم‌دار جهان می‌شوند و به‌طور انتخابی مسیر حرکت آن‌ها را تغییر داده و عامل به وجود آمدن جرم می‌شوند. نتیجه خالص این اندرکنش بین ماده معمولی و خلأ پر از ذرات هیگز این است که جهان از یک مکان بدون ساختار تبدیل به مکانی می‌شود که در آن حیات شگفت‌انگیز و گوناگونی وجود داشته و ستارگان، کهکشان‌ها و مردم در آن زندگی می‌کنند.

حال سؤال اصلی این است که خود ذرات هیگز در ابتدا چگونه به وجود آمدند؟ پاسخ این سؤال هنوز به‌طور قطعی مشخص نیست، اما تصور بر این است که آن‌ها باقی‌مانده تغییر

فازی[۱] هستند که اندکی پس از انفجار بزرگ به وقوع پیوسته است. اگر شما آدم صبوری باشید و به شیشه پنجره‌تان در یک عصر زمستانی نگاه کنید، به‌تدریج که از میزان دما کاسته می‌شود بلورهای زیبای یخی را خواهید دید که از بخار آب در هوای شب ایجاد می‌شوند. تغییری که از بخار آب به یخ بر روی شیشه سرد صورت می‌گیرد تغییر فاز می‌گویند – مولکول‌های آب خودشان را مرتب کرده و به بلورهای یخ تبدیل می‌شوند؛ شکست ناگهانی تقارن بخار بی‌شکل که به دلیل کاهش دما صورت می‌گیرد. بلورهای یخ به این دلیل شکل می‌گیرند که ازلحاظ انرژیکی آن‌ها مساعدترین (موردقبول‌ترین) حالت ممکن هستند. دقیقاً مثل توپ رهاشده

[۱]. Phase Transition

بر دامنه کوه که خود را به پایین رسانده تا حداقل انرژی را کسب کند یا الکترون‌ها که خود را دور هسته مرتب می‌کنند تا پیوندی را تشکیل دهند که مولکول‌ها را حفظ کند، زیبایی دانه برف نیز ناشی از ساختار حداقل انرژی مولکول‌های آب نسبت به ابری از بخار آب است.

ما گمان می‌کنیم که اتفاق مشابهی در لحظات آغازین تاریخ جهان به وقوع پیوسته است. به‌تدریج که گاز داغ ذرات در لحظه تولد جهان منبسط شده و خنک‌تر شد، خلأ ای بدون ذرات هیگز ازلحاظ انرژیکی رضایت‌بخش نبوده و خلائی پر از ذرات هیگز نماینده وضعیت طبیعی شد. این فرایند واقعاً مشابه با بخار آبی است که دچار میعان شده و قطره‌ها را تشکیل داده یا دانه‌های یخ را بر روی صفحه شیشه می‌سازد.

ظهور ناگهانی قطرات آب بر روی شیشه ممکن است این احساس را به وجود آورند که آن‌ها از هیچ به وجود آمده‌اند. به‌طور مشابهی در مورد ذرات هیگز، در مراحل داغ اولیه پس از مهبانگ خلأ در جوش‌وخروش ناشی از نوسانات کوانتومی[۱] بود (همان حلقه‌های موجود در نمودارهای فاینمن) و ذرات و پادذرات از هیچ به وجود آمده و محو می‌شدند. بااین‌حال اتفاق بنیادینی افتاد و به‌تدریج که جهان خنک‌تر می‌شد ناگهان به‌مانند قطرات آب که بر روی شیشه ظاهر می‌شوند ذرات هیگز نیز خود را از هیچ به مرحله ظهور رساندند و در یک سوسپانسیون زودگذری که سایر ذرات نیز در آن منتشر

[۱] . Quantum Fluctuations

می‌شدند، ذرات هیگز با استفاده از اندرکنش مابین خودشان توانستند خود را حفظ کنند.

این ایده که خلأ از چیزی پر شده است می‌گوید که ما و هر چیز دیگری در این جهان درون یک مجموعه غلیظی زندگی می‌کنیم که از جهان در حال خنک شدن به وجود آمده است همانند شبنم صبحگاهی. نباید فکر کنیم که خلأ تنها از به‌اصطلاح چگالش[۱] ذرات هیگز پر شده است؛ خلأ چیزهای بیش از این دارد که به ما عرضه کند. با خنک‌تر شدن جهان کوارک‌ها و گلوئن های چگالیده نیز به وجود آمدند. وجود این ذرات توسط آزمایشات قطعی شده است و آن‌ها نقش مهمی

[۱]. Condensate

در فهم ما از نیروی هسته‌ای قوی دارند. در حقیقت همین فرایند چگالش بود که قسمت اعظم جرم پروتون‌ها و نوترون‌ها را به وجود آورد. بااین‌حال خلأ هیگز مسئول تولید جرم مشاهده‌شده ذرات بنیادی است – کوارک‌ها، الکترون‌ها، میون ها، تاوها و ذرات W و Z. چگالش کوارک‌ها اینجا به کار ما می‌آید که بخواهیم بدانیم زمانی که مجموعه‌ای از کوارک‌ها دورهم جمع می‌شوند تا پروتون‌ها و نوترون‌ها را بسازند، چه اتفاقی می‌افتد. جالب است که هرقدر مکانیزم هیگز برای توضیح جرم پروتون‌ها، نوترون‌ها و هسته سنگین اتم‌ها کم‌اهمیت است، برعکسِ این مطلب در مورد ذرات W و Z صادق است. برای آن‌ها در شرایطی که ذرات هیگز وجود نداشته باشند، چگالش کوارک و گلوئن می‌تواند جرمی حدود

۱ GeV تولید کند اما جرم آن‌ها در آزمایشات حدود ۱۰۰ برابر این میزان به دست آمده است. LHC طوری طراحی شده است که بتواند در حوزه [انرژی] W و Z عمل کند و بتواند مکانیزمی را که مسئول جرم نسبتاً سنگین آن‌هاست، کشف کند. در مورد اینکه آیا ذرات هیگز این مسئولیت را به عهده می‌گیرند یا ذره‌ای که هنوز مشخص نشده، تنها گذر زمان و برخورد ذرات (آزمایشات) هستند که نتیجه نهایی را به ما خواهند گفت.

برای اینکه اعداد جالبی را وارد مبحث کنیم این را بگوییم که انرژی ذخیره‌شده در ۱ مترمکعب از فضای خالی ناشی از چگالش کوارک‌ها و گلوئن ها برابر با عدد شگفت‌انگیز $۱۰^{۳۵}$ ژول است و انرژی فضای خالی ناشی از ذرات هیگز ۱۰۰ برابر

بزرگ‌تر از این است. جمع این دو برابر با انرژی‌ای است که خورشید در ۱۰۰۰ سال تولید می‌کند. البته اگر بخواهیم دقیق‌تر باشیم این انرژی "منفی" است، زیرا خلأ، نسبت به جهانی که هیچ ذره‌ای ندارد انرژی کمتری دارد. این انرژی منفی ناشی از انرژی پیوندی مرتبط با تشکیل این چگالیده‌هاست و به‌خودی‌خود مرموز نیست. یعنی شگفت‌انگیزتر از این نیست که برای جوشاندن آب (یعنی حالت برعکس تغییر فاز از گاز به مایع) شما باید به آن انرژی بدهید.

قسمت عجیب داستان اینجاست که اگر چنین عدد منفی و بزرگی در هر یک مترمکعب از فضای خالی داشته باشیم، انبساط جهان آن‌قدر زیاد می‌شود که هیچ ستاره و انسانی در

آن به وجود نخواهد آمد. جهان واقعاً پس از مهبانگ باید متلاشی می‌شد. اگر ما این پیش‌بینی چگالش خلأ را از فیزیک ذرات بگیریم و وارد معادلات گرانش انیشتین کنیم و نتیجه را بر روی جهان بزرگ‌مقیاس اعمال کنیم، با چنین مشکلی روبرو می‌شویم. این معمای عجیب با نام مسئله ثابت کیهانی[۱] شناخته می‌شود و این یکی از مشکلات اساسی فیزیک بنیادی است. مشخص است که این معما به ما می‌گوید باید قبل از اینکه ادعا کنیم ماهیت خلأ یا گرانش را شناخته‌ایم، بسیار دقت کنیم. ما هنوز نتوانستیم یکی از بنیادی‌ترین چیزها درباره خلأ را بدانیم.

[۱] . The Csmological Constant Problem

با این جمله ما به پایان داستان رسیدیم، زیرا اکنون در مرز دانش قرار داریم.امروزه عرصه تحقیقات دانشمندان درباره چیزهایی است که نمی‌دانیم. همان‌طور که در ابتدای این کتاب دیدیم نظریه کوانتوم مشهور به سخت بودن و وجود تناقضات عجیب است و رفتار ذرات ماده را طوری نشان می‌دهد که نسبتاً [برای انجام هر کاری] آزاد هستند. اما تمام مطالبی که مطرح کردیم، به‌جز مطالب همین فصل، قابل‌فهم و موردقبول [جامعه علمی] است. دنبال کردن شواهد بدون پیش‌داوری در مورد آن‌ها، ما را به‌جایی رساند که امروزه به نظریه‌ای دست‌یافتیم که می‌تواند گستره وسیعی از پدیده‌ها را توضیح دهد؛ از رنگین‌کمان‌هایی که از اتم‌های داغ تابیده می‌شوند تا همجوشی درون ستاره‌ها. استفاده از این نظریه در

عمل منجر به مهم‌ترین اتفاق تکنولوژیکی قرن بیستم شد – ترانزیستور – وسیله‌ای که عملکردش بدون دیدگاه کوانتومی از جهان امکان‌پذیر نبود.

اما نظریه کوانتوم بسیار فراتر از یک نظریه‌ای صرفاً برای توضیح جهان است. در ارتباط اجباری بین نظریه کوانتوم و نسبیت، پادماده خود را به‌عنوان یکی از ضروریات نظری نشان داد و پس از مدتی کشف شد. اسپین، که مشخصه بنیادی ذرات زیراتمی است و پایداری اتم‌ها را تضمین می‌کند، نیز یکی از پیش‌بینی‌های نظری بود که برای سازگاری نظریه لازم بود. و حال در دومین قرن کوانتومی، برخورددهنده بزرگ هادرونی با سفر در خلأ راهی را به‌سوی معماها باز کرده است.این یک پیشرفت علمی است؛ ساخت آهسته و پیوسته

میراثی از توضیحات و پیش‌بینی‌ها که حتی روش زندگی ما را عوض می‌کند. و همین است که علم را از سایر چیزها متمایز می‌کند؛ یعنی دیدگاه متفاوت – علم حقایقی را آشکار می‌کند که نمی‌توان تصورش کرد، حتی برای کسی که ذهنی خلاق و تخیلاتی دارد. علم یعنی تحقیق به دنبال واقعیت‌ها و حتی اگر این واقعیت‌ها در نظر ما غیرواقعی یا عجیب بیاید، بازهم واقعیت دارد. هیچ توضیحی بهتر از نظریه کوانتوم درباره قدرت روش علمی وجود ندارد. هیچ‌کس بدون انجام آزمایشات موشکافانه نمی‌توانست به این نظریه دست یابد و فیزیکدانان نظری نیز که این نظریه را ارائه دادند توانستند تعصبات قدیمی‌شان را دور ریخته و این آزمایشات را توضیح دهند.احتمالاً معمای انرژی خلأ نشانه‌های برای یک سفر

کوانتومی دیگر است و شاید LHC بتواند داده‌های جدید و غیرقابل توضیحی را در اختیار ما قرار دهد و ممکن است هر آنچه که در این کتاب مطرح کردیم تنها تقریبی از یک تصویر بزرگ‌تر باشد – سفر هیجان‌انگیز ما برای فهم جهان کوانتومی ادامه دارد.

زمانی که ما درباره نوشتن این کتاب فکر می‌کردیم، مدتی را نیز صرف این کردیم که ببینیم چگونه می‌توان آن را به اتمام رساند. ما قصد داشتیم تا قدرت عملی و عقلانی نظریه کوانتوم را با مثالی نشان دهیم که حتی شکاک‌ترین خواننده نیز قبول کند که علم واقعاً با جزئیات دقیقی عملکرد جهان را توضیح می‌دهد. هردوی ما (نویسنده‌ها) پذیرفتیم که مثال خوبی وجود دارد که البته نیاز به ریاضیات هم دارد، اما تلاش

کردیم تا این توضیح را بدون موشکافی در معادلات ارائه دهیم، اما بدانید که اندکی با معادلات سروکار خواهید داشت. پس کتاب ما اینجا تمام می‌شود، مگر اینکه شما هنوز بخواهید بیشتر بدانید: بهترین مثالی که درباره قدرت نظریه کوانتوم به ذهن ما رسید را در ادامه به شما توضیح خواهیم داد. موفق باشید و از سفر خود لذت ببرید.

سخن پایانی

مرگ ستارگان

زمانی که ستارگان می‌میرند، بسیاری از آن‌ها به توپ بسیاری چگالی از مواد هسته‌ای تبدیل می‌شوند که با دریایی از الکترون‌ها آمیخته‌اند و آن‌ها را به نام "کوتوله‌های سفید[1]" می‌شناسیم. همین سرنوشت ۵ میلیارد سال دیگر در انتظار خورشید ماست که سوخت هسته‌ای‌اش را تمام می‌کند. همچنین ۹۵٪ از ستارگان کهکشان ما همین سرنوشت را

[1]. White Dwarves

خواهند داشت. با در دست داشتن تنها یک قلم، کاغذ و اندکی تفکر می‌توانیم بزرگ‌ترین جرم ممکن این ستارگان را حساب کنیم. این محاسبات اولین بار توسط سابرامانیان چاندراسخار[1] در سال ۱۹۳۰ با استفاده از نظریه کوانتوم و نسبیت انجام شد تا دو پیش‌بینی کاملاً دقیق انجام دهد. اولین پیش‌بینی این بود که چیزی به نام ستاره کوتوله سفید وجود دارد – توپی از ماده که با توجه به اصل طرد پاولی از فروپاشی بیشتر ناشی از گرانش خودش جلوگیری می‌کند. دومی این بود که اگر ما نگاهمان را از کاغذ پیش روی‌مان که در آن محاسبات نظری انجام دادیم برداشته و به آسمان خیره شویم، نخواهیم توانست

[1] . Subrahmanyan Chandrasekhar

کوتوله سفیدی با جرمی بیشتر از ۱/۴ برابر جرم خورشید پیدا کنیم. این پیش‌بینی‌ها واقعاً شجاعانه‌اند.

امروزه اخترشناسان حدود ۱۰۰۰۰ کوتوله سفید را فهرست کرده‌اند. اکثر آن‌ها جرمی برابر با ۰/۶ جرم خورشیدی دارند اما بزرگ‌ترین کوتوله سفیدی که رصد شده جرمش دقیقاً کمی کمتر از ۱/۴ جرم خورشید است. تنها همین عدد "۱/۴" یکی از پیروزی‌های روش علمی است. یافتن این عدد حاصل درک ما از فیزیک هسته‌ای، فیزیک کوانتوم و نظریه نسبیت خاص انیشتین است – مجموعه‌ای متحد از فیزیک قرن بیستم. محاسبه این عدد همچنین با استفاده از ثابت‌های بنیادی طبیعت صورت می‌گیرد که در این کتاب با آن‌ها آشنا

شده‌ایم. در انتهای این فصل ما خواهیم فهمید که بیشترین جرم [کوتوله سفید] با استفاده از نسبت زیر تعیین می‌شود:

$$\left(\frac{hc}{G}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{1}{m_p^2}$$

به چیزی که نوشتیم به‌دقت نگاه کنید: این نسبت به ثابت پلانک، سرعت نور، ثابت گرانش نیوتون و جرم پروتون بستگی دارد. چقدر شگفت‌انگیز است که ما می‌توانیم بیشترین جرم یک ستاره (کوتوله سفید) را با این ترکیب از ثابت‌های طبیعی به دست آوریم. ترکیب سه‌گانه گرانش، نسبیت و کوانتوم

حرکت را که در قسمت $\left(\frac{hc}{G}\right)^{\frac{۳}{۲}}$ دیده می‌شود، جرم پلانک[۱] می‌نامند و زمانی که این قسمت را عددگذاری کنیم به عدد تقریبی ۵۵ میکروگرم می‌رسیم؛ تقریباً جرم یک‌دانه ماسه. پس جرم چاندراسخار به طرز بسیار زیبایی با در نظر گرفتن دو جرم محاسبه می‌شود، یکی اندازه یک‌دانه ماسه و دیگری جرم یک پروتون. از این اعداد بسیار ریز، مقیاس جرم بنیادی جدیدی به دست می‌آید: جرم یک ستاره در حال مرگ.

ما می‌توانیم یک نگاه کلی به روشی که چاندراسخار این رابطه را به دست آورد بیاندازیم، اما قصدمان این است که اندکی بیشتر پیش برویم: ما می‌خواهیم محاسبات واقعی را به

[1] . Planck Masss

شما نشان دهیم زیرا واقعاً شما را به وجد خواهد آورد. ما دقیقاً به این عدد (۱/۴ جرم خورشیدی) نخواهیم رسید، اما بسیار به آن نزدیک خواهیم شد و خواهید دید که فیزیکدانان حرفه‌ای چگونه با استفاده از سلسله اقدامات منطقی و هوشمندانه می‌توانند به چنین نتایج شگرفی دست یابند و در طول راه از قوانین شناخته‌شده فیزیک استفاده خواهیم کرد. گمان نکنید که این محاسبات خیالی و صرفاً ناشی از خوش‌بینی ماست. ما آرام‌آرام و به‌طور کاملاً قطعی به سمت این نتیجه‌گیری شگفت‌انگیز کشیده خواهیم شد.

نقطه شروع ما باید این باشد که "ستاره چیست"؟ جهان قابل‌رؤیت با تقریب خوبی از هیدروژن و هلیم تشکیل شده است؛ دو عنصر ساده‌ای که در اولین دقایق پس از انفجار

بزرگ به وجود آمدند. پس از حدوداً نیم میلیارد سال انبساط، جهان در قسمت‌های چگال تَرَش به‌اندازه کافی خنک شد تا ابرهای گازی بتوانند تحت گرانش خود متراکم شوند. این‌ها در حقیقت بذر کهکشان‌ها محسوب می‌شوند و در لابه‌لای این ابرها و در محدوده‌های کوچک‌تر اولین ستارگان شروع به شکل‌گیری کردند.

هرقدر که این ابرها متراکم‌تر می‌شدند، گاز داغ‌تر می‌شد؛ کسانی که از تلمبه برای باد کردن لاستیک دوچرخه‌شان استفاده کرده باشند می‌دانند که هرقدر گاز (هوا) را متراکم کنیم، دمایش بیشتر می‌شود. زمانی که دمای این گاز به ۱۰۰۰۰۰ درجه برسد، الکترون‌ها دیگر نمی‌توانند به دور هسته اتم‌های هلیم و هیدروژن بگردند و اتم‌ها متلاشی

می‌شوند و پلاسمایی از هسته خالص و الکترون‌ها را به‌جای می‌گذارند. گاز داغ در تلاش است که به سمت بیرون منبسط شود و از تراکم بیشتر جلوگیری کند اما برای مجموعه ابرهایی که به اندازه کافی سنگین هستند، گرانش برنده می‌شود. ازآنجایی‌که پروتون‌ها بار مثبت دارند همدیگر را دفع می‌کنند، اما هرقدر که فروپاشی گرانشی پیش می‌رود و دما را افزایش می‌دهد پروتون‌ها سریع‌تر و سریع‌تر حرکت می‌کنند. نهایتاً در دمایی حدود چند میلیون درجه پروتون‌ها آن‌قدر سریع حرکت می‌کنند که به جایی می‌رسند که نیروی هسته‌ای ضعیف بتوانند عنان کار را در دست بگیرد. زمانی که چنین اتفاقی بیافتد دو پروتون می‌توانند در مقابل هم عکس‌العمل انجام دهند؛ یکی از آن‌ها با گسیل همزمان پوزیترون و نوترینو

تبدیل به نوترون می‌شود (دقیقاً همان‌طور که در شکل ۳-۱۱ صفحه ۲۳۲ نشان داده شده است). حال که این ذره از بار الکتریکی خلاص شد، پروتون و نوترون تحت نیروی هسته‌ای قوی باهم همجوشی کرده و دوترون (هسته سنگین‌تر هیدروژن) را می‌سازند. این فرایند مقدار انرژی زیادی را ساطع می‌کند، دقیقاً مانند تشکیل اتم هیدروژن که پیوند چیزها انرژی ساطع می‌کرد.

انرژی آزادشده از تنها یک فرایند همجوشی با توجه به مقیاس‌های روزمره، بزرگ نیست. همجوشی یک‌میلیون پروتون-پروتون می‌تواند انرژی‌ای در حد انرژی جنبشی یک مگس در حال پرواز تولید کند، یا برابر خواهد بود با انرژی ساطع‌شده از یک لامپ صد وات در یک نانوثانیه. اما این عدد

در مقیاس‌های اتمی بسیار عظیم است و به خاطر داشته باشید که ما داریم درباره قلب چگال یک ابر گازی در حال فروپاشی صحبت می‌کنیم که در هر سانتی‌متر مکعبش حدود $۱۰^{۲۶}$ پروتون دارد. اگر تمامی پروتون‌های این یک سانتی‌متر مکعب همجوشی کنند، $۱۰^{۱۳}$ ژول انرژی ساطع خواهد شد که برای تأمین برق یک شهر کوچک در یک سال کافی است.

همجوشی دو پروتون به یک دوترون آغاز جشن همجوشی‌هاست. خود دوترون دوست دارد با پروتون دیگری همجوشی کرده و هسته سبکی از هلیم را بسازد (که به آن هلیم-۳ می‌گویند) و یک فوتون گسیل کند و این هسته‌های هلیم باهم جفت شده و همجوشی می‌کنند و پس از گسیل (بیرون راندن) دو پروتون، به هلیم معمولی (هلیم-۴) تبدیل

می‌شوند. در هر مرحله، فرایند همجوشی انرژی بیشتر و بیشتری را ساطع می‌کند. همچنین، برای اینکه دقیق‌تر بدانید، پوزیترونی که در ابتدای این سلسله فرایند گسیل شده بود، با الکترون‌های موجود در پلاسمای محیطی همجوشی کرده و یک جفت فوتون را می‌سازند. این انرژی ای که آزاد می‌شود، سعی در منبسط کردن گاز داغ مملو از فوتون‌ها، الکترون‌ها و هسته‌ها می‌کند و در مقابل نیروی گرانش ایستادگی می‌کند. این یک ستاره است: همجوشی‌های هسته‌ای سوخت هسته‌ای مرکز ستاره را می‌سوزانند و فشاری به سمت بیرون وارد می‌کنند که باعث می‌شود در مقابل فروپاشی گرانشی مقاومت کرده و ستاره را به تعادل برسانند.

البته سوخت هیدروژن ستاره محدود است و نهایتاً تمام می‌شود. بدون آزادسازی انرژی، فشار به بیرونی نیز وجود نخواهد داشت؛ گرانش دوباره کنترل کار را در دست می‌گیرد و فروپاشیِ به تعویق افتاده ادامه پیدا می‌کند. اگر ستاره به اندازه کافی سنگین باشد، دمای هسته آن به دمای نزدیک به ۱۰۰ میلیون درجه می‌رسد. در این مرحله هلیمی که خود باقی‌مانده سوخت هیدروژن بود، دست به کار شده و با همجوشی تبدیل به کربن و اکسیژن می‌شود و دوباره فروپاشی گرانشی به‌طور موقت متوقف می‌شود.

اما اگر ستاره به اندازه کافی سنگین نباشد که بتواند گداخت هلیم را به جریان بیاندازد چه می‌شود؟ برای ستارگانی که جرمشان کمتر از نصف خورشید است این اتفاق رخ می‌دهد.

دمای ستاره در طی فروپاشی افزایش می‌یابد اما قبل از اینکه به دمای ۱۰۰ میلیون درجه برسد، مانع دیگری سر راه فروپاشی قد علم می‌کند. این مانع الکترون‌ها هستند که به دلیل اصل طرد پاولی، فشاری را به بیرون وارد می‌کنند. همان‌طور که یاد گرفتیم اصل پاولی برای فهم علت پایداری اتم‌ها مهم است و این اصل خصوصیات مواد را پی‌ریزی می‌کند. کاربرد دیگر این اصل در اینجاست: این اصل توضیحی برای ستارگان فشرده‌ای که هیچ سوختی ندارند، اما هنوز باقی مانده‌اند فراهم می‌کند. این اتفاق چگونه می‌افتد؟

به‌تدریج که ستاره متراکم می‌شود، الکترون‌های آن مجبورند در حجم کوچک‌تری جای بگیرند. ما می‌توانیم درباره الکترون با استفاده از تکانه‌اش p فکر کنیم و بنابراین این تکانه به

طول‌موج دو بروگلی h/p مرتبط می‌شود. به‌طور خاص ذره می‌تواند تنها با بسته موجی توصیف شود که حداقل به اندازه طول‌موج مرتبطش باشد[۱]. این یعنی زمانی که ستاره به اندازه کافی متراکم (چگال) باشد، الکترون‌ها باید همدیگر را لمس کنند؛ یعنی ما دیگر نمی‌توانیم آن‌ها را با بسته موج‌های مستقلی توصیف کنیم. این به‌نوبه خود یعنی اثرات مکانیک کوانتومی و خصوصاً اصل پاولی برای توصیف الکترون‌ها لازم می‌شود. مخصوصاً آن‌قدر این تراکم زیاد است که دو الکترون

[۱]. از فصل ۵ به خاطر آورید که ذراتی که تکانه قطعی دارند، در حقیقت با بینهایت طول‌موج تعریف می شوند و اگر ما اجازه اندکی پراکندگی برای تکانه بدهیم، می توانیم ذره را به طور محلی مشخص کنیم. اما فقط در این حد می‌توان پیش رفت و نمی‌توان درباره ذره‌ای صحبت کرد که در محدوده‌ای کوچک‌تر از طول‌موجش شناسایی شود.

تلاش می‌کنند در یک منطقه یکسانی جای بگیرند و می‌دانیم که طبق اصل پاولی این کار امکان‌پذیر نیست و در مقابل این اتفاق مقاومتی صورت می‌گیرد. بنابراین در یک ستاره در حال مرگ، الکترون‌ها همدیگر را دفع کرده و این کار فشاری برابر با فشار ناشی از گرانش ایجاد می‌کند و ستاره دیگر دست از فروپاشی می‌کشد.

خب این سرنوشت ستاره‌های کوچک بود، اما چه بلایی سر ستاره‌هایی مثل خورشید ما می‌افتد؟ ما آن‌ها را چند پاراگراف قبل‌تر رها کردیم که داشتند هلیمشان را با فرایند گداخت (همجوشی) به کربن و اکسیژن تبدیل می‌کردند. وقتی‌که هلیمشان هم تمام شد چه می‌شود؟ آن‌ها نیز باید به فروپاشی تحت گرانش خودشان ادامه دهند و تا زمانی که الکترون‌ها به

هم نزدیک نشده‌اند، این فروپاشی ادامه دارد و دقیقاً مانند ستاره‌های سبک‌تر اصل پاولی وارد کار شده و این فروپاشی را متوقف می‌کند. اما برای بسیاری از ستاره‌های سنگین حتی اصل پاولی نیز محدودیت‌های خودش را دارد. هرقدر که ستاره متراکم شده و الکترون‌ها به هم بچسبند، هسته داغ‌تر شده و حرکت الکترون‌ها سریع‌تر می‌شود. برای ستارگانی که به اندازه کافی بزرگ‌اند، جنب‌وجوش الکترون‌ها آن‌قدر سرعت می‌گیرد که به سرعت نور نزدیک می‌شود و این جایی است که اتفاق جدیدی می‌افتد. زمانی که آن‌ها به سرعت نور نزدیک شوند، فشاری که الکترون‌ها برای مقابله با گرانش تولید می‌کنند به‌قدری کاهش می‌یابد که دیگر توان مقاومت ندارند. آن‌ها دیگر نمی‌توانند جلوی گرانش و به‌تبع آن فروپاشی را بگیرند.

وظیفه ما در این فصل این است که حساب کنیم این اتفاق چه زمانی می‌افتد که البته جواب را در ابتدا داده بودیم. برای ستارگان سنگین‌تر از ۱/۴ برابر جرم خورشید، الکترون‌ها باخته و گرانش پیروز می‌شود.

خوب این مقدمات به‌عنوان پایه‌ای برای شروع محاسبات ما کافی بود. ما می‌توانیم پیش روی کرده و همجوشی هسته‌ای را فراموش کنیم، زیرا ستارگانی که می‌سوزند دیگر سر راه ما قرار ندارند. از این به بعد بررسی خواهیم کرد که درون ستارگان مرده چه می‌گذرد. می‌خواهیم بدانیم که چگونه فشار کوانتومی ناشی از الکترون‌های متراکم با فشار ناشی از گرانش به تعادل می‌رسند و همچنین چگونه است که این فشار زمانی که الکترون‌ها سرعتشان را خیلی زیاد می‌کنند، کاهش

می‌یابد. پس یک بازی تعادلی در قلب مطالعات ما قرار دارد: گرانش در مقابل فشار کوانتومی. اگر بتوانیم آن‌ها را به تعادل برسانیم ما یک کوتوله سفید داریم اما اگر گرانش پیروز شود، فاجعه رخ خواهد داد.

گرچه ربطی به محاسبات ما ندارد، ما نمی‌توانیم این داستان جالب را ناتمام بگذاریم. زمانی که یک ستاره سنگین فرومی‌پاشد دو گزینه پیش روی خود دارد. اگر خیلی سنگین نباشد، پروتون‌ها و الکترون‌هایش آن‌قدر به هم نزدیک می‌شوند که نهایتاً همجوشی کرده و نوترون می‌سازند. به‌طور خاص یک پروتون و یک الکترون می‌توانند تبدیل به یک نوترون شده و یک نوترینو گسیل کنند. به قول فیزیکدان

روسی لو لاندا[1]، ستاره تبدیل به یک هسته عظیم می‌شود. لاندا این جمله را در سال ۱۹۳۲ در کارش با نام "در باب نظریه ستارگان[2]" نوشت که ازقضا در همان ماهی چاپ شد که نوترون توسط جیمز چادویک[3] کشف شد. احتمالاً اگر بگوییم لاندا وجود ستاره‌های نوترونی را پیش‌بینی کرده بود اغراق کردیم، اما واقعاً او چنین چیزی را انتظار داشت. احتمالاً افتخار کشف ستاره‌های نوترونی را می‌توان به والتر باد و فریتز زویکی[4] داد که در سال بعدی [در مقاله‌ای] نوشته بودند " بدون تعصب دیدگاه ما پیشرفت کرده و می‌دانیم که ابرنواختر

[1]. Lev Landau
[2]. On The Theory of Stars
[3]. James Chadwick
[4]. Walter Baade, Fritz Zwicky

در حقیقت تغییر از ستاره معمولی به ستاره نوترونی است که در مراحل پایانی‌شان شامل نوترون‌های به‌شدت متراکم هستند". این ایده آن‌قدر عجیب بود که در روزنامه لوس‌آنجلس تایمز به شکل طنز آورده شد (شکل ۱-۱۲ را ببینید) و ستارگان نوترونی تا اواسط دهه ۱۹۶۰ به‌عنوان یک معما باقی ماندند.

شکل ۱-۱۲: کاریکاتوری از مجله لوس آنجلس تایمز در تاریخ ۱۹ ژانویه ۱۹۳۴

در سال ۱۹۶۵ آنتونی هیویش و ساموئل اوکوی[۱] "شواهدی مبنی بر یک منبع غیرعادی از دمای بالای رادیویی روشنایی در سحابی خرچنگ[۲]" یافتند، گرچه آن‌ها در تشخیص آن به‌عنوان یک ستاره نوترونی موفق عمل نکردند. شواهد قطعی در سال ۱۹۶۷ توسط یوسف شکولوفسکی[۳] به دست آمد و اندکی پس از او با اندازه‌گیری‌های دقیقی توسط ژوسلین بل[۴] و خود هیویش. این جرم آسمانی عجیب که اولین بار بود کشف شده بود با نام "پالسار[۵] هیویش اوکوی" نام‌گذاری شد.

---

1. Anthony Hewish, Samuel Okoye
2. Crab Nebula
3. Iosif Shklovsky
4. Jocelyn Bell
5. Pulsar

جالب است که بدانید همان ابرنواختری[1] که پالسار هیویش اوکوی را به وجود آورده بود، ۱۰۰۰ سال قبل توسط منجمین رصد شده بود. ابرنواختر بزرگ سال ۱۰۵۴، روشن‌ترین ابرنواختر طول تاریخ ، توسط منجمین چینی رصد شده بود و همچنین با نقاشی معروفی بر روی صخره‌ای در جنوب غربی ایالات‌متحده توسط اهالی دره چاکو کشیده شده است.

ما هنوز به شما نگفتیم که آن نوترون‌ها چگونه در مقابل گرانش مقاومت کرده و از فروپاشی بیشتر جلوگیری می‌کنند، اما احتمالاً شما بتوانید حدس بزنید. نوترون‌ها (دقیقاً مانند الکترون‌ها) تحت سیطره اصل پاولی هستند. آن‌ها نیز

[1] . Supernova

می‌توانند فروپاشی را متوقف کنند و بدین ترتیب مانند کوتوله‌های سفید، ستاره‌های نوترونی[1] یکی از حالات پایانی عمر ستارگان‌اند. ستاره‌های نوترونی قسمت مختصری از داستان ما بودند اما نمی‌توانیم به‌سادگی از آن‌ها بگذریم و باید بگوییم که این اجرام یکی از شگفت‌انگیزترین اجرام جهانند: آن‌ها ستارگانی به اندازه یک شهر هستند و آن‌قدر چگالی‌شان بالاست که یک قاشق چای‌خوری از آن‌ها به اندازه یک کوه جرم دارد و پایداری‌شان را از ذرات نیم اسپینی (همان نوترون) که همدیگر را طرد می‌کنند، به دست آورده‌اند.

[1] . Neutron Stars

تنها یک گزینه دیگر برای سنگین‌ترین ستاره‌های جهان باقی ماند – ستارگانی که در آن‌ها نوترون‌ها در حال حرکت با سرعتی نزدیک به نور هستند. سرنوشت شومی در انتظار چنین ستاره‌های غول‌پیکری است زیرا نوترون‌ها هم توانایی تولید فشار کافی برای مقابله با گرانش را نخواهند داشت. هیچ مکانیزم شناخته‌شده‌ای برای جلوگیری از فروپاشی هسته ستاره‌ای با جرم بیشتر از حدوداً ۳ برابر خورشید وجود ندارد و نتیجه فروپاشی آن‌ها ایجاد یک سیاهچاله[1] است: مکانی که قوانین فیزیک به آن صورت که ما می‌شناسیم در هم می‌شکنند. احتمالاً قوانین طبیعت هرگز متوقف نمی‌شوند اما

[1] . Black Hole

درک مناسب رفتار داخلی سیاهچاله‌ها نیازمند یک نظریه گرانش کوانتومی[1] است و چنین نظریه‌ای امروزه وجود ندارد.

حال زمانش است که به بحث اصلی‌مان برگردیم و بر روی دو هدفمان که یکی بررسی وجود ستاره‌های کوتوله سفید بود و دیگری محاسبه جرم چاندراسخار، متمرکز شویم. می‌دانیم که چطور باید پیش روی کنیم: ما باید فشار الکترون‌ها را با فشار گرانش به تعادل برسانیم. این محاسبات از آن جنس نیستند که بتوان در ذهن انجام داد، پس باید نقشه راه بکشیم. نقشه ما این است؛ البته کمی طولانی است زیرا ما می‌خواهیم

[1] . Quantum Theory of Gravity

جزئیات پیش‌فرض‌های این محاسبات را نیز برایتان آشکار کنیم و زمینه را برای محاسبات اصلی آماده کنیم.

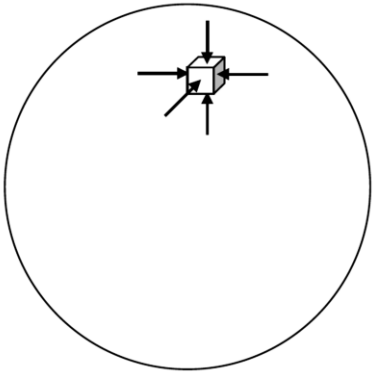
گام اول: ما باید تعیین کنیم فشار داخل ستارگان ناشی از الکترون‌های متراکم چقدر است. ممکن است شما تعجب کنید که چرا راجع به بقیه چیزهای داخل ستاره نگران نیستیم – مثلاً چرا هسته‌ها و فوتون‌ها را در نظر نمی‌گیریم؟ فوتون‌ها مشمول اصل پاولی نمی‌شوند و اگر به اندازه کافی زمان بگذرد آن‌ها نهایتاً ستاره را ترک خواهند کرد. آن‌ها هیچ امیدی به مقابله در برابر گرانش ندارند. همچنین در مورد هسته، هسته نیم-اسپین نیز باید از قانون پاولی پیروی کند اما (همان‌طور که خواهیم دید) جرم زیاد آن‌ها به این معنی است که فشار کمتری را نسبت به الکترون‌ها تولید می‌کنند و ما به‌سادگی

می‌توانیم از تأثیر آن‌ها در مسابقه تعادل چشم‌پوشی کنیم. این کار محاسبات را بسیار ساده‌تر می‌کند – فشار الکترون‌ها تنها چیزی است که نیاز داریم و باید توجهمان را معطوف به آن‌ها کنیم.

گام دوم: پس‌ازاینکه فشار الکترون‌ها را به دست آوردیم، ما باید مسابقه تعادل را آغاز کنیم. واضح نیست که چگونه می‌خواهیم این کار را بکنیم. گفتن اینکه "گرانش به داخل فشار وارد می‌کند و الکترون‌ها به خارج" یک چیز است و عددگذاری این جمله چیز دیگر.

فشار در داخل ستاره متغیر است؛ در مرکز آن بیشتر و در سطح آن کمتر است. این نکته که ما گرادیان فشار (تغییرات

مقدار فشار) داریم بسیار مهم است. مشابه با شکل ۲-۱۲ مکعبی از ماده ستاره را در نظر بگیرید که در قسمتی از ستاره قرار گرفته است. گرانش در تلاش است تا این مکعب را به سمت مرکز ستاره بکشد و ما می‌خواهیم بدانیم فشار الکترون‌ها چگونه قرار است در مقابل این کشش مقاومت کند. فشار گاز الکترون‌ها بر روی هر ۶ وجه این مکعب وارد می‌شود و نیروی وارده برابر است با فشار سطح ضرب‌در مساحت آن. این گزاره دقیق است؛ تا اینجا ما از واژه "فشار" استفاده کردیم زیرا فرضمان بر این بود که همگی یک درک باطنی از این مطلب داریم که گاز با فشار زیاد نسبت به گاز با فشار کمتر، بیشتر هل می‌دهد. اگر تابه‌حال لاستیک ماشینتان را بادکرده باشید، خودتان می‌دانید.



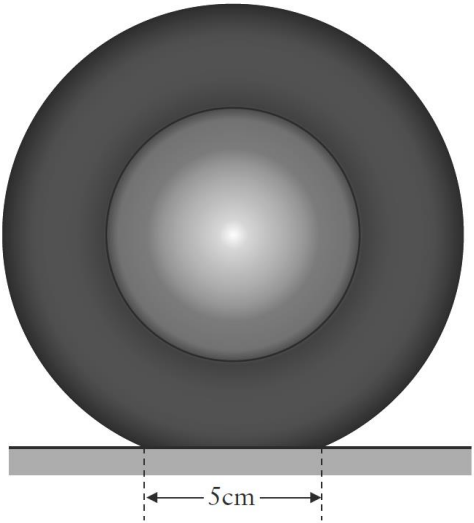
شکل ۲-۱۲: مکعبی که در جایی داخل ستاره قرار دارد. فلش‌ها نشان‌دهنده فشار وارده بر مکعب توسط الکترون‌های درون ستاره هستند.

ازآنجایی‌که ما باید مفهوم فشار را به‌درستی بفهمیم، نیاز داریم تا مختصراً راه میانبری به سمت موضوع قابل‌فهم‌تری بزنیم. موضوع لاستیک را بررسی خواهیم کرد؛ زمانی که تایر

(لاستیک) ماشین صاف می‌شود فیزیکدانان می‌گویند فشار درون تایرها برای مقابله با وزن ماشین کافی نیست. ما می‌خواهیم فشار تایر مناسب را برای اینکه ماشینی به جرم ۱۵۰۰ کیلوگرم را تحمل کرده و تنها ۵ سانتی‌متر از تایر بر روی زمین قرار داشته باشد (پهن شود) محاسبه کنیم که شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است. خب محاسبات را آغاز می‌کنیم.

اگر عرض لاستیک ۲۰ سانتی‌متر باشد و بخواهیم که ۵ سانتی‌متر از طول آن بر روی زمین باشد سطح تماس بین لاستیک و زمین برابر خواهد بود با ۲۰×۵=۱۰۰ سانتی‌مترمربع. ما هنوز فشار مناسب تایر را حساب نکردیم – این چیزی است که می‌خواهیم حساب کنیم – پس بیایید آن

را با نماد P نشان دهیم. ما باید بدانیم نیروی وارده از هوای درون تایر بر روی زمین چقدر است. این برابر خواهد بود با فشار ضرب‌در سطح لاستیکی که با زمین در تماس است یعنی P×۱۰۰ سانتی‌مترمربع. ما باید این عدد را ضرب‌در ۴ کنیم زیرا ماشین ما چهار تایر داریم: P×۴۰۰ سانتی‌مترمربع. این کل نیرویی است که توسط هوای درون لاستیک‌ها به زمین وارد می‌شود. به این صورت فکر کنید: مولکول‌های هوای درون تایر به زمین ضربه وارد می‌کنند (البته درستش این است که این مولکول‌ها به سطح لاستیکی که در تماس با زمین است ضربه وارد می‌کند اما مهم نیست).



شکل ۳-۱۲: زمانی که لاستیک وزن ماشین را تحمل می‌کند، سطح لاستیک کمی تغییر شکل می‌یابد (صاف می‌شود)

زمین معمولاً استقامت خود را از دست نمی‌دهد و با نیروی برابری در جهت مخالف پاسخ می‌دهد (نهایتاً ما قانون سوم نیوتون را نیز وارد کار کردیم). پس ماشین توسط زمین به سمت بالا و توسط گرانش به سمت پایین کشیده می‌شود و ازآنجایی‌که وارد زمین نمی‌شود (به داخل زمین نفوذ نمی‌کند) یا در هوا معلق نمی‌شود ما می‌فهمیم که این دو نیرو باهم در تعادل‌اند. پس ما می‌توانیم نیروی P ضرب‌در ۴۰۰ سانتی‌مترمربع را برابر با نیروی ناشی از گرانش بدانیم. این نیرو برابر با وزن ماشین است و ما می‌دانیم که چگونه از قانون دوم نیوتون استفاده کنیم، $F=ma$ که a شتاب گرانش در سطح زمین است که برابر است با ۹/۸۱ m/s^2. پس وزن ماشین برابر است با ۱۵۰۰kg×۹/۸۱ m/s^2=۱۴۷۰۰ نیوتون.

(۱ نیوتون برابر است با $1\ kg\ m/s^2$ که تقریباً برابر با وزن یک سیب است). برابر قرار دادن دو نیرو معادله زیر را به دست می‌دهد:

$$P \times ۴۰۰ cm^2 = ۱۴۷۰۰\ N$$

حل این معادله ساده است: $N/cm^2 = ۳۶/۷۵\ N/cm^2$ ($P = (\frac{۱۴۷۰۰}{۴۰۰})$. فشاری برابر با ۳۶/۷۵ نیوتون بر سانتی‌مترمربع روش آشنایی برای بیان فشار تایر نیست، اما می‌توانیم این عدد را به واحد "بار" تبدیل کنیم. ۱ بار، فشاری استاندارد و برابر با ۱۰۱۰۰ نیوتون بر مترمربع است. در هر مترمربع ۱۰۰۰۰ سانتی‌مترمربع وجود دارد، پس ۱۰۱۰۰ نیوتون بر مترمربع برابر است با ۱۰/۱ نیوتون بر سانتی‌مترمربع. پس

فشاری که ما می‌خواهیم برابر می‌شود با $\frac{۳۶/۷۵}{۱۰/۱}$ یعنی ۳/۶ بار. (یا ۵۲ psi - می‌توانید هر واحدی را که دوست دارید محاسبه کنید). ما همچنین می‌توانیم نتیجه بگیریم که اگر فشار را ۵۰٪ کاهش داده و به عدد ۱/۸ تقلیل دهیم، سطح تماس بین لاستیک و زمین را دو برابر کرده‌ایم که باعث می‌شود لاستیک صاف‌تر شود (کم‌باد تر به نظر آید). پس از این بحث روشن‌کننده درباره فشار حال آماده‌ایم که به مکعبی از ماده ستاره برگردیم که در شکل ۲-۱۲ دیده می‌شود.

اگر سطح پایینی مکعب به مرکز ستاره نزدیک‌تر باشد، فشار آن باید اندکی بیشتر از سطح بالایی مکعب باشد. این اختلاف فشار، نیرویی به مکعب وارد می‌کند که آن را به سمت خارج

از مرکز ستاره هل می‌دهد (یعنی به سمت بالای تصویر) و این چیزی است که ما می‌خواهیم زیرا این مکعب در همان لحظه توسط نیروی گرانش به سمت مرکز ستاره کشیده می‌شود (به سمت پایین تصویر). اگر ما بتوانیم تعادلی بین این دو نیرو برقرار کنیم، فهمی از کارکرد ستاره پیدا کردیم. اما گفتن این حرف ساده‌تر از عمل کردن به آن است، زیرا اگرچه گام اول به ما اجازه می‌دهد که مقدار نیروی وارد بر مکعب ناشی از فشار الکترون‌ها را حساب کنیم، اما باید نیروی وارده به مکعب ناشی از گرانش را نیز حساب کنیم. همچنین نباید نگران نیروی وارده به سطوح بغلی مکعب باشیم زیرا آن‌ها فاصله یکسانی از مرکز ستاره دارند که باعث می‌شود فشار سمت چپ مکعب برابر با فشار سمت راست آن باشد و این باعث

می‌شود که مکعب ما به چپ و راست حرکت نکند. برای اینکه گرانش وارد بر مکعب را حساب کنیم از قانون نیوتون بهره می‌گیریم که می‌گوید هر تکه از ماده درون ستاره کششی بر مکعب ما وارد می‌کند و هرقدر فاصله این تکه ماده از مکعب ما بیشتر باشد، نیروی ناشی از آن کمتر است. پس تکه‌های دورتر، نیروی کمتری نسبت به تکه‌های نزدیک‌تر وارد می‌کنند. مواجهه با این واقعیت که کشش گرانشی وارده بر مکعب برای تکه‌های مختلف ماده ستاره متفاوت است و بستگی به فاصله شان از مکعب دارد به نظر مشکل پیچیده‌ای است اما بیایید ببینیم چگونه می‌توان چنین مسائلی را به‌طورکلی حل کرد. ما باید ستاره را به قطعات ریزی خرد کنیم و نیروی وارده بر مکعب ناشی از هرکدام از این قطعات

ریز را حساب کنیم. خوشبختانه ما نیازی به تصور ستاره خردشده نداریم، زیرا می‌توانیم از یک قانون زیبا استفاده کنیم. قانون گاوس[1] (که به‌افتخار ریاضیدان افسانه‌ای آلمانی کارل فردریش گاوس[2] نام‌گذاری شده است) به ما می‌گوید: (الف) ما می‌توانیم گرانش ناشی از تکه‌هایی که نسبت به مکعب کوچک ما در بیرون از ستاره قرار دارند را لحاظ نکنیم (یعنی قسمت‌هایی که فاصله‌شان از مرکز ستاره بیشتر از فاصله مکعب از مرکز ستاره است) (ب) گرانش خالص ناشی از قسمت‌هایی که نسبت به مکعب ما به مرکز نزدیک‌تر هستند برابر با حالتی است که ما کل این مواد را در مرکز ستاره در

[1] . Gauss' Law
[2] . Carl Friedrich Gauss

نظر بگیریم. با استفاده مشترک از قانون گاوس و قانون گرانش نیوتون، می‌توانیم بگوییم به این مکعب نیرویی برابر با مقدار زیر وارد می‌شود که آن را به سمت مرکز ستاره می‌کشاند:

$$G\frac{M_{\text{داخل}}M_{\text{مکعب}}}{r^{۲}}$$

که $M_{\text{داخل}}$ برابر است با جرم آن قسمت از ستاره که شعاعش برابر با فاصله مکعب از مرکز ستاره است و $M_{\text{مکعب}}$ جرم مکعب و r فاصله مکعب از مرکز ستاره است (و G ثابت نیوتون می‌باشد). برای مثال اگر این مکعب در سطح ستاره قرار بگیرد $M_{\text{داخل}}$ برابر با کل جرم ستاره است. برای سایر نقاط $M_{\text{داخل}}$ کمتر از این مقدار است.

خب ما پیشرفت خوبی داشتیم. حال برای تعادل نیروهای وارده بر مکعب (که این یعنی مکعب ما حرکت نمی‌کند و این یعنی ستاره نه منفجر می‌شود و نه فرومی‌پاشد[۱]) ما نیاز داریم که:

$$\left(P_{\text{پایین}} - P_{\text{بالا}}\right) A = G \frac{M_{\text{داخل}} M_{\text{مکعب}}}{r^2} \qquad (۱)$$

که $P_{\text{پایین}}$ و $P_{\text{بالا}}$ همان فشارهای وارده ناشی از گاز الکترون‌ها بر سطوح پایینی و بالایی مکعب هستند و A مساحت هرکدام

[۱]. ما می توانیم ایده‌مان را به کل ستاره تعمیم دهیم، چون از ابتدا صحبتی از مکان مکعب نکرده‌ایم. اگر ما ثابت کنیم که مکعبی که در جایی از ستاره قرار دارد، حرکت نمی‌کند، این نشان می‌دهد که تمامی چنین مکعب‌هایی نیز ثابت خواهند ماند و ستاره پایدار خواهد بود.

از سطوح مکعب است (یادتان باشد نیروی حاصل از فشار برابر است با فشار ضرب‌در مساحت). ما نام این معادله را (۱) گذاشتیم چون معادله مهمی است و در ادامه به آن رجوع خواهیم کرد.

گام سوم: یک فنجان چای برای خود بریزید و از آن لذت ببرید زیرا پس از برداشتن گام اول ما فشارهای $P_{\text{پایین}}$ و $P_{\text{بالا}}$ را به دست آوردیم و گام دوم به ما نشان داد که چگونه می‌توان این دو نیرو را به تعادل رساند. البته کار واقعی ما هنوز صورت نگرفته است، زیرا باید گام اول را به‌طور کامل برداریم و اختلاف فشاری که در سمت چپ معادله ۱ وجود دارد را تعیین کنیم. این حرکتِ بعدی ماست.

ستاره‌ای را در نظر بگیرید که شامل الکترون‌ها و سایر مواد می‌شود. الکترون‌ها چگونه پراکنده می‌شوند؟ بیایید توجهمان را به یک الکترون "معمولی" جلب کنیم. می‌دانیم که الکترون‌ها از اصل طرد پاولی تبعیت می‌کنند که می‌گوید هیچ دو الکترونی را نمی‌توان یافت که همزمان در یک نقطه مشخصی از فضا قرار بگیرند. این حرف در مورد دریایی از الکترون‌ها در ستاره که ما از آن با نام "گاز الکترون‌ها" یاد می‌کنیم، چه مفهومی دارد؟ ازآنجایی‌که الکترون‌ها لزوماً از هم جدا هستند، می‌توانیم تصور کنیم که هرکدام از الکترون‌ها به‌تنهایی درون یک مکعب کوچکی داخل ستاره جای گرفته‌اند. در حقیقت این تصور درست نیست زیرا ما می‌دانیم که الکترون‌ها دو نوع دارند – "اسپین بالا" و "اسپین پایین"

– و اصل پاولی فقط ذرات کاملاً یکسان را از نزدیک شدن به هم منع می‌کند و این یعنی ما می‌توانیم دو الکترون [با اپسن متفاوت] را در یک مکعب جای دهیم. بین این حالت با حالتی که الکترون‌ها از اصل پاولی تبعیت نمی‌کنند، باید تفاوت قائل شویم. در آن حالت دو الکترون نمی‌توانند همزمان در یک "مکعب مجازی" قرار بگیرند. در عوض می‌توانند پراکنده شده و از فضای بزرگ‌تری استفاده کنند. در حقیقت اگر ما راه‌های مختلفی که الکترون‌ها می‌توانند با خود و سایر ذرات درون ستاره اندرکنش کنند را در نظر نگیریم، محدودیتی برای جایگیری‌شان وجود نخواهد داشت.

می‌دانیم که اگر یک ذره کوانتومی را محصور کنیم چه اتفاقی می‌افتد: طبق اصل عدم قطعیت هایزنبرگ این ذره

جهش می‌کند و هرقدر این حصار را تنگ‌تر کنیم، جهش آن بیشتر می‌شود. این یعنی هرقدر که کوتوله سفید آینده ما متراکم‌تر می‌شود، الکترون‌ها محصورتر می‌شوند و این باعث می‌شود که بیشتر تحریک شوند. همان فشار ناشی از تحریک آن‌هاست که در مقابل گرانش ایستادگی می‌کند.

ما بهتر از گفته‌هایمان می‌توانیم عمل کنیم زیرا می‌توانیم از اصل عدم قطعیت هایزنبرگ برای به دست آوردن تکانه یک الکترون معمولی استفاده کنیم. به‌طور خاص اگر ما الکترونی را در محدوده‌ای به اندازه Δx محدود کنیم، این ذره با تکانه‌ای به اندازه $p \sim h/\Delta x$ جهش خواهد کرد. در حقیقت ما در فصل چهارم استدلال کردیم که این عدد یک حد بالا برای تکانه محسوب می‌شود و تکانه معمولی بین این عدد و صفر قرار

دارد؛ خوب است که این اطلاعات را برای استفاده اندکی بعد به خاطر داشته باشید. دانستن تکانه سریعاً به ما اجازه می‌دهد که دو چیز را بدانیم. اول اینکه اگر الکترون‌ها از اصل پاولی تبعیت نمی‌کردند، آن‌ها محدود به مکانی به اندازه Δx نمی‌ماندند و در محدوده بزرگ‌تری محصور می‌شدند. این باعث می‌شد که جنب‌وجوش کمتری داشته باشند و این یعنی فشار کمتر. پس واضح است که اصل پاولی چگونه وارد بازی می‌شود؛ این اصل فشاری به الکترون‌ها وارد می‌کند که طبق اصل هایزنبرگ آن‌ها جنب جوش فراوانی داشته باشند. اندکی بعد ما این جنب‌وجوش فراوان را وارد فرمول فشار می‌کنیم اما باید نکته دومی که یاد می‌گیریم را نیز عنوان کنیم. ازآنجایی‌که تکانه برابر است با $p=mv$، سرعت این

جنب‌وجوش نیز به‌طور معکوس با جرم در ارتباط است، پس الکترون‌ها نسبت به هسته‌های سنگین‌تر که آن‌ها نیز در ستاره وجود دارند، جنب‌وجوش بسیار بیشتری دارند و به همین دلیل است که فشار ناشی از هسته‌ها بی‌اهمیت است. خب حال چگونه می‌توانیم با دانستن تکانه یک الکترون فشار گازی از الکترون‌های مشابه را به دست آوریم؟

اولین کاری که باید بکنیم این است که بفهمیم اندازه آن جعبه‌ای که دو الکترون قرار است در آن جای بگیرند چقدر است. جعبه کوچک ما حجمی برابر با $(\Delta x)^3$ دارد و ازآنجایی‌که ما می‌خواهیم تمام الکترون‌ها را درون ستاره جای دهیم، می‌توانیم این حجم را بر مبنای تعداد کل الکترون‌های موجود در ستاره (N) تقسیم‌بر حجم ستاره (V) بنویسیم. ما

دقیقاً $N/۲$ جعبه برای قرار دادن الکترون‌ها نیاز داریم زیرا مجازیم در هر جعبه دو الکترون جای دهیم. این یعنی هر جعبه حجمی برابر با V تقسیم‌بر $N/۲$ دارند که برابر است با $۲(V/N)$. در ادامه بحث ما از کمیت N/V (تعداد الکترون‌ها تقسیم‌بر حجم واحد، در درون ستاره) استفاده زیادی خواهیم کرد، پس بهتر است از نمادی مانند n برای این کمیت استفاده کنیم. حال ما می‌توانیم مقدار حجم موردنیاز جعبه‌ای را بنویسیم که بتوان از آن برای قرار دادن الکترون‌ها در ستاره استفاده کرد یعنی $(\Delta x)^۳=۲/n$. درصورتی‌که ریشه سوم عبارت سمت راست را محاسبه کنیم به دست می‌آوریم:

$$\Delta x = \sqrt[۳]{\frac{۲}{n}} = (\frac{۲}{n})^{\frac{۱}{۳}}$$

حال می‌توانیم این عبارت را در رابطه عدم قطعیت قرار دهیم و تکانه معمولی الکترون‌ها را بر مبنای جنب‌وجوش کوانتومی‌شان به دست آوریم:

$$p \sim h(\frac{n}{۲})^{\frac{۱}{۳}} \qquad (۲)$$

که علامت ~ یعنی تقریباً. مسلماً این عبارات کمی ابهام‌برانگیزند زیرا قرار نیست که الکترون‌ها همگی به‌طور یکسان جنب‌وجوش کنند: بعضی‌شان با سرعت بیشتری از یک الکترون معمولی جهش می‌کنند و بعضی با سرعت کمتر. اصل

عدم قطعیت هایزنبرگ نمی‌تواند به ما بگوید که چه تعداد از الکترون‌ها با این سرعت حرکت کرده و چه تعداد با آن سرعت. در عوض گزاره کلی‌تری را به ما می‌دهد و می‌گوید اگر الکترونی را تحت‌فشار قرار دهید با تکانه‌ای تقریباً برابر با $h/\Delta x$ حرکت می‌کند. ما فرض می‌کنیم همین تکانه معمولی برای تمام الکترون‌ها صادق است. در طی فرایند اندکی از دقت کارمان کاسته خواهد شد اما سادگی کار بسیار بیشتر می‌شود و همچنین مسیر درستی در فیزیک را در پیش خواهیم گرفت[۱].

[۱]. مسلما امکان محاسبه دقیق‌تر حرکت الکترون‌ها وجود دارد، اما به قیمت استفاده از ریاضیات بیشتر.

حال ما سرعت الکترون‌ها را می‌دانیم و همین اطلاعات برای به دست آوردن فشاری که الکترون‌ها به مکعب وارد می‌کنند کافی است. برای به دست آوردن آن، مجموعه الکترون‌هایی را تصور کنید که همگی در یک‌جهت و با سرعت یکسانی (V) به سمت یک آینه تخت می‌روند. آن‌ها به آینه برخورد کرده و به عقب برمی‌گردند و دوباره با همان سرعت اما در جهت مخالف حرکتشان را ادامه می‌دهند. بیایید نیروی وارده بر آینه توسط الکترون‌ها را حساب کنیم. پس‌ازآن می‌توانیم مسئله واقعی‌ترمان که الکترون‌ها در جهت یکسانی حرکت نمی‌کنند را محاسبه کنیم. این روش بسیار در فیزیک متداول است – ابتدا در مورد نسخه ساده‌تری از مسئله‌ای که با آن مواجه شده‌اید، فکر کنید. با این روش شما بدون اینکه به دردسر

بیافتید می‌توانید فیزیک مسئله را بفهمید و قبل از اینکه وارد اصل مطلب شوید اعتمادبه‌نفس کافی را به دست می‌آورید. فرض کنید که تعداد الکترون‌های این مجموعه در هر مترمکعب برابر با n است و برای سادگی مسئله فرض کنید سطح مقطع آن دایروی بوده برابر با ۱ مترمربع است که در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است. در هر ثانیه nv الکترون به آینه برخورد می‌کنند (اگر v را برحسب متر بر ثانیه در نظر بگیریم). ما این را می‌دانیم زیرا در هر ثانیه، تمام الکترون‌هایی که بین آینه و فاصله ۱×v از آینه قرار دارند، به آن برخورد خواهند کرد؛ یعنی الکترون‌هایی که در استوانه موجود در شکل نشان داده شده‌اند. ازآنجایی‌که حجم استوانه برابر با سطح مقطع آن ضرب‌در طولش است، حجم آن برابر با v

مترمکعب خواهد بود و ازآنجایی‌که n الکترون در هر مترمکعب از این مجموعه داریم، در هر ثانیه nv الکترون به آینه برخورد می‌کند.

زمانی که هر الکترون به آینه خورده و برمی‌گردد (یا به‌اصطلاح کمانه می‌کند)، تکانه‌اش برعکس می‌شود و این یعنی هر الکترون تکانه‌اش را به اندازه ۲mv تغییر می‌دهد. همان‌طور که برای متوقف کردن یک اتوبوس و به عقب راندن آن نیرو لازم است، برای تغییر دادن تکانه الکترون‌ها نیز نیرو لازم است. بازهم به اسحاق نیوتون مراجعه می‌کنیم. در فصل اول ما قانون دوم او را به‌صورت F=ma نوشتیم، اما این رابطه حالت خاصی برای یک رابطه کلی‌تر است که می‌گوید: نیرو

برابر است با نرخ تغییرات تکانه[۱]. پس کل این مجموعه الکترون نیروی خالص $F=۲mv\times(nv)$ را بر آینه وارد می‌کنند، زیرا این عبارت همان مقدار تغییرات خالص تکانه الکترون‌ها در هر ثانیه است. ازآنجایی‌که سطح مقطع این استوانه الکترونی ۱ مترمربع است، همین مقدار را می‌توان به‌عنوان فشار وارده بر آینه ناشی از الکترون‌ها در نظر گرفت.

تنها یک گام کوچک برای رسیدن از مجموعه الکترون‌ها به گاز الکترون‌ها باقی مانده. به جای اینکه فرض کنیم تمامی الکترون‌ها در یک‌جهت حرکت می‌کنند باید در نظر داشته باشیم که بعضی‌شان به بالا می‌روند، بعضی به پایین، بعضی به

[۱]. قانون دوم نیوتون را می‌توان به صورت $F=dp/dt$ نوشت. برای جرم‌های ثابت می‌توان آن را به شکل آشناتر $F=mdv/dt=ma$ نوشت.

چپ و به همین ترتیب. اثر خالص به این صورت به دست می‌آید که فشار را بر ۶ تقسیم کنیم (به ۶ جهت موجود در مکعب فکر کنید) یعنی $(2mv)\times(nv)/6=nmv^2/3$. ما می‌توانیم v موجود در این رابطه را با سرعت حرکت الکترون‌های معمولی که با رابطه هایزنبرگ به دست آوردیم عوض کنیم (یعنی رابطه شماره ۲) تا بتوانیم نتیجه نهایی‌مان را برای فشاری که توسط الکترون‌ها درون ستاره کوتوله سفید ایجاد می‌شود به دست آوریم:[۱]

$$p = \frac{1}{3} nm \frac{h^2}{m^2} \left(\frac{n}{2}\right)^{\frac{2}{3}} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{2}{3}} \frac{h^2}{m} n^{\frac{5}{3}}$$

[۱]. در اینجا ما ضرایب را طبق قانون عمومی $x^a x^b = x^{a+b}$ ترکیب کردیم.

اگر یادتان باشد ما گفتیم که این تنها یک تقریب است. نتیجه نهایی با استفاده از ریاضیاتِ خیلی بیشتری می‌شود:

$$P = \frac{۱}{۴۰}\left(\frac{۳}{\pi}\right)^{\frac{۲}{۳}}\frac{h^{۲}}{m}n^{\frac{۵}{۳}} \qquad (۳)$$

این نتیجه خوبی است. به ما می‌گوید فشار در نقطه‌ای از ستاره با تعداد الکترون‌های ستاره در هر مترمکعبش به توان پنج‌سوم، متناسب است. نگران نباشید که چرا ما ثابت تناسب را درست تخمین نزدیم – این‌که بقیه چیزها را درست به دست آوردیم مهم است. در حقیقت ما گفته بودیم که تخمین ما از تکانه الکترون‌ها احتمالاً خیلی بزرگ است و این دلیلی

است برای اینکه چرا تخمین ما از مقدار واقعی فشار بزرگ‌تر شد.

دانستن فشار بر مبنای تراکم الکترون‌ها شروع خوبی است، اما اگر آن را بر مبنای چگالی جرمی ستاره بیان کنیم به اهدافمان نزدیک‌تر می‌شویم. ما می‌توانیم این کار را با استفاده از این فرض مطمئن انجام دهیم که جرم غالب ستاره ناشی از هسته‌هایش است، نه از الکترون‌ها (یک پروتون تنها جرمی حدود ۲۰۰۰ برابر الکترون دارد). همچنین می‌دانیم که تعداد الکترون‌های یک ستاره برابر با تعداد پروتون‌هایش است، زیرا ستاره ازلحاظ الکتریکی خنثی است. برای به دست آوردن چگالی جرمی باید بدانیم که تعداد پروتون‌ها و نوترون‌های درون ستاره در هر مترمکعبش چقدر است و نباید نوترون‌ها را

فراموش کنیم، زیرا آن‌ها نتیجه‌ای از فرایند همجوشی هستند. برای کوتوله‌های سفید سبک‌تر هسته ستاره به‌طور عمده هلیم-۴ خواهد بود که محصول نهایی همجوشی هیدروژن است، و این یعنی تعداد پروتون‌ها و نوترون‌ها برابر خواهد بود. خب کمی به نمادگذاری‌ها بپردازیم. عدد جرمی A طبق قرارداد برابر است با تعداد نوترون‌ها + پروتون‌ها در یک هسته و برای هلیم-۴ می‌شود A=۴. تعداد پروتون‌های هسته (عدد اتمی) را با Z نشان می‌دهند و برای هلیم Z=۲. حال می‌توانیم رابطه‌ای بین چگالی الکترون‌ها، n، و چگالی جرم، ρ بنویسیم:

$$n = Z\rho/(m_p A)$$

و ما فرض کردیم که جرم پروتون، m_p، برابر با جرم نوترون است که فرض خوبی است. کمیت m_pA برابر با جرم هر هسته است؛ بنابراین ρ/m_pA تعداد هسته در واحد حجم است و Z ضرب‌در این مقدار تعداد پروتون‌های هر واحد حجمی را می‌دهد که برابر خواهد بود با تعداد الکترون‌ها – این‌ها چیزهایی بود که معادله می‌گفت.

ما می‌توانیم از این معادله برای جابجایی n در معادله (۳) استفاده کنیم و چون n متناسب با ρ است، نتیجه این می‌شود که فشار متناسب است با چگالی به توان $\frac{۵}{۳}$. فیزیک برجسته‌ای که ما در اینجا کشف کردیم این است:

$$P = \kappa\rho^{\frac{5}{3}} \qquad (۴)$$

و ما نباید نگران اعدادی باشیم که مقیاس کلی فشار را تنظیم می‌کنند و به همین دلیل آن‌ها را با نشان دادن علامت κ آورده‌ایم. بهتر است بدانید κ بستگی به نسبت بین Z و A دارد، پس برای کوتوله‌های سفید متفاوت فرق می‌کند. جمع‌وجور کردن اعداد و نشان دادن آن‌ها با یک نماد باعث می‌شود تا قسمت مهم معادله بیشتر به چشم ما بیاید. مثلاً در این مورد تعدد اعداد و نمادها باعث می‌شد که ما قسمت اصلی معادله که رابطه بین فشار و چگالی ستاره است، موردتوجه قرار نمی‌گرفت.

قبل از اینکه از این بحث بیرون بیاییم دقت کنید که فشار ناشی از جنب‌وجوش کوانتومی ربطی به دمای ستاره ندارد. تنها به این وابسته است که چقدر ستاره را فشار دهیم. همچنین عامل دیگری وجود دارد که می‌تواند در فشار الکترون‌ها سهیم شود که به‌سادگی اتفاق می‌افتد زیرا الکترون‌ها در دمای خودشان در حال جنب‌وجوش "معمولی" هستند و هرقدر دمای ستاره بیشتر شود، جنب‌وجوش آن‌ها بیشتر می‌شود. ما درباره این منبع فشار صحبتی نکردیم زیرا زمان کوتاه است و اگر ما می‌خواستیم این را هم حساب کنیم نهایتاً می‌دیدیم که مقدار آن در مقابل فشار کوانتومی ناچیز است.

نهایتاً ما آماده‌ایم تا معادله‌مان که برای فشار کوانتومی به دست آمد را وارد معادله اصلی‌مان (۱) بکنیم که می‌ارزد دوباره تکرارش کنیم:

$$\left(P_{\text{پایین}} - P_{\text{بالا}}\right) A = G \frac{M_{\text{داخل}} M_{\text{مکعب}}}{r^{۲}} \qquad (۱)$$

اما به همین سادگی‌ها که می‌گوییم نیست، زیرا باید اختلاف فشار بین سطوح بالا و پایین مکعب را بدانیم. ما می‌توانیم معادله (۱) را دوباره مبتنی بر چگالی ستاره بنویسیم که خود این چگالی چیزی است که در جای‌جای ستاره متغیر است (اگر این‌گونه نبود هیچ اختلاف فشاری در طول مکعب اتفاق نمی‌افتاد) و سپس می‌توانیم تلاش کنیم تا معادله را حل کرده و تعیین کنیم که چگالی ستاره نسبت به فاصله‌ای که از

مرکزش دارد چگونه تغییر می‌کند. برای این کار ما باید شروع به حل معادلات دیفرانسیل کنیم که البته قصدمان این است که وارد آن سطوح از ریاضیات نشویم. به‌جای آن ما از روشی استفاده خواهیم کرد که مبتکرانه بوده و نیازمند تفکر پیچیده‌تر (اما محاسبات ساده‌تر) ای است و به‌این‌ترتیب اقدام به حل معادله (۱) می‌کنیم و رابطه بین جرم و شعاع ستاره کوتوله سفید را استخراج می‌کنیم.

به‌وضوح اندازه مکعب کوچک ما و همچنین موقعیت آن درون ستاره اختیاری است و هیچ‌کدام از نتیجه‌گیری‌هایی که درباره ستاره خواهیم کرد ارتباطی به جزئیات این مکعب نخواهد داشت. بیایید از جایی شروع کنیم که ممکن است بی‌هدف به نظر آید. ما حق داریم که موقعیت و اندازه مکعب

را بر مبنای اندازه ستاره بیان کنیم. اگر R شعاع ستاره باشد، می‌توانیم فاصله مکعب از مرکز ستاره را به‌صورت $r=aR$ بیان کنیم که a عددی بی‌بعد و بین ۰ و ۱ می‌باشد. منظور ما از بی‌بعد این است که این عدد خالص بوده و هیچ واحدی ندارد. اگر $a=1$، مکعب ما در سطح ستاره قرار دارد و اگر $a=\frac{1}{2}$، مکعب در وسط فاصله بین مرکز تا سطح ستاره جای گرفته است. به همین شکل ما می‌توانیم اندازه مکعب را نیز بر مبنای شعاع ستاره بنویسیم. اگر L اندازه وجه مکعب باشد می‌توانیم بنویسیم $L=bR$ که دوباره b عدد خالصی است و اگر بخواهیم مکعب نسبت به ستاره بسیار کوچک باشد، این عدد نیز بسیار کوچک است. واقعاً نکته مبهمی در اینجا وجود ندارد و فعلاً به نظر کار ما بی‌ارزش می‌آید. تنها نکته قابل‌ذکر این است که R

فاصله مناسبی برای استفاده است زیرا هیچ فاصله دیگری وجود ندارد که ما بخواهیم برای یک ستاره کوتوله سفید استفاده کنیم که همزمان درکی هم از خود ستاره به ما بدهد.

به همین ترتیب می‌توانیم این حرکت وسواسانه مان را ادامه داده و چگالی ستاره در نقطه‌ای که مکعب قرار دارد را بر مبنای چگالی متوسط ستاره بنویسیم؛ یعنی می‌توانیم بنویسیم $\rho = f\bar{\rho}$ که f بازهم عددی است خالص (بی‌بعد) و $\bar{\rho}$ چگالی متوسط ستاره است. همان‌طور که گفتیم، چگالی مکعب بستگی به مکان قرارگیری‌اش در ستاره دارد – اگر به مرکز ستاره نزدیک‌تر باشد، چگالی‌اش بیشتر است. ازآنجایی‌که چگالی متوسط $\bar{\rho}$ ربطی به موقعیت مکعب ندارد، f باید ربط داشته باشد. یعنی f بستگی به فاصله r دارد که این یعنی

وابسته به aR است. حال نکته‌ای را ذکر می‌کنیم که جهت‌گیری بقیه محاسباتمان را روشن می‌سازد: f عددی خالص بوده، اما R این‌گونه نیست (زیرا فاصله را اندازه می‌گیرد). این یعنی f تنها می‌تواند به a وابسته باشد و نه به R. این نتیجه مهمی است زیرا می‌گوید نمودار تغییرات چگالی یک ستاره کوتوله سفید "ازلحاظ مقیاسی نامتغیر است". این یعنی چگالی با توجه به شعاع تغییر می‌کند اما ربطی به این ندارد که شعاع خود ستاره چقدر است. به‌عنوان‌مثال چگالی به فاصله $\frac{۳}{۴}$ از مرکز ستاره همان کسر از چگالی متوسط در هر کوتوله سفید است و ربطی به اندازه (شعاع) ستاره ندارد. دو راه برای استفاده از این نتیجه‌گیری مهم وجود دارد و ما هردویشان را می‌گوییم. یکی از ما (نویسندگان) این را این‌گونه

بیان می‌کنیم: "این به این دلیل است که هر تابع بی‌بعدی از r (یعنی همان f) تنها زمانی می‌تواند بی‌بعد باشد که تابعی از یک متغیر بی‌بعد باشد و تنها متغیر بی‌بعد ما r/R=a است، زیرا R تنها کمیتی است که بعدی را در خود دارد که در اختیار ماست"

نویسنده دیگر احساس می‌کند که بیان این جمله به این صورت قابل‌فهم‌تر است:" f به‌طورکلی می‌تواند به شکل پیچیده‌ای به r (فاصله مکعب از مرکز ستاره) وابسته باشد. اما برای سادگی کار بیایید فرض کنیم که رابطه‌شان مستقیم است یعنی f متناسب است با مثلاً r^2 ($f \alpha r^2$). به‌عبارت‌دیگر f=Br که B عددی ثابت است. اینجا ما دوست داریم که f عددی خالص باشد،اما r واحد دارد (می‌تواند متر باشد). این

یعنی باشد واحد B به‌صورت $\frac{۱}{\text{متر}}$ باشد تا واحدهای فاصله همدیگر را حذف کنند [و f بی‌بعد بماند]. پس ما چه چیزی را برای B انتخاب کنیم؟ ما نمی‌توانیم B را اختیاری انتخاب کنیم مثلاً به‌طور تصادفی عدد ۱ را (با واحد ۱ بر متر) به آن اختصاص دهیم زیرا مفهومی نخواهد داشت و ارتباطی به ستاره نیز پیدا نمی‌کند. مثلاً چرا عدد ۱ تقسیم‌بر ۱ سال نوری را انتخاب نمی‌کنیم تا جواب کاملاً متفاوتی به دست آوریم؟ تنها فاصله‌ای که در دستمان است R است که همان شعاع فیزیکی ستاره می‌باشد و ما باید از این عدد استفاده کنیم تا f را بی‌بعد نگه داریم. این یعنی f تنها به r/R بستگی دارد. شما می‌توانید همین استدلال را برای زمانی که f متناسب با $r^۲$ باشد نیز انجام دهید". این مفهوم همان چیزی

است که نویسنده اول گفت اما طولانی‌تر. این یعنی ما می‌توانیم جرم مکعب کوچکمان که اندازه L داشته و حجم L^3 دارد و در فاصله r از مرکز ستاره قرار گرفته را این‌گونه بنویسیم: $M_{\text{مکعب}} = f(a)L^3\bar{\rho}$. ما به‌جای f نوشتیم f(a) تا بدانیم که f تنها به a=r/R بستگی دارد و نه مستقیماً به اندازه‌های مقیاس بزرگ خود ستاره. همین استدلال را می‌توان به کار برد و نوشت $M_{\text{داخل}} = g(a)M$ که g(a) نیز تابعی از a است. برای مثال تابع g(a) که در $a=\frac{1}{2}$ حساب شده است، کسری از جرم ستاره که در فاصله بین مرکز تا نصف شعاع ستاره قرار دارد را به ما می‌دهد و برای تمامی کوتوله‌های سفید یکسان بوده و ربطی به شعاعشان ندارد زیرا در پاراگراف

قبل استدلال کردیم[۱]. ممکن است دقت کرده باشید که ما به‌آرامی شروع به استفاده از نمادهایی کردیم که در معادله ۱ معرفی شدند و آن‌ها را با کمیت‌های بی‌بعد جایگزین کردیم (a، b، f و g) که در کمیت‌هایی که تنها به جرم و شعاع ستاره وابسته هستند ضرب شده‌اند (چگالی متوسط ستاره بر اساس M و R تعیین می‌شود زیرا $\bar{\rho} = \frac{M}{V}$ و $V = \frac{۴\pi R^۳}{۳}$ که همان حجم کره است). برای تکمیل این بحث، ما باید همین کار را برای اختلاف فشار نیز بکنیم که می‌توانیم (با استفاده از

---

[۱]. برای کسانی که ریاضیات می دانند: $g(a) = ۴\pi R^۳ \bar{\rho} \int_۰^a x^۲ f(x) dx$.
این یعنی زمانی که ما f(a)را دانستیم، g(a) را نیز خواهیم دانست.

معادله ۴) بنویسیم $P_{\text{پایین}} - P_{\text{بالا}} = h(a,b)\kappa\bar{\rho}^{\frac{5}{3}}$ که h(a,b) کمیتی بی‌بعد است. این‌که h(a,b) به هردوی a و b بستگی دارد به این دلیل است که اختلاف فشار نه‌تنها به موقعیت مکعب وابسته است (که به a مشخص می‌شود) بلکه به اندازه خود مکعب نیز بستگی دارد (که به b مشخص می‌شود): مکعب‌های بزرگ‌تر اختلاف فشار بیشتری دارند. نکته مهم این است که همانند f(a) و g(a)، h(a,b) نیز ربطی به شعاع خود ستاره ندارد. ما می‌توانیم از عباراتی که به دست آوردیم استفاده کنیم و معادله (۱) را به‌صورت زیر بازنویسی کنیم:

$$\left(h\kappa\bar{\rho}^{\frac{5}{3}}\right)\times\left(b^{2}R^{2}\right)=G\frac{(gM)\times(fb^{3}R^{3}\bar{\rho})}{a^{2}R^{2}}$$

که بسیار پیچیده به نظر آمده و اصلاً شبیه به این نیست که هنوز به هدف رسیده باشیم. نکته مهم این است که این عبارت رابطه‌ای را بین جرم ستاره و شعاعش بیان می‌کند. اگر چگالی متوسط ستاره را نیز با پارامترهای خودش بنویسیم (یعنی $\bar{\rho}=\frac{M}{\frac{4\pi R^{3}}{3}}$) این عبارت پیچیده را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$RM^{\frac{1}{3}}=\frac{\kappa}{(\lambda G)} \qquad (۵)$$

که

$$\lambda = \frac{۳}{۴\pi}\frac{bfg}{ha^{۲}}$$

حال λ تنها بستگی به کمیت‌های بی‌بعد a، b، f، g و h دارد و این یعنی ربطی به مشخصات کلی ستاره که همان M و R هستند ندارد و این هم یعنی این عدد را می‌توان برای تمامی ستاره‌های کوتوله سفید به کار برد.

اگر شما نگران این هستید که چه اتفاق می‌افتد اگر a یا b را عوض کنیم (یعنی موقعیت و اندازه مکعبمان را تغییر دهیم)، شما قدرت این استدلال را به درستی درک نکرده‌اید. به نظر می‌آید که تغییر a و b می‌تواند λ را تغییر دهد و

جواب متفاوتی را برای $RM^{\frac{1}{3}}$ بدهد. اما این غیرممکن است زیرا می‌دانیم $RM^{\frac{1}{3}}$ چیزی است که به کلیت ستاره مرتبط بوده و ارتباطی به مکعب ندارد. این یعنی هر تغییری در a و b باید توسط تغییراتی در f، g و h خنثی شود.

معادله (۵) به‌طور خاص نشان می‌دهد که کوتوله‌های سفید می‌توانند وجود داشته باشند زیرا ما توانستیم با موفقیت معادله فشار-گرانش (معادله (۱)) را تعادل ببخشیم. این اتفاق کم‌ارزشی نیست، زیرا ممکن بود این معادله برای ترکیبات مختلف M و R ارضا نشود. همچنین معادله (۵) می‌گوید مقدار $RM^{\frac{1}{3}}$ باید ثابت باشد. به‌عبارت‌دیگر اگر ما به آسمان

نگاه کرده و شعاع و جرم کوتوله‌های سفید را اندازه بگیریم، خواهیم فهمید که حاصل‌ضرب شعاع در ریشه سوم جرم، عدد ثابتی را برای هر کوتوله سفید می‌دهد. این پیش‌بینی بزرگی است.

این استدلال را می‌توان پیش برد و مقدار دقیق λ را محاسبه کرد، اما چنین کاری نیازمند حل معادله دیفرانسیل مرتبه ۲ برای چگالی است و چنین کاری بسیار فراتر از حد این کتاب است. به یاد داشته باشید λ یک عدد خالص است و دلیلش ساده است "همینی هست که هست!" و البته ما می‌توانیم با ریاضیاتی در سطوح بالاتر این عدد را محاسبه کنیم. این‌که ما این عدد را در اینجا محاسبه نکردیم نباید شما را از دستاوردهایی که تا اینجا داشتیم غافل کند: ما ثابت

کردیم که ستاره‌های کوتوله سفید امکان وجود دارند و توانستیم رابطه‌ای را بین جرم و اندازه‌شان به دست آوریم. پس از محاسبه λ (که می‌توان آن را با کامپیوترهای خانگی انجام داد) و همچنین پس از جایگذاری پارامترهای κ و G پیش‌بینی ما این است:

$$RM^{\frac{1}{3}} = (3/5\times10^{17}\ kg^{\frac{1}{3}}m)\times\left(\frac{Z}{A}\right)^{\frac{5}{3}}$$

که برای هسته‌هایی از جنس هلیم خالص، کربن و یا اکسیژن $\left(\frac{Z}{A}=\frac{1}{2}\right)$ برابر است با $1/1\times10^{17}\ kg^{\frac{1}{3}}m$. برای هسته‌های آهنی $\left(\frac{Z}{A}=\frac{26}{56}\right)$ عدد ۱/۱ اندکی تغییر کرده به ۱

تبدیل می‌شود. ما مقالات آکادمیک را بررسی کرده و داده‌های مرتبط با جرم و شعاع ۱۶ کوتوله سفید را که در کهکشان راه شیری قرار دارند جمع‌آوری کردیم. برای هرکدام از آن‌ها مقدار $RM^{\frac{1}{3}}$ را محاسبه کردیم و نتیجه این بود که مشاهدات نجومی نشان می‌دهند $RM^{\frac{1}{3}} \approx ۰/۹\times۱۰^{۱۷}\ kg^{\frac{1}{3}}m$. توافق بین مشاهدات و نظریه بسیار حیرت‌انگیز است – ما موفق شدیم از اصل طرد پاولی، اصل عدم قطعیت هایزنبرگ و قانون گرانش نیوتون استفاده کرده و رابطه بین شعاع-جرم ستاره‌های کوتوله سفید را محاسبه کنیم.

البته عدم قطعیتی در این اعداد وجود دارد (مقادیر نظریه ۱/۱ و۱/۰ بوده اما مشاهدات نجومی ۰/۹ را نتیجه داد). می‌توان یک تحلیل علمی شروع کرد که چقدر احتمال دارد مشاهدات با نظریات توافق داشته باشند، اما برای اهداف ما چنین تحلیلی نیاز نیست زیرا توافقی که ما می‌بینیم به اندازه کافی شگفت‌انگیز است. خیلی جالب است که ما توانستیم محاسباتی انجام دهیم و با دقت تقریباً ۱۰٪ نتیجه را پیش‌بینی کنیم و این شاهدی قانع‌کننده مبنی بر فهم عمیق ما از ستارگان و مکانیک کوانتومی است.

فیزیکدانان حرفه‌ای و اخترشناسان، مسئله را اینجا ول نمی‌کنند. آن‌ها دوست دارند فهم نظریاتی‌شان را تا حداکثر جزئیات ممکن امتحان کنند و این کار یعنی بهبود بخشیدن

توضیحاتی که ما در این فصل به آن‌ها پرداختیم. به‌طور خاص یک تحلیل مؤثر می‌تواند دمای ستاره که نقش مهمی در ساختار ستاره ایفا می‌کند را، وارد معادلات کند. علاوه بر آن دریای الکترون‌ها در حضور هسته‌ای که بار الکتریکی مثبت دارد، تجمع می‌کنند و ما در محاسباتمان این اندرکنش بین الکترون‌ها و هسته‌ها را در نظر نگرفتیم (و همچنین مابین خود الکترون‌ها). دلیل چشم‌پوشی ما، این ادعا بود که تأثیری که این اندرکنش‌ها می‌گذارند در مقابل سادگی محاسبات ما، اندک است. این ادعا را می‌توان با محاسبات جزئی‌تری ثابت کرد و به همین دلیل است که محاسبات ساده ما با نتایج حاصل از داده‌ها همخوانی خوبی دارد.

ما تا اینجا چیزهای زیادی یاد گرفتیم: ما فهمیدیم که فشار الکترون‌ها می‌تواند باعث پایداری کوتوله‌های سفید شود و همچنین توانستیم با دقت خوبی پیش‌بینی کنیم که تغییر در جرم ستاره چه تأثیری بر روی شعاع آن دارد. برخلاف "ستاره‌های معمولی" که در حال مصرف کردن سوختشان هستند ، دقت کنید که ستاره کوتوله سفید این خاصیت را دارد که اگر به آن جرمی اضافه کنیم کوچک‌تر می‌شود. به این دلیل که افزایش جرم، گرانش ستاره را افزایش می‌دهد و آن را متراکم‌تر می‌کند. اگر معادله ۵ را در نظر بگیریم، این معادله به‌طور ضمنی به ما می‌گوید که با اضافه کردن بینهایت جرم می‌توانیم ستاره را به حدی رز کنیم که اصلاً اندازه‌ای نداشته باشد. اما واقعیت این نیست. همان‌طور که در ابتدای این فصل

گفتیم، مسئله مهم این است که [با افزایش جرم] ما وارد محدوده‌هایی می‌شویم که الکترون‌ها بسیار محدود می‌شوند [که باعث می‌شود جنب‌وجوششان بیشتر شود] و این کار نظریه نسبیت خاص انیشتین را وارد ماجرا می‌کند، زیرا به‌تدریج سرعت الکترون‌ها نزدیک به سرعت نور می‌شود. تأثیر این اتفاق این است که ما دیگر نمی‌توانیم از قوانین حرکت نیوتون استفاده کنیم و باید آن‌ها را با قوانین انیشتین جایگزین کنیم. همان‌طور که در ادامه خواهیم دید، کل ماجرا متفاوت می‌شود.

چیزی که قرار است در ادامه به آن بپردازیم این است که هرقدر ستاره را سنگین‌تر کنیم، فشار ناشی از الکترون‌ها دیگر متناسب با چگالی به توان پنج‌سوم نخواهد بود؛ در عوض این

فشار با نرخ کمتری متناسب با چگالی افزایش پیدا می‌کند. تا لحظاتی دیگر محاسبات را آغاز می‌کنیم، اما همین توضیحات نشان می‌دهند که چنین اتفاقی، عواقب ناگواری را برای ستاره به همراه دارد. این یعنی زمانی که ما جرم اضافه کنیم، گرانش افزایش همیشگی خود را خواهد داشت اما فشار افزایش کمتری به خود می‌بیند. سرنوشت ستاره بستگی به این خواهد داشت که با توجه به افزایش سرعت الکترون‌ها، فشار چه نسبتی با چگالی خواهد داشت. حال وقتش است که بدانیم فشار نسبیتی گاز الکترون چقدر است.

خوشبختانه نیازی به سوارشدن بر ماشین پیچیده نظریه انیشتین نداریم، زیرا محاسبه فشار گازی از الکترون‌ها که با سرعت نزدیک به نور در حرکت‌اند، دقیقاً همان مراحلی را طی

می‌کند که برای یافتن فشار گاز الکترون‌های با سرعت پایین، طی کردیم.تنها تفاوت کلیدی در این است که دیگر نمی‌توانیم از رابطه تکانه به‌صورت p=mv استفاده کنیم زیرا این رابطه صدق نخواهد کرد. اما چیزی که هنوز درست است این است که نیروی تولیدی توسط الکترون‌ها به نرخ تغییر تکانه آن‌ها بستگی دارد. قبلاً ثابت کردیم که اگر مجموعه‌ای از الکترون‌ها به سطح آینه‌ای برخورد کرده و کمانه کنند فشاری برابر با P=۲mv×(nv) را به آینه وارد می‌کنند. در حالات نسبیتی، همین عبارات را می‌توانیم بنویسیم اما باید به‌جای mv از تکانه p استفاده کنیم. ما همچنین فرضمان بر این است که سرعت الکترون‌ها نزدیک به سرعت نور است، پس می‌توانیم v را با c جایگزین کنیم. نهایتاً هنوز هم باید نتیجه را تقسیم‌بر ۶

کنیم تا فشار درون ستاره را به دست آوریم. همه این‌ها یعنی معادله فشار گاز در حالت نسبیتی برابر خواهد بود با pnc/۳ = P=۲p×nc/۶ . دقیقاً مثل قبل می‌توانیم مستقیماً سراغ اصل عدم قطعیت هایزنبرگ رفته و بگوییم تکانه معمولی یک مجموعه الکترون محصور برابر است با $h(\frac{n}{۲})^{\frac{۱}{۳}}$ و بنابراین:

$$P = \frac{۱}{۳}nch(\frac{n}{۲})^{\frac{۱}{۳}} \propto n^{\frac{۳}{۴}}$$

دوباره این معادله را به معادله دقیق مقایسه می‌کنیم:

$$P = \frac{1}{16}\left(\frac{3}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} hcn^{\frac{3}{4}}$$

نهایتاً می‌توانیم همان روش را به‌کاربرده و فشار را بر پایه چگالی درون ستاره بیان کنیم و معادله جایگزین برای معادله (۴) را به دست آوریم

$$P = \acute{\kappa}\rho^{\frac{4}{3}}$$

که $\acute{\kappa} \propto hc \times \left(\frac{Z}{Am_p}\right)^{\frac{4}{3}}$. همان‌طور که گفتیم افزایش فشار نسبت به افزایش چگالی نسبت به حالت غیر نسبیتی با سرعت کمتری رخ می‌دهد. زیرا چگالی با توان چهارسوم

افزایش پیدا می‌کند نه با توان پنج‌سوم. علت این کاهش تغییرات این است که الکترون‌ها نمی‌توانند با سرعتی بیش از نور حرکت کنند. این یعنی "ضریب جریان" nv که برای محاسبه فشار از آن استفاده کردیم، زمانی که به nc می‌رسد اشباع می‌شود و گاز نمی‌تواند با نرخ مناسبی الکترون‌هایش را به آینه برساند (یا سطح مکعب) تا بتواند به رفتار $\rho^{\frac{۵}{۳}}$ دست یابد.

حال می‌توانیم تأثیرات این تغییر را بررسی کنیم به این صورت که با همان استدلالاتی که برای حالت غیر نسبیتی پیش رفتیم، پیش روی کرده و جایگزین معادله (۵) را به دست آوریم:

$$\acute{\kappa} M^{\frac{۴}{۳}} \propto G M^{۲}$$

این نتیجه بسیار مهمی است زیرا برخلاف معادله (۵)، این معادله هیچ ارتباطی به شعاع ستاره ندارد. معادله به ما می‌گوید که این نوع از ستاره که از الکترون‌های با سرعت نور تشکیل شده است، تنها می‌تواند جرم خاصی را به خود بگیرد. درصورتی‌که پارامترهای موجود در $\acute{\kappa}$ را که در پاراگراف قبل آمده جایگزین کنیم، پیش‌بینی خواهیم کرد:

$$M \propto \left(\frac{hc}{G}\right)^{\frac{۳}{۲}} \left(\frac{Z}{Am_p}\right)^{۲}$$

این دقیقاً همان نتیجه ایست که در ابتدای این فصل مطرح کردیم؛ یعنی حداکثر جرمی است که یک کوتوله سفید می‌تواند داشته باشد. ما به رسیدن به نتیجه چاندراسخار بسیار نزدیک شدیم. تمام آن چیزی که باید بدانیم این است که چرا این عدد حداکثر جرم ممکن است.

ما یاد گرفتیم که برای ستاره‌های کوتوله سفید که خیلی هم سنگین نیستند، شعاع خیلی کوچک نیست و الکترون‌ها نیز خیلی متراکم نشده‌اند. پس آن‌ها جنب‌وجوش کوانتومی زیادی نداشته و سرعتشان نسبت به سرعت نور کم است. دیدیم که در این ستارگان رابطه‌ای بین جرم و شعاع حاکم است که " ثابت=$R M^{\frac{1}{3}}$ " . حال فرض کنید جرم اندکی به

ستاره اضافه می‌کنیم. رابطه جرم-شعاع به ما می‌گوید که شعاع ستاره باید کوچک‌تر شود و درنتیجه الکترون‌ها متراکم‌تر شده و سریع‌تر می‌جنبند.اگر جرم بیشتری اضافه کنید ستاره کوچک‌تر می‌شود. بنابراین افزایش جرم باعث افزایش سرعت الکترون‌ها می‌شود تا جایی که سرعت حکت الکترون‌ها قابل‌مقایسه با سرعت نور شود. در همان حال فشار آن‌ها نیز به‌تدریج از $P \propto \bar{\rho}^{\frac{5}{3}}$ به $P \propto \bar{\rho}^{\frac{4}{3}}$ تبدیل می‌شود و در حالت دوم ستاره تنها در یک جرم مشخص پایدار است. اگر جرم از این مقدار مشخص بیشتر شود، قسمت راست معادله $\acute{\kappa} M^{\frac{4}{3}} \propto GM^2$، از قسمت چپ آن بیشتر می‌شود و معادله نامتعادل می‌شود. این یعنی فشار الکترون‌ها (که در سمت

چپ معادله قرار دارد) برای مقابله با گرانش (که در قسمت راست معادله است) کافی نخواهد بود و ستاره الزاماً شروع به فروپاشی می‌کند. اگر ما نگرش درستی درباره تکانه الکترون داشته باشیم و باقی مسائل را با ریاضیات پیشرفته حل کرده و اعداد جامانده را محاسبه کنیم، می‌توانیم پیش‌بینی دقیقی برای حداکثر جرم یک ستاره کوتوله سفید بکنیم. این پیش‌بینی برابر است با:

$$M=۰/۲\left(\frac{hc}{G}\right)^{\frac{۳}{۲}}\left(\frac{Z}{Am_p}\right)^{۲}=۵/۸\left(\frac{Z}{A}\right)^{۲}M_{\odot}$$

که ما دوباره مجموعه‌ای از ثابت‌های فیزیکی را بر مبنای جرم خورشید خودمان ($M_{\odot}$) آوردیم. دقت کنید که تمام آن کارهای سخت اضافی که ما انجامشان ندادیم، مقدار نسبت را به ما می‌داد که برابر با ۰/۲ است. این معادله حاصل تلاش ما برای به دست آوردن حد چاندراسخار بود: برای نسبت $\frac{Z}{A} = \frac{۱}{۲}$ ، این عدد برابر ۱/۴ جرم خورشیدی است.

اینجا دیگر پایان سفر ماست. محاسبات این فصل نسبت به سایر فصول ریاضیات بالاتری را می‌طلبید، اما ازنظر ما این محاسبات یکی از زیباترین مثال‌هایی برای قدرت بلامنازع فیزیک نوین است. درست است که این محاسبات به درد زندگی روزمره ما نمی‌خورد، اما به‌هرحال یکی از پیروزی‌های

ذهن بشر است. ما از نسبیت، مکانیک کوانتومی و استدلالات ریاضی استفاده کردیم تا بیشترین اندازه ماده که می‌تواند توسط اصل طرد در مقابل گرانش مقاومت کند را به‌درستی محاسبه کنیم. این یعنی علم بر حق است؛ مکانیک کوانتومی، صرف‌نظر از عجیب بودنش، نظریه‌ای است که دنیای واقعی را توصیف می‌کند. و این پایان خوبی برای این کتاب است.

برای مطالعه بیشتر

ما برای آماده‌سازی این کتاب، از کتاب‌های زیادی استفاده کردیم، اما جا دارد که بعضی‌شان را نام برده و توصیه کنیم.

برای تاریخچه مکانیک کوانتومی، مراجع قطعی دو کتاب فوق‌العاده از آبراهام پایس هستند: "مرز داخلی" و "خدا زیرک است..." که هر دو این کتاب‌ها فنی بوده، اما در مورد جزئیات تاریخی بی‌رقیب هستند.

کتاب ریچارد فاینمن "QED: نظریه عجیب نور و ماده" هم‌سطح این کتاب بوده و همان‌طور که از نامش پیداست بیشتر تمرکزش بر روی نظریه کوانتوم الکترودینامیک است.

خواندن این کتاب مانند اکثر کتاب‌های فاینمن، لذت‌بخش است.

برای کسانی که به دنبال جزئیات بیشتری هستند، بهترین کتاب درباره اصول بنیادی مکانیک کوانتومی ازنظر ما هنوز هم کتاب "اصول مکانیک کوانتومی" نوشته پاول دیراک است. برای خواندن این کتاب سطح بالایی از ریاضیات لازم است.

به‌صورت آنلاین، دو مجموعه سخنرانی را به شما پیشنهاد می‌کنیم که در iTunes University موجود هستند: " Modern Physics: The Theoretical Minimum – Quantum Mechanics" از لئونارد ساسکیند و سخنرانی پیشرفته‌تر جیمز بینی از دانشگاه آکسفورد با عنوان

"Quantum Mechanics". درک هر دو این سخنرانی‌ها نیازمند پیشینه ریاضیاتی قابل قبولی است.

برایان کاکس فیزیکدان، استاد دانشگاه و عضو گروه فیزیک انرژی بالا در دانشگاه منچستر است. او همچنین در پروژه ATLAS در برخورد دهنده بزرگ هادرونی در پژوهشکده سرن مشغول به کار است. کاکس بیشتر به‌خاطر اجرای برنامه های علمی در شبکه بی بی سی شناخته شده است که عمده مطالب این برنامه ها درباره اخترشناسی و فیزیک می باشد

جف فورشاو استاد دانشگاه منچستر در گروه فیزیک و اختر شناسی است. وی بر روی پدیده‌شناسی فیزیک ذرات بنیادی کار می‌کند و در اصل تخصص او بررسی داده های آزمایشات فیزیک ذرات و استخراج مفاهیم کاربردی از میان این داده ها در مورد اجزای سازنده ماده و برهمکنش بین آنهاست.

از همین مترجم : - جهانی از عدم

- چرا E=mc2

ناشرالکترونیکی : سایت علمی بیگ بنگ