سرگذشت کوانتوم

تاریخچه‌ای در ۴۰ موقعیت

جیم بگوت

ترجمه‌ی

محمدعلی جعفری

انتشارات مازیار

فهرست مطالب

مقدمه ۹

پیش‌درآمد ۱۵

ابرهای توفان‌زا

لندن، آوریل ۱۹۰۰

بخش اول: کوانتوم کنش ۱۹

۱. سخت‌ترین کار زندگی من ۲۱

برلین، دسامبر ۱۹۰۰

۲. سال شگفتی‌ها ۲۹

برن، مارس ۱۹۰۵

۳. تکه‌ای از واقعیت ۳۶

منچستر، آوریل ۱۹۱۳

۴. کمدی فرانسوی ۴۴

پاریس، سپتامبر ۱۹۲۳

۵. درون زیبای شگفت‌انگیز ۵۲

هلگولاند، ژوئن ۱۹۲۵

۶. الکترون خودچرخان ۵۹

لیدن، نوامبر ۱۹۲۵

۷. فوران دیرهنگام اشتیاق ۶۷

کوهستان آلپ سویس، کریسمس ۱۹۲۵

بخش دوم: تعبیر کوانتومی ۷۵

۸. میدان روح ۷۷

آکسفورد، آگوست ۱۹۲۶

۹. این پرش کوانتومی لعنتی ۸۵

کپنهاگ، اکتبر ۱۹۲۶

۱۰. اصل عدم قطعیت ۹۲
کپنهاگ، فوریه‌ی ۱۹۲۷

۱۱. روح کپنهاگی ۹۹
کپنهاگ، ژوئن ۱۹۲۷

۱۲. دنیای کوانتومی وجود ندارد ۱۰۶
لِیک کومو، سپتامبر ۱۹۲۷

بخش سوم: مناظره‌ی کوانتومی ۱۱۵

۱۳. مناظره آغاز می‌شود ۱۱۷
بروکسل، اکتبر ۱۹۲۷

۱۴. شگفتی محض ۱۲۶
کمبریج، کریسمس ۱۹۲۷

۱۵. جعبه‌ی فوتون ۱۳۳
بروکسل، اکتبر ۱۹۳۰

۱۶. چون صاعقه ۱۴۰
پرینستون، مه ۱۹۳۵

۱۷. پارادوکس گربه‌ی شرودینگر ۱۴۷
آکسفورد، آگوست ۱۹۳۵

میان‌پرده ۱۵۶
اولین جنگ فیزیک
کریسمس ۱۹۳۸ ـ آگوست ۱۹۴۵

بخش چهارم: میدان‌های کوانتومی ۱۶۵

۱۸. شلتر آیلند ۱۶۷
لانگ‌آیلند، ژوئن ۱۹۴۷

۱۹. پدیدار نیمه‌بصری تصویری ۱۷۶
نیویورک، ژانویه‌ی ۱۹۴۹

۲۰. ایده‌ی زیبا ۱۸۷
پرینستون، فوریه‌ی ۱۹۵۴

۲۱. شگفتی در تناسب ۱۹۶
راچستر، آگوست ۱۹۶۰

۲۲. سه کوارک برای آقای مارک! ۲۰۵
نیویورک، مارس ۱۹۶۳

۲۳. «ذره‌خدا» ۲۱۵
کمبریج، ماساچوست، پاییز ۱۹۶۷

بخش پنجم: ذرات کوانتومی ۲۲۵

۲۴. پراکندگی ناکشسان عمیق ۲۲۷
استنفورد، آگوست ۱۹۶۸

۲۵. افسون و جریان‌های خنثای ضعیف ۲۳۷
هاروارد، فوریه‌ی ۱۹۷۰

۲۶. جادوی رنگ ۲۴۶
پرینستون / هاروارد، آوریل ۱۹۷۳

۲۷. انقلاب نوامبر ۲۵۴
لانگ آیلند / استنفورد، نوامبر ۱۹۷۴

۲۸. بوزون‌های برداری میانی ۲۶۴
ژنو، ژانویه / ژوئن ۱۹۸۳

۲۹. مدل استاندارد ۲۷۳
ژنو، سپتامبر ۲۰۰۳

بخش ششم: واقعیت کوانتومی ۲۸۱

۳. متغیرهای نهفته ۲۸۳
پرینستون، بهار ۱۹۵۱

۳۱. جوراب‌های برتلمان ۲۹۱
بوستون، سپتامبر ۱۹۶۴
۳۲. آزمایش‌های اسپکت ۳۰۱
پاریس، سپتامبر ۱۹۸۲
۳۳. پاک‌کُن کوانتومی ۳۱۰
بالتیمور، ژانویه‌ی ۱۹۹۹
۳۴. گربه‌های آزمایشگاه ۳۲۰
استونی‌بروک / دلفت، ژوئیه‌ی ۲۰۰۰
۳۵. توهم پایدار ۳۳۰
وین، دسامبر ۲۰۰۶
بخش هفتم: کیهان‌شناسی کوانتومی ۳۳۹
۳۶. تابع موج گیتی ۳۴۱
پرینستون، ژوئیه‌ی ۱۹۶۶
۳۷. تابش هاکینگ ۳۵۱
آکسفورد، فوریه‌ی ۱۹۷۴
۳۸. نخستین انقلاب ابریسمان ۳۵۹
اَسپِن، آگوست ۱۹۸۴
۳۹. کوانتوم‌های فضا و زمان ۳۶۹
سانتا باربارا، فوریه‌ی ۱۹۸۶
۴۰ .بحران؟ کدام بحران؟ ۳۷۶
دورهام، تابستان ۱۹۹۴
سخن آخر
آرامش کوانتومی؟ ۳۸۴
ژنو، مارس ۲۰۱۰
نمایه ۳۸۹

۱

سخت‌ترین کار زندگی من

برلین، دسامبر ۱۹۰۰

یک وقتی به ماکس پلانک توصیه شده بود فیزیک نظری را به عنوان شغل انتخاب نکند. استاد او در دانشگاه مونیخ به او گفته بود با کشف اصول ترمودینامیک، فیزیک به منزله‌ی یک موضوع پژوهشی عمدتاً کامل شده است. گویا مطلقاً چیز بیشتری برای کشف شدن نمانده بود.

اما در اواخر قرن نوزدهم، بین نظریات فیزیکی رقیب نزاع در گرفت. اصول ترمودینامیک تصویر طبیعت به منزله‌ی جریان هماهنگ را تقویت کرد. انرژی که نه خلق‌شدنی است و نه نابودشدنی، بی‌وقفه و به شکل پیوستار مداوم بین تابش و ماده جاری می‌شود. در صف مقابل این دیدگاه، اتم‌باورانی بودند که دورنمای نسبتاً متفاوتی ارائه داده بودند. بنا به استدلال آن‌ها ماده از اتم‌ها یا مولکول‌های مجزا تشکیل شده است. خواص ترمودینامیکی مواد را می‌شود با استفاده از آمار از حرکت مکانیکی اتم‌ها یا مولکول‌های سازنده‌ی مواد محاسبه کرد.

پلانک استاد ترمودینامیک کلاسیک بود. برخی از ویژگی‌های مدل‌های آماری - مکانیکی اتم‌باوران دیدگاه و حاصل عمر او را نابود کرده بود. او قبول داشت که ایده‌ی اتمی ماده به موفقیت‌های قابل توجهی دست یافته است اما آن را «دشمن خطرناک پیشرفت» تلقی می‌کرد که باید سرانجام «به نفع فرضیه‌ی ماده‌ی پیوسته کنار گذاشته شود.»

در ۱۸۹۷ پلانک نظریه‌ی تابش کاواکی یا به‌اصطلاح تابش «جسم سیاه» را به منزله‌ی مبنای آشتی دادن نهایی مکانیک و ترمودینامیک و هجوم به رقبای اتم‌باور خود برگزید. اما پس از سه سال کشفی کرد که او را به گرویدن کامل به آموزه‌ی اتم‌باوران سوق داد. او بی‌سروصدا و تقریباً به منزله‌ی محصول جانبی [کارش]، بذر عمیق‌ترین انقلاب در استنباط علمی ما از دنیا را کاشت؛ انقلابی که پیامدهایش هنوز پس از یک قرن وسیعاً احساس می‌شود.

مشکل پلانک با آموزه‌ی اتم‌باوری نسبتاً ساده اعلام شد. اتم‌باوران با تقلیل محاسبه‌ی کمیت‌های ترمودینامیکی به آمار حرکت‌های اتمی یا مولکولی راه را بر پیامدهای دردسرساز گشودند. آنچه بنا به استدلال ترمودینامیک یقیناً برگشت‌ناپذیر و موضوع

قانون مقاومت‌ناپذیر طبیعت به شمار آمد، به استدلال آمار فقط محتمل‌ترین نمونه از بین گزینه‌های ممکن متعدد بود.

دعوا بر سر تفسیر قانون دوم ترمودینامیک بالا گرفت. موضوع رساله‌ی دکترای پلانک در سال ۱۸۷۹ این بود و پلانک به منزله‌ی یکی از خبرگان پیشرو دنیا به آن مباهات می‌کرد. به ادعای قانون دوم اگر ماده‌ای ـ مانند گاز ـ در دستگاه بسته‌ای باشد و با محیط بیرون تبادل انرژی نکند، کمیتی ترمودینامیکی به نام آنتروپی، هنگام رسیدن گاز به تعادل با محیط اطرافش، خودبه‌خود و به‌طرز اجتناب‌ناپذیری تا مقداری بیشینه افزایش می‌یابد.

آنتروپی تا حدّی کمیّتی مجرد است و آن را به مقدار «بی‌نظمی» دستگاه تعبیر می‌کنیم[1]. در سال ۱۸۹۵ ارنست زرملو، دستیار تحقیقاتی پلانک با موافقت او، موضوع دعوا با اتم‌باوران را به صفحات مجله‌ی علمی آلمانی آنالن در فیزیک کشاند.

مثلاً اگر دو گاز با دمای متفاوت را داخل ظرف بسته‌ای آزاد کنیم، به پیش‌بینی قانون دوم، گازها مخلوط می‌شوند و دماها به تعادل می‌رسند و آنتروپی مخلوط تا حداکثر افزایش می‌یابد. اما به نظر اتم‌باوران، رفتار گازها پیامد حرکت مکانیکی بنیادی اتم‌ها یا مولکول‌های هر گاز و حالت تعادل مخلوط محتمل‌ترین حالت است. در این صورت، بنا به استدلال زرملو، اصولاً نمی‌توان زنجیره‌ی رویدادهایی را که در آن حرکت اتم‌ها یا مولکول‌ها معکوس شود منتفی دانست. در این صورت گازها حتماً از هم جدا می‌شوند و به دماهای اولیه برمی‌گردند و آنتروپی مخلوط خودبه‌خود کاهش می‌یابد که در تناقض آشکار با قانون دوم است.

لودویگ بولتسمان، فیزیکدان اتریشی و سخنگوی پیشتاز اتم‌باوران واکنش نشان داد. بنا به استدلال او آنتروپی همواره افزایش نمی‌یابد ــ که این با تفسیر عموماً پذیرفته‌شده‌ی قانون دوم تناقض دارد ــ بلکه تقریباً همواره افزایش می‌یابد. به زبان آمار، تعداد حالت‌های آنتروپیِ بیشتر؛ از تعداد حالت‌های آنتروپیِ کمتر خیلی بیشتر است، در نتیجه دستگاه مدتِ بیشتری در حالت‌های آنتروپی بیشتر می‌ماند. ادعای بولتسمان عملاً این بود که اگر به مدت کافی صبر کنیم[2] سرانجام می‌توانیم دستگاه را در حالتی مشاهده کنیم که آنتروپی آن خودبه‌خود کاهش می‌یابد.

این اتفاق به همان اندازه باورنکردنی است که لیوان شکسته در کمال شگفتی

۱. مثلاً، قالب یخ پس از ذوب به مایعی بی‌نظم‌تر تبدیل می‌شود. وقتی آب با گرم شدن بخار شود، به گازی با بی‌نظمی بیشتر تبدیل می‌شود. آنتروپی اندازه‌گیری‌شده‌ی آب هنگام تبدیل آب از حالت جامد به مایع و گاز افزایش می‌یابد.

۲. باید اذعان کرد مجبوریم مدتی بیش از عمر کنونی گیتی صبر کنیم.

مهمانان خودبه‌خود سالم شود.

به نظر پلانک این موضوع زیر پای تفسیر قانون دوم را خالی کرد. پلانک به دنبال نقض قانع‌کننده‌ی استدلال آماری بولتسمان، فیزیک تابش کاواک را به عنوان میدان نبرد خود برگزید.

انتخاب او ظاهراً قابل اطمینان بود. گویا فیزیک نظریِ تابش کاواک با اتم‌ها و مولکول‌ها ارتباط ندارد. مسئله بر سر امواج پیوسته‌ی الکترومغناطیسی به توصیف نظریه‌ی مکسول و ترمودینامیک بود که طبق قانون دوم، تابش را به تعادل می‌رساند. استدلال پلانک این بود که اگر بتواند تعادل را بدون کمک مدل‌های آماری‌ـ مکانیکی اتم‌باوران بنا کند، می‌تواند مبانی توصیف مکانیکی را ویران سازد.

در آن هنگام رفتار تابش کاواک پدیده‌ای آشنا بود. اگر جسمی را تا دمای زیاد گرم کنید، انرژی می‌گیرد و نور گسیل می‌کند. می‌گوییم جسم «داغ [به رنگ] سرخ» یا «داغ [به رنگ] سفید» است. با افزایش دمای جسم، شدت نور گسیل‌شده بیشتر و به سمت بسامدهای بالاتر (طولِ‌موج کوتاه‌تر) جابه‌جا می‌شود. جسم هرچه داغ‌تر شود، ابتدا سرخ، سپس زردِ نارنجی، پس از آن زرد روشن و آنگاه سفید درخشان را می‌تاباند.

نظریه‌پردازان مسئله را با فراخوانی ایده‌ی «جسم سیاه» ساده کردند. جسم سیاه جسمی فرضی و به‌کلی غیربازتابی (کاملاً سیاه) است که تابش نور را بدون ترجیح دامنه‌ی ویژه‌ای از بسامدها جذب و گسیل می‌کند. شدت تابش گسیل‌شده‌ی جسم سیاه با مقدار انرژی جسم، هنگام تعادل گرمایی با محیط اطراف، نسبت مستقیم دارد.

به علاوه نظریه‌پردازان پی بردند با مطالعه‌ی تابش گرفتار در کاواکی با جداره‌ی کاملاً جذب‌کننده با سوراخی کوچک که تابش از آن طریق وارد و خارج شود، می‌توانند درباره‌ی خواص جسم سیاه تحقیق کنند. استوانه‌های سربسته‌ی نسبتاً گران‌قیمت از جنس چینی و پلاتین نمونه‌های ابتدایی این کاواک‌ها به شمار می‌آیند[1].

گوستاو کیرشهوف[2]، فیزیکدان آلمانی، در زمستان ۱۸۵۹ ـ ۱۸۶۰ ثابت کرد نسبت انرژی گسیل‌شده به انرژی جذب‌شده فقط به بسامد تابش و دمای درون کاواک وابسته است. این نسبت به شکل کاواک، شکل دیواره‌ها یا جنس آن وابسته نیست. این نتیجه مربوط به مشاهده‌ی ویژگی کاملاً بنیادیی در فیزیک بود و کیرشهوف جامعه‌ی علمی را به چالش کشف منشأ این رفتار دعوت کرد.

۱. هدف مطالعه‌ی تابش کاواک صرفاً اثبات اصول نظری نبود. اداره‌ی استاندارد آلمان نیز به عنوان مرجع اندازه‌گیری لامپ‌های الکتریکی به این مطالعات علاقه نشان می‌داد.

2. Gustav Kirchhoff