

# هلگولند

سر در آوردن از انقلاب کوانتومی

کارلو روولّی

ترجمه

مزدا موحد

فرهنگ نشر نو  
با همکاری نشر آسیم  
تهران - ۱۴۰۱



## درونی فوق‌العاده زیبا

چگونه فیزیکی‌دان آلمانی جوانی به ایده‌ای رسید که واقعاً غریب، اما توصیفش از عالم به شکل عجیبی خوب بود – و سرگشتگی عظیمی که به دنبال آورد.

### ایده غریب هایزنبرگ جوان: مشاهده‌پذیرها

حدود ساعت سه صبح بود که نتایج نهایی محاسباتم پیش رویم بود. عمیقاً جا خورده بودم و چنان تشویش داشتم که خوابم نمی‌برد. خانه را ترک کردم و به آرامی در تاریکی راه رفتم. روی صخره‌ای مشرف به دریا در کنج جزیره رفتم. منتظر ماندم که خورشید برآید...<sup>[1]</sup>

اغلب درباره افکار و احساسات هایزنبرگ جوان هنگام بالا رفتن از آن صخره مشرف به دریا، در جزیره بایر و بادخیز هلگولند در دریای شمال و روبه‌روی وسعت امواج و در انتظار طلوع فکر کرده‌ام، افکار و احساساتش بعد از اینکه اولین کسی شد که یکی از سرگیجه‌آورترین رازهای طبیعت را که تا به حال در دیدرس بشر قرار گرفته است دید. بیست و سه ساله بود.

برای تسکین یک آلرژی که دچارش بود به جزیره آمده بود. هلگولند نامی که معنی‌اش جزیره مقدس است - عملاً درختی ندارد و گرده بسیار کمی در هوایش است. (به قول جیمز جویس در اولیس: «هلگولند با تک‌درختش»). شاید افسانه‌هایی نیز از مخفی شدن دزد دریایی نابکار، اشتوربتکر<sup>۱</sup> در جزیره که هایزنبرگ در کودکی دوست داشت در ذهنش بود. اما دلیل اصلی هایزنبرگ برای آنجا بودن، غوطه‌ور شدن در مسأله‌ای بود که برایش به دغدغه تبدیل شده بود، مبحثی داغ که نیلز بور<sup>۲</sup> به او محول کرده بود. کم می‌خوابید و اوقاتش را در تنهایی می‌گذراند و سعی می‌کرد چیزی را محاسبه کند که قوانین درک‌نشده‌ی بور را توجیه کند. هر از گاهی دست از کار می‌کشید تا بالای صخره‌های جزیره برود یا اشعاری از دیوان غربی-شرقی گوته را حفظ کند، مجموعه اشعاری که در آن بزرگ‌ترین شاعر آلمان عشقش را به اسلام ترنم می‌کند.

نیلز بور همان موقع هم دانشمندی مشهور بود. معادلاتی ساده اما عجیب نوشته بود که خواص عناصر شیمیایی را حتی پیش از اندازه‌گیری آنها پیش‌بینی می‌کردند. مثلاً پیش‌بینی می‌کردند که بسامد نوری که عناصر هنگام گرم شدن ساطع می‌کنند چیست: نوری که به خود می‌گیرند. این موفقیتی درخشان بود. اما معادلات کامل نبودند: مثلاً شدت نور ساطع شده را مشخص نمی‌کردند.

اما ورای همه اینها، در معادلات چیزی حقیقتاً نامعقول مشهود بود. مثلاً بدون داشتن دلیل مشخصی فرض می‌کردند که الکترون‌های داخل اتم‌ها فقط در مدارهای دقیق و خاصی به دور هسته می‌گردند، با فواصل دقیق و خاصی از هسته و با انرژی‌هایی دقیق و خاص، تا اینکه به شکلی سحرآمیز از این مدار به مدار دیگر «جهش کنند». اولین جهش‌های کوانتومی. چرا فقط در این مدارها؟ این «جهش‌های» نامناسب از این

1. Johann "Klaus" Störtebeker

2. Niels Bohr

مدار به مدار دیگر چگونه؟ چه نیرویی می‌توانست عامل همچو رفتار غریبی باشد؟

اتم عنصر سازنده همه چیز است. ولی چگونه رفتار می‌کند؟ الکترون‌ها چگونه درون آن حرکت می‌کنند؟ بیش از ده سال بود که دانشمندان آغاز قرن دربارهٔ این پرسش‌ها فکر می‌کردند، بدون اینکه به جایی برسند.

بور مثل یک استاد نقاشی دوران رنسانس، بهترین فیزیکدانانی را که می‌توانست پیدا کند به دور خود جمع کرده بود تا با هم روی معماهای اتم کار کنند. یکی از آنها ولفگانگ پائولی<sup>۱</sup> بود؛ دوست و هم‌کلاس پیشین بسیار هوشمند و خیلی متکبر هایزنبرگ. اما پائولی هایزنبرگ را به بور توصیه کرد و گفت برای هرگونه پیشرفت راستین به او احتیاج دارند. بور این توصیه را قبول کرد و در پاییز سال ۱۹۲۴ هایزنبرگ را از گوتینگن<sup>۲</sup> به کپنهاگ آورد، از گوتینگن که هایزنبرگ در آن دستیار ماکس بورن<sup>۳</sup> فیزیکدان بود. هایزنبرگ چند ماهی را صرف بحث‌هایی طولانی با بور در کپنهاگ و جلوی تخته‌سیاه‌های پر از معادلات کرد. شاگرد جوان و استاد به پیاده‌روی‌هایی طولانی در کوه‌ها رفتند و دربارهٔ معماهای اتم حرف زدند، دربارهٔ فیزیک و فلسفه.<sup>[۴]</sup>

هایزنبرگ خود را غرق مسأله کرد. برایش دغدغه شد. مثل دیگران همه چیز را آزموده بود. هیچ چیزی کار نمی‌کرد. ظاهراً نیروی معقولی نبود که بتواند راهنمای الکترون‌ها در مدارهای عجیب بور و جهش‌های غیرعادی او باشد. با این همه، این مدارها و جهش‌ها واقعاً منجر به پیش‌بینی‌های خوبی دربارهٔ پدیده‌های اتمی می‌شد. سرگشتگی.

استیصال ما را به سمت راه‌حل‌های افراطی هل می‌دهد. هایزنبرگ در آن جزیرهٔ دریای شمال و در تنهایی کامل عهد کرد در ایده‌های افراطی کاوش کند.

1. Wolfgang Pauli

2. Göttingen

3. Max Born

درواقع با ایده‌های افراطی بود که آینشتاین توانسته بود بیست سال قبل جهان را شگفت‌زده کند. افراط‌گرایی آینشتاین جواب داده بود. پائولی و هایزنبرگ عاشق فیزیک او بودند. آینشتاین برای آنها اسطوره بود. از خود پرسیدند آیا زمانش نرسیده است که جرأت کنند و گامی همان‌قدر افراطی بردارند تا بتوانند از بن‌بست مرتبط با الکترون‌های اتم فرار کنند؟ آیا ممکن بود آنها باشند که این گام را برمی‌دارند؟ بیست و چند ساله که باشی می‌توانی آزادانه رؤیا ببافی.

آینشتاین نشان داده بود که حتی ریشه‌دارترین باورهای ما ممکن است اشتباه باشد. چیزی که اکنون برای ما بدیهی است ممکن است غلط از آب درآید. کنار گذاشتن فرضیاتی که بدیهی به نظر می‌رسند ممکن است به درک بیشتری منجر شود. آینشتاین به ما آموخته بود که همه چیز باید مبتنی باشد بر آنچه مشاهده می‌کنیم، نه بر آنچه وجودش را فرض می‌کنیم.

پائولی این آرا را برای هایزنبرگ بازگو کرد. دو مرد جوان جرعه‌ای عمیق از این شهد مسموم نوشیده بودند. مباحثات اوایل قرن در فلسفه‌های اتریشی و آلمانی دربارهٔ ارتباط بین واقعیت و تجربه را پیگیری کرده بودند. ارنست ماخ که تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر آینشتاین گذاشته بود، اصرار داشت که دانش باید صرفاً بر پایهٔ مشاهدات و از هرگونه فرض «متافیزیکی» ضمنی آزاد باشد. اینها اجزایی بود که هنگامی که هایزنبرگ جوان خودش را در تابستان سال ۱۹۲۵ در هلگولند منزوی کرده بود در تفکر او کنار هم قرار می‌گرفتند، مثل اجزای شیمیایی یک مادهٔ منفجره.

و اینجا بود که ایده به ذهنش آمد. ایده‌ای که فقط افراطی‌گرایی لاقید جوانان است که آن را ممکن می‌کند. ایده‌ای که فیزیک را کاملاً تغییر شکل می‌داد، فیزیک به همراه تمامی علم و خود برداشت ما از جهان. ایده‌ای که به باور من، بشریت هنوز کاملاً هضم نکرده است.

$hh$

جهش هایزنبرگ همان قدر شجاعانه است که سادگی دارد. کسی نتوانسته نیرویی را که می‌تواند عامل رفتار غریب الکترون‌ها باشد پیدا کند؟ ایرادی ندارد، بیاییم جست‌وجو برای این نیروی جدید را متوقف کنیم. در عوض بگذارید از نیرویی که برای ما آشنا است استفاده کنیم: نیروی الکتریکی که الکترون را به هسته می‌بندد. نمی‌توانیم قوانین جدید حرکتی برای توجیه مدارهای بور و «جهش‌های» او پیدا کنیم؟ ایرادی ندارد، بیایید با همان قوانین حرکت که برایمان آشنا است بمانیم و تغییرشان ندهیم.

در عوض بگذارید طرز فکرمان را درباره الکترون تغییر بدهیم. بیایید از توصیف حرکت آن دست بکشیم. بیایید فقط آن چیزی را که می‌توانیم مشاهده کنیم توصیف کنیم: نوری که ساطع می‌کند. بیایید مبنای همه چیز را بر کمیت‌هایی قرار دهیم که قابل مشاهده هستند. ایده همین بود.

هایزنبرگ تلاش کرد که دوباره رفتار الکترون را بر مبنای کمیت‌هایی که مشاهده می‌کنیم محاسبه کند: بسامد و دامنه نور ساطع شده.

می‌توانیم آثار جهش‌های الکترون را از یکی از مدارهای بور به دیگری مشاهده کنیم. هایزنبرگ متغیرهای فیزیکی (اعداد) را با جداولی از اعداد جایگزین کرد، جداولی که در ردیف‌های افقی‌شان مدارهای مبدأ قرار دارند و در ردیف‌های عمودی‌شان مدارهای مقصد. هر عدد جدول در تقاطع یک ردیف افقی و یک ردیف عمودی است: جهش از یک مدار به دیگری را توصیف می‌کند. او وقتش را در جزیره صرف تلاشی کرد که با استفاده از این جداول چیزی را محاسبه کند که بتواند قوانین بور را توجیه کند. خواب‌چندانی نداشت. اما از پس ریاضیات الکترون داخل اتم برنیامد: بیش از حد دشوار بود. سعی کرد به جایش سامانه ساده‌تری را توجیه کند، آونگ، و در این موضوع ساده‌تر به دنبال قوانین بور گشت.

روز هفتم ژوئن، چیزی آغاز به جرقه زدن کرد:

وقتی به نظر رسید اولین عبارات [با در نظر گرفتن قوانین بور] درست هستند، هیجان‌زده شدم و پشت سر هم اشتباه ریاضی می‌کردم. در نتیجه حدود سه صبح بود که نتیجه محاسبات جلوی من بود. همه عبارات صحیح بودند.

ناگهان دیگر تردیدی درباره سازگاری مکانیک «کوانتومی» جدیدی که محاسباتم توصیف می‌کرد نداشتم.

در آغاز عمیقاً نگران شدم. حس می‌کردم از سطح اشیاء گذشته‌ام و دیدن درونی فوق‌العاده زیبا را آغاز کرده‌ام. این فکر که حال باید در این غنای ساختارهای ریاضی که طبیعت با این سخاوت در برابرم پهن کرده است تحقیق کنم سرم را به دوران انداخت.

نفسمان را بند می‌آورد. زیر سطح اشیاء، «درونی فوق‌العاده زیبا». کلمات هاینبرگ پژواکی است از کلماتی که گالیله وقتی بار اول نظم ریاضی ظاهر شده را در اندازه‌گیری‌هایش از سقوط اشیاء روی سطح شیب‌دار دید نوشته بود: اولین قانون ریاضی که حرکت اشیاء روی زمین را توضیح می‌داد و نوع بشر کشف کرده بود. هیچ چیز قابل قیاس با احساسات ناشی از دیدن قانونی ریاضی حاکم بر بی‌نظمی ظواهر نیست.

### $\hbar$

هاینبرگ در ۹ ژوئن ه‌ل‌گول‌ند را ترک کرد و به دانشگاهش در گوتینگن برگشت. نسخه‌ای از نتایجش را برای دوستش پائولی فرستاد و در هاشم آن نوشت: «هنوز همه چیز برایم بسیار مبهم و ناروشن است ولی ظاهراً الکترون‌ها دیگر در مدار حرکت نمی‌کنند».

روز ۹ ژوئیه نسخه‌ای از کارش را برای ماکس بورن فرستاد، همان پروفیسوری که او دستیارش بود، و در یادداشتی نوشت: «مقاله جنون‌آمیزی نوشته‌ام و جرأت فرستادنش را برای انتشار ندارم». از بورن خواست آن را بخواند و توصیه‌هایی بکند.

۲۵ ژوئیه، خودِ ماکس بورن کار هایزنبرگ را به نشریه علمی تزیستشرفیت فور فیزیک<sup>۱</sup> فرستاد.<sup>[۳]</sup>

بورن اهمیت گامی را که دستیار جوانش برداشته بود درک کرد. سعی کرد مسأله را روشن‌تر کند. شاگردش پاسکوال جردن<sup>۲</sup> را درگیر تلاش برای نظم دادن به نتایج خارق‌العاده هایزنبرگ کرد.<sup>[۴]</sup> هایزنبرگ به نوبه خودش سعی کرد پائولی را درگیر کند، ولی پائولی متقاعد نشده بود: همه‌اش برای او شبیه یک بازی ریاضی بود، بیش از حد انتزاعی و غامض. در آغاز فقط همین سه نفر روی نظریه کار می‌کردند: هایزنبرگ، بورن و جردن.

با شور و حرارت کار کردند و چند ماهی بیش نگذشت که موفق شدند کلیت ساختار شکلی یک مکانیک نوین را مستقر کنند. خیلی ساده است: نیروها همان نیروهای فیزیک کلاسیک است؛ معادلات همان معادلات فیزیک کلاسیک است (به علاوه یکی،<sup>[۵]</sup> که بعداً درباره آن خواهیم گفت). اما متغیرها جای خود را به جداولی از اعداد، یا «ماتریس»، داده‌اند.

### $\hbar$

چرا جداولی از اعداد؟ چیزی که از الکترونی درون اتم مشاهده می‌کنیم نوری است که طبق فرضیه بور هنگام جهش از مداری به مدار دیگر ساطع می‌کند. هر جهش دربردارنده دو مدار است: مداری که الکترون آن را ترک می‌کند و مداری که به آن می‌جهد. پس همان‌گونه که اشاره کردم، هر مشاهده را می‌توان در ورودی‌های جدولی نهاد که در آن مدار اولیه در ردیف افقی است و مدار مقصد در ردیف عمودی.

ایده هایزنبرگ این بود که همه کمیت‌هایی را که حرکت الکترون را توصیف می‌کنند (موقعیت، سرعت، انرژی) دیگر نه به شکل عدد، بلکه به شکل جدولی از اعداد بنویسد. به جای داشتن یک موقعیت  $x$  برای الکترون،

1. Zeitschrift für Physik

2. Pascual Jordan



جدول کاملی از موقعیت‌های ممکن  $X$  داریم: یک موقعیت برای هر جهش ممکن. ایده این است که به استفاده از همان معادلات همیشگی ادامه دهیم و صرفاً به جای کمیت‌های معمول (موقعیت، سرعت، انرژی، بسامد مدار و امثالهم) از این نوع جداول استفاده کنیم. مثلاً شدت و بسامد نوری که در یک جهش ساطع می‌شود با خانهٔ مربوطه در جدول تعیین می‌شود. جدول متناظر با انرژی فقط اعدادی در قطر دارد و اینها نشانگر انرژی مدارهای بور هستند.

شفاف است؟ نیست. همان قدر شفاف است که قیر.

مدار مقصد					
مدار اولیه	مدار ۱	مدار ۲	مدار ۳	مدار ۴	...
مدار ۱	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$	...
مدار ۲	$X_{21}$	$X_{22}$	$X_{23}$	$X_{24}$	...
مدار ۳	$X_{31}$	$X_{32}$	$X_{33}$	$X_{34}$	...
مدار ۴	$X_{41}$	$X_{42}$	$X_{43}$	$X_{44}$	...
...	...	...	...	...	...

یک ماتریس هاینبرگ: جدولی از اعداد که «نمایشگر» موقعیت الکترون هستند. مثلاً عدد  $X_{23}$  به جهشی از مدار دوم به مدار سوم اشاره می‌کند.

اما این مانور غیرعادی جایگزین کردن متغیرها با جداول به ما امکان می‌دهد نتایج صحیح را محاسبه و آنچه را که در آزمایش‌ها مشاهده می‌شود پیش‌بینی کنیم.

قبل از پایان سال، در عین حیرت سه تفنگدار گوتینگنی، بورن از طریق پست مقالهٔ موجزی از یک انگلیسی جوان دریافت کرد که در آن اساساً همان نظریهٔ خودشان ساخته شده و برای این کار از قاموسی ریاضی استفاده کرده بود که حتی از ماتریس‌های گوتینگن انتزاعی‌تر بود.<sup>[۵]</sup> نویسندهٔ آن پل