امیر مؤمنان، حضرت علی (ع):

"تفکرُ ساعةٍ افضل من عبادة سبعین سنةٍ"

یک ساعت تفکر برتر از هفتاد سال عبادت است.

شانس کوانتومی

ناموضِعیت، تِلِپورتِیشن و سایر شگفتی‌های کوانتوم

تالیف:

نیکلا ژیزا

ترجمه:

وحید یزدانیان

حسین اسکندریان

سرشناسه	ژیزا، نیکلا Gisin, N.(Nicolas)
عنوان و نام پدیدآور	شانس کوانتومی: ناموضعیت، تلپورتیشن و سایر شگفتی‌های کوانتوم/تالیف نیکلا ژیزا ؛ ترجمه: وحید یزدانیان ، حسین اسکندریان.
مشخصات نشر	تهران: راز نهان، ۱۳۹۹.
مشخصات ظاهری	۱۹۲ص.
شابک	۹۷۸-۶۲۲-۲۷۸۰۰۸-۱
وضعیت فهرست نویسی	فیپا
عنوان اصلی	Quantum chance: Nonlocality, Teleportation and Other Quantum Marvels
عنوان دیگر	ناموضعیت، تلپورتیشن و سایر شگفتی‌های کوانتوم.
موضوع	کوانتوم
موضوع	Quantum theory
شناسه افزوده	یزدانیان، وحید، ۱۳۵۸، مترجم
شناسه افزوده	اسکندریان، حسین، ۱۳۶۱، مترجم
رده بندی کنگره	QC۱۷۴/۱۲
رده بندی دیویی	۵۳۰/۱۲
شماره کتابشناسی ملی	۷۳۱۳۳۸۵

شانس کوانتومی

ناموضِعیت، تلپورتِیشن و سایر شگفتیهای کوانتوم

مولف: نیکلا ژیزا

مترجمان: وحید یزدانیان، حسین اسکندریان

طراحی جلد: رضا کاوه

نوبت چاپ: اول ۱۳۹۹

تیراژ: ۱۰۰۰ نسخه

قیمت: ۲۵۰۰۰ تومان

ناشر: انتشارات راز نهان

شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۲۷۸۰۰۸-۱

ISBN:978-622-278-008-1

حق چاپ محفوظ

درباره مولف:

پروفسور نیکلا ژیزا (Nicolas Gisin) در سال ۱۹۵۲ در کشور سوئیس بدنیا آمد. پروفسور ژیزا فیزیک‌دان تئوری/ تجربی و استاد دانشگاه ژنوا سوئیس بوده و در زمینه اطلاعات و ارتباطات کوانتومی کار می‌کند. او همچنین یکی از بنیانگذاران فیزیک کوانتومی محسوب می‌گردد. پروفسور ژیزا کارهای برجسته‌ای را در زمینه رمزنگاری کوانتومی و ارتباطات کوانتومی راه دور به‌صورت تجربی انجام داده است و به عنوان یک تئوری‌پرداز، بینش عمیقی را از مکانیک کوانتومی ایجاد نموده‌است. همچنین اولین کسی است که فن‌آوری ارتباطات کوانتومی را از سطح آزمایشگاهی به سطح تجاری توسعه داده است.

درباره مترجمان:

وحید یزدانیان عضو هیات علمی گروه ارتباطات نوری پژوهشگاه ارتباطات و فن‌آوری اطلاعات کشور و دارای مدرک دکتری در رشته فیزیک حالت جامد از دانشگاه صنعتی امیر کبیر است. ایشان ضمن سوابق مختلف آموزشی و پژوهشی، به‌عنوان مدیر کل دفتر توسعه فن‌آوری و صدور خدمات فنی و مهندسی وزارت ارتباطات و فن‌آوری اطلاعات و همچنین به‌عنوان ریاست دانشکده علمی کاربردی پست و مخابرات و هم اکنون نیز به‌عنوان ریاست پژوهشگاه ارتباطات و فن‌آوری اطلاعات کشور مشغول به خدمت می‌باشند.

حسین اسکندریان دارای مدرک کارشناسی ارشد فیزیک حالت جامد از دانشگاه تربیت معلم تهران و محقق در زمینه بلورهای فوتونیکی و ارتباطات و رمزنگاری کوانتومی بوده و هم اکنون در آزمایشگاه‌های مرجع تایید نمونه شبکه و سیستم‌های دسترسی و انتقال نوری پژوهشگاه ارتباطات و فن‌آوری اطلاعات کشور مشغول به خدمت می‌باشد.

فهـــــرست مطالب

فصل ۱: بیان مسئله ۱

مقدمه ۱

نیوتن: یک تردید بزرگ ۱

تماس تلفنی راه دور شگفت ۴

فصل ۲: همبستگی موضِعی و ناموضِعی ۹

همبستگی‌ها ۱۰

بازی بل ۱۵

محاسبه ناموضِعی: $a + b = x \times y$ ۱۸

راهبردهای موضِعی برای بازی بِل ۲۱

برنده شدن در بازی بل: همبستگی‌های ناموضِعی ۲۹

برنده شدن در بازی بِل بیانگر ارتباط نیست ۳۲

باز کردن جعبه ها ۳۵

فصل ۳: ناموضِعیت و شانس محض ۳۹

یک کُلّیت ناموضِع ۴۰

تِلپاتی و دوقلوهای واقعی ۴۲

هماهنگی ارتباط نیست ۴۴

شانس یا رندمی بودن ناموضِع ۴۷

شانس محض ۵۰

شانس محض موجب ناموضِعیت بدون برقراری ارتباط می‌شود ۵۳

فصل ۴: غیر ممکن بودن شبیه‌سازی کوانتومی ۵۵

شبیه‌سازی کوانتومی ارتباطات ناممکن را ممکن می‌کند ۵۷
چگونه ممکن است که DNA را شبیه‌سازی نماییم؟ ۵۹
گریز: شبیه‌سازی تقریبی ۶۰
فصل ۵: درهم‌تنیدگی کوانتومی ۶۳
کل‌نگری کوانتومی ۶۳
ناتعیّنی کوانتومی ۶۵
درهم‌تنیدگی کوانتومی ۶۶
چگونه چنین چیزی ممکن است؟ ۶۷
درهم‌تنیدگی چگونه می‌تواند به برنده شدن در بازی بِل کمک کند؟ ۷۰
ناموضِعیت کوانتومی ۷۳
منشاء همبستگی‌های کوانتومی ۷۶
فصل ۶: تجربه ۷۹
تولید جفت فوتون‌ها ۷۹
ایجاد در هم‌تنیدگی ۸۱
درهم‌تنیدگی بیت‌های کوانتومی ۸۵
آزمایش برنکس- بلوو ۸۷
فصل ۷: کاربردها ۸۹
تولید اعداد تصادفی با استفاده از شانس محض کوانتومی ۹۰
رمزنگاری کوانتومی: یک ایده ۹۳
رمزنگاری کوانتومی در عمل ۹۵
فصل ۸: تِلِپورتِیشن کوانتومی ۹۹
ماده و شکل ۱۰۰

اندازه‌گیری مشترک ۱۰۴
پروتکل تلپورتیشن کوانتومی ۱۰۸
فکس کوانتومی و شبکه‌های مخابراتی کوانتومی ۱۱۱
آیا ما می‌توانیم اجسام بزرگ را تلپورت نماییم؟ ۱۱۳
فصل ۹: آیا طبیعت واقعاً ناموضِع می‌باشد؟ ۱۱۵
ناموضِعیت در دنیای نیوتن ۱۱۶
روزنه آشکارسازی ۱۱۸
روزنه موضِعیت ۱۲۱
یک ترکیب از روزنه‌ها ۱۲۶
ارتباط پنهان سریع‌تر از نور ۱۲۸
آلیس و باب هر کدام قبل از دیگری به اندازه‌گیری می‌پردازند ۱۳۴
اَبَر تعیّنی (جبرگرایی) و اراده آزاد ۱۳۷
واقع‌گرایی ۱۳۹
فرضیه چندجهانی ۱۴۳
فصل ۱۰: تحقیقات در حال جریان در مورد ناموضِعیت **۱۴۵**
چگونه می‌توان ناموضِعیت را "وزن" کرد؟ ۱۴۶
چرا هربار در بازی بِل برنده نشویم؟ ۱۴۷
ناموضِعیت در بیش از دو بخش ۱۵۱
"نظریه اراده آزاد" ۱۵۳
یک تاثیر پنهان؟ ۱۵۶
نتیجه‌گیری ۱۶۱

دیباچه

نیکلا ژیزا حس خود را وقتی برای اولین بار با نظریه بِل مواجه شد، این‌گونه توصیف نمود: "عشق در یک نگاه!". وقتی من در مورد این نظریه شنیدم، درحالی‌که در یک روز پاییزی سال ۱۹۷۴ در مطالعه مقاله جان بِل که در آن زمان کمتر شناخته شده بود، غوطه‌ور شده بودم، تسلی‌خاطر یافته و فهمیدم که می‌توان یک حکم تجربی درمنازعه بین بوهر و اینشتین درخصوص تعبیر مکانیک کوانتومی ارائه‌داد. این موضوع در حالی بود که تعداد اندکی از فیزیک‌دان‌ها در خصوص مشکلی که توسط اینشتین، پودولسکی و روزِن (EPR) مطرح شده بود، می‌دانستند، تعداد زیادی نیز در مورد نامعادلات بِل نشنیده بودند و تنها تعداد اندکی توجه جدی به سوالات مربوط به مفاهیم بنیادی مکانیک کوانتومی را ارزشمند تلقی می‌نمودند. مقاله EPR که در سال ۱۹۳۵ در Physical Review چاپ شده بود، در کتابخانه دانشگاه‌ها به آسانی در دسترس بود، اما در مورد مقاله بِل که در یک مجله گمنام جدید چاپ شده بود و مقدر شده بود که پس از تنها چهار شماره ناپدید شود، شرایط اینگونه نبود. در آن روزها، اگر مقاله‌ای در مجلات اصلی چاپ نمی‌شد، مجبور بود برای انتشار یافتن به فتوکپی تکیه نماید. من نیز کپی این مقاله را در پوشه‌ای که توسط کریستین ایمبِرت، استاد جوان موسسه *D'Optique* گردآوری شده بود و در زمانی که اَنبر شیمونی توسط برنارد اسپگنات به اُرسای دعوت شده بود، بدست آوردم. اما به یکبار در اثر جادوی ایده‌های بِل، تصمیم گرفتم که در پایان‌نامه دکتری خود به بررسی آزمون‌های تجربی نامعادلات بِل بپردازم، و ایمبِرت پذیرفت که مرا حمایت نماید.

در مقاله‌ی (به‌طور موثر واضح) بِل، من قادر بودم چالش بحرانی تجربی‌دان‌ها را تشخیص دهم: تغییر دادن جهت آشکارسازهای قطبیدگی در حالی‌که ذرات درهم-

تنیده‌شده همچنان از منبع خود به درون ناحیه اندازه‌گیری منتشر می‌شدند. نکته این بود که با استفاده از اصل علیت نسبیتی که انتشار تاثیرات فیزیکی با سرعتی بالاتر از سرعت نور را ممنوع می‌کند، مانع تاثیر جهت قطبش‌گر بر روی مکانیزم انتشار یا اندازه‌گیری شویم. چنین آزمایشی قادر خواهد بود که ماهیت نزاع بین مکانیک کوانتومی از یک طرف و دیدگاه جهانی اینشتین از طرف دیگر را موشکافی نماید. اینشتین از واقع‌گرایی موضِعی که دو اصل را ترکیب می‌نماید، طرفداری می‌نمود. اول اینکه یک واقعیت فیزیکی از سیستم وجود دارد. دوم اینکه یک سیستم نمی‌تواند توسط هر چیزی که بر روی یک سیستم دیگر که از اولی با فاصله‌ای فضاگونه در فضا-زمان جدا شده است اتفاق می‌افتد، به‌صورت آنی تاثیر بپذیرد (فرض موضِعیت)، زیرا آن دو سیستم مجبور خواهند شد تا از طریق اثرهایی که با سرعتی بالاتر از سرعت نور منتشر می‌گردند، ارتباط برقرار سازند. سرانجام آزمایش‌های ما پیش‌بینی‌های مکانیک کوانتومی را تایید نمودند و فیزیک‌دان‌ها را مجبور کردندکه واقع‌گرایی موضِعی، دیدگاهی از جهان که بطور متقاعدکننده‌ای توسط اینشتین حمایت می‌شد، را کنار بگذارند. اما آیا ما باید واقع‌گرایی را کنار بگذاریم و یا موضِعیت را؟

این ایده که باید مفهوم واقعیت فیزیکی را کنار گذاشت، برای بنده قانع‌کننده نمی‌باشد، زیرا به نظر من نقش یک فیزیک‌دان دقیقاً توصیف حقیقت جهان می‌باشد، نَه اینکه تنها بتواند نتایجی را پیش‌بینی نماید که در دستگاه‌های اندازه‌گیری ما نمایان می‌شوند. اما اگر مکانیک کوانتومی در این موضوع پابرجا بماند، همچنان‌که امروزه غیرقابل اجتناب به‌نظر می‌رسد، آیا این بدان معنی است که ما باید وجود برهم‌کنش‌های ناموضِع که در تضاد آشکار با اصل علیت نسبیتی اینشتین می‌باشد را بپذیریم؟ و آیا امیدی وجود دارد که از این ناموضِعیت کوانتومی برای انتقال یک سیگنال قابل استفاده، مانند روشن‌کردن یک لامپ یا دادن یک سفارش در بازار بورس، با سرعتی بالاتر از سرعت نور بهره بگیریم؟ اما این‌جاست که یک ویژگی نهادین دیگر مکانیک کوانتومی، یعنی وجود *ناتعیّنی بنیادی کوانتوم* وارد بازی می‌

شود. این ویژگی بیانگر این موضوع است که هرگاه مکانیک کوانتومی پیش‌بینی نماید که چندین نتیجه امکان‌پذیر می‌باشد، تاثیرگذاشتن بر روی نتیجه واقعی هر آزمایش خاصی، به‌صورت قطعی غیرممکن می‌باشد. درست است که مکانیک کوانتومی می‌تواند برای محاسبه بسیار دقیق احتمال به‌وقوع پیوستن نتایج ممکن مختلف مورد استفاده قرار گیرد، اما این احتمالات تنها زمانی که یک آزمایش یکسان به تعداد زیادی تکرار گردد، یک معنای آماری داشته و در مورد نتیجه یک آزمایش خاص چیزی به ما نمی‌گویند. این *رندمی‌بودن بنیادین کوانتومی* می‌باشد که امکان برقراری ارتباط سریع‌تر از نور را ممنوع می‌سازد.

در میان بسیاری گزارش‌ها و شرح‌های مشهور درمورد پیشرفت‌های اخیر در فیزیک کوانتومی، کتاب حاضر که توسط نیکلا ژیزا نوشته شده است، با تاکید بر نقش کلیدی که رندمی‌بودن بنیادی کوانتومی ایفا می‌نماید، خط مشخصی را در این مورد ترسیم می‌نماید که بدون آن ممکن است روزی رویای طراحی یک سیستم ماوراء تلگراف را ببینیم. اگر روزی این رویا به واقعیت بپیوندد، این اختراع افسانه‌ای فیلم-های علمی-تخیلی، برای فیزیکی که امروزه ما می‌شناسیم، تجدید نظر بنیادینی را ضروری خواهد نمود. طبیعتاً هدف ما این نیست که بگوییم در اینجا ممکن است قوانین فیزیکی تغییرناپذیر و دارای مصونیتی فراتر از هر گونه اصلاحی وجود داشته باشند، بلکه کاملاً برعکس، بنده شخصاً متقاعد شده‌ام که هر نظریه فیزیکی روزی با نظریه کامل‌تری جایگزین خواهد شد. اما برخی از نظریه‌های ما آنقدر بنیادین هستند که تجدیدنظر در آن‌ها، در واقع انقلاب مفهومی گسترده‌ای را رقم خواهد زد. اگرچه همه ما در سرتاسر تاریخ بشری با چندین نمونه از چنین انقلاب‌هایی آشنایی داریم، با این‌وجود آن‌ها آن‌قدر استثنایی هستند که نباید به‌صورت سطحی آن‌ها را در ذهن مجسم نمود. در این زمینه، توضیح اینکه چرا ناموضِعیت کوانتومی، فارغ از میزان خارق‌العاده بودن آن، نمی‌تواند اصل علیت نسبیتی، که برقراری ارتباط ماورائی را ممنوع می‌سازد، را نقض نماید به نظر بنده یک ویژگی خصوصاً مهم کتاب نیکلا ژیزا به شمار می‌آید.

این واقعیت که این کتاب بر خلاف سایر توضیحات متداول، موضِع ریزبینانه‌ای را در مورد این موضوع اتخاذ می‌نماید جای هیچ تعجبی ندارد، زیرا نیکلا ژیزا یکی از کلیدی‌ترین نقش‌آفرینان انقلاب جدید کوانتومی بوده است که در ربع آخر قرن بیستم بوقوع پیوسته است. اولین انقلاب کوانتومی، در ابتدای قرن بیستم، بر مبنای کشف دوگانگی موج-ذره شکل گرفت. این انقلاب راهی را برای توصیف آماری رفتار اتم‌ها که ماده را می‌سازند، ابرهای الکترونی که جریان الکتریکی را درون فلزات و نیمه‌رساناها ایجاد می‌نمایند و میلیاردها میلیارد فوتونی که در یک پرتو نور وجود دارند، با دقت بسیار بالا فراهم نمود. همچنین درحالی‌که فیزیک کلاسیک قادر نبود توضیح دهد که چرا ماده، که از بارهای مثبت و منفی که یکدیگر را جذب می‌نمایند تشکیل شده است، به‌سادگی فرو نمی‌ریزد، مکانیک کوانتومی ابزاری را در اختیار ما قرار داد تا خواص مکانیکی جامدات را درک نماییم. مکانیک کوانتومی توصیف کمی دقیقی از خواص الکتریکی و اپتیکی مواد ارائه داده‌است و چهارچوب مفهومی لازم برای توصیف پدیده‌هایی به شگفت‌انگیزی اَبررسانایی و خواص عجیب برخی ذرات بنیادی را فراهم نموده است. در زمینه همین انقلاب کوانتومی اول بود که فیزیک-دان‌ها وسایل جدیدی مانند ترانزیستور، لیزر، مداراهای مجتمع (IC) را اختراع نمودند که امروزه ما را به عصر جامعه اطلاعات رسانده‌اند. اما پس از آن، مقارن با دهه۱۹۶۰، فیزیکدان‌ها شروع به پرسیدن سوالات جدیدی نمودند که در طی اولین انقلاب کوانتومی کنار گذاشته شده بودند:

- ما چگونه می‌توانیم مکانیک کوانتومی را با پیش‌بینی‌های صرفاً آماری آن برای تک اجسام ماکروسکوپیک اعمال نماییم؟
- آیا ویژگی‌های شگفت‌آور *جفت اجسام کوانتومی درهم‌تنیده*، همچنان که در مقاله EPR سال ۱۹۳۵ توصیف گردید اما درواقع هیچگاه مشاهده-نشد، واقعاً به نحوه رفتار طبیعت مربوط می‌شود یا این‌که ما در این موضوع به محدودیت مکانیک کوانتومی رسیده‌ایم؟

پاسخ به این سوال‌ها، که ابتدا توسط تجربی‌دان‌ها ارائه شد و سپس توسط نظریه-پردازان بیشتر تصحیح شد، بود که انقلاب کوانتومی دوم و درحال پیشرفت کنونی را آغاز نمود[۱].

رفتار تک اجسام کوانتومی، موضوع مناظرات جالب توجه در میان فیزیک‌دان‌ها بوده است. برای مدت‌های طولانی، اکثریت جامعه فیزیک فکر می‌کردند که این موضوع بخودی خود دارای معنای کمی می‌باشد و اهمیت چندانی ندارد زیرا حتی دیدن یک تک جسم کوانتومی غیر قابل تصور است، چه برسد به اینکه بتوان آن را مورد دستکاری یا کنترل قرار داد. به گفته اروین شرودینگر[۲]:

باید بیان کنیم که ما با تک ذرات آزمایش نمی‌کنیم، درست مانند این‌که نمی‌توانیم ایکتیوسورها را در باغ‌وحش پرورش دهیم.

اما از دهه ۱۹۷۰، تجربی‌دان‌ها روش‌هایی را گسترش دادند تا تک ذرات میکروسکوپیک مانند الکترون‌ها، اتم‌ها و یون‌ها را مشاهده، دستکاری و کنترل نمایند. من هنوز شور و شوقی که در کنفرانس بین‌المللی فیزیک اتمی سال ۱۹۸۰ که در بوستون برگزار شد را به یاد دارم وقتی پیتر توسکِک اولین تصویر یک تک یون در دام‌افتاده را نشان داد که مستقیماً با فوتون‌های فلورسانسی که تحت تابش لیزر گسیل می‌شدند دیده می‌شد. از آن‌پس پیشرفت‌های تجربی به مشاهده مستقیم جهش‌های کوانتومی و درنتیجه دهه‌های جدال و مشاجره منجر شده‌است. همچنین نشان داده شده است که فرمولبندی کوانتومی بطور کامل قادر

[۱] See, for example, A. Aspect: John Bell and the second quantum revolution, foreword of J. Bell: Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics: Collected Papers on Quantum Philosophy, Cambridge University Press (2004); J. Dowling and G. Milburn: Quantum technology: The second quantum revolution, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences **361**, 1809, pp. 1655-1674 (2003).

[۲] E. Schrodinger: are there quantum jumps? British Journal for the Philosophy of Science, Vol. 3,p. 240.

است رفتار تک جسم‌های کوانتومی را توصیف نماید، به شرطی که نتایج احتمالاتی محاسبات به روش صحیح تعبیر گردند. در مورد پرسش دوم در خصوص ویژگی‌های درهم‌تنیدگی، پیش‌بینی‌های کوانتومی بار اول در یک سری آزمایش‌هایی که به‌تدریج به شرایط ایده‌آل رویایی نظریه‌پردازهایی مانند جان بِل همگرا می‌شود، بر روی جفت‌هایی از فوتون تست گردید و این آزمایش‌ها هرچند غافلگیرکننده به نظر می‌رسید، همواره پیش‌بینی‌های کوانتوم را تایید نمودند.

نیکلا ژیزا در دهه ۱۹۸۰ یک گروه فیزیک کاربردی را برای کار بر روی فیبرهای نوری ایجاد نمود (هرچند در برابر کارفرما به‌صورت مخفیانه و یا حداقل محتاطانه، زیرا در آن روزها رفتن به دنبال چنین موضوعاتی لزوماً کار ارزشمندی محسوب نمی‌شد)، و با وجود علاقه همیشگی که به بنیان‌های مکانیک کوانتومی داشت کاملاً طبیعی است از اولین کسانی باشد که توانست درهم‌تنیدگی کوانتومی را بر روی جفت فوتون‌های تزریق شده درون فیبرهای نوری تست نماید. با دانش دقیق او در خصوص تکنولوژی فیبرهای نوری، او توانست از شبکه تجاری مخابرات اطراف ژنوا استفاده نماید تا با متعجب ساختن تجربی‌دان‌ها نشان دهد که حتی در فاصله چند ده کیلومتری، درهم‌تنیدگی باقی خواهد ماند! او از چندین تست ساده مفهومی استفاده نمود تا ویژگی کاملاً حیرت‌آور درهم‌تنیدگی بین رخدادهای دور از یکدیگر را آشکار سازد و یک پروتکل تلپورتیشن کوانتومی را پایه‌ریزی نماید. با ترکیب مهارت‌های او به‌عنوان یک نظریه‌پرداز در بنیان‌های کوانتوم و تخصص او در زمینه کاربردهای فیبر نوری، او جزء اولین کسانی بود که کاربردهایی از درهم-تنیدگی مانند رمزنگاری و یا تولید اعداد واقعاً رندمی را توسعه بخشید.

در سرتاسر این کتاب جذاب که در ارئه مباحث لطیف فیزیک کوانتومی به زبانی قابل فهم برای عموم مردم غیرعلمی و بدون توسل به فرمولبندی ریاضی موفق بوده است، ترکیب استعدادهای ایشان آشکار است. او درهم‌تنیدگی، ناموضِعیت کوانتومی و رندمی‌بودن کوانتومی را توضیح می‌دهد و تعدادی از کاربردهای آن‌ها

را توصیف می‌نماید. اما این کتاب بیش از یک توضیح عمومی بوده و متخصصان کوانتوم می‌توانند مباحث عمیقی از این موضوعات را در آن بیابند، همچنان که نویسنده اشاره می‌نماید قسمت اعظم طبیعت واقعی و آثار آن همچنان فراتر از فهم ما قرار دارد. در خصوص این سوال که آیا تکذیب تجربی واقع‌گرایی موضِعی ما را مجبور به ترک مفهوم واقعیت فیزیکی و یا ترک موضِعیت می‌نماید[1]، بنده نیز نظر نیکلا ژیزا را برمی‌گزینم: حتی اگر مفهوم واقع‌گرایی موضِعی ثابت‌قدم بوده و از لحاظ فکری قانع‌کننده باشد، تقسیم نمودن آن به دو بخش و نگه‌داشتن تنها یکی از آن‌ها بصورت مجزا لزوماً این‌گونه نخواهد بود. چگونه شخص می‌تواند واقعیت فیزیکی مستقل یک سیستم را به‌صورت موضِعی در فضا-زمان تعریف نماید درصورتی‌که این سیستم تحت تاثیر چیزهایی است که بر روی سیستم دیگری که در فاصله فضاگونه از آن قرار دارد، اتفاق می‌افتد؟ این کتاب با نشان دادن این موضوع که با به‌حساب آوردن وجود رندمی‌بودن بنیادین کوانتومی، واقعیت فیزیکی ناموضِع اجازه پیدا می‌نماید با علیت نسبیتی که آن‌قدر برای اینشتین گرامی بود در همزیستی مسالمت‌آمیزتری قرار گیرد، راه‌حل ملایم‌تری را پیشنهاد می‌نماید. در این‌صورت حتی فیزیک‌دان‌هایی که از این مطالب آگاه هستند در کتاب نیکلا ژیزا مطالبی را برای تفکر و تامل خواهند یافت و خوانندگان غیر متخصص نیز با کشف رمز و راز درهم‌تنیدگی و ناموضِعیت کوانتومی به قلب مسئله راه یافته و تمامی پیچیدگی‌های خاص آن را که با شفافیت روشنگرانه‌ای توسط یکی از متخصصان پیشرو دنیا توضیح داده شده است، فراخواهند گرفت.[2]

پروفسور آلن اسپکت[3] **مِی سال ۲۰۱۲، شهر پلزو**

---

[1] ما ممکن است از راه‌حل ناامیدکننده‌ای که مفهوم اراده آزاد را مردود می‌داند، یعنی مانند جبرگرایی لاپلاسی انسان را تنها یک عروسک خیمه شب بازی می‌داند، صرف‌نظر نماییم.

[2] نیکلا ژیزا در سال ۲۰۰۹ اولین برنده جایزه با ارزش جان استیوارت بِل بود که بخاطر تحقیقات بر روی مسائل بنیادین مکانیک کوانتومی و کاربردهای آن به ایشان تعلق گرفت.

[3] Alain Aspect که البته تلفظ صحیح نام ایشان "آلا آسپِ" می‌باشد.

پیش‌گفتار مولف

اگر شما در زمان انقلاب نیوتنی زندگی می‌کردید، آیا دوست داشتید بفهمید که چه اتفاقی پیش‌می‌آید؟ امروزه فیزیک کوانتومی این فرصت را به ما می‌دهد تا در یک انقلاب مفهومی با اهمیت مشابه زندگی نماییم. هدف این کتاب این است که بدون ریاضیات و همچنین بدون اینکه سعی نماید مشکلات مفهومی را پنهان سازد، به شما کمک کند تا بفهمید چه چیزی درحال اتفاق افتادن می‌باشد. در واقع اگرچه فیزیک برای کشف نمودن نتایج فرضیه‌های خود و برای محاسبه دقیق برخی از پیش‌بینی‌های خود به ریاضیات نیاز دارد، اما برای گفتن داستان عظیم فیزیک به ریاضیات نیازمند نمی‌باشد. زیرا چیزی که در فیزیک جالب است نَه ریاضیات بلکه مفاهیم آن می‌باشد. بنابرین هدف من در اینجا نَه بازی با معادلات بلکه *فهمیدن* است.

برخی از بخش‌های کتاب، تلاش فکری حقیقی خواننده را طلب می‌نماید. هرکسی چیزی خواهد فهمید و هیچ‌کس همه‌چیز را نخواهد فهمید! در این زمینه مفهوم واقعی فهمیدن تار می‌باشد. اما با این وجود بنده ادعا می‌کنم که هر کسی می‌تواند حداقل بخشی از انقلاب مفهومی که در حال اتفاق افتادن است را درک نموده و از ادراک آن لذت ببرد. برای دستیابی به این موضوع، شخص باید به‌سادگی بپذیرد که قرار نیست همه چیز شفاف باشد و مسلماً با این عقیده که فهمیدن فیزیک کار ناامیدانه‌ای است، شروع ننماید.

اگر بخش‌هایی از مباحث خیلی دشوار به نظر آمد، فقط به خواندن ادامه دهید. مطالبی که در ادامه آن می‌آیند ممکن است موضوع را روشن نمایند. یا برخی مواقع

خواهید فهمید که تنها نکته‌ای زیرکانه بوده است که برای همکاران فیزیک‌دان خود قرار داده‌ام، زیرا آن‌ها نیز ممکن است از خواندن این کتاب لذت ببرند. اگر لازم شد بعداً برگردید و آن متن‌هایی که برای شما مشکل ایجاد نموده‌اند را دوباره بخوانید. موضوع مهم این نیست که همه چیز را بفهمید، بلکه مهم این‌است که یک دید کلی به‌دست‌آورید. در پایان خواهید دید شخص واقعاً می‌تواند بدون نیاز به ریاضیات، مقدار بسیار زیادی از فیزیک کوانتومی را درک نماید!

فیزیک کوانتومی اغلب موضوع تفاسیر طولانی و پایان‌نامه‌های فلسفی مبهمی بوده است. برای اینکه در اینگونه دام‌ها گیر نکنیم، تنها در اینجا به عقل سلیم خود متوسل شده‌ایم. وقتی فیزیک‌دان‌ها یک آزمایش را انجام می‌دهند، یک واقعیت خارجی را مورد تحقیق قرار می‌دهند. فیزیک‌دان تصمیم می‌گیرد که چه سوالی را بپرسد و کِی آن را بپرسد و هنگامی که پاسخ برمی‌گردد، مثلاً به شکل یک نور کوچک قرمز رنگ، آن‌ها از خود نمی‌پرسند که آیا واقعاً آن نور قرمز است و یا اینکه تنها نوعی توهم می‌باشد. پاسخ قرمز است و این پایان ماجراست.

خواننده همچنین خواهد دید که برخی حکایت‌ها در چندین فصل این کتاب نمایان می‌شوند. تجربه بنده به‌عنوان یک معلم به من آموخته‌است که تکرار برخی نکات مهم در متن‌های مختلف، معمولاً بسیار مفید خواهد بود. در پایان، این کتاب در مورد دقت تاریخی هیچ ادعایی نمی‌کند. هر یادداشتی در مورد پیشینیان برجسته بنده، تنها بازتاب احساسات من می‌باشد که در طول ۳۰ سال زندگی‌کردن به‌عنوان یک فیزیک‌دان حرفه‌ای کسب شده است.

مقدمه

ما در حساس‌ترین سن فهمیدیم که برای برهم‌کنش داشتن با یک جسم که دور از دسترس ما قرار دارد تنها دو امکان وجود دارد. یا خود را به سمت آن جسم حرکت دهیم، مانند نوزادان به سمت آن بخزیم، و یا اینکه یک جسم بلند مانند چوب‌دستی فراهم نموده که به ما اجازه دهد دسترسی خود را گسترش دهیم. بعداً فهمیدیم که مکانیزم پیچیده‌تر دیگری را می‌توان مورد استفاده قرار داد، مانند انداختن یک نامه درون صندوق پست. نامه توسط یک پستچی جمع‌آوری شده، توسط دست یا ماشین دسته‌بندی می‌شود، با کامیون، قطار و یا هواپیما منتقل شده و در پایان درب منزل شخصی که نام او بر روی نامه قرار دارد تحویل داده می‌شود. اینترنت، تلویزیون و بسیاری مثال‌های روزمره دیگر به ما می‌آموزند که نهایتاً هرگونه برهم-کنشی و هرنوع ارتباطی بین دو جسم که از لحاظ فضایی از یکدیگر دور می‌باشند، می‌بایست به‌صورت پیوسته از یک نقطه به نقطه بعدی و از طریق مکانیزم‌هایی که ممکن است پیچیده باشند منتشر گردد، اما همواره یک مسیر پیوسته را می‌پیمایند که حداقل در اصول می‌تواند در فضا و زمان مشخص شوند.

با این وجود، فیزیک کوانتومی که جهانی فراتر از آنچه ما بطور مستقیم درک می-نماییم را کاوش می‌نماید، ادعا می‌کند اجسامی که از لحاظ فضایی از یکدیگر دور هستند، برخی مواقع می‌توانند یک موجود واحد را تشکیل دهند. در واقع برای اینگونه سیستم‌ها فرق نمی‌کند که چقدر اجزاء آن‌ها از یکدیگر دور هستند، اگر ما یکی از آن‌ها را تحریک کنیم، هر دو به ارتعاش درخواهند آمد! اما چگونه می‌توان چنین چیزی را باور نمود؟ آیا می‌توان این ادعا را تست نمود؟ چگونه می‌توانیم آن را درک نماییم؟ و آیا ما می‌توانیم از این اثر عجیب فیزیک کوانتومی استفاده نموده و با بهره‌گیری از این اجسام دور از یکدیگر که یک کلیت واحد را تشکیل می‌دهند،

از راه دور ارتباط برقرار سازیم؟ این‌ها سوالات اصلی می‌باشند که ما سعی می‌کنیم در این کتاب به آن‌ها پاسخ دهیم.

بنده سعی خواهم نمود تا شما را در این اکتشاف شگفت‌آور سهیم نمایم، اکتشاف جهانی که نمی‌توان آن را از طریق برهم‌کنش‌هایی که به‌طور پیوسته از یک نقطه به نقطه بعدی منتشر می‌گردند، توصیف نمود بلکه در آن همبستگی‌های به اصطلاح ناموضِع، حقیقتی از زندگی به شمار می‌آیند. در طول مسیر ما با مفاهیم شانس غیرقابل تقلیل، همبستگی‌ها، اطلاعات و حتی اراده آزاد مواجه خواهیم شد. همچنین ما خواهیم دید که چگونه فیزیک‌دان‌ها همبستگی‌های ناموضِع را تولید می‌نمایند، چگونه از آن‌ها برای تولید رمزهای کاملاً امن در رمزنگاری بهره می‌گیرند و چگونه این همبستگی‌های شگفت‌آور می‌توانند برای تلپورتیشن کوانتومی مورد استفاده قرار گیرند. هدف دیگر این کتاب نشان‌دادن یک روش علمی خواهد بود که چگونه شخص می‌تواند خود را متعاقد نماید چیزی که کاملاً بر خلاف شهود اوست را بپذیرد؟ چه دلیل و مدرکی برای چنین تغییر ساختار ذهنی و پذیرفتن انقلابی مفهومی از این دست نیاز است؟ اگر برای لحظه‌ای به عقب برگردیم می‌بینیم که در واقع داستان ناموضِعیت کوانتومی نسبتاً ساده و خیلی بشری است. و همچنین خواهیم دید که طبیعت، اتفاقات شانسی (شانسی‌گونه غیر قابل تقلیل!) را تولید می‌نماید که می‌تواند در مکان‌هایی کاملاً دور از یکدیگر بدون اینکه چیزی به‌صورت نقطه به نقطه و در هر مسیری بین آن دو مکان منتشر گردد، اتفاق بیفتد. اما خواهیم دید که ماهیت شانسی‌گونه اینگونه اثرات، از هرگونه امکان استفاده از این شکل ناموضِعیت برای برقراری ارتباط جلوگیری می‌نماید و بدین وسیله یکی از اصول بنیادین نظریه نسبیت که مطابق آن هیچ ارتباطی نمی‌تواند سریع‌تر از سرعت نور حرکت کند را نقض نمی‌نماید.

ما در عصر خارق‌العاده‌ای زندگی می‌نماییم. فیزیک کشف کرده است که یکی از عمیق‌ترین شهودات ما، این موضوع که اجسام نمی‌توانند از راه دور "برهم‌کنش" داشته باشند، صحیح نمی‌باشد. علامت روی کلمه "برهم‌کنش" خاطر نشان می‌کند

که ما می‌بایست کاملاً مشخص کنیم منظورمان از آن چیست. فیزیک‌دان‌ها دنیای فیزیک کوانتومی، دنیایی شامل اتم‌ها، فوتون‌ها و سایر اجسامی که کاملاً برای ما اسرارآمیز به نظر می‌رسد را کاوش می‌نمایند. غافل ماندن از این انقلاب بدون اینکه به آن توجه کافی داشته باشیم به اندازه غافل ماندن از انقلاب نیوتنی و یا انقلاب داروینی، اگر ما هم دوره آن‌ها بودیم، شرم‌آور خواهد بود. زیرا انقلاب مفهومی که امروزه در حال رخ‌دادن می‌باشد از اهمیت کمتری برخوردار نمی‌باشد. این انقلاب کاملاً تصویر قبلی ما از طبیعت را واژگون خواهد نمود و بدون شک گستره‌ای از تکنولوژی‌های جدید را به‌وجود خواهد آورد که به زبان ساده سحرآمیز به نظر خواهند رسید.

در فصل ۲، با بحث نمودن پیرامون یک بازی که به‌عنوان بازی بِل می‌شناسیم، مفهوم همبستگی را که در قلب موضوع این کتاب قرار دارد ارائه خواهیم نمود. درآنجا نشان خواهیم داد که اگر ما تنها مجاز به برهم‌کنش‌هایی باشیم که در فضا از یک نقطه به نقطه دیگر منتشر می‌گردند، برخی همبستگی‌ها را نمی‌توان تولید نمود. این فصل حتی اگرچه در آن هیچ اشاره‌ای به فیزیک کوانتومی نمی‌شود، برای فهمیدن سایر فصل‌ها حیاتی می‌باشد و به احتمال خیلی زیاد دشوارترین فصل برای فهمیدن خواهد بود، اما بقیه کتاب برای کمک کردن به شما خواهند آمد.

سپس قبل از مواجه شدن با شانس محض در فصل ۳ و غیرممکن بودن شبیه‌سازی سیستم‌های کوانتومی در فصل ۴، خواهیم پرسید اگر کسی همواره در بازی بِل برنده شود، چیزی که ظاهراً غیرممکن است، حتی اگرچه مورد ادعای فیزیک کوانتومی می‌باشد، ما چه واکنشی باید داشته باشیم. دو فصلی که در ادامه می‌آیند یک نظریه عجیب در فیزیک کوانتومی را معرفی می‌نمایند، ابتدا مفهوم نظری درهم‌تنیدگی بررسی می‌گردد، سپس آزمایش‌های مربوطه توصیف شده و این نتیجه غیر قابل اجتناب گرفته می‌شود که *طبیعت ناموضِع است*.

اما قبل از پذیرش این نتیجه خواهیم پرسید که آیا واقعاً این نتیجه اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. در فصل ۹ بسیاری تلاش‌های توهم‌گونه فیزیک‌دان‌ها برای نجات توصیف

موضِعی طبیعت را بررسی خواهیم نمود. این داستان همچنان خبری داغ و موضوع بسیاری از امور در دنیای فیزیک می‌باشد. علاوه بر این زیرکی طبیعی فیزیک‌دان‌ها را نشان می‌دهد! ما داستان خود را در فصل ۱۰ با توصیف برخی تحقیقات جذاب که در حال انجام است ادامه خواهیم داد. این فصل ما را در دنیای تحقیقات علمی به‌روز خواهد نمود.

به چه دردی می‌خورد؟

این سوالی است که اغلب از من پرسیده می‌شود. تقریباً مانند این است که شخص هرگز نباید چیزی انجام دهد که هیچ کاربرد فوری ندارد. من می‌توانم اینگونه پاسخ دهم: فایده رفتن به سینما چیست؟ درست است، من حقوق دریافت می‌کنم تا این تحقیقات را که خیلی دوست دارم انجام دهم، در حالی‌که مجبورم برای رفتن به سینما پول بدهم، این طور سعی می‌کنم پاسخ صحیحی که بیشتر سیاسی است را ارائه دهم. اما کاملاً رُک و پوست‌کنده، بهترین جواب به زبان ساده این است که خیلی جذاب است! اگرچه بنده یک گروه فیزیک کاربردی را اداره می‌نمایم، ولی صبح با این امید که وسایل جدیدی را اختراع نمایم از رختخواب به بیرون نمی‌پرم. من خیلی ساده مجذوب و مسحور فیزیک شده‌ام! تنها این‌که طبیعت را درک نمایم و به‌طور خاص این‌که بفهمم چگونه می‌تواند همبستگی‌های ناموضِع را تولید نماید، برای من انگیزه کافی به شمار می‌آید. پس چرا در یک گروه فیزیک کاربردی کار می‌کنم؟ آیا یک فرصت‌طلبی ساده است؟ در حقیقت دلیل خیلی خوبی برای نگران بودن در مورد کاربردها وجود دارد، حتی و شاید به‌ویژه وقتی که عمیق‌ترین انگیزه ما فهمیدن مفاهیم باشد. یک دلیل این است که لزوماً چشم‌اندازهای جدیدی در سطح کاربردی باز خواهد نمود و هرچه مفهوم انقلابی‌تر باشد کاربردها آینده‌محورتر خواهند بود. مزیت بزرگ کارکردن بر روی کاربردهای بالقوه دقیقاً این است که

برای تست نمودن مفاهیمی که در لایه‌های زیر قرار گرفته‌اند ابزاری را برای ما فراهم می‌سازد. علاوه بر این زمانی که یک کاربرد شناسایی شد هیچ کس نمی‌تواند ارتباط مفهوم را انکار نماید! چگونه شخص می‌تواند ارتباط یک مفهوم را انکار نماید که یک کاربرد عملی را در دنیای واقعی پی‌ریزی کرده است؟

داستان ناموضِعیت کوانتومی یک نمایش درجه اول از این موضوع می‌باشد. درهم-تنیدگی و ناموضِعیت تا زمان اولین کاربرد تا حد زیادی نادیده گرفته می‌شد، حتی توسط اکثریت فیزیک‌دان‌ها به‌عنوان یک مبحث کاملاً فلسفی بدنام می‌شد. برای هر کس که می‌خواست این مسائل را تا قبل از سال ۱۹۹۱ بررسی نماید، شجاعت و حتی مقداری گستاخی مورد نیاز بود[۱]. تقریباً هیچ موقعیت دانشگاهی برای تحقیق و بررسی در این زمینه وجود نداشت، درحالی‌که امروزه نتایج این تحقیقات را همه دنبال می‌نمایند. طبیعتاً دولت‌هایی که از این‌گونه مراکز تحقیقاتی حمایت مالی می‌نمایند، بیشتر به تکنولوژی‌های کوانتومی اهمیت می‌دهند تا به مفاهیمی که در زیر آن‌ها قرار دارد، اما نکته مهم این است که دانشجویان در این مراکز می‌بایست این فیزیک جدید را یاد بگیرند.

فصل ۷ دو کاربرد که قبلاً تجاری شده‌اند را ارائه می‌دهد: رمزنگاری کوانتومی و مولد اعداد تصادفی کوانتومی. سرانجام تلپورتیشن کوانتومی، شگفت‌آورترین کاربرد، در فصل ۸ توصیف خواهد شد.

[۱] وقتی آلن اسپکت تحقیقات حرفه‌ای خود را آغاز نمود، او به دیدن جان بِل رفت و پیشنهاد داد که آزمایش بِل را انجام دهند. بِل به این پیشنهاد این‌گونه اسخ داد: "آیا شغل دائمی داری؟" بِل با تمام تجربه خود می‌دانست که برای هر فیزیک‌دان جوانی کار کردن بر روی موضوعی که آن‌گونه مورد اهانت جامعه علمی بود، خطرناک خواد بود.

فصل ۱: بیان مسئله

مقدمه

پیش از این که مضمون اصلی کتاب را ارائه دهم، مایلم که با دو داستان کوتاه شروع کنم که به روشن‌شدن موضوع کمک می‌کنند. اولی داستانی واقعی است که در گذشته اتفاق افتاده، درحالی‌که دومی صرفاً افسانه‌ای است که البته ممکن است در آینده‌ی نزدیک به وقوع بپیوندد.

نیوتن: یک تردید بزرگ

همه درمورد نظریه‌ی جهانی جاذبه‌ی نیوتن درخصوص گرانش شنیده‌ایم. طبق این نظریه تمامی اشیاء همدیگر را جذب می‌کنند و مقدار این نیروی جاذبه به جرم و فاصله‌ی بین اجسام وابسته است (به عبارت دقیق‌تر با مربع فاصله‌ی اجسام رابطه عکس دارد که البته اینجا موضوع بحث ما نیست). مثلاً، خورشید و زمین با نیروی جاذبه‌ای که با نیروی گریز از مرکز در تعادل می‌باشد بهم مقید شده و خورشید زمین را در مداری تقریبا دایره‌ای به دور خود نگه می‌دارد. این مورد برای دیگر سیارات هم صدق می‌کند، برای سیستم زمین و ماه، و حتی در مورد تمامی کهکشان ما که حول مرکز خوشه‌ای از کهکشان‌ها می‌چرخد نیز همین‌گونه است.

و اما بگذارید بر روی سیستم ماه-زمین متمرکز شویم. چطور ماه می‌داند که باید به وسیله‌ی زمین و آن‌هم بگونه‌ای جذب شود که نیروی جاذبه آن‌ها به جرم زمین و فاصله‌ی بین آن دو بستگی داشته‌باشد؟ همچنین، چگونه ماه جرم زمین و فاصله‌ی خودش از آن را می‌داند؟ آیا از نوعی چوب اندازه‌گیری استفاده می‌کند؟ و یا نوعی از توپ‌های کوچک را پرتاب می‌کند؟ آیا اصلاً به صورتی خاص ارتباط برقرار می‌کند؟ این سوالات ظاهراً کودکانه در حقیقت بسیار جدی و عمیق هستند. در واقع، این مسئله به صورتی بسیار جدی نیوتن را فریب داد و با این‌که نظریه‌ی جاذبه‌ی جهانی را نیوتن خودش کشف کرده بود و باعث شهرتش شده بود، اما این نظریه را آنقدر پوچ می‌دانست که می‌گفت هیچ عقل سلیمی نمی‌تواند آن را بپذیرد (به کادر زیر رجوع نمایید).

اما در این جا باید بگوییم که درک و بصیرت نیوتن از مشکل نظریه خود درست بود، اگرچه چندین قرن زمان و هوش نابغه‌ای چون اینشتین لازم بود تا این شکاف مفهومی پُر شده و جوابی قانع کننده برای آن ارائه گردد. امروزه فیزیک‌دانان می‌دانند عمل جاذبه‌ای که از فاصله دور در گرانش رخ می‌دهد و همچنین برهم‌کنش بین دو جسم باردار کاملاً لحظه‌ای نیست. بلکه بیشتر حاصل ردوبدل کردن فرستاده‌هاست و بر همین اساس است که حدس وجود توپ‌های کوچکی که پیشتر به آن اشاره شد اثبات می‌شود. این فرستاده‌ها ذرات کوچکی هستند که فیزیک‌دانان به آن‌ها نام‌هایی را اختصاص داده‌اند و فرستاده‌های مربوط به جاذبه را "گراویتون" و فرستاده‌های مربوط به نیروهای الکتریکی را "فوتون" نامیده‌اند.

کادر ۱. نیوتن: این موضوع که جاذبه می‌بایستی برای مواد درونی، ذاتی و ضروری باشد، تا این که یک جسم بر دیگری از فاصله‌ای در خلا نیرو وارد کند و این انتقال عمل و نیرو بدون وساطت چیز دیگری صورت پذیرد، در نظر من آن چنان پوچ و مضحک است که گمان نمی‌کنم هیچ انسانی که در امور فلسفی دارای صلاحیت باشد هرگز آن را بپذیرد.[۱]

[۱] Cohen, B., Schofield, R.E. (Eds): Isacc Newton Papers and Letters on Natural Philosophy and Related Documents, Harvard UniversityPress (1958).

بدین ترتیب، از زمان اینشتین، فیزیک طبیعت را به‌صورت مجموعه‌ای از عناصر ذاتی که می‌توانند به‌طور پیوسته درون فضا با هم برهم‌کنش داشته باشند، توصیف می‌کرد. مطمئناً این ایده با درک ما از دنیا مطابقت دارد، همان‌گونه که با درک نیوتن انطباق داشت. اما امروزه فیزیک همچنین بر پایه‌ی یک چهارچوب تئوری به نام فیزیک کوانتوم قرار دارد که دنیای فوتون‌ها و اتم‌ها را توصیف می‌کند. اینشتین نیز در این کشف مهم دخیل بوده است. در سال ۱۹۰۵، او اثر فوتوالکتریک را این‌گونه توضیح داد که الکترون‌های صفحه‌ی فلزی توسط ذرات نور که فوتون نامیده می‌شوند، مانند توپ‌های بیلیارد بمباران شده و در اثر این برهمکنش مکانیکی و برخورد مستقیم از سطح فلز کنده شده و به بیرون رانده می‌شوند. اما جالب اینجاست که به محض این که نظریه‌ی کوانتوم به صورت کامل توسعه یافت و فرمول‌بندی شد، اینشتین سریعاً موضع انتقادی شدیدی نسبت به آن اتخاذ نمود چرا که دریافته بود این نظریه عجیب و غریب، به نوعی شکل جدیدی از عمل از فاصله دور را معرفی می‌کند[۱]. اینشتین نیز همانند نیوتن در سه قرن قبل از خودش، این نظریه را پوچ نامید، آن‌را نپذیرفت و آن را به عنوان عملی شبح‌وار از فاصله دور بیان نمود.

امروزه، مکانیک کوانتوم به خوبی توسعه یافته و در قلب فیزیک جدید جای گرفته است. در واقع این مکانیک کوانتوم شامل نوعی ناموضِعیت[۲] می‌باشد که احتمالاً اینشتین را خوشحال نمی‌کند، اگرچه بسیار متفاوت از ناموضِعیتی است که نیوتن را آزار می‌داد. علاوه بر این، این شکل از ناموضِعیت کوانتومی کاملاً با آزمایش‌ها مورد تایید قرار گرفته است. همچنین کاربردهای نوید بخشی در رمزنگاری دارد و پدیده کاملاً شگفت‌آور تلپورتِیشِن[۳] کوانتومی را ممکن می‌سازد.

---

[۱] Gilder, L.: The age of Entanglement, When Quantum Physics Was reborn, Alfered A. Knopf (2008).

[۲] Nonlocality

[۳] توضیح مترجم: تلپورتیشن یا دورفرست که در ادبیات دینی به آن طی‌الارض گفته می‌شود یعنی انتقال آنی ماده یا انرژی از نقطه‌ای به نقطه دیگر بدون این‌که ماده یا انرژی مورد نظر فاصله مکانی بین آن دو نقطه را طی نماید. تلپورتیشن اجسام معمولی یا انسان یکی از موضوعات جذاب فیلم‌های علمی تخیلی بوده‌است اما واقعیت این است که اگر انجام چنین کاری غیرممکن نباشد، مسلماً راه زیادی تا دستیابی به آن باقی‌مانده است و یا ممکن است در آینده

تماس تلفنی راه دور شگفت

در اینجا بخشی از یک داستان علمی-تخیلی را ذکر می‌کنیم، گرچه آنقدرها هم که به نظر می‌رسد مربوط به آینده نیست و به زودی تکنولوژی آن را به واقعیت تبدیل خواهد نمود. یک ارتباط تلفنی بین دو نفر، که طبق عرف رایج نامشان را آلیس و باب درنظر می‌گیریم، که با دو حرف اول حروف الفبا شروع می‌شوند، را تصور کنید. همان‌طور که برخی مواقع پیش می‌آید، فرض کنید ارتباط این دو نفر نیز ضعیف و همراه با نویز می‌باشد. درواقع، ارتباط آن قدر ضعیف است که آلیس هیچ چیزی از آنچه باب سعی دارد بگوید را نمی‌شنود. تمامی چیزی که می‌شنود یک صدای ممتد گنگ است. مانند چزوپزوشرسکریز...، همچنین باب نیز در آن سوی خط تنها همین صدای چزوپزوشرسکریز... را می‌شنود. آن‌ها در گوشی داد می‌زنند، غر می‌زنند، و دور اتاق می‌چرخند، اما بیهوده است و هیچ بهبودی حاصل نمی‌شود. چقدر آزار دهنده است! ارتباط با چنین وسیله‌ای کاملاً غیر ممکن است و کاملاً مشخص است که نمی‌توان نام تلفن را بر آن گذاشت.

قوانین جدیدی کشف گردند که طبق آن‌ها تلپورت نمودن یک جسم در مقیاس ما را غیرممکن بدانند. اما تلپورتیشن کوانتومی یعنی چیزی که هم‌اکنون نیز انجام می‌شود، امری متفاوت است که در آن ماده از یک مکان به مکان دیگر منتقل نمی‌شود بلکه اطلاعات لازم برای بازتولید حالت کامل یک سیستم کوانتومی به مقصد تلپورت می‌گردد، بگونه‌ای که سیستم کوانتومی که در مقصد قرار دارد در همان حالت کوانتومی سیستم مبدا قرار گیرد و جالب این‌جاست که این کار بدون هیچ‌گونه انتقال ظاهری اطلاعات و به‌صورت آنی صورت می‌پذیرد. در این نوع تلپورتیشن از یکی از ویژگی‌های جادویی ولی واقعی دنیای کوانتوم به‌نام درهم‌تنیدگی استفاده می‌شود که می‌گوید اگر دو ذره درهم‌تنیده شوند، حتی اگر در دو کهکشان بسیار دور از یکدیگر قرار داشته باشند، هرگونه اندازه‌گیری روی یکی از آن‌ها، دیگری را نیز به‌صورت آنی و همزمان تحت تاثیر قرار می‌دهد! (جالب است بدانید این نوع همبستگی ناموضِع بین اجسام همان چیزی است که خاطر اینشتین را به شدت می‌آزرد بگونه‌ای که آن را عملی شبح‌وار از فاصله دور نامید و باعث شد او در مقابل نظریه کوانتومی قرار بگیرد که خود از نقش‌آفرینان مهم آن بود). یکی از مشکلات اصلی در تلپورت‌کردن یک جسم معمولی این است که برای این کار به مقدار بسیار زیادی درهم‌تنیدگی نیاز می‌باشد، ولی درهم‌تنیدگی به شدت شکننده است و برای حفظ آن باید از ایجاد هرگونه اختلالی پرهیز کرد که این نیز شامل هرگونه تعاملی با محیط اطراف می‌شود و در حال حاضر حتی نمی‌توان به این موضوع یعنی جلوگیری از بروز اختلال برای در امان نگه‌داشتن درهم‌تنیدگی‌ها اصلاً فکر کرد و در واقع هیچ ایده‌ای نیز برای غلبه بر این مشکل وجود ندارد.

البته، آلیس و باب هر دو فیزیکدان هستند. هر کدام یک دقیقه از سر و صدایی که توسط گوشی تلفنشان تولید می‌شود را ضبط می‌کنند. به این ترتیب، آن‌ها می‌توانند به یکدیگر ثابت کنند که بیشترین تلاششان را برای برقراری ارتباط انجام داده‌اند. اما در کمال تعجب، نویزهایی که این دو ضبط کرده‌اند کاملا یکسان بودند. از آنجا که هر دو دستگاه ضبط دیجیتال هستند پس آلیس و باب می‌توانند چک کنند که هر بیت از اطلاعات ضبط شده آن‌ها دقیقاً یکسان هستند. باور نکردنی است! بنابرین منبع نویز می‌بایست در مرکز تلفن یا جایی در طول خط تلفن باشد. از آن جا که نویزها کاملاً یکسان و هماهنگ بودند، آن‌ها این گونه نتیجه گرفتند که منبع نویز می‌بایست دقیقاً در وسط خط تلفن باشد، چرا که دقیقاً در یک زمان به آلیس و باب رسیده‌اند.

آن‌ها تصمیم گرفتند این فرضیه که دلیل نویزها ایرادی احتمالا الکتریکی در وسط خط تلفن است را تست کنند. به این منظور، آلیس سیم بلندی را سمت خود اضافه نمود، در این‌صورت می‌بایست صدایی که به او می‌رسد نسبت به صدایی که به باب می‌رسد دارای تاخیر بیشتری شود. اما نه! هیچ تغییری صورت نگرفت. نه تنها صدا همچنان وجود داشت و در دو سر سیم یکسان بود بلکه هم‌زمانی آن نیز کاملاً حفظ شده بود. سپس باب خط ارتباطی را قطع کرد اما نویزها همچنان وجود داشت!

چطور می‌توانیم چنین پدیده‌ای را توضیح دهیم؟ آیا سیمی که در سیستم گیرنده قرار دارد تنها وسیله‌ای برای ردگیری گیرنده در آن آپارتمان است؟ آیا این تنها یک گوشی همراه است که به دیوار چسبیده است؟ یا این که نویزها را خود گیرنده‌ها ایجاد کرده‌اند و نَه یک منبع دیگری که بین آن‌ها قرار گرفته است؟ آیا این پدیده می‌تواند نتیجه‌ی انفجاری در کهکشان‌های دوردست باشد که صداهای یکسانی در دو گیرنده ایجاد نموده است؟ و چگونه یک نفر می‌تواند این فرضیات را امتحان کند؟ باب که چیزهایی درباره امواج الکترومغناطیسی می‌داند، در یک قفس فارادی، قفسی فلزی که اجازه ورود امواج رادیویی را نمی‌دهد، قرار می‌گیرد. اما صدا همچنان وجود دارد. آلیس پیشنهاد می‌دهد که از یکدیگر خیلی فاصله بگیرند. بنابرین از طریق هر

مکانیزمی هم که گیرنده‌ها با هم در ارتباط باشند، می‌بایست کیفیت این ارتباط کاهش یافته و در نهایت از بین برود. اما حتی دورتر شدن هم تاثیری در مقدار و دامنه‌ی نویزها نداشت.

آلیس و باب نتیجه گرفتند که گیرنده‌های آن‌ها یک تسلسل بسیار طولانی از صداها را ضبط نموده‌اند که به محض برداشتن گوشی دوباره آن را باز تولید می‌کنند. پس تعجب آور نیست که هر دو گیرنده همیشه صدایی کاملاً مشابه تولید می‌کنند.

آلیس و باب خوشحال از اینکه توانستند دلایل علمی این مسئله را پیدا کنند، خبر کشف خود را نزد معلم فیزیکشان بردند و او نیز آن‌ها را مورد تشویق قرار داد ولی در عین حال اضافه کرد که: "این فرض که گوشی‌های تلفن خودشان بصورت همزمان صداهایی تولید می‌کنند، یا صدایی که قبلاً ضبط شده است را بازتولید می‌کنند، فرضیه‌ای است که خودش قابل تست کردن است و به آن *آزمایش بِل* می‌گویند". آزمون بل یا بازی بل در فصل بعد توضیح داده شده است. آلیس و باب به سرعت به خانه‌هایشان برگشتند تا این آزمون بِل را بر روی گیرنده‌های خود انجام دهند. آن‌ها این آزمایش را چندین بار انجام دادند و هر بار شکست خوردند. بنابرین فرضیه وجود یک علت مشابه ضبط شده روی دو دستگاه رد شد.

آلیس و باب در شگفتی باقی ماندند که چه مکانیزی می‌تواند منجر به این شده باشد که هر دو دستگاه گیرنده، نویزهای مشابه تولید کرده باشند در حالی‌که کاملاً از هم جدا شده‌اند و ارتباطی با هم ندارند و همچنین صدای از قبل ضبط شده‌ای نیز در گیرنده‌ها وجود ندارد. هرچه تلاش کردند نتوانستند هیچ مکانیزمی پیدا کنند که این پدیده را توضیح دهد، بنابرین برای مشورت نزد معلم خود برگشتند: "اصلاً عجیب نیست که شما نتوانستید مکانیزمی برای این پدیده بیابید، زیرا به‌طور ساده می‌توان گفت مکانیزمی برای آن وجود ندارد. این یک مسئله مکانیک نیست و به فیزیک کوانتوم مربوط می‌شود. این صداها بصورت رندمی و تصادفی تولید می‌شوند، ولی یک

رندم کاملاً واقعی[۱]، هر بیت از صدا تا وقتی که گیرنده آن را تولید نکند وجود خارجی ندارد. علاوه بر این، این رندم کوانتومی می‌تواند خود را به طور همزمان در چندین مکان نشان دهد، مثلاً در دو گیرنده شما."

آلیس از روی تعجب فریاد زد، "اما این غیر ممکنه، سیگنال باید با افزایش فاصله بین دو گیرنده ضعیف شود، در غیر اینصورت این بدین معناست که شخص می‌تواند در هر فاصله دلخواهی ارتباط برقرار کند".

باب اضافه کرد، "علاوه بر این همزمانی کامل به این معنی است که با هر سرعت بالایی می‌توان این ارتباط را برقرار ساخت، حتی با سرعتی بالاتر از سرعت نور که این غیر ممکن است."

اما معلم آن‌ها بدون تعجب گفت: "شما به من گفتید که حتی وقتی درون گوشی فریاد می‌زنید، به اطراف حرکت می‌کنید، به دور خود می‌چرخید و همچنین تلفن را تکان می‌دهید، صداها همچنان ثابت باقی می‌ماند. با توجه به این واقعیت که صداهای یکسانی بصورت رندمی در دوطرف تولید می‌شود، پس می‌بینید که **نمی‌توان از آن برای برقراری ارتباط استفاده کرد**. شخص مقابل مطلقاً چیزی از شما نمی‌فهمد. بنابرین هیچ تضادی بین این پدیده و نظریه نسبیت اینشتین دیده نمی‌شود. شما بار دیگر نشان دادید که هیچ ارتباطی نمی‌تواند سریع‌تر از سرعت نور اتفاق بیفتد".

آلیس و باب بدون هیچ حرفی ساکت ماندند. از آنجا که "تلفن" عجیب و غریب آن‌ها نمی‌تواند برای برقراری ارتباط مورد استفاده قرار گیرد، پس در واقع آن‌ها اصلاً تلفن به حساب نمی‌آیند، حتی اگرچه شبیه تلفن هستند. ولی آن‌ها چگونه با هم هماهنگ می‌شوند بطوریکه بدون برقراری ارتباط با هم و یا توافق قبلی بین آن‌ها همیشه نتیجه یکسانی تولید می‌کنند؟ همچنین در مورد پیشنهاد "رندم واقعی" که می‌تواند خود را بطور همزمان در چند مکان به نمایش بگذارد چه توضیحی می‌توان یافت؟ بعد از دقایقی سکوت بالاخره باب گفت" اما اگر واقعاً این چیزی است که اتفاق می‌افتد، این

[۱] True randomness.

پدیده می‌تواند کاربردهایی داشته باشد. در اینصورت من می‌توانم چیزی بسازم و آنقدر با آن سروکله بزنم تا بفهمم چگونه کار می‌کند. این همان روشی است که با آن فهمیدم الکتریسیته چگونه کار می‌کند و یا مسیر یک توپ وقتی در حال چرخش است چگونه تغییر می‌کند و در واقع همه چیزهایی را که تاکنون یادگرفته‌ام از این طریق فهمیده‌ام."

معلم این موضوع را تصدیق نمود. این اثر می‌تواند برای تولید اعداد تصادفی و همچنین برای ایمن‌سازی ارتباطات محرمانه که به‌عنوان رمزنگاری کوانتومی شناخته می‌شود، مورد استفاده قرار گیرد. همچنین می‌توان برای تِلِپورتِیشِن یا دورفرست کوانتومی از آن بهره گرفت. اما ابتدا باید مفهوم کلیدی و اصلی این کتاب یعنی ناموضِعیت که هنگام توضیح پدیده همبستگی و توصیف بازی بِل به آن خواهیم پرداخت را درک کنیم.

فصل ۲: همبستگی موضِعی و ناموضِعی

مفهوم اصلی این کتاب همبستگی ناموضعی (از راه دور) می‌باشد. خواهیم دید که این مفهوم با ایده "رندم واقعی یا شانس محض"، یعنی اتفاقاتی که بصورت ذاتی غیرقابل پیش‌بینی هستند، رابطه نزدیکی دارد. شانس به خودی‌خود مفهوم قابل تاملی می‌باشد ولی در اینجا ما درمورد شانس ناموضِع صحبت خواهیم نمود. این مباحث شامل مفاهیم کاملاً جدید و شگفت‌آور و حتی انقلابی می‌باشند. همچنین درک ارتباط آن‌ها آسان نبوده و این بدین معنی است که این بخش می‌تواند سخت‌ترین فصل این کتاب باشد و سایر فصل‌های کتاب برای کمک به شما در فهم این مطلب است. فیزیکدانان برای این که بتوانند خود را متقاعد کنند که واقعاً "همبستگی‌های ناموضع" و "رندم محض" وجود دارند، نوعی بازی را ابداع کرده‌اند که به آن بازی بل گفته می‌شود. در واقع فیزیکدانان کودکان بالغی هستند که هرگز اسباب‌بازی‌هایشان را کنار نمی‌گذارند تا اینکه بفهمند چگونه کار می‌کنند.

پیش از آن که به معرفی این بازی بپردازیم، باید ابتدا مفهوم همبستگی را بیان کنیم. در واقع علم ماهیتاً مشاهده همبستگی‌ها و سپس تلاش برای توضیح دادن آن‌ها می‌باشد. به گفته جان بل همبستگی‌ها به شدت تشنه توضیحی برای خود می‌باشند[۱].

[۱] Bell, J.S.: Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics, Cambridge university press (1987), p. 152.

بهتر است ابتدا مثالی برای همبستگی بیاوریم و سپس به جستجوی توضیحی برای آن بپردازیم. باید اذعان کرد که با تعداد توضیحات بسیار کم و مختلفی مواجه هستیم. اگر خود را محدود به توضیحات موضعی کنیم، یعنی مکانیزم‌هایی که بصورت پیوسته از یک نقطه به نقطه دیگر درون فضا انتشار می‌یابند، درواقع فقط با دو نوع توضیح مجزا برخورد خواهیم نمود.

بازی بل می‌تواند برای بررسی همبستگی‌های خاص مورد استفاده قرار گیرد. در این بازی دو نفر باید با مشارکت و همکاری با یکدیگر به بالاترین امتیاز دست یابند. قوانین بازی بسیار ساده است و اجرای بازی نیاز به مهارت خاصی ندارد، اما دستیابی به هدف بازی که نوعی محاسبه ناموضِع است، در ابتدا آسان نخواهد بود. در واقع نکته اصلی چگونگی درک و فهم نحوه کار این بازی است، نَه خود آن. به همین علت ما به قلب مسئله، یعنی همبستگی‌های ناموضِع و انقلاب مفهومی مربوط به آن، می‌پردازیم.

اما اجازه بدهید ابتدا با مفهوم همبستگی شروع کنیم.

همبستگی‌ها

هر روز انتخاب‌های بسیاری در پیش روی ما قرار دارد که هر کدام نتیجه‌ای خاص خواهند داشت. اما پاره‌ای از این انتخاب‌ها و نتایج حاصله مهم‌تر از بقیه می‌باشند.
برخی نتایج فقط و فقط به انتخاب ما بستگی دارند، اما بسیاری از آن‌ها تحت تاثیر انتخاب دیگران نیز می‌باشند. به این ترتیب نتایج انتخاب‌های ما از یکدیگر مستقل نمی‌باشند و به هم همبستگی دارند. برای مثال انتخاب عصرانه از منوی یک رستوران علاوه بر همه موارد به قیمت آن نیز وابسته است و خود این قیمت نیز توسط افراد دیگری تحت شرایط مختلفی تعیین می‌گردد. همچنین مِنوهای رستوران‌هایی که در یک محدوده از شهر هستند با هم ارتباط دارند و تغییر در یکی باعث ایجاد تغییر در سایر منوهای مشابه می‌شود. اگر سفارش ویژه‌ای برای اسفناج وجود داشته باشد، به احتمال زیاد این سبزی بیشتر در منوها ظاهر می‌شود. همبستگی دیگری که بین منوها وجود دارد ناشی از تاثیر انتخاب‌هایی است که رستوران‌های همسایه انجام

می‌دهند. اگر صفی طولانی مقابل یک رستوران بوجود آید، ممکن است ما وسوسه شده و به دنبال دلیل جاذبه آن برویم و یا اینکه از رفتن به آن جای شلوغ صرف‌نظر کنیم. در هر دو حالت همبستگی‌هایی وجود دارد، مثلاً در حالت اول همبستگی مثبت و در حالت دوم همبستگی منفی بوجود می‌آید.
اجازه دهید مثال را به منتهی‌الیه خود سوق دهیم. دوباره دو همسایه مانند آلیس و باب را در نظر بگیرید (خواهیم دید که آن‌ها نقش‌های یکسانی را در داستان تلفن عجیب و غریب ایفا می‌کنند). فرض کنیم که آن‌ها همیشه و هر روز عصرانه مشابهی می‌خورند. به عبارت دیگر منوی عصرانه آن‌ها کاملاً همبسته می‌باشد. ما چگونه می-توانیم چنین همبستگی را توضیح دهیم؟

اولین حالت ممکن این است که باب بصورت سیستماتیک از روی آلیس کپی‌برداری کند و درواقع منوی خود را انتخاب نکند، یا برعکس آلیس از باب کپی‌برداری کند. اینجاست که اولین روش ممکن برای توضیح این همبستگی ارائه می‌شود: اولین رویداد بر روی دومی تاثیر می‌گذارد. این طرح توجیحی را می‌توان مورد آزمون قرار داد، پس بگذارید مانند دانشمندان عمل کنیم و این کار را انجام دهیم. حداقل بصورت ذهنی، فرض کنیم آلیس و باب بسیار از هم دور شده‌اند، مثلاً در دو شهر مختلف در دو کشور متفاوت، و مطمئن هستیم که هر دو به فروشگاه دسترسی دارند. برای اینکه اطمینان حاصل کنیم که آن‌ها نتوانند بر هم تاثیری بگذارند، فرض می‌کنیم آلیس و باب دقیقاً در یک لحظه خرید کنند. حتی فرض کنید که آلیس و باب در دو کهکشان متفاوت قرار دارند. تحت چنین شرایطی، ایجاد ارتباط میان آن دو و یا تاثیرگذاری روی یکدیگر، مانند کسانی که خمیازه می‌کشند[1]، کاملاً غیرممکن خواهد بود. اما حالا تصور کنید که همچنان یک همبستگی کامل بین منوی عصرانه آن‌ها وجود دارد.

[1] ما می‌دانیم که اگر در جمعی یک نفر خمیازه بکشد، باعث می‌شود دیگران نیز خمیازه بکشند حتی اگر از این موضوع خبر نداشته باشند. این یک مثال از تاثیر ناآگاهانه بین افراد می‌باشد. به هرحال این امر مستلزم این است که نفر دوم اولی را در حال خمیازه کشیدن ببیند، بنابرین این نوع تاثیرگذاری نمی‌تواند با سرعتی بیشتر از سرعت نور منتشر شود.

بنابرین اکنون نمی‌توانیم چنین همبستگی را از طریق تاثیرگذاری توضیح دهیم و باید به دنبال طرح‌های توجیحی دیگری بگردیم.

دومین توضیح ممکن این است که نزدیک‌ترین فروشگاه به آلیس و نزدیکترین فروشگاه به باب تنها و تنها یک محصول مشابه را ارائه دهند و در واقع هیچ انتخاب دیگری برای آن‌ها وجود نداشته باشد. مثلاً ممکن است در زمان‌های خیلی دور هر دو فروشگاه منو عصرانه یکسانی برای سال‌های بعد تهیه کرده باشند. موارد این منو می‌تواند در روزهای متفاوت یکسان نباشد ولی هر دو فروشگاه طبق دستورالعمل یکسانی که دارند عصرانه یکسانی را ارائه می‌دهند. این لیست می‌تواند توسط مدیر فروشگاه‌های زنجیره‌ای تهیه شده باشد و آن را به تمامی شعبه‌های خود در کهکشان‌ها توسط ایمیل مخابره کرده باشد. در این صورت آلیس و باب هر روز لزوماً منوی یکسانی خواهند داشت. بر اساس این توضیح منوهای آلیس و باب در زمان‌های بسیار دور توسط عامل یکسانی تعیین گردیده است که اکنون با وجود فاصله بسیار زیاد بین آلیس و باب بر آن‌ها تاثیر می‌گذارد. این علت مشترک می‌بایست در سرتاسر جهان هستی نقطه به نقطه بدون توقف و بصورت پیوسته منتشر شده باشد. پس می‌توان از علت مشترک موضعی صحبت کرد، مشترک زیرا از یک گذشته مشترک بوجود آمده است و موضعی زیرا هرچیزی بصورت موضعی و پیوسته رخ می‌دهد، از یک نقطه در فضا به نقطه بعدی.

بنابرین می‌توان در اینجا به یک توضیح منطقی دست پیدا کرد. اکنون در مورد آن بیندیشید که آیا توضیح ممکن دیگری وجود دارد؟ تمام سعی خود را انجام دهید تا سومین طرح توضیحی برای این واقعیت که آلیس و باب هر روز با عصرانه دقیقاً یکسانی روبرو می‌شوند را ارائه دهید. توضیحی بجز تاثیر باب بر آلیس یا آلیس بر باب و همچنین بجز برخی عوامل مشترک موضعی. آیا واقعاً توضیح ممکن دیگری وجود ندارد؟ ممکن است تعجب‌آور به نظر برسد ولی تاکنون دانشمندان هرگز نتوانسته‌اند هیچگونه توضیح دیگری برای این موضوع بیابند. تمامی همبستگی‌هایی که در علوم،

خارج از فیزیک کوانتومی، دیده شده‌اند را می‌توان بوسیله تاثیر یک رخداد بر دیگری (توضیح نوع اول) یا از طریق علت‌های مشترک موضعی، مانند مدیر دو فروشگاه زنجیره‌ای (توضیح نوع دوم) توجیه نمود. در هر دو نوع توضیح اثر یا علت مشترک ذکر شده بطور پیوسته و از یک نقطه به نقطه دیگر درون فضا منتشر می‌شود، و در معنی دقیق کلمه، تمامی چنین توضیحاتی موضعی هستند.

علاوه بر این، ما هنگامی از همبستگی‌های موضعی صحبت می‌کنیم که بخواهیم بگوییم که این همبستگی‌ها توضیحاتی موضعی دارند. در واقع خواهیم دید که فیزیک کوانتومی برای ما توضیح سومی را ممکن می‌سازد و این دقیقاً موضوع این کتاب است. اما در خارج از فیزیک کوانتومی چه در زمین‌شناسی یا پزشکی و چه در جامعه-شناسی یا زیست شناسی، تنها دو نوع توضیح برای تمامی همبستگی‌های مشاهده شده وجود دارد. و هر دوی این توضیحات موضعی می‌باشند زیرا دست به دامان زنجیره‌ای از مکانیزم‌ها می‌شوند که بطور پیوسته از یک نقطه به نقطه دیگر در فضا منتشر می‌شوند.

جستجو برای توضیحات موضعی موفقیت‌های بسیاری را برای دنیای علم به ارمغان آورده است. درواقع علم را می‌توان با جستجوی بی‌وقفه آن برای یافتن توضیحات خوب شاخص‌گذاری نمود. و یک توضیح وقتی خوب قلمداد می‌گردد که سه معیار را برآورده سازد. مهمترین آن‌ها دقت می‌باشد که عبارت است از فرمولبندی با معادلات ریاضی به نحوی که به شخص توانایی پیش‌بینی و مقایسه آن با آزمایش‌ها و مشاهدات را بدهد. به‌هرحال این عقیده بنده است که این معیار با اینکه ضروری است ولی مهمترین معیار نمی‌باشد. دومین مشخصه یک توضیح خوب این است که یک داستان را روایت کند. هر درس علمی با یک داستان آغاز می‌شود. مگر به روش دیگری می‌توان مفاهیم جدید، مانند انرژی، مولکول، لایه‌های زمین‌شناسی و یا همبستگی را معرفی نمود؟ تا قبل از پیدایش فیزیک کوانتومی تمامی این داستان‌ها به روشی کاملاً پیوسته در فضا و در طول زمان رخ می‌دادند و درنتیجه داستان‌هایی موضعی بودند. سومین

معیار یک توضیح خوب این است که به‌سادگی قابل تغییر دادن نباشد. بنابرین یک توضیح خوب را می‌توان بوسیله آزمایش مورد امتحان قرار داد زیرا در غیر اینصورت نمی‌توان از آن برای توضیح داده‌های جدید تجربی که ممکن است آن را نقض نمایند استفاده نمود و به‌راحتی با داده‌های تجربی متضاد سازگار نمی‌شود. یا به قول پوپر نمی‌توان آن را به‌راحتی تحریف نمود.

اما بگذارید به داستان آلیس و باب و همبستگی کامل بین عصرانه آن‌ها برگردیم. فاصله بسیار زیاد بین آن‌ها باعث می‌شود که توضیح تاثیر مستقیم (نوع اول) منتفی گردد. اما چطور می‌توانیم توضیح علت مشترک موضعی (نوع دوم) را تست کنیم؟ در مثال ما، آلیس هیچ حق انتخابی ندارد. تنها یک فروشگاه در نزدیکی محل سکونت او وجود دارد و این فروشگاه نیز هر عصر تنها یک منوی عصرانه ارائه می‌دهد. چنین شرایطی که هیچ‌گونه انتخاب دیگری وجود نداشته باشد را می‌توان به‌راحتی مورد آزمایش قرار داد، بنابرین ما می‌بایست مثال خود را کمی استادانه‌تر بیان کنیم.

اکنون تصور کنید که دو فروشگاه در نزدیکی منزل آلیس وجود دارد. از محلی که او خارج می‌شود یکی در سمت چپ و یکی در سمت راست. همچنین دو فروشگاه در نزدیکی منزل باب وجود دارد، یکی در سمت چپ و دیگری در سمت راست. آلیس و باب همچنان در دو کهکشان متفاوت زندگی می‌کنند و درنتیجه نمی‌توانند بر یکدیگر تاثیر گذار باشند. اما اجازه دهید فرض کنیم هرگاه که آن‌ها فروشگاه سمت چپ را برای خرید انتخاب می‌کنند، البته کاملاً شانسی، همیشه با منوی مشابهی خرید خود را انجام می‌دهند. تنها توضیح موضعی برای این همبستگی این است که فروشگاه‌های سمت چپ لیست مشترکی دارند که هر عصر تنها منوی عصرانه موجود را تعیین می‌کند. برای فروشگاه‌های سمت چپ شرایط دقیقاً مانند قبل است. اما این واقعیت که چندین فروشگاه نزدیک آلیس و باب وجود دارد به این معنی است که طیفی از همبستگی‌های متفاوت را می‌توان تصور نمود. به عنوان مثال اگر آلیس فروشگاه سمت چپ و باب سمت راست را انتخاب کند، ما می‌توانیم یکبار دیگر فرض کنیم همیشه

خرید آن‌ها به منوی یکسانی منتهی می‌شود. اگر آلیس به فروشگاه سمت راست و باب به فروشگاه سمت چپ برود نیز همچنین است. بنابرین نتیجه می‌گیریم که دوباره تنها توضیح موضعی برای این سه همبستگی، چپ-چپ، چپ-راست و راست-چپ، این است که این چهار فروشگاه لیست منوی یکسانی دارند. اما اکنون فرض کنید وقتی آلیس و باب هر دو به فروشگاه سمت راست می‌روند، آن‌ها هرگز منوی یکسانی ندارند. آیا این ممکن است؟ البته رسیدن به چنین شرایطی دشوار به نظر می‌رسد.

اکنون ما به مفهوم بازی بِل خیلی نزدیک شده‌ایم. پس اجازه دهید موضوع فروشگاه‌ها را در اینجا کنار بگذاریم. ما باید رهیافتی علمی اتخاذ کنیم و شرایط را تا حد امکان ساده‌سازی نماییم. بجای یک منوی عصرانه، ما از نتایج صحبت خواهیم نمود، و از آنجا که درنظر گرفتن تنها دو نتیجه کفایت می‌کند، ما به بیشتر از آن نیاز پیدا نخواهیم نمود.

بازی بل

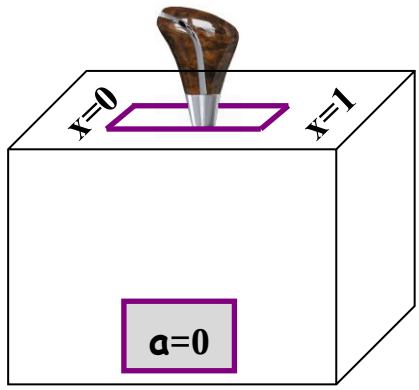
ابداع کننده این بازی دو جعبه ظاهراً یکسان مانند شکل ۲-۱ را تهیه نموده است. هریک از جعبه‌ها به یک دسته و صفحه نمایش‌گر مجهز می‌باشند. در حالت سکون دسته به صورت عمودی قرار دارد. یک ثانیه بعد از اینکه دسته به راست یا چپ متمایل شود نتیجه بر روی نمایش‌گر ظاهر می‌شود. نتایج باینِری هستند، یعنی تنها دو مقدار ممکن وجود دارد، صفر و یا یک. مهندسان کامپیوتر آن‌ها را بیت‌های اطلاعات می‌نامند. برای هر جعبه، به نظر می‌رسد نتایج به صورت تصادفی باشد.

برای انجام این بازی، آلیس و باب هر کدام یک جعبه برمی‌دارند، ساعت‌هایشان را با هم تنظیم می‌کنند و کمی از هم فاصله می‌گیرند. دقیقاً در ساعت ۹ صبح و هر دقیقه یک بار دسته را به یک سمت حرکت می‌دهند و با دقت نتایج نشان داده شده روی جعبه خود بهمراه زمان و جهتی که برای دسته انتخاب کرده‌اند را یادداشت می‌کنند. در اینجا بسیار مهم است که آن‌ها هربار دسته را آزادانه و کاملاً مستقل از یکدیگر به سمت چپ یا راست حرکت دهند. در واقع آن‌ها اجازه ندارند همیشه انتخاب یکسانی

را انجام دهند و همچنین در مورد انتخاب‌های خود از قبل با هم هماهنگ کنند. این موضوع مهم است که آلیس از انتخاب‌هایی که باب انجام داده نباید باخبر شود و همچنین باب از انتخاب‌های آلیس آگاه نباشد. قابل ذکر است که آن‌ها سعی نمی‌کنند تقلب کنند زیرا هدف هردو آن‌ها درک و فهم نحوه بازی بل است.

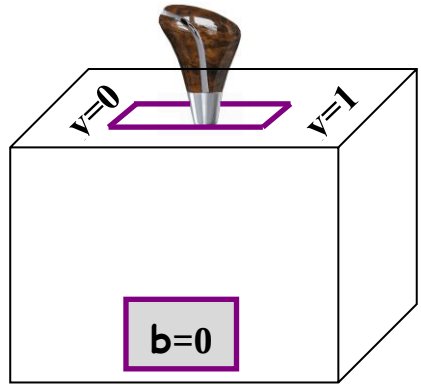
آلیس

زمان	x	a
9h00	چپ	0
9h01	چپ	1
9h02	راست	1
9h03	چپ	1
9h04	راست	0
9h05	راست	0
...		



باب

زمان	x	a
9h00	چپ	0
9h01	چپ	1
9h02	راست	1
9h03	چپ	1
9h04	راست	0
9h05	راست	0
...		



شکل ۲-۱: آلیس و باب بازی بِل را انجام می‌دهند. هرکدام یک جعبه مجهز به یک دسته دارند. هردقیقه آن‌ها با انتخاب خود دسته را به سمت راست یا به سمت چپ حرکت می‌دهند درحالی‌که هر جعبه نتیجه را نمایش می‌دهد. آلیس و باب با دقت زمان، انتخاب خود و نتیجه نمایش داده شده توسط جعبه خود را یادداشت می‌نمایند. درپایان روز آن‌ها نتایج خود را مقایسه نموده و تعیین می‌کنند که آیا بازی را برده‌اند یا باخته‌اند. هدف آن‌ها این است که نحوه کارکردن جعبه‌ها را متوجه شوند درست مانند کودکانی که برای فهمیدن چگونگی کارکردن اسباب‌بازی‌های خود، چیزهایی را یادمی‌گیرند.

آن‌ها تا ساعت ۷ بعدازظهر به بازی ادامه می‌دهند و ۶۰۰ نتیجه یادداشت می‌نمایند و تقریباً ۱۵۰ مورد از انتخاب‌های آن‌ها چپ-چپ، و به همین تعداد انتخاب‌های چپ-راست، راست-چپ و راست-راست داشته‌اند. سپس در انتهای روز آن‌ها نزد هم آمده تا مطابق قواعد زیر امتیازات و نمره خود را محاسبه نمایند:

۱- هرگاه آلیس دسته را به سمت چپ حرکت داده است، یا باب دسته را به سمت چپ حرکت داده است یا وقتی هر دو دسته‌ها را به سمت چپ حرکت داده‌اند، درصورت یکی بودن نتایج، هر دو یک امتیاز دریافت می‌کنند.
۲- هرگاه آلیس و باب هردو به انتخاب خود دسته را به سمت راست حرکت داده‌اند اگر نتایج مختلفی کسب کرده‌باشند یک امتیاز می‌گیرند.

سپس امتیازات آن‌ها بصورت زیر محاسبه می‌شوند:

- برای هریک از چهار ترکیب انتخاب‌ها، یعنی چپ-چپ، چپ-راست، راست-چپ و راست-راست، آن‌ها ابتدا نرخ موفقیت را حساب کردند، یعنی تعداد امتیازها تقسیم بر تعداد کل تلاش‌ها. سپس این چهار نرخ موفقیت را با هم جمع نمودند. بنابرین از آنجا که چهار ترکیب از انتخاب‌ها وجود دارد و نرخ موفقیت هر یک می‌تواند حداکثر یک باشد، بنابرین بیشترین حاصل‌جمع ممکن ۴ خواهد بود. اگر حاصلجمع آن‌ها S بدست آید، ما می‌گوییم که آلیس و باب در بازی بِل S بار از چهار بار برنده شده‌اند. توجه کنید که این نمره یک میانگین است، بنابرین می‌تواند هرمقداری بین صفر و چهار داشته باشد. برای مثال، نمره ۳/۴۱ به این معناست که آلیس و باب بطور میانگین ۳/۴۱ بار از ۴ بار یا به عبارت دیگر ۳۴۱ بار از ۴۰۰ بار برنده شده‌اند.
- خواهیم دید که ساختن جعبه‌ها بصورتی که اجازه دهد آلیس و باب به امتیاز ۳ برسند، کار آسانی است. بنابرین وقتی می‌گوییم که آن‌ها بازی بِل را برنده شده‌اند منظورمان این است که آن‌ها اغلب ۳ بار از ۴ بار را برنده شده‌اند.

برای آشنایی بیشتر با این بازی خاص، تصور کنید که آلیس و باب نتایجی را که جعبه‌هایشان نمایش می‌دهند را یادداشت نمی‌نمایند و درعوض فقط هر آنچه به ذهن آن‌ها خطور می‌کند را یادداشت می‌کنند. به عبارتی دیگر آن‌ها نتایج را کاملاً شانسی و مستقل از یکدیگر تولید می‌نمایند.[۱] در این مورد تمامی نرخ‌های موفقیت ۱/۲ خواهند بود. در واقع آلیس و باب هرگونه انتخابی برای جهت حرکت دسته داشته باشند، در نیمی از مدت زمان نتایج یکسان و در نیمه دیگر نتایج مخالف را ثبت می‌کنند. این بدین معناست که نمره بازی بِل برابر $4 \times \frac{1}{2} = 2$ خواهد شد. بنابرین برای اینکه به نمره‌ای بالاتر از ۲ دست یابیم، جعبه‌های آلیس و باب نمی‌توانند کاملاً مستقل از هم باشند و باید به نحوی با هم هماهنگ شوند تا نتایج همبسته تولید نمایند.

یک کم فراتر می‌رویم. مثال دیگری را درنظر بگیرید که در آن هر دو جعبه صرف‌نظر از موقعیت دسته همیشه نتیجه یکسان صفر را نمایش می‌دهند. در این مورد انتخاب-های آلیس و باب تاثیری بر نتایج بازی نخواهند داشت. مشخص است که نرخ موفقیت برای هر یک از سه ترکیب چپ-چپ، چپ-راست و راست-چپ برابر یک و برای ترکیب راست-راست برابر صفر خواهد بود. بنابرین در این مورد نمره ۳ خواهد شد.

قبل از اینکه به تحلیل چگونگی کارکردن جعبه‌ها بپردازیم، اجازه دهید کمی بصورت انتزاعی بحث را پیش ببریم. این کار ما را به قلب مفهوم ناموضعیت خواهد برد.

محاسبه ناموضِعی: $a + b = x \times y$

دانشمندان دوست دارند چیزهایی را که تحلیل می‌نمایند با استفاده از اعداد کدگذاری نمایند، مانند کاری که ما در اینجا برای نشان دادن نتایج روی جعبه‌ها انجام دادیم. این امر به آن‌ها کمک می‌کند که روی مباحث مهم و ضروری تمرکز

[۱] لازم به ذکر است که این استدلال‌ها برای زمانی که یکی از این دو نفر قواعد را رعایت کند و دیگری آن‌ها کاملاً نادیده بگیرد، نیز برقرار می‌باشد. در این‌صورت یکبار دیگر تمامی نرخ‌های موفقیت ۱/۲ خواهد بود و مجموع آن‌ها نمره ۲ را تشکیل می‌دهد.

نمایند بجای اینکه با جملات طولانی مانند"آلیس دسته خود را به سمت چپ حرکت داد و نتیجه صفر را مشاهده نمود" گیج شوند. این کار همچنین به آن‌ها اجازه می‌دهد که عملیات‌های جمع و ضرب را انجام دهند. ما نیز خواهیم دید که این روش می‌تواند جهت کپسوله کردن مفهوم ناموضعیت در یک معادله بسیار ساده مورد استفاده قرار گیرد.

اجازه دهید ابتدا روی آلیس متمرکز شویم. فرض کنید x نشان‌دهنده انتخاب او و a نشان‌دهنده نتیجه انتخاب باشد. مثلاً $x=0$ به این معنا خواهد بود که آلیس تصمیم گرفته دسته را به سمت چپ منحرف نماید و $x=1$ یعنی او دسته را به سمت راست جابجا نموده است. همچنین در مورد باب فرض می‌کنیم y نشان‌دهنده انتخاب او و b نشان دهنده نتیجه آن انتخاب باشد. با استفاده از این علامت‌گذاری جدول کوچک زیر موردی را بصورت خلاصه نشان می‌دهد که با توجه به قواعد بازی بِل، آلیس و باب یک امتیاز می‌گیرند:

	$x=0$	$x=1$
$y=0$	$a=b$	$a=b$
$y=1$	$a=b$	$a\neq b$

اجازه دهید فقط برای سرگرمی کمی ریاضیات ابتدایی انجام دهیم. با فرض اینکه آلیس و باب هر کدام جعبه جداگانه خود را دارند و بسیار از هم فاصله دارند و احتمال هیچ‌گونه کپی‌برداری نیز وجود نداشته باشد و هرکدام انتخاب‌های کاملاً آزادانه‌ای انجام می‌دهند و نتایج خود را یادداشت می‌کنند، اثبات می‌شود که می‌توان بازی بل را بصورت معادله زیبا و برآزنده زیر خلاصه نمود:

$$a+b=x\times y$$

یعنی a بعلاوه b برابر است با x ضربدر y . در واقع حاصلضرب $x \times y$ همیشه برابر صفر است مگر اینکه $x = y = 1$ باشد. پس این معادله می‌گوید که $a + b = 0$ مگر اینکه $x = y = 1$ باشد.

ابتدا حالتی را در نظر بگیرید که $x = y = 1$ باشد. در این‌حالت $a + b = 1$ بوده و از آنجا که a و b برابر 0 یا 1 می‌باشند، معادله $a + b = 1$ تنها دو جواب ممکن دارد: یا $a = 0$ و $b = 1$ و یا $a = 1$ و $b = 0$. از آنجا که $a + b = 1$، پس حتماً می‌بایست $a \neq b$ و طبق قواعد بازی بِل، آلیس و باب یک امتیاز می‌گیرند.

اکنون سه حالت دیگر را بررسی می‌کنیم: *(x,y)=(0,0), (0,1)* و یا *(1,0)* . در این موارد همواره داریم $x \times y = 0$ و بنابرین معادله بصورت $a + b = 0$ خلاصه می‌شود. اولین حالت ممکن عبارت‌است از $a = b = 0$. دومین جواب عبارت‌است از $a = b = 1$، این جواب ممکن است در دید اول عجیب به نظر برسد زیرا معمولاً $1 + 1$ برابر *2* می‌باشد. اما وقتی ما با بیت‌های *0* و *1* سروکار داریم، جواب نیز می‌بایست *0* یا *1* باشد. در اینجا $2 = 0$ (ریاضی‌دان‌ها آن را محاسبات در سیستم باینری یا دودویی می‌نامند). بنابرین معادله $a + b = 0$ معادل $a = b$ می‌باشد.

در نتیجه، معادله زیبای $a + b = x \times y$ بطور کامل بازی بِل را در خود خلاصه می‌نماید. هر بار که این معادله برقرار گردد آلیس و باب یک امتیاز می‌گیرند. و بنابرین شما می‌بینید که انقلاب کوانتومی می‌تواند توسط ریاضیات بسیار ساده‌ای به نمایش گذاشته شود.[۱]

این معادله پدیده ناموضِعیت را بیان می‌نماید. برای اینکه بازی بِل را به‌صورت سیستماتیک برنده شویم، جعبه‌ها می‌بایست حاصلضرب $x \times y$ را محاسبه کنند. اما در شرایطی که انتخاب x فقط در دسترس جعبه آلیس بوده و انتخاب y تنها در

[۱] به‌عنوان یک دانشجوی خوب و به نوعی سرکش، چند بار در طول تحصیلاتم از اساتید فیزیک کوانتومی خود توضیح بیشتر را خواستار شدم، فقط برای اینکه این را بشنوم که فیزیک کوانتومی را نمی‌توان فهمید زیرا به ریاضیات بسیار پیچیده‌ای نیاز دارد.

دسترس جعبه باب می‌باشد، این محاسبه نمی‌تواند بصورت موضِعی انجام پذیرد. در بهترین حالت آن‌ها می‌توانند روی $x \times y = 0$ شرط‌بندی کنند و ۳ بار از ۴ بار را درست حدس زده و به نمره ۳ دست‌یابند. اما هر نمره بالای ۳ مستلزم محاسبه ناموضِعی $x \times y$ می‌باشد زیرا دو عامل موجود در این ضرب تنها در مکان‌هایی موجود می‌باشند که بسیار از هم فاصله دارند.

راهبردهای موضِعی برای بازی بل:

آلیس و باب در کنار جعبه‌های خود قرار دارند و دقیقه‌ای یکبار بصورت آزاد و مستقل از یکدیگر، انتخاب خود را انجام داده و با دقت انتخاب‌های خود و نتیجه نمایش داده شده روی جعبه‌ها را یادداشت می‌نمایند. این جعبه‌ها چه‌کار می‌توانند انجام دهند تا نمره خوبی را برای آلیس و باب رقم بزنند؟

اجازه دهید فرض کنیم آن‌ها بسیار دورتر از آن هستند که بتوانند بر یکدیگر تاثیری داشته باشند. به این منظور در ذهن خود، آلیس و باب را آنقدر دور از هم تصور کنید که هیچگونه ارتباطی ممکن نباشد. به عنوان مثال آن‌ها را در فاصله‌ای تصور کنید که حتی برای نور بیشتر از یک ثانیه طول بکشد تا از یکی به دیگری برسد، یعنی فاصله‌ای بیشتر از ۳۰۰،۰۰۰ کیلومتر. تقریباً برابر فاصله زمین تا ماه. در این حالت حداکثری، برای آلیس و جعبه او غیر ممکن خواهد بود که انتخاب خود را به باب یا جعبه باب مخابره نمایند. بنابرین هیچ شکلی از تاثیر یا ارتباط ممکن نخواهد بود و ما می‌بایست به دنبال توضیح دیگری در این رابطه باشیم.

حال بیایید موردی را تحلیل کنیم که هر دو دسته بصورت کاملاً تصادفی به سمت چپ منحرف می‌شوند. آلیس و باب تنها درصورتی‌که نتایج یکسانی ببینند یک امتیاز می‌گیرند. این شرایط مانند وقتی است که دو خریدار اگر فروشگاه سمت چپ را انتخاب نمایند همواره خرید آن‌ها به منوی یکسانی ختم می‌شود. قبلاً دیدم که اگر امکان تمامی تاثیرهای مستقیم را کنار بگذاریم، این پدیده تنها درصورتی ممکن خواهد بود که هر دو فروشگاه مطلقاً انتخاب دیگری نداشته و یا به‌عبارت ساده‌تر،

منوی یکسانی را ارائه دهند. در مورد جعبه‌های بازی بِل این بدین معناست که اگر دسته‌ها به سمت چپ منحرف شوند هر دو نتیجه یکسانی را تولید می‌کنند. این نتیجه در هر دقیقه از قبل تعیین شده است ولی ممکن است از یک دقیقه به دقیقه بعدی تغییر نماید، همانطور که تک منوی موجود می‌توانست از یک بعدازظهر به بعدازظهر دیگر تغییر نماید. در اینجا ما یک توضیح برای یک همبستگی بیشینه در حالتی که هر دو دسته به سمت چپ منحرف می‌شوند خواهیم داشت. این توضیح از نوع دوم یعنی بر اساس علت موضِعی مشترک خواهد بود[۱]. در واقع نتایجی که هر دقیقه از قبل تعیین شده‌اند می‌بایست در هر جعبه ذخیره شده باشند، یعنی موضعی می‌باشد.

اجازه دهید این مورد را کمی بیشتر تحلیل کنیم. نتایجی که از ابتدا در جعبه‌ها ذخیره شده‌اند ممکن است توسط یک سری طولانی از پرتاب سکه تولید شده‌باشند. بنابرین از دید آلیس و همچنین از نظر باب، آن‌ها کاملاً رندم و تصادفی به نظر می‌رسند. به‌هرحال وقتی آن‌ها دوباره یکدیگر را پس از انجام آزمایش ملاقات نمایند و ببینند که همواره نتایج یکسانی بدست آورده‌اند، دیگر باور نخواهند نمود که این اتفاق شانسی بوده است. مگر اینکه یک شانس ناموضِعی در کار باشد؟ ما به این مسئله بازخواهیم گشت.

کادر ۲. شانس: نتیجه‌ای که غیرمنتظره است، شانسی اطلاق می‌شود. اما غیرمنتظره برای چه کسی؟ خیلی چیزها یا بخاطر اینکه نتیجه فرآیندی آنقدر پیچیده می‌باشند که قابل فهم نیستند و یا اینکه ما به تمام جزئیاتی که بر نتیجه تاثیرگذار بوده‌اند توجه ننموده‌ایم، غیر منتظره به‌نظر می‌آیند. به‌هرحال، یک نتیجه واقعاً رندم که توسط شانس صرف رخ داده‌است نیز غیر منتظره-است زیرا ذاتاً غیر قابل پیش‌بینی می‌باشد. چنین نتیجه‌ای هرچقدر هم پیچیده باشد، از طریق یک یا چند زنجیره از علت‌ها رخ نمی‌دهد. یک نتیجه کاملاً رندمی قابل پیش‌بینی نمی‌باشد زیرا

[۱] Common local cause

قبل از اینکه بوجود آید، اصلاً وجود نداشته، لازم و ضروری نبوده و تحقق‌یافتن آن خلقت محض بوده است.

برای روشن نمودن این ایده، تصور کنید که آلیس و باب بصورت تصادفی یکدیگر را در خیابان ملاقات می‌نمایند. این ملاقات می‌تواند مثلاً ناشی از این باشد که آلیس به رستورانی پایین‌تر در آن خیابان می‌رفته و باب نیز برای ملاقات دوستش که در خیابان بعدی زندگی می‌کند از آن خیابان رد می‌شده است. از لحظه‌ای که آن دو تصمیم می‌گیرند که بصورت پیاده و از طریق کوتاه‌ترین مسیر ممکن، آلیس به سمت رستوران و باب برای دیدن دوستش، بروند، ملاقات آن‌ها قابل پیش‌بینی بوده‌است. این مثالی است از دو زنجیره از علت‌ها، یعنی مسیرهایی که آلیس و باب انتخاب نموده‌اند که از مقابل یکدیگر عبور می‌کند و بنابرین چیزی را بوجود می‌آورد که برای هردوی آن‌ها یک مواجهه شانسی وانمود می‌شود. درحالی‌که این مواجهه برای کسی که میدان دید وسیع‌تری دارد قابل پیش‌بینی بوده است. طبیعت به ظاهر شانسی این ملاقات صرفاً در اثر ناآگاهی می‌باشد: باب نمی‌دانست آلیس کجا می‌رفت و همین‌طور برعکس. اما اوضاع قبل از اینکه آلیس تصمیم بگیرد به رستوران برود چگونه بود؟ اگر ما بپذیریم که او از موهبت اراده آزاد بهره‌مند بوده است، پس قبل از اینکه او تصمیمش را بگیرد، ملاقات واقعاً غیرقابل پیش‌بینی بوده است. شانس محض چیزی شبیه به این است.

بنابرین شانس محض، علتی مانند آنچه در باور فیزیک کلاسیک می‌باشد ندارد. نتیجه‌ای که ناشی از شانس محض باشد به هیچ طریقی قابل پیش‌بینی نمی‌باشد. اما ما لازم داریم که برای این ادعا شرایطی را لحاظ نماییم، زیرا یک اتفاق کاملاً شانسی نیز، ممکن است علتی داشته باشد. این بدین معناست که چنین علتی نتیجه را تعیین نمی‌نماید و تنها احتمال طیفی از نتایج محتمل مختلف را فراهم می‌آورد. در واقع تنها تمایل طبیعی به یک نتیجه خاص است که می‌تواند از قبل تعیین شده باشد.

طبق توضیح وجود علت‌های مشترک موضِعی، هر دقیقه هر جعبه یک نتیجه از قبل تعیین شده را تولید می‌نماید. چنین توضیحی مستلزم این است که لیستی از نتیجه‌ها از قبل در هر جعبه قرار داده شده و ذخیره شده باشد. ما می‌توانیم فرض کنیم که هر جعبه مجهز به یک کامپیوتر کوچک که دارای یک حافظه بزرگ، یک ساعت و

یک برنامه که اطلاعات بعدی را در فاصله‌های زمانی یک دقیقه‌ای از حافظه می‌خواند می‌باشد.

بسته به برنامه، نتایج می‌توانند به موقعیت دسته وابسته باشند و یا اینکه ربطی به مکان دسته نداشته باشند. اما چه برنامه‌هایی در کامپیوترهای آلیس و باب در حال اجرا می‌باشند؟ آیا تعداد نامتناهی و یا حداقل تعداد بسیار زیادی برنامه ممکن باید وجود داشته باشد؟ در واقع اینگونه نیست، زیرا بر اساس ساده‌سازی که با مقید شدن به انتخاب‌ها و نتایج باینری (دو دویی) در رهیافت علمی خود انجام دادیم، تعداد برنامه‌های ممکن در هر جعبه به ۴ عدد محدود می‌گردد. در واقع برنامه موجود تنها کافی است یک نتیجه از بین دو نتیجه را برای هر یک از دو انتخاب ممکن فراهم کند. این ۴ برنامه در جعبه آلیس عبارتند از[۱]:

۱- انتخاب x هرچه باشد، نتیجه همواره $a=0$ است.
۲- انتخاب x هرچه باشد، نتیجه همواره $a=1$ است.
۳- نتیجه عیناً برابر انتخاب می‌باشد، یعنی $a=x$.
۴- نتیجه همواره با انتخاب تفاوت دارد، یعنی $a=1-x$.

به همین‌ترتیب ۴ برنامه ممکن برای جعبه باب وجود خواهد داشت. یعنی در مجموع $4 \times 4 = 16$ ترکیب ممکن از برنامه‌ها برای هر دوی آلیس و باب قابل تصور است. طبیعتاً برنامه‌ها در جعبه‌های آلیس و باب می‌توانند از یک دقیقه به دقیقه بعدی تغییر نمایند، اما در هر دقیقه یکی از ۴ برنامه موجود در جعبه آلیس نتیجه a را و یکی از ۴ برنامه موجود در جعبه باب نتیجه b را تعیین می‌نمایند.

[۱] در اینجا مفهوم انتزاعی برنامه، یعنی چه نتایجی در اثر چه داده‌هایی تولید می‌شوند، مورد نظر می‌باشد. واضح است که یک برنامه انتزاعی به روش‌های زیادی می‌تواند نوشته شود، با زبان‌های برنامه نویسی گوناگون و احتمالاً با تعداد زیادی سطرهای غیر ضروری، بگونه‌ای که ممکن است تشخیص دو برنامه جداگانه که در واقع یک برنامه نوعی و انتزاعی مشترک هستند، کار دشواری باشد.

اجازه دهید این ۱۶ ترکیب ممکن از برنامه‌ها را بررسی نموده و نمره‌های متناظر آن‌ها را محاسبه نماییم. در خاطر داشته باشید که هدف ما یافتن مقدار بیشترین نمره ممکن توسط یک توضیح موضِعی می‌باشد. خواهیم دید که طراحی جعبه‌ها به‌وسیله روش‌های موضِعی بگونه‌ای که نمره‌ای بالاتر از ۳ اخذ شود غیر ممکن خواهد بود. اکنون شما می‌توانید انتخاب کنید که این موضوع را به‌سادگی بپذیرید و مستقیماً به صفحه ۲۹ (قسمتی با عنوان برنده شدن در بازی بِل: همبستگی‌های ناموضِعی) بروید یا اینکه کمی وقت بگذارید و با مطالعه مباحث پاراگراف بعدی خود را قانع نمایید، البته من راه دوم را شدیداً توصیه می‌نمایم.

اجازه دهید با ترکیب برنامه ۱ برای آلیس و برنامه ۱ برای باب شروع کنیم. در این‌حالت هر دو نتیجه همواره صفر هستند، یعنی $a=b=0$، و آلیس و باب ۳ بار از ۴ بار در بازی بِل برنده می‌شوند. درواقع آن‌ها تنها زمانی در بازی بِل می‌بازند که هر دو ۱ را انتخاب می‌نمایند. اکنون دومین ترکیب از برنامه‌ها را درنظر بگیرید، یعنی برنامه ۱ برای آلیس، که همواره $a=0$ می‌باشد، و برنامه ۳ برای باب، که $b=y$ می‌باشد. به‌نوبت چهار جفت از انتخاب‌های ممکن آن‌ها را درنظر بگیرید. برای $x=0$ و $y=0$، نتایج $(0,0)$ می‌باشند و بنابرین آلیس و باب برنده می‌شوند، به عبارتی یک امتیاز کسب می‌کنند. برای $x=0$ و $y=1$ نتایج عبارتند از $(0,1)$ و آن‌ها می‌بازند، به این معنی که امتیازی کسب نمی‌کنند. برای $x=1$ و $y=0$ نتایج عبارتند از $(0,0)$ و آن‌ها برنده می‌شوند. درپایان، برای $x=1$ و $y=1$ نتایج عبارتند از $(0,1)$ و آن‌ها دوباره برنده می‌شوند، زیرا برای $x=y=1$ هدف این است که نتایج متفاوتی داشته باشیم. بطور خلاصه، دوباره آلیس و باب نمره ۳ را اخذ می‌نمایند.

اکنون شما خودتان می‌توانید با درنظر گرفتن یکایک ۱۴ ترکیب باقیمانده از برنامه‌ها بحث را به پایان برسانید. یا اینکه می‌توانید نتایج درج شده در جدول ۲,۱ را مورد استفاده قرار دهید.

برنامه آلیس	برنامه باب	نتایج برای انتخابهای $(x,y)=(0,0)$	نتایج برای انتخابهای $(x,y)=(0,1)$	نتایج برای انتخابهای $(x,y)=(1,0)$	نتایج برای انتخابهای $(x,y)=(1,1)$	امتیاز
1	1	$a=0,b=0$	$a=0,b=0$	$a=0,b=0$	$a=0,b=0$	3
1	2	$a=0,b=1$	$a=0,b=1$	$a=0,b=1$	$a=0,b=1$	1
1	3	$a=0,b=0$	$a=0,b=1$	$a=0,b=0$	$a=0,b=1$	3
1	4	$a=0,b=1$	$a=0,b=0$	$a=0,b=1$	$a=0,b=0$	1
2	1	$a=1,b=0$	$a=1,b=0$	$a=1,b=0$	$a=1,b=0$	1
2	2	$a=1,b=1$	$a=1,b=1$	$a=1,b=1$	$a=1,b=1$	3
2	3	$a=1,b=0$	$a=1,b=1$	$a=1,b=0$	$a=1,b=1$	1
2	4	$a=1,b=1$	$a=1,b=0$	$a=1,b=1$	$a=1,b=0$	3
3	1	$a=0,b=0$	$a=0,b=0$	$a=1,b=0$	$a=1,b=0$	3
3	2	$a=0,b=1$	$a=0,b=1$	$a=1,b=1$	$a=1,b=1$	1
3	3	$a=0,b=0$	$a=0,b=1$	$a=1,b=0$	$a=1,b=1$	1
3	4	$a=0,b=1$	$a=0,b=0$	$a=1,b=1$	$a=1,b=0$	3
4	1	$a=1,b=0$	$a=1,b=0$	$a=0,b=0$	$a=0,b=0$	1
4	2	$a=1,b=1$	$a=1,b=1$	$a=0,b=1$	$a=0,b=1$	3
4	3	$a=1,b=0$	$a=1,b=1$	$a=0,b=0$	$a=0,b=1$	3
4	4	$a=1,b=1$	$a=1,b=0$	$a=0,b=1$	$a=0,b=0$	1

شکل۲,۱ نتایج ۱۶ ترکیب ممکن از ۴ برنامه موجود بر روی هر جعبه.

بنابرین به‌طور خلاصه می‌توان گفت جدا از اینکه استراتژی ساخت جعبه‌ها و در نتیجه ترکیب برنامه‌ها چه باشد، آلیس و باب هیچگاه نمی‌توانند بیش از ۳ بار از ۴ بار در بازی بِل برنده شوند. فیزیک‌دانان تمایل دارند این نتیجه را به‌صورت یک نامعادله بیان نمایند که آن‌را نابرابری بِل می‌نامیم[۱]. از آنجا که این نامعادله در مرکزیت موضوع این کتاب قرار دارد، آن را بصورت کامل می‌نویسم. حتی اگر شما معنی آن را کاملاً درک نکنید، حداقل زیبایی آن را خواهید دید، درست مانند زمانی که زیبایی ترکیب یک قطعه موسیقی را احساس می‌کنید:

$$P(a=b|0,0)+P(a=b|0,1)+P(a=b|1,0)+P(a\neq b|1,1)\leq 3$$

[۱] به عبارت دقیق‌تر، در میان خانواده نامعادلات بِل، این ساده‌ترین مورد بوده و هم‌ارز نامعادله CHSH می‌باشد که به افتخار کاشفان آن یعنی J.F. Clauser, M.A. Horne, A. Shimony, R.A. Holt در مقاله "آزمایش پیشنهاد شده جهت تست تئوری متغیرهای پنهانِ موضعی" اینگونه نامگذاری شد. (عنوان لاتین مقاله:
Proposed experiment to test local hidden-variable theories, phys. Rev. Lett. 23, 880)
سایر نامعادلات مربوط به حالت‌هایی هستند که تعداد بیشتری انتخاب ممکن، تعداد بیشتری نتایج و یا تعداد بیشتری بازیکن در کار باشند.

عبارت $P(a=b|x,y)$، یعنی در موردی که x و y انتخاب شده‌اند احتمال اینکه a مساوی b باشد چقدر است. به همین روش $P(a\neq b|1,1)$ عبارت است از میزان احتمال اینکه a با b متفاوت باشد در حالتی که x=y=1 انتخاب شده باشد. نامعادله بِل همان چیزی را بیان می‌کند که ما دریافتیم، یعنی در مجموع چهار احتمال در بازی بِل، حداکثر امتیاز قابل کسب همواره ۳ است. بنابرین برای همبستگی‌های ناموضِعی همواره نامعادله بِل صادق است.

کادر۳: نامعادله‌ی بل. بطور کلی احتمال $P(a,b|x,y)$ می‌تواند از ترکیب آماری حالت‌های ممکن مختلفی ایجاد شده باشد. برای مثال، حالت ممکن اول، که به‌صورت سنتی با λ_1 نمایش داده می‌شود، با احتمال $P(\lambda_1)$ رخ می‌دهد و احتمال دوم λ_2 با احتمال $P(\lambda_2)$ و به‌همین ترتیب تا آخر. این احتمالات $P(\lambda)$ می‌توانند برای تحلیل حالت‌هایی که دقیقاً وضعیت واقعی آن‌ها را نمی‌دانیم نیز مورد استفاده قرار گیرند. در واقع ما حتی نیاز نداریم که احتمالات این حالت‌ها را بدانیم. فقط کافی است بدانیم که حالت‌های مختلف با احتمالات متفاوت رخ می‌دهند.

این حالت‌های λ می‌توانند شامل حالت‌های کوانتومی باشند، که معمولاً با علامت سای Ψ نمایش داده می‌شوند. در واقع آن‌ها می‌توانند شامل کل گذشته‌ی آلیس و باب و حتی حالت کل جهان باشند، فقط با در نظر گرفتن یک نکته: انتخاب‌های x و y باید از λ مستقل باشند. از طرف دیگر، λ می‌تواند بسیار محدودتر باشد، مانند انتخاب راهبردهای آلیس و باب در بازی بِل. از نظر تاریخی، به λ متغیرهای پنهان موضِعی گفته می‌شود اما بهتر است که آن‌ها را به‌عنوان حالت‌های فیزیکی سیستم‌ها، یعنی جعبه‌های آلیس و باب که با نظریه‌ای در آینده یا حال توضیح داده می‌شوند، در نظر بگیریم. بنابرین نامعادلات بِل درباره ساختار هر نظریه فیزیکی که در آینده با آزمایشات امروزی سازگاری داشته باشد اطلاعاتی را در اختیار ما قرار می‌دهد. به‌طور خلاصه تنها فرض در مورد λ این است که دارای هیچ اطلاعاتی از انتخاب‌های x و y نمی‌باشند.

برای هر حالت λ، احتمال شرطی را همواره می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$P(a,b|x,y,\lambda)=P(a|x,y,\lambda)P(b|x,y,a,\lambda)$$

بنابرین شرط موضِعیت بیان می‌کند که برای هر λ چیزی که در جعبه آلیس رخ می‌دهد به چیزی که در جعبه باب رخ می‌دهد بستگی ندارد، که بصورت $P(a|x,y,\lambda) = P(a|x,\lambda)$ و برعکس $P(b|x,y,a,\lambda) = P(b|y,\lambda)$ بیان می‌گردد. در مجموع، فرضیه‌ای که در زیر تمام نامعادله بِل قرار دارد با متوسط گرفتن روی همه حالت‌های ممکن λ بدست می‌آید:

$$P(a,b|x,y) = \sum_{\lambda} \rho(\lambda) P(a|x,\lambda) P(b|y,\lambda)$$

که در آن $\rho(\lambda)$ احتمال این است که حالت λ اتفاق بیفتد.

تا اینجای کار ما فرض کرده‌ایم که جعبه‌های آلیس و باب هر یک شامل برنامه‌ای هستند که نتایج را در اثر انتخاب‌های x و y تعیین می‌کنند (دانشمندان علم کامپیوتر x و y را داده‌های ورودی می‌نامند). اما اگر این برنامه‌ها کاملاً نتایج را تعیین نمی-نمودند و فضایی را برای شانس باقی می‌گذاشتند چه اتفاقی می‌افتاد؟ برای مثال، می‌توان تصور نمود که جعبه آلیس گاهی اوقات به‌صورت رندمی برنامه ۱ یا برنامه ۲ را انتخاب نماید. یا همین‌طور جعبه گاهی اوقات ممکن است نتیجه‌ای رندمی تولید نماید. آیا این موضوع می‌تواند به آن‌ها کمک کند تا در بازی بِل برنده شوند؟ نخست توجه کنید که به‌صورت رندمی انتخاب کردن برنامه ۱ (که a=0 را تعیین می‌نماید) و یا برنامه ۲ (که a=1 را تعیین می‌نماید) درست مانند تولید یک نتیجه رندمی می‌باشد. معلوم شد که این کار بیهوده‌ای است و هیچ دستاوردی به‌بار نمی‌آورد. بازی بِل شامل تعداد بسیار زیادی تکرار و محاسبه میانگین می‌باشد. حالتی که در یک دقیقه مشخص، جعبه آلیس یک برنامه را به‌صورت رندم از بین مجموعه‌ای از برنامه‌ها انتخاب نماید، نسبت به حالتی که جعبه در هر دقیقه از یک برنامه خاص استفاده کند که به‌صورت رندمی از این مجموعه برنامه‌ها انتخاب شده است، نمره متفاوتی را به‌بار نخواهد آورد. بنابرین این فرض که در هر دقیقه جعبه‌ها از یک برنامه خاص استفاده می‌نمایند به هیچ وجه محدود کننده نمی‌باشد. در نتیجه راهبردهای رندمی برای آلیس و باب به آن‌ها کمک نخواهد نمود تا در بازی بِل برنده شوند. کاملاً برعکس،

در واقع همچنان‌که دیدیم اگر جعبه‌های آلیس و باب به‌طور مستقل و به‌صورت رندم، نتایج خود را تولید نمایند، تنها به نمره ۲ دست می‌یابند.

در مجموع، هیچ راهبرد موضِعی نمی‌تواند به‌کارگرفته شود تا در بازی بِل به‌طور معمول بیشتر از ۳ بار از ۴ بار برنده شد. فیزیکدانان می‌گویند که هیچ همبستگی موضِعی نمی‌تواند نامعادله بِل را نقض کند. به عبارت دیگر، اگر آلیس و باب با این‌وجود به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی می‌کردند که به‌طور معمول بیشتر از ۳ بار از ۴ بار در بازی بِل برنده شوند، هیچ توضیح موضِعی برای این پدیده وجود نداشت. همان‌طور که دیدیم تنها دو نوع توضیح موضِعی وجود دارد، نوع اول، توضیحی که بر مبنای تاثیرهایی است که به‌صورت پیوسته از یک نقطه به نقطه دیگر در فضا انتشار می‌یابد و نوع دوم، که بر اساس علت‌های مشترک بوده و همچنین می‌توانند از یک نقطه از فضا به نقطه دیگر و از برخی گذشته‌های مشترک منتشر شوند. اما توضیح نوع اول به علت فاصله بسیار زیادی که آلیس و باب را از یکدیگر جدا نموده رَد می‌شود و همان‌طور که الان دیدیم، توضیح نوع دوم نیز هرگز نمی‌تواند برای برنده شدن در بازی بِل بیش از ۳ بار از ۴ بار مورد استفاده قرار گیرد.

برنده شدن در بازی بل: همبستگی‌های ناموضِعی

اکنون تصور کنید که آلیس و باب برای مدتی طولانی بازی بِل را انجام داده و به‌طور متوسط بیشتر از ۳ بار از ۴ بار برنده می‌شوند. این دقیقاً همان چیزی است که توسط پدیده درهم‌تنیدگی در فیزیک کوانتوم ممکن می‌شود. اما اکنون ما این قسمت هیجان‌انگیز فیزیک را به کناری گذاشته و به‌طور ساده فرضیه‌ای که آلیس و باب بازی بِل را بیشتر مواقع برنده می‌شوند را در نظر می‌گیریم. در حال حاضر امکان تاثیر آن‌ها بر یکدیگر یا ارتباط جعبه ها را، حتی بوسیله برخی انواع ناشناخته موج (بعداً به این فرضیه مهم می‌پردازیم) کنار می‌گذاریم. همین الان دیدیم که اگر جعبه‌ها نتایج خود را به‌صورت موضِعی و وابسته به زمان و موقعیت دسته، و در نتیجه وابسته به انتخاب شخص، تولید نمایند، نمی‌توان در این بازی به‌طور معمول بیشتر از ۳ بار از ۴ بار

برنده شد. به عبارت دیگر، اگر فقط راهبردهای موضِعی پذیرفته شوند، یعنی فقط از سازوکارهایی استفاده شود که از یک نقطه به نقطه دیگر در فضا منتشر می‌گردند، برنده شدن بیشتر از ۳ بار از ۴ بار غیر ممکن خواهد بود.

به‌همین علت است که همبستگی‌هایی که اجازه می‌دهد در بازی بِل بیشتر از ۳ بار از ۴ بار برنده شد را ناموضِع می‌نامند. اما بنابرین چگونه آلیس و باب این کار را با جعبه‌های خود انجام می‌دهند؟

اگر قبل از ظهور مکانیک کوانتومی، یعنی قبل از سال ۱۹۲۵، این سوال از یک فیزیکدان پرسیده می‌شد جواب خیلی ساده بود: آن‌ها می‌گفتند که این موضوع کاملاً غیرممکن است. برای اینکه در بازی بِل به‌طور معمول برای بیشتر از ۳ بار از ۴ بار برنده شدن آلیس و باب، یا حداقل جعبه‌های آن‌ها، باید بگونه‌ای تقلب صورت گیرد، یا با برقراری ارتباط با یکدیگر یا با تاثیر گذاشتن بر یکدیگر که ممکن است به‌صورت ناخودآگاه باشد، مانند وقتی که شخصی با خمیازه کشیدن باعث می‌شود شخص دیگری خمیازه بکشد. اما بدون برقراری ارتباط، دانشمندان ماقبل نظریه کوانتومی این پدیده را کاملاً غیر ممکن می‌دانستند.

شما چطور؟ آیا شما می‌توانید بگویید چگونه به‌طور معمول می‌توان در بازی بِل بیشتر از ۳ بار از ۴ بار برنده شد؟ آیا فکر می‌کنید این موضوع ممکن است؟ متاسفم اگر با این بازی باعث آزار سلول‌های خاکستری مغز شما شدم اما این موضوع واقعاً در قلب مبحث ناموضِعیت قرار دارد. شاید ما اکنون در موقعیتی قرار گرفته‌ایم که انسان‌های قرون وسطی وقتی به آن‌ها گفته شد زمین مانند یک توپ گرد است و انسان‌هایی در طرف دیگر آن زندگی می‌کنند، قرار داشتند. اما چگونه است که آن‌ها از طرف دیگر زمین سقوط نمی‌کنند؟ امروزه همه می‌دانند که تمامی اجسام، از جمله انسان‌ها، به سمت مرکز زمین در حال سقوط هستند و نَه از بالا به پایین. بنابرین انسان‌هایی که در طرف دیگر زمین قرار دارند به همان روشی که آهنربا به درب یخچال می‌چسبند روی سطح زمین نگه‌داشته شده‌اند. با تشکر از خاصیت آهنرباها، همه این موضوع را

درک می‌کند که ما به سمت زمین جذب می‌شویم و بنابرین نه استرالیایی‌ها و نه اروپایی‌ها سقوط نخواهند کرد.

اما بازی بِل چه شباهتی به آهنربای درب یخچال دارد؟ چه داستانی را می‌توانیم بیان کنیم تا این موضوع را درک نماییم؟ متاسفانه من نمی‌توانم به شما توضیح قابل لمسی دهم که چگونه درهم‌تنیدگی کوانتومی به ما اجازه می‌دهد در بازی بِل بیشتر از ۳ بار از ۴ بار برنده شویم، اما شما را دعوت می‌کنم که اکتشاف ما را در دنیای اتم‌ها و فوتون‌ها دنبال نمایید تا بتوانید با این بازی عجیب خوش بگذرانید و نتایج سرگرم کننده و حتی مفیدی را بدست آورید. اجازه دهید ببینیم این موضوع از دید ما نسبت به جهان به چه معنی می‌باشد. اجازه دهید همان‌گونه که کودکان اسباب‌بازی‌های خود را از هم جدا می‌کنند تا بفهمند با چه مکانیزم داخلی کار می‌کنند، ما نیز این همبستگی را پیاده نماییم.

کادر۴: جان بِل: " من مهندس کوانتوم هستم، اما در روزهای یکشنبه (روزهای تعطیل) قواعد خاصی دارم". من خوش‌شانس بودم که توانستم جان بل را اغلب ملاقات کنم. این داستان یکی از اولین ملاقات‌های من با او می‌باشد:

" من یک مهندس کوانتوم هستم، ولی در روزهای یکشنبه قواعدی خاص دارم"، بِل در یک ملاقات نسبتاً غیر معمول در مارس ۱۹۸۳ این‌گونه صحبت خود را آغاز نمود. این‌ها کلماتی هستند که من هیچ‌گاه فراموش نمی‌کنم. جان بِل، جان بِل مشهور، خود را به‌عنوان یک مهندس معرفی نمود، یکی از آن افراد تجربی‌کار که می‌دانند چطور چیزها کار می‌کنند، در حالی‌که در نظر من جان بِل که دریافت کننده با افتخار و معاصر دکتری فیزیک تئوری بود، یک تئوری‌دان بزرگ به‌حساب می‌آمد.

در سال ۱۹۸۳، جامعه تحقیقاتی فیزیک واد (Vaud)، کارگاه آموزشی سالانه خود را با گردهم-آوری اساتید و محققان فیزیک در مونتانا، به مدت یک هفته که نصف آن اسکی و نصف آن سخنرانی دانشمندان مشهور بود، برگزار نمود. موضوع تحقیقات آن سال، بنیان‌های فیزیک کوانتوم بود و فرصتی نصیب من شد تا آلن اسپکت، اولین شخصی که در بازی بِل برنده شده

بود[۱] را ملاقات نمایم و یک بعدازظهر دلپذیر را با او به اسکی‌بازی بپردازم. جان بِل نیز دعوت شده بود اما در برنامه‌ها زمان مناسبی به او برای انگیزش ویژه این بخش از جامعه فیزیک داده نشده بود، و مسلماً این یک اشتباه بزرگ به‌شمار می‌آمد. همراه با یک دانشجوی دیگر ما از بِل خواهش کردیم که برای ما یک ارائه مختصر و خارج از برنامه انجام دهد. در ابتدا او نپذیرفت زیرا اسلایدهای خود را همراه نداشت، اما سرانجام یک روز عصر بعد از عصرانه، خارج از برنامه سخنرانی نمود، در یک زیر زمین که البته خیلی سریع به یک اتاق کنفرانس تبدیل شد در حالی‌که حضار روی زمین نشسته بودند. این مهندس با اصولی خاص توضیح داد که چگونه می‌توان با رویکردی عمل‌گرایانه به فیزیک، از آن در توسعه برنامه‌های خاص، انجام آزمایش‌های دشوار، شناسایی قوانین تجربی و به‌کارگیری آن‌ها در شرایط خاص استفاده کرد. ولی در عین حال نباید هدف برجسته و مهم علم، یعنی توضیح طبیعت به روشی سازگار را نادیده گرفت. سخنان بل از آن زمان فکر و ذهن مرا مجذوب کرده است.

برنده شدن در بازی بِل بیانگر ارتباط نیست

بیایید فرض کنیم که آلیس و باب در بازی بِل بیشتر از ۳ بار از ۴ بار برنده می‌شوند، حتی شاید هر بار. آیا آن‌ها می‌توانند از این موضوع برای برقراری ارتباط استفاده نمایند[۲]. توجه کنید از آنجا که آن‌دو از یکدیگر به یک اندازه دلخواه بسیار بزرگ فاصله گرفته‌اند، چنین ارتباطی به معنای امکان برقراری ارتباط با سرعت دلخواه بسیار بالا خواهد بود.

[۱] فیزیکدان آمریکایی جان کلاوسر (John Clauser) نیز چند سال پیش موفق به برنده شدن در این بازی شده بود، اما جعبه‌هایی که استفاده کرده بود امکان تبادل اطلاعات را رد نمی‌کردند. علاوه بر این، آن‌ها تنها می‌توانستند یک نتیجه را تولید کنند، مثلاً صفر، نتیجه دیگر توسط اندازه‌گیری غیر مستقیم بدست می‌آمد.

[۲] این دو موضوع را با هم قاطی نکنید: فرضیه نوعی ارتباط "مرموز" بین دو جعبه که باعث می‌شود در بازی بِل برنده شد و امکان اینکه آلیس و باب از این همبستگی بوجود آمده بین جعبه‌های خود برای برقراری ارتباط بین خودشان استفاده نمایند. اولی نوعی ارتباط مخفی است که ما به‌عنوان "تاثیر" آن را می‌شناسیم، اما دومی به آلیس و باب اجازه می‌دهد که بدون نیاز به فهمیدن و کنترل عملیات داخلی جعبه‌ها با هم ارتباط برقرار سازند.

چگونه آلیس می‌تواند مقداری اطلاعات را برای باب مخابره نماید؟ تنها راه و وسیله موجود از طریق تغییر محل دسته خواهد بود. برای مثال "چپ" می‌تواند به معنی "بله" و "راست" به معنی "خیر" باشد. اما از دیدگاه باب، جعبه او نتایج را بصورت کاملاً رندمی تولید می‌نماید. مکان دسته او هر جا که باشد، دو نتیجه ممکن b=0 و b=1 با فراوانی یکسانی تولید می‌شوند. و همین قضیه برای آلیس صادق است، با هر مکانی که دسته او داشته باشد. بنابرین هیچ راهی برای استفاده از همبستگی موجود در بازی بِل جهت فرستادن پیامی از آلیس به باب و یا برعکس وجود ندارد. تها با مقایسه نتایج دو جعبه است که می‌توان به این همبستگی پی‌بُرد. تلفن عجیب و غریب فصل اول را بخاطر آورید.

بنابرین غیرممکن است که آلیس و باب از دو جعبه برای برقراری ارتباط استفاده نمایند[۱]. تنها در صورتی این اتفاق می‌افتد که آلیس و باب قادر باشند نتایج خود را با هم مقایسه نمایند، یعنی تنها زمانی که آن‌ها بازی را متوقف نموده و همدیگر را در پایان روز ملاقات نمایند، بدین ترتیب آن‌ها می‌توانند معلوم کنند که در بازی بِل برنده شده‌اند یا خیر. بنابرین هیچ‌گونه پیوندی بین آلیس و باب وجود ندارد که به آن‌ها اجازه دهد با یکدیگر ارتباط برقرار نمایند. برقراری ارتباط از طریق تنها بازی بِل به معنای ایجاد ارتباط بدون هرگونه موجود فیزیکی برای انتقال پیام از فرستنده به گیرنده می‌باشد. این پدیده برقراری ارتباط بدون مخابره خواهد بود، یعنی یک ارتباط غیر ممکن، همچنان‌که در کادر ۵ توضیح داده شده است.

[۱] در حالت کلی اگر تابع توزیع‌های حاشیه‌ای (marginal distributions) به ورودی طرف دیگر بستگی نداشته باشند، نمی‌توان از همبستگی $P(a,b|x,y)$ برای برقراری ارتباط استفاده نمود یعنی اگر:
$$\sum_b P(a,b|x,y) = P(a|x) \quad \text{و} \quad \sum_a P(a,b|x,y) = P(b|y)$$

کادر۵. هیچ ارتباطی بدون انتقال (مخابره) وجود ندارد. اگر شخصی، مثلاً آلیس، بخواهد پیامی را برای شخص دیگری، مثلاً باب، مخابره نماید، او ابتدا باید آن را روی یک واسطه فیزیکی بنویسد (کدگذاری نماید). پیام توسط این واسطه فیزیکی (مانند نامه، الکترون‌ها، فوتون‌ها) از یک نقطه به نقطه دیگر حمل می‌گردد. سپس باب این واسطه فیزیکی را دریافت نموده و پیامی که حمل می‌کند را می‌خواند یا کشف رمز می‌کند. بدین ترتیب پیام به‌طور پیوسته از یک نقطه به نقطه دیگر از طریق فضا منتقل می‌گردد. سایر روش‌های انتقال پیام، هیچ‌کدام فیزیکی نیستند.

برای مثال، اگر آلیس پیامی را انتخاب نموده و آن‌را بر روی یک واسطه فیزیکی سوار نماید، اما چیزی از او خارج نشود، یعنی هیچ موجود فیزیکی از نقطه‌ای که او در فضا قرار دارد خارج نگردد، بنابرین هیچ راهی برای او وجود ندارد تا پیام خود را منتقل نماید. در غیراین‌صورت، همچنان‌که نیوتن نیز متوجه شده بود (کادر ۱ در صفحه ۲ را ببینید)، امکان برقراری ارتباط بدون انتقال وجود داشت. ولی از طرفی ایجاد ارتباط بدون این‌که یک واسطه فیزیکی مثل ماده، موج یا انرژی پس از انتخاب پیام از آلیس به سمت گیرنده خارج شود غیرممکن است .

این موضوع را عقل سلیم به‌سادگی تایید می‌نماید. اگر شخصی این اصل را مثلاً با تلپاتی نقض نماید، می‌تواند با هر سرعت دلخواهی ارتباط برقرار سازد. در واقع از آنجا که نیاز نیست چیزی پیام را حمل کند، فاصله بین آلیس و باب هیچ اهمیتی نخواهد داشت و با زیاد نمودن این فاصله به میزان دلخواه، شخص می‌تواند به هر سرعت بالای دلخواهی برای ارتباط خود دست یابد، به‌عنوان مثال سریع‌تر از نور. اما غیرممکن بودن چنین چیزی حتی بنیادی‌تر از خود نظریه نسبیت می‌باشد، که هرگونه سرعتی بالاتر از سرعت نور را ممنوع می‌سازد:

برقراری ارتباط غیر- فیزیکی غیر ممکن است.

اما آیا می‌تواند نوعی "نخی نامرئی" برای اتصال و نَه ارتباط میان دو جعبه وجود داشته باشد که به‌طور ساده به جعبه‌ها اجازه دهد تا در بازی بِل برنده شوند؟ اگر چنین اتصالی وجود داشت، حتماً می‌توانستیم "ترفندی" که در قلب ماجرا وجود دارد را بفهمیم. اگرچه می‌تواند مانند تردستی ساده یک جادوگر ناامیدکننده باشد.

اما برای فیزیکدانان، این می‌تواند به معنای آغازی برای یک کشف مهم باشد. این ارتباط از چه چیزی تشکیل شده است؟ چگونه کار می‌کند؟ با چه سرعتی می‌تواند

تاثیرات پنهان فرضی را بین جعبه‌ها منتقل سازد؟ اما توجه داشته باشید که در حال حاضر هیچ‌گونه ارتباط مرئی قابل درکی وجود ندارد، و همچنین جعبه‌های ما آنقدر از هم دور هستند که هیچ‌گونه تاثیری که با سرعت نور حرکت نماید به موقع به مقصد خود نمی‌رسد. علاوه بر این آلیس و باب نیازی نیست بدانند که دیگری کجا قرار دارند. آن‌ها می‌توانند جعبه‌های خود را برداشته و به یک مکان نامعلومی ببرند.

باز کردن جعبه ها

در سال ۱۹۶۴ وقتی اولین بار جان بِل بازی خود را در قالب یک نامعادلعه بیان نمود، آن تنها یک آزمایش ذهنی بود. اما پس از آن این بازی در بسیاری آزمایشگاه‌های تحقیقاتی به واقعیت تبدیل شد. بنابرین بیایید این جعبه‌های ظاهراً جادویی، که ما را قادر می‌سازند در بازی بِل برنده شویم را باز کنیم.

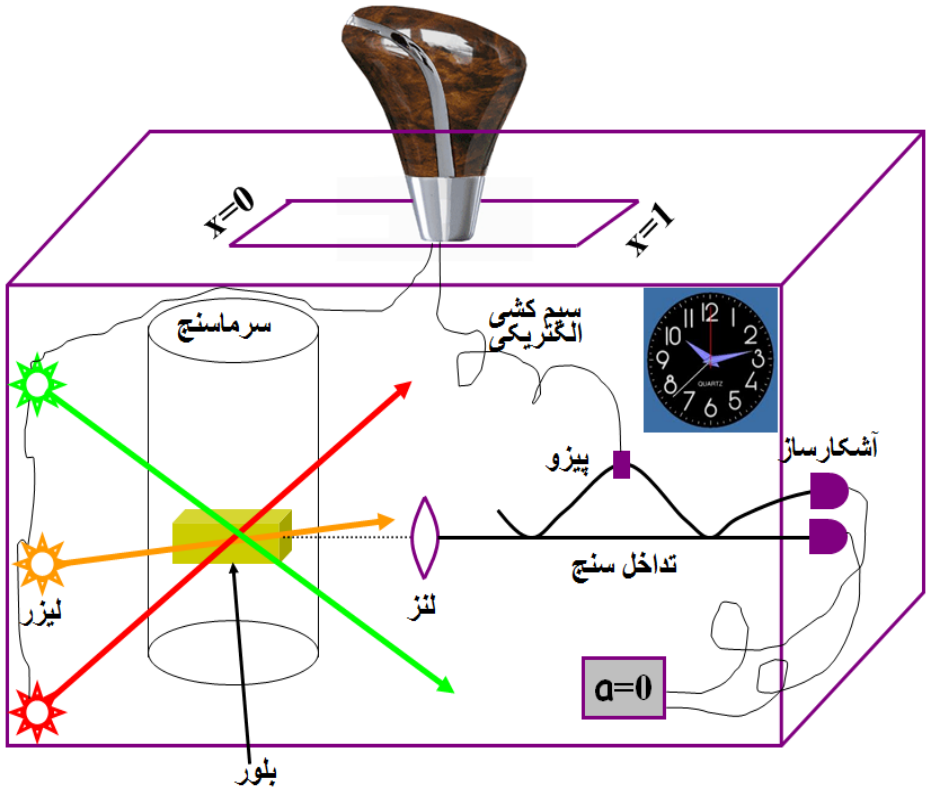
وقتی به درون آن نگاه می‌کنیم، مجموعه‌ای کامل از تجهیزات فیزیکی شامل لیزرها (قرمز، سبز و حتی برخی لیزرها که نور زرد زیبایی تولید می‌کنند)، یک سرماسنج (نوعی یخچال برای سرد کردن اجسام تا دمایی نزدیک به دمای صفر مطلق، یعنی تا ۲۷۰- درجه سانتیگراد)، تداخل‌سنج فیبر نوری (مداری نوری برای فوتون‌ها)، دو آشکارساز فوتون (که قادرند ذرات نور را آشکارسازی کنند) و یک ساعت به چشم می‌خورند (شکل ۲,۲ را ببینید). اما مشاهده این‌ها کمک چندانی نمی‌کند.

با نگاه دقیق‌تر به این تجهیزات، در مرکز سرماسنج، در محل تقاطع تمامی پرتوهای لیزر، ما متوجه یک کریستال کوچک چند میلیمتری شبیه به شیشه خواهیم شد. مشخص است که این بلور ناچیز در قلب دستگاه قرار دارد. درواقع وقتی دسته به سمت چپ یا راست منحرف می‌گردد، یک سری پرتوهای لیزری تولید شده و به

کریستال تابیده می‌شوند و یک عنصر پیزوالکتریک[۱] درون تداخل‌سنج که به کریستال متصل است را فعال می‌نمایند. این عنصر پیزوالکتریک مسافت کوچکی را هم‌جهت با دسته جابجا می‌شود. سپس ماشه یکی از دو آشکارسازِ فوتون کشیده می‌شود و متعاقباً جعبه یک نتیجه صفر یا یک را تولید می‌نماید. واضح است که دسته باعث شده‌است اتفاقی درون بلور بیفتد، از طریق پالس‌های لیزری، و سپس به کمک عنصر پیزوالکتریک حالت تداخل سنج را تعیین می‌نماید. درپایان نتیجه توسط آشکارساز داده می‌شود. دو جعبه کاملاً و دقیقاً یکسان هستند. یک‌بار دیگر متذکر می‌شویم که راز این بازی به نظر می‌رسد درون قطعه بلوری که در مرکز دستگاه است نهفته باشد. در نهایت باید گفت، کنکاش درون جعبه‌ها نتیجه قطعی و نهایی را بدست نمی‌دهد و این موضوع دقیقاً پیام این فصل را تشکیل می‌دهد. با وارسی ساده‌ی روش ساختن جعبه‌ها و نحوه کارکردن آن‌ها، حتی با جزئیات کامل، ما هرگز نخواهیم توانست یک توضیح قانع کننده بیابیم. در هر حالت ما از قبل می‌دانیم که هیچ توضیح موضعی برای برنده شدن در بازی بِل وجود ندارد، بنابرین به‌صورت قطع‌ویقین، با بررسی موضِعی هر یک از جعبه‌ها، به یک توضیح مناسب دست نخواهیم یافت. بنابرین بیایید برای یک لحظه به عقب برگردیم. در نهایت، تمام چیزی که این تجهیزات پیچیده انجام داده است این است که هر گاه دسته به سمت چپ یا راست جابجا شده است، یک نتیجه دو دویی تولید نموده‌اند. بنابرین حتی اگر سازوکار آن بسیار پیچیده است، به نظر می‌رسد که همه کاری که می‌تواند انجام دهد این است که یکی از چهار

[۱] وقتی به یک عنصر پیزوالکتریک فشار وارد می‌شود، یک اختلاف پتانسیل الکتریکی تولید می‌نماید، و به‌طورعکس، وقتی به آن یک اختلاف پتانسیل الکتریکی اعمال می‌کنیم، عنصر فشرده می‌شود. این دو اثر دست به دست می‌شوند. یکی از آشناترین کاربردهای آن در فندک‌های گازی می‌باشد. وقتی فشاری اعمال می‌گردد اختلاف پتانسیل کوچکی تولید می‌گردد و درنتیجه به‌صورت یک جرقه، تخلیه الکتریکی صورت می‌گیرد. یاقوت استفاده شده در سوزن قلم‌های حکاکی جهت ضبط روی صفحه‌های چرخان، نمونه دیگری از کاربرد آن می‌باشد.

برنامه‌ای که قبلاً (در صفحه ۲۴) توضیح داده شد را تولید نماید. با این وجود، چه کار دیگری می‌تواند انجام دهد؟ یک‌بار دیگر تاکید می‌کنیم که تنها دو حالت ممکن برای دسته‌ها و تنها یک نتیجه دو دویی وجود دارد. استفاده از چندین لیزر، یک سرماسنج و آشکارسازهای فوتونی برای انجام چنین برنامه ساده‌ای افراط به نظر می‌رسد! اما این دستگاه کار بیشتری انجام می‌دهد، زیرا به ما اجازه می‌دهد در بازی بِل برنده‌شویم.



شکل ۲,۲ آلیس و باب درون جعبه‌های بازی بِل مجموعه‌ی پیچیده‌ای از تجهیزات فیزیکی را یافتند. اما تنها با مشاهده موضِعی محتویات دو جعبه نبود که آلیس و باب توانستند بفهمند که بازی بِل چگونه کار می‌کند، زیرا این بازی می‌تواند همبستگی‌هایی را تولید نماید که هیچ توضیح موضِعی ندارند.

یک فیزیکدان متعلق به دوره پیش از کوانتوم ممکن است زمان بسیار زیادی را به بررسی این وسایل پرداخته باشد و اصلاً چیزی نفهمیده باشد، بنابرین اگر برای خواننده روشن نباشد که چه اتفاقی درون جعبه‌ها می‌افتند، نباید احساس خجالت نماید. ما جواب را در فصل ۶ خواهیم دید، اما در حال حاضر اجازه دهید متذکر شویم که عنصر اصلی درون جعبه‌ها همان بلورها هستند و این بلورها با هم درهم‌تنیده می‌باشند[۱]. اما این به چه معنا می‌باشد؟ تا این‌جای کار درهم‌تنیدگی تنها کلمه‌ای است که ما استفاده کردیم تا مفهوم فیزیک کوانتومی که ما را قادر می‌سازد در بازی بِل برنده شویم را نام‌گذاری نماییم. بنابرین صبور باشید!

در خاتمه، محتویات دقیق جعبه‌ها زیاد اهمیت ندارند. تنها چیز مهم این است که فیزیکدانان می‌دانند، در اصول، چگونه جعبه‌هایی را بسازند که آلیس و باب را قادر سازد در بازی بِل بیشتر از ۳ بار از ۴ بار برنده شوند، و اینکه نقش اساسی از طریق چیزی به‌نام درهم‌تنیدگی اتفاق می‌افتد. این واقعیت ساده که امکان دارد در بازی بِل برنده شد، یک نتیجه و واقعیت بسیار مهم است، واقعیتی که مانند تصویر زمین در حالی‌که در فضای خالی معلق است، به‌طور خیره‌کننده‌ای روشن و واضح می‌باشد: زمین گرد است و فیزیک کوانتومی همبستگی‌های ناموضِع را پیش‌بینی می‌نماید.

[۱] ما برای متخصصان امر باید بگوییم که تمامی بلور آلیس به‌طور کامل با تمامی بلور باب درهم‌تنیده نشده است، بلکه هر بلور شامل چندین میلیارد از یون‌های کمیاب زمین می‌باشند. چندین برانگیختگی دسته‌جمعی از این یون‌ها درون بلور آلیس با برانگیختگی‌های مشابه یون‌ها درون بلور باب درهم‌تنیده شده‌اند.
(Christoph Clausen, Imam Usmani, Fe'lix Bussie'res, Nicolas Sangouard, Mikael Afzelius, Hugues de Riedmatten, and Nicolas Gisin: Quantum storage of photonic entanglement in a crystal, Nature 469, 508-511, January 2011).

فصل ۳ : ناموضِعیت و شانس محض

دیدیم که به‌دست آوردن نمره ۳ در بازی بِل آسان است. برای مثال تنها کافی است که از قبل توافق کنیم که در هر بار یک نتیجه یکسان را تولید نماییم. اما همچنین دیدیم که تعیین نمودن هرگونه راهبرد موضِعی که آلیس و باب بتوانند به‌صورت مستقل بکار بگیرند تا آن‌ها را قادر سازد به‌طور معمول بیش از ۳ بار از ۴ بار برنده شوند، غیر ممکن است. این موضوع نتیجه اصلی فصل دوم بود.

اما اگر دو بازکن، در بازی بِل برنده شوند، یعنی نمره‌ای بیشتر از ۳ از ۴ کسب نمایند، ما در این‌حالت چه نتیجه‌ای می‌گیریم؟ ظاهراً دو نتیجه‌گیری ممکن است: یا به‌طریق زیرکانه‌ای روی هم تاثیر می‌گذارند، یا این‌که تقلب نموده‌اند. اما فرض کنیم این دو گزینه را می‌توان حذف نمود. نتیجه ممکن بعدی این است که ممکن است خطایی در مباحث بیان شده در فصل دوم وجود داشته باشد. بسیاری فیزیکدانان و فلاسفه سالیان دراز به بررسی این موضوع پرداخته‌اند. چرا شما خودتان برای چند لحظه‌ای این‌کار را نمی‌کنید؟ به‌خاطر داشته باشید که هیچ‌گاه شخص نباید یک موضوع را به‌خاطر اقتدارش بپذیرد. هر کس حق دارد، و وظیفه دارد، که استدلالات علمی را خودش بررسی نماید. یک‌بار دیگر متذکر می‌شویم، هر یک از دو بازیکن، آلیس و

باب، تنها می‌توانند یکی از چهار راهبرد ممکن را انتخاب کنند. بنابرین تنها $4 \times 4 = 16$ ترکیب ممکن از راهبردها وجود دارد و هیچ‌کدام از آن‌ها راهی برای برنده شدن بیش از ۳ بار از ۴ بار را فراهم نمی‌نمایند (جدول ۲,۱ در فصل دوم را ببینید). دوباره استدلال‌های انجام شده را مرور نمایید. سعی کنید آن‌را برای دوست‌تان توضیح دهید.

دلیل خوبی برای متقاعد شدن نسبت به صحت و زیرکی این بحث وجود دارد. این مدعا کاملاً صحیح بوده و توسط هزاران فیزیک‌دان، فیلسوف، ریاضی‌دان و متخصص در زمینه محاسبات و نظریه اطلاعات چِک شده‌است. پس اما چگونه است که موضوع برنده شدن بیش از ۳ بار از ۴ بار بازیکن‌ها پیش می‌آید درصورتی‌که غیر ممکن به‌نظر می‌رسد؟ این موضوع سوال آزاردهنده‌ای می‌باشد. این بحث آنقدر ساده به‌نظر می‌رسد که بدون مکانیک کوانتومی کسی به آن کمترین علاقه‌ای پیدا نخواهد کرد. این مبحث نیز یک حقیقت آشکار در میان توده‌ای از سایر حقایق آشکار غیرجالب که هیچ ارتباط خاصی با چیزی ندارند خواهد بود. تنها دلیل خوبی که برای بررسی این سوال وجود دارد این است که امروزه در واقع فیزیک می‌تواند در این بازی برنده شود، بدون این‌که بازیکن‌ها ارتباطی برقرار سازند و یا تقلبی انجام دهند.

یک کُلّیت ناموضِع:

بنابرین بیایید به سوال خود برگردیم: ما چه نتیجه‌ای می‌توانیم از نمره‌ای که به‌طور سیستماتیک بیشتر از ۳ از ۴ در بازی بِل به‌دست آمده است بگیریم؟ تنها امکان این است که جعبه‌های آلیس و باب، اگر چه در فضا از هم فاصله دارند ولی منطقاً از هم جدا نیستند. علیرغم فاصله بین آن‌ها، ما نمی‌توانیم جعبه آلیس را در یک طرف و جعبه باب را در طرف دیگر به‌عنوان دو ماهیت جدا از هم درنظر بگیریم. به عبارت

دیگر، نمی‌توانیم صرفاً بگوییم که جعبه آلیس از یک طرف و جعبه باب از طرف دیگر چه‌کار می‌کنند. این‌گونه به‌نظر می‌رسد که علیرغم فاصله بین آن‌ها، دو جعبه همانند یک ماهیت واحد عمل می‌نمایند، یعنی ماهیتی که نمی‌توان منطقاً آن را به دو قسمت تقسیم نمود. به‌طور خلاصه، یک کلّیت ناموضِع در کار می‌باشد.

اما یک کُلّیت ناموضِع به چه معنا می‌باشد؟ آیا واقعاً به فهم موضوع کمک می‌نماید؟ شاید نَه، مگر این‌که واقعاً زیرک و باهوش باشید! در این‌جا کلمه "ناموضِع" به‌طور ساده چیزی را توصیف می‌کند که نمی‌تواند به‌صورت دو قسمت مستقل و کاملاً دارای موضِع مشخص بیان گردد. البته آلیس و باب و جعبه‌هایشان دارای موضِع‌های مشخصی می‌باشند. درست مانند هر شخص و هر جعبه عادی دیگر. ما می‌توانیم آن‌ها را با دیوارهایی از بتُن آرمه (بتُن تقویت شده) و محافظ سُربی یا هر چیز دیگری محاصره و از یکدیگر جدا نماییم اما غیر ممکن است که رفتار آن‌ها را به‌صورت این برای جعبه آلیس و آن برای جعبه باب توصیف نماییم. در واقع اگر هرکدام رفتار و درنتیجه راهبرد مخصوص خود را داشتند، غیر ممکن بود که در بازی بِل برنده شوند. و حتی اگر قبل از دور شدن جعبه‌ها در فضا، این رفتارها و راهبردها مورد بحث قرار گرفته و هماهنگ شده بودند، باز هم این موضوع صادق است.

بنابرین ما به یک نتیجه بسیار مهم و قابل‌توجه می‌رسیم که هضم آن راحت نمی‌باشد. اگر آلیس و باب به نمره‌ای بالاتر از ۳ دست می‌یابند، بنابرین ما مجبوریم که بپذیریم علیرغم فاصله بین آن‌ها و امکان تشخیص دو بازیکن، نتایج بازی آن‌ها نمی‌تواند به‌صورت موضِعی تولید شده باشند، یعنی یکی توسط جعبه آلیس و دیگری توسط جعبه باب. *نتایج به شیوه‌ای ناموضِع تولید می‌گردند.* یعنی انگار جعبه آلیس می‌داند که باب چه‌کار می‌کند و برعکس.

کادر۶. یک محاسبه ناموضِع. برنده شدن در بازی بِل بدین معناست که نتایج آلیس و باب بگونه‌ای با هم "ارتباط" دارند که معادله $a + b = x \times y$ بیش از ۳ بار از ۴ بار برآورده می‌شود. بنابرین حاصلضرب $x \times y$ بیشتر از تعداد باری که به‌صورت موضِعی امکان دارد، به‌درستی تخمین زده می‌شود، حتی اگر چه ورودی‌های x وy هیچ‌جا به‌صورت مشترک وجود ندارند، یعنی x تنها برای آلیس و جعبه او و y فقط برای باب و جعبه‌اش معلوم هستند. در اینجا یک ایده برای ساخت یک محاسبه‌گر(پردازشگر) شگفت‌انگیز رخ می‌نمایاند، کامپیوتر کوانتومی، هرچند داستان این کامپیوتر بسیار طولانی و خارج از محدوده بحث این کتاب است (و در واقع باید از یک پردازشگر کوانتومی سخن گفت تا یک کامپیوتر واقعی همه منظوره).

تِلپاتی و دوقلوهای واقعی

در این مقطع، برخی خوانندگان ممکن است به تلپاتی فکر کنند، یا شاید به دوقلوهایی که وقتی از هم دور می‌شوند تصمیم‌های مشترکی می‌گیرند یا رنج‌های یکسانی را متحمل می‌شوند. اما چنین مسیرهای فراری گمراه‌کننده خواهند بود. بیایید با دوقلوها شروع کنیم. این حقیقت که آن‌ها مجموعه ژن‌های یکسانی دارند چه مشخصه‌ای به دوقلوها می‌دهد؟ آن‌ها دارای طرح ژنتیکی یکسانی هستند و بنابرین شبیه هم می‌باشند، و معمولاً غیر قابل تشخیص‌اند. به‌همین ترتیب، مانند این است که آلیس‌ها و باب‌هایِ موضِعی، راهبردهایی را مشابه دستورالعمل‌های ژنتیکی "با خود حمل می‌کنند". اما ما دیدیم که، هر راهبردی توسط آلیس و باب "حمل شود" یا توسط جعبه‌های آن‌ها بخاطر سپرده شود، آن‌ها هرگز نخواهند توانست در بازی بِل برنده شوند. و همچنین دوقلوها، دو دوقلوی کاملاً همسان، حتی اگر در طول حیاتشان در معرض تاثیرات محیطی دقیقاً یکسانی هم قرار گرفته باشند، هرگز قادر نخواهند بود در بازی بِل برنده شوند. بنابرین تشابه دوقلوها برای فهم همبستگی موضِعی

مناسب می‌باشد، اما هیچ توضیحی در مورد برنده شدن در بازی بِل ارائه نمی‌دهد. برخلاف تصور، حتی دوقلوهای کاملاً همسان نیز نمی‌توانند در بازی بِل برنده شوند.[۱]

پس در مورد تلپاتی چه می‌توان گفت؟ اگر وجود داشته باشد، به دو نفر اجازه می‌دهد که از فاصله دور از طریق فکر با یکدیگر ارتباط برقرار سازند. تفاوت بسیار بزرگ آن با بازی بِل در این است که برای برنده شدن در بازی بِل به برقراری ارتباط نیازی نیست. تنها کافی‌است که نتایج به‌صورت رندمی تولید شوند، اما به یک روش هماهنگ. هر کدام از جعبه‌های آلیس و باب باید به نوعی "بدانند" که دیگری چه‌کار می‌کند، اما بازیکن‌ها نمی‌توانند از این "دانش" استفاده نمایند تا اطلاعات را مخابره نمایند. بنابرین برای برنده شدن در بازی بِل، بازیکن‌ها از تلپاتی استفاده نمی‌نمایند، حتی اگرچه بتوانیم تصور کنیم که جعبه‌ها به‌طریقی با هم تلپاتی دارند.

شخصاً بنده این ایده که جعبه‌ها قادرند با هم تلپاتی داشته باشند را زیاد نمی‌پسندم، زیرا از دیدگاه من چیزی به فهم ما از موضوع اضافه نمی‌نماید. من احساس می‌کنم این‌کار به‌معنای عوض کردن یک کلمه (ناموضِع) با کلمه دیگر (تلپاتی) می‌باشد. اما اگر شما احساس می‌کنید که این نوع انتخاب واژه به شما کمک می‌نماید تا مفهوم را بهتر درک کنید، چرا که نَه، به شرطی که در خاطر داشته باشید که اشخاص نیستند که می‌توانند با هم تلپاتی داشته باشند، بلکه تنها جعبه‌ها و یا بلورهای موجود در مرکز آن‌ها می‌توانند این‌کار را انجام دهند. علاوه بر این، این نوع انتخاب واژه گمراه-کننده است، زیرا مفهوم تلپاتی مستلزم وجود یک فرستنده و یک گیرنده است. اما ما بعداً خواهیم دید که این ایده بعید است. همچنین در بازی بِل و آزمایش‌های مربوطه

[۱] در این رابطه، تصور فوتون‌های دوقلو که معمولاً برای صحبت در مورد جفت فوتون‌های درهم‌تنیده مورد استفاده قرار می‌گیرد، و در واقع می‌تواند برای برنده شدن در بازی بِل استفاده شود کاملاً گمراه‌کننده می‌باشد.

تقارن بین آلیس و باب کامل می‌باشد و چیزی برای تشخیص یک فرستنده احتمالی از یک گیرنده وجود ندارد.

هماهنگی ارتباط نیست

ایده وجود یک کلّیت ناموضِع بلافاصله مفهوم ارتباط آنی را به ذهن می‌آورد. واکنش نیوتن به ناموضِعیت در نظریه جهانی گرانشش را بخاطر آورید. در واقع اگر جعبه‌های آلیس و باب در بازی بِل برنده می‌شوند، به‌خاطر این است که آن‌ها بعد از این‌که دسته‌های آن‌ها به سمت چپ یا راست حرکت می‌نمایند با هم هماهنگ می‌شوند. اما از آنجا که این جعبه‌ها با فاصله زیادی از هم جدا شده‌اند لذا آن‌ها باید بتوانند در فاصله دور با یکدیگر هماهنگ شوند. این همان چیزی است که اینشتین آن را عمل شَبه‌وار از فاصله دور نامید، عبارتی که به روشنی بی‌رغبتی استاد را به چنین چیزی نشان می‌دهد. اما در کمال تعجب، امروزه بسیاری آزمایش‌ها بینش اینشتین را نقض نموده و نظریه کوانتومی را تایید می‌نمایند: طبیعت در واقع قادر است که دو جعبه دور از هم را هماهنگ نماید.

به‌هرحال، هماهنگی به معنای ارتباط نمی‌باشد. اما چگونه ممکن است که بدون ارتباط هماهنگی صورت گیرد؟ به‌عنوان یک انسان، مسلماً ما توانایی چنین کار برجسته‌ای را نداریم و بنابرین تصور چگونگی نحوه کار کردن آن برای ما بسیار دشوار خواهد بود. در واقع، برای این‌که بتوان بدون ارتباط هماهنگی برقرار ساخت، جعبه‌ها باید نتایج خود را به‌صورت رندمی تولید نمایند. برای فهم این موضوع، فرض می‌کنیم برعکس باشد، یعنی جعبه‌ها نتایج از قبل تعیین شده را تولید نمایند. سپس نشان خواهیم داد که این موضوع به آلیس و باب اجازه می‌دهد که بدون انتقال (مخابره) ارتباط برقرار سازند. اما از آنجا که چنین ارتباطی بدون انتقال غیر ممکن است (کادر ۵ در

صفحه ۳۴ را ببینید)، ما می‌توانیم نتیجه بگیریم که هرگونه جعبه‌ای که قارد باشد در بازی بِل برنده شود نمی‌تواند نتایج از پیش‌تعیین شده تولید نماید.

برای این‌که درک بهتری از سوال حاصل شود، با در نظر گرفتن حالت ساده‌ای که جعبه آلیس همیشه a=0 را تولید و باب y=1 را انتخاب می‌نماید شروع می‌کنیم. اگر باب نتیجه b=0 را به‌دست آورد، او می‌داند که a=b و می‌تواند نتیجه بگیرد که آلیس احتمالاً x=0 را انتخاب کرده است. درغیراین‌صورت، اگر او b=1 را به‌دست آورد، او می‌داند که $a \neq b$ و می‌تواند نتیجه بگیرد که آلیس احتمالاً x=1 را انتخاب نموده است. در واقع تنها در این‌صورت است که آن‌ها یک امتیاز در بازی بِل کسب خواهند نمود. کادر ۷ نشان می‌دهد که این نتیجه‌گیری مهم، جدا از هر رابطه‌ای که نتیجه آلیس را در اثر انتخاب او تعیین نماید، همواره درست است.

از مباحث فوق آنچه را می‌توانیم بفهمیم این است که اگر جعبه آلیس نتیجه a را به روشی تَعینی (قطعی) تولید نماید (یکی از برنامه‌های ذکر شده در صفحه ۲۴ را دنبال نماید) و باب این روش را بداند، بنابرین باب می‌تواند از روی نتیجه جعبه‌ی خود انتخاب آلیس را نتیجه‌گیری کند (بفهمد). بنابرین طبق این فرضیه، باب قادر خواهد بود که افکار آلیس را از راه دور بخواند. در حقیقت هرگاه که آن‌ها یک امتیاز دریافت نمایند، باب می‌تواند به‌درستی انتخاب آلیس را حدس بزند. اگر آن‌ها در نهایت در بازی بِل برنده شوند، این نوع از ارتباط به امری عادی و پیش‌پا افتاده تبدیل می‌شود.

این نوع ارتباط همزمان و آنی خواهد بود زیرا زمان انتقال به فاصله بین آلیس و باب وابستگی ندارد. به‌طور خاص، سرعت این ارتباط می‌تواند از سرعت نور بیشتر باشد، اما سرعت نور در اینجا وارد استدلال‌های ما نمی‌شود، زیرا با دور کردن بیشتر و بیشتر آلیس و باب از یکدیگر، می‌توان از هر سرعتی فراتر رفت. حتی مهم‌تر این‌که، شخص

می‌تواند شکلی از ارتباط غیر فیزیکی داشته باشد، زیرا به هیچ مخابره‌ای برای انتقال آن بین جعبه آلیس و جعبه باب نیاز نمی‌باشد. اما چنین ارتباطی بدون انتقال غیر ممکن است (کادر ۵ در صفحه ۳۴ را ببینید).

برای جمع‌بندی، اگر جعبه‌های آلیس و باب قادرند از فاصله دور هماهنگ شوند، اما به روشی که نمی‌توان از آن برای ارتباط برقرار کردن میان آلیس و باب استفاده نمود، بنابرین نتایج آلیس نمی‌توانند به‌صورت قطعی (تَعینی) تولید گردند. این نتایج لزوماً می‌بایست به‌صورت تصادفی تولید گردند آن هم از طریق یک فرآیند ناموضِع شانسی.

کادر ۷: قطعیت (تَعیُّن) می‌تواند نمایانگر ارتباط بدون انتقال باشد. مطابق فرضیه قطعیت (تعیّن)، یک‌سری رابطه‌ها وجود دارند که با توجه به جهتی که دسته حرکت داده می‌شود نتیجه تولید شده توسط هر جعبه را تعیین می‌نمایند. اما هرگونه رابطه تعیّنی (قطعی) بین جهت دسته جعبه آلیس و نتیجه آن، به باب اجازه می‌دهد تا انتخاب آلیس را از راه دور بخواند و درنتیجه به ارتباطی بدون انتقال دست یابند. و از آنجا که چنین ارتباطی غیرممکن است، قطعیت (تعیّن) نیز غیرممکن است. جهت متقاعد شدن در این مورد، آزمایش دیگری را بررسی می‌نماییم.

بیایید تصورکنیم هر گاه دسته آلیس به سمت چپ حرکت کند، جعبه او نتیجه a=0 را نشان می‌دهد و اگر به سمت راست منحرف شود نتیجه a=1 را تولید می‌نماید. این مورد مطابق راهبرد شماره ۳ در فصل ۲ می‌باشد، یعنی a=x (صفحه ۲۴ را ببینید). در این حالت اگر باب دسته خود را به سمت چپ حرکت دهد، و درنتیجه y=0، او می‌تواند از روی نتیجه‌ای که جعبه‌اش تولید می‌نماید، جهتی که آلیس دسته خود را حرکت داده را بیابد. بنابرین برای مثال، اگر نتیجه او b=0 باشد، باب درمی‌یابد که آلیس احتمالاً دسته خود را به سمت چپ منحرف نموده است، زیرا این تنها موردی است که آن‌ها می‌توانند در بازی بِل یک امتیاز بگیرند. در واقع در حالت y=0، ما برای کسب یک امتیاز باید داشته باشیم a=b، و از آنجا که باب b=0 را مشاهده می‌نماید، او نتیجه می‌گیرد که a=0، اما در مثال ما این نتیجه تنها در صورتی ممکن خواهد

بود که x=0، و آن‌هم در صورتی اتفاق می‌افتد که آلیس دسته را به سمت چپ منحرف نموده باشد.

برای اینکه خود را متقاعد سازیم که این استنتاج با هر رابطه‌ای که نتیجه را بر اساس انتخاب x تعیین نماید، معتبر می‌ماند، کافی‌است متذکر شویم که در میان چهار متغیر موجود در رابطه $a + b = x \times y$، باب دوتا را می‌داند: انتخاب خود یعنی y و نتیجه آن یعنی b را. اگر علاوه بر این‌ها، او رابطه‌ای به‌صورت "a=f(x)" داشته‌باشد (رابطه‌ای که a و x را به یکدیگر موبوط نماید)، بنابرین باب می‌تواند انتخاب x انجام شده توسط آلیس را محاسبه نماید. برای مثال اگر a=x، درنتیجه رابطه $a + b = x \times y$ به رابطه $x + b = x \times y$ تبدیل خواهد شد و بنابرین اگر باب y=0 را انتخاب نماید، خواهیم داشت x=b، یعنی نتیجه‌ی تولید شده توسط جعبه باب برابر انتخاب آلیس x می‌باشد.

رابطه‌ی تعیین کننده نتیجه آلیس بر اساس جهتی که او دسته را حرکت می‌دهد، ممکن است از یک دقیقه به دقیقه بعد تغییر نماید، ولی در هر دقیقه این رابطه ثابت باشد، یعنی در واقع از خیلی قبل‌تر تعیین شده باشد. در چنین حالتی، هیچ چیز نمی‌تواند مانع این شود تا باب این رابطه را برای هر دقیقه نداند. اما با استفاده از هر رابطه‌ای، باب می‌تواند با احتمال زیاد جهتی را که آلیس دسته خود را حرکت می‌دهد، حدس بزند. که در نتیجه درست مانند این است که او می‌تواند افکار آلیس را از راه دور بخواند. در این‌صورت ما ارتباطی بدون انتقال خواهیم داشت.

شانس یا رندمی بودن ناموضِع

ما هم‌اکنون دیدیم که چرا نتایج آلیس و باب می‌بایست به‌صورت شانسی (تصادفی) تولید گردند، اما این رندمی بودن در جعبه آلیس و در جعبه باب مستقل نیستند، زیرا در واقع در جعبه آلیس و در جعبه باب اتفاقات رندمی‌گونه مشابهی رخ می‌دهند. بنابرین این نکته شگفت‌انگیزی به‌شمار می‌آید. شانس به‌خودی‌خود مفهوم جالب و شگفت‌انگیزی می‌باشد، اما در این‌جا علاوه بر آن، اتفاقات شانسی‌گونه یکسانی در دو

نقطه بسیار دور از یکدیگر خود را آشکار ساخته‌اند. این توضیح با درک و معرفت ما جور درنمی‌آید اما غیرقابل اجتناب است. اگر هضم این موضوع برایتان دشوار است، مطمئن باشید که بسیاری فیزیکدانان در چنین شرایطی قرار گرفته‌اند، از جمله آلبرت اینشتین که هیچگاه باور نکرد که ممکن است در بازی بِل برنده شد. بنابرین ما تمام توجه خود را در فصل ۵ به این "رندمی بودن ناموضِع" معطوف نموده و سپس در فصل ۶ آزمایش‌هایی را توضیح می‌دهیم که به ما اجازه می‌دهند در بازی بِل برنده شویم. در فصل ۹ به‌صورت دقیق ارتباط این آزمایش‌ها را بررسی خواهیم نمود تا ببینیم که آیا راه گریزی وجود دارد که به ما اجازه دهد مفهوم موضِعیت را زنده نگه‌داریم یا خیر.

اما قبل از این‌که این فصل را به پایان برسانیم بیایید به "توضیح" خود برگردیم. من بر روی کلمه "توضیح" علامت احتیاط گذاشتم، زیرا ما به نقطه‌ای رسیده‌ایم که باید از خود بپرسیم که منظورمان از یک توضیح چیست یا این‌که از آن چه خواسته‌ای داریم. یک توضیح اساساً داستانی است که به ما در مورد پدیده‌ای که قرار است توضیح داده شود می‌گوید. البته برخی خوانندگان ممکن است اعتراض کنند و دلیل بیاورند که صحبت کردن در مورد رندمی بودن ناموضِعی به سختی استانداردهای یک توضیح را داراست. اما با این وجود، این استنتاج غیرقابل اجتناب می‌باشد: ما هیچ داستانی را نمی‌توانیم بازگو کنیم که به‌صورت موضِعی در فضا و به‌صورت پیوسته در زمان رخ دهد و به ما بگوید که چگونه در بازی بِل برنده شویم. انسان‌های معاصر با نیوتن را وقتی از آن‌ها خواسته می‌شد که "توضیح" افتادن همه چیز به سمت مرکز زمین را هضم کنند، بیاد آورید. آیا آن یک توضیح است؟ خب، بله و نه. توضیح از طریق مفهوم گرانش، دارای مزیت بسیار بزرگی به‌خاطر اتفاق افتادن در زمان (افتادن ما) و در فضا (به سمت مرکز زمین) می باشد، اما همچنان این سوال که چگونه بدن ما، حتی وقتی

چشمان ما بسته است، "می‌فهمد" که زمین کجا قرار دارد، را بدون جواب باقی گذاشته است.

توضیح توسط رندمی بودن ناموضِع ممکن است در مقایسه با توضیح توسط سقوط آزاد،کمتر رضایت‌بخش باشد. اما نکته اصلی این است که هیچ توضیحی صرفاً بر مبنای موجودیت‌های موضِعی وجود نخواهد داشت. برنده‌شدن در بازی بِل نشان می-دهد که طبیعت ناموضِع می‌باشد.

بنابرین آیا ما باید هرگونه تلاشی برای به‌دست آوردن یک توضیح را رها کنیم؟ مسلماً نَه! ما تنها باید بپذیریم تا داستانی را بگوییم که شامل مشخصه‌های ناموضِع مانند رندمی‌بودن ناموضِع باشد، یک رندمی بودن غیر قابل تقلیل که می‌تواند خود را در چندین مکان کاملاً دور از هم بدون منتشر شدن از یک نقطه از فضا به نقطه دیگر به نمایش بگذارد.[۱] ناموضِعیت ما را مجبور می‌نماید تا جعبه‌ابزار مفاهیم خود که برای صحبت‌کردن در مورد نحوه کارکردن ذاتی طبیعت از آن استفاده می‌کنیم را گسترش دهیم.

برای این‌که در این‌جا به شما کمکی شود، نوعی "تاس" ناموضِع را تصور نمایید که می‌تواند با حرکت دادن هر یک از دسته‌ها پرتاب شود. این تاس ناموضِع، به محض اینکه آلیس دسته خود را به سمت x فشار دهد نتیجه a را و برای باب به محض اینکه دسته خود را به سمت y منحرف سازد نتیجه b را تولید می‌نماید. هر دوی a

[۱] بنده قصد ندارم ادعا کنم که توضیح بر اساس رندمی بودن نا موضِع کامل و قطعی می‌باشد. هر چند، بنده می‌گویم که دانشمندان همواره سعی دارند توضیحاتی را بیابند، و هر توضیحی برای این مورد لزوماً می‌بایست ناموضِع باشد. توضیحی که تاریخ بالاخره خواهد پذیرفت، توضیحی خواهد بود که به ما اجازه می‌دهد از فیزیک امروزی فراتر رفته و ما را به کشف یک فیزیک جدید که فیزیک کوانتومی را به‌عنوان یک تقریب در خود جای می‌دهد رهنمون خواهد ساخت. این فیزیک جدید همچنان به ما اجازه خواهد داد که در بازی بِل برنده شویم، در غیر این‌صورت با نتایج تجربی سازگار نخواهد بود. به‌همین علت، آن نیز ناموضِع خواهد بود.

و b رندمی هستند، اما قطعاً به گونه‌ای به سمت یکدیگر "جذب" می‌شوند تا اغلب هدف بازی بِل یعنی معادله $a + b = x \times y$ را برآورده سازند.

از لحظه‌ای که ما می‌پذیریم جهان تعیّنی نمی‌باشد، و بنابرین رندمی بودن غیر قابل تقلیل واقعاً وجود دارد، ما همچنین باید بپذیریم که این رندمی بودن، لزوماً با همان قوانینی که بر احتمالات فیزیک کلاسیک حاکم است، کنترل نمی‌شود،[1] و از طرف دیگر هیچ اصلی وجود ندارد که حضور همزمانش را در چندین مکان ممنوع سازد، به شرط آن‌که نتوان از این اثر برای برقراری ارتباط استفاده نمود.

شانس محض

هم‌اکنون دیدیم تنها یک راه وجود دارد که می‌توان از شرایطی که در آن برنده شدن در بازی بِل به امکان برقراری ارتباط با سرعت‌های بالای دلخواه می‌انجامد، اجتناب نمود: جعبه آلیس نمی‌بایست در هر دقیقه نتایج خود را در نتیجه روابط از پیش تعیین شده تولید نماید، بلکه می‌بایست آن‌ها را به روشی واقعاً رندمی تولید نماید. تنها فرضیه رندمی بودن غیر قابل تقلیل می‌تواند مانع این شود که باب رابطه بین

[1] در فیزیک کلاسیک نتیجه هر اندازه‌گیری از قبل تعیین شده است. به عبارت دیگر، درون حالت فیزیکی سیستمی که اندازه‌گیری می‌شود نوشته شده است. احتمالات تنها در اثر ناآگاهی (نادانی) ما از حالت دقیق فیزیکی ناشی می‌شوند. این عدم آگاهی، دانشمندان را مجبور می‌نماید تا به روش‌های آماری و محاسبات احتمالاتی که از اصل کولموگوروف (Kolmogorov) تبعیت می‌کنند، متوسل گردند. در فیزیک کوانتومی نتیجه یک اندازه‌گیری از پیش تعیین نشده است، حتی اگر حالت سیستم از قبل کاملاً مشخص باشد. تنها میل باطنی چنین نتیجه‌ای که خود را به نمایش بگذارد، در حالت فیزیکی سیستم تحت اندازه‌گیری نوشته شده است. این میل‌های باطنی از قواعد یکسانی پیروی نمی‌کنند و اصل کولموگوروف را برآورده نمی‌سازند. اما توجه کنید که با این‌حال برخی نتایج در فیزیک کوانتومی از پیش‌تعیین شده می‌باشند. ساختار نظریه ریاضی فیزیک کوانتومی (فضای هیلبرت) بگونه‌ای می‌باشد که برای حالت‌هایی که هیچ‌گونه ناآگاهی را مجاز نمی‌دانند و حالت‌های خالص (pure sates) نامیده می‌شوند، مجموعه تمامی نتایج از پیش تعیین شده، به‌طور منحصربه‌فرد (یکتا) میل باطنی تمامی سایر نتایج ممکن را نیز مشخص می‌نمایند. در این معنی، میل‌های باطنی فیزیک کوانتومی، تعمیم منطقی تعیّن کلاسیک می‌باشد. (N. Gisin: Propensities ;in a non-deterministic physics, Synthese **89**, 287-297, 1991 همچنین arXiv:1401.0419 را ببینید)

انتخاب آلیس و نتیجه خودش را دریابد. اگر رندمی‌بودن محض درکار نباشد، باب رابطه و همچنین دنیای فیزیک را خواهد یافت.

بنابرین ما باید این ایده که جعبه آلیس نتیجه‌ای به‌صورت موضِعی تولید می‌نماید را کنار بگذاریم. در واقع این دو جعبه هماهنگ هستند که یک جفت نتیجه را به‌صورت جهانی تولید می‌نمایند، حتی اگر چه در نظر هر یک از بازیکن‌ها نتایج آن‌ها شانسی-گونه می‌باشد.

مفهوم رندمی‌بودن محض شایسته توجه خاصی می‌باشد. بازی شیر یا خط با یک سکه و یا پرتاب یک تاس نمونه‌هایی از رخدادهای شانسی می‌باشند. در هر دو مورد، در واقع پیچیدگی میکروپدیده‌ها مانند برخورد مولکول‌های هوا با سکه و یا ناهمواری سطحی که تاس برخورد می‌کند، در عمل پیش‌بینی نتیجه را غیرممکن می‌سازد. اما هیچ‌چیز ذاتی در مورد این ناممکنی وجود ندارد و نتیجه نهایی تنها محصول تعداد زیادی علت‌های ناچیز است که با یکدیگر دست بدست هم داده‌اند. اگر ما جزئیات حرکت تاس را با دقت کافی و با ابزار مناسب محاسباتی بررسی می‌نمودیم، با در نظر گرفتن شرایط اولیه پرتاب، مولکول‌های هوا و سطحی که تاس روی آن می‌افتد و سرانجام ثابت می‌شود، مطمئناً می‌توانستیم عددی که به ما نشان می‌دهد را پیش‌بینی نماییم. بنابرین این مورد (پرتاب تاس) یک رندمی‌بودن محض نمی‌باشد.

مثال بعدی این تمایز را بهتر نشان می‌دهد. برای انجام دادن شبیه‌سازی‌های عددی، مهندسان معمولاً از اعدادی بنام اعداد شبه تصادفی (pseudo-random numbers) استفاده می‌نمایند. بسیاری از مسائل می‌توانند بدین‌گونه تحلیل گردند. برای مثال تکامل یک هواپیما (اِرکرَفت) را در نظر بگیرید. به‌جای ساختن تعداد زیادی نمونه اولیه و آزمایش نمودن تک‌تک آن‌ها، مهندسان این نمونه‌ها را بر روی کامپیوترهای

بزرگ شبیه‌سازی می‌نمایند. برای شبیه سازی شرایط پرواز، که می‌تواند همواره در طول زمان و با توجه به باد و تمامی انواع تاثیرات غیرقابل پیش‌بینی تغییر نماید، مهندسان از اعداد شبه تصادفی در برنامه‌های شبیه‌سازی خود استفاده می‌نمایند. این اعداد توسط کامپیوترها تولید می‌گردند، که به‌خودی‌خود ماشین‌های تعیّنی می‌باشند و شانس هیچ‌گونه نقشی در آن‌ها ایفا نمی‌نماید. بنابرین این اعداد در واقع به‌صورت رندمی تولید نشده‌اند، بلکه فقط مانند نتایج پرتاب تاس می‌باشند و کلمه "شبه" همین موضوع را نشان می‌دهد. رابطه بین یک عدد شبه رندمی و عدد شبه رندمی بعدی از قبل تعیین شده است، اما به اندازه کافی پیچیده‌است که می‌توان مطمئن شد به‌راحتی قابل حدس زدن نیست. در دید اول ممکن است فکر کنید که همین کافی‌است و هیچ تفاوت واقعی بین یک عدد شبه رندمی که توسط کامپیوتر تولید می‌گردد و اعدادی که با شانس محض تولید می‌گردند وجود نخواهد داشت. اما این موضوع درست نیست. نمونه‌هایی از هواپیما وجود دارند که وقتی با این‌گونه اعداد شبه‌رندم شبیه‌سازی می‌گردند کاملاً عالی رفتار می‌کنند اما در پرواز واقعی دچار اشکالات زیادی می‌شوند[۱]. این‌گونه موارد به‌ندرت اتفاق می‌افتند ولی هر چند هم که برنامه‌های تولید اعداد شبه رندم هوشمند باشند، همچنان وجود دارند. از طرف دیگر برای اعدادی که به‌واقع به روشی شانس‌گونه تولید شده‌اند چنین آسیب‌شناسی‌هایی وجود ندارد. بنابرین بین اتفاقات ظاهراً شانس‌گونه مانند پرتاب تاس و اتفاقات واقعاً شانسی از همان نمونه‌ای که برای برنده شدن در بازی بِل بدون اجازه دادن به برقراری ارتباط نیاز است، یک تفاوت واقعی وجود دارد. به‌علاوه خواهیم دید که وجود شانس

[۱] Ferrenberg, A.M., Landau, D.P.,Wong, Y.J.: Monte Carlo simulations: Hidden errors from ‘good’ random number generators, Phys. Rev. Lett. 69, 3382 (1992); Ossola, G., Sokal, A.D.: Systematic errors due to linear congruential random-number generators with the Swendsen--Wang algorithm: A warning, Phys. Rev.E 70, 027701 (2004).

محض منبع مفیدی برای جامعه می‌باشد. ما به این موضوع در فصل ۷ خواهیم پرداخت.

شانس محض موجب ناموضِعیت بدون برقراری ارتباط می‌شود

برای جمع‌بندی، برنده شدن در بازی بِل بدون برقراری ارتباط لزوماً بدین معناست که جعبه‌های آلیس و باب نتایج خود را به‌صورت واقعاً رندمی تولید می‌نمایند. این رندم‌بودن بنیادی است و نمی‌تواند به یک سازوکار پیچیده تعیّنی تقلیل یابد. این بدین معناست که طبیعت قادر به خلقت محض می‌باشد!

به‌جای این‌که مانند اینشتین به‌طور قطعی ادعا کنیم که خداوند تاس پرتاب نمی‌کند، بیایید ما بپرسیم چرا او تاس بازی می‌کند.[۱] جواب این است که بدین طریق طبیعت می‌تواند بدون این‌که به امکان برقراری ارتباط بدون انتقال بینجامد ناموضِع باشد. در واقع وقتی ما پذیرفتیم که طبیعت می‌تواند اتفاقات واقعاً تصادفی‌گونه تولید نماید، دیگر دلیلی وجود ندارد که ظهور این رندمی‌بودن را به یک تک مکان کاملاً موضِعی محدود نماییم. رندمی‌بودن واقعی می‌تواند خود را در چند مکان به‌صورت همزمان بروز دهد. از آن‌جاکه این‌گونه رندمی‌بودن ناموضِع نمی‌تواند برای برقراری ارتباط مورد استفاده قرار گیرد، دلیلی وجود ندارد که طبیعت را محدود سازیم.

بنابرین ما یافتیم که دو مفهوم به ظاهر کاملاً متفاوت، شانس و موضِعیت، درواقع کاملاً به‌یکدیگر مربوط هستند. بدون رندمی‌بودن واقعی، موضِعیت لزوماً باید مانع امکان برقراری ارتباط بدون انتقال شود. بنابرین می‌بایست در خاطر داشته باشیم که رندمی‌بودن واقعی وجود دارد و این‌که آن می‌تواند خود را به روشی ناموضِع به نمایش

[۱] Popescu, S., Rohrlich, D.: Nonlocalityas an axion, Found. Phys, **24**, 379 (1994).

بگذارد. ما می‌بایست به‌سادگی به این ایده رندمی بودن که خود را می‌تواند در چندین مکان به نمایش بگذارد عادت کنیم، یعنی رندمی بودن ناموضِعی که نتایجی که در دو مکان بسیار دور از هم رخ می‌دهند را هماهنگ می‌سازد. ما می‌بایست این ایده که رندمی بودن ناموضِع نمی‌تواند برای برقراری ارتباط استفاده شود را در بینش خود جای دهیم. مانند این است که آلیس و باب تنها می‌توانند صدا را "بشنوند"، مانند صدایی که توسط "تلفن" عجیب و غریب تولید می‌شد، و این صدایی است که نمی-تواند برای برقراری ارتباط از آن استفاده شود اما به ما اجازه می‌دهد تا در بازی بِل برنده شویم.

فصل ۴: غیر ممکن بودن شبیه‌سازی کوانتومی

ناموضِعیت بدون برقراری ارتباط نتایج حیرت‌آور دیگری نیز دارد. یک مثال آن به شبیه‌سازی (تولید مثل) کوانتومی[۱] مربوط می‌گردد. در مفهوم مورد نظر ما، این موضوع به معنی سعی نمودن برای تولید یک کپی از جعبه باب می‌باشد. همان‌طور که در فصل ۷ و ۸ خواهیم دید این مثال نسبتاً ساده در قلب رمزنگاری کوانتومی و همچنین تِلِپورتِیشِن (دورفرست، طی‌الارض یا انتقال ماده یا انرژی بین دو نقطه از فضا بدون این‌که فاصله آن دو نقطه طی شود) قرار دارد. بنابرین ارزش بررسی را دارد.

شبیه‌سازی حیوانات عادی و پیش‌پاافتاده شده است. بدون شک شبیه‌سازی انسان نیز از قبل در دسترس بوده و تا قبل از پایان این قرن به انجام خواهد رسید. خارج از واکنش‌های کاملاً مشروع و عاطفی و مشکلاتی که ایجاد خواهد نمود، اجازه دهید ببینیم که آیا شبیه‌سازی در دنیای کوانتوم ممکن است یا خیر. به عبارت دیگر آیا ممکن است از یک سیستم فیزیکی که متعلق به دنیای اتم‌ها و فوتون‌ها می‌باشد یک کپی گرفت؟ آیا دانشمندان می‌توانند یک کِلون، یعنی یک کپی کامل و تمام عیار، از جعبه آلیس یا جعبه باب تولید نمایند؟

---

[۱] شبیه‌سازی کوانتومی (Quantum cloning) پروسه‌ای است که در آن یک حالت کوانتومی دلخواه و نامشخص انتخاب شده و بدون هیچ‌گونه تغییری در این حالت اولیه یک کپی دقیق از آن تولید می‌گردد. طبق قوانین کوانتوم شبیه‌سازی کوانتومی غیرممکن می‌باشد.

اجازه دهید کمی دقیق‌تر بگوییم. این بی‌معنی است که یک الکترون را "کپی" کنیم، زیرا تمامی الکترون‌ها کاملاً یکسان هستند. وقتی ما از کپی کردن یک کتاب صحبت می‌کنیم، ما سعی نداریم که کتاب دیگری را با همان فرمت و همان تعداد صفحات تولید نماییم. یک کپی می‌بایست دقیقاً دارای همان اطلاعات باشد، یعنی دارای همان عکس‌ها و همان متن باشد. بنابرین کلون یک الکترون می‌بایست همان "اطلاعاتی" که الکترون اصلی دارد را داشته‌باشد، و بنابرین باید دارای همان متوسط سرعت و همان ناتعیّنی (نا معلومی) در سرعت و همچنین در تمامی کمیت‌های فیزیکی دیگر خود باشد[1]. تنها متوسط مکان آن متفاوت خواهد بود، به‌طوریکه ما نمونه اصلی را در اینجا و کلون آن را در آنجا خواهیم داشت.

در این فصل خواهیم پرسید که آیا واقعاً ممکن است که جعبه باب را شبیه‌سازی نماییم. ما قبلاً دیدیم که عنصر اصلی این جعبه‌ها بلورها می‌باشند که مشخصه کوانتومی که ما آن را درهم‌تنیدگی نامیدیم را دربردارند. بنابرین شبیه‌سازی جعبه باب بدین معنی است که این موجودیت‌های کوانتومی را با ویژگی‌های کوانتومی آن‌ها شبیه‌سازی نماییم.

کادر ۸. روابط عدم قطعیت هایزنبرگ. وِرنر هایزِنبرگ یکی از بنیان‌گذاران اصلی فیزیک کوانتومی بود. به‌ویژه، از او بخاطر بیان اصل عدم قطعیتش یاد می‌شود، که بر طبق آن اگر ما مکان یک ذره را با دقت اندازه‌گیری کنیم، لزوماً سرعت آن را برهم می‌زنیم. و برعکس اگر ما دقیقاً سرعت ذره را اندازه‌گیری نماییم، لزوماً مکان آن را مختل می‌نماییم. بنابرین ما هیچگاه نمی‌توانیم سرعت و مکان یک ذره را همزمان و با دقت زیاد اندازه‌گیری کنیم و بدانیم. فیزیک کوانتومی مدرن این اصل را به‌طور ساده به این حقیقت که ذرات هرگز به‌طور همزمان دارای مکان دقیقاً مشخص و سرعت دقیقاً معین نمی‌باشند یکی نموده است. بنابرین ما ترجیح می‌دهیم که از ناتعیّنی صحبت کنیم. ما عبارت "عدم قطعیت" را برای اصل هایزنبرگ نگه‌می‌داریم، اما

[1] به دلایل تاریخی، معمولاً فیزیکدان‌ها از عدم قطعیت کوانتومی صحبت می‌کنند. اما از آنجا که (عدم) قطعیت به مشاهده‌گر اشاره دارد تا به سیستم فیزیکی، ما ترجیح می‌دهیم تا امروز از ناتعیّنی (نامعلومی) کوانتومی صحبت کنیم (کادر ۸ را ببینید).

باید از توصیف کمیت‌های فیزیکی به‌عنوان نامعلوم خودداری کنیم. ما می‌گوییم که آن‌ها ناتعیّن هستند. همچنین عدم قطعیت به ناتعیّنی تبدیل می‌شود.

شبیه‌سازی کوانتومی ارتباطات ناممکن را ممکن می‌کند

غیرممکن بودن شبیه‌سازی یک سیستم کوانتومی برای کاربردهایی مانند رمزنگاری کوانتومی و تلپورتیشن (انتقال از راه دور) ضروری می‌باشد که بعداً مورد بحث قرار می‌گیرد. برای اثبات این ناممکنی از برهان خلف استفاده می‌نماییم، یعنی ابتدا فرض می‌نماییم که شبیه‌سازی سیستم‌های کوانتومی ممکن است و سپس چیزی بی‌معنی (چرند) را نتیجه‌گیری می‌نماییم که در این مورد برقراری ارتباط بدون انتقال (مخابره) خواهد بود. سپس می‌توانیم این‌گونه نتیجه‌گیری کنیم که از آنجاکه ارتباط بدون انتقال غیرممکن است پس همچنین شبیه‌سازی کوانتومی نیز وجود ندارد.

فرض نمایید که باب موفق شود جعبه خود را شبیه‌سازی نماید. به عبارت دقیق‌تر تصور کنید باب موفق شود بلوری که در قلب جعبه او قرار دارد را شبیه‌سازی نماید، یادآوری می‌کنیم که بقیه جعبه او تنها یک مکانیزم پیچیده می‌باشد که بازتولید آن دشوار نیست. اکنون او دو جعبه در مقابل خود دارد، یکی سمت چپ و یکی سمت راست. هر یک از این جعبه‌ها یک دسته دارند که او می‌تواند آن‌ها را به سمت چپ یا راست منحرف نماید و یک ثانیه بعد هر جعبه یک نتیجه را تولید خواهد نمود. اگر این دو جعبه واقعاً شبیه‌سازی باشند، نتایجی که هر دو تولید می‌نمایند باید با نتایج جعبه آلیس همبستگی داشته باشند، به‌صورتی که هر جعبه در بازی بِل با جعبه آلیس برنده شود. به‌هرحال باب می‌تواند تصمیم بگیرد که انتخاب خاصی نداشته باشد، بلکه هر دو گزینه را همزمان امتحان نماید. یعنی دسته جعبه سمت چپ را به سمت چپ و دسته جعبه سمت راست را به سمت راست منحرف نماید. اکنون توضیح خواهیم داد که چگونه باب می‌تواند از روی دو نتیجه حاصل از دو جعبه خود، از انتخاب آلیس که در فاصله دوری از او قرار دارد باخبر شود.

اجازه دهید با موردی شروع کنیم که دو نتیجه باب یکسان باشند، یعنی هر دو یا صفر باشند یا هر دو یک باشند. در این‌حالت آلیس احتمالاً x=0 را انتخاب نموده است. در واقع اگر آلیس x=1 را انتخاب نموده بود، نتیجه جعبه سمت راست باب می‌بایست با نتیجه آلیس تفاوت داشت، زیرا $(x,y)=(1,1)\Longrightarrow a\neq b$، درحالی‌که نتیجه جعبه سمت چپ او می‌بایست با نتیجه آلیس یکسان باشد، زیرا $(x,y)=(1,0)\Longrightarrow a=b$. از طرف دیگر اگر دو نتیجه باب متفاوت باشند بنابرین آلیس احتمالاً x=1 را انتخاب نموده است. در کادر ۹ این بحث کوچک با استفاده از حساب دودویی (باینری) جمع‌بندی شده است.

کادر۹: نظریه شبیه‌سازی-ممنوع[۱]. فرض کنیم b_{left} و b_{right} نشان‌دهنده نتایج تولید شده توسط دو جعبه باب باشند، به ترتیب، یکی برای دسته سمت چپ و دیگری برای دسته سمت راست. برنده شدن در بازی بل به این معنی است که این دو معادلات اغلب برقرار هستند:

$$a+b_{left}=x\times y_{left}\quad \text{و}\quad a+b_{right}=x\times y_{right}$$

با جمع نمودن این دو رابطه خواهیم داشت:

$$a+b_{left}+a+b_{right}=x\times y_{left}+x\times y_{right}$$

باید یادآوری کنم که کلیه این علائم نشان دهنده بیت‌ها (صفر و یک) هستند و همچنین جمع در مبنای ۲ بوده و بنابرین نتیجه همواره یک بیت می‌باشد. از این‌رو $a+a=0$. همچنین یادآور می‌شوم که باب دسته جعبه سمت چپ را به سمت چپ فشار می‌دهد که از آنجا $y_{left}=0$ و دسته جعبه سمت راستی را به سمت راست منحرف می‌نماید که از آنجا $y_{right}=1$. بنابرین در پایان خواهیم داشت $b_{left}+b_{right}=x$. بنابرین باب می‌تواند انتخاب آلیس x را به‌سادگی و با احتمال زیاد با جمع نمودن این دو نتیجه حدس بزند.

بنابرین اگر باب قادر بود تا جعبه خود را شبیه‌سازی نماید، او می‌توانست انتخاب آلیس را با احتمال بالا و علیرغم فاصله زیادی که آن‌ها را از هم جدا نموده حدس بزند. بنابرین ما ارتباط بدون انتقال و با سرعت دلخواه خواهیم داشت. ممکن است باب هنگامی که انتخاب آلیس را حدس می‌زند اشتباه داشته باشد، زیرا آلیس و باب

[۱] No-Cloning Theorem.

به نمره ۴ دست نمی‌یابند بلکه نمره‌ای کسب می‌کنند که به‌طور قابل ملاحظه‌ای از ۳ بیشتر است. بنابرین، باب ممکن است برخی مواقع مرتکب اشتباه گردد. اما به‌هر-حال همین حقیقت که او توانسته اغلب موارد، یعنی بیشتر از یک بار از دو بار، انتخاب آلیس را به‌درستی حدس بزند کافی است تا برقراری این ارتباط را ممکن بدانیم[1]. این ارتباط کمی دارای نویز (سروصدا) خواهد بود و آن‌ها مجبور خواهند شد چندین بار آن را تکرار کنند (در حالی‌که آلیس هر بار انتخاب‌های دقیقاً یکسانی را انجام دهد) و بنابرین باب خواهد توانست انتخاب‌های آلیس را تقریباً با قطعیت کامل حدس بزند. در واقع این همان چیزی است که در تمامی ارتباطات دیجیتال در حال انجام است. اینترنت و سایر پروتکل‌های ارتباطی پیام‌های ما را به بخش‌های کوچک تقسیم نموده که بتوان آن‌ها را به یک گیرنده فرستاد و از آنجا که همواره احتمال کوچکی برای خطا وجود دارد، پیام چندین بار برگردانده می‌شود تا بتوان از احتمال باقی‌ماندن هر گونه خطایی چشم‌پوشی نمود.

در مجموع، امکان برنده شدن در بازی بِل به معنای غیر ممکن بودن شبیه‌سازی سیستم‌های کوانتومی می‌باشد. فیزیکدان‌ها به این موضوع نظریه شبیه‌سازی-ممنوع می‌گویند. این موضوع نتیجه مهمی در فیزیک کوانتومی محسوب می‌شود. اثبات ریاضی این موضوع بسیار ساده است، اما همچنین ما دیدیم که این نظریه خیلی مستقیم و سرراست از ناموضعی بودن بدون ارتباط نتیجه گرفته می‌شود که بار دیگر بر اهمیت این مفهوم تاکید می‌کند.

چگونه ممکن است که DNA را شبیه‌سازی نماییم؟

ممکن است تعجب نماییم که چگونه ممکن است حیوانات را شبیه‌سازی نمود اگر ما نمی‌توانیم سیستم‌های کوانتومی را شبیه‌سازی نماییم. آیا اَبَرمولکول زیستی بنام NDA خودش یک سیستم کوانتومی می‌باشد؟ جالب توجه است که دقیقاً با پرسیدن

[1] می‌توان نشان داد که اگر آلیس و باب در بازی بِل بیشتر از ۳ بار از ۴ بار برنده شوند، باب بیشتر از یک‌بار از دو بار به‌طور دقیق انتخاب‌های آلیس را به‌درستی حدس می‌زند.

همین سوال بود که فیزیکدان برنده جایزه نوبل یوجین ویگنر[۱] برای اولین بار موضوع شبیه‌سازی کوانتومی را مطرح نمود[۲]. او همچنین غیر ممکن بودن شبیه‌سازی در زیست‌شناسی را نتیجه‌گیری نمود که یک اشتباه بود. DNA در واقع یک سیستم کوانتومی می‌باشد (یا حداقل به احتمال زیاد چنین است، هرچند هرگز به‌صورت تجربی اثبات نشده است ولی کمتر فیزیکدانی به آن شک دارد). به‌هرحال اطلاعات ژنتیکی درون DNA تنها توسط کسر بسیار کوچکی از احتمالاتی که فیزیک کوانتومی مجاز می‌داند کدگذاری شده‌اند و هیچ مانع بنیادی برای شبیه‌سازی این مقدار کم از اطلاعات وجود ندارد[۳]. به‌عنوان یک موضوع کلی، تحقیق نمودن در مورد نقش فیزیک کوانتومی در زیست‌شناسی جالب بوده و یک زمینه تحقیقات مدرن امروزی می‌باشد.

گریز: شبیه‌سازی تقریبی

برای این‌که این فصل را به پایان ببریم، اجازه دهید اظهاراتی را بیان نمایم که برای بحث اصلی ما ضروری نمی‌باشند ولی برای خوانندگان علمی می‌تواند جالب باشد.

اجازه دهید که این‌بار بدون اثبات ذکر کنیم که نظریه کوانتوم، شبیه‌سازی تقریبی را مجاز می‌داند، چیزی مانند یک کپی ضعیف، به‌طوری‌که بهترین شبیه‌سازی ممکن آنقدر نامرغوب باشد که تضمین نماید هیچ ارتباط بدون انتقالی نتواند انجام گیرد[۴].

---

[۱] Eugene Wigner

[۲] Wigner, E.P.: The probability of the existence of a self-reproducing unit. In: The logic of personal knowledge: Essay presented to Michael Polanyi on his Seventieth Birthday, Routledge and Kegan Paul (1961). Reprinted in wigner, E.P.: Symmetries and Reflections, Indiana University Press (1967) and in the collected work of Eugene Paul Wigner, Springer-Verlag (1997), Part A, Vol III.

[۳] مانند این است که اطلاعات در مکان یک الکترون کدگذاری شود، بدون این‌که در مورد سرعت آن نگران شویم. در این مود، مکان می‌تواند کپی شود، حال آن‌که این کار باعث اختلال در سرعت الکترون می‌گردد که البته اهمیتی ندارد، زیرا از سرعت برای حمل اطلاعات استفاده نشده است.

[۴] Gisin, N.: Quantum cloning without signaling, Physics Letters A **242**, 1-3 (1998).

نظریه شبیه‌سازی-ممنوع به‌طور خیلی نزدیک با بسیاری جنبه‌های نظریه کوانتوم گره‌خورده است. به ویژه، همان‌طور که قبلاً اشاره شد، برای کاربردهایی مانند رمزنگاری کوانتومی (فصل ۷ را ببینید) و تلپورتیشن کوانتومی (فصل ۸ را ببینید) ضروری می‌باشد. همچنین اگر قرار است که روابط معروف عدم قطعیت هایزنبرگ معنی داشته باشند این نظریه حیاتی است (کادر ۸ در صفحه ۵۶ را ببینید). در واقع اگر ممکن بود یک سیستم کوانتومی را کاملاً شبیه‌سازی نماییم، دراین‌صورت ما می‌توانستیم به‌عنوان مثال مکان را از نمونه اصلی و سرعت را از نمونه شبیه‌سازی شده اندازه‌گیری نماییم. بنابرین مکان و سرعت ذره را به‌صورت همزمان بدست می-آوردیم، چیزی که توسط اصل عدم قطعیت رد شده است[۱].

نتیجه مهم دیگر نظریه شبیه‌سازی-ممنوع این است که گسیل القایی که اساس تولید نور لیزر می‌باشد بدون گسیل خودبخودی ممکن نخواهد بود. در غیر این‌صورت، می‌توان از گسیل القایی برای شبیه‌سازی کامل حالت یک فوتون استفاده نمود (برای مثال قطبش آن). یک‌بار دیگر ذکر می‌کنیم، نسبت بین گسیل القایی و گسیل خودبخودی دقیقاً در حدود شبیه‌سازی بهینه قرار دارد که با ناموضِعیت بدون برقراری ارتباط سازگاری دارد[۲]. همه چیز خیلی خوب با هم جور درمی‌آیند. نظریه کوانتوم به‌طور قابل ملاحظه‌ای سازگار و زیبا می‌باشد. اینشتین اولین کسی بود که نسبت بین گسیل القایی و گسیل خودبخودی را توصیف نمود. او متحیر می‌شد اگر می‌فهمید که فرمولش دقیقاً از مفهوم ناموضِعیت که او آن‌قدر از آن بیزار بود پیروی می‌کند.

---

[۱] در اینجا مقداری ساده‌سازی صورت گرفته تا ارقام اندازه‌گیری‌های مکان روی نمونه اصلی و اندازه‌گیری‌های سرعت روی نمونه شبیه‌سازی شده با رابطه عدم قطعیت هایزنبرگ همخوانی داشته‌باشند. واقعیت این است که رابطه عدم قطعیت هایزنبرگ آن‌گونه که از لحاظ تاریخی توسط هایزنبرگ فرمولبندی شده است اگر اشتباه نباشد، ولی یک فرمول مبهم است (برای مثال M. Ozawa: Phys. Rev A **67**, 042105(2003) را ببینید). یک روش برای فرمولبندی آن به‌صورت دقیق از طریق نظریه شبیه‌سازی-ممنوع و تقریب کوانتومی بهینه آن می‌باشد (برای مثال C. Branciard: Proc. Natl. Acad. Sci. USA **110**, 6742-6747 (2013) را ببینید).

[۲] Simon, C., Weihs, G., Zeilinger, A.: Quantum cloning and signaling, Acta Phys. Slov. **49**, 755-760 (1999).

در پایان، آخرین مورد در خصوص رابطه بین شبیه‌سازی و ناموضِعیت را بیان می‌کنیم. ما دیدیم که غیرممکن بودن برقراری ارتباط بدون انتقال (مخابره) محدودیتی را بر روی کیفیت شبیه‌سازی جعبه باب به دو جعبه اعمال می‌نماید. چه اتفاقی می‌افتد اگر ما بازی بِل را با یک بازی (یا نامعادله) جایگزین کنیم که در آن باب به امکان‌های بیشتری دسترسی داشته‌باشد؟ برای مثال فرض کنید که دسته را می‌توان در n جهت متفاوت حرکت داد. در این مورد، غیرممکن بودن برقراری ارتباط بدون انتقال محدودیتی را روی شبیه‌سازی جعبه باب به n جعبه اعمال می‌نماید، و ما همچنان محدودیت شبیه‌سازی بهینه را خواهیم داشت. یک نتیجه این است که، برای نشان دادن ناموضع بودن، باب و همچنین آلیس می‌بایست گزینه‌های انتخاب بیشتری در مقایسه با جعبه‌ها داشته باشند، تا بتوانند یک انتخاب واقعی داشته باشند. آن‌ها نمی‌توانند تنها به موازات یکدیگر تمام انتخاب‌های خود را انجام دهند[۱]. در اینجا به مسئله اراده آزاد، یا به‌طور خاص‌تر، اهمیت این‌که آلیس و باب قادر باشند انتخاب‌های آزادانه و مستقل از یکدیگر داشته باشند، اشاره‌ای کوتاه می‌کنیم. بدون انتخاب‌های مستقل، ناموضِعیت وجود نخواهد داشت.

[۱] Terhal, B.M., Doherry, A.C., Schwab, D.: Local hidden variable theories for quantum states, Phys Rev. Lett. **90**, 157903 (2003).

فصل ۵: درهم‌تنیدگی کوانتومی

بر اساس فیزیک کوانتومی، توضیح این‌که چگونه می‌توان در بازی بل برنده شد، یعنی نمره بالای ۳ بدست‌آورد، با مفهومی بنام درهم‌تنیدگی امکان‌پذیر است. اِروین شرودینگِر، یکی از پدران فیزیک کوانتومی، اولین کسی بود که گفت درهم‌تنیدگی تنها یک مشخصه از میان سایر مشخصه‌های فیزیک کوانتومی نیست، بلکه ویژگی اصلی آن می‌باشد[۱]:

"درهم‌تنیدگی تنها یک مشخصه نیست، بلکه نشان اختصاصی مکانیک کوانتومی می‌باشد، مشخصه‌ای که عزیمت کامل از خط فکری کلاسیکی را اجباری می‌نماید."

در این فصل، ما این ویژگی جالب توجه از دنیای اتم‌ها و فوتون‌ها را معرفی می‌نماییم[۲].

کل‌نگری کوانتومی

به‌طور خلاصه، نظریه عجیب و غریب فیزیک کوانتومی به ما می‌گوید این‌که دو جسم که از یکدیگر فاصله بسیار زیادی در فضا دارند، تشکیل یک وجود واحد را بدهند، نه

---

[۱] Schrodinger, E.: Discussion of probability relations between separated systems, Proceedings of the Cambridge Philosophical Society **31**, 55 (1935).

[۲] برای مباحث مفصل بیشتر، " Scarani, V.: Quantum Physics, A First Encounter, Oxford Univ. Press 2006" را ببینید.

تنها ممکن است بلکه امری عادی و پیش‌پاافتاده است! و این همان درهم‌تنیدگی می‌باشد. بنابرین اگر ما یکی از دو قسمت را سیخونک بزنیم، هر دو به ارتعاش درخواهند آمد. قبل از هر چیز توجه نمایید وقتی ما "سیخونک می‌زنیم"، یعنی وقتی ما روی یک موجود کوانتومی یک اندازه‌گیری انجام می‌دهیم، این‌کار یک پاسخ، یک واکنش یا عکس‌العمل، کاملاً تصادفی(شانسی) ایجاد خواهد نمود، یعنی از میان گستره مشخصی از نتایج ممکن، که با احتمال کاملاً مشخصی توسط نظریه کوانتوم و با دقت عالی پیش‌بینی می‌گردد، تنها یک نتیجه ظهور خواهد نمود. از آنجا که این یک رخداد تصادفی (شانسی) می‌باشد، بنابرین نمی‌توان از این واقعیت که موجود درهم‌تنیده شده مانند یک کُل واکنش نشان می‌دهد برای فرستادن هرگونه اطلاعاتی استفاده نمود. در واقع، گیرنده فقط نویز دریافت می‌نماید، یک تپش کاملاً رندمی. یک‌بار دیگر به اهمیت رندمی بودن محض پی‌می‌بریم. اما شما ممکن است بگویید که اگر ما اولین جسم را سیخونک نزنیم، دومی به لرزه درنخواهد آمد. بنابرین من می‌توانم به‌راحتی با تصمیم‌گرفتن در مورد این‌که اولی را سیخونک بزنم یا نه اطلاعاتی را بفرستم. اما مشکل اینجاست: چگونه شخص می‌فهمد که جسم دوم تکان‌خورده است؟ برای دانستن این موضوع، شخص مجبور است یک اندازه‌گیری انجام دهد، و این اندازه‌گیری باعث می‌شود آن تکان‌بخورد. به‌طور خلاصه، هرچند ممکن است این موضوع غیرمنطقی به‌نظر برسد، ولی این ایده که دو جسم درهم‌تنیده در واقع یک موجود را تشکیل می‌دهند را نمی‌توان با مباحث ساده و پیش‌پاافتاده رد نمود.

در تئوری، هر جسمی می‌تواند درهم‌تنیده شود، اما در عمل فیزیکدان‌ها پدیده درهم-تنیدگی را برای اتم‌ها، فوتون‌ها و برخی ذرات بنیادی نشان داده‌اند. بزرگترین اجسامی که درهم‌تنیده شده‌اند، بلورهایی مانند آنچه در جعبه‌های بازی بِل وجود داشت، می‌باشند. اجسامی که درهم‌تنیده شده‌اند هرچه باشند، پدیده درهم‌تنیدگی یکسان

است. ما این ویژگی تقریباً جادویی در دنیای کوانتوم را با استفاده از الکترون‌ها، ذرات ریزی که جریان الکتریکی را حمل می‌کنند، نشان خواهیم داد.

ناتعیّنی کوانتومی

با یک مثال آغاز می‌کنیم. یک الکترون ممکن است در حالتی باشد که مکان آن نامعین است. یعنی مانند یک ابر ممکن است موقعیت مشخصی نداشته باشد. طبیعتاً یک ابر دارای مکان متوسط می‌باشد (آن‌گونه که فیزیکدان‌ها می‌گویند، مکان مرکز جرم آن)، و همچنین الکترون دارای یک مکان میانگین می‌باشد. اما یک تفاوت بسیار مهم نسبت به ابر وجود دارد، یک الکترون از تعداد بسیار زیادی قطرات آب و یا هر نوع قطره دیگری تشکیل نشده است. الکترون غیرقابل تقسیم‌کردن می‌باشد. و با اینکه غیرقابل تقسیم است همچنان یک مکان نداشته و تنها ابری از مکان‌های ممکن دارد. اگر علیرغم این‌موضوع ما مکان آن‌را اندازه‌گیری نماییم، الکترون حسب‌الوظیفه پاسخ می‌دهد: "من اینجا هستم!". اما این پاسخ در زمان اندازه‌گیری و کاملاً تصادفی(شانسی) تولید شده است. الکترون دارای هیچ مکانی نبوده است اما در طول پروسه اندازه‌گیری، مجبور شده است به سوالی پاسخ دهد که هیچ جواب از قبل تعیین‌شده‌ای نداشته است: رندمی‌بودن کوانتومی واقعیت دارد، یک رندمی‌بودن غیرقابل تقلیل.

به‌طور رسمی این ناتعیّنی بوسیله چیزی به‌نام اصل برهم‌نهی بیان می‌گردد. اگر یک الکترون بتواند اینجا یا یک متر سمت راست اینجا باشد، بنابرین این الکترون همچنین می‌تواند در یک حالت برهم‌نهی از "اینجا" و "یک متر سمت راست اینجا" باشد، یعنی هم اینجا و هم یک متر به سمت راست اینجا. در این مثال، الکترون به‌طور همزمان در دو مکان قرار دارد. الکترون می‌تواند اتفاقاتی که اینجا، مثلاً در یکی از

شکاف‌های یانگ، می‌افتد را حس نماید و همچنین چیزهایی که یک‌متر آنطرف‌تر در سمت راست رخ می‌دهد، مثلاً در شکاف دیگر یانگ، را نیز درک نماید (نام توماس یانگ، ۱۸۲۹-۱۷۷۳، با آزمایش معروفی پیوند خورد که در آن یک ذره به‌طور همزمان از دو شکاف کنار یکدیگر عبور می‌کند). بنابرین الکترون در واقع به‌طور همزمان هم در اینجا و هم یک متر سمت راست اینجا قرار دارد. به‌هرحال، اگر ما مکان آن‌را اندازه‌گیری نماییم، به‌صورت کاملاً رندمی نتیجه‌ای که بدست می‌آوریم یا اینجاست یا یک متر سمت راست اینجا.

درهم‌تنیدگی کوانتومی

هم‌اکنون دیدیم که یک الکترون ممکن است یک مکان مشخص نداشته باشد. همچنین هر کدام از دو الکترون ممکن است مکانی نداشته باشند. اما با این حال در اثر درهم‌تنیدگی، فاصله و مسافت بین دو الکترون می‌تواند کاملاً مشخص باشد. یعنی هر گاه مکان این دوالکترون را اندازه‌گیری می‌نماییم، ما دو نتیجه بدست می‌آوریم، که هر کدام کاملاً رندمی می‌باشند اما به‌صورتی که تفاضل آن‌ها همیشه دقیقاً مقدار یکسانی باشد! این دو الکترون نسبت به مکان متوسط خود همواره نتایج یکسانی تولید می‌نمایند، حتی اگرچه این نتایج واقعاً رندمی هستند. بنابرین اگر مکان یکی از الکترون‌ها در اندازه‌گیری کمی به سمت راست مکان میانگین آن بدست آید، بنابرین مکان دیگری هم دقیقاً به همان اندازه الکترون اولی کمی به سمت راست اندازه‌گیری خواهد شد، یعنی دقیقاً در فاصله یکسانی از مرکز جرم آن. این قضیه حتی اگر دو الکترون بسیار از هم فاصله بگیرند نیز برقرار خواهد ماند.

بنابرین مکان یک الکترون نسبت به دیگری کاملاً معین می‌باشد حتی اگرچه مکان هر الکترون این‌گونه نیست. در حالت کلی، سیستم‌های کوانتومی درهم‌تنیده شده

می‌توانند در یک حالت کاملاً معین باشند حتی اگرچه هر سیستم بخودی خود در یک حالت نامعین قرار دارد. وقتی بر روی دو سیستم درهم‌تنیده شده اندازه‌گیری صورت‌گیرد، نتایج به‌صورت شانسی تعیین می‌گردند ولی با *شانسی یکسان*! شانس کوانتومی ناموضِع است.

همچنین درهم‌تنیدگی را می‌توان به‌صورت توانایی سیستم‌های کوانتومی برای تولید نتایج یکسان، وقتی ما کمیت یکسانی را روی هر یک از آن‌ها اندازه‌گیری می‌نماییم، تعریف نمود. این قضیه با به‌کاربردن اصل برهم‌نهی برای چندین سیستم به‌طور همزمان توصیف می‌شود. برای مثال دو الکترون می‌توانند "یکی در اینجا و دیگری در آنجا" و یا می‌توانند "اولی یک متر به سمت راست از اینجا و دومی یک متر به سمت راست از آنجا" باشند. بر اساس اصل برهم‌نهی این دو الکترون همچنین می-توانند در حالت برهم‌نهی "یکی اینجا و دیگری آنجا" و "اولی یک متر به سمت راست از اینجا و دومی یک متر به سمت راست از آنجا" قرار داشته باشد. این یک حالت درهم‌تنیده می‌باشد. اما درهم‌تنیدگی شامل چیزی بسیار فراتر از اصل برهم‌نهی است، زیرا این درهم‌تنیدگی است که همبستگی‌های ناموضِع را در فیزیک معرفی می‌نماید. برای مثال در حالت درهم‌تنیده فوق هیچ الکترونی مکان از قبل تعیین شده‌ای ندارد، اما اگر یک اندازه‌گیری از مکان اولین الکترون نتیجه "اینجا" را تولید نماید، مکان الکترون دیگر به‌طور آنی "آنجا" خواهد بود، حتی بدون این‌که مجبور شویم مکان الکترون دوم را اندازه‌گیری نماییم.

چگونه چنین چیزی ممکن است؟

چگونه دو الکترون می‌توانند یک مکان نسبی کاملاً معین داشته باشند بدون این‌که هر کدام مکان مشخصی داشته باشند؟ در دنیای اجسامی که ما هر روزه می‌بینیم،

این موضوع غیر ممکن است. بنابرین طبیعی است شک کنیم که فیزیک کوانتومی توصیف کاملی از مکان الکترون‌ها به ما نمی‌دهد و یک نظریه کامل‌تر خواهد توانست الکترون‌ها را بگونه‌ای که همیشه دارای مکان معین ولی پنهانی باشند، توصیف نماید. این همان بینشی است که مفهوم متغیرهای پنهان موضِعی بر پایه آن قرار دارد. این‌ها موضِعی هستند زیرا هر الکترون مستقل از سایر الکترون‌ها مکان خود را دارد.

با این وجود، این فرضیه مکان پنهان دارای مشکلات مربوط به خود می‌باشد. در واقع مکان یک الکترون تنها متغیر قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد. زیرا ما ممکن است سرعت آن را نیز اندازه بگیریم، که آن نیز قابل اندازه‌گیری می‌باشد. مسلماً یک الکترون دارای یک سرعت متوسط می‌باشد، اما سرعتی که در اندازه‌گیری بدست می‌آید، به‌صورت شانسی (تصادفی) از میان یک گستره کامل از سرعت‌های ممکن تولید می‌گردد، دقیقاً مانند مکانی که در اندازه‌گیری مکان تولید می‌شود. در اینجا نیز متذکر می‌شویم که درهم‌تنیدگی به دو الکترون اجازه می‌دهد که هر کدام سرعت نامشخص داشته باشند در حالی‌که هردو می‌توانند دقیقاً سرعت یکسانی داشته باشند و این قضیه حتی اگر الکترون‌ها در فاصله بسیار دوری از یکدیگر قرار بگیرند نیز برقرار خواهد ماند.

در واقع درهم‌تنیدگی یک گام فراتر می‌رود. دو الکترون هر کدام می‌توانند نَه دارای مکان و نَه دارای سرعت مشخصی بوده اما درهم‌تنیده باشند، بگونه‌ای که اختلاف بین مکان‌های آن‌ها و بین سرعت‌های آن‌ها کاملاً معین باشد. اگر مکان‌های پنهان وجود داشته‌باشند، بنابرین باید سرعت‌های پنهان نیز وجود داشته باشند. اما این با اصل عدم قطعیت هایزنبرگ که یک قسمت کلیدی در فرمالیزم کوانتوم به حساب می‌آید در تضاد است (کادر ۸ در صفحه ۵۶ را ببینید). وِرنِر هایزنبرگ و استاد او نیلز بوهر و دوستان آن‌ها، به شدت بر علیه فرضیه مکان‌ها و سرعت‌های پنهان، که به آن‌ها متغیرهای موضِعی پنهان گفته می‌شود، واکنش نشان دادند. در طرف دیگر اروین شرودینگر، لوییس دِبروی و آلبرت اینشتین، فرضیه متغیرهای پنهان را به‌عنوان

فرضیه‌ای منطقی‌تر از فرضیه درهم‌تنیدگی، که حاکی از ظهور شانس محض به‌طور همزمان در چند مکان متفاوت بود، قلمداد می‌کردند.

در آن زمان، یعنی از سال ۱۹۳۵ تا ۱۹۶۴ هیچ‌کس مانند بحثی که جان بِل ارائه داد و ما در فصل ۲ مورد بررسی قرار دادیم، چیزی پیدا نکرده بود. بنابرین هیچ آزمایش فیزیکی وجود نداشت که بتواند این منازعه را از طریق یک آزمون آزمایشی حل نماید و برای مثال به این پرسش پاسخ دهد که آیا ممکن است که در بازی بِل بیشتر از ۳ بار از ۴ بار برنده شد یا خیر؟ اگر متغیرهای موضعی پنهان وجود داشتند، سیستم‌های کوانتومی نمی‌توانستند در بازی بِل برنده شوند. متغیرهای پنهان موضعی (مانند ژن-های دوقلوها) نقش برنامه‌هایی را اجرا می‌کنند که به طریق موضعی، در مکان آلیس و باب، نتایج تولید شده توسط دو جعبه را تعیین می‌نمایند. اما ما دیدیم که اگر نتایج به‌صورت موضعی تعیین گردند، آلیس و باب نخواهند توانست در بازی بِل بیشتر از ۳ بار از ۴ بار برنده شوند. با این‌که آزمودن این مورد توسط آزمایش هنوز غیرممکن بود، موضوع خیلی سریع به یک منازعه احساسی تبدیل شد. شرودینگر نوشت که اگر این ایده درهم‌تنیدگی درست باشد، او از این‌که در آن مشارکت نموده است متاسف است! در مورد بوهر، برای اینکه بفهمیم چگونه او موضوع را شخصی نمود و از آن تا پایان دفاع نمود، تنها کافی‌است پاسخ او به مقاله سال ۱۹۳۵ اینشتین، پودُلسکی و روزِن (پارادکس EPR[۱]) را بخوانیم!

اینشتین از بزرگترین دانشمندان بعد از نیوتن است که یک نظریه موضِعی از گرانش ارائه کرده است. قبل از نظریه نسبیت عام در سال ۱۹۱۵، فیزیکدانان گرانش را به‌صورت ناموضِع توصیف می‌نمودند، به این معنی که اگر کسی یک سنگ را روی

[۱] Rae, A.: Quantum physics illusion or reality?, Cambridge University Press (1986); Ortoli, S., Pharabod, J.P.: Le Cantique des quantiques, La Decouverte (1985); Gilder, L.: The Age of Entanglement, Alfered a. Knopf (2008).

سطح ماه جابجا می‌نمود، وزن ما[1] بر روی زمین به‌صورت آنی و همزمان تحت تاثیر قرار می‌گرفت. بنابرین اصولاً شخص می‌تواند در سرتاسر جهان به‌صورت آنی ارتباط برقرار نماید. اما با نظریه اینشتین، گرانش مانند سایر پدیده‌های فیزیکی که تا سال ۱۹۱۵ شناخته شده بودند به پدیده‌ای تبدیل شد، که با سرعتی محدود از یک نقطه به نقطه بعدی از طریق فضا منتشر می‌شود. بنابرین بر طبق نظریه نسبیت اینشتین، اگر ما یک سنگ را بر روی ماه جابجا نماییم، زمین و بقیه جهان توسط امواج گرانشی که با سرعت نور منتشر می‌شوند از این موضوع مطلع می‌شوند. البته از آنجا که ماه حدود ۳۸۰،۰۰۰ کیلومتر با زمین فاصله دارد، تنها حدود یک ثانیه طول می‌کشد تا یک وزن زمینی تحت تاثیر جابجایی سنگ روی ماه قرار گیرد.

تنها ۱۰ سال پس از کشف قهرمانانه‌اش، اینشتین یعنی کسی که فیزیک را موضِعی نمود، یکبار دیگر خود را در مواجهه با ناموضِعیت یافت. حتی اگرچه ناموضِعیت کوانتومی از ناموضِعیت گرانش نیوتنی بسیار متفاوت بود، اما اینشتین نتوانست در برابر این موضوع که ساختار مفهومی او را تهدید می‌کرد بدون واکنش بایستد. بنابرین با توجه به شرایط، عکس‌العمل او به این موضوع کاملاً منطقی و قابل درک است: چرا باید به اصل عدم قطعیت هایزنبرگ بیشتر از تعیّن و موضِعیت اعتماد نمود؟

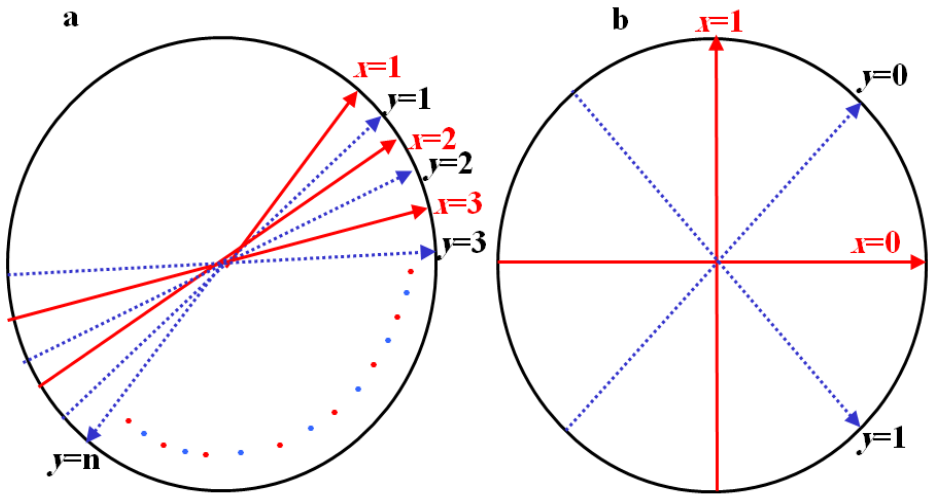
درهم‌تنیدگی چگونه می‌تواند به برنده شدن در بازی بِل کمک کند؟

کلمه "کوانتوم" که برای توصیف فیزیک جدید از سال ۱۹۲۰ به‌کار می‌رود، از این حقیقت بوجود آمد که انرژی‌های ممکن یک اتم کوانتیده (گسسته) می‌باشند، یعنی انرژی نمی‌تواند هر مقدار دلخواهی داشته باشد و می‌بایست از میان مجموعه‌ی مشخص و گسسته‌ای از انرژی‌ها انتخاب گردد. در واقع به غیر از انرژی، بسیاری کمیت‌های فیزیکی وجود دارند که تنها می‌توانند تعداد محدودی از مقادیر را اخذ

[1] وزن ما وقتی که با ترازوهای معمولی اندازه‌گیری می‌شود، تغییر می‌کند، اما جرم ما تغییر نمی‌کند. تنها نیروی جاذبه‌ای که زمین و ماه به ما اعمال می‌نمایند تغییر خواهد نمود. توجه کنید که آن سنگ می‌بایست توسط یک موشک جابجا شود تا بتواند به مقدار اندکی مرکز جرم ماه را تغییر دهد.

نمایند و بنابرین کوانتیده هستند. یک مورد ساده و رایج آن است که تنها دو مقدار ممکن وجود داشته باشد و این شرایطی است که در اصطلاحات فیزیکی یک بیت کوانتومی، یا کیوبیت، را به‌دست می‌دهد.

اندازه‌گیری‌های متفاوتی که می‌تواند بر روی یک کیوبیت انجام شود را می‌توان با یک "جهت" نمایش داد. در مورد قطبش فوتون، این جهت مستقیماً در ارتباط با جهت قطبش‌گر می‌باشد[۱]. بنابرین می‌توانیم این جهت‌های اندازه‌گیری را به‌عنوان زاویه‌هایی برروی یک دایره، مانند شکل ۵،۱a، نمایش دهیم.



شکل۵،۱ یک بیت کوانتومی یا کیوبیت می‌تواند در "جهت‌های" مختلفی اندازه‌گیری شود. اگر دو کیوبیت درهم‌تنیده باشند و ما آن‌ها را در جهت‌هایی که نزدیک یکدیگر هستند اندازه‌گیری نماییم، اغلب نتایج یکسان و درنتیجه به شدت همبسته خواهند بود. برای مثال در شکل a انتخاب‌های اندازه‌گیری x=1 و y=1 به نتایجی به شدت همبسته منجر می‌گردد، همچنین برای y=1 و x=2، x=2 و y=2 و همین‌طور تا آخر. با این‌حال انتخاب‌های x=1 و y=n نتایج متفاوتی را به‌دست می‌دهد. در بازی بِل، جعبه‌های آلیس و باب از جهت‌های اندازه‌گیری که در شکل b نشان داده شده‌اند، استفاده می‌نمایند.

[۱] قطبش توسط جهت میدان الکتریکی مربوط به هر فوتون تعیین می‌گردد. اگر فوتون کاملاً قطبیده باشد، این نوسانات به یک جهت دقیق در فضا محدود خواهد بود و این جهت، حالت قطبش فوتون را تعیین می‌نماید. این قضیه مربوط به جهت‌های ممکن اندازه‌گیری با یک ضریب ۲ در زاویه‌ها می‌باشد، ضریبی که داستان آن نیز ارزش بازگو کردن دارد.

هر موقع که ما یک کیوبیت را در یکی از این جهت‌ها، اندازه‌گیری می‌نماییم، یا نتیجه صفر را کسب می‌نماییم که مربوط به حالت "موازی" با این جهت است و یا نتیجه ۱ را به‌دست می‌آوریم که مربوط به حالت "ناموازی" با این جهت، یعنی به سمت جهت مخالف، می‌باشد. معکوس نمودن جهت اندازه‌گیری به‌سادگی باعث عوض شدن صفر و ۱ می‌شود، زیرا نتیجه صفر در یک جهت همانند نتیجه ۱ در جهت مخالف خواهد بود. توجه نمایید که برای هر کیوبیت، ما می‌توانیم جهت اندازه‌گیری را انتخاب نماییم. اما از آنجا که این اندازه‌گیری باعث آشفتگی و اختلال در حالت کیوبیت می‌شود، ما نمی‌توانیم همان کیوبیت را دوباره در جهت‌های دیگر اندازه‌گیری کنیم[۱]. البته، ما می‌توانیم تعداد زیادی کیوبیت که همگی به‌صورت یکسان آماده شده‌اند (به قول فیزیک‌دانان همگی آن‌ها دارای حالت یکسانی هستند) را تولید نماییم. بدین ترتیب می‌توانیم جهت‌های اندازه‌گیری متفاوتی برای کیوبیت‌های متفاوت انتخاب نماییم و در نتیجه برای هر حالت معین یک نتیجه آماری به‌دست‌آوریم.

احتمال این‌که یک کیوبیت نتیجه صفر را تولید نماید به حالتی بستگی دارد که کیوبیت در آن حالت آماده شده است. اما این حالت هرچیزی که باشد احتمال این‌که کیوبیت در دو جهت نزدیک به یکدیگر نتیجه صفر را تولید نماید، زیاد است. به عبارت دیگر، احتمال به‌دست آمدن یک نتیجه بر حسب تابعی از جهت اندازه‌گیری دارای پیوستگی می‌باشد.

اگر دو کیوبیت درهم‌تنیده[۲] و هر دو در یک جهت یکسان اندازه‌گیری شوند، ما همواره نتیجه یکسانی به‌دست‌خواهیم آورد، یا هر دو صفر خواهند بود یا هر دو ۱. چرا این‌گونه است؟ این دقیقاً جادوی درهم‌تنیدگی می‌باشد. همان‌طور که در مبحث *درهم‌تنیدگی کوانتومی* در صفحه ۶۳ بحث شد، هر کیوبیت با ابری از نتایج ممکن پیوندخورده

---

[۱] توضیح مترجم: زیرا دیگر این فوتون، همان فوتون قبل از اندازه‌گیری نیست و به‌خاطر عمل اندازه‌گیری و درنتیجه برهم‌کنشی که با آن داشته‌ایم، اکنون حالت آن تغییر کرده است.

[۲] بینهایت حالت درهم‌تنیده ممکن وجود دارد. در این‌جا حالتی مد نظر من است که برای فیزیک‌دان‌ها به‌صورت Φ^+ شناخته شده است و اندازه‌گیری‌ها نیز در صفحه XZ در نظر گرفته می‌شود.

است، اما تفاوت بین نتایج دو کیوبیت درهم‌تنیده صفر می‌باشد. بنابرین اگر آلیس و باب یک جفت کیوبیت درهم‌تنیده به‌صورت مشترک داشته باشند و اگر آلیس کیوبیت خود را در یک جهت A اندازه‌گیری نماید و باب کیوبیت خود را در یک جهت B که نزدیک به جهت A می‌باشد اندازه‌گیری نماید، احتمال اینکه دو نتیجه یکسان به‌دست آیند نزدیک به ۱ می‌باشد. مانند شکل ۵,۱a فرض نمایید که جهت باب کمی به سمت راست جهت آلیس باشد. اکنون تصور کنید که آلیس از یک جهت دوم $\tilde{A}$ استفاده نماید که همچنان به جهت باب نزدیک بوده اما این‌بار کمی به سمت راست جهت باب می‌باشد. یک‌بار دیگر این دو جهت به یکدیگر نزدیک می‌باشند بنابرین احتمال بدست آوردن نتایج یکسان برای هر دو دوباره نزدیک به ۱ می‌باشد.

به همین روش ما می‌توانیم از یک نقطه به نقطه بعدی روی دایره ادامه دهیم تا زمانی که آخرین جهت باب دقیقاً در جهت مخالف اولین جهت آلیس قرار گیرد. اما برای جهت‌های مخالف نتایج می‌بایست لزوماً مخالف یکدیگر باشند! این‌جاست که اساس بازی بِل را می‌توانیم دریابیم. نتایج تقریباً همیشه یکسان هستند مگر در حالتی که آن‌ها متفاوت باشند. در بازی بِل این حالت خاص که نتایج می‌بایست مخالف یکدیگر باشند به موردی مربوط است که آلیس و باب هردو دسته خود را به سمت راست جابجا نمایند. در سناریوی دو کیوبیت درهم‌تنیده شده، این حالت خاص مربوط به موردی است که آلیس از اولین جهت اندازه‌گیری خود و باب از آخرین جهت خود استفاده نمایند. بسته به تعداد جهت‌های اندازه‌گیری درنظر گرفته شده، نامعادله‌های بِل متفاوتی به‌دست می‌آید. در خصوص بازی بِل، آن‌گونه که در شکل ۵,۱b نشان داده شده‌است، آلیس و باب هرکدام از تنها دو جهت استفاده می‌نمایند و با این استراتژی آن‌ها نمره ۳,۴۱ را کسب می‌نمایند.

ناموضِعیت کوانتومی

بیایید یک ارزیابی کلی داشته باشیم. نظریه کوانتوم پیش‌بینی می‌کند که طبیعت می‌تواند بین دو رویداد دور از هم همبستگی ایجاد نماید که آن را نَه می‌توان با

تاثیرگذاری یک رویداد بر روی دیگری توضیح داد و نَه با یک علت موضِعی مشترک. برای شروع ما باید کمی دقیق‌تر باشیم. چیزی که ممنوع شده است تاثیری است که به‌صورت پیوسته از یک نقطه از فضا به نقطه دیگر با هر سرعتی بالاتر از سرعت نور منتشر گردد (در فصل ۹ و ۱۰خواهیم دید که این نتیجه می‌تواند به هر سرعت محدودی، حتی سرعت‌های بالاتر از سرعت نور، تعمیم داده شود به شرطی که آن سرعت‌ها نامحدود نباشند). به‌طور مشابه، عامل‌های مشترکی که به‌طور پیوسته از یک نقطه به نقطه دیگر از طریق فضا منتشر می‌گردند نیز مردود می‌باشد. این دو نوع توضیح بر مبنای متغیرهای موضِعی می‌باشند زیرا همه چیز به‌صورت موضِعی رخ می‌دهد و از یک نقطه به نقطه دیگر نمو پیدا می‌کند، و از اینجاست که اصطلاحات "توضیح موضِعی" یا "متغیرهای موضِعی" پدیدار می‌شوند[۱].

نکته قابل توجه اینجاست که وقتی ما هرگونه توضیحی به شکل یک تاثیر یا علت مشترک که به‌صورت پیوسته از نقطه‌ای به نقطه دیگر منتشر شود را رَد نمودیم، هیچ توضیح موضِعی دیگری ممکن نخواهد بود. این بدین معناست که هیچ توضیحی به صورت یک داستان که با گذشت زمان در فضا اتفاق افتد و توضیح دهد که چگونه این همبستگی معروف می‌تواند ایجاد شود، وجود ندارد. برای این‌که صریحاً بیان نماییم، به نظر می‌رسد این همبستگی‌های ناموضِعی بگونه‌ای از خارج فضا-زمان پدیدار شده است!

اما آیا ما در اینجا کمی زود نتیجه‌گیری نکردیم؟ و این همبستگی‌های ناموضِع چه هستند؟ بیایید با سوال دوم که ساده‌تر است شروع کنیم. از آنجا که این همبستگی‌ها

[۱] برخی ترجیح می‌دهند تا از متغیرهای موضعی پنهان صحبت کنند، اما چه آن‌ها پنهان باشند چه نباشند، چیزی را در اینجا تغییر نمی‌دهد.

هیچ توضیح موضِعی ندارند، ناموضِع خوانده می‌شوند. بنابرین ناموضِع، به‌سادگی به معنای "غیر موضِعی"، یا به‌صورت موشکافانه‌تر، غیر قابل توصیف بر اساس متغیرهای موضِعی می‌باشد. بنابرین کلمه توصیفی "ناموضِع" منفی می‌باشد: به ما نمی‌گوید که این همبستگی‌ها واقعاً چگونه می‌توانند باشند بلکه به ما می‌گوید که چگونه نمی‌توانند باشند. مانند این است که بگوییم رنگ یک جسم قرمز نیست. این به ما نمی‌گوید که آن جسم واقعاً چه رنگی است، فقط بیان می‌کند که قرمز نیست.

یک جنبه بسیار مهم منفی بودن توصیف "ناموضِع" این است که به هیچ وجه به این معنی نمی‌باشد که همبستگی‌های ناموضِع می‌توانند برای برقراری ارتباط مورد استفاده قرار گیرند، چه به‌طور آنی و چه باسرعتی بالاتر یا پایین‌تر از سرعت نور. به هیچ طریقی همبستگی‌های کوانتومی ناموضِع نمی‌توانند وسیله‌ای برای برقراری ارتباط فراهم نمایند. هیچ‌چیز قابل کنترلی در آزمایش‌های دارای همبستگی‌های ناموضِع وجود ندارد که سریع‌تر از نور حرکت نماید. هیچ انتقالی و درنتیجه هیچ ارتباطی وجود ندارد، اما نتایج مشاهده شده را نمی‌توان با مدل‌های موضِعی توضیح داد، یعنی نمی‌توان با داستان‌هایی که در فضا و زمان رخ می‌دهند آن‌ها را بررسی نمود.

این حقیقت که هیچ ارتباطی وجود ندارد از ناسازگاری و تضاد مستقیم فیزیک کوانتومی و نظریه نسبیت جلوگیری می‌نماید. برخی این را همزیستی مسالمت‌آمیز می‌نامند[۱]، یک روش شگفت‌آور برای صحبت کردن در مورد دو بنیاد فیزیک نوین. با این وجود این بنیادها بر پایه‌هایی استوارند که کاملاً با یکدیگر در تضادند. فیزیک کوانتوم ذاتاً رندمی است در حالی‌که نظریه نسبیت عمیقاً تعیّنی می‌باشد. فیزیک

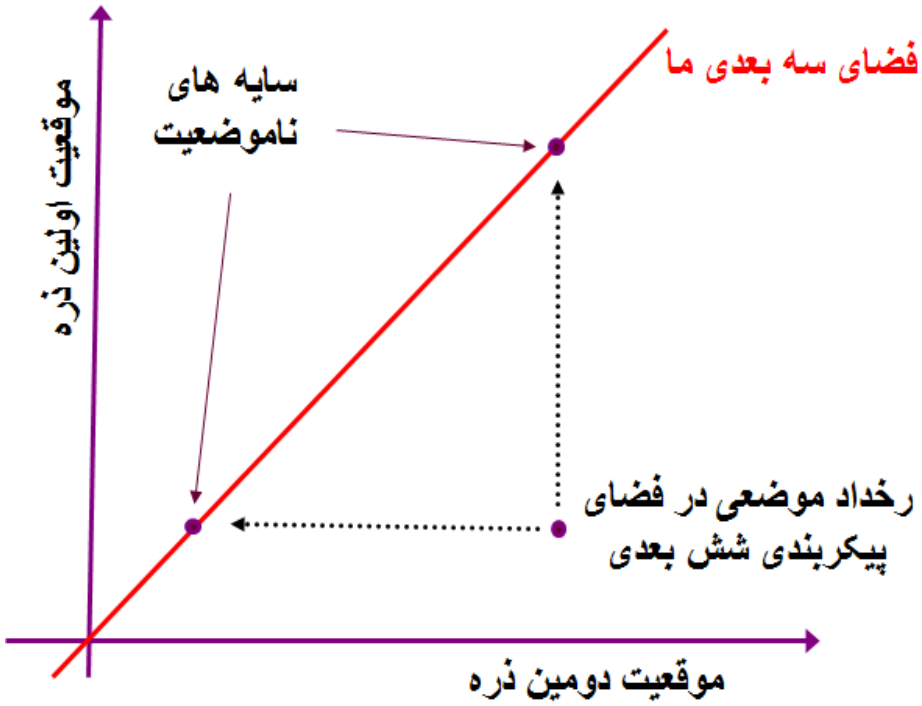
[۱] Shimony, A.: In foundations of quantum mechanics in the light of new technology, ed. By S. Kamefuchi et al., Physical Society of Japan, Tokyo (1983).

کوانتومی وجود همبستگی‌هایی را پیش‌بینی می‌نماید که توسط متغیرهای موضعی قابل توصیف نمی‌باشد، در حالی‌که همه چیز در نظریه نسبیت اساساً موضِعی می‌باشد.

منشاء همبستگی‌های کوانتومی

برای اینکه این فصل را به پایان برسانیم اجازه دهید بپرسیم چگونه فرمولبندی ریاضی فیزیک کوانتومی همبستگی‌های ناموضی را توصیف می‌نماید. از همه چیز گذشته، این فرمولبندی بسیار عالی کار می‌کند. پس آیا نمی‌تواند توضیح دهد که چگونه این همبستگی‌های ناموضِع بوجود آمده‌اند؟

طبق این فرمولبندی، این همبستگی‌های عجیب و غریب از درهم‌تنیدگی ناشی می‌شوند و درهم‌تنیدگی نیز به نوبه خود از طریق نوعی امواج که در فضایی بسیار بزرگتر از فضای ۳ بعدی ما منتشر می‌گردند، توصیف می‌گردد. تعداد ابعاد این فضا که در آن چنین امواجی منتشر می‌گردد، و فیزیکدان‌ها به آن فضای پیکربندی می‌گویند، به تعداد ذرات درهم‌تنیده شده بستگی دارد، در واقع ۳ برابر تعداد ذرات درهم‌تنیده می‌باشد. در فضای پیکربندی، هر نقطه مکان تمامی نقاط را نشان می‌دهد، حتی اگر آن‌ها بسیار از هم دور باشند. در این‌صورت، یک رخداد موضعی در فضای پیکربندی می‌تواند شامل ذرات کاملاً دور و جدا باشد. اما ما انسان‌های بسیط قادر به دیدن این فضای پیکربندی نیستیم و تنها سایه‌ای از چیزهایی که واقعاً در حال اتفاق افتادن هستند را می‌بینیم. هر ذره سایه‌ای در فضای ۳ بعدی ما می‌افکند، سایه‌ای متناظر با مکان خود در فضای ما. بنابرین سایه‌های یک نقطه می‌توانند در فضای ما بسیار از هم فاصله بگیرند، حتی اگر آن‌ها سایه‌هایی از یک تک نقطه معین در فضای پیکربندی باشند (شکل ۵,۲ را ببینید).



شکل ۵,۲ فیزیک کوانتومی از یک فضای با ابعاد بالا برای توصیف ذرات استفاده می‌نماید. این فضا برای دو ذره که تنها مجازند در امتداد یک خط مستقیم منتشر شوند دو بعدی می‌باشد، مانند یک برگه کاغذ. بنابرین هر نقطه روی شکل مکان دو ذره را نمایش می‌دهد. خط مورب فضای معمولی ما را نشان می‌دهد. بنابرین یک رخداد در فضای بزرگ دو سایه در فضای ما ایجاد می‌نماید و این سایه‌ها می‌توانند از یکدیگر بسیار دور باشند.

در واقع اگر بتوان این را توضیح نامید، توضیح عجیب و غریبی می‌باشد. بنابرین در یک معنای خاص، واقعیت چیزی است که در فضایی بجز فضای ما رخ می‌دهد و آنچه ما از آن درک می‌کنیم تنها سایه‌هایی از واقعیت هستند، چیزی شبیه به غار افلاطون که قرن‌ها پیش برای توضیح این‌که درک واقعیت چقدر دشوار است، به‌کار گرفته شده بود.

این "توضیح" برای منشا همبستگی‌های کوانتومی ناموضِع بیشتر ریاضی‌وار به نظر می‌رسد تا فیزیک‌گونه. درواقع سخت می‌توان باور نمود که واقعیت در فضایی رخ می‌دهد که ابعاد آن به تعداد ذرات بستگی دارد، مخصوصاً وقتی ما بخاطر می‌آوریم

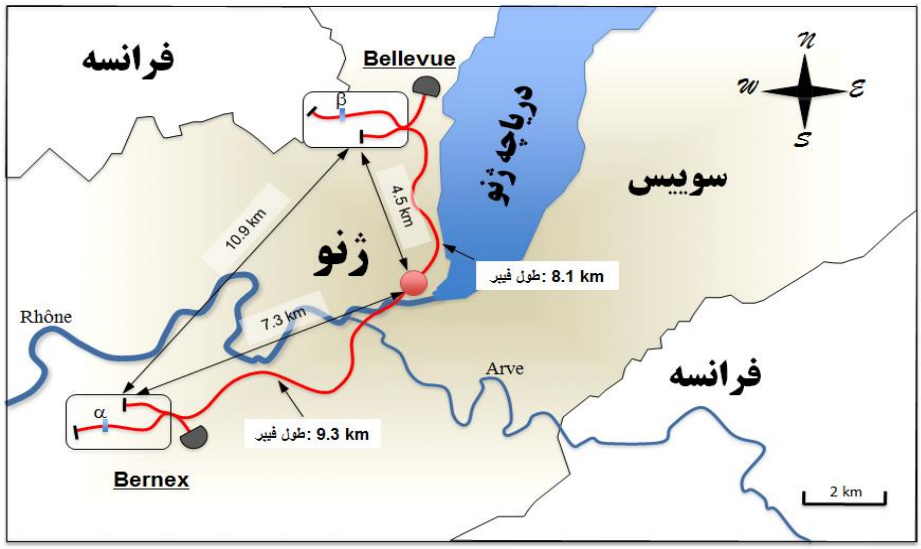
که این تعداد با زمان تغییر می‌نمایند. در نتیجه به‌طور خلاصه، فرمولبندی ریاضی فیزیک کوانتومی تنها بجز روشی برای انجام محاسبات، هیچ توضیحی را ارائه نمی-دهد. برخی فیزیکدان‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که هیچ توضیحی در این‌باره وجود ندارد و به ما این‌گونه توصیه می‌کنند که "ساکت شو و محاسبات رو انجام بده"!

فصل ۶: تجربه

در این فصل تمایل دارم شما را با آزمایش بِل، در واقع با آزمایشی که ما در سال ۱۹۹۷ در ژنو، یا به‌طور دقیق‌تر بین دهکده‌های بِرنکس و بلوو که حدود ۱۰ کیلومتر به‌طور مستقیم از هم فاصله دارند و با استفاده از شبکه فیبرنوری اپراتور مخابرات ملی سویس‌کام انجام دادیم، آشنا کنم. شکل ۶,۱ موقعیت این آزمایش، یعنی نخستین آزمایش بِل که در خارج از فضای آزمایشگاه صورت گرفته را نشان می دهد.

تولید جفت فوتون‌ها

بیایید از قلب آزمایش که فوتون‌های درهم‌تنیده تولید می‌گردند شروع نماییم. در یک بلور، اتم‌ها به روشی کاملاً منظم قرار گرفته‌اند (اما توجه نمایید که بلوری که به‌عنوان منبع درهم‌تنیدگی مورد استفاده قرار می‌گیرد ربطی به بلورهای موجود در جعبه‌های آلیس و باب ندارد). هر اتم با ابری از الکترون‌ها محاصره شده است. وقتی این اتم‌ها با تاباندن نور به آن‌ها برانگیخته می‌گردند، ابرهای الکترونی اطراف هسته اتمی به نوسان درمی‌آیند. اگر این نوسانات نامتقارن باشند، یعنی اگر ابر الکترونی اطراف هسته در یک جهت راحت‌تر از هسته دور شود تا در جهت دیگر، ما چیزی بنام بلور غیرخطی خواهیم داشت. علت این نامگذاری به شرح زیر می‌باشد: وقتی یک فوتون با یک اتم برهم‌کنش انجام می‌دهد، ابر الکترونی را برانگیخته نموده و آن را به نوسان درمی‌آورد.



شکل ۶,۱ آزمایش همبستگی ناموضِع بین روستاهای برنکس و بلوو که به‌طور مستقیم حدود ۱۰ کیلومتر از هم فاصله دارند. وقتی ما این آزمایش را انجام دادیم، نخستین بار بود که کسی بازی بِل را خارج از آزمایشگاه انجام داده بود. فیبر نوری که برای انتشار حالت‌های درهم‌تنیده مورد استفاده قرار گرفتند متعلق به شبکه مخابراتی تجاری سویس‌کام بود.

اگر ابر به‌صورت متقارن نوسان نماید، با گسیل یک فوتون دقیقاً مانند فوتون اولیه و در یک جهت کاملاً اختیاری، از حالت برانگیختگی خارج می‌گردد. به این پدیده فلورِسِنس گفته می‌شود. از طرف دیگر اگر ابر الکترونی به‌صورت نامتقارن نوسان نماید، ابر با گسیل یک فوتون با رنگ متفاوت از حالت برانگیختگی خارج می‌گردد.

اما رنگ فوتون نشان‌دهنده انرژی آن است و یکی از قوانین پایه فیزیک این است که انرژی پایسته است. بنابرین بحث فوق لزوماً کامل نمی‌باشد. به‌هرحال بلورهای غیرخطی وجود دارند، که وقتی نور مادون قرمز به آن‌ها تابیده می‌شود یک نور زیبای سبز رنگ تولید می‌نمایند. این همان مکانیزم فیزیکی در اشاره‌گرهای لیزری می‌باشد که طی چند سال اخیر در کنفرانس‌ها به طور روز افزونی مورد استفاده قرار می‌گیرند. توضیحی که در اینجا وجود دارد این است که ما به دو فوتون کم‌انرژی در قسمت مادون قرمز طیف امواج الکترومغناطیسی نیاز داریم تا یک فوتون با انرژی بالاتر، یعنی سبز رنگ، ایجاد شود. بنابرین شدت این نور سبز رنگ برابر مربع شدت نور مادون‌قرمز

خواهد بود[۱]، از این جهت نام "غیرخطی" به‌وجود می‌آید. بنابرین یک بلور غیرخطی می‌تواند رنگ یک پرتو نور را تغییر دهد. در مقیاس فوتونی، این پروسه لزوماً شامل چندین فوتون کم‌انرژی می‌باشد.

قوانین فیزیک برگشت‌پذیر می‌باشند. یعنی اگر یک پروسه اصلی بتواند در یک جهت انجام شود، روند معکوس نیز باید ممکن باشد. بنابرین باید ممکن باشد که یک فوتون سبز را به یک بلور غیرخطی فرستاده و دو موج مادون قرمز تولید نمود. بنابرین در اینجا فرآیندی داریم که می‌تواند جفت‌های فوتونی تولید نماید[۲].

ایجاد در هم تنیدگی

این موضوع که چرا این فوتون‌ها درهم‌تنیده شده‌اند باقی‌ماند. برای این‌که این موضوع را درک نماییم بخاطر آورید که ذرات کوانتومی مانند فوتون‌ها عموماً دارای کمیت‌های فیزیکی نامعین می‌باشند (مکان، سرعت، انرژی و غیره). برای مثال یک فوتون دارای مقداری انرژی می‌باشد اما این انرژی نامعین است. به‌طور متوسط می‌تواند این مقدار و یا آن مقدار را داشته باشد اما با یک نامعینی که ممکن است خیلی زیاد باشد. این عدم قطعیت در دانش ما از انرژی فوتون نمی‌باشد بلکه تعیّن‌ناپذیری *ذاتی* فوتون می‌باشد که خودش انرژی خودش را "نمی‌داند". به‌طور خلاصه، فوتون دارای یک

---

[۱] برای اینکه یک فوتون سبزرنگ تولید شود، دو فوتون مادون قرمز می‌بایست به‌صورت همزمان و تصادفی در یک نقطه از بلور پدیدار شوند. احتمال این رخداد با مربع شدت نور مادون‌قرمز تغییر می‌نماید.

[۲] بسته به این‌که چه بلور غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرد، این دو فوتون لزوماً نباید دارای متوسط رنگ یکسانی باشند. برای مثال یکی می‌تواند نور مادون‌قرمز کمرنگ باشد، یعنی دارای کمی نور قرمز باشد، درحالی‌که دیگری، نور مادون قرمز پررنگ و درنتیجه برای چشم‌های ما کاملاً نامرئی باشد. این تفاوت در رنگ و درنتیجه همچنین در انرژی فوتون‌ها می‌تواند کاملاً قابل توجه بوده و به‌طور خاص بزرگتر از عدم‌قطعیت موجود در انرژی هر یک از فوتون‌ها باشد، هرچند ما همچنان آن‌ها را مادون قرمز خواهیم نامید. با کمک این تفاوت، دو فوتون را می‌توان از یکدیگر جدا نمود و به‌عنوان مثال نور مادون قرمز کم‌رنگ را به آلیس و نور مادون قرمز پررنگ را به باب فرستاد. برای انجام این کار فوتون‌ها به فیبرهای نوری تزریق می‌گردند، به همان نوع فیبرهایی که هرروزه وقتی شما صفحات وب را جستجو می‌کنید، تلویزیون تماشا می‌کنید یا به دوستتان تلفن می‌زنید مورد استفاده قرار می‌گیرند. در آزمایش واقعی فوتون‌های مادون قرمز با ویژگی‌های فیبرهای نوری انطباق داده می‌شوند. وقتی از فوتون‌های مخابراتی صحبت می‌شود رنگ آن‌ها بگونه‌ای است که شفافیت فیبر نوری استفاده شده در مخابرات ماکسیمم می‌باشد.

انرژی دقیق نیست بلکه دارای طیف کاملی از انرژی‌های ممکن می‌باشد (دقیقاً مانند مکان یک الکترون که در فصل ۵ توضیح‌داده شد). اگر انرژی آن خیلی دقیق اندازه-گیری شود یک نتیجه رندمی از طیف انرژی‌های ممکن به‌دست می‌آوریم، نتیجه‌ای از نوع واقعاً رندمی که قبلاً مورد بحث قرار گرفت. در اینجا این موضوع می‌بایست درک شود، که برای داشتن شانس محض، از همان نوعی که دیدم برای برنده شدن در بازی بِل ضروری است، برخی کمیت‌های فیزیکی می‌بایست مقادیر دقیقاً معینی نداشته باشند. آن‌ها می‌بایست نامعین باشند و تنها زمانی که دقیقاً مورد اندازه‌گیری قرارمی‌گیرند مقدار معینی به خود بگیرند. ولی چه مقدار معینی؟ این همان رندمی بودن کوانتومی است.

دقیقاً مانند انرژی فوتون، عمر فوتون، یعنی زمان سپری شده از موقعی که توسط یک منبع نور گسیل شده است، همچنین می‌تواند نامعین باشد. در این مورد، مجموعه‌ای از عمرهای ممکن برای یک فوتون، بسته به این‌که چگونه گسیل شده باشد، می‌تواند از چندین میلیاردم یک ثانیه تا چندین ثانیه متغیر باشد. در مورد فوتون‌ها روابط مشهور عدم قطعیت هایزنبرگ (کادر ۸ در صفحه ۵۶ را ببینید) بیان می‌کنند که هر چقدر عمر فوتون دقیق‌تر اندازه‌گیری شود، عدم قطعیت در اندازه‌گیری انرژی آن بیشتر می‌گردد و برعکس، هرچه مقدار انرژی فوتون بهتر مشخص گردد، عدم قطعیت در عمر آن بیشتر می‌شود.

اما اجازه دهید به مبحث بلورهای غیرخطی خود و جفت فوتون‌هایی که تولید می-نمایند برگردیم. تصور نمایید یک بلور غیر خطی توسط یک فوتون سبز رنگ با انرژی خیلی دقیق برانگیخته شده است، یعنی عدم قطعیت موجود در انرژی فوتون بسیار کوچک می‌باشد. این فوتون به دو فوتون مادون قرمز تبدیل می‌شود به‌طوریکه انرژی هر کدام از آن‌ها نامعین بوده ولی مجموع انرژی‌های دو فوتون مادون قرمز دقیقاً برابر انرژی فوتون سبز اولیه می‌باشد. بنابرین ما دو فوتون مادون قرمز با انرژی‌های نامعین داریم که مجموع انرژی‌های آن‌ها به‌صورت خیلی دقیق معین می‌باشد.

بنابرین انرژی‌های دو فوتون با یکدیگر همبستگی دارند. اگر ما انرژی‌های آن‌ها را اندازه گیری نماییم و برای یکی از فوتون‌ها انرژیی بالاتر از حد متوسط بدست آید، انرژی فوتون دیگر لزوماً پایین‌تر از حد متوسط می‌باشد. در اینجا ما با یک خصوصیت شگفت‌آور از ناموضِعیت مواجه هستیم: انرژی یک فوتون که در ابتدا نامعین است می‌تواند در نتیجه اندازه‌گیری که روی فوتون دیگر انجام می‌شود تعیین گردد.

اما این هنوز همه آن چیزی نیست که به آن نیاز داریم. برای این‌که بازی بِل را انجام دهیم، ما باید قدرت انتخاب بین حداقل دو اندازه‌گیری متناظر با دو موقعیت دسته‌ها، را داشته باشیم. از آنجا که فوتون سبز اولیه انرژی خیلی دقیقی دارد، برای برآورده شدن اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، این فوتون می‌بایست متناظراً طول عمر نامعینی داشته باشد. بنابرین در مورد جفت فوتون های مادون قرمز چه می‌توان گفت؟ از آنجا که انرژی‌های آن‌ها نامعین است پس طول عمر آن‌ها می‌تواند نسبتاً دقیق تعیین گردد، در واقع خیلی دقیق‌تر از طول عمر فوتون سبز رنگ.

آیا یکی از فوتون‌های مادون‌قرمز می‌تواند از دیگری پیرتر باشد؟ جواب منفی است زیرا تنها در صورتی می‌تواند این اتفاق بیفتد که این فوتون توسط بلور، قبل از فوتون دیگر تولید شده باشد. اگر یکی از فوتون‌های مادون‌قرمز قبل از دیگری بوجود آید، در نتیجه یک بازه زمانی کوتاه وجود خواهد داشت که در طول آن قانون پایستگی انرژی برقرار نخواهد ماند، که غیر ممکن است. بنابرین دو فوتون مادون‌قرمز می‌بایست همزمان تولید شده باشند، در همان لحظه‌ای که فوتون سبز نابود می‌شود. در چه زمانی دو فوتون مادون‌قرمز خلق می‌گردند؟ پاسخ این است که لحظه خلق دو فوتون مادون‌قرمز نامعین است، دقیقاً مانند عمر فوتون سبز رنگ.

برای جمع‌بندی، دو فوتون مادون‌قرمز عمر یکسانی دارند، اما این عمر نامعین می‌باشد. اگر ما عمر یکی از فوتون‌ها را اندازه‌گیری نماییم، یک نتیجه کاملاً رندمی بدست‌می-آوریم. اما از این لحظه، عمر فوتون دیگر نیز معلوم می‌گردد. بنابرین اینجا دومین

همبستگی کوانتومی که ما برای بازی‌کردن و برنده شدن در بازی بِل نیاز داریم، پدیدار می‌شود[۱].

وقتی جفت فوتون‌ها به مقصدشان برسند، یکی به جعبه آلیس و دیگری به جعبه باب، آن‌ها به‌صورت ایده‌ال در حافظه ذخیره می‌گردند. این نوع حافظه، که به آن حافظه کوانتومی گفته می‌شود، هم‌اکنون در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی در حال توسعه می‌باشد. در حال حاضر آن‌ها زیاد کارآمد نیستند و تنها می‌توانند یک فوتون را برای قسمت کوچکی از یک ثانیه ذخیره نمایند. بنابرین از آلیس و باب خواسته می‌شود که کمی قبل از رسیدن فوتون تصمیم خود را بگیرند. در این‌صورت آن‌ها به محض رسیدن به جعبه‌ها فوراً اندازه‌گیری می‌شوند. بسته به موقعیت دسته‌ها، یکی از اندازه‌گیری‌های ممکن، یعنی انرژی یا عمر آن‌ها، مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد (طبق آنچه فیزیکدان‌ها می‌گویند انرژی یا زمان آن‌ها). در پایان هر جعبه نتیجه این اندازه‌گیری‌ها را نمایش می‌دهد. اما در اصل، برای انجام بازی بِل مانند آنچه در فصل ۲ گفته شد، فوتون‌های کافی در جعبه‌های آلیس و باب ذخیره خواهند شد (و به زودی تکنولوژی برای این دستیابی فراهم خواهد شد). بنابرین بلورهایی که در قلب دو جعبه وجود دارند حافظه‌های کوانتومی هستند که چندصد فوتون درهم‌تنیده شده را ذخیره نموده‌اند، مانند بلورهای حافظه کوانتومی که در حال حاضر ما در ژنو در حال توسعه آن‌ها می‌باشیم (و می‌بایست بازدهی و زمان ذخیره‌سازی آن‌ها را به تدریج بهبود ببخشیم).

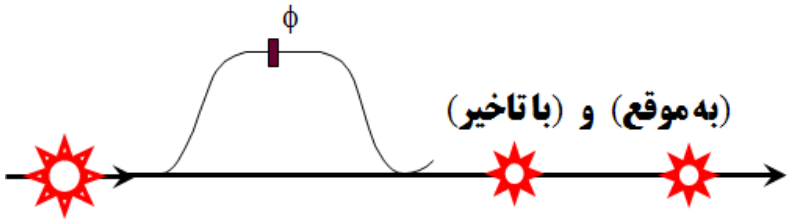
[۱] اگر ما روابط عدم قطعیت هایزنبرگ را بپذیریم و از این‌رو بپذیریم که اندازه‌گیری در فیزیک کوانتومی ذاتاً نتایج رندمی تولید می‌نماید، بنابرین ما به دو کمیت فیزیکی مانند انرژی و عمر فوتون‌ها نیاز نخواهیم داشت. تنها یک کمیت برای نشان دادن ناموضِعیت در فیزیک کوانتومی کافی خواهد بود. اما اگر دو کمیت نبود، هیچکس رندمی بودن محض را باور نمی‌نمود، زیرا برای مثال ممکن بود بگویند که انرژی هر فوتون کاملاً معین بوده و فقط ما مقدار آن را نمی‌دانسته‌ایم. تنها با توجه به بازی بِل، که در آن ضروری است آلیس و باب حداقل بین دو گزینه انتخاب انجام دهند، می‌توانیم خود را در مورد وجود شانس محض و اعتبار روابط عدم قطعیت هایزنبرگ متقاعد سازیم.

درهم‌تنیدگی بیت‌های کوانتومی

دیدیم چگونه می‌توان دو فوتون مادون‌قرمز را تولید نمود که در انرژی و طول عمر درهم‌تنیده باشند. اگر ما انرژی یا عمر این دو فوتون را اندازه‌گیری نماییم نتایج کاملاً همبسته‌ای را به‌دست‌خواهیم آورد. دسته‌های جعبه‌های آلیس و باب می‌توانند تعیین نمایند که جعبه انرژی فوتون‌ها را اندازه‌گیری نماید یا طول عمر آن‌ها را، اما این موضوع هنوز برای انجام بازی بِل کافی نمی‌باشد. علت این است که در این بازی جعبه‌ها می‌بایست نتایج باینری (دو دویی) تولید نمایند درحالی‌که اندازه‌گیری انرژی یا عمر نتایج عددی را بدست می‌آورند که می‌تواند یک گستره وسیع از مقادیر ممکن را داشته باشد (در اصل، تعداد بینهایت مقدار مختلف می‌تواند تولید شود). بنابرین ما باید به‌عبارتی درهم‌تنیدگی را گسسته نماییم.

بنابرین می‌توانیم با جایگزین نمودن لیزری که به‌طور پیوسته به بلور غیرخطی می‌تابد با لیزری که پالس‌های کوچکی از نور را می‌تاباند شروع نماییم. این پالس را توسط آینه نیمه شفاف، که فیزیکدان‌ها به آن شکافنده نور می‌گویند، به دو قسمت تقسیم نموده و در یکی از دو نیم پالس، تاخیری بوجود آورده و مانند شکل ۶,۲ دوباره آن‌ها را با یکدیگر ادغام می‌نماییم. بنابرین بلور توسط یک سری از دو نیم-پالس‌ها مورد تابش قرار می‌گیرد. بلوری که ما برای تولید زوج فوتون از آن استفاده می‌نماییم، همچنان غیر خطی می‌باشد. ولی این زوج فوتون‌ها چه زمانی تولید می‌شوند؟ هر فوتون سبز رنگ از نور لیزر به دو قسمت تقسیم شده، در نیمی از آن تاخیر ایجاد شده و نتیجه به بلور فرستاده می‌شود. بنابرین هر فوتون سبز رنگ می‌تواند در بلور غیر خطی در دو زمان متفاوت به دو فوتون مادون قرمز تبدیل شود. اگر ما یکی از فوتون‌های مادون قرمز را آشکارسازی نماییم، ممکن است آن را در دو زمان متفاوت پیدا کنیم، یا به‌موقع یا دارای تاخیر. و بنابرین فوتون مادون‌قرمز دیگر، لزوماً در همان زمان پیدا خواهد شد، یعنی عمر یکسانی خواهد داشت. بنابرین ما در اینجا یک نتیجه باینری (دودویی) برای اندازه‌گیری عمر فوتون بر روی فوتون‌های مادون‌قرمز خواهیم داشت. (مهم است بدانیم که این گونه نیست که فوتون سبز برخی مواقع به‌موقع و

برخی مواقع دارای تاخیر باشد، بلکه آن‌گونه که فیزیک‌دان‌ها می‌گویند در یک برهم-نهی این دو حالت قرار دارد، یعنی همیشه به‌موقع **و** دارای تاخیر می‌باشد. ابر طول عمرهای ممکن آن دارای دو قله (پیک) می‌باشد: یکی متناظر به‌موقع بودن و دیگری متناظر دارای تاخیر بودن. بدین ترتیب هر جفت فوتون مادون‌قرمزی که توسط یک فوتون سبز تولید می‌گردد نیز هم به‌موقع و هم تاخیردار می‌باشد، اما هر دو فوتون همیشه سن یکسانی دارند.)



کل ۶,۲. تصویری از یک بیت کوانتومی تایم-بین (کیوبیت)[۱]. در سمت چپ فوتون ورودی نمایش‌داده شده است. این فوتون ممکن است مسیر کوتاه (در قسمت پایین شکل) و یا مسیر طولانی‌تر (در بالای شکل) را دنبال کند. این دو مسیر در ادامه با هم یکی می‌شوند. بنابرین فوتون می‌تواند به‌موقع باشد، اگر مسیر کوتاه را انتخاب نماید، و یا دارای تاخیر باشد، اگر مسیر طولانی‌تر را برگزیند. بر طبق فیزیک کوانتومی فوتون در حقیقت می‌تواند هر دو مسیر کوتاه و بلند را انتخاب نماید، که در نتیجه هم به‌موقع خواهد بود و هم دارای تاخیر (و یا طبق اصطلاحات فیزیکی در یک برهم‌نهی خواهد بود).

دومین اندازه‌گیری که برای انجام دادن بازی بِل مورد نیاز است، یعنی اندازه‌گیری انرژی، به یک تداخل‌سنج نیاز دارد. نکته مهمی که باید درک نمود این است که همچنین شخص می‌تواند اندازه‌گیری انرژی را گسسته (کوانتیده) نموده و بنابرین بازی بِل را انجام داده و برنده شود[۲].

---

[۱] Time-bin quantum bit (qubit).

[۲] تداخل‌سنج برای تاخیر ایجاد نمودن در قسمتی از فوتون که به‌موقع است بکار می‌رود و سپس آن را با قسمتی از همان فوتون که دارای تاخیر است برخورد می‌دهد. بدین‌ترتیب دو قسمت فوتون مادون‌قرمزی که به باب می‌رسد در یک جفت‌کننده(کوپلر) فیبر نوری که معادل یک آینه نیم-شفاف است به‌هم می‌رسند. فوتون می‌تواند بین دو خروجی تداخل‌سنج که هر کدام مجهز به یک آشکارساز فوتونی می‌باشند یکی را انتخاب کند. بنابرین دوباره یک نتیجه باینری(دو دویی) داریم. هر کدام از دو تداخل‌سنج به یک مدولاتور یا تلفیق‌کننده فازی (phase modulator) مجهز می‌باشند. این قسمت در عمل جزئی می‌باشد که طول فیبر نوری را کمی بلند می‌کند تا در قسمت به‌موقع فوتون

آزمایش برنکس– بلوو

ما آزمایش فوق را در ژنو در سال ۱۹۹۷ انجام دادیم. این اولین باری بود که بازی بِل خارج از فضای آزمایشگاه فیزیک انجام شده بود. من پیش‌زمینه خوبی در مخابرات استاندارد و به‌ویژه در فیبرهای نوری داشتم و در معرفی آن‌ها در کشور سوئیس در ابتدای دهه ۱۹۸۰ همکاری داشتم. اولین مشکل فنی اصلی، آشکارسازی یک به یک فوتون‌هایی بود که طول موج‌های سازگار با فیبرهای نوری داشتند. در آن زمان چنین آشکارسازهایی وجود نداشتند. در اولین دور از آزمایش‌های خود، برخی دیودها را در نیتروژن مایع غوطه‌ور کردیم تا آن‌ها را در دمای پایینی نگه‌داریم. یک مشکل دیگر، دسترسی به شبکه فیبر نوری اپراتور مخابرات ملی سوئیس یعنی سوئیس‌کام بود که خوشبختانه به خاطر کار قبلی‌ام در مخابرات، روابط خوبی در آنجا داشتم.

بلوری که به‌عنوان منبع درهم‌تنیدگی مورد استفاده قرار گرفتند و تمامی تجهیزات همراه آن، به یک مرکز مخابراتی در نزدیکی ایستگاه راه‌آهن در کورناوین منتقل و نصب شدند. یک فیبر نوری مستقیماً از آنجا به روستای بلوو در شمال ژنو و یک فیبر

مادون‌قرمز تاخیر ایجاد نماید. این تغییر طول بسیار کوچک است، کوچکتر از طول موج فوتون‌ها، بنابرین این واقعیت که دو قسمت هر فوتون در آخرین تلفیق‌کننده هر تداخل‌سنج به‌طور همزمان همدیگر را ملاقات کنند، تغییر نخواهد کرد. برای انجام این‌کار به‌عنوان مثال می‌توان از یک عنصر پیزوالکتریک برای ایجاد کشش خیلی کم در فیبر نوری استفاده نمود. نکته مهم این است که هر دو فوتون باید همواره شانس یکسانی در آشکار شدن در هر یک از آشکارسازها داشته باشند. از طرف دیگر، احتمال این‌که هر دو فوتون مادون‌قرمز از یک جفت توسط آشکارساز بالایی آشکار شوند و در نتیجه a=0=b باشد، به روشی که ما مسیرهای نوری را در محل باب و در محل آلیس تغییر طول می‌دهیم بستگی دارد، یا به‌قول فیزیک‌دان‌ها به حاصل‌جمع فازها بستگی دارد. بنابرین همبستگی میان نتایج آلیس و باب به این تغییر طول‌های کوچک آلیس و باب بستگی دارد. به‌طور رسمی این نوع از درهم‌تنیدگی که کدگذاری اطلاعات بر روی یک کیوبیت نامیده می‌شود، معادل درهم‌تنیدگی قطبی می‌باشد (W. Tittel, G. Weihs: Quantum Information and Computation **1**, 3-56,2001). یکی از مزیت‌های آن این است که با فیبرهای نوری سازگاری کامل داشته و همچنین به‌راحتی می‌توان تعداد تایم-بین‌ها را افزایش داده و بنابرین مواردی با بیش از دو نتیجه ممکن را نیز کاوش نمود.

نوری دیگر به برنکس، روستایی در جنوب ژنو و به فاصله مستقیم بیش از ۱۰ کیلومتر از بلوو، کشیده شد. در هر روستا ما قادر بودیم تداخل‌سنج‌ها و آشکارسازهای فوتونی خود (به‌علاوه نیتروژن مایع!) را در مراکز کوچک مخابراتی نصب نماییم. طبیعی بود که به کلیدی برای دسترسی به این مراکز نیاز داشتیم. بعد از باز نمودن درب، تنها یک دقیقه اجازه ورود داده می‌شد تا با مرکز امنیتی تماس گرفته و پسورد را با استفاده از یک تلفن داخلی وارد کنیم. سپس می‌توانستیم به طبقه چهارم در زیرزمین، یعنی جایی که تمامی فیبرهای نوری سرتاسر منطقه به آنجا می‌رسند، برویم. از آنجا که استفاده از تلفن همراه در آنجا غیرممکن بود، خود می‌توانید به مشکلات آن بیندیشد! به هر ترتیب آزمایش شروع شد. ما با اطمینان انتظار داشتیم تا در بازی بِل برنده شویم، ولی سه مشکل برای ما را غافل‌گیر کرد. اول این که وقتی خورشید طلوع می‌کرد، فیبر نوری که به سمت جنوب می‌رفت به‌طور قابل توجهی از فیبر دیگر طولانی‌تر می‌شد. توضیح محتمل در این مورد این بود که این فیبر از روی یک پل عبور می‌کرد و از دیگری کم‌عمق‌تر دفن شده بود و درنتیجه تغییرات دمایی بیشتری را متحمل می‌شد. این موضوع یک مشکل بزرگ برای همزمان‌سازی به‌وجود آورد، اگرچه با چندین شب بی‌خوابی جوابی برای آن به‌دست آمد. دومین غافل‌گیری مورد خوش‌آیندی بود. خانم مری بِل، همسر مرحوم جان بِل، به ملاقات ما آمد تا ببیند اوضاع چگونه پیش می‌رود. سومین غافل‌گیری پس از انتشار مقاله رخ داد[۱]، زمانی که نتیجه کار ما مقاله اصلی نیویورک تایمز شد، از بی‌بی‌سی برای تهیه گزارش تصویری آنچه انجام داده‌ایم مراجعه کردند و همچنین این آزمایش از طرف انجمن علمی فیزیک آمریکا، نامزد یکی از برجسته‌ترین آزمایش‌های تجربی سال ۱۹۹۰ گردید.

[۱] Tittel, W. Brendel, J., Zbinden, H., Gisin, N.: Violation of Bell inequalities by photons more than 10 km apart, Phys. Rev. Lett. **81**, 3563 (1998).

فصل ۷: کاربردها

یک مفهوم فیزیکی صحیح باید نتایجی را در زندگی روزمره انسان داشته‌باشد. معادلات الکترودینامیک که توسط ماکسول در قرن نوزدهم کشف شدند، عامل اصلی پیشرفت‌های الکترونیک در قرن بیستم بوند. همچنین باید انتظار داشته باشیم فیزیک کوانتومی که در قرن بیستم کشف شد، پیشرفت‌های تکنولوژیکی قرن بیست‌ویکم را رقم بزند. تاکنون فیزیک کوانتوم برای ما لیزرها، که به‌عنوان مثال در پخش‌کننده‌های DVD استفاده می‌شود، و نیمه‌رساناها که در کامپیوترها بسیار مهم هستند را به ارمغان آورده است. اما این‌گونه کاربردهای اولیه تنها از خواص گروهی ذرات کوانتومی بهره‌می‌گیرند، یعنی گروه‌هایی از فوتون‌ها در لیزرها و گروه‌هایی از الکترون‌ها در نیمه‌رساناها. اما در مورد کاربردهای همبستگی‌های ناموضِع کوانتومی چه می‌توان گفت؟ این‌ها شامل جفت ذرات کوانتومی، یکی برای آلیس و یکی برای باب، می‌باشند. بنابرین این‌گونه ذرات می‌بایست به‌صورت فردی مورد بررسی قرار گیرند و این یک چالش بسیار بزرگ می‌باشد. اما فیزیک‌دان‌ها مانند افرادی نیستند که عقب بایستند و تماشا نمایند. در این فصل، به معرفی دو نمونه از کاربردها که قبلاً تجاری‌سازی شده‌اند پرداخته می‌شود، اما به احتمال زیاد، بسیاری از کاربردهای شگفت‌انگیز دیگر در آینده معرفی خواهند شد.

تولید اعداد تصادفی با استفاده از شانس محض کوانتومی

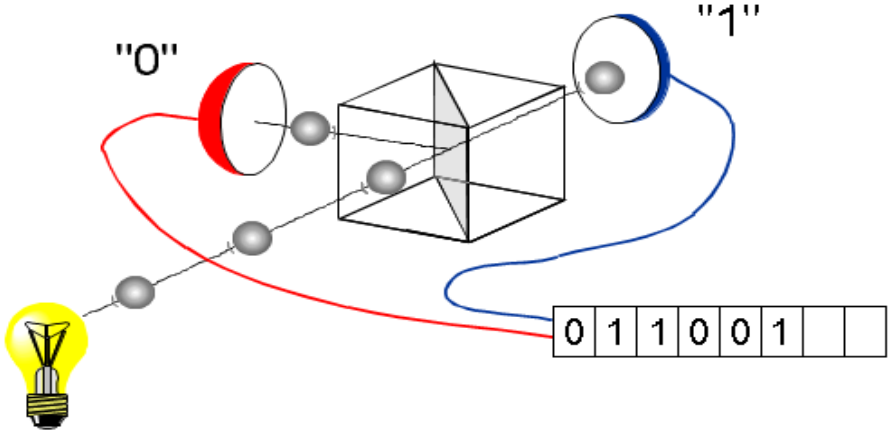
اولین کاربرد بسیار ساده است. دیدیم که همبستگی ناموضع تنها درصورتی امکان‌پذیر است که نتایج به‌دست آمده توسط آلیس کاملاً رندمی باشند. اما رندمی‌بودن چه کاری برای ما انجام می‌دهد؟ البته در دنیای اطلاعات چیزی مهم‌تر از این وجود ندارد. همگی ما دارای کارت‌های اعتباری و بیشمار پسورد هستیم. کارت اعتباری ما دارای یک رمز مخصوص است که باید محرمانه بماند، که به‌صورت رندمی انتخاب شده است. اما تولید اعداد رندمی زیاد آسان نیست. قبلاً در مورد اهمیت اعداد رندمی برای شبیه‌سازی‌های عددی بحث نمودیم. مثال دیگری که این‌روزها بسیار سریع در حال توسعه می‌باشد، شرط‌بندی اینترنتی آنلاین می‌باشد. یکبار دیگر باید اطمینان حاصل شود که وقتی یک کارت مجازی و یا عدد برنده بیرون کشیده می‌شود، واقعاً نتیجه یک انتخاب شانسی باشد. در غیر این‌صورت یا کازینوی الکترونیکی در حال تقلب نمودن است و یا این‌که اگر تنها از اعداد شبه رندمی استفاده می‌شود، این خطر وجود دارد که یک شخص باهوش توالی مربوطه را تشخیص داده و کازینو را دور بزند. بنابرین یکی از کاربردهای بسیار امیدبخش فیزیک کوانتومی توسعه دادن مولدهای اعداد رندمی می‌باشد که از رندمی بودن ذاتی کوانتومی، یعنی تنها رندمی‌بودن واقعی که برای فیزیکدان‌ها شناخته شده است، بهره می‌گیرند.

فیزیک کاربردی درصدد درک برخی جنبه‌های فیزیک می‌باشد به‌گونه‌ای که بتوان به یک پروتکل ساده همراه با شرایط مطلوب اقتصادی و ایده‌آل دست یافت. برنده شدن آلیس و باب در بازی بِل با استفاده از دو کامپیوتر، که با فاصله فضاگونه‌ای از یکدیگر جدا شده‌اند به‌طوری‌که نتوانند با سرعت نور اثری به یکدیگر داشته باشند، به قدری پیچیده است که به راحتی نمی‌توان کاربرد تجاری برای آن متصور شد. اگر فقط آلیس را در نظر بگیریم، می‌بینیم چیزی که او اساساً دارد یک جریان از فوتون‌ها

است که قبل از برخورد با دو آشکارساز فوتونی از یک آینه نیمه‌شفاف عبور می‌نمایند. این واقعیت که درهم‌تنیدگی وجود دارد و باب نیز به‌همین ترتیب عمل می‌کند تا در پایان در بازی بِل برنده شوند، کافی است تا اطمینان حاصل کنیم که نتایج آلیس در واقع ناشی از رندمی بودن محض می‌باشد. اما در آخر ما تنها به نتایج آلیس نیاز داریم. پس فقط کافی است که باب به‌صورت فرضی در بازی باشد. بنابرین در مورد کاربرد، ما می‌توانیم باب را فراموش نماییم و به محض انجام این کار، دیگر به درهم‌تنیدگی نیازی نیست. تنها کافی است بدانیم که اساساً فوتون آلیس می‌تواند درهم‌تنیده باشد اما در عمل هیچ نیازی نیست که واقعاً درهم‌تنیده باشد. در پایان آلیس می‌تواند به‌جای یک تک فوتون، از یک منبع لیزر بسیار ضعیف شده استفاده نماید، که در این‌صورت تقریباً هیچگاه بیشتر از یک فوتون وجود نخواهد داشت. این موضوع پایه و اساس بیشتر مولدهای اعداد رندمی کوانتومی (QRNG) می‌باشد که به‌صورت تجاری موجود می‌باشند.

شکل ۷,۱ مولد اعداد تصادفی کوانتومی (QRNG) ساخته و تجاری شده توسط شرکت ژنوی ID Quantique SA [۱] را نشان می‌دهد. ممکن است تصور شود که این دستگاه خیلی ساده است. پس چه بر سر همبستگی‌های ناموضِع در این دستگاه آمده‌است؟ این مولد مستقیماً از آن‌ها استفاده نمی‌نماید بلکه تنها *امکان* استفاده از نوع یکسانی از فوتون‌ها، شکاف‌دهنده پرتوها و آشکارسازهای فوتونی است که همبستگی‌های ناموضِع را تولید می‌نماید و اطمینان می‌دهد که نتایج واقعاً به‌صورت کاملاً شانسی به‌دست آمده‌اند.

[۱] WWW.idquantique.com



شکل ۷,۱ مولد تولید عدد رندمی. ایده آن در نمودار نشان داده شده است. یک فوتون از یک آینه نیمه‌شفاف عبور نموده تا به یکی از دو آشکارساز فوتونی برسد. هر آشکارساز با یک عدد باینری (دودویی) یا یک بیت متناظر شده است. در قسمت بالا اولین مولد تجاری را می‌بینید که 4 × 3 سانتی‌متر طول داشت و توسط شرکت ژنوی ID Quantique ساخته شد.

برخی ممکن است شک کنند و بپرسند که چگونه می‌توان مطمئن شد که ما نوع یکسانی از شکاف‌دهندهای پرتو و آشکارسازها را داریم؟ سوال خوبی است. برای این‌که این مولد اعداد رندمی را به اندازه کافی ساده‌سازی و تجاری نماییم، باید این فرض را

در پیش بگیریم که دستگاه‌ها قابل اطمینان می‌باشند. این یک فرض معمول بوده و به‌خوبی تست‌شده است. یک روش خیلی ظریف و زیبا برای فائق آمدن بر این مسئله وجود دارد، ولی ابتدا باید به موقعیتی شبیه به آنچه در بازی بِل بود برگردیم و از بیشتر ساده‌سازی‌هایی که در بالا ذکر شدند دست بکشیم. این کار به‌صورت عملی، اما تنها در محیط آزمایشگاهی، انجام شده است.[۱]

رمزنگاری کوانتومی: یک ایده

دومین کاربرد، رمزنگاری کوانتومی می‌باشد. ما دیدیم که اگر دو جسم با یکدیگر درهم‌تنیده باشند، اگر ما اندازه‌گیری‌های یکسانی بر روی هر کدام از آن‌ها انجام دهیم همواره نتایج یکسانی تولید می‌نمایند. در دید اول این موضوع به‌صورت خاص مفید به نظر نمی‌رسد، به‌ویژه از آنجا که این نتایج یکسان کاملاً به‌صورت شانسی تولید شده‌اند. اما از دید یک رمزنگار، تمامی این‌ها بسیار جالب به نظر می‌رسد. در واقع جامعه اطلاعاتی ما حجم بسیار زیادی از اطلاعات را به اطراف انتقال می‌دهد که قسمت زیادی از آن می‌بایست محرمانه بماند. برای این‌منظور اطلاعات قبل از این‌که به گیرنده ارسال گردد کدگذاری می‌گردد. این بدین معنی است که برای هر شخص سومی این اطلاعات کدگذاری شده فقط به‌صورت یک رشته طولانی از نویزها بدون هیچ‌گونه ساختار یا معنی می‌باشد. اما در طولانی مدت، لازم است که این کدگذاری را در فاصله‌های زمانی منظمی تغییر دهیم، به‌طور ایده‌آل برای هر پیام جدید. این موضوع این سوال را ایجاد می‌کند که چگونه کلیدهای کدگذاری را تبادل نماییم. این کلیدها می‌بایست برای هر دوی فرستنده و گیرنده معلوم باشد ولی برای هیچ‌کس

[۱] Pironio, S., et al.: Random numbers certified by Bell's theorem, Nature 464, 1021-1024 (2010); B.G. Christensen., et al.: Detection-loophole-free test of quantum nonlocality, and applications, Phys. Rev. let. **111**, 130406 (2013)

دیگری مشخص نباشد. ما ممکن است ناوگان‌هایی از تاکسی‌های زره‌پوش را تصور نماییم که سرتاسر دنیا برای توزیع این کلیدها به کاربرانشان در حال حرکت می‌باشند، اما مطمئناً راه ساده‌تری وجود دارد.

امروزه برخی دولت‌ها و شرکت‌های بزرگ جهت برقراری ارتباط بسیار محرمانه بین شرکای خود، در واقع افرادی را به‌طور فیزیکی به‌همراه یک کیف که به مچ دست آن‌ها متصل بوده برای توزیع کلیدهای کدگذاری می‌فرستند. ولی افراد عادی مثل ما از سیستم‌های عملی‌تر، مانند خرید اینترنتی، که در آن‌ها امنیت بر مبنای نظریه‌های پیچیده ریاضیاتی استوار است، کاملاً راضی هستند. در این مورد از چیزی به‌نام رمزنگاری کلید عمومی استفاده می‌شود. ایده این‌گونه است که برخی عملیات‌های ریاضی مانند ضرب نمودن دو عدد اول در یکدیگر برای یک کامپیوتر آسان است اما برگرداندن آن بسیار دشوار می‌باشد. در این مورد می‌بایست از روی مقدار حاصلضرب، دو عدد اول پیدا شوند که به‌صورت بالقوه حتی برای یک کامپیوتر قوی کاری طولانی می‌باشد. اما در اینجا جزئیات اهمیتی ندارند. آنچه در اینجا مهم است، دانستن مفهوم مشکل است. در دوران مدرسه، یک مسئله زمانی سخت محسوب می‌شد که حتی بهترین شاگرد کلاس هم نتواند آن را حل نماید. در رمزنگاری عمومی نیز دقیقاً هم‌این‌گونه است، با این تفاوت که به‌جای هم‌کلاسی‌ها، بهترین ریاضی‌دان‌های سرتاسر دنیا را در یک مکان راحت و مناسب گردهم آورده و یک جایزه سخاوت‌مندانه برای کسی که موفق شود این مسئله را حل نماید، در نظر گرفته می‌شود. اگر هیچ‌کدام از آن‌ها پاسخ را نیابند، این بدین معنی است که مسئله واقعاً مشکل بوده است. اما با این وجود، مشکل به معنای غیر ممکن نمی‌باشد. تاریخ ریاضیات مملو از مسائلی است که بهترین ریاضی‌دان‌ها را برای سالیان سال و حتی قرن‌ها قبل از این‌که مغز متفکری راه‌حل را بیابد، متوقف نموده‌اند.

ریاضیات این‌گونه است، به محض این‌که یک راه‌حل را بیابیم بهره‌برداری و بازتولید آن به هیچ وجه دشوار نمی‌باشد. بنابرین اگر روزی افرادی باهوش برای پیدا کردن دو عدد اولی که در پشت حاصل‌ضربشان پنهان شده‌اند، روشی سریع را بیابند، تمامی پول‌های الکترونیکی در جوامع سریعاً ارزش خود را از دست خواهند داد. دیگر هیچ کارت اعتباری، هیچ تجارت آنلاین و هیچ وام بین‌بانکی وجود نخواهد داشت. این یک فاجعه بزرگ خواهد بود. علاوه بر این اگر سازمانی ارتباطات رمزنگاری شده توسط کلید عمومی را ضبط کرده باشد، متعاقباً می‌تواند آن‌ها را کشف رمز نموده و پیام‌های محرمانه‌ای که سال‌ها و یا دهه‌ها قبل فرستاده شده‌است را بخواند. بنابرین اگر واقعاً می‌خواهید که اطلاعات شما در دهه‌هایی که می‌آیند محرمانه باقی‌بمانند، بهتر است که رمزنگاری عمومی را کنار بگذارید.

از این‌رو می‌توان به اهمیت تولید نتایج کاملاً شانسی ولی همیشه یکسان برای آلیس و باب، پی‌برد. اگر آلیس و باب با یکدیگر درهم‌تنیدگی داشته باشند، آن‌ها می‌توانند در هر لحظه رشته‌ای از نتایج را تولید نمایند که بتوانند فوراً از آن‌ها به‌عنوان کلید رمزگذاری استفاده نمایند. و با تشکر از نظریه شبیه‌سازی ممنوع، آن‌ها می‌توانند اطمینان حاصل نمایند که هیچ شخص دیگری هرگز به یک کپی از کلید آن‌ها دست پیدا نخواهد کرد. این موضوع، حداقل بر روی کاغذ، به همین سادگی می‌باشد.

رمزنگاری کوانتومی در عمل

چگونه می‌توانیم ساختار بازی بِل را برای یک کاربرد عملی جهت ایده فوق ساده‌سازی نماییم؟ در اینجا هم درک اصول فیزیکی حاکم برای پیاده‌سازی یک‌رمزنگاری کوانتومی ساده، اما نَه بیش از حد ساده، از اهمیت زیادی برخوردار است.

اولین ساده‌سازی: در هر بازی بِل سه قسمت وجود دارد. آلیس، باب و بلوری که فوتون‌های درهم‌تنیده را تولید می‌نماید. به علت تقارن بلورها معمولاً در وسط قرار می‌گیرد. اما این کار خیلی راحتی نیست، بنابرین اجازه دهید که بلورها را نزد آلیس نگه‌داریم. دراین‌صورت ما تنها دو جزء خواهیم داشت، اما ما دیگر مانعی که توسط نسبیت برای ارتباط بین آلیس و باب تحمیل می‌شود را نداریم. به‌هرحال در رمزنگاری باید از قبل اطمینان حاصل نمود که هیچ اطلاعاتی بر خلاف میل ما نشت پیدا نمی‌کند، زیرا در این‌صورت رخنه‌ای در محرمانه‌بودن به‌وجود خواهد آمد.

دومین ساده‌سازی: اکنون که منبع جفت فوتون‌های درهم‌تنیده نزد آلیس می‌باشد، او کیوبیتی که با فوتون‌اش حمل می‌شود را خیلی قبل از باب اندازه‌گیری می‌نماید. در واقع آلیس آن را حتی قبل از این‌که فوتون دیگر او را ترک کند و به سمت باب برود، اندازه‌گیری می‌نماید. بنابرین به‌جای استفاده از منبع جفت فوتونی و اندازه‌گیری فوری یکی از آن‌ها (و بنابرین نابود نمودن آن)، آلیس می‌تواند به راحتی از منبعی استفاده کند که فوتون‌ها را یکی‌یکی تولید می‌نماید.

سومین ساده‌سازی: یک منبع که فوتون‌ها را یکی‌یکی تولید نماید، همچنان دارای پیچیدگی‌های زیادی می‌باشد. پس حتی ساده‌تر است از منبعی استفاده نماییم که پالس‌های بسیار ضعیف لیزری تولید می‌نماید، چنان ضعیف که هر پالس تنها شامل چندین فوتون باشد و این مسلماً یک منبع ارزان، آزمایش شده و قابل اعتماد است. تنها مشکلی که باقی می‌ماند این است که تصمیم بگیریم با پالس‌های چندفوتونی چه‌کار کنیم، که البته موضوع نادری است. در عمل ما تنها به تخمین دقیقی از فرکانس این پالس‌های چندفوتونی نیاز داریم. سپس این فرضیه محافظه‌کارانه را می‌پذیریم که جاسوسان همه چیز را در مورد این پالس‌های چندفوتونی می‌دانند. بعد

از رد و بدل نمودن تعداد زیادی پالس، به‌طور معمول میلیون‌ها پالس، آلیس و باب می‌توانند تخمین بزنند که در بدترین حالت دشمنان آن‌ها چقدر درباره نتایج آن‌ها می‌دانند. بنابرین آن‌ها می‌توانند از یک الگوریتم استاندارد تقویت حریم‌خصوصی استفاده نمایند[۱]. با این روش می‌توان از یک کلید طولانی، کلید کوتاه‌تری را با این ضمانت که دشمن حداکثر اطلاعات بسیار کمتری را بدست آورد، استخراج نماییم. اگرچه کلید جدید کوتاه‌تر است ولی می‌توان مطمئن شد که کاملاً ایمن است[۲].

پس از انجام تمامی این کارها و با همه این تفاسیر، تنها دو جعبه وجود دارند. یکی از جعبه‌ها پرتوهای لیزری با شدت بسیار پایین که حامل اطلاعات کوانتومی کدگذاری شده بر روی قطبش یا کدگذاری شده بر روی زمان می‌باشند را می‌فرستد، همان‌گونه که در فصل ۶ مورد بحث قرار گرفت، درحالی‌که جعبه دوم قطبش و یا سن این فوتون‌ها را اندازه‌گیری می‌نماید. البته در عمل روش‌های فنی دیگری هم وجود دارد، اما اگر شما تا اینجا توانسته باشید مباحث را دنبال نمایید، بخش زیادی از فیزیک کاربردی را فرا گرفته‌اید[۳].

---

[۱] این الگوریتم به‌صورت شهودی به‌صورت زیر کار می‌کند. دو بیت b_1 و b_2 و یک دشمن که با احتمال $\frac{3}{4}$ می‌تواند این بیت‌ها را به‌درستی حدس بزند را تصور نمایید. این دو بیت را با مجموع آن‌ها $b: b_1 + b_2$ جایگزین نمایید (در مبنای ۲ هستند، بنابرین مجموع آن‌ها نیز یک بیت است). تنها درصورتی دشمن b را درست حدس می‌زند که یا هر دو بیت را به‌درستی حدس بزند یا هر دو را اشتباهی حدس بزند. یعنی او b را با احتمال

$$\left(\frac{3}{4}\right)^2 + \left(\frac{1}{4}\right)^2 = \frac{5}{8}$$

درست حدس می‌زند، که کمتر از $\frac{3}{4}$ می‌باشد. بنابرین در این‌صورت آلیس و باب محرمانگی کلید خود را به قیمت از دست دادن نیمی از آن افزایش داده‌اند. الگوریتم‌های پیچیده‌تر می‌توانند با از دست دادن مقدار بسیار کمتری از کلیدهای اولیه، اثر بهتری داشته باشند.

[۲] ناامنیتی اولیه نباید خیلی بزرگ باشد. بدین منظور پالس‌هایی که آلیس به سمت باب می‌فرستد باید به میزان کافی ضعیف باشند تا فرکانس پالس‌های چندفوتونی را محدود سازند.

[۳] برای دیدن جزئیات بیشتر به مقالات زیر مراجعه نمایید:

امروزه برخی سازمان‌ها در ژنو با سیستم‌های پشتیبانی اطلاعات خود، ۷۰ کیلومتر آنطرف‌تر در نزدیکی لوزان، از فیبرهای نوری که از زیر دریاچه ژنو عبور می‌کنند استفاده می‌کنند تا از سیستم‌های رمزنگاری که توسط شرکت ژنوی IDQ، یکی از زیرمجموعه‌های دانشگاه ژنو، تجاری شده است، بهره‌گیری نمایند.

از نظر تاریخی، جالب است بدانیم که نمونه ساده شده بالا خیلی قبل از موردی که بر مبنای ناموضِعیت می‌باشد اختراع شده است. این‌جا یکی از موارد خلاف قاعده تاریخ، که کاملاً بشری است، نمود پیدا کرده است که همیشه مسیر منطقی را دنبال نمی‌نماید. یکی دیگر از این‌گونه داستان‌های کاملاً بشری این بود که وقتی بِنِت و براسارد[۱] رمزنگاری کوانتومی را به‌صورت نمونه ساده‌شده آن ابداع نمودند، هیچ مجله فیزیکی حاضر به چاپ آن نشد. خیلی جدیده! خیلی متفاوته! و بنابرین برای آن‌دسته از فیزیک‌دان‌هایی که جهت ارزیابی چاپ مقالات آن‌ها دعوت شده‌بودند، قابل‌درک نبود. درنهایت بِنِت و برآسارد نتایج خود را در جریان یک کنفرانس محاسباتی در هند ارائه نمودند. لازم به گفتن نیست، این مقاله که در سال ۱۹۸۴ چاپ شد تا زمان کشف‌مجدد و مستقل رمزنگاری کوانتومی توسط آرتور اِکرت در سال ۱۹۹۱، کشفی که این‌بار بر اساس ناموضِعیت بود و در یکی از مجلات معتبر فیزیک چاپ شد، کاملاً بدون توجه باقی ماند.

N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, H. Zbinden: Quantum cryptography, Rev. Mod. Phys. **74**, 145-195 (2002); V. Scarani, H. Bechmann-Pasquinucci, N. Cerf, M. Dusek, N. Lukenhaus, M. Peev: The security of practical quantum key distribution, Rev, Mod. Phys. **81**, 1301 (2009)

[۱] Bennett and Brassard

فصل ۸: تِلِپورتِیشن[۱] کوانتومی

چه چیزی می‌تواند از تلپورتیشن کوانتومی هیجان انگیزتر باشد؟ یک جسم در اینجا ناپدید شده و در آنجا پدیدار می‌شود بدون این‌که از نقاط میانی عبور کند! برخی مواقع تکنولوژی‌های ارتباطی به این موضوع می‌پردازند. یک ایمیل کامپیوتر من را ترک کرده و چند ثانیه بعد بر روی صفحه کامپیوتر یک دوست که در آن‌سوی جهان قرار دارد ظاهر می‌گردد. اما در مورد یک ایمیل ما خیلی خوب می‌دانیم که ایمیل من توسط یک شبکه کامل از سیگنال‌های Wi-Fi، الکترون‌ها در کابل‌های مسی و فوتون‌ها در فیبرهای نوری به‌صورت پیوسته از یک نقطه به نقطه دیگر از طریق فضا منتقل شده تا به مقصد خود برسد. تلپورتیشن کاملاً متفاوت است، زیرا جسم مستقیماً از اینجا به آنجا "می‌پرد" بدون این‌که چیزی از نقاط میانی عبور نماید. مگر این‌که نوعی ناموضِعیت کوانتومی، یعنی یک ارتباط غیرطبیعی و زیرکانه بین مکان‌های دور از هم، وجود داشته باشد، وگرنه این موضوع چیزی شبیه شعبده و یا داستان‌های علمی- تخیلی به‌نظر می‌رسد.

در سرتاسر این کتاب دیده‌ایم که از ناموضِعیت نمی‌توان برای برقراری ارتباط استفاده نمود. اما نسخه علمی- تخیلی تلپورتیشن، برقراری ارتباط را با هر سرعت دلخواهی

---

[۱] کلمه Teleportation در فارسی به‌صورت دورفرست، دورنوردی یا طی‌الارض ترجمه می‌شود و به معنای انتقال آنی ماده یا انرژی از یک نقطه به نقطه دیگر فضا بدون طی کردن مسافت بین آن‌دو نقطه می‌باشد.

مجاز می‌داند. علاوه بر این هر جسمی لزوماً از ماده ساخته شده است (یا اگر فوتون باشد از انرژی تشکیل شده است) و ماده نمی‌تواند بدون عبور از نقاط میانی از یک مکان به مکان دیگر انتقال یابد. بنابرین نوع علمی- تخیلی تلپورتیشن غیرممکن می‌باشد. با این حال در سال ۱۹۹۳ گروهی از فیزیکدان‌ها که در یک جلسه فکری و ایده‌پردازی سرگرم بودند به بررسی ایده ناموضِعیت پرداختند و چیزی را اختراع نمودند که ما امروزه تلپورتیشن کوانتومی می‌نامیم[۱]. در چاپ این مقاله نام شش مولف ذکر شد و بنابرین هیچ‌کس به تنهایی تلپورتیشن کوانتومی را ابداع ننموده است. در واقع این موضوع حاصل یک پینگ-پونگ فکری میان گروهی از افراد بود که با تصویر معمول از دانشمندان با استعداد و منزوی کاملاً متفاوت می‌باشد[۲].

ماده و شکل

پس موضوع تلپورتیشن چگونه مطرح و عملی شد؟ برای شروع باید از خود بپرسیم که منظور از یک جسم چیست. ارسطو دو جزء لازم را برای یک جسم در نظر می‌گیرد:

[۱] در اینجا داستان کوتاهی را ذکر می‌کنم تا شرایطی که از زمان آغاز دومین انقلاب کوانتومی در سال ۱۹۹۰ وجود داشت روشن گردد. در سال ۱۹۸۳، زمانی که من یک دانشجوی پست‌دکترای جوان در ایالات متحده بودم، یک استاد سرشناس نزد من آمد و با لبخندی عریض بر چهره گفت که جان من را نجات داده است. او پذیرفته بود که داور یکی از اولین مقالات علمی من باشد، که در آن مقاله با نوشتن این مطلب که در فیزیک کوانتومی، ممکن به نظر می‌رسد که "یک سیستم در اینجا ناپدید شده و در جای دیگری مجدداً ظاهر شود"مرتکب یک کفر نابخشودنی شده بودم. امروزه این موضوع یادآور تلپورتیشن می‌باشد، اما در حقیقت من اصلاً به آن فکر نکرده بودم. این فقط یک بینش ذهنی من بود. "ناجی" من مقاله من را تنها به شرطی برای چاپ پذیرفته بود که جمله کفرآمیز ذکر شده در بالا حذف گردد. این ادعای من در آن زمان تقبیح جهانی را برای من به ارمغان می‌آورد! ممکن است تعجب نمایید که چه فرصت‌های زیادی به‌خاطر اصرار مدام پروفسورهای سرشناس بر این موضوع که بوهر همه چیز را طبقه‌بندی نموده، از بین رفته است. چه تعداد ذهن‌های جوان بااستعداد ممکن است فیزیک را بخاطر این موضوع ترک کرده باشند؟ و چه تعداد از پروفسورهای بزرگ همچنان عقیده دارند که در حقیقت بوهر همه چیز را جمع‌وجور نموده است؟

[۲] Bennett, C.H., Brassard, G., Crepeau, C., Jozsa, R., Peres, A. and Woottters, W.K.: Teleportating an unknown quantum state via dual classical and Einstein_Podolsky-Rosen channels, Phys. Rev. Lett. **70**, 1895-1899 (1993).

جوهر و شکل[۱]. امروزه فیزیک‌دان‌ها آن را ماده و حالت فیزیکی می‌نامند. برای مثال یک نامه از یک‌طرف از کاغذ و مرکب ساخته شده است، که ماده می‌باشند، و در طرف دیگر از یک متن تشکیل شده است، که اطلاعات یا حالت فیزیکی کاغذ و مرکب می‌باشد. در مورد یک الکترون، ماده عبارت است از جرم و بار الکتریکی آن (به همراه سایر خواص دائمی)، درحالی که ابر مکان‌ها و سرعت‌های ممکن آن، حالت فیزیکی را تشکیل می‌دهد. در مورد یک فوتون، یک ذره بدون جرم نور، آن ماده انرژی فوتون و حالت فیزیکی آن نیز شامل قطبش و ابرهای احتمالاتی مکان و فرکانس ارتعاشی (یعنی انرژی‌های) ممکن آن می‌باشد.

در تلپورتیشن کوانتومی، ما کل جسم را تلپورت نمی‌کنیم، بلکه تنها حالت فیزیکی، و یا به قول ارسطو شکل آن‌را، تلپورت می‌نماییم. آیا این موضوع ناامیدکننده بود؟ نه واقعاً! برای شروع ما می‌دانیم که جرم یا انرژی یک جسم را نمی‌توانیم تلپورت کنیم. این موضوع به شدت این اصل که برقراری ارتباط بدون انتقال غیرممکن است را نقض می‌نماید (کادر ۵ در صفحه ۳۴ را ببینید). گذشته از این، این واقعیت که ما می‌توانیم حالت کوانتومی یک جسم را تلپورت کنیم به‌طور کاملاً شگفت‌انگیزی کافی می‌باشد. در واقع حالت کوانتومی، شامل حالت نهایی ساختار یک ماده است. بنابرین ما صرفاً برخی توصیفات تقریبی را تلپورت نمی‌کنیم، بلکه *همه‌چیزی* که عملاً قابل تلپورت کردن باشد را تلپورت می‌نماییم. و نظریه شبیه‌سازی- ممنوع فصل ۴ را فراموش نکنید. وقتی ما حالت کوانتومی یک جسم را تلپورت می‌کنیم، نمونه اولیه لزوماً ناپدید

[۱] ما مقاله خود در مورد اولین آزمایش تلپورتیشن با بُرد بلند را این گونه آغاز نمودیم. اما ویراستاران مجله معروف نِیچِر هرگونه نقل‌وقول که به زمان‌های دور مانند زمان ارسطو برگردد را رَد می‌نمودند! من شدیداً اصرار داشتم که دانشجویانم بیخیال چاپ مقاله در نِیچِر شوند اما فشار بسیار زیاد بود و در پایان ما تسلیم خواسته ویراستاران نِیچِر شدیم:
I. Marcikic, H. de Riedmatten, W. Tittel, H. Zbinden, N. Gisin: Long-distance teleportation of qubits at telecommunication wavelenths, I, Nature **421**, 509-513 (2003) (submitted paper arXiv:quant-ph/0301178)

می‌شود، درغیراین‌صورت در پایان ما به دو کپی دست‌خواهیم یافت و این موضوع نظریه شبیه‌سازی- ممنوع را نقض می‌نماید. بنابرین باید ناپدید شدن اصل جسم در اینجا و ظاهر شدن آن در جای دیگر تضمین شده باشد.

بیایید جمع‌بندی کنیم. در تلپورتیشن کوانتومی، ماده جسم اولیه (جرم، انرژی) در محل عزیمت باقی‌می‌ماند، یعنی نزد آلیس، اما به‌طور ساده تمامی ساختار آن (حالت فیزیکی آن) کاملاً ناپدید می‌شود. برای مثال اگر آلیس یک اردک ساخته شده از خمیر تلپورت نماید، خمیر همانجا که قرار داشته باقی خواهد ماند ولی دیگر شکل اردک را نخواهد داشت. در واقع، تنها به توده‌ای خمیر بدون شکل تبدیل خواهد شد. در مقصد، یعنی نزد باب، در یک فاصله دلخواه دورتر (و در واقع در مکانی که ممکن است برای آلیس ناشناخته باقی بماند) در ابتدا ما یک توده بدون‌شکل خمیر داریم ولی در پایان فرآیند تلپورتیشن، توده خمیر باب، شکل دقیق اردک اولیه را تا کوچکترین جزئیات اتمی به‌دست‌خواهد آورد. طبیعتاً این مثال خاص هنوز در قلمرو داستان‌های علمی- تخیلی قرار دارد. در حال حاضر ما قادر به تلپورت نمودن یک اردک خمیری نیستیم. این موضوع برای تکنولوژی امروزه بسیار پیچیده می‌باشد. شاید اصلاً فیزیک کوانتومی در ابعاد چنین اجسام روزمره ما قابل اعمال نباشد؟ بنابرین بیایید دومین مثال، قطبش فوتون، را درنظر بگیریم که هم واقعی‌تر است و هم صریح‌تر.

یک فوتون یک بسته بسیار کوچک انرژی می‌باشد (فیزیک‌دان‌ها آن را انرژی الکترومغناطیسی می‌نامند). این انرژی در مقایسه با سایر انرژی‌ها، دارای نوعی میدان الکتریکی نوسان‌کننده ضعیف می‌باشد. اگر فوتون دارای قطبش مشخصی باشد، میدان الکتریکی در یک جهت دقیق و معین به‌طور منظم نوسان می‌کند. اما اگر

چنین فوتونی دارای قطبشی بدون ساختار و نامنظم و یا به‌قول فیزیکدان‌ها ناقطبیده باشد[۱]. در این‌حالت، میدان الکتریکی در هر جهتی به‌صورت کاملاً نامنظم نوسان می‌نماید.

فوتون آلیس با قطبش کاملاً مشخص بیرون می‌آید، یعنی در یک جهت معین نوسان می‌نماید. این جهت ممکن است مشخص نباشد ولی حتماً وجود دارد. بعد از فرآیند تلپورتیشن، انرژی فوتون آلیس همچنان موجود است اما دیگر قطبیده نمی‌باشد. در سمت باب ما یک فوتون (و در نتیجه انرژی[۲]) داریم که قطبیده نمی‌باشد، اما پس از فرآیند تلپورتیشن قطبش کامل فوتون تلپورت شده را کسب نموده است. پس از این، فوتون باب از تمامی جهات دقیقاً مشابه فوتون اولیه آلیس می‌باشد و فوتون آلیس از تمامی جنبه‌ها دقیقاً شبیه فوتون اولیه باب می‌باشد[۳].

بنابرین در اینجا واقعاً تلپورتیشن صورت گرفته است. فوتونی که به‌صورت "انرژی+قطبش" و یا به‌طور عمومی‌تر جسمی که به‌صورت "جوهر+حالت فیزیکی" درنظر گرفته می‌شود، واقعاً از آلیس به باب منتقل می‌شود بدون این‌که از هیچ نقطه‌ای از فضا که بین آن‌ها قرار دارد عبور نماید. در پایان فرآیند تلپورتیشن کوانتومی، هیچ

---

[۱] برای یک فوتون دارای قطبش معین، قطبش‌گری وجود دارد که مطمئناً فوتون از آن عبور می‌نماید. از طرف دیگر یک فوتون کاملاً ناقطبیده همواره با شانس یک‌دوم از هر قطبش‌گری، با هر جهت قطبشی، عبور می‌نماید. در حالت اول فوتون دارای قطبشی می‌باشد که قطبش‌گر می‌تواند آن‌را تایید نماید، درحالی که در دومی پاسخ این سوال که "عبور می‌کند یا عبور نمی‌کند" همواره ۵۰-۵۰ می‌باشد.

[۲] همانطور که در فصل ۶ دیدیم انرژی یک فوتون می‌تواند نامعین باشد. در واقع همین موضوع برای جرم، یعنی چگالش بوز- اینشتین، نیز صادق می‌باشد. نکته مهم این است که جوهر، جرم یا انرژی، باید از قبل، حداقل به‌طور بالقوه، در مقصد وجود داشته باشد.

[۳] برای مخاطبان فیزیک‌دان، این قضیه درصورتی صادق است که تمامی مشخصات فوتون را تلپورت نماییم. گر ما فقط قطبش آن را تلپورت نماییم، فوتون‌ها تنها درصورتی غیر قابل تشخیص خواهند بود که سایر مشخصات آن‌ها، مانند طیف آن‌ها، از قبل و در ابتدا غیر قابل تشخیص بوده باشد.

تمایزی میان حالت نهایی با حالتی که در آن فوتون آلیس به باب و فوتون باب به آلیس منتقل گردد، وجود ندارد.

اما هیچکدام از این‌ها به ما نمی‌گوید که تلپورتیشن کوانتومی چگونه کار می‌کند. ما می‌دانیم که باید از ناموضِعیت کوانتومی استفاده نماییم، اما این کافی نیست. ما همچنان به مفهوم دیگری به‌نام اندازه‌گیری مشترک[۱] نیاز داریم.

اندازه‌گیری مشترک

بنابرین برای این‌که به تلپورتیشن دست‌یابیم به یک جفت جسم کوانتومی درهم‌تنیده نیاز خواهیم داشت. به‌صورت واقعی‌تر، یک جفت فوتون قطبش-درهم‌تنیده را در نظر بگیرید. در ادامه ما به جسمی نیاز داریم که تلپورت شود، مثلاً یک فوتون که مایل هستیم قطبیدگی آن‌را تلپورت نماییم. بنابرین حالت قطبیدگی آن یک بیت اطلاعات کوانتومی یا کیوبیت می‌باشد که قرار است تلپورت شود. آلیس، یعنی فرستنده، فوتونی که باید تلپورت گردد را دارد، یا به‌طور دقیق‌تر او فوتونی دارد که کیوبیت قطبیدگی که قرار است تلپورت گردد را حمل می‌نماید، و همچنین او فوتونی دارد که می‌داند با فوتون سوم که در اختیار باب و در فاصله بسیار دور قرار دارد، درهم‌تنیده می‌باشد. آلیس لازم نیست تا از مکان باب اطلاع داشته باشد. پس چه‌کار باید انجام دهد؟ اگر او کیوبیتی که قرار است تلپورت شود را اندازه‌گیری نماید، در آن اختلال به‌وجود آورده و لذا دیگر نخواهد توانست اصل آن‌را تلپورت نماید. اگر او فوتونی که با فوتون باب درهم‌تنیده می‌باشد را اندازه‌گیری نماید، خواهد فهمید که می‌تواند با فوتون باب یک همبستگی ناموضِع ایجاد نماید، اما آلیس با این چه‌کار می‌تواند انجام دهد؟ همه آن‌چه او می‌داند این است که اگر باب همان اندازه‌گیری که او انجام می‌دهد را انجام

[۱] Joint measurement.

دهد، هر دو نتیجه یکسانی به‌دست‌خواهند آورد، یک نتیجه رندمی ولی یکسان در هر دو طرف.

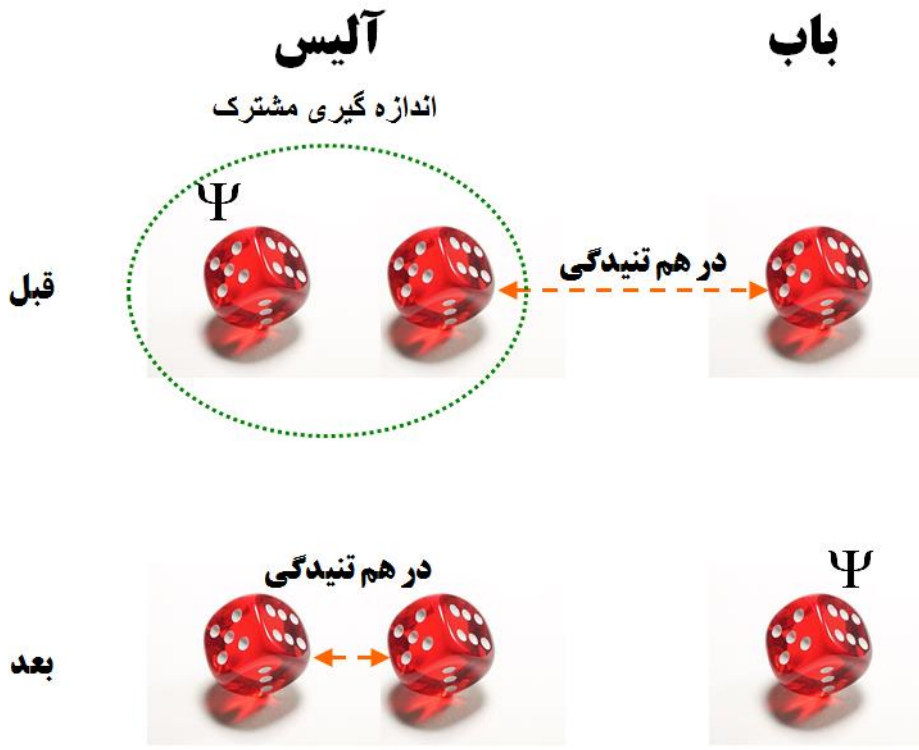
هسته فرآیند تلپورتیشن مستلزم استفاده آلیس از دومین جنبه درهم‌تنیدگی است، یعنی چیزی که به آن کمتر پرداخته‌ایم. تاکنون ما فقط جنبه اول درهم‌تنیدگی را مورد بحث قرار داده‌ایم، یعنی موردی که به دو موجود کوانتومی درهم‌تنیده، مانند دو فوتون، اجازه می‌دهد که با یک حالت درهم‌تنیده توصیف شوند. اما در اینجا آلیس دو فوتون دارد که با دو حالت توصیف می‌گردند. اولی در یک حالت قطبیدگی کاملاً مشخص قرار دارد، که ممکن است برای آلیس مجهول باقی بماند و دومین فوتون در یک حالت درهم‌تنیده می‌باشد. کاری که آلیس می‌بایست انجام دهد این است که دو فوتون خود را درهم‌تنیده نماید. برای انجام این‌کار کافی نیست که او تنها یکی از آن‌ها را اندازه‌گیری نماید. بلکه می‌بایست آن‌ها را به‌صورت مشترک اندازه‌گیری نماید. فهم این مطلب مشکل است، زیرا مانند خود درهم‌تنیدگی، دستیابی به این موضوع در دنیای هرروزه ما که با آن آشنا هستیم کاملاً غیرممکن می‌باشد.

برای فهم این مطلب تصور نمایید آلیس از هر دو فوتون خود این سوال را می‌پرسد: آیا شما مانند هم هستید؟ در واقع سوال آلیس این است: اگر من اندازه‌گیری یکسانی روی هر کدام از شما انجام دهم، آیا هر دو جواب یکسانی به من می‌دهید؟ در دنیای اجسام هرروزه ما، تنها راه جواب دادن به این سوال عجیب این است که دو اندازه‌گیری را واقعاً انجام داده و سپس نتایج را با هم مقایسه کنیم. ولی به لطف درهم‌تنیدگی می‌توانیمکار بهتری در کوانتوم انجام دهیم. ما می‌توانیم از دو فوتون این سوال را "بپرسیم" و آن‌ها با یکدیگر یک حالت درهم‌تنیده ایجاد نموده و به این سوال پاسخ دهند، بدون این‌که نیاز شود دو اندازه‌گیری، تک‌تک روی هرکدام، انجام دهیم. ما از

قبل می‌دانیم که یک حالت درهم‌تنیده این‌گونه است، اگر ما دو فوتون را به یک روش اندازه‌گیری نماییم، یعنی در یک جهت، همانطور که در فصل ۵ توضیح داده شد، آن‌ها همواره جواب رندمی یکسانی را تولید خواهند نمود که مانند همیشه توسط رندمی‌بودن محضِ ناموضِع توصیف می‌گردد. و این قضیه در مورد هر جهتی که برای اندازه‌گیری انتخاب شود صادق می‌باشد!

اگر دو فوتون آلیس همیشه برای یک سوال یکسان، یک پاسخ یکسان تولید نمایند و اگر فوتون باب نیز، که با فوتون آلیس درهم‌تنیده می‌باشد، نتیجه یکسانی برای همان سوال تولید نماید، بنابرین فوتون باب همواره پاسخ یکسانی مانند فوتونی که قرار است تلپورت شود تولید خواهد نمود. موضوع به همین سادگی است، یا تقریباً به همین سادگی. بنابرین ما می‌بایست دو بار از درهم‌تنیدگی استفاده نماییم، یک‌بار به‌عنوان یک کانال ناموضِع تلپورتیشن کوانتومی (حالت درهم‌تنیده فوتون‌های آلیس و باب) و دومین بار جهت فراهم‌نمودن روشی برای پرسیدن یک سوال درباره حالت نسبی دو سیستم (دو فوتون آلیس)، بدون این‌که اطلاعاتی در مورد حالت هر یک از آن‌ها کسب نماییم (شکل ۸,۱ را ببینید).

اما این پایان داستان نمی‌باشد. مانند همیشه در فیزیک کوانتومی، اندازه‌گیری مشترک بر روی دو فوتون آلیس، با درنظر گرفتن حالت نسبی آن‌ها، یک نتیجه کاملاً رندمی تولید می‌نماید، تنها یک نتیجه از میان چندین نتیجه ممکن. اگر ما کمی خوش‌شانس باشیم و نتیجه "ما شبیه هم هستیم" را دریافت کنیم، به نظر می‌رسد که به پایان قضیه رسیده‌ایم. ولی باب این را نمی‌داند. اما اگر آلیس نتیجه "ما شبیه یکدیگر نیستیم" یعنی "در پاسخ دادن به یک سوال یکسان، ما جواب‌های مخالف یکدیگر خواهیم داد"را دریافت نماید، چه اتفاقی می‌افتد؟



شکل۸,۱ تلپورتیشن کوانتومی. در ابتدا آلیس دو فوتون دارد که در اینجا با دو تاس نشان‌داده شده است. تاس سمت چپ بیت کوانتومی یا کیوبیت Ψ که قرار است تلپورت شود را حمل می‌نماید درحالی‌که تاس سمت راست با فوتون باب درهم‌تنیده شده است. آلیس یک اندازه‌گیری مشترک بر روی دو فوتون خود انجام می‌دهد. این کار دو فوتون او را درهم‌تنیده نموده و همزمان کیوبیت را به سمت چپ یعنی به فوتون باب تلپورت می‌نماید. برای کامل نمودن فرآیند، آلیس نتیجه اندازه‌گیری مشترک خود را به باب می‌گوید و باب فوتون خود را "می‌چرخاند" تا با این نتیجه همخوانی داشته باشد.

در این حالت باب مجبور خواهد شد که فوتون خود را معکوس نماید به‌طوری‌که در حالتی قرار گیرد که آن نیز نتیجه یکسانی مانند فوتون اولیه آلیس تولید نماید[۱].

[۱] توجه داشته باشید که تعداد زیادی حالت درهم‌تنیده وجود دارند. جهت ساده‌سازی، تا این‌جا همواره از درهم‌تنیدگی بگونه‌ای صحبت نموده‌ام که در نتیجه آن همواره نتیجه یکسانی در اندازه‌گیری‌های یکسان تولید می‌گردد. اما حالت‌های درهم‌تنیده دیگری هم وجود دارد. برای مثال حالتی وجود دارد که در آن همیشه نتایج متفاوتی در اندازه‌گیری‌های یکسان تولید می‌گردد. و در واقع همچنین تعداد بسیار زیاد دیگری وجود دارند، ولی در این‌جا نیازی به بررسی آن‌ها

اما آلیس برای سوال پرسیدن از دو فوتون خود چه‌کار باید انجام دهد؟ این مشکل عملیاتی بزرگی می‌باشد. من در این‌جا بیشتر در مورد این موضوع صحبت نمی‌کنم چراکه فراتر از حدود این کتاب می‌باشد.

پروتکل تلپورتیشن کوانتومی

اندازه‌گیری مشترک آلیس یک نتیجه رندمی به بار می‌آورد. بسته به این نتیجه، فوتون باب اگر در جهت مشابه اندازه‌گیری شود، همواره نتیجه‌ای شبیه به فوتون اولیه و یا نتیجه عکس فوتونی را که حاصل فوتون اولیه است به دست می‌دهد. و این دو نتیجه به یک میزان محتمل می‌باشند. تا این‌جا این موضوع برای باب زیاد جالب نیست. او یک دوم شانس دارد که نتیجه یکسان و یک دوم شانس دارد که نتیجه مخالف آن‌چه فوتون اولیه درصورت اندازه‌گیری تولید می‌نمود، به‌دست آورد. تا این‌جا باب لازم نبود اصلاً کاری انجام دهد. از آن‌جا که تنها دو جواب ممکن وجود دارد، او خودش از قبل می‌داند که به احتمال یک‌دوم نتیجه درست را دارد. اما در تلپورتیشن کوانتومی، آلیس نتیجه اندازه‌گیری مشترک خود را می‌داند، بنابرین او می‌داند که آیا باب نتیجه درست را و یا معکوس آن را به‌دست می‌آورد. بنابرین برای تکمیل فرآیند تلپورتیشن کوانتومی، آلیس می‌بایست به باب بگوید در چه شرایطی قرار خواهد گرفت.

اکنون ما می‌فهمیم که چگونه تلپورتیشن کوانتومی از برقراری ارتباط با سرعت دلخواه جلوگیری می‌نماید: فرآیند تنها وقتی کامل است که باب نتیجه اندازه‌گیری مشترک که دو فوتون آلیس را درهم‌تنیده کرده را دریافت نماید. این ارتباط بین آلیس و باب ضروری است زیرا بدون آن نتایج باب صرفاً شانسی‌گونه خواهند بود و باب هیچ راهی برای تفسیر آن‌ها نخواهد داشت. این ارتباط از نتیجه آلیس لزوماً با سرعت نور و یا کمتر از آن منتشر می‌گردد. بنابرین تلپورتیشن کوانتومی، از ابتدا تا انتها، سریع‌تر از

نداریم. برای مخاطبان فیزیک‌دان باید گفت که چهار حالت متعامد با بیشینه درهم‌تنیدگی برای قطبیدگی دو فوتون وجود دارد. باب می‌تواند برای هر یک از این‌ها، بر روی قطبیدگی هر فوتون خود چرخشی را انجام دهد (یک تبدیل واحد) بگونه‌ای که دقیقاً در حالت اولیه فوتون آلیس قرار گیرد، در واقع بدون این‌که همچنان بداند آن حالت چگونه بوده است.

نور حرکت نمی‌نماید. درواقع وقتی آلیس اندازه‌گیری مشترک خود را انجام می‌دهد، چیزی درمورد باب اتفاق می‌افتد، زیرا فوتون باب از حالتی بدون ساختار به یکی از دو حالت ممکن می‌رود. باب به هیچ‌وجه از این موضوع اطلاع نمی‌یابد، زیرا هر گونه اندازه‌گیری که انجام دهد، یک نتیجه کاملاً رندمی دریافت می‌نماید، اما به محض این‌که آلیس به او اطلاع دهد که فوتون او در کدام‌یک از دو حالت ممکن قرار دارد، باب خواهد فهمید چگونه به‌صورت سیستماتیک نتیجه آلیس را، اگر او فوتون اولیه خود را اندازه‌گیری می‌نمود، به‌دست آورد و این موضوع برای هر اندازه‌گیری که باب انتخاب نماید صادق می‌باشد. بنابرین فوتون باب در حالت کوانتومی فوتون اولیه قرار دارد.

توجه کنید که باب مجبور نیست فوتون خود را اندازه‌گیری نماید. او می‌تواند آن را بگونه‌ای برای استفاده در آینده محفوظ نگه‌دارد و یا حتی این‌که آن را به جای دیگری تلپورت نماید. بنابرین ما می‌توانیم یک شبکه کامل تلپورتیشن از یک گره به گره بعدی، مثلاً با فاصله ۵۰ کیلومتری از یکدیگر، فاصله‌ای که به‌راحتی می‌توان در طول آن درهم‌تنیدگی را توسط فیبرهای نوری منتقل نمود، را تصور نماییم. اگر باب از سمت آلیس متوجه شود که فوتون او (باب) همیشه نتیجه معکوس تولید می‌نماید، او (باب) تنها مجبور خواهد شد که فوتون خود را معکوس نماید[1]. این کار بدون ایجاد اختلال در فوتون قابل انجام است (باب فوتون خود را بدون این‌که چیزی در مورد حالت آن بداند معکوس می‌نماید). همچنین توجه نمایید که باب می‌تواند فوتون خود را بدون اصلاح نمودن به جای دیگری تلپورت نماید. او تنها می‌بایست به دریافت‌کننده اطلاع دهد که خودش می‌بایست اصلاح را انجام دهد. بنابرین گیرنده نهایی محاسبه خواهد نمود که چه مدت یک‌بار می‌بایست فوتون را معکوس نماید. اگر تعداد دفعات

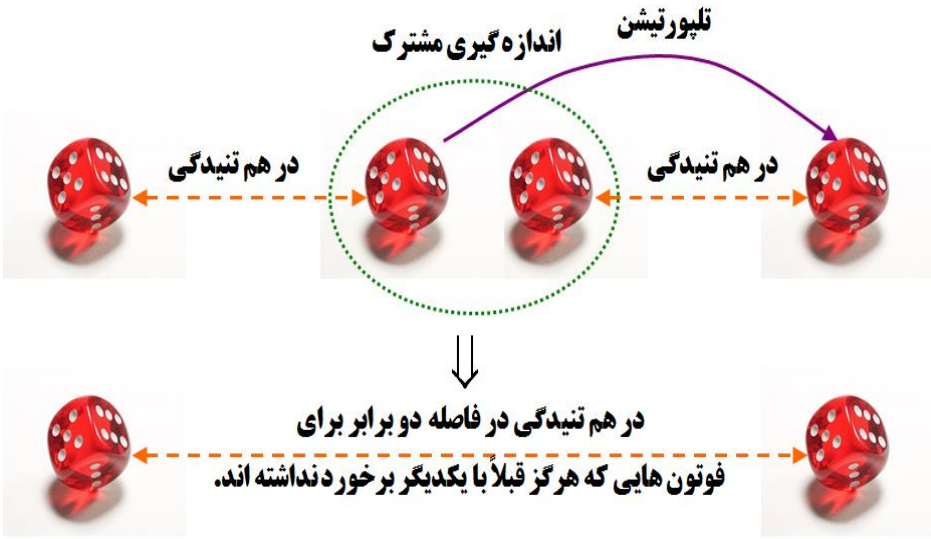
[1] برای انجام این کار او می‌بایست حالت فوتون را بچرخاند. برای مثال، اگر کیوبیت با قطبیدگی کدگذاری شده است، او می‌بایست حالت قطبیدگی را با استفاده از یک بلور دوشکستی (دارای ضریب شکست مضاعف) معکوس نماید.

عدد زوجی بدست آمد او لازم نیست کاری انجام دهد و اگر عدد فردی بدست آمد تنها کافی است یک‌بار آن را معکوس نماید.

یک نکته مهم‌تر وجود دارد. نه آلیس و نه باب چیزی در مورد حالت درهم‌تنیده نمی‌دانند. در واقع نتیجه اندازه‌گیری مشترک آلیس بر روی دو فوتون همواره کاملاً رندمی می‌باشد. بنابرین این نتیجه هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد حالت درهم‌تنیده فراهم نمی‌نماید. نباید در مورد این موضوع تعجب نماییم. ما دیدم که وقتی با یک حالت درهم‌تنیده شروع می‌کنیم، نتیجه یک اندازه‌گیری در هر جهت مشخصی، همیشه کاملاً رندمی، یعنی به‌صورت تقلیل‌ناپذیری شانسی‌گونه، می‌باشد. برعکس، اگر با فوتونی کار خود را آغاز نماییم که در جهتی کاملاً معین، این جهت به هر سمتی می‌تواند باشد، نوسان نماید و ما از آن بپرسیم "آیا شما شبیه به‌هم هستید؟"، پاسخ به این سوال نیز کاملاً رندم خواهد بود. این نوعی فرآیند معکوس می‌باشد که به‌عنوان توضیح بیشتر باید گفت که این موضوع کاملاً ضروری می‌باشد، در غیراین‌صورت اگر آلیس و/یا باب قرار بود چیزی درمورد حالت درهم‌تنیده بفهمند، آن‌ها قادر می‌شدند که با تلپورت نمودن این حالت به جلو و عقب بین یکدیگر، هر بار با استفاده از یک جفت فوتون درهم‌تنیده جدید، این فرآیند را تا زمانی که اطلاعات کافی برای تولید کپی‌هایی از این حالت جمع‌آوری نمایند، تکرار نمایند، و این موضوع برخلاف نظریه شبیه‌سازی ممنوع فصل ۴ می‌باشد.

در نهایت، آلیس و باب می‌توانند حالت یک فوتون که با فوتون چهارم درهم‌تنیده است را نیز تلپورت نمایند. از آن‌جا که آن‌ها چیزی درمورد حالت تلپورت‌شده نخواهند فهمید، پس درهم‌تنیدگی تلپورت شده را نابود نمی‌نمایند. بنابرین ما از هر دو جنبه درهم‌تنیدگی استفاده می‌نماییم، دو بار برای همبسته نمودن فوتون‌هایی که بسیار از هم دور هستند و یک‌بار برای انجام اندازه‌گیری مشترک. بنابرین هم‌چنان‌که در شکل ۸,۲ نشان داده شده است، ما می‌توانیم فوتون‌هایی را که هرگز همدیگر را ملاقات

ننموده‌اند و هیچ گذشته مشترکی ندارند را درهم‌تنیده نماییم. بنابرین ما می‌توانیم از تلپورت نمودن درهم‌تنیدگی صحبت می‌نماییم.



شکل ۸,۲ وقتی ما یک کیوبیت (فوتون) که خودش درهم‌تنیده است را تلپورت می‌نماییم، مانند دومی در سمت چپ که با اولی درهم‌تنیده می‌باشد، نتیجه این می‌شود که اولی با چهارمی درهم‌تنیده می‌گردد. بدین‌گونه ما از تلپورت نمودن درهم‌تنیدگی صحبت می‌نماییم. این پدیده به‌صورت ویژه شگفت‌آور می‌باشد، زیرا ذراتی را با یکدیگر درهم‌تنیده می‌نماید که هرگز قبلاً یکدیگر را ملاقات ننموده‌اند. همچنین این پدیده مفید می‌باشد، زیرا می‌توان از آن برای دو برابر نمودن فاصله بین اجسام درهم‌تنیده استفاده نمود.

فکس کوانتومی و شبکه‌های مخابراتی کوانتومی

ممکن است در پایان به نظر برسد که تلپورتیشن کوانتومی چیزی جز یک سیستم فکس کوانتومی نمی‌باشد. در مجموع، باب باید از قبل یک کیوبیت شبیه به کاغذ سفیدی داشته باشد که حالت کیوبیت "فکس‌شده" بر روی آن پرینت خواهد شد. اما این تشبیه به چندین علت گمراه‌کننده می‌باشد.

اولاً، وقتی ما از تلپورتیشن استفاده می‌نماییم، صرفاً برخی مقادیر کوچک اطلاعات را فکس نمی‌کنیم. بلکه این ساختار نهایی ماده است که به شکل حالت کوانتومی تلپورت می‌گردد. کیوبیت نهایی نه تنها حالت کیوبیت اولیه را دربرخواهد گرفت بلکه مطلقاً از هر جهت با آن همسان خواهد بود.

دوماً، مقدار نامحدودی از اطلاعات برای توصیف حالت کوانتومی یک سیستم مورد نیاز می‌باشد، زیرا تعداد نامحدودی حالت‌های کوانتومی وجود دارد. برای مثال حالت قطبیدگی یک فوتون را می‌توان با یک زاویه توصیف نمود. برای مخابره‌نمودن این زاویه، تعداد نامحدودی بیت‌های اطلاعات لازم می‌باشد. درحالی‌که در تلپورتیشن کوانتومی، حالت قطبیدگی یک فوتون تنها به یک بیت نیاز دارد. این بدین معنی است که ارتباط مورد نیاز در تلپورتیشن کوانتومی در مقایسه با مقدار اطلاعاتی که برای مخابره نمودن حالت تلپورت‌شده در حالت دوم مورد نیاز است، بسیار اندک می‌باشد (اگر مورد دوم شناخته‌شده باشد).

سومین تفاوت این است که در تلپورتیشن کوانتومی، نه آلیس و نه باب هرگز از حالت کیوبیت تلپورت‌شده چیزی نخواهند فهمید. این موضوع بسیار قابل‌توجه و در رمزنگاری به شدت مفید می‌باشد. زمانی که شخصی یک فکس می‌فرستد، هر کسی که در امتداد خط ارتباطی قرارداشته باشد می‌تواند آن را رهگیری و یا قطع نماید. اما چنین چیزی درمورد تلپورتیشن کوانتومی نمی‌تواند رخ دهد. همان‌طور که دیدیم هیچ‌کس حتی فرستنده و گیرنده در مورد حالت کیوبیت تلپورت‌شده هیچ‌چیزی نخواهد دانست. بنابرین آلیس می‌تواند یک پیام را برای چارلز و او نیز متعاقباً آن را برای باب تلپورت نماید. اگر چارلز پروتکل تلپورتیشن کوانتومی را به‌درستی اجرا نماید، او از پیام چیزی دریافت نمی‌نماید. همچنین آلیس و باب به‌وسیله اعمال

پروتکل رمزنگاری کوانتومی می‌توانند چک نمایند که فرآیند به‌درستی اجرا شده و اینکه چارلز چیزی را از پیام نفهمیده است. در تعمیم‌دادن به یک شبکه کامل تلپورتیشن کوانتومی، حتی اگر گره‌های میانی (یا به‌قول فیزیکدان‌ها، تکرارکننده‌های کوانتومی) وجود داشته باشند، آلیس و باب می‌توانند در مورد محرمانگی ارتباطات خود اطمینان حاصل نمایند.

آیا ما می‌توانیم اجسام بزرگ را تلپورت نماییم؟

آیا برای داخل شدن به یک ماشین تلپورتیشن کوانتومی آماده هستید؟ اگر من جای شما بودم به دو علت بسیار احتیاط می‌کردم. اولاً تعدادی از تلپورتیشن‌های کوانتومی که تاکنون انجام شده‌اند با این‌که اصل مربوطه را اثبات نموده‌اند، و این خارق‌العاده می‌باشد!، اما برای انجام این‌کار آن‌ها مجبور بوده‌اند موارد محدودی را برگزینند که جسم اولیه از بین نرود. درواقع در بیشتر این آزمایش‌های عملی از فوتون‌ها استفاده می‌گردد و دقیقاً همانند نمایش بازی بِل (در بخشی با عنوان روزنه آشکارسازی در صفحه ۱۱۸)، بسیاری از این فوتون‌ها به‌سادگی از دست می‌روند. فیزیکدان‌ها خیلی خوب علت این موضوع را می‌دانند و با این‌حال چنین آزمایش‌هایی را قطعی قلمداد می‌کنند. به‌هرحال اگر من حق انتخاب داشتم، داوطلب نمی‌شدم تا در یک آزمایش تلپورتیشن جای یکی از این فوتون‌ها قرار بگیرم. همچنین به‌صورت جدی‌تر چندین آزمایش با اتم‌ها انجام شده‌است و در این موارد تقریباً هیچ‌یک از کاندیدهای این تلپورتیشن‌ها از بین نرفته‌اند. هرچند این آزمایش‌ها تاکنون در فواصل کمتر از یک میلی‌متر انجام شده‌اند. برای احتیاط دلیل دومی هم وجود دارد. برای تلپورت نمودن یک جسم با ابعاد اشیاء روزمره، شخص به تعداد بسیار زیادی درهم‌تنیدگی نیاز خواهد داشت. اما درهم‌تنیدگی به‌شدت شکننده می‌باشد. برای حفظ آن، هرگونه منشاء اختلال را باید حذف نمود و این شامل هر نوع برهم‌کنش با محیط می‌شود. این کار را می‌توان به‌راحتی با فوتون‌هایی که در فیبرهای نوری منزوی شده‌اند و یا با اتم‌هایی که در محفظه‌های ویژه با خلاء بالا در دام افتاده‌اند، انجام داد. اما برای مقادیر بسیار

زیاد درهم‌تنیدگی، که حتی برای تلپورت نمودن نوک یک مداد مورد نیاز می‌باشد، در حال حاضر حتی نمی‌توان به جلوگیری از اختلالی که می‌تواند تمامی فرآیند تلپورتیشن را غیرعملی سازد، حتی فکر کرد.

امروزه، حتی با بودجه نامتناهی، هیچ‌کس ایده‌ای برای غلبه بر این مشکل ندارد. بنابرین این یک مشکل فنی ساده به حساب نمی‌آید. آیا واقعاً ما روزی موفق خواهیم شد که حالت کوانتومی یک ویروس را تلپورت نماییم؟ در حقیقت ما تا آن زمان راه خیلی طولانی درپیش داریم. در مرحله نخست باید بدانیم که حالت کوانتومی یک ویروس چگونه می‌تواند باشد. حتی ممکن است متوجه شویم که انجام چنین کاری غیرممکن است. ممکن است برخی اصول جدید فیزیکی را قرار دهیم که تلپورتیشن یک جسم با مقیاس طولی ما را ممنوع اعلام دارد. من هیچ ایده‌ای ندارم. این عدم قطعیت و زیبایی علم می‌باشد!

فصل ۹: آیا طبیعت واقعاً ناموضِع می‌باشد؟

برای قضاوت بر اساس آنچه تاکنون دیده‌ایم، در واقع به نظر می‌رسد که طبیعت می‌تواند همبستگی‌های ناموضِع تولید نماید. اما دانشمندان معمولاً از یک نظریه یا یک مفهوم به این سادگی عبور نمی‌کنند. هرگاه یک آزمایش نتایج عجیبی داشته باشد، آن‌ها نه تنها نظریه، بلکه همچنین آزمایش‌ها را زیر سوال می‌برند. آیا تجدیدپذیر هستند؟ آیا به درستی تفسیر شده‌اند؟ در مورد ما، این آزمایش بارها و بارها و در همه قاره‌ها و با تمامی انواع متغیرها تکرار شده است. اما با این‌وجود خواهیم دید بسیار سخت می‌توان با اطمینان تمامی تفسیرهای جایگزین ممکن را کنار گذاشت، حتی اگر چه امروزه جامعه علمی کاملاً مجاب شده است که طبیعت به‌صورت موثری ناموضِع می‌باشد.

ما در این فصل تمامی استدلال‌های مختلفی را مرور می‌کنیم که طبق آن‌ها دانشمندان خود را متعاقد نمودند تا هرگونه امیدی برای توصیف طبیعت بر اساس "عناصر واقعیت" کاملاً موضِعی و متقابلاً مستقل را کنار بگذارند. در واقع هرگونه تصویری از طبیعت که مانند جهان یک کودک از لِگو ساخته شده باشد، با ناموضِعیتی که در بازی بِل خود را نمایان می‌سازد ناسازگار می‌باشد. از مخاطبانی که قبلاً متقاعد شده‌اند و مایل نیستند منازعات علمی که در ادامه ارائه می‌گردند را دنبال نمایند، دعوت می‌گردد که مستقیماً به فصل ۱۰ بروند.

ناموضِعیت در دنیای نیوتن

اجازه دهید با مثال دیگری از ناموضِعیت شروع نماییم. همان‌طور که قبلاً دیدیم این اولین بار در تاریخ نیست که فیزیکدان‌ها با ناموضِعیت مواجه شده‌اند. نظریه بزرگ گرانش جهانی نیوتن نیز ناموضِع بود. مطابق این نظریه اگر ما سنگی را بر روی سطح ماه جابجا نماییم، وزن ما بر روی زمین به‌طور آنی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. واضح است این اثر که در هر فاصله‌ای به‌صورت آنی رخ می‌دهد، اثری ناموضِع می‌باشد. اما بر خلاف ناموضِعیت کوانتومی، این اثر ناموضِع می‌تواند برای برقراری ارتباط بدون انتقال در هر سرعت بالای دلخواهی مورد استفاده قرار گیرد. در اینجا شخص ممکن است بپرسد که چگونه فیزیک‌دان‌ها برای قرن‌ها چنین نظریه‌ای را پذیرفتند؟ واقعیت این است که آن‌ها هیچ‌گاه واقعاً آن را نپذیرفتند. واکنش خود نیوتن همه چیز را نشان می‌دهد (کادر ۱ در صفحه ۲ را ببینید): "این گرانش می‌بایست از مسافت دور عمل کند و در نظر من آن چنان پوچ و مضحک است که گمان نمی‌کنم هیچ انسانی که در امور فلسفی دارای صلاحیت باشد هرگز آن را بپذیرد".

چند دهه بعد زمانی‌که لاپلاس وارد میدان شد، برخی متفکران نظریه نیوتن را تا مقام یک واقعیت محض بالا بردند، از آن شکلی قطعی از تعیّن را استنباط نمودند و درواقع علم و فلسفه جبرگرایی را یکی‌نمودند. نگرش نیوتن در تضاد کامل با نگرش شخصی چون نیلز بوهر بود، فردی که از آن به‌عنوان پدر معنوی مکانیک کوانتومی یاد می‌شود که با ادعای مصرانه خود که نظریه کوانتوم نظریه‌ی کاملی می‌باشد، کل نسل فیزیک را به زانو درآورد. این موضوع باعث شد بوهر استدلال‌هایی که اینشتین برای نشان دادن ناموضِع بودن نظریه کوانتومی خیلی سریع ارائه داد را تحقیر نماید. چه کسی می‌داند؟ این موضوع ممکن است مانع این شده باشد که در دهه ۱۹۳۰

برخی فیزیک‌دان‌های جوان استدلال‌های بِل را بیابند. حال بیایید این‌گونه گمانه‌زنی‌ها را در اینجا رها نموده و به کار خود بپردازیم.

امروزه بحث ناموضِعیت نیوتنی از نظریه‌های فیزیک ناپدید شده است. نظریه نسبیت عام اینشتین جایگزین نظریه نیوتن شده و نظریه نیوتن را در مقام یک تقریب بسیار خوب حفظ نموده است. مطابق نظریه فعلی، تاثیر جابجا نمودن یک سنگ بر روی سطح ماه بر وزن ما این‌جا روی زمین حدود یک ثانیه یا بیشتر مشاهده خواهد شد، یعنی زمانی که برای یک سیگنال لازم است تا با سرعت نور از ماه به زمین برسد.

داستان ناموضِعیت نیوتن در این‌جا به دو علت کاملاً متفاوت با موضوع کتاب مرتبط می‌باشد. از یک سو ممکن است این سوال پیش‌آید که ناموضِعیت کوانتومی نیز ممکن است موقتی باشد و بعداً توسط نظریه دیگری جایگزین گردد، نظریه‌ای که نشان دهد می‌توان این همبستگی‌ها که ما را قادر می‌سازد در بازی بِل برنده شویم را به‌صورت موضِعی در فضا و زمان توضیح داد و نظریه کوانتومی تنها یک تقریب خوب می‌باشد. همان‌طور که ما دیدیم استدلالات بِل از نظریه کوانتومی مستقل می‌باشد و این موضوع مستقیماً روشی را برای آزمودن ناموضِعیت فراهم می‌نماید. اگر ما در بازی بِل برنده می‌شویم، بنابرین طبیعت نمی‌تواند به‌صورت کامل توسط یک نظریه موضِعی، هر نظریه‌ای که باشد، توصیف گردد.

از سوی دیگر توجه به این موضوع شگفت‌آور است که فیزیک تقریباً همیشه برای ما یک توصیف ناموضِع از طبیعت فراهم نموده است. ما تا سال ۱۹۱۵ ناموضِعیت نیوتنی را داشته‌ایم و از سال ۱۹۲۷ ناموضِعیت کوانتومی را. بنابرین جز یک پنجره باریک ۱۲ ساله، فیزیک همواره ناموضِع بوده است. ممکن است تعجب نمایید که چگونه هنوز تعداد بسیاری از فیزیک‌دان‌ها مایل به پذیرش مفهوم ناموضِعیت نمی‌باشند.

البته تعجبی ندارد که اینشتین در راس این منتقدان قرار داشته باشد. به‌هرحال او کسی بود که پس از چندین قرن، بالاخره با موضِعی نمودن فیزیک پاسخی برای نیوتن فراهم نمود. این واقعیت که دوازده سال بعد نظریه دیگری ناموضِعیت را به قلب فیزیک برگرداند، کاملاً برای او غیر قابل‌تحمل بود. چقدر حیف شد که بین سال‌های ۱۹۳۰ و ۱۹۴۰ ایده درخشان بِل به ذهن هیچ‌کس نرسید. دیدن واکنش اینشتین می‌توانست بسیار دیدنی باشد!

روزنه آشکارسازی

در بازی بِل هربار که دسته به سمت چپ یا راست منحرف می‌گردد، جعبه‌ها یک نتیجه تولید می‌نمایند. در آزمایش‌های واقعی از این نوع، گاهی یک فوتون یا از دست رفته[1] و یا آشکارسازی نمی‌گردد که در این موارد هیچ نتیجه‌ای ثبت نمی‌گردد. فیزیک‌دان‌ها خیلی خوب می‌دانند که چرا برخی فوتون‌ها گم می‌شوند و چرا آشکارسازهای فوتونی بازدهی محدودی دارند. اما به‌هرحال در این‌جا بین بازی تئوری و آزمایش واقعی تفاوت‌هایی وجود دارد.

در عمل، فیزیک‌دان‌ها تنها به مواردی توجه می‌نمایند که هر دو جعبه‌های آلیس و باب نتیجه‌ای را تولید نموده‌اند. به عبارت دیگر آن‌ها به‌سادگی سایر موارد را نادیده می‌گیرند. آن‌ها فرض می‌نمایند نمونه‌ای که بدین‌طریق بدست‌آمده‌است، نشان‌دهنده کل گروه می‌باشد و این فرض را با این ادعا که طبیعت تقلب نمی‌نماید، یعنی طبیعت به‌صورت جانبدارانه نمونه‌ای را ارائه نمی‌دهد، توجیه می‌نمایند. این استدلال قانع-کننده‌ای می‌باشد، با این‌حال از آن‌جا که در این‌جا یک فرض صورت گرفته است، ما

[1] در اصل، این واقعیت که یک فوتون گم می‌شود اهمیت چندانی ندارد، درصورتی‌که این موضوع را قبل از پرسیدن هرگونه سوالی از آن بدانیم، یعنی قبل از منحرف نمودن دسته به سمت راست یا چپ. درغیراین‌صورت ممکن است فوتون هرگاه سوال را نامناسب ببیند تصمیم بگیرد که خود را بگونه‌ای گم نماید.

بایستی درنظر بگیریم که این فرض ممکن است برخی گریزها از ناموضِعیت را پنهان نماید.

تصور نمایید که جعبه‌های آلیس و باب راهبرد زیر را مورد استفاده قرار می‌دهند. در ساعت ۹ تنها درصورتی که دسته به سمت چپ جابجا گردد (ورودی صفر)، هریک از آن‌ها یک نتیجه تولید می‌نمایند و همچنین این‌که هر دو نتیجه در این مورد صفر می‌باشند. اگر دسته یکی از این جعبه‌ها به سمت راست منحرف گردد، آن جعبه به‌سادگی نتیجه‌ای تولید نمی‌نماید. در دقیقه بعدی آن‌ها درصورتی یک نتیجه تولید می‌نمایند که دسته به سمت راست منحرف گردد (ورودی یک)، که در آن مورد پاسخ برای آلیس ۱ و نتیجه برای باب صفر خواهد بود. آن‌ها به‌همین ترتیب ادامه می‌دهند، بگونه‌ای که هر دقیقه هر یک از دو جعبه تنها یک سوال را می‌پذیرند و در آن مورد یک نتیجه از قبل تعیین شده را تولید می‌نمایند. اگر دو جعبه از قبل توافقی با هم انجام داده باشند و اگر ما تنها مواردی را در نظر بگیریم که هر دو جعبه، به‌صورت شانسی، یک نتیجه را تولید نموده‌اند، دراین‌صورت می‌توان در بازی بِل ۴ بار از ۴ بار برنده شد! در واقع همه چیز بگونه‌ای رخ می‌دهد که انگار جعبه‌ها سوال را از قبل می‌دانسته‌اند، زیرا آن‌ها تنها به سوال‌هایی پاسخ می‌دهند که برای جواب‌دادن به آن‌ها آماده (برنامه‌ریزی) شده‌اند. از آن‌جا که تنها دو سوال ممکن وجود دارد، احتمال این‌که برای هر جعبه کاملاً به‌صورت شانسی سوال درست مطرح گردد ۵۰ درصد می‌باشد. بنابرین اگر در یک آزمایش مشخص، نیمی از فوتون‌ها در هر سمت گم‌شده و یا آشکارسازی نشوند، به‌سادگی می‌توان راهبردی برای "برنده شدن" در بازی بِل بسیار بیشتر از سه بار از ۴ بار را تصور نمود. حتی شخص می‌تواند با اطمینان قطعی "برنده شود". من بر روی کلمه "برنده شدن" علامت احتیاط قرارداده‌ام، چراکه ما در اینجا تقلب نموده‌ایم. جعبه‌ها همیشه پاسخ نمی‌دهند.

آیا ممکن است متغیرهای موضِعی اضافی، فوتون‌ها را بگونه‌ای برنامه‌ریزی نمایند که به برخی از سوال‌ها پاسخ ندهند، یعنی بگونه‌ای که آشکارسازها نتوانند آن‌ها را آشکارسازی نمایند؟ بیشتر فیزیک‌دان‌ها درمورد چنین فرضیه‌ای به شدت شک‌وتردید دارند. آن‌ها احساس می‌نمایند که درک خوبی از نحوه کار آشکارسازها دارند. به‌علاوه آزمایش‌های زیادی با انواع مختلف آشکارسازها انجام شده‌است: نیمه‌رسانایی، گرمایی و غیره. اما اگر ما فرضیه متغیرهای اضافی را جدی بگیریم، درواقع هیچ دلیلی وجود ندارد که فکر کنیم این متغیرها تاثیری بر احتمال‌های آشکارسازی ندارند. یک‌بار دیگر، تنها راه‌حل مناسب آزمایش می‌باشد. اما هیچ‌گونه آزمایشی نمی‌تواند به بازدهی صددرصد برای آشکارسازی برسد. یک راه‌حل برای دورزدن این مشکل این است که تصمیم بگیریم اگر دستگاه فیزیکی پاسخی تولید نکرد، ما این موارد را به‌عنوان پاسخ صفر به حساب آوریم. در این‌صورت ما همواره یک پاسخ خواهیم داشت، اما واضح است که عمده آن‌ها صفر خواهند بود.

می‌توان نشان داد که با استفاده از این راهبرد، شخص‌تنها نیاز دارد که ۸۲/۸ درصد فوتون‌ها را در بازی بِل آشکارسازی نماید تا به هیچ توضیحی بر اساس متغیرهای اضافی نیاز نشود (کادر ۱۰ را ببینید). با این وجود، ۸۲/۸ درصد هنوز برای تکنولوژی فوتون امروزه خیلی زیاد می‌باشد. خوشبختانه ما همچنین می‌توانیم بازی بِل را با ذرات دیگری بجز فوتون‌ها انجام دهیم. دو گروه از فیزیک‌دان‌ها در ایالات متحده برای برنده‌شدن در بازی بِل با حاشیه کافی که روزنه آشکارسازی را ببندد از یون‌ها (اتم‌هایی که تعدادی از الکترون‌های خود را از دست داده‌اند) استفاده نموده‌اند[۱].

[۱] M. A. Rowe, et al.: Experimental violation of Bell's inequalities with efficient detection, **149**, 791-794(2001); D.N. Matsukevich, et al.: Bell inequality violation with two remote atomic qubits, Phys. Rev. Lett. **100**, 150404(2008).

همچنین اخیراً تحقیقات جدیدی در مورد فوتون‌ها انجام شده است:

فائق‌آمدن به این روزنه، شرایطی که به‌وضوح مشکلات فنی موجود در آزمایش را نشان می‌داد، بیش از بیست سال به‌طول انجامید.

کادر ۱۰. روزنه آشکارسازی. اجازه دهید p را احتمال تولید یک نتیجه توسط جعبه آلیس در نظر بگیریم و فرض کنیم که جعبه باب نیز با همان احتمال یک نتیجه را تولید می‌نماید. بنابرین هر دو جعبه با احتمال p^2 در یک زمان معین یک نتیجه را تولید می‌نمایند. در این حالت آلیس و باب $2+\sqrt{2}=3.41$ بار از ۴ بار در بازی بِل برنده می‌شوند. احتمال این‌که هیچ نتیجه‌ای در زمان داده شده تولید نگردد $(1-p)^2$ می‌باشد. در این‌حالت آلیس و باب این‌ها را به‌عنوان صفر قلمداد نموده و بنابرین ۳ بار از ۴ بار برنده می‌گردند. هنگامی که تنها یک جعبه در زمان معین نتیجه‌ای را تولید می‌نماید، که احتمال آن $2\mathrm{p}(1-\mathrm{p})$ می‌باشد، آلیس و باب در نیمی از زمان، یعنی ۲ بار از ۴ بار، برنده می‌شوند. بنابرین به‌صورت میانگین نرخ برنده شدن آلیس و باب عبارت است از:

$$p^2\left(2+\sqrt{2}\right)+2p(1-p)\times 2+(1-p)^2\times 3$$

که بزرگتر از ۳ است اگر و تنها اگر p از مقدار $\frac{2}{1+\sqrt{2}}=82.8\ \%$ بزرگتر باشد.

روزنه موضِعیت:

مشکل مهم بعدی در هر نمایش عملی از بازی بِل، نیاز به همزمان‌سازی بالا می‌باشد. جعبه آلیس می‌بایست نتیجه a را قبل از این‌که انتخاب باب بتواند به آن مخابره گردد تولید نماید، چه به‌صورت عمدی باشد چه غیرعمدی، چه آشکارا باشد یا به روشی پنهانی. در حال حاضر نظریه نسبیت بیشینه سرعتی، یعنی سرعت نور، را برای هرگونه مخابره‌ای اعمال می‌نماید. بنابرین از لحظه‌ای که باب انتخاب خود y را انجام می‌دهد

M. Giustina, A. Mech, S. Ramelow, B. Wittmann, J. Kofler, J. Beyer, a. Lita, B. Calkins, T. Gerrits, S. W. Nam, R. Ursin, A. Zeilinger: Bell violation using entangled photons without the fair-sampling assumption, Nature **497**, 227(2013); B.G. Christensen, K.T.McCusker, J.B. Altepeter, B.Calkins, T.Gerrits, A.E. Lita, A.Miller, L.K. Shalm, Y. Zhang, S.W. Nam, N, Brunner, C.C.W.Lim,N.Gisin, P.G. Kwiat: Detection-loopole-free test of quantum nonlocality and applications, Phys. Rev. Lett. **111**, 130406 (2013).

تا لحظه‌ای که جعبه آلیس نتیجه a خود را تولید می‌نماید، مدت زمانی که سپری می‌شود نباید از مدت زمانی که طول می‌کشد نور فاصله بین جعبه‌های آلیس و باب را طی می‌نماید بیشتر گردد. برعکس، هیچ اطلاعاتی درمورد انتخاب آلیس، نباید زمان داشته باشد تا به جعبه باب قبل از این‌که نتیجه b را تولید نماید، برسد. درغیر-این‌صورت این موضوع باعث به‌وجود آمدن چیزی به‌نام روزنه موضِعیت می‌گردد. درواقع از منظر نسبیت، آلیس و باب به‌صورت موضِعی با هم در ارتباط خواهند بود[۱].

برای بستن روزنه موضِعیت، باید بازی بِل را انجام دهیم (و در آن بیشتر از ۳ بار از ۴ بار برنده شویم) درحالی‌که اطمینان حاصل نماییم که آلیس و باب به اندازه کافی از یکدیگر فاصله داشته باشند و به‌خوبی همزمان‌سازی شده باشند. به قول فیزیک‌دان‌ها آن‌ها می‌بایست با فاصله‌ای فضاگونه از هم جداشده‌باشند. توجه نمایید که این جداسازی در مکان آلیس به تمام بازه زمانی از لحظه‌ای که انتخاب x انجام می‌شود تا زمانی که نتیجه a ثبت می‌گردد مربوط می‌شود (x و a متغیرهای کلاسیکی هستند و تعیّن‌ناپذیری کوانتومی درمورد آن‌ها صدق نمی‌نماید). از این منظر، تمامی این بازه می‌بایست از تمامی بازه متناظر مربوط به باب مجزا باشد.

برای نشان‌دادن مشکلات فنی، همانند آزمایش مشهور انجام شده توسط آلن اسپکت که در زیر توصیف شده است، تصور نمایید که آلیس و باب ۱۰ متر از یکدیگر فاصله دارند. ۳۰ میلیاردم ثانیه طول می‌کشد تا نور این فاصله را بپیماید. به‌وضوح می‌توان دید که انجام یک انتخاب و انجام یک اندازه‌گیری (معادل جابجا نمودن دسته) و ثبت نتیجه در چنین مدت کوتاهی کار بینهایت دشواری می‌باشد. واضح است که مسئله‌ای

[۱] برای کسانی که در مورد نظریه نسبیت احساس نگرانی می‌کنند، توجه به این نکته ممکن است مفید واقع گردد: اگر یک سیگنال نوری نتواند دو رخداد را در یک چارچوب مرجع لَخت به یکدیگر وصل نماید، بنابرین قادر نخواهد بود در هیچ چارچوب لخت دیگری این کار را انجام دهد، بنابرین، این مفهوم مستقل از چارچوب است.

در خصوص یک انتخاب آزادانه توسط شخص وجود ندارد، همچنین در خصوص منحرف نمودن یک دسته، اما حتی با استفاده از تجهیزات اپتوالکترونیک مدرن امروزی نیز، فاصله ۱۰ متر بسیار کم است. برای این‌کار به فاصله چند صد متری، یا در حالت بهتر چندین کیلومتری، نیاز خواهد داشت. یا این‌که شخص انجام دهنده آزمایش باید به اندازه یک فیزیک‌دان باهوش باشد.

اما قبل از این‌که بررسی کنیم که چگونه آلن اسپکت و گروهش این مشکل را دورزدند، توجه نمایید که در اکثر قریب به اتفاق آزمایش‌های بِل (فیزیک‌دان‌ها نمی‌گویند بازی بِل، آزمایش بِل جدی‌تر به نظر می‌رسد)، به این روزنه توجه کمی صورت می‌گیرد. یک دلیل این موضوع دقیقاً این است که مواجه شدن با آن بسیار مشکل است، اما دلیل شایع‌تر این است که دانشمندانی که این آزمایش را طراحی نموده‌اند، خیلی خوب می‌دانند که برای این‌که از تقلب نمودن دانش‌آموزان برای قبولی در امتحاناتشان جلوگیری نماییم، مانند مورد جعبه‌های آلیس و باب برای برنده شدن در بازی، واقعاً الزامی نیست که آن‌ها را در فاصله‌ای فضاگونه از یکدیگر قرار دهیم. تنها کافی است مطمئن شویم که هیچ راه عملی برای تاثیر آن‌ها روی یکدیگر وجود ندارد.

برای رفع این مشکل در آزمایشگاهی که تنها حدود ۱۰ متر طول دارد، آلن اسپکت استراتژی زیر را مطرح نمود. وقتی که فوتون‌ها منبع خود را ترک نمودند، توسط نوعی از آینه‌های مرتعش به‌صورت رندم به سمت یکی از دو دستگاه اندازه‌گیری هدایت می‌گردند. هر یک از وسیله‌های اندازه‌گیری همواره اندازه‌گیری (انتخاب) یکسانی را انجام می‌دهد، اما از آنجا که دو دستگاه وجود دارد، زمانی که فوتون‌ها چشمه را ترک می‌نمایند و در فضا از یکدیگر فاصله می‌گیرند، نمی‌توانند پیش‌بینی نمایند که به سمت کدام وسیله اندازه‌گیری حرکت خواهند نمود. بنابرین نمی‌توانند

سوالی که باید پاسخ دهند را پیش‌بینی نمایند. با استفاده از این حقه تنها مشکل این خواهد بود که اطمینان حاصل شود جهت‌های دو آینه، یکی به سمت آلیس و دیگری به سمت باب، واقعاً مستقل از یکدیگر و در فرکانسی به اندازه کافی بالا ارتعاش نمایند بگونه‌ای که اطلاعات هرکدام از طرفین هیچ‌گونه تاثیری روی طرف مقابل نداشته باشد. پس مشکل باقی‌مانده این است که مطمئن شویم آینه‌ها واقعاً رندمی و مستقل از یکدیگر ارتعاش می‌نمایند.

با کمک این استراتژی، اسپکت و همکارانش در سال ۱۹۸۲ توانستند روزنه موضِعیت را ببندند[۱]. این آزمایش که در اورسای دقیقاً در جنوب پاریس انجام شد به‌عنوان یک واقعه برجسته در تاریخ فیزیک باقی خواهد ماند. از آن پس، چندین آزمایش دیگر نیز موفق به بستن این روزنه شدند. در سال ۱۹۹۸، آنتون زِلینگر در دانشگاه اینسبراک اتریش آزمایش بسیار برازنده‌ای انجام داد که فاصله‌ای چندصد متری را شامل می‌شد[۲]. در این آزمایش از دو مولد اعداد کوانتومی استفاده نمود تا انتخاب‌های آلیس و باب را تولید نمایند و نتایج را به‌طور موضِعی در دو کامپیوتر ثبت نمایند. هر کامپیوتر زمان رخدادها، انتخاب‌ها و نتایج آن‌ها را ثبت می‌نمود. بدین صورت در بازی بِل به‌طور میانگین ۳/۳۶۵ بار از ۴ بار برنده شد.

ما نیز در ژنو با استفاده از شبکه مخابراتی فیبر نوری اپراتور ملی‌مان سویس‌کام بین دو روستا، بلوو در شمال و برنکس در جنوب ژنو، و در فاصله‌ای کمی بیشتر از ۱۰ کیلومتر این روزنه را بستیم[۳]. برای انجام این کار ما از حقه‌ای کمی متفاوت با آن‌چه

---

[۱] Aspect, A., Dalibard, J., Roger, G.: Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers, Phys. Rev. Lett. **49**, 91-94 (1982).

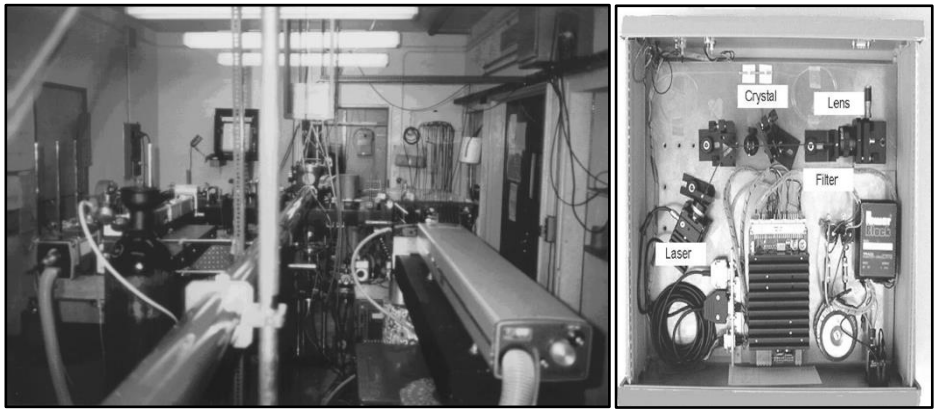
[۲] Weihs, G. Jenneswein, T., Simon, C., Weinfurter, H., Zeilinger, A.: Violation of Bell's inequality under strict Einstein locality conditions, Phys. Rev. Lett. **81**, 5039 (1998).

[۳] Tittel, W., Brendel, J., Zbinden, H., Gisin, N.: Violation of Bell inequalities by photons more than 10 km apart, art. Cit.; Tittel, W., Brendel, J., Gisin, N., Zbinden, H.: Long-

اسپکت اعمال نمود استفاده نمودیم[۱]. در طرف آلیس یک آینه نیمه شفاف فوتون‌ها را به‌صورت رندمی به یکی از دو دستگاه اندازه‌گیری که معادل حرکت دسته به سمت چپ و یا به دستگاه اندازه‌گیری دیگری که متناظر با حرکت دسته به سمت راست می‌باشد، هدایت می‌نماید و در هر زمان مشخص در واقع تنها آشکارسازهای یکی از این دو دستگاه فعال می‌باشد. درنتیجه در هر زمان تنها یک وسیله اندازه‌گیری در طرف آلیس وجود خواهد داشت که آماده اندازه‌گیری فوتون ورودی می‌باشد. واضح است که ما نیمی از فوتون‌ها را از دست می‌دهیم و بنابرین روزنه آشکارسازی را باز می‌نماییم، اما به‌هرحال به‌خاطر اتلاف‌های درون فیبر نوری و محدودیت بازدهی آشکارسازها این روزنه از قبل کاملاً باز بوده است. در حقیقت آزمایش ما معادل آزمایش‌های انجام شده در پاریس و اینسبراک بود اما انجام آن بسیار ساده‌تر می‌باشد. شکل ۹,۱b چشمه جفت‌فوتون‌های درهم‌تنیده ما را نشان می‌دهد. توجه کنید که این جعبه کوچک که با فیبرهای نوری استاندارد سازگار می‌باشد معادل تمامی آزمایشگاه اسپکت نشان داده شده در شکل ۹,۱a می‌باشد. بدین‌گونه است که پیشرفت‌های تکنولوژی و مقدار زیادی از تخیل فیزیک‌دان‌ها منجر به پیشرفت‌های چشمگیری در ۱۵ سال گذشته شده است!

distance Bell-type tests using energy-time entangled photons, Phys. Rev. A **59**, 4150 (1999).

[۱] Gisin, N., Zbinden, H.: Bell inequality and the locality loophole. Active versus passive switches, Phys. Lett. A **264**, 103-107 (1999).



شکل ۹,۱ دو قسمت این شکل پیشرفت‌های بزرگی که در زمینه تکنولوژی کوانتومی انجام شده است را نشان می‌دهد. سمت چپ آزمایشگاه آلن اسپکت در سال ۱۹۸۲ را نشان می‌دهد، زمانی که او اولین شخصی شد که در بازی بِل برنده گردید. ما یک آزمایشگاه بزرگ را می‌بینیم که با تجهیزات حجیمی که چشمه فوتون‌های درهم‌تنیده را برای این آزمایش تاریخی تولید می‌نمایند، پر شده است. سمت راست چشمه‌ای است که ما در سال ۱۹۹۷ در ژنو برای انجام اولین آزمایش درهم‌تنیدگی خارج از آزمایشگاه بین دو روستای برنکس و بلوو مورد استفاده قرار دادیم. این جعبه نیمه‌خالی حدود ۳۰ سانتی‌متر طول دارد و شامل چشمه فوتون‌های درهم‌تنیده‌ای می‌باشد که حتی از نمونه‌ای که اسپکت استفاده نمود بازدهی بیشتری دارد. این دو آزمایش تنها ۱۵ سال با هم فاصله‌زمانی دارند.

یک ترکیب از روزنه‌ها

آزمایش اسپکت در سال ۱۹۸۲ و در ادامه آزمایش‌های انجام شده در اینسبراک و ژنو روزنه موضعیت را بستند. البته در این سه آزمایش روزنه آشکارسازی همچنان کاملاً باز باقی ماند، و در آزمایش‌هایی که این روزنه بسته شد، روزنه موضِعیت باز می‌ماند. بنابرین به‌طور منطقی ممکن است طبیعت، بسته به شرایط، از یکی یا هر دوی این روزنه‌ها استفاده نماید تا ما را از درک صحیح موضوع گمراه نماید. اما این موضوع آن‌قدر غیرمحتمل می‌باشد که امروزه هیچ فیزیک‌دانی آن را نمی‌پذیرد. در حقیقت آن‌ها تمایل دارند که طبیعت را به‌عنوان یک یار قابل اعتماد و قابل تکیه

درنظر بگیرند. طبیعت تقلب نمی‌نماید. همان‌طور که اینشتین می‌گفت، خداوند زیرک و ماهر است ولی بداندیش و بدخواه نمی‌باشد. از طرف دیگر، وقتی با انتخاب بین طبیعت ناموضِع و طبیعت دیگری که از برخی قوانین پیچیده پیروی می‌کند و فعلاً ما را نجات می‌دهد ولی به خود اجازه می‌دهد برای زمان محدودی از هر دو روزنه موضِعیت و روزنه آشکارسازی به‌صورت همزمان استفاده نماید، مواجه می‌شویم، شرایط آن‌قدرها هم روشن و واضح نمی‌باشد. و از آن‌جا که ما در این‌جا در مورد علم تجربی صحبت می‌کنیم، تنها راه صادقانه این خواهد بود که آزمایشی را انجام دهیم که به‌طور همزمان هر دو روزنه را بیازماید.

تنها علتی که چرا این آزمایش هنوز انجام نشده است این است که خیلی سخت است. برای بستن روزنه آشکارسازی بهتر است که از ذرات سنگین استفاده نمود، زیرا آشکارسازی آن‌ها از فوتون‌ها آسان‌تر است، اما در مورد روزنه موضِعیت، فوتون‌ها ارجحیت دارند زیرا آسانتر در مسافت‌های طولانی منتشر می‌گردند. بنابرین به نظر می‌رسد که ما می‌بایست منتظر تکنولوژی‌های پیشرفته‌تری باشیم که با استفاده از آن‌ها بتوانیم از فوتون‌های درهم‌تنیده برای تعمیم‌دادن درهم‌تنیدگی در فواصل طولانی استفاده نماییم، سپس این درهم‌تنیدگی را به اتم‌ها تلپورت نماییم، اول از همه برای این‌که چک کنیم که فوتون‌ها واقعاً رسیده‌اند یا خیر، اما همچنین در ادامه ما را قادر سازد تا آن‌ها را آشکارسازی نماییم. این چشم‌انداز شگفت‌انگیز احتمالاً در ۳ سال آینده به واقعیت بپیوندد.

اما واقعیت این است که یک ترکیب منطقاً ممکن از روزنه‌ها باقی می‌ماند که باید مورد تست قرار گیرد.

ارتباط پنهان سریع‌تر از نور

آیا راه‌های دیگری نیز وجود دارد؟ این سوال سختی می‌باشد چرا که همواره خطر عدم وجود تصور و تخیل وجود دارد. به‌هرحال به نظر می‌رسد که فیزیک‌دان‌ها، فیلسوف‌ها، ریاضی‌دان‌ها و نظریه‌پردازهای علم اطلاعات سعی نموده‌اند از عهده این پرسش برآیند و هیچ جایگزین معتبری برای آن شناسایی نشده‌است. با این‌وجود ما چندین امکان را بررسی می‌نماییم.

اولین ایده‌ای که به ذهن خطور می‌کند درمورد برخی تاثیرات مخفی می‌باشد، مخفی به معنای پنهان از چشمان فیزیک‌دان‌های آغاز قرن بیست‌ویکم، که از آلیس به باب با سرعتی بالاتر از سرعت نور منتشر می‌گردد. تا حدی جای تعجب دارد که کتاب‌های درسی در فیزیک غیرنسبیتی درباره آزمایش بِل این‌گونه توضیح می‌دهند: اندازه‌گیری انجام شده توسط آلیس باعث "فروریختن" تابع موج در سمت باب می‌گردد. این توضیح با نسبیت سازگار نمی‌باشد اما به‌خاطر فقدان توضیحی بهتر، این روشی است که ما دانش‌جویان را درس می‌دهیم!

این فرضیه تاثیر پنهانی، همچنین بینش جان بِل را تشکیل می‌داد وقتی می‌گفت که همه چیز بگونه‌ای اتفاق می‌افتد که "انگار نوعی دسیسه در پشت پرده اتفاق می‌افتد که مجاز به نشان‌دادن خود بر روی صحنه نمی‌باشد"[۱].

[۱] P.C.W.Davies, J.R. Brown (Eds): The Ghost in the Atom, Cambridge University Press (1986), pp. 48-50.

یک سرعت ماورائی تنها درصورتی می‌تواند تعریف گردد که ما فرض نماییم این سرعت نسبت به یک چاچوب مرجع لَخت خاص که چارچوب مرجع متمایز[۱] نامیده می‌شود تعیین می‌گردد. یادآوری می‌کنیم که یک چارچوب لَخت، انتخابی از محورهای مختصات فضایی است که با سرعت ثابت حرکت می‌نمایند.

این فرض که یک چارچوب ارجح وجود دارد برخلاف روح نظریه نسبیت می‌باشد و بنابرین درنظر بیشتر فیزیک‌دان‌ها کفرآمیز محسوب می‌گردد. اما این فرضیه‌ی چارچوب ارجح در واقع نظریه نسبیت را نقض نمی‌نماید. برای دیدن این موضوع، باید توجه نماییم که امروزه کیهانشناسی دقیقاً چنین چارچوبی را در خود جای داده، یعنی چارچوبی که از زمان بیگ-بنگ به عنوان مرکز جرم جهان تعیین شده است. حتی فیزیک‌دان‌ها آن را با دقت خارق‌العاده‌ای به‌عنوان چارچوبی که در آن نویزهای مایکروویو زمینه، بقایای بیگ-بنگ که هنوز هم کل جهان را پر نموده‌است، ایزوتروپیک[۲] هستند، اندازه‌گیری نموده‌اند. نسبت به این چارچوب، زمین با سرعت ۳۶۹ کیلومتر بر ثانیه در حرکت می‌باشد[۳]. همچنین جهت حرکت زمین کاملاً تثبیت شده است.

بنابرین فرضیه یک چارچوب ارجح که در آن "تاثیرات" می‌توانند با سرعتی بالاتر از سرعت نور منتشر گردند، نبایست از ابتدا مردود تلقی گردد. آیا این موضوع نوعی

---

[۱] توضیح مترجم: چارچوب مرجع متمایز یا چارچوب مرجع مرجح (ارجح) (preferred or privileged frame) در فیزیک تئوری معمولاً یک چارچوب فرضی خاص است که قوانین فیزیک در آن ساده‌تر از سایر دستگاه‌های مرجع ظاهر می‌شوند.

[۲] توضیح مترجم: خاصیتی را ایزوتروپیک (Isotropic) یا همسان‌گرد می‌گویند که در تمام جهات یکسان باشد. به زبان ریاضی نسبت به گروه دوران‌های فضایی تقارن داشته باشد.

[۳] Lineweaver, C., et al.: The dipole observed in the COBE DMR 4 year data, Astrophys. J. 38, 470 (1996). http://pdg.lbl.gov.

توضیح را برای همبستگی‌های ناموضِع فراهم نمی‌نماید؟ اگر این‌گونه باشد چنین همبستگی‌هایی اصلاً ناموضِع نخواهند بود، زیرا ما می‌بایست برای آن توضیحی موضِعی، یعنی مکانیزمی که از یک نقطه از فضا به نقطه دیگر منتشر گردد، پیدا می‌کردیم. اما چگونه می‌توانیم چنین فرضیه‌ای را تست نماییم وقتی اصلاً نمی‌دانیم این چارچوب متمایز فرضی چیست؟ ایده اصلی برای این‌که بتوانیم چنین تستی را انجام دهیم، همان ایده‌ای است که برای روزنه موضِعیت وجود داشت: آلیس و باب می‌بایست به‌طور همزمان تصمیم خود را گرفته و نتایج خود را گردآوری نمایند بگونه‌ای که تاثیرات فرضی نتوانند به‌موقع برسند. یا با مسافت بزرگتری از یکدیگر فاصله بگیرند یا همزمانی خود را بهبود ببخشند. مشکل اینجاست که می‌بایست چارچوبی را تعیین نمود که در آن آلیس و باب مجبور شوند همزمان گردند، زیرا مطابق نظریه نسبیت اگر آن‌ها در یک چارچوب همزمان باشند، دیگر چارچوب‌هایی وجود دارد که در آن‌ها کاملاً غیر همزمان هستند. اگر سرعت کمتر و یا مساوی سرعت نور باشد چنین مشکلی وجود نخواهد داشت، زیرا اگر همزمان‌سازی بگونه‌ای باشد که نور نتواند در یک چارچوب به‌موقع برسد، بنابرین در هر چارچوب دیگری نیز به‌موقع نخواهد رسید. اما در مورد سرعت‌های بالاتر ما نیاز داریم چارچوبی را بشناسیم که در آن آلیس و باب مجبور به همزمان‌سازی شوند.

فیزیک‌دان سوئیسی فیلیپ اِبرهارد که در آزمایشگاه ملی لارنس برکلی (LBNL)[1] در نزدیکی برکلی در ایالات متحده کار می‌کرد حقه زیرکانه‌ای برای تست‌نمودن یکباره تمامی چارچوب‌های مرجع فرضی ممکن ارائه نمود. ایده او نسبتاً ساده می‌باشد. مخاطب کنجکاو می‌تواند خلاصه‌ای از آن را در کادر ۱۱ مشاهده نماید. این‌جا به این

[1] Lawrence Berkeley National Laboratory.

نکته بسنده می‌کنیم که در این ایده از چرخش ۲۴ ساعته زمین استفاده می‌شود و لازم است آلیس و باب در امتداد محور شرق-غرب قرار گیرند.

این آزمایش توسط گروه ما بین دو روستا در نزدیکی ژنو به فاصله ۱۸ کیلومتر از هم، ساتیگنی[۱] در غرب و جسی[۲] در شرق ژنو، انجام شده‌است. این آزمایش ۱۲ ساعت به‌طول‌انجامید، یعنی زمانی که مورد نیاز است تا زمین یک نصفه دور بچرخد، و چهاربار نیز تکرار شد[۳]. یک گروه ایتالیایی نیز آزمایش مشابهی را انجام دادند[۴]. تفسیر این نتایج کمی پیچیده است زیرا به سرعت زمین نسبت به این چارچوب ارجح فرضی وابسته می‌باشد، سرعتی که البته معلوم نیست. اگر ما فرض نماییم که این سرعت از سرعت زمین نسبت به مرکز جرم جهان کمتر است، بنابرین آزمایش می‌تواند هرگونه تاثیری را تا سرعت پنجاه هزار برابر سرعت نور مستثنی نماید. این به خودی خود سرعت مطلقاً غول‌آسایی می‌باشد، بسیار بزرگتر از چیزی که بیشتر ما بتوانیم تصور نماییم، و فیزیک‌دان‌ها نتیجه می‌گیرند که چنین تاثیری نمی‌تواند وجود داشته باشد. بنابرین به نظر می‌رسد که چنین "رابطه شبه‌واری از فاصله دور"، همانند نظر معروف اینشتین، نمی‌تواند وجود داشته باشد. یک‌بار دیگر به نظر می‌رسد که همبستگی‌های ناموضِع بگونه‌ای از خارج فضا-زمان پدیدار می‌شوند.

اما سرعت پنجاه هزار برابر سرعت نور ممکن است کافی نباشد. شاید لازم باشد که ما آزمایش را با دقت‌های بزرگتری تکرار نماییم تا سرعت‌های تا یک‌میلیون برابر سرعت

---

[۱] Satigny

[۲] Jussy

[۳] Salart Subils, D., Baas, A., Branciard, C., Gisin, N., Zbinden, H.: Testing the speed of "spooky action at a distance", Nature **454**, 861-864 (2008).

[۴] Cocciaro, B., Faetti, S., Fronzoni, L.: A lower bound for the velocity of quantum communications in the preferred frame, Phys. Lett. A **375**, 379-384 (2011).

نور را مستثنی نماییم. به‌خاطر آورید که نسبت سرعت نور به سرعت صوت در هوا حدود یک میلیون می‌باشد (۳۴۰ متر بر ثانیه در مقایسه با ۳۰۰،۰۰۰ کیلومتر بر ثانیه)، بنابرین چرا نباید یکبار دیگر سرعت قابل توجه بعدی یک میلیون برابر بزرگتر باشد؟

کادر۱۱: آزمایش ساتیگنی- جسی. تصور نمایید که آلیس و باب بر روی یک محور شرق-غرب قرار گرفته‌اند و اندازه‌گیری‌های آن‌ها بر طبق ساعت‌هایشان همزمان می‌باشد، یعنی نسبت به چارچوبی که با با ژنو حرکت می‌نماید همزمان هستند. از آن‌جا که زمین به‌دور محور خود می‌چرخد، چارچوب ژنو در تمامی مدت تغییر می‌نماید، اما این تغییر بسیار کند است و بنابرین می‌توان آن را در زمان مورد نیاز برای اندازه‌گیری نادیده گرفت. مطابق نظریه نسبیت، همچنین اندازه‌گیری‌های آلیس و باب در این مورد نسبت به هر چارچوب لَختی که در جهت عمود بر محور آلیس- باب حرکت می‌نماید، و در نتیجه نسبت به هر چارچوبی که در صفحه گذرنده از قطب‌های شمال و جنوب حرکت می‌کند، همزمان می‌باشند. در طول یک دوره ۱۲ ساعته، زمانی که زمین یک نصفه‌دور حول محور خود می‌چرخد، همچنین این صفحه نیم‌دور می‌چرخد. در این‌صورت تمامی فضا را جاروب می‌نماید. بنابرین اگر آلیس و باب همچنان برای ۱۲ ساعت به بازی بِل ادامه دهند و اگر چنین چارچوب ارجحی وجود داشته باشد، لزوماً زمان‌هایی وجود خواهد داشت که اندازه‌گیری‌های آن‌ها نسبت به چارچوب ارجح کاملاً همزمان خواهد بود. اگر آلیس و باب به برنده شدن در بازی بِل بیش از ۳ بار از ۴ بار ادامه دهند، توضیح توسط یک ارتباط ماورائی تعیین شده در یک چارچوب ارجح باطل خواهد شد. در عمل همزمان‌سازی کامل و تمام‌عیار نمی‌باشد، جهت‌گیری محور شرق- غرب شامل خطاهایی خواهد بود و زمان لازم برای انجام آزمایش بِل کاملاً قابل چشم‌پوشی نخواهد بود، بنابرین در این آزمایش‌ها ما تنها می‌توانیم یک حد پایین برای سرعت این تاثیر ماورائی فرضی قائل شویم.

ممکن است برخی وجود اثری که بتواند با سرعت نامتناهی حرکت کند را در نظر بگیرند که همچنان نسبت به یک چارچوب ارجح تعریف شده باشد. همچنان که توسط دیوید بوهم در سال ۱۹۵۲ (سالی که من به‌دنیا آمدم) نشان داده شد این

موضوع درواقع از دیدگاه ریاضی ممکن است[۱]. به‌هرحال این فرضیه بر این موضوع دلالت دارد که تاثیرات می‌توانند به‌صورت آنی نواحی دلخواهی از فضا را به یکدیگر متصل نمایند. اما اگر تاثیرات بتوانند به‌طور آنی نواحی دلخواهی از فضا را به یکدیگر متصل نمایند، ما فضا را چگونه می‌توانیم تصور نماییم؟ در یک معنا، پذیرفتن چنین تاثیراتی به‌عنوان توضیحی برای همبستگی‌های ناموضِع به این معناست که شخص می‌تواند بپذیرد که در واقع این تاثیرات در فضای ما منتشر نمی‌گردند و در عوض راه‌های میان‌بری با طول صفر را خارج از فضای ما اختیار می‌نمایند. بنابرین قدرت توضیحی چنین فرضیه‌ای به نظر من ضعیف می‌باشد[۲]. تعداد انگشت‌شماری از فیزیک‌دان‌ها به این جایگزین علاقمند می‌باشند، اگرچه باید گفته شود اندک فیلسوفانی نیز به آن نظر مثبت دارند.

برخی نظریه‌پردازان با نشان دادن این‌که، تحت فرضیات مناسب، هرگونه اثر فرانوری الزاماً در نهایت به یک ارتباط سریع‌تر از نور ختم می‌شود، سعی کردند تا به مشکل آزمایش‌ها که بدون وضع‌کردن یک حد پایین برای سرعت این تاثیرات فرضی هیچ‌گاه قابل انجام نیست، فائق آیند[۳]. از آن‌جا که این موضوع توسط نظریه نسبیت ممنوع می‌باشد، بنابرین می‌توانیم این‌گونه نتیجه‌گیری نماییم که هیچ‌گونه تاثیر پنهانی با

---

[۱] Bohm, D.: A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables, Phys. Rev. **85**, 2 (1952).

[۲] برای جلوگیری کردن از داشتن ارتباط بدون انتقال، مدل بوهم فرض می‌نماید که برخی متغیرها برای همیشه خارج از دسترس ما می‌باشند. اما متغیرهای ذاتاً و دائماً غیرقابل دسترس، متغیرهای فیزیکی نمی‌باشند. جالب است که بوهم خودش نوشت: "این کاملاً ممکن است که همبستگی‌های ناموضِع کوانتومی منتشر گردند، نه با سرعت‌های نامتناهی، بلکه با سرعت‌هایی بسیار بالاتر از سرعت نور. در این حالت ما می‌توانیم انتظار انحرافات قابل مشاهده‌ای از پیش‌بینی‌های نظریه مکانیک کوانتومی فعلی را داشته‌باشیم (به عنوان مثال با تعمیم آزمایشی شبیه به آزمایش آلن اسپکت).
See D. Bohm and B.J. Hiley, The Undivided Universe , Routledge, London and NY 1993 (p.347 of the paperback edition).

[۳] Scaran, V., Gisin, N.: Superluminal hidden communication as the underlying mechanism for quantum correlations. Constraining models, Brazilian Journal of Physics **35**, 328-332 (2005); Bancal, J. D., Pironio, S., Acin, A., Liang, Y.C., Scarani, V., Gisin, N.: Quantum nonlocality based on finite-speed casual influences leads to superluminal signaling, Nature Physics **8**, 867 (2012).

هرگونه سرعتی وجود ندارد. این موضوع، یک برنامه تحقیقاتی ارزشمندی خواهد بود که یک‌بار برای همیشه هرگونه فرضیه‌ای را که شامل تاثیرات ماورائی پنهان باشد را مردود نماید. در یک انطباق خوشحال کننده، زمانی که این کتاب در حال نوشته‌شدن بود گروهی از نظریه‌پردازها تمامی توضیحات ناموضِعیت که به انتشار تاثیرات با هر سرعت محدودی متوسل شده باشد را مستثنی نموده‌اند (فصل ۱۰ را ببینید).

آلیس و باب هر کدام قبل از دیگری به اندازه‌گیری می‌پردازند

مایل هستم به‌صورت خلاصه ایده دیگری که نشان می‌دهد چگونه فیزیک‌دان‌ها سعی نموده‌اند راه‌هایی را برای نپذیرفتن ناموضِعیت تصور نمایند، را مورد بحث قرار دهم. بر طبق این فرضیه که توسط آنتوینه سوارِز و والریو اسکارانی[۱] مطرح شده است، وقتی جعبه آلیس یک نتیجه را تولید می‌نماید، بقیه جهان و به‌طور ویژه جعبه باب را با سرعتی فراتر از نور مطلع می‌سازد. عکس این حالت از جعبه باب به آلیس نیز اتفاق می‌افتد. بنابرین اولی که نتیجه‌ای را تولید نماید دومی را مطلع می‌سازد و سپس مانند آن‌چه در بخش قبل گفته‌شد، آن را برای برنده‌شدن در بازی بِل مورد استفاده قرار می‌دهد. اما بر طبق این فرضیه، سرعت فراتر از سرعت نور نسبت به چارچوب ارجح جهانی تعیین نشده است بلکه نسبت به چارچوبی که در آن جعبه منتشرکننده در حال سکون است (آن‌گونه که فیزیک‌دان‌ها می‌گویند در دستگاه مختصات لخت آن) تعیین گردیده است. به این ترتیب هر "جعبه" و زبان دقیق‌تر هر جزء از دستگاه اندازه‌گیری، یک چارچوب لَخت را تعریف می‌نماید و بررسی پیامدهای این ایده که این چارچوب‌ها سرعت اطلاعاتی که منتشر می‌کنند را تعیین می‌نمایند، موضوع جالبی خواهد بود.

آزمودن چنین فرضیه‌ای مشکل به نظر می‌رسد. در واقع در سال ۱۹۹۷ وقتی‌که سوارز و اسکارانی فرضیه خود را ارائه نمودند، این فرضیه با تمامی آزمایش‌هایی که تا آن موقع انجام شده‌بودند سازگار بود. اما موقعیت زیر را درنظر بگیرید. آلیس و باب همراه

[۱] Antoine Suarez and Valerio Scarani.

با جعبه‌های خود و با سرعت بسیار بالایی از یکدیگر فاصله می‌گیرند که در نتیجه چارچوب لخت آلیس با چارچوب لخت باب یکسان نخواهد بود. یادآوری می‌کنیم که طبق نظریه نسبیت اینشتین ترتیب زمانی دو رویداد از دید دو چارچوب که نسبت به یکدیگر در حرکت می‌باشند، ممکن است متفاوت باشد. بنابرین ما می‌توانیم آزمایش فوق را بگونه‌ای ترتیب دهیم که آلیس در چارچوب خودش انتخاب خود را انجام داده و نتیجه‌اش را قبل از باب دریافت نماید، درحالی‌که در همان آزمایش، باب در چارچوب خود انتخاب خود را انجام داده و او نیز نتیجه خود را قبل از آلیس دریافت نماید. فیزیک‌دان‌ها به این آزمایش "قبل از- قبل از"[۱] می‌گویند، زیرا هر یک از دو بازیکن، آلیس و باب، قبل از دیگری عمل می‌نمایند! می‌توان از جادوی نظریه نسبیت برای آزمودن جادوی نظریه کوانتوم استفاده نمود.

مشکل اصلی برای انجام آزمایش "قبل از- قبل از" این است که جعبه‌های آلیس و باب می‌بایست با سرعت به اندازه کافی بالا حرکت نمایند تا اطمینان حاصل شود که ترتیب زمانی رویدادها واقعاً در دو چارچوب معکوس شود. این موضوع قطعاً مشکل است ولی غیر ممکن نیست، حداقل با کمی تخیل. قرار دادن کل آزمایشگاه آلیس درون یک سفینه فضایی کار واقع‌بینانه‌ای نیست، به‌هرحال تنها کافی است که جزء کلیدی، جزئی که رویداد واقعاً شانسی-گونه در آن اتفاق می‌افتد، را به حرکت درآوریم. در آزمایش اول در ژنو[۲]، ما نمونه آشکارسازی را بر روی یک دیسک که ۱۰،۰۰۰ بار در دقیقه می‌چرخید نصب نمودیم که سرعت مماسی در لبه دیسک به میزان ۳۸۰ کیلومتر بر ساعت یا حدود ۱۰۰ متر بر ثانیه را ایجاد می‌نمود[۳]. زمانی که سرعت‌های نسبیتی مورد بررسی هستند، این سرعت ممکن است نسبتاً کند به‌نظر برسد، زیرا

---

[۱] Before-before experiment.

[۲] این آزمایش توسط بنیان Marcel et Monique Odier de Psycbo-Physique تامین مالی شد. مارسل اودیر پس از گرفتن مدرک فیزیک و دکترای ریاضیات، نماینده پنجمین نسل در بانک خصوصی خانواده خود می‌باشد.

[۳] Stefanov, A., Zbinden, H., Gisin, N., Suarez, A.: Quantum correlation with moving beamsplitters in relativistic configuration, Pramana (Journal of Physics) **53**, 1-8 (1999); Gisin, N., Scarani, V., Tittel, W., Zbinden, H.: Quantum nonlocality: From EPR-Bell tests towards expriments with moving observers, Annalen der Physik **9**, 831-842 (2000).

نور با سرعت ۳۰۰،۰۰۰ کیلومتر بر ثانیه حرکت می‌نماید. اما به هر حال اگر آلیس و باب بیش از ۱۰ کیلومتر از هم فاصله داشته‌باشند، همزمان‌سازی مناسب می‌تواند اثر نسبیتی "قبل از- قبل از" را تامین نماید. این آزمایش فرضیه سوارز و اسکارانی را مردود ساخت (هرچند یک نقطه ضعف وجود داشت، زیرا دیسک تنها یک جذب‌کننده را حمل می‌نمود و نَه یک آشکارساز واقعی را، درصورتی‌که چه فوتون جذب‌شده باشد چه جذب نشده باشد، اطلاعاتی که معادل نتیجه آلیس می‌باشد، توسط آشکارساز دیگری که در خروجی دیگر تداخل‌سنج قرار گرفته بود خوانده می‌شد).

آنتونی سوارز که این آزمایش را به دقت دنبال می‌نمود سریعاً با بیان این‌که آخرین شکافنده‌پرتو می‌بایست در حرکت باشد و نَه آشکارساز، به این موضوع واکنش نشان داد. به نظر سوارز، این آینه است که وسیله انتخاب می‌باشد، یعنی جزئی است که در آن نتیجه نهایی انتخاب می‌گردد (همان‌طور که شما الان می‌دانید به‌صورت واقعاً شانسی‌گونه). اما چگونه می‌توانیم شکافنده پرتو را با این سرعت به حرکت درآوریم؟ برای همکار من زمان زیادی طول نکشید تا پاسخ این سوال را بیابد. او پیشنهاد داد:"بیایید از انتشار یک موج صوتی در بلور استفاده نماییم". از آن‌جا که چنین موجی با سرعت حدود ۲/۵ کیلومتر بر ثانیه منتشر می‌گردد، بنابرین می‌توان آزمایش را در آزمایشگاه انجام داد. و یکبار دیگر نظریه کوانتوم تایید شد: حتی با آینه‌های متحرک، آلیس و باب در بازی بِل بیش از ۳ بار از ۴ بار برنده می‌گردند[۱]. بعد از چند روز سخت، بالاخره آنتونی سوارز مجبور شد نتیجه را بپذیرد. اما با وجود این‌که نظریه آن‌ها باطل (یا رَد) شده‌بود ولی آن‌ها احساس افتخار می‌کردند که یک نظریه محتمل علمی را جلو برده بودند.

[۱] وقتی سوارز از نتیجه ما آگاه شد، او فوراً به ژنو آمد و متوجه شد که دانش‌جویان آزمایش را اشتباه انجام داده بودند: آینه‌ها به سمت یکدیگر حرکت می‌نمودند به‌جای این‌که از هم دور شوند! و هیچ‌یک از ما متوجه آن نشده‌بودیم. شرمنده شدیم! آزمایش تصحیح شد و تکرار شد، اما نتیجه یکسان بود.

اَبَر تعیّنی(جبرگرایی) و اراده آزاد[۱]

چه مباحث دیگری برای کشف‌کرن باقی مانده‌اند؟ یک فرضیه نسبتاً ناامیدکننده این است که انکار نماییم که آلیس و باب می‌توانند آزادانه جهت حرکت دادن دسته را در جعبه‌های خود انتخاب نمایند. این فرضیه وجود اراده آزاد را نفی‌می‌نماید. بنابرین اگر آلیس وقعاً یک انتخاب آزاد انجام نمی‌دهد و برای حرکت دادن دسته در جهت‌هایی از پیش‌تعیین شده برنامه‌ریزی شده‌است، پس می‌توانیم تصور نماییم که باب، یا جعبه‌اش، از قبل انتخاب آلیس را می‌دانند. در این‌حالت ما حتی می‌توانیم چنین فرض‌نماییم که نتایج آلیس از پیش معین می‌باشند و باب، که همه چیز را می‌داند، می‌تواند به‌راحتی در بازی بِل برنده شود. توجه نمایید که او حتی می‌تواند با یقین و اطمینان برنده شود، یعنی بیشتر از چیزی که فیزیک کوانتومی مجاز می‌داند[۲].

چه پیشنهاد عجیبی است که وجود اراده آزاد را انکار نماییم. آیا ما باید از ایده ناموضِعیت آنقدر شوکه شویم که یکی از چیزهایی که همه ما از نزدیک با آن آشنا هستیم را انکار نماییم؟ ما می‌توانیم به تحصیل علم بپردازیم، در مورد ریاضیات، شیمی و فیزیک و بسیاری موضوعات دیگر یاد بگیریم، اما حتی یک معادله ساده، یک حقیقت تاریخی و یا کوچکترین واکنش شیمیایی را هرگز به خوبی تجربه‌های روزمره خود نخواهیم فهمید. به عقیده من، این چیزی نیست جز یک خطای اساسی در معرفت‌شناسی.

اگر ما آزادی اراده نداشتیم، هیچگاه نمی‌توانستیم تصمیم بگیریم تا یک نظریه علمی را بیازماییم. ما می‌توانستیم در جهانی زندگی کنیم که اجسام تمایل داشتند رو به بالاپرواز کنند ولی ما بگونه‌ای برنامه‌ریزی می‌شدیم که تنها سقوط آن‌ها را مشاهده کنیم. باید اقرار کنم برای این موضوع که شما آزادی اراده دارید، مدرکی ندارم، اما

---

[۱] Superdeterminism and free will.

[۲] علاوه براین، چنین دسیسه بزرگی به تنظیم فوق‌العاده دقیقی نیاز دارد تا انتخاب‌های ظاهراً آزاد آلیس و باب دقیقاً به‌صورتی به‌هم‌مرتبط گردند تا در بازی بِل "بُرد" صورت گیرد.

قطعاً از آزادی اراده لذت می‌برم، و شما نیز هرگز قادر به نشان دادن غیر از آن نمی‌باشید. این‌گونه مباحث معمولاً در یک دور باطل می‌افتند. به صورت منطقی ممکن، ولی اصلاً جذابیتی ندارند، تاحدودی شبیه نفس‌گرایی است که ادعا می‌کند من تنها انسان موجود در جهان هستم و این‌که هرشخص دیگری تنها یک توهم است که در ذهن من سکنی‌گزیده است.

این فرضیه اَبَرتعیّنی ارزش بحث و گفتگو را ندارد و در اینجا تنها به این خاطر بیان شد تا نشان دهیم بسیاری فیزیک‌دان‌ها، حتی برخی متخصصان فیزیک کوانتومی، چگونه و تا چه حد توسط شانس محض و ناموضِعیت ناامید شده‌اند. اما برای من موضوع خیلی واضح است: نه تنها اراده آزاد وجود دارد بلکه پیش‌نیازی برای علم، فلسفه و توانایی ما در فکرکردن منطقی و معنادار می‌باشد. بدون اراده آزاد هیچ فکر منطقی وجود نخواهد داشت. درنتیجه انکار اراده آزاد توسط علم و فلسفه کاملاً غیرممکن است. همان‌طور که مکانیک نیوتنی و یا برخی تعبیرهای نظریه کوانتومی با مثال نشان داد، برخی نظریه‌های فیزیکی تعیّنی می‌باشند. بالابردن این نظریه‌ها تا حد حقیقت نهایی به روشی متعصبانه و تقریباً مذهبی یک خطای منطقی به حساب می‌آید، زیرا با تجربه ما از اراده آزاد در تضاد می‌باشد. توجه کنید که نیوتن هیچ‌گاه ادعا نکرد که نظریه‌اش همه چیز را توضیح می‌دهد (و این از روی شکسته‌نفسی او نبوده است!). کاملاً برعکس. او به‌صورت صریح بیان کرد که نظریه گرانش او با جاذبه ناموضِعی از راه دور کاملاً پوچ و مسخره بوده است. اما درغیاب هرچیز حداقل می‌تواند برای انجام محاسبات مورد استفاده قرار گیرد. لاپلاس شخصی بود که با ادعای معروف خود نظریه نیوتن را تا جایگاه شبه-مذهبی آن بالا برد:[۱]

> *خرد و هوشی که در یک زمان معین همه نیروهایی که طبیعت را به حرکت درآورده و تمامی موقعیت‌های متقابل همه آیتم‌هایی تشکیل‌دهنده طبیعت را بشناسد و همچنین اگر این خرد به اندازه کافی وسیع باشد تا این اطلاعات را تجزیه و تحلیل*

[۱] Laplace, P. S.: Essai philosophique sur les probabilities, bachelier (1814).

نماید، آنگاه می‌تواند حرکت بزرگترین اجسام در جهان تا کوچکترین ذرات در اتم را در یک فرمول جمع‌نماید. برای چنین خردی هیچ‌چیز نامعلوم نخواهد بود و آینده درست مانند گذشته در جلوی چشمان او حاضر خواهد بود.

تاریخچه مکانیک کوانتومی متفاوت بوده‌است. بنیانگذار اصلی آن، نیلز بوهر، همواره بر کامل‌بودن نظریه‌اش پافشاری نموده است، حتی اگرچه هیچ نظریه تئوری نمی‌تواند واقعاً کامل باشد.

به‌طور خلاصه، انکار نمودن این‌که آلیس می‌تواند انتخاب‌های آزاد داشته باشد، درهرصورت انکار اعتبار علم محسوب می‌شود. بنابرین ما این فرضیه ناامیدانه را در اینجا رها می‌کنیم. این موضوع نباید علم را از حرکت به‌جلو و ارائه دادن یک فهم بهتر از اراده آزاد باز دارد. اما من همچنان عقیده‌دارم که علم هیچگاه این موضوع خاص را به‌صورت کامل پایان نخواهد داد. برای این‌که این بخش را به پایان برسانیم، اجازه دهید به نقل‌قولی از نیوتن را بیان نماییم: "*باید آن ارده آزاد یک توهم باشد، تا شخص بتواند از وجود همبستگی‌های ناموضِع از طریق فضای تهی و بدون واسطه‌گری هیچ‌چیز دیگری که به وسیله آن یا از طریق آن عمل و عکس‌العمل از یک نقطه به نقطه دیگر منتقل گردد، متقاعد گردد. در نظر من این موضوع آن‌قدر پوچ می‌باشد که معتقدم هیچ شخصی که در مباحث فلسفی دارای صلاحیت فکرکردن باشد هرگز آن را نخواهد پذیرفت.*"

واقع‌گرایی

برای این‌که این فصل را به پایان برسانیم، اجازه دهید یک فرضیه ناامیدکننده دیگر، یعنی انکار واقع‌گرایی را مورد بررسی قرار دهیم. اما این موضوع واقعاً چه معنایی می‌تواند داشته باشد و چگونه به فهم موضوع اصلی خودمان کمک می‌کند[۱]؟

[۱] در نظر برخی فیزیک‌دان‌ها واقع‌گرایی به معنای جبرگرایی می‌باشد. اما ما دیدیم که ناموضِعیت مفهوم رندمی‌بودن غیرقابل تقلیل را می‌رساند. بنابرین ما بایستی مفهومی از واقع‌گرایی را بیابیم که با رندمی‌بودن واقعی سازگار باشد.

تا قبل از سال ۱۹۹۰ تقریباً غیرممکن بود که در هر مجله معتبری مقاله‌ای را چاپ نمود که به ناموضِعیت و یا حتی نامعادله بِل ارجاع داده باشد. بنیان‌گذاران فیزیک کوانتومی مجبور بودند برای جا انداختن این فیزیک جدید به سختی تلاش نمایند و طرفداران فیزیک نیوتنی این کار را برای آن‌ها بسیار دشوار کرده بودند. نسل بعدی از طرفداران کوانتوم این مبارزه را ادامه دادند، هرچند دیگر تعداد مخالفان کمتر شده بود. آن‌ها موفق به حفظ این ایده شده‌بودند و پیشرفت‌های بیشتر را ممکن یا الزامی نمی‌دانستند. تا این‌که در اوایل دهه ۱۹۹۰، کاربردهای درهم‌تنیدگی و ناموضِعیت جامعه فیزیک را مجبور نمود تا یک ارزیابی تازه و بالاتر از آن بی‌تعصبانه از این جنبه فیزیک کوانتومی انجام دهد[۱]. اما به‌هرحال عبارت "واقع‌گرایی موضِعی" به‌طور منظم در گفتار و نوشتار جای عبارت "متغیرهای موضِعی" را گرفت و این به یک عادت تثبیت‌شده تبدیل شد. البته من فکر می‌کنم که این بیشتر به خاطر انتخاب با دقت کلمات بوده تا نتیجه یک تفکر عمیق. امروزه در برخی محافل مُد شده است که گفته شود حق انتخابی بین ناموضِعیت و غیر-واقع‌گرایی وجود دارد. البته اولین چیزی که می‌توان در مواجهه با این موضوع مطرح نمود این است که تعریف نماییم منظور از غیر-واقع‌گرایی چیست (در خاطر داشته باشید که ناموضِعیت به معنای "چیزهایی است که نمی‌توان تنها با موجودات موضِعی آن‌ها را توصیف نمود")[۲]. متاسفانه نمی-توانم بگویم که غیر-واقع‌گرایی به چه معناست. من احساس می‌کنم که این موضوع بیش از هر چیز یک راه‌فرار روانشناسی می‌باشد: آن‌هایی که نمی‌توانند مفهوم ناموضِعیت را بپذیرند به نوعی حفاظ فکری پناه می‌برند، تقریباً مانند برخی مردم سوییس که هنگام به‌صدا درآمدن آژیرها با رفتن به پناهگاه‌های هسته‌ای خود ناپدید

---

[۱] در این زمینه جالب است که اشاره نماییم که اولین مقاله در مورد رمزنگاری کوانتومی توسط تمامی مجلات فیزیک رَد شد! به همین خاطر در یک کنفرانس محاسباتی که در هند برگزار گردید مطرح گردید. این موضوع ممکن است برای شخصی که از بیرون به قضیه نگاه می‌کند تعجب‌آور باشد، اما همه فیزیک‌دان‌های باتجربه می‌دانند که چاپ نمودن یک ایده جدید و ناب سخت می‌باشد. شخص می‌بایست از مانع شک‌گرایی میان جامعه عبور نماید، مانعی که به عنوان یک فیلتر ضروری عمل می‌نماید و ایده‌هایی که با حقایق کاملاً تثبیت شده ناسازگارند را حذف می‌نماید.

[۲] Gisin, N.: Non-realism: Deep thought or a soft option?, Foundations of Physics 42, 80-85 (2012).

می‌گردند. این موضوع کاملاً عقلانی است ولی بالاخره دیر یا زود مجبور می‌شوند که بیرون بیایند.

اما آیا واقعاً هیچ نتیجه‌گیری ممکن نیست؟ نَه کاملاً! برای یک لحظه به بازی بِل برگردید. انتخاب‌های آلیس و باب همچنین نتایج آن‌ها می‌بایست "واقعی" باشند. فیزیک‌دان‌ها و مهندسان کامپیوتر می‌گویند که ورودی‌ها و خروجی‌های جعبه‌های آلیس و باب می‌بایست متغیرهای کلاسیکی باشند، یعنی اعدادی (بیت‌هایی) که قابل تشخیص، کپی، ذخیره، چاپ و به‌طور خلاصه، آن‌ها باید گزاره‌های کاملاً مشخصی باشند که هیچ‌گونه ناتعیّنی (عدم قطعیت) کوانتومی در مورد آن‌ها وجود نداشته باشد. ما قبلاً در بخش قبل این فرضیه را مورد بحث قرار دادیم که ممکن است انتخاب‌های آزاد (ورودی‌ها) تنها یک توهم باشند، اما در مورد نتایج تولید شده توسط جعبه‌ها (خروجی‌ها) چه می‌توان گفت؟ آیا این نتایج هم می‌توانند غیرواقعی باشند؟ اگر این نتایج تنها توهم‌هایی هستند که در ذهن ما اتفاق می‌افتند، ما به مباحثه‌ای بی‌مورد در مورد برخی انواع نفس‌گرایی برخواهیم گشت. اما به هر حال، این‌که این نتایج چگونه به‌دست می‌آیند، خود جای بحث و تحقیق دارد. برای این‌که از تاثیر گذاشتن جعبه‌ها بر روی یکدیگر جلوگیری نماییم، این نتایج می‌بایست قبل از این‌که هر تاثیر ممکنی فرصت رسیدن به مقصد خود را داشته باشد تولید گردند. در اصل تنها کافی است که ما دو جعبه را به اندازه کافی از یکدیگر دور کنیم اما در عمل این کار آن‌قدر هم آسان نیست. در واقع فیزیک کوانتومی در مورد لحظه دقیقی که نتیجه یک اندازه‌گیری تولید می‌گردد مبهم می‌باشد. برای بیشتر تجربی‌کارها نتیجه از قبل و به محض این‌که یک فوتون وارد چند میکرون ابتدای سطح آشکارساز می‌گردد و ماشه آبشاری از الکترون‌ها را می‌کشد، به‌دست می‌آید. ولی چگونه می‌توانیم مطمئن شویم؟ شاید باید تا توضیح نهایی منتظر بمانیم یا حتی اصرار به ثبت نتایج روی حافظه کامپیوتر یا حافظه انسان داشت؟ این پرسش آخر، جان بِل را به خندیدن واداشت و پرسید که آیا این حافظه انسانی می‌بایست به یک فیزیک‌دان دارای دکتری تعلق داشته باشد!

اگرچه فیزیک کوانتومی به ما نمی‌گوید که ما دقیقاً چه زمانی می‌توانیم مطمئن شویم که یک نتیجه تولید گردیده است، اما باید زمانی بعد از لحظه‌ای که فوتون با یک آشکارساز برخورد می‌نماید و قبل از لحظه‌ای که ما از آن آگاه می‌شویم، باشد. بنابرین در این‌جا یک روزنه، هرچند خیلی کوچک، وجود دارد: نتایج می‌توانند خیلی دیرتر از آنچه دانشمندان تصور می‌نماید تولید گردند و این‌که شکلی ماهرانه از ارتباطات از این موضوع سوء استفاده نموده و بین جعبه‌های آلیس و باب ارتباط ایجاد نماید[۱].

دو فیزیکدان به نام‌های لاجُس دیوسی و راگِر پِنروسی[۲] به‌صورت مستقل مدلی نظری ارائه نمودند که مدت زمان یک اندازه‌گیری را به اثرهای گرانشی ارتباط می‌دهد[۳]. مدل‌های آن‌ها تقریباً پیش‌بینی یکسانی انجام می‌دهد. برای تست نمودن آن، باب می‌بایست یک جسم سنگین را خیلی سریع به محض این‌که آشکارساز فوتونی او به‌صدا درآمد، جابجا نماید. اخیراً به همراه گروه خود در دانشگاه ژنو، ما این مدل‌ها و کاربرد آن‌ها در بازی بِل را تست نمودیم. نتایج کاملاً با فیزیک کوانتومی سازگار است: هیچ‌کدام از مدل‌های دیوسی و پنروسی راهی را برای فرار از مفهوم ناموضِعیت ارائه نکردند[۴]. بنابرین به نظر می‌رسد که ناموضِعیت کوانتومی یک مفهوم کاملاً قوی و مستحکم می‌باشد.

---

[۱] Franson, J. D.: Bell's theorem and delayed determinism, Phys, Rev. D **31**, 2529-2532 (1985).

[۲] Lajos Diosi and Roger Penrose.

[۳] Penrose, R.: On gravity's role in quantum state reduction, General Relativity and Gravitation **28**, 581-600 (1996); Diosi, L.: A universal master equation for the gravitational violation of the quantum mechanics, Phys. Lett. A **120**, 377 (1987); Adler, S.: Comments on proposed gravitational modifications of Schrodinger dynamics and their experimental implifications, J. Phys. A **40**, 755-763 (2007).

[۴] Salart, D., Baas, A., Van Houwelingen, J.A.W., Gisin, N., Zbinden, H.: Spacelike separation in a Bell test assuming gravitationally induced collapses, Phys. Rev. Lett. 100, 220404 (2008).

فرضیه چندجهانی

آخرین راه فراری که در میان برخی فیزیک‌دان‌های کوانتومی مرسوم شده است این است که هیچ گونه نتیجه آزمایشی وجود ندارد. مطابق این فرضیه هر بار که ما توهم انجام یک اندازه‌گیری با N نتیجه ممکن را داریم، جهان به N شاخه تقسیم می‌گردد که هر یک مانند بقیه واقعی می‌باشند و هر کدام نیز یک نتیجه متفاوت از میان N احتمال را در خود جای‌می‌دهد. همچنین آزمایش‌گر نیز به N کپی تقسیم می‌شود، بطوری‌که هر کدام یکی از N نتیجه ممکن را "می‌بینند". این تعبیر در مقابل تعبیری که تنها جهان ساده ما را مفروض می‌داند، فرضیه بسا-جهانی یا چندجهانی نامیده می‌شود. حامیان این تعبیر ادعا می‌کنند که "راه‌حل" آن‌ها ساده‌ترین راه‌حل برای پرهیز از شانس محض است و همچنین آن‌ها این‌گونه استنتاج می‌نمایند که بر اساس اصل اختصار تبیین ویلیام اوکام[۱]، که تصریح می‌کند همواره در میان فرضیه‌های ممکن بایستی ساده‌ترین را انتخاب نمود، می‌بایست این فرضیه را پذیرفت.

هر کس نتیجه‌گیری خود را در مورد سادگی این تعبیر دارد. من به نوبه خود به دو نکته اشاره می‌کنم. اول این‌که جدا از هرگونه مدرک و دلیل نظری و علمی، همواره شخص می‌تواند وجود شانس محض را انکار کرد[۲]. تنها لازم است فرض نماید که هرگاه این رندمی‌بودن خود را نشان‌می‌دهد، جهان تقسیم می‌شود و درواقع هر نتیجه در یکی از این جهان‌های موازی حاصله اتفاق می‌افتد. به نظر من این بیشتر یک

---

[۱] طبق اصل تبیین، اصل امساک و یا اصل تیغه اوکام، هرگاه درباره علت بروز پدیده‌ای دو توضیح مختلف ارائه شود، در آن توضیحی که پیچیده‌تر باشد احتمال بروز اشتباه بیش‌تر است و بنابراین در شرایط مساوی، احتمال صحیح بودن توضیح ساده‌تر بیش‌تر است.

[۲] البته می‌توان در اینجا تقلب کرد. می‌توان همواره متغیرهای ناموضِع پنهان که کل آینده را تعیین می‌نمایند را به نظریه کوانتوم افزود. این پارامترها به‌سادگی می‌توانند آینده باشند! آن‌ها لزوماً ناموضِع و از دیدگاه امروزی ما پنهان می‌باشند. کاملاً رُک و پوست‌کنده می‌گویم که این موضوع به نظر من خیلی جالب نمی‌باشد. یک‌بار دیگر می‌توان گفت که این یک بازی با کلمات می‌باشد تا چیز دیگری.

فرضیه موردی و موقت[۱] می‌باشد[۲]. دوماً تعبیر بسا-جهانی به معنی یک شکل مطلق از جبرگرایی است. درواقع مطابق این تعبیر درهم‌تنیدگی هیچگاه شکسته نشده و همچنان بیشتر و بیشتر گسترده می‌گردد. بنابرین همه‌چیز با همه‌چیز درهم‌تنیده شده و هیچ فضایی برای چیزی شبیه اراده آزاد باقی نمی‌گذارد. این شرایط حتی از جبرگرایی نیوتنی هم بدتر است. در مورد جبرگرایی نیوتنی، همه چیز به‌خوبی دارای موضِع مشخص بوده و به‌صورت منطقی جدا شده‌اند. بنابرین نظریه نیوتن فضایی برای یک نظریه آینده باقی می‌گذارد که جهان باز، جهانی که در آن زمان حال کاملاً آینده را تعیین ننماید، را توصیف نماید[۳]. در واقع این امید با ظهور نظریه کوانتومی به وقوع پیوست، هر چند که بعداً در توضیح‌دادن اراده آزاد خیلی کم آورد. اما در مقابل، چندجهانی هیچ امیدی را برای یک جهان باز باقی نمی‌گذارد[۴].

---

[۱] فرضیه ad hok (آد هاک) که در زبان فارسی به‌صورت موردی، موقتی، تک‌کاره، فاقد عمومیت و یا خلق‌الساعه ترجمه می‌شود، در علم و فلسفه به فرضیه‌ای گفته‌می‌شود که به یک نظریه اضافه می‌شود تا موادری که در نظریه پیش‌بینی نشده را جبران کند و درنتیجه آن نظریه را از باطل شدن نجات دهد.

[۲] طرفداران ایده چندجهانی ادعا می‌کنند که نظریه آن‌ها موضِعی می‌باشد، اما واقعاً مشخص نیست در چه معنا موضِعی می‌باشد. وقتی آلیس دسته خود را منحرف می‌سازد، فرض می‌شود جعبه او و تمام محیط آن به دو شاخه برهم‌نهی شده تقسیم می‌شود که هریک به اندازه دیگری واقعی می‌باشند. در مورد باب نیز همین‌طور است. هنگامی که محیط‌های آلیس و باب با یکدیگر برخورد می‌کنند، بگونه‌ای درست درهم‌تنیده می‌گردند که قواعد بازی بِل را در هر شاخه رعایت نمایند. قرار است این موضوع توضیحی برای دینامیک توصیف‌شده توسط معادله شرودینگر محسوب گردد، اما آیا واقعاً کاری جز اضافه نمودن برخی کلمات، که بگونه‌ای مبهم هستند، به یک معادله زیبا انجام داده‌است؟ آیا توضیحی را در بر دارد؟ و از همه مهمتر آیا این واقعاً یک توضیح موضِعی می‌باشد؟

[۳] در مورد نظریه‌ای که هم شامل متغیرهای کوانتومی و هم کلاسیکی باشد (به عنوان مثال، نتایج اندازه‌گیری)، فرمولبندی می‌تواند به‌گونه‌ای انجام گیرد که این امکان که تغییر و تحول متغیرهای کوانتومی توسط متغیرهای کلاسیکی کنترل گردد را الزامی نماید (آزمایش‌گر باید قادر باشد که یک پتانسیل را به‌خاطر نتایج اندازه‌گیری قبلی فعال و یا غیرفعال نماید). برای اطلاعات بیشتر در این مورد مقاله زیر را ببینید:

L. Diosi: Classical–quantum coexistence. A "free will" test, J. Phys. Conf. ser. 361,012028 (2012); arXiv: 1202.2472.

[۴] Gisin, N: L epidemie du multiverse. In: Le plus grand des hasards. Surprises quantiques, ed. By Dars, J. F., Papillaut, A., Belin (2010).

فصل ۱۰: تحقیقات در حال جریان در مورد ناموضِعیت

پس این دو ناحیه از فضا-زمان چه‌کار می‌کنند تا "بدانند" در طرف دیگر چه اتفاقی در حال رخ‌دادن است؟ به نظر من این موضوع بسیار مهمی است. در واقع حتی می‌توان گفت این موضوع اصلی انقلاب مفهومی در حال جریان می‌باشد. پس چگونه است که برخی از فیزیک‌دان‌ها این را ناراحت‌کننده می‌دانند؟ و چرا این سوال از سال ۱۳۹۵، سالی که پارادکس EPR چاپ شد، تا آغاز دهه ۱۹۹۰، زمانی که آرتور اکرت[۱] نشان داد این همبستگی‌ها می‌توانند در رمزنگاری مورد استفاده قرار گیرند، کاملاً نادیده گرفته شد؟ دلایل آن پیچیده‌اند. در سال ۱۹۳۵، فیزیک‌دان‌ها کارهای بهتری داشتند که با فیزیک کوانتومی نوظهور که به‌صورت ناگهانی راه‌هایی را برای توصیف گروهی از پدیده‌های جدید فراهم نموده بود، انجام دهند. درهم‌تنیدگی و ناموضِعیت می‌توانستند منتظر بمانند. سپس نفوذ بوهر و "مکتب کپنهاگی" او بود که هر کنجکاوی را با ادعای بلند و آشکار خود که مکانیک کوانتومی نظریه کاملی می‌باشد، در مرحله ابتدایی آن خاموش می‌نمود.

پس از آن‌که فیزیک‌دان‌ها برای مدت طولانی مبهوت موفقیت این فیزیک جدید بودند، پوچی چنین ادعایی به تدریج نمایان شد. اصلاً چگونه هر نظریه علمی می‌تواند

---

[۱] Ekert, A.: Quantum cryptography based on Bell's theorem, Phys. Rev. Lett. **67**, 661-663 (1991).

کامل باشد؟ این بدین معنی است که ما به نظریه نهایی در حال نزدیک شدن هستیم و بعد از آن هیچ چیز دیگری وجود نخواهد داشت که به دنبال آن بگردیم، زیرا هیچ‌چیز دیگری برای پیدا نمودن وجود ندارد. چه ایده ترسناکی! اما در سرتاسر تاریخ و به‌ویژه در انتهای دو قرن اخیر، برخی این موضوع را باور نموده‌اند. عنوان کتابی که توسط برنده جایزه نوبل در فیزیک استیون واینبرگ نوشته شد، گویای این موضوع است: *رویاهای نظریه نهایی*[۱]. حتی امروزه برخی به‌صورت جدی از نظریه همه‌چیز[۲] صحبت می‌نمایند، که مخفف آن یعنی TOE شاید کمی خنده‌دار به نظر آید. مسلماً این نظریه‌ای نیست که اکنون در دسترس ما باشد، اما رویایی مهم به شمار می‌آید.

به لطف تلاش‌های نسل جدید فیزیک‌دان‌ها و هم‌افزایی و همکاری که با علم کامپیوتر نظری صورت گرفت، در اوایل دهه ۱۹۹۰ خیلی چیزها تغییر کرد و توانستند داستانی نادر و شگفت‌آور را خلق نمایند[۳].

چگونه می‌توان ناموضِعیت را "وزن" کرد؟

اکنون که وجود ناموضِعیت کوانتومی به‌صورت محکمی تاییدشده است، فیزیک‌دان‌ها بازی‌کردن با آن را آغاز نموده‌اند. آن‌ها بازی کردن را دوست دارند، هرچند ممکن است برای افرادی که خودشان را خیلی جدی می‌گیرند کاملاً آزاردهنده باشد. اما به‌هرحال تنها با بازی‌کردن و سروکله زدن با یک چیز جدید می‌توان واقعاً با آن آشنا شد، چه اسباب‌بازی کودکان باشد و چه یک مفهوم علمی. پس بیایید بازی کنیم! شما حتماً متوجه شده‌اید که همه این کتاب پیرامون یک بازی، بازی بِل، می‌باشد، و

---

[۱] Weinberg, S.: Dreams of a final theory: The scientist's search for the ultimate laws of nature, Vintage (1994).

[۲] Theory of everything

[۳] Rothen, F.: Le monde quantique, si probe et si etrange, Presses polytechniques and universitaires romandes (2012); Gilder, L.: The age of entanglement, Alfred A. Knopf (2008).

به لطف این بازی بود که ما توانستیم درست به قلب فیزیک کوانتومی و قابل‌توجه‌ترین ویژگی آن یعنی ناموضِعیت دست‌یابیم.

وسواس دیگری که در میان فیزیک‌دان‌ها وجود دارد این است که سعی می‌کنند کمیت هر چیزی را تعیین کنند یا به عبارتی آن را "وزن نمایند". طبیعتاً ناموضِعیت چیزی نیست که وزن داشته باشد، اما اندازه‌گیری آن موضوع مهمی است تا بتوان گفت که از میان دو صورت ناموضعیت، کدام‌یک "بزرگترین" و یا "عمیق‌ترین" می‌باشد. برای ناموضِعیت فیزیک‌دان‌ها هنوز یک مقیاس خوب نیافته‌اند. به نظر می‌رسد بسته به جنبه‌ای از ناموضِعیت که شخص بررسی می‌نماید، روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری آن وجود دارد[۱]. این موضوع به‌طور واضح نشان‌دهنده این است که ما هنوز کاملاً این مفهوم را درک ننموده‌ایم.

همچنین این طبیعی است که درمورد ایده اندازه‌گیری "مقدار" ناموضِعیت تعجب نماییم. در این زمینه پیشرفت‌های خوبی از سال ۱۹۹۰ انجام‌پذیرفته است، هرچند که یک‌بار دیگر باید گفت که بسیاری مسائل بدون جواب می‌مانند. آیا ما باید از این وضعیت امور ناامید شویم؟ البته که نه. این تنها علامتی است که نشان می‌دهد چیزهای زیادی برای کشف‌شدن باقی‌می‌مانند.

چرا هربار در بازی بِل برنده نشویم؟

فیزیک کوانتومی به ما اجازه می‌دهد که در بازی بِل به‌صورت میانگین ۳۴۱ بار از ۴۰۰ بار برنده شویم، بنابرین خیلی بیشتر از ۳ بار از ۴ بار، یعنی بسیار بیشتر از حالتی‌که جعبه‌های آلیس و باب نتایج خود را به‌صورت موضِعی تولید نمایند. این

[۱] Methot, A., Scarani, V.: An anomaly of non-locality, Quantum Information and Computation 7, 157-170 (2007).

موضوع برای فیزیک‌دان‌ها آن‌قدر شگفت‌انگیز بوده است که برای چندین نسل، آن‌ها فراموش نمودند که بپرسند چرا فیزیک به ما اجازه نمی‌دهد که هربار، یعنی ۴۰۰ بار از ۴۰۰ بار، در بازی بِل برنده شویم. اگر طبیعت ناموضِع است، پس چرا به‌صورت کامل نیست؟ چه چیزی فیزیک را از این پیش‌بینی منع کرده که نمی‌توان هر بار در بازی بل برنده شد؟

جالب است بدانیم که این سوال ساده بچگانه برای اولین‌بار در دهه ۱۹۹۰ مورد مطرح شد و تنها در قرن جاری به یک موضوع تحقیقاتی تبدیل شد. تا همین اواخر، "تنها" سوال مطرح شده این بود که: چگونه طبیعت (یا فیزیک کوانتومی، اگر شما ترجیح می‌دهید) می‌تواند ناموضِع باشد؟ امروزه بسیاری مقالات علمی در حال کاوش نتایج ناموضِعیتی می‌باشند که از ناموضِعیت کوانتومی بسیار گسترده‌تر می‌باشد. ایده اصلی این است که با بررسی فیزیک کوانتومی از بیرون، از زاویه گسترده‌تری نسبت به آن‌چه فرمولبندی کوانتوم ارائه کرده است، بپرسیم که چه چیزی فیزیک کوانتومی را محدود می‌سازد.

اولین اسباب‌بازی تئوری که فیزیک‌دان‌ها برای این کاوش اختراع نمودند جفت جعبه PR بود، که بنام مخترعان آن سندو پاپسکو و دنیل رورلیچ[۱] نام گرفت. این جعبه‌های PR برای ما نسبتاً آشنا هستند، چرا که به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای شبیه جعبه‌هایی هستند که توسط دوستان ما آلیس و باب در بازی بِل مورد استفاده قرار گرفتند. تنها تفاوت این است که در بازی نمودن با جعبه‌های PR، آلیس و باب هربار، یعنی ۴ بار از ۴ بار، در بازی برنده می‌شوند. هیچ‌کس نمی‌داند چگونه چنین جعبه‌هایی را ساخت، بنابرین شما نمی‌توانید یک جفت از آن‌ها را بخرید (برخلاف جعبه‌های کوانتومی که

[۱] Popescu, S., Rohrlich, D.: Nonlocality as an axiom, Found, Phys, **24**, 379 (1994).

به شما اجازه می‌دهند بیش از ۳ بار از ۴ بار برنده شوید)[۱]. هرچند این موضوع فیزیک‌دان‌ها را از بازی کردن با آن‌ها بازنمی‌دارد. بنابرین جعبه‌های PR اسباب‌بازی‌ها یا ابزار مفهومی می‌باشند.

من تنها دو مثال برای توضیح دادن جعبه‌های PR بیان می‌نمایم. اولی شبیه‌سازی همبستگی‌های کوانتومی می‌باشد. ما دیدیم که فیزیک کوانتومی به ما اجازه می‌دهد بسیار بیشتر از دو اندازه‌گیری روی یک سیستم انجام دهیم (شکل ۵,۱ در صفحه ۷۱ را ببینید). برای بازی بِل دو تا کافی‌است اما فیزیک‌دان‌ها انتخابی بین تعداد نامتناهی از احتمالات را دارند. بنابرین آیا باید ناموضِعیت‌های بسیار بیشتری برای درک این تعداد نامتناهی از احتمالات وجود داشته باشد؟ بدون پرداختن به جزئیات، که به هر حال بیشتر آن‌ها برای ما ناشناخته می‌باشند، اجازه دهید بگوییم که با یک جفت جعبه‌های PR ما می‌توانیم تمامی همبستگی‌های کوانتومی متناظر با دو بیت کوانتومی درهم‌تنیده را شبیه‌سازی نماییم[۲]. این نسبتاً تعجب‌آور است. آیا ما می‌توانیم تمامی همبستگی‌های کوانتومی را با استفاده از جعبه‌های PR، یا جعبه‌های دیگری که قادرند همبستگی‌های ساده اما بنیادی ایجاد نمایند، را شبیه‌سازی کنیم درحالی‌که مانع ارتباط بدون انتقال باشند؟ معما همچنان باقی‌است.

دومین مثال در استفاده از جعبه‌های PR از حوزه نظریه پیچیدگی ارتباطات می‌آید[۳]. در اینجا هدف محدود نمودن تعداد بیت‌هایی است که باید مخابره گردند تا تکالیف خاصی را به انجام برسانند. می‌توان نشاد داد که درهم‌تنیدگی کوانتومی هیچ راهی

---

[۱] www.qutools.com

[۲] Cerf, N. J., Gisin, N., Massar, S., Popescu, S.: Simulating maximal quantum entanglement without communication. Phys. Rev. Lett. **94**, 220403 (2005).

[۳] Brassard, G.: Quantum communication complexity, Foundations of physics **33**, 1593-1616 (2003).

برای کاهش تعداد بیت‌هایی که باید مخابره‌گردند، ارائه نمی‌دهد. اما اگر جعبه‌های PR وجود داشتند، این عدد به یک تک بیت برای یک طبقه گسترده از مسائل کاهش می‌یافت! به‌طور خلاصه، در این‌صورت پیچیدگی ارتباطات پیش‌پا افتاده می‌شد. این موضوع ممکن است نسبتاً انتزاعی به نظر برسد اما درواقع خارق‌العاده می‌باشد. یک تک بیت به‌جای میلیاردها از آن‌ها! اما متاسفانه جعبه‌های PR در واقعیت وجود ندارند. اما شاید این موضوع دقیقاً به خاطر جلوگیری از چنین ساده‌سازی پیچیدگی ارتباطات باشد؟ به همان اندازه که وجود سرعت‌های بالاتر از نور برای فیزیک‌دان‌ها غیرممکن می‌باشد، اکثریت قریب به اتفاق نظریه‌پردازان اطلاعات نیز کاهش پیچیدگی ارتباطات را غیرمحتمل می‌دانند. بنابرین آیا می‌توان گفت که ما توضیحی برای این واقعیت داریم که فیزیک کوانتومی به ما اجازه نمی‌دهد در بازی بِل هربار برنده شویم؟ ممکن است این‌گونه باشد اما مسئله هنوز به‌طور کامل حل نشده است. می‌توان تصور نمود که جعبه‌های PR به اندازه کافی دارای نویز باشند که پیچیدگی ارتباطات نقض نگردد اما با این وجود به ما اجازه دهد که در بازی بِل بیشتر از چیزی که فیزیک کوانتومی مجاز می‌داند برنده شویم[۱].

به عنوان یک محقق فیزیک امیدوارم توانسته باشم حداقل مقداری از هیجان خود، هیجان نوع تحقیقاتی که اکنون درحال انجام می‌باشد، را با شما تسهیم کرده باشم، حتی به قیمت این‌که شما را با این توضیحات پیچیده کمی سردرگم کرده باشم. در این زمینه، مایلم که سه تا از موضوعات تحقیقاتی روز را معرفی نمایم. اگر همه‌چیز را متوجه نشدید، مهم نیست. تنها هدف این است که فردا کمی بیشتر از دیروز بفهمیم.

[۱] Brassard, G., Buhrman, H., et al.: Limit on nonlocality in any world in which communication complexity is not trivial, Phys. Rev. Lett. **96**, 250401 (2006).

ناموضِعیت در بیش از دو بخش

رندمی‌بودن راستین می‌تواند خود را در بیش از دو مکان به نمایش بگذارد. اما آیا همچنین می‌تواند خود را در سه و یا هزار مکان آشکار سازد؟ جواب این سوال واضح نیست، زیرا ممکن است تمامی همبستگی‌های کوانتومی سه‌گانه را بتوان به‌عنوان ترکیب‌هایی از رندمی‌بودن ناموضِع دوگانه توضیح داد. اما امروزه ما می‌دانیم که این‌گونه نیست و همبستگی‌های کوانتومی وجود دارند که مستلزم این هستند که رندمی‌بودن را به‌طور آنی در بسیاری مکان‌های مختلف نشان دهند. اما با این‌حال این حقیقت وجود دارد که کارهای بسیاری مانده است تا در بررسی ناموضِعیت چندگانه انجام گیرد[۱].

یک مورد به ویژه جالب زمانی اتفاق می‌افتد که چندین جفت از سیستم‌ها درهم‌تنیده باشند، یعنیA-B و C-D و درجایی که اندازه‌گیری‌های مشترک، از نوعی که در تلپورتیشن کوانتومی استفاده می‌شود (فصل ۸ را ببینید)، بر روی سیستم‌هایی که متعلق به جفت‌های مختلف، مثلاً بر روی B و C، هستند انجام می‌گردد. طبیعی است که فرض نماییم جفت‌های درهم‌تنیده مختلف از یکدیگر مستقل هستند. اگر n جفت وجود داشته باشد ما از n-موضِعیت صحبت می‌نماییم. این موضوع یک زمینه کامل کاوش و تحقیق را باز می‌نماید که دو جنبه درهم‌تنیدگی، یعنی ایده حالت‌های جداناپذیر و ایده اندازه‌گیری مشترک، را به یکدیگر مرتبط می‌سازد.[۲]

---

[۱] Svetlichny, G.: Distinguishing three-body from two-body nonseparability by a Bell-type inequality, Phys. Rev. D **35**, 3066(1987); Collins, D., Gisin, N., Popescu, S., Roberts, D., Scarani, V.: Bell-type inequalities to detect true n-body nonseparability, Phys. Rev. Lett. **88**, 170405 (2002).

[۲] Branciard, C., Gisin, N., Pironio, S.: Characterizing the nonlocal correlations created via entanglement swapping, Phys. Rev. Lett. **104**, 170401 (2010); Branciard, C., Rosset,

چه کسی مسئول این است که تصمیم بگیرد چه کسی با چه کسی درهم‌تنیده شود؟ اطلاعات ذخیره شده درباره مکان‌هایی که رندمی‌بودن ناموضِع را به نمایش می‌گذارند کجا هستند؟ آیا نوعی از فرشته وجود دارد که فضای بزرگ ریاضی به‌نام فضای هیلبرت که این محاسبات در آن قرار دارد را مدیریت می‌نماید؟ به نظر نمی‌رسد که این اطلاعات در فضای سه‌بعدی ما وجود داشته‌باشند. علی‌رغم جدی‌بودن این سوال ساده کودکانه، تاکنون خیلی توجه کمی به آن شده است.

اجازه دهید به‌صورت خلاصه موضوع تحقیقاتی مورد بحث روز دیگری را بیان نمایم: با کمک ناموضِعیت اما بدون استفاده از ماشین کامل ریاضی فیزیک کوانتومی چه چیزهای دیگری را می‌توانیم پیش‌بینی نماییم؟ در فصل ۴ دیدیم که نظریه شبیه-سازی-ممنوع را می‌توان کاملاً اثبات نمود، همچنین در فصل ۷ اساس کاربردهایی مانند مولدهای اعداد رندمی و رمزنگاری کوانتومی را بررسی نمودیم. ما همچنین می‌توانیم برخی ویژگی‌های روابط عدم قطعیت هایزنبرگ را پوشش دهیم[۱]. از سوی دیگر، امروزه ما همچنان قادر نیستیم که تلپورتیشن کوانتومی را صرفاً بر حسب جعبه‌هایی مانند آن‌چه در بازی بِل مورد استفاده قرار گرفت، بیان نماییم. مشکل در این‌جا، در اندازه‌گیری مشترک نهفته است. ما همچنان نمی‌توانیم این ویژگی‌های ضروری را بدون بکارگیری چارچوب ریاضی فیزیک کوانتومی تسخیر نماییم. اخیراً اروپا از اهمیت چنین تحقیقاتی باخبر شده و در قالب برنامه‌ای بنام DIQUIP[۲] محققانی از شش کشور را گرد هم آورده است.

D., Gisin, N., Pironio, S.: Bilocal versus non-bilocal correlations in entanglement swapping experiments, Phys. Rev. A **85**, 032119 (2012).

[۱] Scarani, V., Gisin, N., Brunner, N., Masanes, L., Pino, S., Actin, A.: Secrecy extraction from no-signalling correlations, Phys. Rev. A **74**, 042339 (2006).

[۲] Device independent quantum information processing ww.chistera.eu/projects/digip.

"نظریه اراده آزاد"

اکنون که هرگونه توضیح موضِعی از بررسی حذف شده است، طبیعی است که بپرسیم که آیا ممکن است برخی توضیحات ناموضِع تعیّنی وجود داشته باشند. اگر نمی‌توانیم موضِعیت را نجات دهیم حداقل شاید بتوانیم تعیّن‌پذیری را حفظ نماییم. اجازه دهید به‌صورت خلاصه به قضیه متغیرهای ناموضِع تعیّنی، که قادرند به‌صورت کامل نتایج هرگونه اندازه‌گیری را تعیین نمایند، بازگردیم.

در اصل، این موضوع امکان‌پذیر به نظر می‌رسد. از آن‌جا که نظریه کوانتومی احتمالات را پیش‌بینی می‌نماید، ممکن است تصور کنید که کافی است به‌صورت آماری مخلوطی از این متغیرهای تعیّنی (قطعی) را درنظر بگیریم تا احتمالات کوانتومی را بازتولید نماییم. این در واقع، ایده اساسی برنامه‌های تجاری است که پدیده‌های کوانتومی را شبیه‌سازی می‌کنند و توسط دانشجویان ما مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس چگونه کار می‌کند؟

به خاطر آورید که برای دو رویداد کاملاً دور در فضا، همزمانی ممکن است به چارچوب مرجعی بستگی داشته باشد که برای توصیف دو پدیده مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابرین جدا از نمایش پدیده‌های کوانتومی در کامپیوتر، همان‌گونه که در بالا اشاره شد، متغیرهای ناموضِع تعیّنی (قطعی) اضافی تنها درصورتی مفید هستند که در تمامی چارچوب‌ها پیش‌بینی یکسانی ارائه دهند. چنین متغیرهایی همموردا[۱] نامیده می‌شوند. خواهیم دید که در واقع این موضوع غیرممکن می‌باشد، که در نتیجه آن متغیرهای ناموضِعی تعیّنی همموردا نمی‌توانند وجود داشته‌باشند. بنابرین این موضوع پایان تعیّن (قطعیت یا جبرگرایی) را دیکته می‌نماید!

[۱] Covariant

برای این‌که نشان دهیم چنین متغیرهای تعیّنی ناموضِعی وجود ندارند، باید فرض نماییم که آلیس و باب دارای اراده آزاد می‌باشند. از این‌رو برخی چنین نتیجه‌گیری می‌نمایند که اگر ما انسان‌ها دارای اراده آزاد هستیم، بنابرین ذرات کوانتومی مانند الکترون‌ها، فوتون‌ها، اتم‌ها و مانند آن‌ها نیز باید لزوماً دارای اراده آزاد باشند. این روش شگفت‌انگیز ارائه نتایج، نشات گرفته از ریاضی‌دان‌های آمریکایی و انگلیسی به نام‌های جان کانوِی و سیمون کوچن می‌باشد که نظریه اراده آزاد خوانده می‌شود[۱].

اجازه دهید یک‌بار دیگر توسط برهان خلف بحث نماییم. اثبات موضوع کمی پیچیده می‌باشد، بنابرین اگر در راه گم شدید، مستقیم به بخش نتیجه‌گیری بروید. تصور نمایید آلیس و باب در حال انجام بازی بِل می‌باشند و از چارچوبی که در آن آلیس دسته خود را کمی قبل از باب منحرف می‌سازد به آن‌چه در حال انجام است نگاه کنید. فرض کنید k متغیر غیرموضِعی باشد که، طبق فرضیه، نتایج تولیدشده توسط جعبه‌های آلیس و باب را تعیین می‌نماید. بنابرین نتیجه آلیس a به این متغیر k و انتخاب خودش x بستگی دارد. ما می‌نویسیم $a = F_{AB}(k, x)$ که در آن F_{AB} یک تابع می‌باشد. از دید این چارچوب، وقتی باب دسته خود را منحرف می‌سازد، نتیجه او b ممکن است به متغیر k و انتخاب او y و همچنین به انتخاب x گزیده شده توسط آلیس بستگی داشته باشد. ما می‌نویسیم $b = S_{AB}(k, x, y)$. این‌جا جایی است که می‌بینیم متغیر k ناموضِع می‌باشد[۲]، زیرا نتیجه باب می‌تواند به انتخاب آلیس بستگی داشته باشد. توجه کنید که در ترتیب زمانی AB، نمادهای F_{AB} و S_{AB} نشان‌دهنده "اولی" و "دومی" هستند.

---

[۱] Conway, J.H., Kochen, S.: The free will theorem, Found. Phys. **36**. 1441-1473 (2006).

[۲] به بیان دقیق‌تر یک متغیر ذاتاً موضِعی یا غیرموضِعی نمی‌باشد. در مورد مورد بحثف فیزیک‌دان‌ها می‌گویند که متغیر k بخاطر استفاده‌ای که تابع S_{AB} از آن نمود، ناموضِع می‌باشد.

اکنون همین وضعیت را زمانی که از چارچوب دیگری که در آن باب دسته خود را کمی قبل از آلیس منحرف می‌سازد، مشاهده نمایید. برای مثال، این چارچوب دومی می‌تواند سوار بر موشکی باشد که با سرعت بسیار زیاد از آلیس به سمت باب دور می‌شود. در این حالت ، نتیجه باب b تنها به متغیر k و انتخاب او y بستگی دارد، بنابرین می‌نویسیم $b = F_{AB}(k, y)$. همچنین نتیجه آلیس a اکنون می‌تواند به متغیر ناموضِع k، انتخاب او x و انتخاب باب y بستگی داشته باشد، بنابرین می-نویسیم$a = S_{AB}(k, x, y)$. یک‌بار دیگر متذکر می‌شویم که نمادهایF_{AB} و S_{AB} در ترتیب زمانی BA نشاندهنده "اولی" و "دومی" می‌باشند.

اما نتیجه آلیس a نمی‌تواند به چارچوبی که برای توصیف آزمایش (بازی) بکار می‌رود بستگی داشته باشد. بنابرین باید همواره داشته باشیم$= a = F_{AB}(k, x)$ $S_{BA}(k, x. y)$. این معادله اخیر تنها درصورتی برقرار خواهد بود که S_{BA} به y بستگی نداشته باشد، یعنی نتیجه آلیس در واقع به انتخاب باب بستگی نداشته باشد. همچنین نتیجه باب نمی‌تواند به انتخاب آلیس بستگی داشته باشد. اما این شرایط موضِعیت بود که توسط بِل در سال ۱۹۶۴ فرمولبندی شد: جعبه آلیس و همچنین جعبه باب هر دو نتایج خود را به‌صورت موضِعی تولید می‌نمایند. در این حالت همچنان‌که دیدیم آلیس و باب نمی‌توانند در بازی بل بیش از ۳ بار از ۴ بار برنده شوند. و این بدین معناست که اگر آن‌ها در واقع بیش از ۳ بار از ۴ بار برنده شوند، این موضوع همچنین امکان متغیرهای ناموضِع که هم تعیّنی و هم هموردا باشند را منتفی می‌سازد.

بنابرین در مجموع تنها امکان باقی‌مانده، متغیرهای ناتعیّنی ناموضِع می‌باشد. این همان روشی است که نظریه کوانتوم بازی بِل را توصیف می‌نماید. توجه نمایید که در

این‌جا "غیر-تعیّنی" نیز یک صفت منفی دیگر به شمار می‌آید. این صفت به ما نمی‌گوید که این متغیرها چه هستند و چگونه این متغیرها و یا این مدل‌ها بازی بِل را توصیف می‌نمایند، بلکه تنها می‌گوید که تعیّنی نخواهند بود. به‌ویژه، غیر-تعیّنی به معنای احتمالاتی در معنای معمول احتمالات نیست، چرا که مخلوطی آماری از حالت‌های تعیّنی (معین) نمی‌باشد. (تصویر خوبی از این تحقیق را می‌توان در مقالات کُلبک و همکارانش و پوسِی و همکارانش ببینید[۱]).

یک تاثیر پنهان؟

نمی‌توانم آخرین نتیجه‌ای که به‌تازگی نیز به‌دست آمده است، حتی اگرچه دوباره منفی می‌باشد، را در اینجا بازگو نکنم. برای نجات دادن موضِعیت، ایده‌ای که آن‌چنان عمیق در ما تثبیت شده‌است که دور زدن آن بسیار دشوار می‌باشد، یعنی برای حفظ نمودن این ایده که چیزها و تاثیرات به‌صورت پیوسته از یک نقطه به نقطه بعدی، بدون جهش و وقفه منتشر می‌گردند، خیلی وسوسه‌انگیز است که تصور نماییم آلیس و یا جعبه او به روشی زیرکانه که از چشمان فیزیک‌دان‌های آغاز قرن ۲۱ مخفی مانده است، بر باب تاثیر می‌گذارد. یا در واقع باب بر روی آلیس تاثیر می‌گذارد که این بستگی به این داردکه کدام‌یک از آن‌ها اول انتخاب خود را انجام می‌دهد. از آن‌جا که این ترتیب زمانی به انتخاب اختیاری دستگاه مختصات بستگی دارد، وسوسه‌انگیز است که فرض نماییم چارچوب ارجحی وجود دارد که یک‌بار و برای همیشه ترتیب زمانی همه رخدادهای مربوطه را تعیین می‌نماید.

---

[۱] Colbeck, R., Renner, R.: No extension of quantum theory can have improved predictive power, Nature Communications **2**, 411 (2011); Pusey, M. F., Barrett, J., Rudolph, T.,: The quantum state can not be interpreted statistically, Nature Physics **8**, 476-479 (2012).

ما دیدیم که با آزمایش می‌توان یک حد پایین برای سرعت چنین اثری تعیین کرد (فصل ۹ را ببینید). اما آیا نمی‌تواند این‌گونه باشد که ناموضِعیت ظاهری ممکن است ناشی از تاثیری باشد که به‌صورت پیوسته از یک نقطه به نقطه بعدی بین آلیس و باب با سرعتی غول‌آسا نسبت به چارچوب ارجحی که هنوز فیزیک‌دان‌ها آن را شناسایی ننموده‌اند، منتشر می‌گردد؟ مطابق این فرضیه، اگر تاثیر به‌موقع برسد، همبستگی‌های مشاهده‌شده همان‌هایی هستند که توسط نظریه کوانتوم پیش‌بینی می‌شوند، اما اگر این تاثیرات به‌موقع نرسند، بنابرین لزوماً این همبستگی‌ها موضِعی هستند، و درنتیجه به ما اجازه نمی‌دهند تا در بازی بِل برنده شویم. چنین فرضیه‌ای به روح نظریه نسبیت اینشتین احترام نمی‌گذارد ولی با هیچ آزمون تجربی از آن نظریه در تضاد نمی‌باشد. به‌طور خلاصه، این فرضیه دقیقاً مانند همبستگی‌های ناموضِع کوانتومی که به ما اجازه می‌دهند در بازی بِل برنده شویم، با نظریه نسبیت همزیستی مسالمت‌آمیزی دارد.

در ابتدا غیر ممکن به نظر می‌رسد که چنین توضیحی را از مطالعه حذف نماییم. در بهترین حالت ما می‌توانیم آزمایش‌هایی مانند آنچه در فصل ۹ توصیف شد و حد پایینی برای سرعت این تاثیر فرضی قرار داد، را انجام دهیم. اما می‌توانیم باهوش‌تر از آن باشیم.

آیا وجود تاثیراتی که با سرعتی بیشتر از نور منتشر می‌گردند لزوماً به این معنی است که ما می‌توانیم سریع‌تر از نور ارتباط برقرار سازیم؟ یکی ممکن است فرض نماید که چنی تاثیراتی تا ابد پنهان بمانند. این فرض خیلی فیزیکی به نظر نمی‌رسد، اما مادامی که فیزیک‌دان‌ها قادر به کنترل این تاثیرات فرضی نیستند، طبیعی است که فکر کنیم نمی‌توانند از آن‌ها برای برقراری ارتباط سریع‌تر از نور استفاده نمایند.

اما جالب است که همین فرضیه ساده که طبق آن شخص نمی‌تواند بدون کنترل این تاثیرات با سرعتی بیشتر از سرعت نور ارتباط برقرار سازد، کافی است تا اثبات کند که چنین تاثیراتی نمی‌توانند وجود داشته باشند! این نتیجه هنگام نوشتن این کتاب توسط دانشجوی من جین-دنیِل بنکال، دانشجوی پست‌دکترای مالزیایی یِونگ-چرنگ لیانگ و سه تن از همکاران سابق من استفانو پیرونیو در بروکسل، آنتونیو اکین در بارسلون و والریو اسکارانی در سنگاپور به همراه خود من به‌دست‌آمد. این دستاورد اوج ماجرای بزرگی بود که بیش از ۱۰ سال قبل آغاز شده بود. از آن‌جا که این موضوع تمام وقت ما را به خود اختصاص داد، تعجب نکنید که آن را کمی پیچیده بیابید. من سعی خواهم نمود که این پیشرفت‌ها را به‌صورت خلاصه بیان نمایم اما اگر مایل به خواندن آن‌ها نیستید می‌توانید مستقیماً به بخش نتیجه‌گیری بروید. توجه کنید که حتی اگر فرض تاثیراتی که با هر سرعت محدود دلخواهی، سریع‌تر از سرعت نور ولی با این‌حال متناهی، منتشر می‌گردند، حتی این فرضیه بیشینه بتواند مردود گردد، طبیعت به‌طور حتم ناموضِع می‌باشد.

فرضیه تاثیرات فرانوری می‌تواند تمامی نتایج تجربی بین دو نفر، مانند دوستان ما آلیس و باب، را بازتولید نماید. درواقع از آن‌جا که هیچ همزمان‌سازی در عمل کامل نیست، ما می‌توانیم همواره فرض نماییم که این تاثیرات با سرعت به اندازه کافی بالا سفر می‌نمایند تا دو رخداد را همبسته نمایند. در مورد سه نفر این سوال باز می‌ماند[۱]. اما با چهار نفر، مثلاً A، B، C و D ما استدلال زیر را یافته‌ایم. فرض نمایید که در چارچوب ارجح، A ابتدا اندازه‌گیری خود را انجام می‌دهد، سپس D و پس از آن تقریباً

[۱] بعد از اتمام این کتاب، این سوال در مقاله زیر پاسخ داده شد:

T. J. Barnea, J. D. Bancal, Y.C. Liang, and N. Gisin: Tripartite quantum state violating the hidden-influence constraint Phys. Rev. A 88, 022123 (2013).

به‌طور همزمان B و C، به‌صورتی که تاثیر از A به‌موقع به سه نفر دیگر برسد و تاثیر ناشی از D به‌موقع به B و C برسد، و این دو خودشان نتوانند بر یکدیگر تاثیری بگذارند. در این شرایط خاص همبستگی‌های ABD و ACD همان‌هایی هستند که توسط نظریه کوانتومی، مطابق با فرضیه تاثیرات پنهان، پیش‌بینی می‌شوند. اگرچه همبستگی BC موضِعی می‌باشد، اما ما نامعادله بسیار شگفت‌آوری را بدست‌آورده‌ایم[۱] که توسط تمامی همبستگی‌های چهارگانه که در آن BC موضِعی می‌باشد و همچنین نمی‌توانند برای برقراری ارتباط بدون انتقال مورد استفاده قرار گیرند برآورده می‌شود. به‌علاوه این نامعادله تنها دارای جملاتی است که شامل همبستگی‌های بین ABD و ACD می‌باشد. هریک از این بخش‌های سه‌گانه طبق فرضیه تاثیر پنهان با یکدیگر از درون مرتبط هستند، به‌طوری‌که به عنوان مثال A بر D تاثیر می‌گذارد که آن هم بر B تاثیر دارد. بنابرین در پیکربندی فوق هر مدلی که از تاثیرات پنهان دارای سرعت متناهی استفاده نماید مقادیر یکسانی را مانند نظریه کوانتوم برای این نامعادله پیش‌بینی می‌نماید. اما پیش‌بینی کوانتومی، نامعادله ما را نقض می‌نماید، بنابرین ما ممکن است این گونه نتیجه‌گیری نماییم که هرگونه مدلی دست‌به‌دامان تاثیرات پنهان با سرعت متناهی شود، لزوماً همبستگی‌هایی را ایجاد می‌نماید که ارتباطات با سرعت فرانور را مجاز می‌داند.

نتایجی که در بالا ترسیم شد، برنامه و روشی را که جان بِل برای توضیح‌دادن همبستگی‌های کوانتومی از طریق اصل پیوستگی،که مطابق آن همه‌چیز به‌صورت پیوسته از یک نقطه به نقطه دیگر در فضا منتشر می‌گردد، آغاز نمود را کامل می‌نماید.

[۱] Bancal, J. D., Pironio, S., Acin, A., Liang, Y. C., Scarani, V., Gisin, N.: Quantum nonlocality based on finite-speed caual influences leads to superluminal signaling, Nature Physics **8**, 867 (2012), arXiv: 1210 . 7308.

شکل ۱۰٫۱ این برنامه را نشان می‌دهد. در این‌جا نیز نتیجه غیرقابل‌اجتناب این است که رخدادهای دور از هم به طریقی ناپیوسته به یکدیگر متصل هستند، و درنتیجه واقعاً طبیعت ناموضِع می‌باشد.

شکل ۱۰٫۱ برنامه تحقیقاتی جان بِل. امروزه این برنامه تکمیل شده است. برای برخی همبستگی‌هایی که می‌تواند با فیزیک کوانتومی ایجاد شوند هیچ‌گونه توضیح موضِعی ممکنی وجود ندارد. طبیعت ناموضِع است و خدا تاس بازی می‌کند، بگونه‌ای که شکلی از ناموضِعیت که مانع ارتباط بدون انتقال می‌شود را مجاز بداند.

نتیجه‌گیری

به انتهای کتاب رسیدیم. همان‌طور که هشدار دادم، شما همه‌چیز را نخواهید فهمید. هیچ‌کس نمی‌داند که چرا فیزیک کوانتومی ناموضِع است. از طرف دیگر متوجه شدید که طبیعت تعیّنی نمی‌باشد و این‌که قادر است کنش‌هایی اصیل از خلقت محض را داشته باشد. به زبان دیگر قادر است رخدادهای واقعاً شانسی‌گونه را خلق نماید. علاوه بر این، به محض این‌که بپذیریم این‌گونه رخدادها به‌طور تقلیل‌ناپذیری شانسی‌گونه بوده و نَه چیزی که از قبل وجود داشته و فقط از چشمان ما پنهان بوده‌اند، خواهیم فهمید که هیچ‌چیز نمی‌تواند مانع شود که این رندمی بودن به‌طور همزمان در چندین مکان بدون این‌که بر هرگونه ارتباطی بین آن مکان‌ها دلالت داشته باشد، خود را به نمایش بگذارد.

این مکان‌ها اختیاری نبوده و ابتدا باید درهم‌تنیده باشند. درهم‌تنیدگی توسط اجسام کوانتومی مانند فوتون‌ها یا الکترون‌ها حمل می‌گردد و این اجسام با سرعت‌های متناهی، کمتر و یا مساوی سرعت نور، منتشر می‌گردند. به این ترتیب، مفاهیم فاصله و فضا همچنان با یکدیگر مرتبط باقی می‌مانند، هرچند که رندمی‌بودن ناموضِع خود را می‌تواند در دو مکان با هر فاصله بزرگ دلخواهی به نمایش بگذارد.

در این کتاب گفتم که به نظر می‌رسد همبستگی‌های ناموضِع بگونه‌ای از خارج از فضا و زمان پدیدار می‌گردند به این معنا که هیچ داستانی که در فضا با گذشت زمان اتفاق بیفتد نمی‌تواند طریقه‌ای که طبیعت چنین همبستگی‌هایی ایجاد می‌کند را توضیح دهد. این موضوع که هیچ داستان معمولی، به این معنی که به ما بگوید چگونه رخدادها و چیزها می‌توانند بر یکدیگر تاثیر بگذارند، به اطراف حرکت کنند و به‌صورت پیوسته از یک نقطه به نقطه بعدی منتشر گردند، وجود ندارد که قادر باشد ظاهر همبستگی‌های ناموضِع را توصیف نماید، به‌طور موثری صحیح می‌باشد. اما آیا این بدان معنی است که فیزیک‌دان‌ها می‌بایست کوشش خود را برای فهمیدن طبیعت ترک نمایند؟ این موضوع همیشه مرا متعجب می‌نماید که چگونه برخی فیزیک‌دان‌ها درمورد این سوال زیاد نگران به نظر نمی‌رسند. گویی آن‌ها صرفاً از این‌که قادرند محاسبات ضروری را انجام دهند راضی می‌باشند. شاید این فیزیک‌دان‌ها عقیده دارند که کامپیوترها طبیعت را خواهند فهمید؟ ولی علم همواره با این خصوصیت که در جستجوی توضیح‌های خوب می‌باشد، شناخته شده است.

تا قبل از ظهور فیزیک کوانتومی، تمامی همبستگی‌های پیش‌بینی شده و مشاهده شده توسط زنجیره‌های عِلّیتی که به‌صورت پیوسته از یک نقطه به نقطه بعدی منتشر می‌گردند، یعنی توسط یک مکانیزم موضِعی، توضیح داده می‌شده است. همچنین تمامی این توضیحاتِ پیش از مکانیک کوانتومی، دارای مشخصه تعیّن بوده‌اند. در اصل، هر چیز توسط شرایط اولیه تعیین می‌گردیده است. هرچند در عمل، شناخت و پیگیری جزئیات این زنجیره‌های عِلّی تعیّنی اغلب غیرممکن بوده، ولی باز هم فیزیک‌دان‌ها در وجود آن‌ها هرگز تردید نکردند. اما فیزیک کوانتومی ما را مجبور می‌نماید که نوع جدید و خوبی از توضیح را برای همبستگی‌های ناموضِع فرمولبندی نماییم.

اما چگونه می‌توانیم مفهومم ناموضِعیت را توضیح دهیم؟ این کار با ابزار مفهومی پیش‌از کوانتوم، غیر ممکن خواهد بود. بنابرین ما مجبور هستیم جعبه‌ابزار خود را گسترش دهیم. یک راه این است که در مورد رندمی‌بودن ناموضِع که توسط اجسام درهم‌تنیده به‌وجود می‌آید صحبت کنیم.

نوعی تاس مفهومی، چیزی شبیه به جعبه‌های PR که در فصل ۱۰ مورد بحث قرار گرفت، را درنظر بگیرید که هم آلیس و هم باب می‌توانند آن را "پرتاب کنند" و نتیایج رندمی هم برای آلیس و هم برای باب تولید می‌نماید. این تاس ناموضِع به انتخاب آلیس و انتخاب باب، از طریق حرکت دادن دسته جعبه آلیس و جعبه باب، پرتاب می‌شود تا یک اندازه‌گیری را انجام دهد. به‌صورت کمی رسمی‌تر، این فرآیند رندمی می‌تواند توسط آلیس و با انتخاب ورودی خود x یا توسط باب از طریق انتخاب ورودی او y انجام پذیرد. نتایج a و b رندمی هستند اما با این ضمانت که آن‌ها به نوعی به یکدیگر "مربوطند" (یا "همدیگر را جذب می‌کنند") بگونه‌ای که همبستگی اساسی بازی بِل همان‌گونه که در رابطه $a + b = x \times y$ بیان‌شد را برآورده نمایند. اگر ما چنین توضیحی را مجاز بدانیم، بنابرین خواهیم توانست ناموضعیت را بفهمیم، دقیقاً همان‌گونه که سرانجام جاذبه عمومی را با پذیرفتن این‌که همه جرم‌ها، و به‌طور خاص همه انسان‌ها، توسط زمین جذب می‌گردند، درک نمودیم. طبیعتاً وقتی حرف از جاذبه عمومی به میان‌می‌آید ما معادل آشنایی برای آن مانند آهنربای استفاده شده در یخچال را داریم. همچنین اگر روزی رمزنگاری کوانتومی به همین اندازه عادی گردد، ما قادر خواهیم بود به فرزند خود بگوییم: "می‌بینی، ناموضِعیت دقیقاً مانند چیزی است که در رمزنگاری کوانتومی اتفاق می‌افتد، نَه آلیس یک کلید محرمانه را برای باب می فرستد و نَه باب کلیدی محرمانه برای آلیس می‌فرستد، این آلیس و

باب هستند که درحالی‌که از یکدیگر کاملاً دور هستند با یکدیگر یک کلید محرمانه را تولید می‌نمایند که برای هردوی آن‌ها به‌طور همزمان صورت مادی بخود می‌گیرد".

آیا این تنها روشی است که می‌توان رندمی‌بودن ناموضِع را توضیح داد؟ برخی ترجیح می‌دهند تا در مورد علّیت وارونه (رو به عقب) صحبت نمایند، بدین معنا که انتخاب آلیس در زمان به سمت عقب بر روی منبع درهم‌تنیدگی اثر می‌گذارد، و این منبع نیز به نوبه خود در زمان به سمت جلو بر روی سیستم کوانتومی باب اثر می‌گذارد. بنابرین علّیت وارونه در زمان به سمت عقب و به سمت گذشته عمل می‌نماید. از یک نقطه به نقطه دیگر از طریق فضا منتشر می‌گردد، اما به سمت گذشته. شخصاً بنده شک ندارم که ناموضِعیت، مانند نظریه نسبیت، مشکلاتی را برای مفهوم آشنایی از زمان که در ذهن ماست ایجاد می‌نماید، اما تصور یک علیت که از لحاظ زمانی وارونه باشد و در زمان به سمت عقب حرکت نماید، گامی بسیار متهورانه به نظر می‌رسد!

این رهیافت را به‌عنوان مثالی از تحقیقات امروزی ذکر نمودم. حتماً متوجه شده‌اید که بنده توضیح خودم را بر مبنای ایده رندمی‌بودن ناموضِع که می‌تواند خودش را در چندین مکان به‌صورت همزمان و بدون توجه به فاصله بین آن‌ها به نمایش بگذارد، ترجیح می‌دهم، اما ممکن است که آینده مرا کاملاً غافلگیر نماید و نسل‌های آینده توضیح کاملاً متفاوتی از ارائه بدهند. اما یک چیز قطعی است: ما مفهوم ناموضِعیت را خواهیم شناخت. فیزیک‌دان‌ها هیچ‌گاه این کار بزرگ را ترک نمی‌نمایند که جهان را بشناسند، آن‌ها برای این موضوع نیز به توضیحی دست‌خواهند یافت.

بنابرین رندمی‌بودن ناموضِع روش توضیحی جدیدی محسوب می‌گردد که در کنار تمامی ابزار دیگر که ما در طول قرن‌ها برای فهمیدن جهان جمع‌آوری نموده‌ایم، در جعبه‌ابزار مفهومی ما قرار می‌گیرد. و این یک انقلاب مفهومی اصیل به حساب می‌آید!

از آن‌جا که نظریه کوانتومی وجود همبستگی‌های ناموضِع را پیش‌بینی می‌نماید، ما راه دیگری نداریم جز این‌که با آن‌ها به‌صورت موقتی سرکنیم و این نوع جدید توضیح را بپذیریم.

زمان زیادی طول کشید تا ناموضِعیت کوانتومی به عنوان یک مفهوم اصلی در فیزیک پذیرفته شد. حتی امروزه بسیاری از فیزیک‌دان‌ها عبارت "ناموضِع" را نمی‌پسندند[۱]. اما با این وجود، از همان سال ۱۹۳۵، دانشمندان فیزیک از جمله اینشتین و شرودینگر این جنبه از مکانیک کوانتومی را به‌عنوان اصلی‌ترین ویژگی آن پذیرفته بودند[۲]. به نظر می‌رسد آن‌چه تمامی این فیزیک‌دان‌های شکاک درک نکرده‌اند این است که ناموضِعیت کوانتومی اجازه برقراری ارتباط را نمی‌دهد. در واقع هیچ‌چیز از سوی آلیس به باب یا از باب به آلیس رهسپار نمی‌شود. فقط این‌گونه است که یک رخداد رندمی خودش را در چندین مکان بگونه‌ای که نمی‌توان آن را به‌صورت موضِعی توصیف نمود، یعنی به روشی ناموضِع، به نمایش می‌گذارد. اینشتین اشتباه می‌نمود که از "کنش ناموضِع" صحبت می‌کرد، زیرا هیچ‌گونه کنشی از آلیس بر باب و یا از باب بر آلیس وجود ندارد. اما او کاملاً حق داشت که بر اهمیت این جنبه از نظریه کوانتومی تاکید نماید، زیرا در واقع این خاصیتی است که فیزیک کوانتومی را از فیزیک کلاسیک

[۱] در طول بیست سال گذشته همه چیز به‌صورت چشمگیری تغییر نموده است. ظهور اطلاعات کوانتومی و تغییر رفتار جامعه عظیم فیزیک حالت جامد، باعث استفاده گسترده از کلماتی شده است که تقریباً تا دو دهه قبل ممنوع بودند، کلماتی مانند "ناموضِعیت"، "همبستگی‌های ناموضِع"، "رندمی بودن محض" و "نامعادله بِل". اما بخش بزرگی از این جامعه فیزیک، یعنی جامعه فیزیک انرژی‌های بالا، همچنان در برابر این تغییرات مقاومت می‌کنند. گویا این فیزیک‌دان‌ها فکر می‌کنند که تنها شاخه آن‌ها با مسائل بنیادی فیزیک سروکار دارد و مابقی فیزیک تنها نوعی مهندسی قابل ستودن می‌باشد. تعداد فیزیک‌دان‌های حرفه‌ای در قرن ۲۱ به‌صورت چشمگیری افزایش یافته ولی همچنان جامعه‌شناسی این مجموعه بزرگ تدوین نشده است.

[۲] توضیح مترجم البته با هماهنگی مولف: این‌گونه دانشمندان با این‌که مفهوم ناموضعیت را دوست نداشتند و امیدوار بودند با یک نظریه موضعی جدید جایگزین شود، مانند آنچه برای نظریه نیوتن رخ داد، ولی مجبور به پذیرش آن بودند و این جنبه از مکانیک کوانتومی را اصلی‌ترین ویژگی آن می‌دانستند. امروزه می‌دانیم که این جایگزینی غیرممکن است.

متمایز می‌نماید. امروزه وقتی می‌خواهیم مطمئن شویم که یک سیستم کوانتومی است، باید نشان دهیم که می‌تواند برای تولید همبستگی‌های ناموضِع مورد استفاده قرار گیرد، به عبارت دیگر، می‌تواند برای برنده شدن در بازی بِل مورد استفاده قرار گیرد. امروزه نقض نامعادله بِل ویژگی اصلی (امضای) دنیای کوانتوم می‌باشد.

اما این همچنان ضربه محکمی به شهود ما محسوب می‌گردد. آیا تکنولوژی‌های کوانتومی که امروزه در حال توسعه می‌باشند، ممکن است روزی فیزیک کوانتومی و ناموضِعیت را برای ما شهودپذیر نمایند؟ به نظر بنده خواهند توانست. می‌توانیم از حالا با جایگزین کردن واژه قدیمی "مکانیک کوانتومی" با عبارت "فیزیک کوانتومی" شروع نماییم. هیچ‌چیز مکانیکی در مورد این شاخه خاص از فیزیک وجود ندارد!

اجازه دهید یک‌بار دیگر نکات اصلی را جمع‌بندی نماییم. دیدیم که همبستگی‌های ناموضِع و وجود شانس محض به‌صورت خیلی نزدیکی به یکدیگر مربوطند. بدون رندمی بودن محض، همبستگی‌های ناموضِع لزوماً می‌تواند برای برقراری ارتباط بدون انتقال مورد استفاده قرار گیرد (بنابرین با هر سرعت دلخواهی). بنابرین مفهوم محوری این کتاب لزوماً بر وجود شانس محض و درنتیجه پایان تعیّن دلالت دارد. برعکس، هنگامی که وجود رندمی‌بودن محض پذیرفته شد، دیگر آن‌چنان‌که فیزیک کلاسیک با تعیّن لجوجانه خود به خورد ما داد، وجود همبستگی‌های ناموضِع جاهلانه به نظر نمی‌رسد. در واقع اگر طبیعت قادر است اتفاقات واقعاً شانسی‌گونه تولید نماید، پس چه الزامی دارد که همبستگی‌های مشاهده شده در طبیعت در قالب همبستگی‌های موضِعی محدود گردند؟

نمی‌توان در مورد تاثیر ناموضِعیت بر متافیزیک، یعنی بر جهان‌بینی که علم مدرن پیشنهاد می‌دهد، بیش از حد اغراق نمود. قرن‌ها طول کشید تا نظریه اتمی در اروپا

جا افتاد. این دیدگاه عبارت بود از جهانی که از تعداد بسیار زیادی اتم ساخته شده است، مانند دانه‌های ریز نامرئی، که به روش‌های مختلفی گردهم‌می‌آیند تا تمامی اجسامی که برای ما شناخته شده‌اند را بسازند. حرکت‌های نامنظم آن‌ها گرما را ایجاد نموده و در موتورهای بخار که برای ما انقلاب صنعتی را به ارمغان آوردند، انرژی فراهم می‌نمایند. در آن زمان به نظر می‌رسد که این جهان‌بینی در حلقه‌های فکری کشور چین طرفداران زیادی پیدا نکرد. زمانی آن‌ها این‌گونه می‌پنداشتند که در جهانی پر از فضای خالی مابین اتم‌ها، ما نه می‌توانیم بشنویم و نَه ببینیم، چرا که خلاء جلوی ادراک حواس ما را می‌گیرد[۱]. ظاهراً در متافیزیک باستانی چین، کنش از راه دور کاملاً طبیعی و بخشی از نظم جهانی بوده که همه‌چیز را به یکدیگر مربوط می‌ساخته است. فیزیک کوانتومی از چنین دیدگاه جامعی حمایت نمی‌نماید. در فیزیک کوانتومی همه‌چیز با همه‌چیز دیگر درهم‌تنیده نشده است و تنها تعداد اندکی از رخدادهای نادر به‌صورت ناموضِع با یکدیگر همبسته می‌باشند. و مهمتر از همه، با این‌که بارها تکرار کردیم، هیچ علتی در این‌جا وجود ندارد که در آنجا عمل کند. درهم‌تنیدگی نوعی از "علت احتمالاتی"[۲] است که اثرات آن می‌توانند در چندین مکان بدون این‌که اجازه برقراری ارتباط از راه دور داده شود، خود را نشان دهند. درهم‌تنیدگی تمایل طبیعی اجسام را برای تولید این‌چنین پاسخ‌های همبسته‌ای به برخی سوالات مشخص می‌نماید. این پاسخ‌ها از قبل تعیین نگردیده‌اند، آن‌ها در حالت جسم نوشته نشده‌اند. این تنها میل یا گرایش طبیعی (یا احتمال) به بار آمدن چنین یا چنان نتیجه‌ای است، که در حالت جسم نوشته شده‌است.

---

[۱] Needham, J.: Science in traditional China, Harvard university Press, 1981.

[۲] probabilistic cause

شخصاً بنده این موضوع را خیلی خارق‌العاده نمی‌بینم که یک جسم کوانتومی نباید تمامی پاسخ‌های همه سوالاتی که فیزیک‌دان‌ها می‌توانند از آن بپرسند را دارا باشد، اما این موضوع که آن جسم باید دارای میل باطنی باشد که آن جواب‌ها را تولید نماید شگفت‌آور می‌باشد. برای من پذیرفتن اینکه جهان تعیّنی نمی‌باشد، دشوار نمی‌باشد. از دید من اینکه این جهان پر از امیال باطنی و رخدادهای شانسی‌گونه باشد و از قوانین مشخصی پیروی نماید، بسیار جالب‌تر از جهانی است که در آن همه چیز کاملاً از پیش‌تعیین شده باشد، و از آغاز زمان اینگونه بوده‌باشد.

اما مطمئن باشد که مقدار بیشتری باقی‌مانده‌است تا درباره جهان بفهمیم. به‌صورت خاص، ما هنوز نَه می‌دانیم که چگونه این موضوع را با نظریه نسبیت اینشتین سازگار نماییم، نَه ساختار کامل ریاضی آن را می‌دانیم، نَه پتانسیل کامل کاربردهای آن در پردازش اطلاعات و شاید شگفت‌آورتر از همه حدود ناموضِعیت را نمی‌دانیم: چرا فیزیک کوانتومی ناموضِعیت‌های بیشتری را مجاز نمی‌داند؟

این سوال آخر، تصویر خوبی است از فاصله‌ای که ما از زمان اینشتین، شرودینگر و بِل طی نموده‌ایم. در آن روزها سوال این بود که: آیا همبستگی‌های ناموضِع که توسط نظریه کوانتومی پیش‌بینی می‌گردد واقعاً وجود دارند؟ امروزه هیچ فیزیک‌دانی بر این موضوع شک ندارد. امروزه مشکل این است که این را با نظریه نسبیت ادغام نموده و حدود ناموضِعیت را درک نماییم. چیزی که ما لازم داریم این است که ناموضِعیت کوانتومی را از خارج از نظریه کوانتوم بررسی نماییم. و ما در حال انجام دادن این‌کار می‌باشیم.