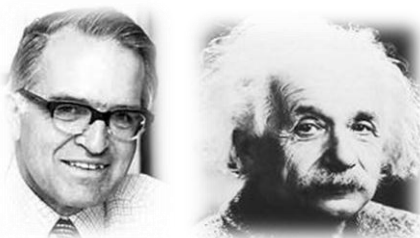




چه کسی درست می‌گفت، اینشتین یا بوهر؟



آیا جهان می‌تواند تا آن اندازه که نظریه کوانتوم ادعا می‌کند، پیچیده باشد؟ این سوالی است که جدال مشهور آلبرت اینشتین و نیلز بوهر را آغاز کرد و به نظر می‌رسد فیزیکدانان به پاسخ نهایی آن نزدیک شده‌اند.

هنگامی که روبرت اورسین در تاریکی مرتفع‌ترین نقطه لاپالما در جزایر قناری ایستاده بود، محیط را ترسناک یافت. «واقعاً ترسناک». دلیل عمده آن، تاریکی‌ای نبود که اقیانوس اطلس را پوشانده بود؛ بلکه بیشتر به دلیل چالش تکنیکی محضی بود که در پیش رو قرار داشت؛ و شاید اندکی هم به دلیل ارواحی بود که وی می‌خواست بعد از چند ده سال، به آرامش برسند.



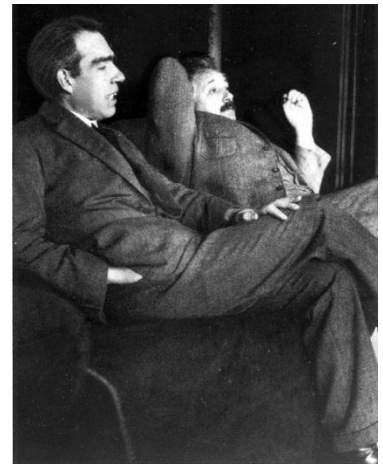
اورسین و همکارانش از موسسه اپتیک کوانتومی و داده‌های کوانتومی وین در اتریش، آن شب به لاپالما آمده بودند تا ببینند که آیا می‌توانند فوتون‌های نور را به شکاف یک متری تلسکوپی در جزیره تریف که 144 کیلومتر از آنها فاصله داشت، بفرستند یا نه. حتی در یک روز صاف، هنگامی که تید؛ قله آتشفشانی تریف از لاپالما قابل مشاهده است؛ رسیدن به چنین دقتی هوش از سر می‌ریاید. چنین به نظر می‌رسید که حتی تلاش برای رسیدن به این دقت در تاریکی، خنده‌دار است. اورسین می‌گوید: «در تاریکی شب شما نمی‌دانید که جزیره مقابل در کدام سمت قرار دارد. کاملاً گم شده‌اید و هیچ ایده‌ای از این که چه کار باید کرد، ندارید».

ولی در طول روز، بی‌نهایت فوتون نور خورشید مزاحم می‌شوند و انجام آزمایش را غیر ممکن می‌سازند. به همین دلیل، در شب‌های بی‌مهتاب، پژوهشگران چراغ‌های آزمایشگاه خود را

خاموش کرده و در زیر نور ستارگان کهکشانشان راه شیری به بیرون می‌روند. برای چه؟ برای کوشش برای پایان بخشیدن به یکی از طولانی‌ترین بحث‌های فیزیک مدرن. برای حل ابهامی دیگر در درک پایه‌ای ما از طبیعت. برای پاسخ به یکی از بنیادی‌ترین پرسش‌ها: آیا واقعیت کوانتومی واقعی است؟

دعای اینشتین و بوهر

در میانه دهه 1920 / 1300 بود که دو نفر از بزرگ‌ترین غول‌های فیزیک مدرن، نیلز بوهر و آلبرت اینشتین، به این سوال پرداختند. تا آن زمان مشخص شده بود که فیزیک کلاسیک نمی‌تواند پدیده‌هایی در مقیاس بسیار کوچک را توضیح دهد؛ پدیده‌هایی مانند این که ارتباط نور با ماده چگونه است، یا این که چرا الکترون‌های از مدار خود به داخل اتم سقوط نکرده و به هسته اتم برخورد نمی‌کنند.



به نظر می‌رسید که نظریه جدید کوانتوم بتواند از عهده این کار برآید، ولی انتخاب مطبوعی نبود. با این کار قوانین قدیمی و ارتباط متقابل عمل و عکس‌العمل، و در یک کلام کل دنیای نیوتنی از اعتبار ساقط می‌شد و آنچه جای آنها را گرفت، دنیایی مه‌آلود و مملو از ذراتی بود که هم‌زمان موج هم بودند، و به نظر بدون هیچ دلیلی بر هم تاثیر می‌گذاشتند، و ظاهراً می‌توانستند تا پیش از این که ناظر بیرونی آنها را مشاهده کند، در آن واحد در چندین حالت وجود

داشته باشند.

به باور بوهر، اگر ما نمی‌توانستیم این فضا را درک کنیم، در آن صورت مشکل در مغز ما بود، نه در مکانیک کوانتوم. هر اندازه که این نظریه برای ذهن کلاسیک ما ناخوشایند به نظر برسد، توضیحی کامل بنیادی از نحوه عملکرد دنیای واقعی است.

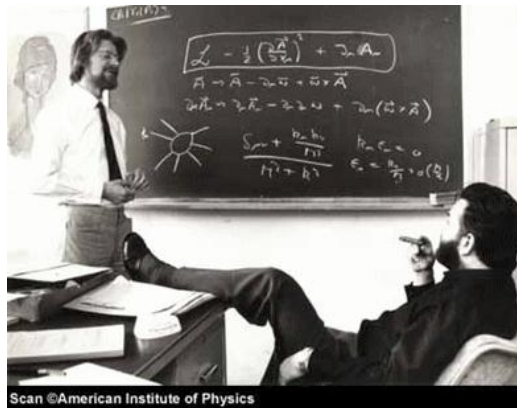
اینشتین اما چنین نظری نداشت. او فکر می‌کرد که غرابیت و پیچیدگی مکانیک کوانتوم به این معنی است که این نظریه چیزی را کم دارد. او متقاعد شده بود که لایه‌ای عمیق‌تر از واقعیت در زیر سطح این نظریه قرار دارد، و توسط «متغیری پنهان» و ناشناخته، کنترل می‌شود که با قوانینی نزدیک به قوانین فیزیک کلاسیک کار می‌کند.

مباحثه بوهر و اینشتین برای چندین دهه و بدون رسیدن به جوابی قطعی ادامه یافت. ولی تا سال 1964 / 1343 (بعد از مرگ هر دو نفر)، هیچ نشانه‌ای از صحت ادعای یکی از طرفین آشکار نشد. این جان پل، پژوهشگر 36 ساله آزمایشگاه اروپایی فیزیک ذرات، سرن بود که نظریه را از بن‌بست خارج کرد. ایده او این بود که بحث تقریباً فلسفی بوهر و اینشتین را تبدیل به معادلات ریاضی کند.

نامساوی بل

بل در آغاز ذرات درهم‌تنیده شروع کرد، به این صورت که با اندازه‌گیری خواص یکی می‌توانید

خواص دیگری را حدس بزنید. وجود چنین درهم‌تنیدگی به نوبه خود تعجب‌برانگیز نیست: اگر قوانینی مانند پایستگی انرژی و تکانه صادق باشند، انتظار داریم که خواصی مانند سرعت یا مکان ذراتی که در یک زمان از یک منبع خارج شده‌اند، درهم‌تنیده باشند. ولی بل از تعریفی ریاضی به نام نابرابری استفاده کرد تا مقدار بیشترین درهم‌تنیدگی ممکن را در صورتی شرح دهد که دو شرط برقرار باشند: واقع‌گرایی و مکان؛ دو شرطی که برای درک کلاسیک ما خیلی اهمیت دارند، اما به نظر می‌رسد که مکانیک کوانتوم ارزشی برای آنها قائل نیست.



واقع‌گرایی متضمن این ایده است که هر ویژگی قابل اندازه‌گیری برای هر جسم و در هر زمانی وجود دارد و مقدار آن بسته به ناظر بیرونی نیست؛ و شرط مکانی فرض می‌کند که این ویژگی‌ها تنها توسط چیزهایی که در نزدیکی آنها باشند، تحت تاثیر قرار می‌گیرند و هیچ چیزی از دور نمی‌تواند بر آنها تاثیر بگذارد.

این‌جا بود که فیزیکدانان می‌توانستند وارد شوند. تمام چیزی که مورد نیاز بود، آزمایش برای بررسی این بود که دو ذره خارج شده از یک منبع، چقدر درهم‌تنیده هستند. اگر درهم‌تنیدگی آنها با تفاوت چشمگیری نابرابری بل را نقض می‌کرد، در آن صورت، هر دو شرط واقع‌گرایی و مکان از اعتبار ساقط و ثابت می‌شد که مکانیک کوانتوم واقعا پیچیده است؛ ذرات به شیوه مرموزی «درهم‌تنیده» بودند. اما اگر نابرابری بل صادق بود، در آن صورت یک چیز واقعی، محلی و کلاسیک وجود داشت که همه چیز را کنترل می‌کرد: برای مثال، متغیر پنهان اینشتین.

ولی واقعیت امر پیچیده‌تر از این‌ها بود. مشخص شد که اعمال شرایط ایده‌آل مورد نیاز برای آزمودن نابرابری بل خیلی سخت است و تمام آزمایش‌ها هم بی‌نتیجه ماندند.

خروج از بن‌بست

در اوایل دهه 1970 / 1350، آلن اسپکت، دانشجوی جوان فرانسوی وارد صحنه شد. او به تازگی خدمت اجباری سربازی خود را به عنوان یک آموزگار در کامرون به پایان برده بود و به دنبال موضوعی برای دکترایش می‌گشت. او که مقاله بل را خوانده بود و از گذشته مباحثات بین بوهر و اینشتین خیر داشت، شیفته این موضوع شد. اسپکت که اکنون در انستیتوی اپتیک پالازیوی فرانسه کار می‌کند، می‌گوید: «هیجان‌انگیزترین چیز برای یک آزمایشگر این بود که با آزمایش دریابد که حق با کدام یک از دو طرف است.»



در نتیجه اسپکت با بل دیدار کرد تا برای کار خود از وی رهنمون بگیرد. بل به اسپکت هشدار داد که خیلی‌ها، کاوش ریشه‌های واقعیت کوانتوم را «فیزیک جنون» می‌دانند، و از او پرسید که آیا کار مطمئنی دارد یا خیر. اسپکت می‌گوید: «من چنین کاری داشتم. درآمد آن کم ولی دائمی بود. آنها نمی‌توانستند اخراج کنند». این اطمینان، اسپکت را قادر ساخت که تحقیق 7 ساله‌ای را برای یافتن این که حق با کدام طرف است آغاز کند.

آزمایش‌های اسپکت از الگویی تبعیت می‌کردند که در آزمایش‌های قبلی نابرابری بل بنا نهاده شده بود. ابتدا اتم‌ها شبیه‌سازی شدند تا زوج‌هایی از فوتون‌ها را ساطع کنند که قطبش آنها درهم‌تنیده بود. سپس این قطبیدگی‌ها در دو آشکارساز جداگانه اندازه‌گیری شده و به طور قراردادی با دو متغیر به نام آلیس و باب کنترل می‌شوند.

این امر مستلزم اندازه‌گیری مقادیر زیاد زوج‌های فوتون برای رسیدن به نتایج آماری چشمگیر بود. در آن زمان، اسپکت به همراه دانشجویانش، فیلیپ گرنجیر و جان دالیارد، آماده بودند تا آزمایش‌های قطعی خود را انجام دهند، پیشرفت‌های فناوری لیزر این کار را ساده‌تر کرد. اسپکت می‌گوید: «در سال 1980 / 1359، من بهترین منبع فوتون‌های درهم‌تنیده جهان را در اختیار داشتم. در حالی که تا پیش از آن زمان، رسیدن به تعداد فوتون مورد نیاز، ساعت‌ها یا روزها به طول می‌انجامید، من می‌توانستم در تنها یک دقیقه به این تعداد برسم».

ولی هنوز کار پرمشقتی بود. ولی در سال 1982 / 1361، پژوهشگران به متقاعدکننده‌ترین پاسخ در بحث واقعیت کوانتومی رسیدند. هیچ شکی در پاسخ وجود نداشت. حق با بوهر بود؛ نابرابری بل نقض شده بود. دنیا به همان پیچیدگی و غرابندی بود که نظریه کوانتوم می‌گوید.

کمی تردید

ما چرا تمام شد؟ به هیچ وجه. آزمایش‌ها قاطع نبود و نتوانست اعتقاد طرفداران دیدگاه اینشتین را حتی اندکی سست کنند، آنها این نکته را مطرح کردند که شاید طبیعت به آزمایش‌گرها کلک زده و آنها را به این فکر رهنمون کرده که نظریه کوانتوم پاسخ درست است. حتی اگر درهم‌تنیدگی‌های اندازه‌گیری شده از بیشینه بل بیشتر شده بود، حفره‌های کافی در آزمایش‌ها وجود داشت تا فضای کافی را برای فکر کردن به این که چیزی غیر از مکانیک کوانتوم بتواند دلیل این امر باشد، به وجود بیاورد.

جانز کوفلر، از نظریه‌پردازان گروه وین می‌گوید: «این سوال که آیا طبیعت محلی و واقع‌گرایانه است یا ریشه در مکانیک کوانتوم دارد، آن قدر عمیق و مهم است که ما باید تلاش کنیم تا این آزمایش‌ها را تا حد امکان تمیز و بدون ایراد انجام دهیم. مسئله فقط حذف نظریه‌های توطئه طبیعت علیه ما است».

آزمایش‌های اسپکت تاکنون با تلاش برای بستن حفره‌ای که بل شناسایی کرده بود، کار بزرگی انجام داده‌اند؛ حفره مکان، تا زمانی که آشکارسازهای مورد استفاده توسط آلیس و باب آن قدر از هم فاصله داشته باشند که مانع از ارتباط بین آنها در سرعت نور یا کمتر از آن شوند، برخی تأثیرات ممکن است از طریق یک لایه پنهان واقعیت منتشر شوند و مثلاً پیش از این که آشکارساز آلیس اندازه‌گیری کند، خروجی باب را به او بگویند، و شاید حتی تنظیمات آشکارساز او را تغییر دهند تا خروجی متفاوتی بدهد. کوفلر می‌گوید: «اگر اجازه چنین ارتباطی را بدهید، نقض نابرابری بل با واقع‌گرایی مکانی کار ساده‌ای خواهد بود».

منبع بسیار کارآمد فوتون‌های درهم‌تنیده و ابزار نوری عالی مورد استفاده توسط اسپکت و گروهش، به آنها این امکان را داد که آلیس و باب را تا 6 متر از هم دور کنند. این امر به آنها زمان کافی را می‌داد تا بعد از خروج فوتون‌ها از منبع، تنظیمات آشکارسازها را تغییر دهند، به این امید که هر کانال ارتباطی پنهانی بین فوتون‌ها را قطع کنند تا نتواند بر آزمایش اثر بگذارد.

اقدام زیرکانه‌ای بود، ولی نه به اندازه کافی. گروه تنها چند نانو ثانیه برای تغییر تنظیمات آشکارسازها در اختیار داشت که برای تغییر تصادفی آنها کافی نبود. در عوض، آنها مجبور بودند از یک الگوی قابل پیش‌بینی متناوب استفاده کنند. اگر یک کانال پنهان وجود داشت، در آن صورت، ممکن بود که در طول زمان آشکارسازهای مورد استفاده باب و آلیس، تنظیمات یکدیگر را حدس زده و دوباره آزمایش را به هم بزنند.

در سال 1988 / 1367 برای حذف چنین امکانی، گرگور وایز، آنتون زایلینگر و همکارانشان، از فیبر نوری برای اتصال آشکارسازها به منبع نوری استفاده کردند تا بتوانند در محوطه دانشگاهشان در اینزبروک اتریش، باب و آلیس را 400 متر از هم دور کنند. این امر به آنها تقریباً 1.3 میلی‌ثانیه زمان می‌داد تا بعد از پرتاب فوتون از منبع نور و قبل از رسیدن فوتون به آشکارساز، تنظیمات آن را به طور تصادفی تغییر دهند. برای بسته‌تر کردن حفره مکان، ساعت‌های اتمی این اطمینان را فراهم می‌کردند که آلیس و باب، در یک فاصله زمانی 5 نانو ثانیه‌ای اندازه‌گیری خود را انجام می‌دهند (که به اندازه کافی سریع بود تا مانع از رسیدن یک پیام پنهانی شود) این آزمایش به وضوح نشان از نقض نابرابری بل داشت. مکانیک کوانتوم برنده شده بود.

ولی حتی این هم پاسخ نهایی نبود. وقتی که حفره مکان بسته شد، نگاه‌ها به حفره‌های دیگر معطوف شد. یکی از آنها حفره نمونه‌برداری منصفانه یا آشکارسازی بود. آشکارسازهای فوتون مورد استفاده در تمام آزمایش‌های پیشین ناکارآمد بودند و تنها بخش کوچکی از فوتون‌های ارسال شده از منبع را نمونه‌برداری می‌کردند. چه می‌شد اگر تنها بخش کوچکی از فوتون‌ها به اندازه کافی درهم‌تنیده بودند تا نابرابری بل را نقض کنند و آشکارسازها هم فقط از همین فوتون‌ها نمونه بگیرند؟ غیر قابل باور، شاید، ولی غیرممکن نه.

این حفره هم اولین بار در سال 2001 / 1380 و توسط گروهی به رهبری دیوید واینلند در انستیتوی ملی استانداردها و فناوری در بولدر کلرادو بسته شد. پژوهشگران به جای فوتون‌ها، یک زوج از یون‌های بریلیوم را درهم‌تنیدند، که هر یک می‌توانست در یک سوپرپوزیشن مکانیک کوانتومی از دو حالت انرژی وجود داشته باشد. بسته به این که یک یون در کدام حالت قرار داشت، یا تعداد خیلی زیادی از فوتون‌ها را پراکنده می‌کرد یا تعداد خیلی کمی را. کاوش یون‌ها با لیزر و اندازه‌گیری تغییرات در مقدار فوتون‌ها این امکان را فراهم آورد که حالت یون را با بازدهی تقریباً 100 درصد تعیین کرد.

باز هم، درهم‌تنیدگی یافت شده بین حالت‌های یون بریلیوم خیلی بیش از چیزی بود که بتوان با هر چیزی جز مکانیک کوانتوم توضیح داد. ولی این آزمایش هم مشکل خود را داشت: در نقطه

اندازه‌گیری، یونها تنها 3 میکرومتر از هم فاصله داشتند. به رغم این‌که حفره آشکارساز بسته شده بود، حفره مکان دوباره باز شده بود.

آزادی انتخاب

از اینها گذشته، تنها یک حفره باقی مانده بود. آزمایش‌های نابرابری بل عموماً فرض می‌کردند که پژوهشگران آزادی انتخاب تنظیمات آشکارساز خود را دارند. ولی آیا در عمل این‌گونه است؟ چه می‌شود اگر منبع ذرات، از طریق یک لایه پنهان واقعیت راهی برای تاثیرگذاری بر تنظیمات آشکارسازهای مورد استفاده آلیس و باب داشته باشد؟ منبع با استفاده از حفره «آزادی انتخاب»، می‌تواند فوتون‌هایی را بفرستد که درهم تنیدگی مکانیک کوانتوم را شبیه‌سازی کنند.



این حفره، ما را به جزایر قناری می‌برد. هدف از تاباندن فوتون‌ها از لاپالما به تئریف (آزمایشی با ترکیب تخصص اورسین، کوفلر، زایلینگر و دیگران) این بود که در عین بسته نگاه داشتن حفره مکانی، حفره آزادی انتخاب را نیز ببندند. در حالی که یک فوتون درهم‌تنیده از روی اقیانوس اطلس و در 479 میکروثانیه به باب تابانده می‌شد، دیگری از یک مسیر 6 کیلومتری فیبر نوری می‌گذشت تا در 29.6 میکروثانیه به آلیس برسد. هنگامی که فوتون‌ها در حال طی مسیر بودند، تولیدکننده‌های اعداد تصادفی تنظیمات آشکارساز را برای آلیس و باب تغییر می‌دادند.

برای اطمینان از آزادی انتخاب برای آلیس، تولید کننده اعداد تصادفی آن، 1.2 کیلومتر دور از منبع فوتون قرار داده شد و زمان‌بندی تولید اعداد تصادفی و تاباندن فوتون طوری بود که هیچ یک نمی‌توانست بر دیگری تاثیر بگذارد. در تئریف، تولیدکننده اعداد تصادفی پیش از رسیدن فوتون از

لاپالما تنظیمات آشکارساز باب را تعیین می‌کرد، و اطمینان حاصل می‌شد که منبع نور نمی‌تواند بر انتخاب باب تاثیر بگذارد؛ با این فرض که هیچ چیز سریع‌تر از فوتون حرکت نمی‌کند.

نتیجه؟ آزمایش یک بار دیگر نابرابری بل را به میزان چشمگیری نقض کرد.

حفره‌های بیشتر؟

به نظر می‌رسد که با این آزمایش، تمام حفره‌های عمده (مکان، نمونه‌برداری عادلانه و آزادی انتخاب) بسته شده‌اند. آیا بحث بین آینشتین و بوهر، در نهایت به سود بوهر به پایان رسیده است؟

شاید! اما برخی دانشمندان تلاش می‌کنند حفره‌های دیگری را شناسایی کنند. یکی از آنها، حفره «فروافتادن واقعیت» است که زائیده افکار آدریان کنت از دانشگاه کمبریج است.

بر مبنای خیلی از تفاسیر نظریه کوانتوم، یک جفت از فوتون‌های درهم‌تنیده تا پیش از اندازه‌گیری، در یک سوپرپوزیشن از حالت‌های کوانتومی قرار دارند، و بعد از آن به یک حالت مشخص فرو می‌افتند. آزمایش‌های انجام شده تاکنون، فرض کرده‌اند که این فروافتادن آنی باشد، ولی این‌گونه نیست. در تفسیرهایی که نیاز به هشیاری انسانی برای ثبت رخدادها و فروافتادن سوپرپوزیشن دارند، این امر چیزی در حدود 0.1 ثانیه به طول می‌انجامد.

این بدان معنی است که حالت کوانتومی می‌تواند پیش از ثبت شدن فروافتادن حالت کوانتومی ذره دوم، فروافتادن خود را از فاصله دور به آن ذره اطلاع دهد. برای بستن این حفره، انسان‌های واقعی باید داده‌ها را ذخیره کنند و فاصله‌ای بیش از 0.1 ثانیه نوری (فاصله‌ای که نور در 0.1 ثانیه طی می‌کند) داشته باشند؛ که چیزی در حدود 30 هزار کیلومتر است.

آنتونی لجت برنده جایزه نوبل از دانشگاه ایلینویز در اوربانا، در این مورد می‌گوید: «این فاصله به نظر خیلی دور می‌رسد، ولی در سوی دیگر، اگر شما در سال 1985 به من می‌گفتید که در سال 2010 مردم چنین آزمایشی را از فاصله بیش از 100 کیلومتری انجام می‌دهند، می‌گفتم که با من شوخی می‌کنید».

اما مساله اصلی این است که هنوز هیچ کس نتوانسته هم‌زمان هر سه حفره عمده را بسته نگاه دارد. پل کوویات و آنتونی لجت، هر دو از دانشگاه ایلینویز در اوربانا، گروهی را برای رسیدن به این هدف رهبری می‌کنند. با استفاده از یک منبع نور قوی، تولیدکننده‌های بسیار سریع اعداد تصادفی و آشکارسازهای بسیار کارآمد، آنها امیدوارند که یک آزمون بدون حفره را ترتیب دهند.

لجت انتظار هیچ شگفتی را ندارد. او می‌گوید: «این یک توطئه خیلی عجیب از طبیعت خواهد بود اگر هنگامی که دو تا از سه حفره را بسته‌اید، همه چیز کار کند، و وقتی هر سه حفره را می‌بندید، همه چیز غلط شود».

از آن بدتر این سوال است که آیا ما واقعا توان بستن حفره آزادی انتخاب را داریم یا نه. اگر دنیایی که ما در آن زندگی می‌کنیم کاملا جبری باشد، چه جایی که حتی خروجی یک تولیدکننده اعداد تصادفی کوانتوم هم از قبل مشخص باشد. این امر ما را تا حد مهره‌های بی‌اختیار یک بازی بزرگ‌تر تنزل می‌دهد. کوفلر می‌گوید: «اگر دنیا جبری باشد، دیگر به عنوان یک آزمایشگر، کاری از دست ما بر نمی‌آید».

ولی به گفته لجت، نگرانی اصلی اغلب فیزیکدان‌ها، این نیست. مسئله این است که یک نظریه متغیر پنهان مکانی-واقع‌گرایانه، به گونه‌ای که اینشتین ترجیح می‌داد، تعریفی ماندگار از طبیعت نیست. به رغم این که شاید مکانیک کوانتوم، کلام آخر نباشد، بهترین تعریف از واقعیتی است که اکنون داریم.

پس اینشتین اشتباه می‌کرد؟ زایلینگر می‌گوید: «بله، او در مورد واقعیت اشتباه فکر می‌کرد، و من خیلی دوست داشتم نظر او را در مورد شرایط فعلی بدانم». ولی زایلینگر این را نیز می‌افزاید که با مجبور کردن ما به آزمودن پایه‌های مکانیک کوانتوم، نگرانی‌های اینشتین به ما نظریه‌ای داده که هرچقدر هم عجیب باشد؛ به نسبت تمام پیشینیانش ریشه محکم‌تری در واقعیت دارد.

انگیزه خوبی است برای گذراندن شب‌های تاریک در بالای لاپالما و بررسی افق تاریک در جستجوی یک هدف فوتونی در دوردست. اگر ارواح بوه‌ر و اینشتین در این شب‌های پرستاره در آنجا باشند، هر یک دلیلی برای خوشحالی و رضایت دارند: بوه‌ر از این که پژوهشگران یک بار دیگر درستی بینش او را در مورد جهان به اثبات رسانده‌اند؛ و اینشتین هم برای اطمینان از این که آنها هنوز راهی به قله پیدا نکرده‌اند!