

الكون الكمومي أو الكوانتي 3-10

أو

حكايات الكوانتوم الغريبة 3

إعداد وترجمة د. جواد بشارة

رحلة في الكون الخاص جدًا لفيزياء الكموم. سوف نكتشف عالماً جديداً، ولكن ما الذي يميز فيزياء الكم؟ إنه ببساطة أبعد من خيالنا، وأبعد تصورنا للأشياء.

نحاول في هذه الدراسة أن نتيح للقارئ الاقتراب بطريقة بسيطة جدًا من شيء يبدو في البداية معقدًا للغاية.. في حكاية مريحة لا تحتاج إلى في الحلقات القادمة تفكير، ستتعرف على قطة شرودنجر المسكينة الحية الميتة في آن واحد، وهذه مجرد تجربة فكرية ولم يتم إساءة معاملة أي حيوان في هذه القصة! لكن هل يمكن أن يؤدي تراكم حالات الإلكترون إلى جعل القطة ميتة وحية في نفس الوقت؟ يكون الكموم غريبًا في بعض الأحيان، لكن في هذه الحالة، لن يؤدي إلى أي مفاجأة: كون القط "أكبر من أن يكون كموميًا"، وسنوضح أن لديه فرصة واحدة من كل 2 للبقاء على قيد الحياة بعد ذلك.

فيزياء الكموم ليست حديثة وتعود ل بدايات القرن الماضي، لكن ما هو مستقبلها؟ يعتقد أنها ستكون فيزياء المستقبل، ولا سيما في مجال معالجة موضوع الكمبيوتر الكمومي. وستكون قادرة على حساب مئات الآلات ومليارات العمليات الحسابية في ثوان، وسرعان ما تم وصفها بأنها ثورة. ولكن تبقى هناك العديد من العناصر المثالية، والتي لا تمنع من وجود بادرة تفاؤل لعقود قادمة.

في الأساس، أرجو أن تكون هذه الرحلة من الحكايات الكمومية ممتعة. وأن تكون أيضًا نوع من التعرف على العالم الكمومي، والذرات، والإلكترونات، وما إلى ذلك ... والمفاهيم الكمومية المختلفة مثل تأثير النفق، وثنائية الموجة والجسيم أو حتى فك الترابط، والتي سيكون لها عدد أقل من الأسرار بالنسبة للقارئ غير المتخصص.

بشرت نهاية القرن التاسع عشر بعصر ذهبي حقيقي للفيزيائيين. لم يكن هناك ما يشير إلى أنهم سيشهدون الولادة الحقيقية لعصر جديد شهد ثورة حقيقية في الفيزياء مع ظهور النسبية الخاصة والعامّة لأينشتاين وفيزياء الكموم الكوانتوم على يد ماكس بلانك ومجموعة كبيرة من العلماء الآخرين وعلى رأسهم نيلز بور وشرودنغر وأينشتاين نفسه وهايزنبرغ وغيرهم.

وكانت تلك الدعامتان من أقوى النظريات وأكثرها إثارة للقلق في تاريخ العلم. انتهى القرن بانتصار "العلوم الحديثة" بلا منازع، التي تأسست عام 1687 بواسطة نظرية الجاذبية الكونية لإسحاق نيوتن. الشعور العام هو أن الإكمال، كما يتضح، حص في عام 1894، من خلال هذا البيان الصادر عن جائزة نوبل المستقبلية في الفيزياء ألبرت ميكلسون: "يبدو من المحتمل أن معظم المبادئ العظيمة الكامنة وراء [الفيزياء] قد تم اكتشافها وبات من الضروري البحث عن تطورات جديدة بشكل رئيسي في التطبيق الصارم لهذه المبادئ على جميع الظواهر التي تحظى باهتمامنا. "وبعبارة أخرى، تم وضع قوانين الفيزياء، ولم يعد عمل علماء الفيزياء في القرن العشرين سوى القيام بصقلها وتطبيقها! لم يبق سوى شرح اثنين أو ثلاثة تفاصيل عنيدة.

"كارثة الأشعة فوق البنفسجية":

"من بين هذه" التفاصيل "التي لا يمكن تفسيرها، يشرح هيرفي زويرن Hervé Zwirn، الفيزيائي وعالم المعرفة، مدير الأبحاث في CNRS، هناك بالضبط نتائج تجربة ميكيلسون ومورلي، في عام 1887، مما أشار لديهما وجود سرعة ثابتة للضوء. كما أثبتت مشكلة إشعاع "الجسم الأسود"، والتي لا يمكن للمرء أن ينشئ قانونًا متماسكًا بشأنها آنذاك. "ومن غير المعروف إذن أن هذه" التفاصيل "الصغيرة التي تبدو غير ضارة ستؤدي في الواقع إلى نظرية النسبية للأول، أي سرعة الضوء، وميكانيكا الكموم للثاني، أي حل لغز إشعاع الجسم الأسود. بعبارة أخرى، ظهور الثورتان العظيمتان في الفيزياء، ولدا معاً في نفس الوقت تقريباً ولم تفصل بينهما سنوات قليلة.

ولكن إذا كانت النسبية من عمل رجل واحد وهو ألبرت أينشتاين، الذي سيطورها بين عامي 1905 و1915، فإن فيزياء الكموم، شارك فيها العديد من العلماء: وتم تشكيل مدارس ورواد لامعين، سيستغرقون سبعة وعشرين عامًا (1900-1927) لتكوينها. يوضح أوليفيه دارينغول Olivier Darrigol، مؤرخ الفيزياء والأستاذ بجامعة باريس ديديرو: " البعض اغمس بحماسة واندفع في هذه الثورة الراديكالية الجديدة بينما فضل البعض التريث والمقاومة لغاية سنة 1926 أمليين أن يكون باستطاعتهم ربطها بشيء يبدو أكثر كلاسيكية "بالنسبة للمؤرخين، لا يوجد إجماع ولا تجانس في هذه العملية.

كان الفيزيائي الألماني ماكس بلانك (1858-1947) أول من نص على أن تبادل الطاقة بين الضوء والمادة يتم بطريقة متقطعة، بواسطة حزم طاقة غير قابلة للتجزئة، "الكلمات". ومن ثم فهو يعتبر والد ميكانيكا الكموم. إنه بالكاد يوافق على فكرة أينشتاين عن تطبيق مبدأ الكموم على الضوء، وحتى أقل من فكرة بور لتطبيقه على الذرة. سيضع في النهاية صلاحية نظريته في عشرينيات القرن الماضي.

بلانك هو "الجد" لكل أولئك الذين سيبنون النظرية من خلال كوانتيته- كمومه، لقد فتح الباب ولكنه ترك نجاحاته تدخله. كان وصيًا للفيزياء في ذلك الوقت، ربما كان بالفعل كبيرًا في السن، ومترسحًا في الفيزياء "الكلاسيكية"، بحيث لا يجرؤ على الشروع في المغامرة المجنونة التي بدأها. بسرعة كبيرة في هذه الراديكالية الجديدة، بينما قاوم آخرون حتى عام 1926، على أمل أن يتمكنوا من ربطها بشيء أكثر كلاسيكية".

وبالتالي كان ماكس بلانك أول من أحدث خرقاً دون حتى أن ينتبه لذلك. أدرك الفيزيائي الألماني ماكس بلانك ذلك في نهاية عام 1900. في مقال، سيتبعه عرض تقديمي إلى جمعية برلين الفيزيائية، يدعي بلانك أنه حل المسألة القديمة "إشعاع الجسم الأسود" التي أبقت الفيزيائيين في مأزق لمدة 40 عامًا. تتعلق هذه المشكلة النظرية بالتفاعل بين المادة والإشعاع. يمكننا توضيح ذلك بتخيلنا لفرن يفرغ من كل هوائه حيث يتم إغلاق الأشياء المراد تسخينها بإحكام. تمتص الأجسام الإشعاع الحراري (على شكل ضوء)، وهو الضوء المنبعث من جدران الفرن، ثم تستقر عند درجة حرارة معينة ثم تبدأ في إصدار نفس الإشعاع بأطيافه المختلفة، بغض النظر عن المادة المصنوعة منها. هذه الحقائق ليست موضع نقاش، لكن العلماء لا يستطيعون وضع معادلات الطريقة التي يتبادل بها الضوء والذرات طاقتهم. أدت جميع المحاولات حتى الآن إلى نتائج عيئية: تبدأ المعادلات في التباعد نحو اللانهاية لأكثر الأطوال الموجية نشاطاً، نحو الأشعة فوق البنفسجية. مما يعني أن أي جسم إذا تعرض لفترة معينة للأشعة فوق

البنفسجية، مثل تلك الموجودة في الشمس، فسوف يصبح كالفنيلة قابل للانفجار ... ومن الواضح أن الأمر ليس كذلك.

ومع ذلك، وجد بلانك الحل لما كان يسمى في ذلك الوقت "بكارثة الأشعة فوق البنفسجية". ولكن على حساب بعض الحريات: بدلاً من اعتبار أن الطاقة يتم تبادلها بين الضوء والمادة بطريقة مستمرة، فإنه يفترض بالفعل أن الشعاع يعطي الطاقة في شكل حبيبات للجسم الأسود. بالنسبة إلى بلانك، فإن هذا المرور من المستمر إلى المنفصل ليس سوى "حيلة رياضية"، حيلة لتجنب الاختلاف في معادلاته. وبما أن هذا يتماشى مع النتائج التجريبية، فقد تم تبنيها دون أن يتساءل أحد عن معنى هذه المخاتلة، أي ماهي تبعات ذلك على طبيعة الضوء التي كان أينشتاين يشتغل عليها؟

بنى أينشتاين (1879-1955) نظرية النسبية من تلقاء نفسه وافترض، في عام 1905، الطبيعة الحبيبية للضوء على أساس كوانتا بلانك. ثم اكتشف "قسرا" في عام 1935 ظاهرة التشابك.

كان هناك اعتراف جمعي به من قبل أقرانه على أنه عبثي ذلك الوقت، ظل أينشتاين دائماً محمياً من التيارات والمدارس الفكرية. لا معلم ولا تلاميذ (على الأقل ممن يدعون ذلك). من خلال التشكيك في معنى الكموم بلا هوادة، سيكون أحد المحركات الرئيسية لهذه النظرية. حتى لو كانت قوة حسه السليم - فإن جوهر عبقريته سيمنعه من الاعتراف حتى وفاتها بأنه يمكن فصل النظرية عن الواقع الذي تصفه. وكان على خطأ. وبسرعة. دون أن يشكك أحد في المعنى المادي لهذه الالتفاف ... أي: ما هي عواقب ذلك على طبيعة الضوء؟ حتى مايو 1905، نشر شخص غير معروف آنذاك، يبلغ من العمر 25 عاماً مقالته الأولى: حول وجهة نظر إرشادية تتعلق بإنتاج وتحويل الضوء. يُدعى الوافد الجديد لساحة الفيزياء ألبرت أينشتاين، ويوضح أن التأثير الكهروضوئي، وتحويل الضوء إلى كهرباء في مادة ما، ينتج عن تبادل كمية الطاقة التي تصورها بلانك. إلا أن أينشتاين يعطيها معنى فيزيائياً: فهي بالنسبة له جزيئات ضوء! "أينشتاين هو أول من انفصل عن الفيزياء الكلاسيكية بسرعة كبيرة في هذه الراديكالية الجديدة، بينما قاوم آخرون حتى عام 1926، على أمل أن يتمكنوا من ربطها بشيء أكثر كلاسيكية" كما ذكرنا أعلاه.

في الواقع، كان من المقبول حتى ذلك الحين أن الضوء عبارة عن كمية مستمرة يمكن أن تنبعث أو تمتص بنفس الطريقة التي يتم بها نقل الماء من وعاء إلى آخر. لكن أينشتاين يوضح ذلك بطريقته الخاصة: فالضوء يفضل أن يشبه مجموعة من الكرات غير القابلة للتجزئة التي تتدفق واحدة تلو الأخرى. سلسلة من الانقطاعات. "في ذلك الوقت، كان أينشتاين وحيداً تماماً"، ولسبب وجيه! لأكثر من قرن من الزمان، تم اعتبار أن الضوء يتكون من موجات مستمرة: في عام 1801، لم يكن الإنجليزي توماس يونغ يعرف ذلك من خلال تمرير الضوء أحادي اللون بواسطة شقين صغيرين، حصلنا على "شكل تداخل"، تناوب للخطوط الساطعة والمظلمة؟ وهو التوقيع بامتياز للظاهرة الموجية للضوء بطبيعتها المستمرة!

هنا يبدأ الارتباك: فالضوء يظهر بشكل متكرر مثل موجة ومثل جسيم حبيبي ... على مدى السنوات التالية،

انضم علماء الفيزياء الرواد تدريجيًا إلى فكرة أن رياحًا جديدة تهب في الفيزياء. حركة أدت في عام 1911 إلى المؤتمر الأول حول نظرية الإشعاع والكمات (Rayonnement et Quantas) (الذي أطلق عليه مؤتمر فيزياء الكموم) الذي تم تنظيمه في بروكسل.

كسر القواعد:

تدفق فطاحل علماء الفيزياء الكبار إلى مؤتمر سولفاي الأول: هنريك لورنتز، وإرنست رذر فورد، وماري كوري، وهنري بوانكاريه، وبول لانجفان، وألبرت أينشتاين، وماكس بلانك ... "لكننا مازلنا في وضع الغموض والحيرة والضبابية وعدم الوضوح، كما يتذكر أوليفيه داريغول. الذي تساءل: هل هذه الطبيعة الحبيبية أو المتقطعة للطاقة والضوء أساسية وغير قابلة للاختزال، أم أنها تتعلق بشيء معروف؟"

عندها ظهرت شخصية ثالثة:

إنه الدنماركي نيلز بور. نحن عام 1913، عندما قرر بور تطبيق مبدأ القياس الكمومي على الذرات. بعد طاقة بلانك، وضوء أينشتاين، يمتد مفهوم الكوانتا إلى المادة. "بور يخالف القواعد، كما يوضح هيرفي زويرن. فهو يسن مبدأ دون يبرره. فمدارات الإلكترونات في الذرة محددة ومستقرة. فالإلكترون محصور عليه أو محتجز دون إنفاق للطاقة، ومن أجل الانتقال من مدار إلى آخر، يجب أن يمتص أو يطلق فوتونًا تتوافق طاقته مع فرق الطاقة بين المدارات". كتب بور بهذا الخصوص: "يبدو ضروريًا إدخال كمية غريبة في هذه القوانين، غريبة عن الديناميكا الكهربائية الكلاسيكية، مثل ثابت بلانك." على الرغم من أن نموذج قطعي، إلا أنه سرعان ما تم قبوله لأنه تم التحقق من صحته من خلال التجربة! أدرك بور تمامًا أننا لم نواجه فيزياء جديدة فحسب، بل أيضًا نظرية جديدة للمعرفة، طريقة مختلفة للتفكير في الفيزياء، كما يكشف أوليفيه داريغول. يراه كمزيح غير عادي من الاستمرارية والانقطاع: للذرات مدارات منفصلة [مستويات طاقة]، لكنها يمكن أن تنتشوه باستمرار.

حماسة مشوبة بضربات ارتباك تهب على الفيزياء ... حتى الحرب العظمى، التي ستقتل الشباب الأوروبي. تتذكر مارثا سيسيليا بمستأمنتي، عالمة الفيزياء ومؤرخة الفيزياء، "نحن نعلم أنه من بين الفيزيائيين الفرنسيين الشباب قبل الحرب، كان هناك الطلاب السابقون الذين كانوا في أعقاب جيل بول لانجفان قد ذهبوا لجبهات القتال، ثم عاد عدد قليل جدًا منهم". لقد مر ما يقرب من عشر سنوات قبل أن يضع عالم فيزيائي فرنسي آخر حجره على المبنى: كان اسمه لويس دي برولي. طالب الدكتوراه الشاب الذي كان بول لانجفان هو المشرف على أطروحته. كان هذا من شأنه أن يشجعه، حسب المؤرخ، على "التفكير في توليفة بين بلانك وأينشتاين وبور". يرى دي برولي الآن رابطًا عميقًا بين عملهم، ويضع لذلك فرضية مجنونة: إذا كان الضوء أيضًا جسيمًا، فلماذا لا تكون المادة أيضًا موجة؟ "هذان التمثيلان، كما كتب دي برولي في أطروحته التي دافع عنها في تشرين الثاني (نوفمبر) 1923، ربما يكونان على الأرجح أقل تعارضًا مما كان مفترضًا، ومع التطور يبدو أن تطوير نظرية الكموم يؤكد هذا الاستنتاج. ومن هنا "ولد مبدأ ازدواجية طبيعة المادة الموجية والجسيمية. كانت تلك المقاربة بمثابة قنبلة!

مبادئ بديهية مضادة:

ينص هذا المبدأ غير البديهي تمامًا على أنه، مثل الضوء والطاقة، فإن لبنات المادة (الذرة، والإلكترون، وما إلى ذلك) هي جسيمات مثلها مثل الموجات. سيؤدي هذا إلى ولادة مبدأ التراكب superposition،

وهو أحد أغنى المفاهيم في ميكانيكا الكموم! بما أن المادة (أيضاً) عبارة عن موجة، فيمكننا عندئذٍ تركيب جزيئات المادة على بعضها البعض، بل وحتى تركيبها على نفسها! وبفضل مبدأ التراكب هذا ستستمر في تحديد المسار حتى النهاية. أي حتى صياغة النظرية بشكل كامل والتي كانت هي بأمس الحاجة لذلك.

منذ بداية العشرينيات من القرن الماضي، في الواقع، كانت صياغتها في حالة ركود. صحيح أن بور استمر في بناء نموذج لذرة الهيدروجين، وهي الأبسط من بين كل النماذج، حتى إنه طور نظرية كموم الأطياف والخطوط كوفنت بمنحه جائزة نوبل للفيزياء سنة 1922. مع حدوث بعض المسافة يمكننا القول إنها لم تكن نجاحاً منقطع النظير فلم يكن ممكناً توسيع نظريته لتشمل الذرات الأكثر تعقيداً وتركيباً. فما زال هناك شيء ما يفلت من تفكيره. ولم يدم ذلك وقتاً طويلاً. إذ في خضم الحماسة التي رافقت أطروحة دي برولي تواصلت واستمرت عمليات نشر البحوث والدراسات بإيقاع جنوني حتى إن انشقاقاً فلسفياً كان يتخمر قد اندلع في ضوء النهار بين الفيزيائيين، بين من يعتقد إنه يجب التخلي عن فكرة نظرية تصف واقعاً ملموساً ومرئياً وآخر حدسي تخميني احتمالي وبين من يعتقد عكس ذلك. أي النظرية التي تصف حقيقة يصعب تخيلها وواقعاً غير قابل للإدراك. المعسكر الأول هم أتباع وأصحاب ومؤيدي بور الذي أسسوا مدرسة كوبنهاغن والذي كانوا فكرياً وثقافياً مستعدين لمسح كامل أرضية الحدس والملموس والرؤية في الفيزياء الكلاسيكية ومن بين هؤلاء فيرنر هايزنبرغ وفولفغانغ بولي وماكس بورن وجاكوب جوردان وأعتقد هؤلاء أنه ليس من سمات نظرية فيزيائية بالضرورة أن تكون قابلة للتصور ولا إعطاء حدس ملموس للواقع وإن حقيقة سلوك المادة وطبيعتها المزدوجة الموجية والجسيمية لا تزعجهم حتى لو كانت تصف واقعاً يصعب إدراكه. يبدو أن نتائجهم تثبت صوابهم. قام باولي وبورن بتحفيظ هايزنبرغ والعكس صحيح. في عام 1925، اكتشف باولي المبدأ المعروف باسم "الاستبعاد" *principe d'exclusion*، والذي يحظر على إلكترونين متشابهين أو متماثلين أن يتواجدا معاً في نفس مستوى الطاقة جلب بورن خبرته الرياضياتية لهائزنبيرغ عندما شرع هذا الأخير بإجراء الحسابات باستخدام جداول قيم منظورة وتعرف على جبر المصفوفة - وهي نظرية رياضية تجريدية وغير مألوفة ولا معروفة وغير مسبوقة في الفيزياء - ثم التحق بالثلاثة جاكوب جوردان حيث قاموا خلال عام 1925 بصياغة ميكانيك المصفوفة *mécanique matricielle* والذي لا يزال مستخدماً إلى اليوم والذي تكون فيه الأجسام ذات متجهات ومصفوفات متعددة الأبعاد.

إن الذي كان يغلي منذ فترة طويلة، يظهر في ضوء النهار، استمر الخلاف بين الفيزيائيين الذين يعتقدون أنه من الضروري إعطاء فكرة عن نظرية تصف واقعاً مرئياً وبدهيهاً، وأولئك الذين لا يفكرون بذلك.

وفي خصم هذا الاندفاع، وصل قادم جديد عام 1926، إنه النمساوي إروين شرودنغر الذي نشر تباعاً أربعة مقالات استنتج منها معادلته الشهيرة المستوحاة على نحو مباشر من قوانين الميكانيك الموجي الكلاسيكي والتي تحمل اليوم اسمه "معادلة شرودنغر" إثر ذلك ولد الأمل من جديد عند أينشتاين وأولئك الذين يعتقدون أنه لا يجب أن تكون النظرية الفيزيائية "تخليقية" ما بدا كأنه يعطي الحق لمعسكر خصوم البوريين - أتباع بور - المكون من الـ *outsiders* الدخلاء وغير المعروفين أو اللامنتمين لمعسكر أينشتاين والمدفاعين عن فيزياء الكموم الحدسية. على عكس المعسكر المناويء الذي يقوده أينشتاين والذين

يشتركون في الاقتناع بأن النظرية يجب أن تعطي حدسًا للواقع الأساسي " .. الذين نجد بينهم أينشتاين، ودي بروجلي وشروندنغر.

"الله لا يلعب النرد!":

ومع ذلك، من مقالته الثانية، اتخذ شروندنغر خطوة نحو ميكانيكا المصفوفة لمدرسة كوبنهاغن. ويعترف: "لم أتمكن من العثور على الاتصال بعد"، على أمل أن "يكمل كل منهما الآخر". قبل أن نلاحظ في مقالته الثالثة، هذه الحقيقة "الغريبة جدًا" وهي أن هاتين النظريتين الجديتين تتفقان مع بعضهما البعض فيما يتعلق بالحقائق المعروفة". وأخيرًا نعرف بأن تمثيل المصفوفة للبوريين، من خلال منع الحدس، يمكن أن يكون متفوقًا، لأنه "لا يشجعنا على تكوين صور مكانية-زمانية للعمليات الذرية التي ربما يجب أن تظل غير قابلة للسيطرة [من أجل العقل]". لذلك يقبل شروندنغر على مضض أن فيزياء الكم تتخلى عن الحدس وهو الأمر الذي لم يتقبله أينشتاين أبدًا.

قدم بول ديراك على الفور دخولًا رائعًا. لن يُظهر هذا البريطاني التكافؤ الصارم لصيغتي شروندنغر وهايزنبرغ فحسب، بل سيحدد أيضًا قواعد حساب هذه الشكلائية: ستحتوي معادلة شروندنغر الآن على مصفوفات ومتجهات كمتغيرات! بعبارة أخرى، هنا تستوعبها الرؤية البورية.

سيؤدي هذا التوليف إلى ارتدادات جديدة. في وقت مبكر من مارس 1927، أظهر هايزنبرغ في مقالته عن المحتوى البديهي للكينماتيكا *cinématique* وميكانيكا الكموم أنه وفقًا لمعادلة شروندنغر المصاغة بمساعدة المتجهات، من المستحيل قياس موضع الإلكترون وسرعته بدقة كبيرة: هذا هو المبدأ الشهير في عدم اليقين أو عدم التحديد *incertitude et indétermination*. وهو مبدأ ينبع من طبيعة الملاحظات وحساب المصفوفة: إذا ضربنا المصفوفات A في B ، فإن النتيجة ليست هي نفسها B في A . وعند ترجمتها إلى الفيزياء، فإن هذا يعني أن قياس الموضع (A)، ثم السرعة (B) قياس السرعة (ب)، ثم الموضع (أ) لنفس الجسم ما من شأنه منع حالة التحديد الدقيقة للإعدادين أو المعلمتين معًا.

المصفوفات ومعادلة شروندنجر، مبدأ التراكم، مبدأ الاحتمالية ... سواء كانوا يؤمنون بواقع يمكن تمييزه أم لا، لكنه "مخفي" وراء الشكلية الكمومية، بلانك، أينشتاين، بور، دي بروجلي، بورن، باولي شروندنجر وهايزنبرغ وديراك قم كل هؤلاء بشكل جماعي ببناء ركائز ميكانيكا الكموم.

بالطبع، ستظل هناك إعادة صياغة، لكن أسس النظرية لن تتزحزح، حتى اليوم. لم يرفضها أينشتاين، وبدلاً من ذلك يقبلها كأداة فعالة، مع الاستمرار في التأكيد على أنها لا تصف بالكامل الظواهر الأساسية، مثل المجهر المتأثر بقوة ضعيفة من العزم. نشوئها يواجه صعوبة في قبول أن تنبؤات النظرية احتمالية: بالنسبة له، أن يقول أن الجسم لديه فرصة بنسبة 30% للرصد هنا و70% من الوجود هناك ناجم عن جهلنا وليس عن الطبيعة الموضوعية للكيانات المادية. "الله لا يلعب النرد!" كان أينشتاين يردد عدة مرات. الذي لم يكن بور ليفشل في الرد عليه بأنه "ليس لنا أن نفرض على الله كيف يجب ان يحكم العالم أو كيف يجب أن يتصرف!"

"أخرس واحسب!": حسب التعبير المنسوب إلى العالم الأمريكي ريتشارد فاينمان، الحائز على جائزة نوبل في الفيزياء عام 1965 ... ولكن ربما نطق بها فيزيائي أمريكي آخر، ديفيد ميرمين. سيتعين علينا الانتظار حتى عام 1964 لكي تستأنف المناقشات بين أينشتاين وبور عندما قام الفيزيائي جون بيل بابتكار بروتوكول يجعل من الممكن الاختيار بينهما تجريبيًا. سيجعل هذا التقدم في النهاية من الممكن

تحقيقه في عام 1982، لتسوية الخلاف بين العبقريتين بشكل نهائي، اللذان غدت نقاشاتهما بالرسائل أو المؤتمرات المتداخلة جيلاً من علماء الفيزياء. إن التاريخ سيثبت ذلك لبور في نهاية المطاف: فالعالم الكمومي غريب، ومضاد للحدس، ويبدو أنه يتعارض مع واقعنا كما تدعي معادلاته. مجهر الكموم ليس قصير النظر. إنها الحقيقة التي تبين لنا ما هو سديمي غامض ربما يلعب الله النرد. "هذا ليس واقعاً تماماً، ويجب إكماله. رؤية تتعارض مع رؤية نيلز بور وأنصار مدرسة كوبنهاغن، الذين يعتقدون، على العكس من ذلك، أنه لا يوجد شيء يتم انتهاكه بالتشابك، حيث أن "الجسيمين" المفترضين ليسا كذلك تشكلاً واحداً لنفس النظام الكمومي: لذلك لا يوجد انتقال للإشارة المادية من واحد إلى الآخر.