الكون الكمومي أو الكوانتي 4-10

أو

حكايات الكوانتوم الغريبة 4

ترجمة وإعداد د. جواد بشارة

ثورة الكموم تهيمن على الوسط العلمي للقرن الحادي والعشرين:

وهذه رحلة صغيرة إلى عالم الكوانتا. في عام 1905 ظهرت فيزياء جديدة من شأنها أن تحدث ثورة في طريقة وصف المادة وتفاعلاتها وهي: فيزياء الكموم. فُتحت معها الأبواب لعالم لا يطيع قوانين الفيزياء الكلاسيكية: ويغوص في عالم اللامتناهي في الصغر مع ذراته وجسيماته ما دون المجهرية.

أجبرت هذه الفيزياء الآباء المؤسسين، آينشتاين وبور وهايزنبرغ وشرودنغر على وجه الخصوص، على إعادة مناقشة الحتمية ومعايير الواقع للفيزياء الكلاسيكية، وكذلك الفصل التقليدي بين المراقب والجسم المرصود. لأول مرة في تاريخ العلم، تطلب أحد التخصصات القيام بجهد تفسيري حتى يتم فهمه وتطبيقه: ما نوع الواقع الذي تمثله الشكلانية الكمومية؟ اليوم، ما مقدار المصداقية التي يجب أن تُمنح للتفسيرات المختلفة المقترحة منذ العشرينيات؟

لا تفشل فيزياء الكموم في إثارة الفتنة والامتعاض والسخط أحيانًا. ومع ذلك، لا يزال مجهولاً، لماذا هي ضحية للصور النمطية: ولماذا يتم التذرع به لدعم هذه الظاهرة الغريبة، لكننا نتجاهل وصف مبادئها الأساسية. ما هي هذه المبادئ التي تجد تطبيقات رائعة أكثر من أي وقت مضى، من الليزر إلى التشفير الكمومي، بما في ذلك النقل الآني؟ من أين تأتي هذه الكفاءة المذهلة لفيزياء الكموم؟ من أساسياتها ثبت أن فيزياء الكم فعالة في وصف الظواهر والتنبؤ بنتائج التجارب ولكن ماذا تقول هذه الفيزياء حقًا عن العالم؟ دائمًا ما يطرح تفسيرها صعوبات ويتم استكشاف السبل المختلفة لحلها. هناك تحدٍ آخر يتمثل في بناء نظرية كمومية للجاذبية أو للثقالة قادرة على وصف اللحظات الأولى للكون وقلب الثقوب السوداء. لديها كفاءة غير معقولة في قلب التقنيات الحديثة. لكن على الرغم من خصوبتها المذهلة فإن تفسيرها يحافظ على بعض المناطق الرمادية الغامضة. في العشرينات من القرن الماضي، أربك سلوك الذرات والجسيمات العلماء. ولشرح بعض الظواهر، مثل إشعاع الجسم الأسود، قام العلماء بتطوير مفاهيم جديدة جذرية تقودهم إلى التفكير بشكل مختلف في المادة وتفاعلاتها. كان عقدًا من الفوران الإبداعي والعمل المكثف، كافياً لعدد قليل منهم لتأسيس واحدة من أجمل التركيبات الفكرية في كل العصور ألا وهي فيزياء الكموم. ومن ثم ميكانيك الكموم. سرعان ما لاقى هذا الإنجاز نجاحًا كبيرًا، بفضل تأكيد تنبؤاته التجريبية الدقيقة. واليوم هو موجود في كل مكان في حياتنا اليومية: في أجهزة الكمبيوتر لدينا، في هواتفنا، في شاشاتنا ...

ومع ذلك، وعلى الرغم من نجاحها الذي لا يمكن إنكاره، تظل فيزياء الكموم غامضة من نواحٍ عديدة، خاصةً لأن هذا الصرح النظري يتطلب عملًا في التفسير، وهو ما يواجه الفيزيائيون صعوبة أكبر في تنفيذه. يجب أن يقال إن نظرية الكم تطرح أسئلة غير مسبوقة ومذهلة: كيف نفهم شكليتها؟ هل هو بسيط

مجرد أداة للتنبؤ بنتائج التجربة؟ ما هي المكانة التي تمنحها الفرصة التي تتدخل في تحديد النتائج؟ هل يتيح لها ذلك الوصول إلى وصف لواقع العالم؟

إذا عانت فيزياء الكموم كثيرًا، فذلك لأنها خرجت من إطار تفسير الفيزياء الكلاسيكية. بالنسبة لأي نظام، تربط الفيزياء الكلاسيكية خصائص مناسبة للنظام (على سبيل المثال، مثل هذه الدراجة زرقاء وتعمل بسرعة 30 كيلومترًا في الساعة)، ولا تنسب دورًا أساسيًا لعملية القياس.، وهو فقط التسجيل المحايد والسلبي للكميات الموجودة بشكل موضوعي (الدراجة زرقاء، سواء نظرنا إليها أم لا).

لا يبدو أن فيزياء الكموم تشترك في مثل هذا "الالتزام الوجودي" القوي. أولاً، لا تمنح الجسيمات أي موضع أو مسار أو شكل محدد جيدًا. ثم وفوق كل شيء، تتخلى عن الاستفادة من فكرة، مهما كانت أولية، أن تنسب إلى الجسيمات حقيقة تكون مستقلة تمامًا عن وسائل ملاحظتها ومراقبتها أو رصدها. هل كانت هذه علامة على التخلي بشكل نهائي عن إطار التفسير الكلاسيكي؟ أو، على العكس من ذلك، أن هذا الجسم الجديد يفتقر إلى المكونات التي، إذا تم أخذها في الاعتبار، ستجعلها "تنسجم مع الخط السائد"؟

حول هذه الأسئلة، أصبح الفيزيائيان نيلز بور وألبرت أينشتاين صديقين بهدوء، لكن بحزم، على عكس بعضهما البعض. اعتبر بور أن فيزياء الكموم أجبرتنا على قلب النظريات التي تفسر العلاقة بيننا وبين ما ندعوه، "الواقع". اعتقد أينشتاين أنه من السابق لأوانه التوصل إلى مثل هذا الاستنتاج. لم يزعم مؤسس النسبية أبدًا أن فيزياء الكموم كانت نظرية خاطئة، ولكن، وفقًا له، لا ينبغي الحكم على النظرية الفيزيائية على أساس كفاءتها التشغيلية وحدها: يجب أيضًا أن تصور الهياكل اتساق حميم مع الواقع. ومع ذلك، في نظره، فإن فيزياء الكموم، على الرغم من نجاحاتها التجريبية المذهلة والتي لا جدال فيها ، لم تفعل ذلك بشكل مرضي للجميع.

في إطار نظرية الكموم، يتم وصف النظام المادي بواسطة كائن رياضياتي وهو، دالة الموجة. تتم كتابة هذا بشكل عام على أنه مجموع عدة وظائف تمثل كل منها حالة معينة، تتأثر بمعامل معين. ثم نواجه "تراكبًا" للحالات المحتملة، وهو وضع لا مثيل له في الفيزياء الكلاسيكية. تنص النظرية بعد ذلك على أنه بمعرفة دالة الموجة، لا يمكننا تحديد نتيجة القياس بشكل عام، ولكن فقط نحسب احتمالات الحصول على نتيجة معينة. ومن بين جميع النتائج المحتملة بشكل مسبق، يتم اختيار واحدة فقط، بشكل عشوائي، بواسطة

عملية القياس. هذا الأخير يستلزم "تقليص الاحتمالات" الذي يحدث إن هذا الأخير يؤدي إلى "تقليص الاحتمالات" وهو الأمر الذي يتم بشكل مفاجئ وعشوائي. اعتقد أينشتاين فقط أنه من السابق لأوانه التوصل إلى مثل هذا الاستنتاج لأنها ليست مكتملة. والآن، وفقًا لأينشتاين، يجب على النظرية الفيزيائية الجيدة أن تقضي على الصدفة، وتلغيها، إن لم يكن من بنائها، فعلى الأقل من مبادئها. ثانيًا، تمسك أينشتاين بشكل ما من إدراك "الواقع"، فكرة العالم الواقعي الذي توجد أصغر أجزاء منه بشكل موضوعي، سواء لاحظناها أم لا، مشيرًا إلى أن هذا الواقع يتعرض للخطر من خلال فيزياء الكموم، فقد أراد إثبات وجود عناصر من

حقيقة أن هذه النظرية غير قادرة الإحاطة بماهية وحقيقة الواقع وبالتالي فهي غير مكتملة.

"هل كان الوصف الكمومي للواقع المادي مكتملاً؟" هو السؤال الذي أجاب عنه الباحثون الثلاثة بالنفي وهم ألبرت آينشتاين وناثان روزين وبوريس بودولسكي في مفارقة EPR. يعتمد منطقهم على ثلاث فرضيات. الأولى تنص على صحة تنبؤات فيزياء الكموم. لا شك أن أينشتاين وزملائه يعتبرون أن فيزياء الكموم هي نظرية إن لم تكن خاطئة، فهي ناقصة، فهم يشككون فقط في تماسكها الداخلي واعتبارها نظرية لا محلية.

الفرضية الثانية: لا تأثير يمكن أن ينتشر بسرعة أسرع من الضوء، وفقًا للنسبية الخاصة. والفرضية الثالثة هي أن العالم الحقيقي موجود بشكل موضوعي مستقل عن الملاحظة والرصد والمشاهدة والقياس. لذلك هم يعترضون على وصف قائم على الصدفة وليس وصف عالم موجود بشكل مستقل عن الملاحظة. وبالعكس من ذلك، كان بور نفسه يكره اعتبار أن هناك حقيقة موضوعية مستقلة عن جهاز القياس. ووفقًا له، فإن ما يمكن أن تدعي النظرية الفيزيائية وصفه هو مجرد ظواهر بما في ذلك في تعريفها السياق التجريبي الذي يجعلها ظاهرة. لذلك لم تكن فيزياء الكموم بحاجة إلى تعديل. إن خاصية المحلية localité هذه تنطوي ببساطة على أنه عندما يكون هناك حدثان بعيدان جدًا في الفضاء وقريبان جدًا من الوقت بحيث لا يتوفر للضوء الوقت لربطهما، فلا يمكن لأي من هذين الحدثين التأثير على الآخر؛ ثم تحدث "كل واحدة في ركن خاص بها" ، تمامًا كما لو أن الآخر لم يحدث. وإذا طبقنا معيار الموقع أو المحلية على الجسيمات، فهذا يعني أن كل واحدة تحمل معها، أي "محليًا"، الخصائص التي ستحدد نتائج القياسات.

أخيرًا، يشير المعيار الأخير، أي فرضية الواقع، إلى أنه إذا كان بإمكان المرء أن يتنبأ على وجه اليقين بقيمة الكمية المادية، فعندئذ يوجد عنصر من الواقع المادي يتوافق مع هذه الكمية. القيمة الناجمة ليست هلوسة أو هذيان ولا شبحاً وهناك عنصر من الواقع يتوائم ويتوافق معها بالضرورة وعلى الشكلانية أن تدمجها وبدونها لن تكون مكتملة. أساس ما يسمى بتفسير كوبنهاغن (ومختلف الفروق الدقيقة فيه)، والذي حمله بور وفيرنر هايزنبرغ وآخرون، لطالما اعتبر أنه الطريقة الوحيدة لتصور فيزياء الكموم.

عندما يعارض أينشتاين بور ويبدأ بينهما السجال الشهير:

بدأ الجدل بين أينشتاين وبور في عام 1927، في بروكسل، خلال مؤتمر سولفاي ، وهو مؤتمر علمي جمع أعظم علماء الفيزياء في ذلك الوقت. بحث أينشتاين عن تناقض في "علاقات عدم اليقين التي عرضها هايزنبيرغ Heisenberg»، والتي تتعلق بسلوك الجسيمات الكمومية الفردية. يتم التعبير عن هذه العلاقات الأساسية لنظرية الكموم في شكل عدم التكافؤ أو عدم المساواة التي تربط بين كميتين

"مكملتين لبعضهما البعض"، مثل الموضع والسرعة. تتمثل إحدى نتائج هذه التفاوتات في أنه من غير الممكن معرفة الكميات التكميلية تمامًا في نفس الوقت. لكن مع كل هجوم، نجح بور في مواجهة حجج أينشتاين. في عام 1935، استؤنفت المناقشة حول مقال نشر الثلاثي ألبرت آينشتاين وبوريس بودولسكي وناثان روزين EPR، تضمن نص مقالتهم اعتراضاً على، ليس فقط سلوك جسيم واحد فقط فحسب، بل زوجين من الجسيمات ترتبط خصائصهما على نحو وثيق بحيث يضطرنا الأمر للحديث عن " جسيمات متشابكة " وعنوان المقال " الوصف الكمومي للواقع الفيزيائي هل يمكن اعتباره كاملاً؟ وهو تساؤل رد عليه العلماء الثلاثة بالنفي.

أسباب حجة الثلاثي EPR مبنية على ثلاث فرضيات. تحدد هذه الفرضيات الثلاثة معًا ما يجب أن نفهمه عن «الشيء الحقيقي" أو الواقع، إذ تظل رؤيتهم قريبة من الفطرة السليمة وأفكار الفيزياء الكلاسيكية. مسلحين بهذه الحجج، تعاطى أينشتاين وبودولسكي وروزين تجربة فكرية تعتمد على نظام يتكون من إلكترونين متشابكين، تم إنشاؤه بواسطة عملية تربط سرعتيهما وموقعيهما في علاقات محددة مسبقًا. بتعبير أدق، يغادر الإلكترونان في اتجاهين متعاكسين بنفس السرعة. بقياس سرعة الجسيم 1، نستنتج سرعة الجسيم 2 في نفس اللحظة دون تغيير حالته؛ وبموجب معيار الواقع، فإن سرعة الجسيم 2 هي عنصر من عناصر الواقع. بالاستمرار بنفس الطريقة مع الموضع، توصلوا إلى استنتاج مفاده أن موضع الجسيم 2 هو أيضًا عنصر من عناصر الواقع. الآن، ومع جمعهما فإن هذين التأكيدين يتعارضان مع مبدأ عدم الدقة أو اللايقين لهايزنبيرغ ولذي ينص على أنه لا يمكن قياس وتحديد سرعة وموضع الجسيم بدقة في آن واحد.

جلب هذا التناقض العلماء الثلاثة لاستنتاج أن فيزياء الكم غير قادرة على تفسير عناصر الواقع هذه (هنا الموضع والسرعة). لذلك يجب اعتبار النظرية غير كاملة: المتغيرات التي لا تظهر في شكلها الرياضياتي ستحمل هذه المعلومات، أي عناصر الواقع هذه. وإلا، سيتعين على المرء أن يتخيل أن الموقع والسرعة ليسا من عناصر الواقع؛ وأن القياس الذي تم إجراؤه على الجسيم 1 سيحدد، على مسافة، فورًا وكأنه بمعجزة (بواسطة "التخاطر" كما يقول أينشتاين)، الكميات المتعلقة بالجسيم 2. كان هذا الحل مستحيلًا في نظر الفيزيائيين الثلاثة، لأنه انتهك فرضية الموقع أو المحلية localité وقوانين النسبية المقيدة. ستكون فيزياء الكموم عندئذٍ نظرية يمكن تسميتها بـ "غير محلية".

لفهم المشكلة بشكل أفضل، دعنا نختار توضيحًا أقرب إلى التجربة المشتركة. لنفترض أن لدينا بطاقتين، واحدة زرقاء والأخرى حمراء، ووضعنا كل منهما في مظروف مغلق. دعونا نخلط المغلفين بعيدًا عن الأنظار، ثم نعطي أحدهما لبول والآخر لجولي. عندما يفتح بول مظروفه، يكتشف لون بطاقته. من الواضح أن النتيجة التي يحصل عليها مرتبطة بتلك التي ستحصل عليها جولي: إذا كانت بطاقة بول زرقاء، فستكون بطاقة جولي بالضرورة حمراء، والعكس صحيح. كيف نفسر هذا؟ بكل بساطة من خلال اعتبار أن الألوان الخاصة ببطاقات بول وجولي قد ثبتت قبل فتح المغلف إن هذا الفعل قد كشف عن حالة لم تكن معروفة من قبل بول لكنها كانت محددة مسبقاً وعلى نحو تام جداً. بعبارة أخرى، الأمر لايتعلق بمعرفة بول بلون بطاقته الذي ثبت هذا اللون ولا من حدد لون بطاقة جولي من خلال بعض المعلومات التي انتقلت من المغلف الأول عند بول باتجاه المغلف الثاني عند جولي، فللبطاقتين لونيهما بموجب السبب المشترك الذي ثبتهما عندما تم دسهما داخل المغلفين بالفعل قبل فتح الظرف: لم يكشف هذا الإجراء إلا عن موقف لم يكن معروفًا لبولس بعد، ولكنه تم تحديده تمامًا بالفعل. بعبارة أخرى، ليست حقيقة أن بول يعلم لون بطاقته هو الذي ثبت هذا اللون، ولا هو من كان يحدد لون بطاقة جولي من خلال بعض المعلومات المنقولة من المغلف الأول إلى الثاني. تصادف أن كلتا البطاقتين تحملان اللونين اللذين بحوزتهما بسبب السبب المشترك الذي أمّنهما عندما تم انزلاقهما في المظاريف. هذا النوع من الجدل هو الذي تتكثف فيه فرضية واقع أينشتاين: هناك "عنصر من الواقع المادي" مرتبط بلون بطاقة جولي منذ ذلك الحين، دون فتح الظرف لديها بين يديها، وهي قادرة على التعرف عليه. كل ما عليه فعله هو أن يسأل بول عما حصل عليه ويصل إلى النتيجة. من الواضح أن حالة بطاقات بول وجولي هي مشكلة ذات طبيعة كلاسيكية، حيث يأخذ الجزء الاحتمالي مصدره في مبدئي "خلط إحصائي" للبطاقات. في

حالة النظام الكمومي المكون من إلكترونين متشابكين، فإن تراكب الحالات هو الذي يلعب دوره. لكن ما أوضحه أينشتاين وزملاؤه هو أن تطبيق معيار الواقع على النظرية الكموم يؤدي إلى "مفارقة EPR" (وهي الأحرف الأولى للموقعين الثلاثة على المقال الذي أثار المفارقة). بتعبير أدق، لضمان الواقعية ولتجنب تعارضات التماسك الداخلي داخل النظرية، يجب أن تكون هناك متغيرات إضافية غير واردة في فيزياء الكموم. وهكذا فإن هذه الشكليات عالقة في فعل عدم الاكتمال. لذلك يجب أن يوجد، وفقًا لأينشتاين وزملائه، مستوى وصف أدق للواقع من ذلك الذي تقترحه فيزياء الكموم.

بمجرد نشر هذا المقال، قرر بور التصدي للدفاع عن فيزياء الكموم كما هي. لكنه سرعان ما أدرك أن منطق أينشتاين كان دقيقًا للغاية وأن دحضه يجب أن يكون دقيقًا أيضاً. بالطبع، كانت الإجابة التي قدمها على السؤال المطروح (هل فيزياء الكم مكتملة؟) كانت نعم لا لبس فيها، لكن حجته بدت مشوشة إلى حد ما، غيرة قادرة على تحديد حتى أدنى خطأ في حجة EPR، اختصر بور في التأكيد على أن الأدلة التي قدمها أينشتاين لم تكن قوية بما يكفي وأن نقده ركز على معيار واقع الشخص الذي يحاوره.

في الواقع، لم تكن هذه المناقشات ذات أهمية كبيرة للفيزيائيين، حيث لم يكن لها تأثير على طريقتهم في استخدام شكليات فيزياء الكموم، أي إجراء الحسابات والتنبؤات. الذين كانوا لا يزالون على اتفاق مع القياسات. إن خصوبة نظرية الكموم كانت مذهلة للغاية لدرجة أنها لا تبدو ضرورية ولا مفيدة لفهمها وليست تلك الخاصة بالنظريات المفيدة لفهم التنافس بشكل أفضل. في النهاية، كان هناك انفصال كامل بين المتخاصمين، ولكن في عام 1964، في CERN، بالقرب من جنيف، وجد جون بيل، الفيزيائي الأيرلندي الشمالي، المولع جدًا بنظريات الواقعية المحلية، نفسه يدحض موقف أحد الطرفين. في وقت لاحق، تم تعديل تجارب أخرى أكثر اتقاناً ودقة، من الوضوح المفاهيمي وأكثر تفصيلاً.

ساعد نيلز بور وألبرت أينشتاين في العثور على فيزياء الكموم وتفسيرها. من خلال رؤاهم المتناقضة والمناقشات المستفيضة التي ميزت التطورات بعمق لكشف هذه النظرية والتي سمحت بفهمها بشكل أفضل.

اقترحا حالات تجريبية بحيث ستعطي فيزياء الكموم تنبؤات مختلفة عن تنبؤات نظرية تدعي التكاملية باحترام فرضة المحلية وذلك بفضل إدخال "المتغيرات المخفية المحلية"، مهما كانت كبيرة، لا تضعف التشابك. علينا بعد ذلك أن نعترف بالطابع غير المحلي لنظرية الكموم.

كان هذا هو الحال في أوائل الثمانينيات، عندما أجرى فريق من معهد البصريات في أورساي Institut d'Optique d'Oray بقيادة آلان آسبيه Alain Aspect سلسلة من التجارب مع فوتونات متشابكة أثبتت أن تنبؤات الفيزياء الكمومية هي الصحيحة والمضبوطة وليس النظريات المناوئة والمنافسة.