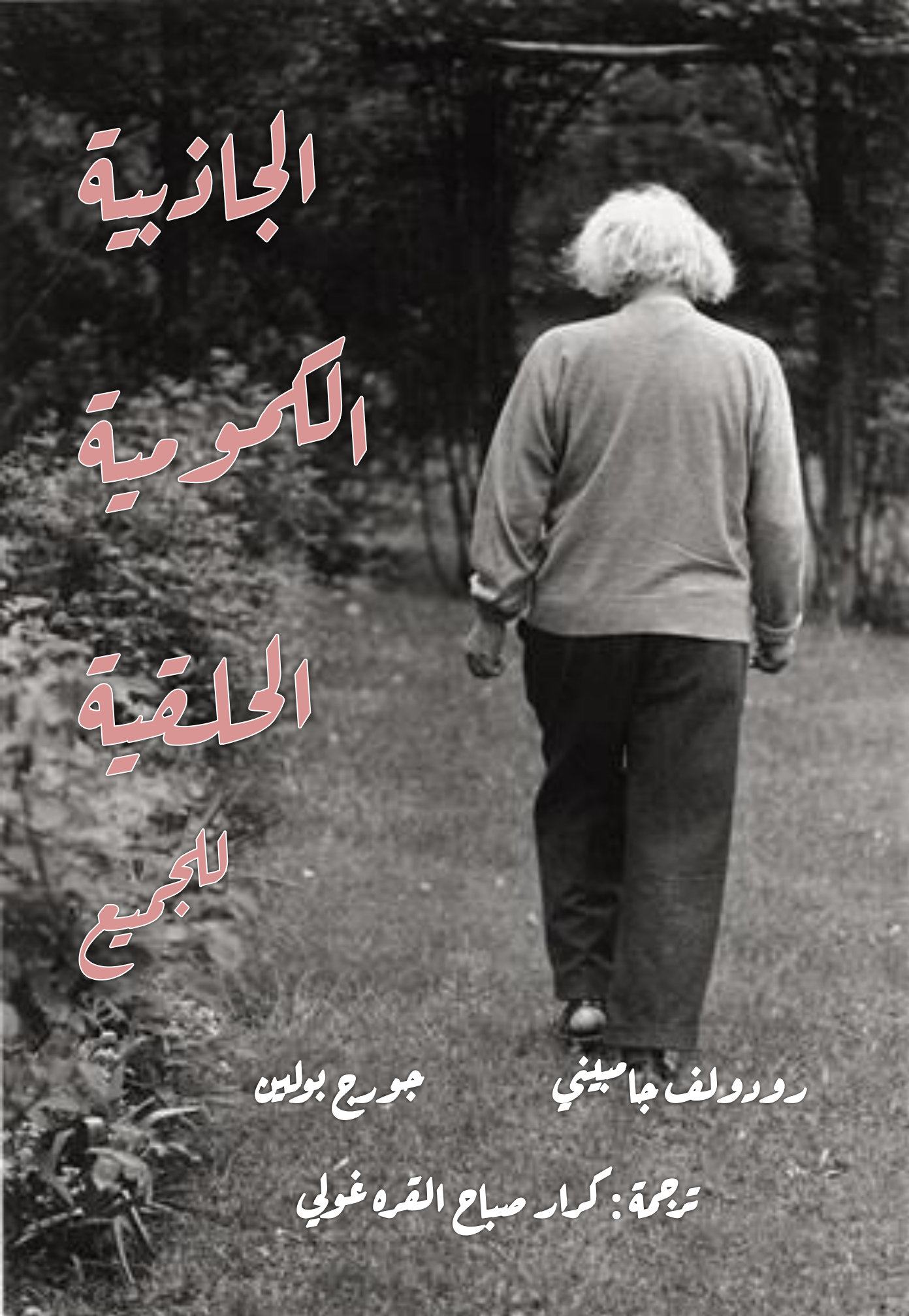
الجاذبية الكمومية الحلقية للجميع



رودولف جاميني
جورج بولين

ترجمة: كرار صباح القره غولي

توطئة

يتأتى هذا الكتاب من دورة EdX.org التي قام أحد المؤلفَين بتدريسها (الدورة باللغة الإسبانية مع عناوين فرعية باللغة الإنجليزية) . وسوف يقدم هذا الكتاب من الصفر وبدون معادلات كل المفاهيم الضرورية للنسبية العامة ، وميكانيكا الكم ، وسيوصف الجاذبية الكمومية الحلقية وتطبيقين لهذه النظرية (في علم الكون والثقوب السوداء) . سيكون أسلوبه سهلًا ومختصرًا لتسهيل الوصول إليه قدر الإمكان . الجاذبية الكمومية الحلقية ليست بمنأى عن الجدل . لن نخجل من هذا وسنحدد سبب وجود مشاكل لدى بعض الناس مع النظرية .

نأمل أن تستمتع بالعرض وأن تخرج منه بفهم للوضع الحالي

شكر وتقدير

نود أن نشكر Ivan Agull´o و Fernando Bar-bero و Guillermo Mena و Lee Smolin و Thomas Thiemann على التعليقات. تم دعم هذا العمل جزئيًا بواسطة المنحة رقم NSF-PHY-1603630، NSF-PHY-1903799، معهد هيرني للفيزياء النظرية، CCT-LSU، معهد الأسئلة التأسيسية (fqxi.org)، و بيديسيبا.

المحتويات

توطئة	٣
شكر وتقدير	٤
١. مقدمة	٦
٢. الجاذبية	١٣
٣. نظرية الكم	٢٤
٤. الجاذبية الكمومية الحلقية	٤١
٥. التطبيق: الثقوب السوداء	٥٧
٦. التطبيق: علم الكونيات	٧٥
٧. تطورات أخرى: رغاوي السبين	٩٢
٨. النتائج المحتملة القابلة للرصد؟	٩٩
الاستنتاجات	١١٣

الفصل الأول

مقدمة

تُعتبر الجاذبية الكمومية الحلقية إحدى البوادر الرئيسة لتوحيد قطبي فيزياء القرن العشرين المُتمثلين بالنظرية النسبية العامة لآينشتاين من جهة والميكانيكا الكمومية من جهة أخرى ، وما يتمخض عن هذا التوحيد من استيلاد نظرية كمومية للجاذبية (تكميم الجاذبية) .

وإذا كُنتَ غير عارفٍ بأغلب هذه المفاهيم، فليس ثَمَة ما يوجب القلق ، لأننا سنتناول إياها بأبسط المصطلحات في قادم الفصول .

والمصطلح التي نود التركيز عليه هنا هو " بوادر " . ما الذي قد يعنيه مصطلح كهذا في سياق العلم ؟ هذا يعني أننا سنناقش علمًا غيرَ ذي اكتمال . فلا يوجد إجماع بين الفيزيائيين حول الكيفية التي يمكن للجاذبية فيها أن تُصاغَ كميًا . ثمة

فروض ، لكنها غير مكتملة ، وليس بيّنًا فيما إذا كانت تلك الفروض متسقة أو ما إذا كانت تتنبأ بفيزياء سليمة .

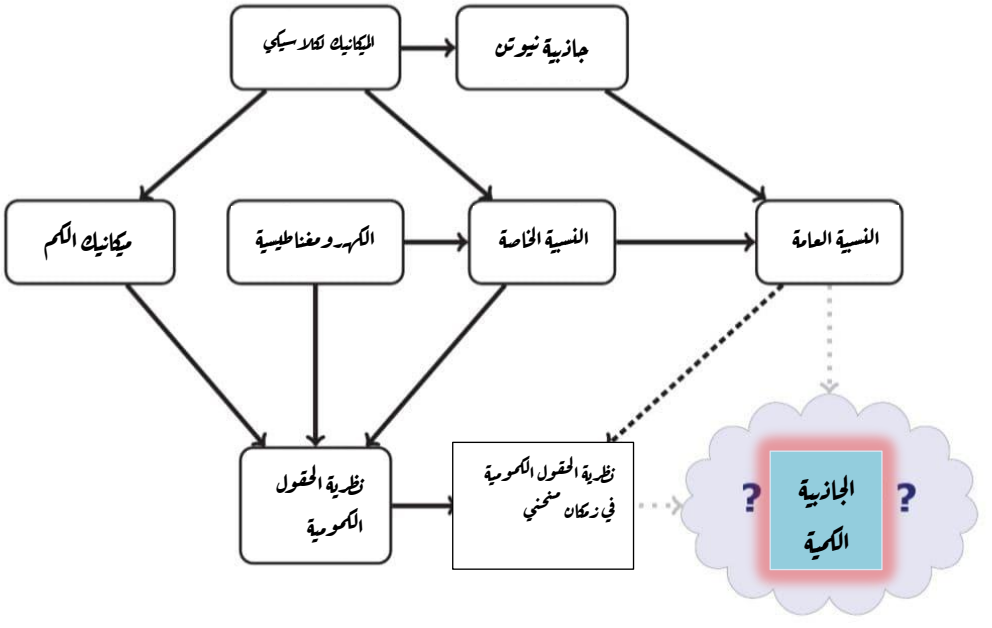
إن أثنين من الفروض التي يتبناها غالبية الفيزيائيين هما نظرية الأوتار ، وتلك التي هي مَغزى هذا الكتاب ، وهي الجاذبية الكمومية الحلقية . إن عدد الأشخاص الذين يتبنون هذه المقاربات بالمئات . ومن الصعب إعطاء بيان بيّن لذلك ، لأن بعض العلماء يعملون بشكلٍ متقطعٍ وغيرِ متصل أو قد تتأرجح أعمالهم بين موضوع وآخر ، ولكن لإعطاء فكرة عن هذا ، فإن لكلتا المقاربتين مؤتمر يُبرم كل ثلاث سنوات يحضره أكثر من مائتي شخص .

ومما ينبغي الإشارة إليه ، أننا في الوقت الراهن لسنا على دراية بظاهرة أو تجربة فيزيائية واحدة قابلة للرصد تقتضي نظرية كمومية للجاذبية "تكميمًا للجاذبية" كضرورة لتفسيرها . ولذا فإن هذا ما يثير السؤال المُتمثل :

لماذا نولي مشروع توحيد هاتين النظريتين ذلك الاهتمام البالغ ؟

إن هناك سببين رئيسين في تبرير مساعي الفيزيائيين هذه :

السبب الأول : هو وحدة الفيزياء واتساقها (انظر الشكل ١,١ لتبيان العلاقة بين مختلف مجالات الفيزياء) .



الشكل ١,١ : كيفية تناسق النظريات الفيزيائية المختلفة مع بعضها البعض.

إنّا على بينة بأن جميع التفاعلات "القوى" الأساسية الأخرى الحاكمة للطبيعة (الكهرومغناطيسية ، القوية ، الضعيفة) تتوسل ميكانيكا الكم وصفاً للطبيعة بشكل صحيح . والسبب في ذلك هو أن فاعلية هذه القوى بيّنة على المستوى المجهري "الصغروي" ، حيث الأشياء على المستوى المجهري ذات طبيعة كمومية . في حين تقتصر فاعلية الجاذبية على المستوى الكبروي (من قبيل الأجسام الفلكية) حيث ليس للتأثيرات الكمومية من أثر بيّن . كما أننا سنرى أن النسبية العامة تتنبأ بحالات من قبيل الثقوب السوداء والانفجار العظيم حيث تكون التأثيرات الكمومية مهمة ، لكننا نفتقر لسُبل الوصول التجريبي المباشر إليها .

السبب الثاني: هو أننا لسنا بذي دراية بالكيفية التي يمكن أن نؤلّف بها بين النظريات الكلاسيكية والكمومية بشكل يقبل الاتساق . كما سنرى ، فإن

لميكانيكا الكم ضرب من الخصائص غير المتوقعة وغير المتماشية مع البداهة العقلية. أحدها هو أن المقادير الفيزيائية (الموقع، السرعة، الزخم...) تفتقر لقيم مُحددة لحين الوقت الذي يتم قياسها به. لا يعني انعدام القيم المحددة ذلك أن المرء جاهل بقيم هذه المقادير حتى قياسها، بل إنها وببساطة "تفتقر للوجود الموضوعي". كيف يمكن للمرء إذاً أن يقرن مثل هذه النظرية بالنظرية الكلاسيكية، تلك التي تقتضي أن يكون للمقادير الفيزيائية قيم مُعطاة أبد الآبدين؟

قد يتراءى للمرء أن عدم وجود أي تجارب أو ظواهر لشرحها سيجعل من السهل جدًا بناء نظرية للجاذبية الكمومية. فبعد كل شيء، قد تخلص المرء من عبء التجارب التي يمكن أن تستبعد النظريات المرشحة. ومع ذلك، فقد ثبت أن هذا صعب للغاية. والسبب في ذلك، كما سنرى، هو أن نظرية النسبية

العامة لآينشتاين تصف الجاذبية ليس من منظور "القوة" شأنها شأن جميع التفاعلات الأخرى ، ولكن باعتبارها تشوهًا للزمكان . هذا يجعل من الجاذبية تفاعلًا مُغايرًا تمامًا للتفاعلات الثلاثة الأخرى . لذلك ليس من المستغرب أنها تمثل تحديات فريدة وعقبات أشبه بالعصية في سبيل تكميمها . وأن ليس لتجربتنا السابقة في تكميم التفاعلات الثلاثة الأخرى من غوث يُرتجى .

سنقدم في هذا الكتاب وصفًا متكاملًا للمحاولات التي قامت بها الجاذبية الكمومية الحلقية بغية تكميم الجاذبية . في الفصل القادم سنرى نظرية النسبية العامة لأينشتاين . وفي الفصل الثالث سوف نقدم ميكانيكا الكم . وفي رابع الفصل سوف نقدم الجاذبية الكمومية الحلقية . في حين سيخصص الفصلان الخامس والسادس لتطبيقات النظرية في علم الكونيات والثقوب السوداء ، بينما سيتحدث الفصل السابع عن التطورات في رغاوي السبين **Spin**

Foams . والفصل الثامن سيكون الخاتمة وسيتضمن مناقشة الخلافات المحيطة بالنظرية .

الفصل الثاني

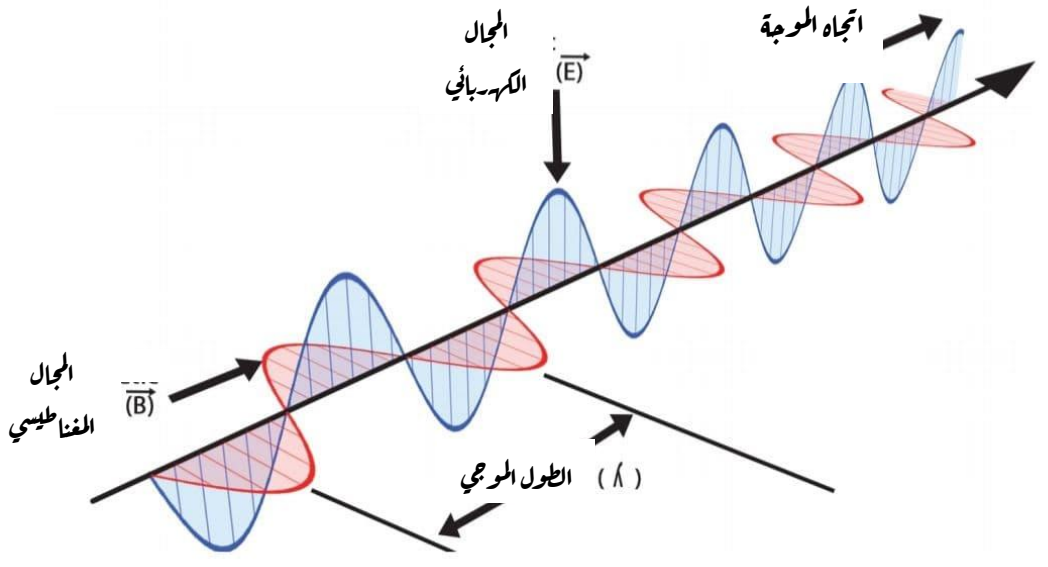
الجاذبية

سنَهِمُ في هذا الفصلِ لتبيان النظرية النسبية العامة لآينشتاين . ولكن بغية ذلك ، نحن مضطرون للخوض مرة أخرى في توصيف التفاعلات "القوى" الأخرى الحاكمة للطبيعة . إن أكثر التفاعلات الأساسية المعروفة في الطبيعة هي التفاعلات الكهرومغناطيسية .

وحد الفيزيائي جيمس كلارك ماكسويل الظواهر الكهربائية والمغناطيسية بنظرية واحدة في القرن التاسع عشر ، والتي علاوةً على ما وحدت تنبأت بوجود الموجات الكهرومغناطيسية (انظر الشكل ٢,١) . لقد حُسم وجود الموجات الكهرومغناطيسية " تجريبيًا " بعد بضعِ سنوات من تنبؤ ماكسويل . وبعد بضعِ أخرى ابتدأ ماركوني باستخدامها للإرسال عبر المحيط الأطلسي . لذا فإن

للكهرومغناطيسية الكثيرُ من التطبيقات العملية . كما تبين أن الضوء هو موجة كهرومغناطيسية وبالتالي توسعت مُدَيات هذه النظرية لتبيان الظواهر البصرية أيضاً . إنها نظرية ناجعة بشكل لا يصدق .

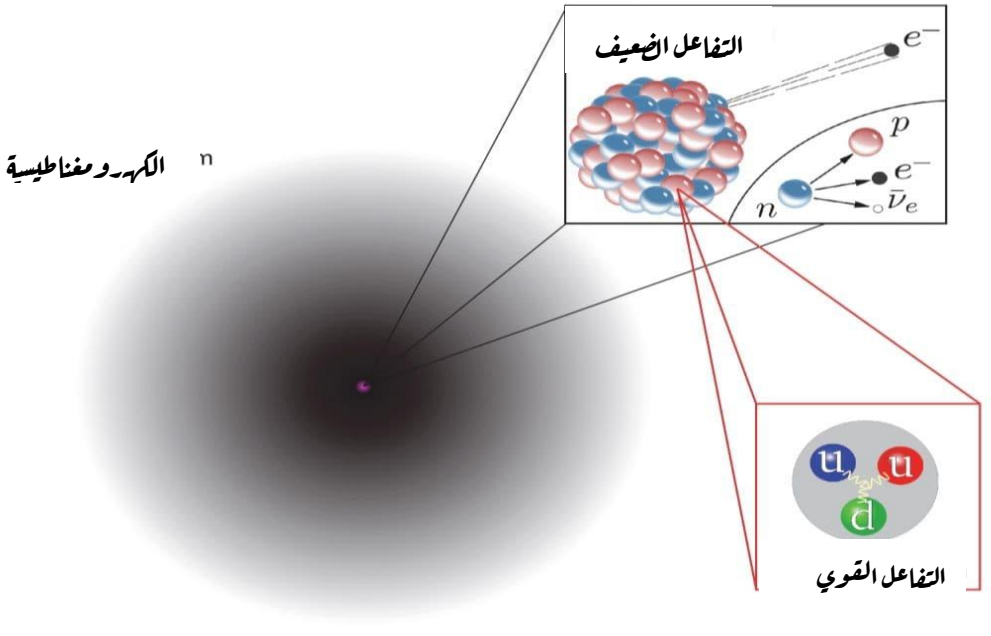
الموجة الكهرومغناطيسية



الشكل ١،٢: في الموجات الكهرومغناطيسية تكون الموجات الكهرومغناطيسية متعامدة مع بعضها البعض ومع اتجاه الموجة. يمثل الطول الموجي المسافة التي تكرر فيها أجزاء من الموجة ذاتها.

من التفاعلات الأساسية الأخرى هي التفاعلات النووية "القوية والضعيفة" .

ليس لهذه التفاعلات من ذلك الأثر البيّن في الحياة اليومية . حيث التفاعل القوي مسؤول عن إبقاء نوى الذرات معًا (انظر الشكل ٢,٢) . تتكون النوى من البروتونات والنيوترونات . تتسم البروتونات بالشحنة الكهربائية الموجبة والتي تسبب لها أن تتنافر متباعدةً عن بعضها البعض في النواة لولا التفاعل القوي، الذي يتجاوز بقوته التنافر الكهرومغناطيسي بين تلك النويات .



الشكل ٢,٢ : التفاعلات الكهرومغناطيسية والقوية والضعيفة ودورها في الذرة.

أما التفاعل الضعيف فهو مسؤولٌ عن تحلل الجسيمات وليس له ذلك الامتثال في الحياة اليومية ولكنه مهم جدًا على المستوى الفلكي ، خاصة في ابتداع العناصر المكونة للمادة .

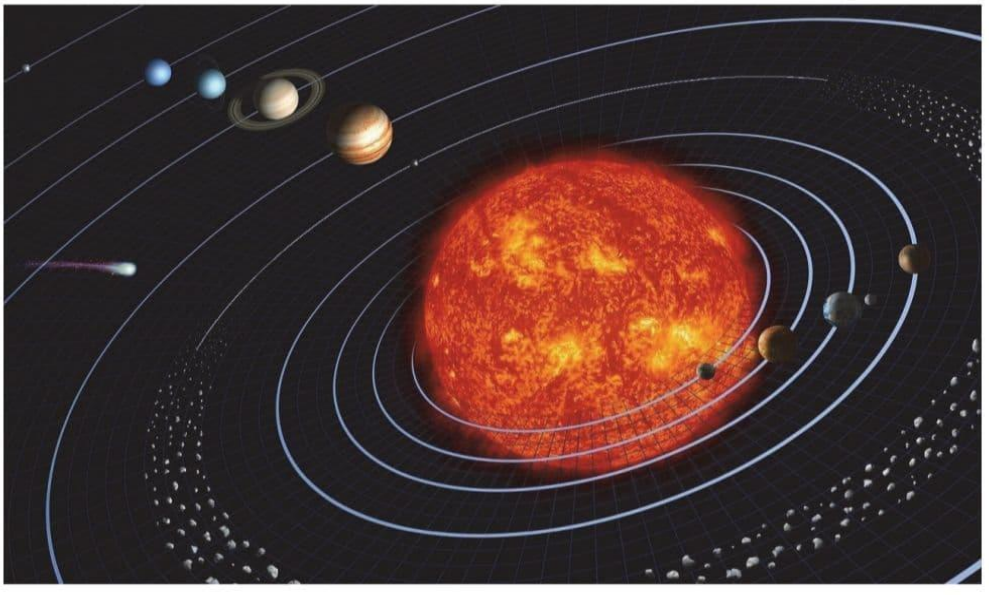
تُوصَف كل من التفاعلات الكهرومغناطيسية والقوية والضعيفة بثلة من النظريات التي تعرف باسم "نظريات يانج_ميلز" تكريما لأعمال تشن نينج يانج وروبرت ميلز في الستينات من القرن العشرين . تعتبر نظريات يانج_ميلز تعميمًا لكهرومغناطيسية ماكسويل حيث العديد من الحقول الكهربائية والمغناطيسية التي تتفاعل مع بعضها البعض . إننا نذكر ذلك لأن هذه النظريات ستلعب دورًا في تطوير الجاذبية الكمومية الحلقية .

إننا جميعًا على دراية بنظرية الجاذبية تلك التي قَدمها نيوتن في عام ١٦٦٦ ، والتي تنص على أن الأجسام تجذب بعضها البعض بقوة تتناسب طرديًا مع الكتل

المتجاذبة وعكسيًا مع مربع المسافة بينها . قد تُستحال معرفتنا لهاته النظرية في بعض الأحيان إلى انبهار بالنظرية العظيمة تلك ، حيث يوحّد قانون الجاذبية الكونية هذا بين أشياء ليس بينها من وِصال مثل سقوط التفاحة من شجرة وحركة القمر حول الأرض وحركة الأخيرة حول الشمس (انظر الشكل ٢,٣) .

إن نظرية نيوتن كفؤة في تبيان حركات النظام الشمسي، لكن أينشتاين أدرك أن ثمة هناك شيئًا خاطئًا . ففي ثنايا ومقتضيات النظرية ثَمَة توقع أن الجاذبية تنتقل آنيًا بين الأجسام المتجاذبة . تعتمد تلك الصياغة الخاصة بالقوة فقط على المسافة الفاصلة بين مصدر الجاذبية والجسم المجذوب . حيث أن تغير القوة مرهون بالتغير اللحظي للمسافة الفاصلة بين الجسمين .

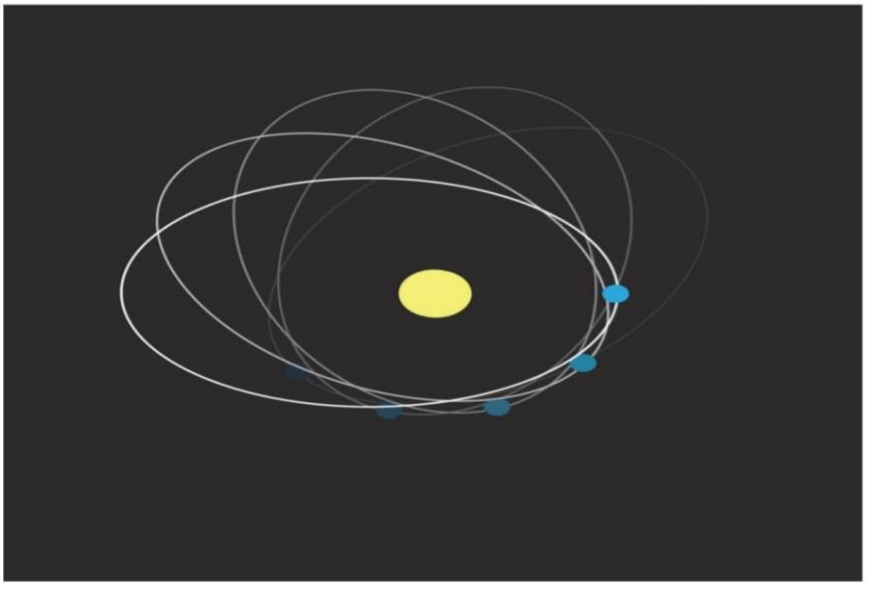
في نظريته الخاصة للنسبية ، وجد أينشتاين أنه ليس لشيء أن يتحرك بأسرع من الضوء . وهذا اقتضى تعديلًا ضروريًا لنظرية نيوتن .



الشكل ٢،٣: تصور فني للنظام الشمسي. المسافات والأحجام ليست معتبرة[١٦].

فشلت نظرية نيوتن أيضا في تبيان ميكانيكا النظام الشمسي بشكل تام. يكون مدار الكواكب على شكل قطع ناقص حيث الشمس في أحدى بؤرتيه (انظر الشكل ٢,٤). ويكون الدوران أسرع كلما كنا أدنى من الشمس. فبالنسبة لعطارد، أقرب الكواكب، يكون الدوران حوالي ٥٠٠٠ ثانية قوسية لكل قرن. لاستجلاء ذلك، فإن هذا يزيد قليلاً عن درجة لكل قرن. كانت نظرية نيوتن قادرة على تبيان كل هذه الحركات تقريبًا، إلا أنها كانت تفقد حوالي ٤٠ ثانية

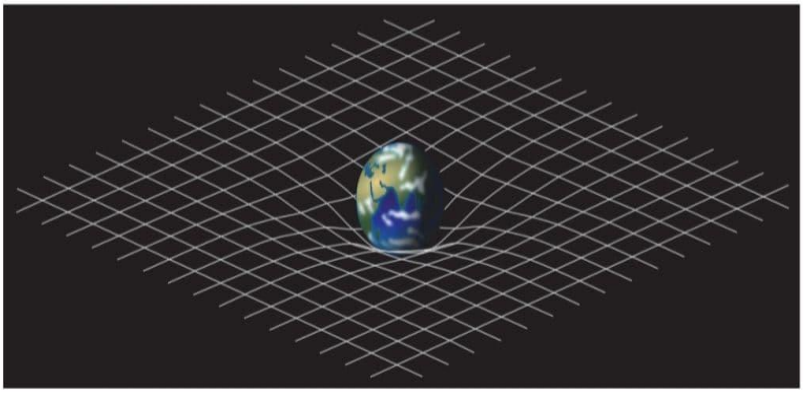
قوسية في كل قرن . يمكن تفسير ذلك من خلال نظرية الجاذبية الجديدة التي طرحها أينشتاين في عام ١٩١٥ والمُسماة بالنظرية العامة للنسبية .



شكل ٤,٢ : حركة القطع الناقص للكواكب عند نقطة المدار الأقرب للشمس (الحضيض الشمسي).

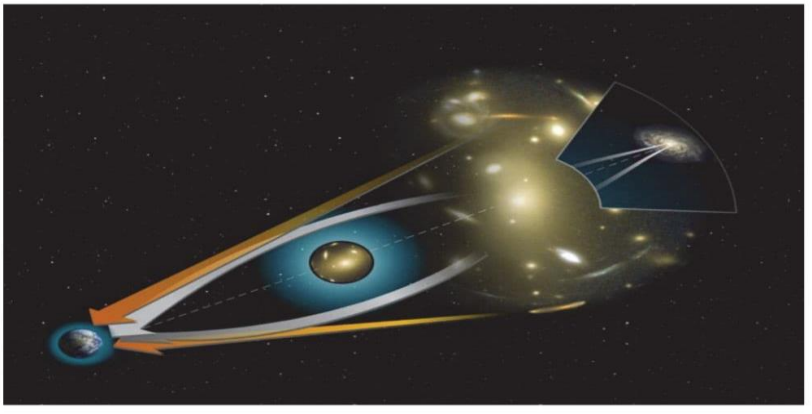
تختلف النسبية العامة على المستوى المفاهيمي اختلافاً جذرياً عن نظرية نيوتن . حيث ترى النسبية العامة أن الجاذبية ليست قوة بل هي تشوه للزمكان المحيط بالكتل الفضائية . فيدور القمر في منحنيات إهليلجية حول الأرض ليس لوجود

قوة جذب عليه ، ولكن لأن الأرض تشوه الزمكان حولها ، وفي ذلك الزمكان المشوه فإن المسار الطبيعي الأكثر ملائمةً ليس خطًا مستقيمًا بل قطعًا ناقصًا (انظر الشكل ٢,٥) . فعند انتفاء الجاذبية "مصدر الجاذبية" ، فإن المسار الطبيعي للجسم المتحرك هو الخط المستقيم . وعندما تكون الجاذبية موجودة وتفعل ما هي فاعلة ويكون الزمكان منحنيًا ، فإن المسار الطبيعي هو المنحني الذي يُدني المسافات في الفضاء المنحني . وكمثال بيّن لهذا هو مثال الشبكة . حيث إذا دحرج أحدهم كرة عليها ، فإنها ستسير في خط مستقيم . ولكن إذا ضغط أحدهم على الشبكة مسببًا انحنائها ، فإن الكرة ستسير على المنحني المُفتعل . إن الشبكة هي الزمكان نفسه في النسبية العامة .



الشكل ٥،٢: تشوه الأرض الزمكان المحيط بها ، ونتيجة لهذا فإن المسار الطبيعي بالقرب منها ليس خطًا مستقيمًا. ويفسر هذا سبب دوران الأرض حول القمر.

ويُخبر تشوه الزمكان بأن الضوء القادم من النجوم والمار بالقرب من الشمس سوف ينحني بفعل الزمكان المنحني الناتج عن كتلة الشمس (انظر الشكل ٢,٦) . إن قياس هذا التأثير صعب ، فلا يمكن للمرء ببساطة أن يوجه تلسكوبًا صوب الشمس . إلا إن المرء قادر على القيام بذلك عندما يُحجب ضوء الشمس بفعل الكسوف . إذا التقط المرء صورة للسماء بالقرب من الشمس عندما تكون محجوبةً عنا بفعل القمر وقارنها بصورة للسماء عندما لا تكون الشمس موجودة في الليل ، فسوف يرى المرء النجوم وهي في غير محلها قليلاً .



شكل ٢،٦: ظاهرة التعدس الجاذبي. حيث تسبب الشمس تغيرًا في مواقع النجوم التي يمر ضوئها بالقرب من الشمس. هذه الظاهرة غير ملحوظة بسبب ضياء الشمس الشديد إلا إنها قابلة للرصد في حالات الكسوف الشمسي حيث يحجب القمر ضياء الشمس المباشر.

إن هذا التأثير ضئيل ، حوالي درجة واحدة لأشعة الضوء المارة بالقرب من الشمس ، ولكن أُمكن قياسه عام ١٩١٩ بفضل مساعي الاكتشاف البريطانية بقيادة السير آرثر إدينجتون . ولم يتوافق القياس مع التنبؤ الذي تمخض عنه جاذبية نيوتن وتوافق مع ذلك الذي للنسبية العامة . جعل هذا الاكتشاف من آينشتاين نجمًا لامعًا ، وأحاله إلى أكثر العلماء شهرة على الإطلاق .

بصرف النظر عن هذه التنبؤات، تتنبأ النسبية العامة لآينشتاين أيضا بوجود موجات الجاذبية، تلك التموجات في الزمكان التي تنتج بفعل تصادم الكتل المتسارعة صوب بعضها البعض . تنتقل هذه الموجات بسرعة الضوء وقيست موجات الجاذبية مباشرة لأول مرة في عام ٢٠١٥ ، ناتجة من تصادم ثقوب سوداء على مسافة ١٥٠٠ مليون سنة ضوئية وقادت مكتشفيها الى جائزة نوبل في الفيزياء في العام ٢٠١٧ . الثقوب السوداء هي تنبؤ آخر لنظرية أينشتاين (سنتناول الثقوب السوداء في الفصل الخامس) .

بالنظر إلى مدى اختلاف النسبية العامة عن النظريات التي تصف جميع التفاعلات الأخرى (جميعها تعامل التفاعلات كقوى في حين أن النسبية العامة تتحدث عن تشوه الزمكان) ، ليس من المستغرب أن تكميم الجاذبية الذي وصفته النظرية العامة للنسبية هو أكثر تحديًا من تكميم التفاعلات الأخرى .

الفصل الثالث

ميكانيكا الكم

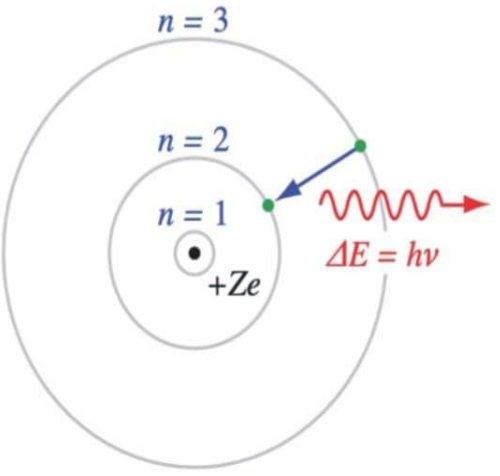
شَرَعَ الفيزيائيون في مطلع القرن العشرين بدراسة المادة في عالمها الدوني /الصغروي. تعود فكرة الذرات إلى الإغريق، لكنها لم تكن إلا ضرب من التكهنات في ذلكم الزمان. في القرن العشرين، تم التأكد تجريبيًا من حقيقة أن المادة تتكون من ذرات وأن الذرات تتكون من نوى وإلكترونات. كما لوحظ أن كيانات العالم الصغروي لا تتصرف بذات الكيفية التي تتصرف بها الكيانات في حياتنا اليومية العينية. حيث تحدث أشياء غريبة على المستويات الكمومية.

بادئ ذي بدء، إذا كنا إزاء ذرة مكونة من نواة موجبة يدور حولها إلكترون سالب، فينبغي أن يبعث الإلكترون موجات راديوية لأن الحركة الدائرية هي حركة تسارعية (متجه السرعة يتغير أثناء الدوران). هذا ما يحدث في داخل

هوائي جهاز الإرسال اللاسلكي ، حيث تُسرّع الإلكترونات جيئةً وذهاباً بواسطة التيار المتردد القادم من المُرسِل . يستتبع انبعاث الموجات الراديوية من الإلكترون فقدان الإلكترون لطاقته في المدار ومن ثم تقلص الذرة التي هو جزء منها . وفي خاتمة الحكاية سيهوي الإلكترون مرتطماً بالنواة . إن المشكلة التي تتخلل هذا العرض هي أن هذه العملية عاجلة الحدوث "في حوالي تريليون من الثانية ! !" ومع ذلك نجد أنفسنا إزاء ذرات مستقرة بشكل أساسي و ديمومي، فنحن جميعاً في الآخر بُنى ذرية .

لحل هذه المشكلة ، انبثقت نظرية جديدة تعرف باسم "نظرية الكم" . تحتوي هذه النظرية على عصبة من السلوكيات غير البديهية التي لا تتوافق وبداهتنا اليومية ، لأن بداهتنا من بُنيات العالم الكبروي ، حيث لنا ما يقرب من 10^{38} ذرة ، فإن ليس لهذه التأثيرات من أثر .

تأتي تسمية "الكم" من حقيقة أن العديد من المقادير في النظرية لا يمكن أن تأخذ قيمًا اعتباطية ولكنها لا يمكن إلا أن تكون "كمومًا" من قيم محددة. ففي حالة الذرة التي كنا نناقشها ، لا يمكن أن يكون للمدارات أي نصف قطر اعتباطي بل يجب أن يأخذ نصف قطرها قيمًا محددةً (انظر الشكل ٣,١) . لا يمكن للإلكترون الذي يدور في أحد أنصاف الأقطار أن يصدر كمية ضئيلة غير محددة من الإشعاع ويذهب إلى مدار أصغر قليلاً. بل هو مرهون بأن يخسر كم محدد من الطاقة ويهبط مقدارًا ثابتًا صوب مدار محدد . يحدث هذا في بعض الأحيان ، ولكن نظرًا لوجود عدد محدود من المدارات المحتملة ، فإنه في النهاية يستقر ولا يبعث إشعاع.



الشكل ٢,١ : المدارات الذرية المسموحة . عندما ينتقل الالكترون من مدار مثل المدار الثالث الى مدار ذي طاقة أدنى مثل المدار الثاني ، فإنه يبعث فوتونًا طاقته مرهونة بالفرق بين طاقتي المدارين.

لهذا آثار في حياتنا اليومية . على سبيل المثال ، إذا أسقطت ملحًا على لهب ، فإن اللهب سيثير إلكترونات الملح مسببًا ارتحالها إلى مدار ذو طاقة أعلى وفي النهاية تخسر تلك الإلكترونات ما حظيت به من فائض الطاقة عائدة الى مدار أدنى ، وباعثة بهذا ضوء . ولأن الضوء ينطوي على كم ثابت من الطاقة تُعطى عن طريق الفرق بين طاقتي المدارين المعنيين ، فإن لهذا الضوء لون مميز . في حالة

الملح (الصوديوم) يكون اللون أصفر (انظر الشكل ٣,٢) . يمكنك تجربة ذلك في مطبخ منزلك . وتنتج المواد الأخرى ألوانًا أخرى .

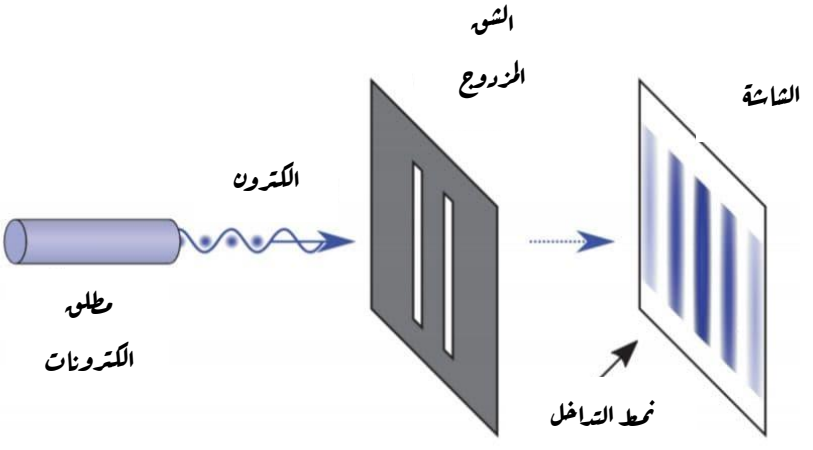
الشكل ٣,٢ : عينة تحتوي على ملح معرضة للهب تنتج لونًا أصفر "ناتج عن الصوديوم".

وهناك خاصية أخرى غير بدَهَية للنظرية الكمومية وهي أنها "احتمالية" ، فهي تتمخض فقط عن احتمالات لقيم المقادير ، وليست تنبؤات دقيقة تُخبَر في ضوء الظروف الأولية . ففي ميكانيكا نيوتن بالنظر إلى المواضع والسُرع الأولية للجسيمات ، تتنبأ النظرية بدقة بقيم المقادير النهائية للجسيمات . في المقابل في

نظرية الكم ، هناك احتمال أن يكون موضع الجسيم في نقطة ما و احتمال أن يكون عند نقطة مغايرة . لن نعرف موضعه إلا إذا هممنا بالقياس .

هناك تجربة معروفة في هذا السياق تسمى تجربة الشق المزدوج . وفي هذه التجربة نفترض أن لنا لوحة مثل السبورة وقمنا بعمل شقين عموديين فيها "أعرض قليلاً من كرة التنس" . وأخذنا واحدة من تلك الآلات التي تسدد كرات التنس نحو اللوح . في الميكانيكا الكلاسيكية ، فإن الكرات إما سترتد عن اللوح أو تمر عبر الشقوق . إذا كانت الكرات مغطاة بالطباشير ، فسنميز علامة على الحائط خلف اللوح تعكس الشقوق لأن الكرات المارة من خلالها ستترك أثرها على الحائط . إذا هممنا الآن بتقليص التجربة إلى الحجم الصغير/الكمومي ، فستكون الأمور مختلفة . لا يعني ذلك أننا سنقوم بذلك ، ولكن يمكن للمرء إنشاء حالات مماثلة ، على سبيل المثال باستخدام البلورات بدلاً من اللوحة ذات الشقوق

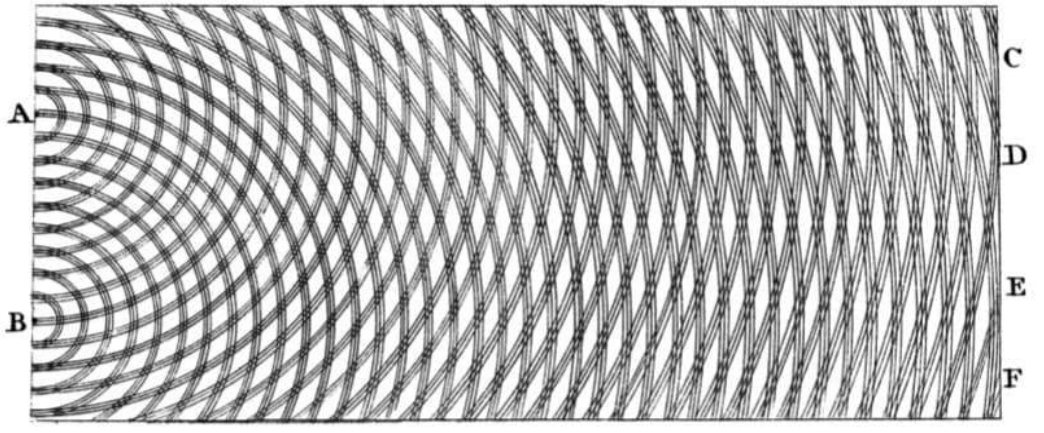
واستخدام الفراغات بين الذرة كشقوق اللوح والإلكترونات بدلاً من كرات التنس ولوحة فوتوغرافية بدلاً من الحائط . لن نرى خطين عموديين كما هو الحال في العالم الكبروي ولكننا سنجد أنفسنا إزاء نمط متموج من الشدة (انظر الشكل ٣,٣) .



الشكل ٢,٣ : تجربة الشق المزدوج بالإلكترونات

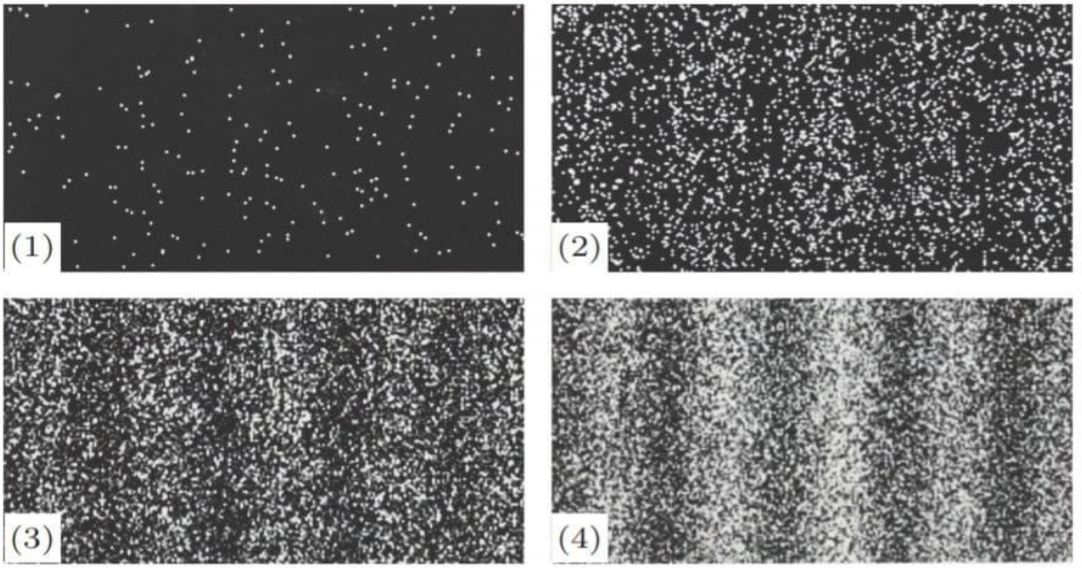
ما يحدث هو أن الإلكترونات تتصرف مثل الموجات . لنفترض أن لدينا خزان ماء وقمنا بغمر اللوح ذي الشقين آنف الذكر به ومن ثم ننتج تصادم لموجة مائية على اللوح. ستمر أجزاء من الموجة من خلال الشقوق وتتفاعل مع بعضها

البعض "وراء اللوح: بعد المرور من الشقين" منتجة نمط متموج في الماء (انظر الشكل ٣,٤) . هذا مشابه لما ينتج عن تجربة الإلكترونات .



الشكل ٣,٤: نمط التداخل في الموجات المائية المارة من خلال الشقين A و B . مثلما رسمت من قبل فيزيائي القرن الثامن عشر البريطاني توماس يونج ، الذي أكتشف هذه الظاهرة في سياق الضوء.

ومع ذلك ، تتصرف الإلكترونات كجسيمات أيضاً . حيث إذا كان بإمكان المرء أن يقوم بالتجربة مقتصرًا على إلكتروناً واحدًا في كل مرة ، فسيرى أنها تُرى على اللوح الفوتوغرافي كنقطة ولكن بمرور المزيد والمزيد من الإلكترونات تلو بعضها البعض فأننا سنبدأ تمييز النمط الموجي . (انظر الشكل ٣,٥) .



شكل ٣,٥: كيف تبدأ الإلكترونات المرتطمة بالشاشة بتكوين نمط التداخل.

تذهب نظرية الكم إلى أبعد من ذلك لتخبرنا أنه لا يمكننا معرفة أي من الشقوق التي يمر عبرها الإلكترون. إذا حاولنا قياسه، على سبيل المثال من خلال وضع كاشف أمام أحد الشقوق، فأن النمط الموجي على لوحة التصوير سيتلاشى. ولكي تنجح التجربة، لا يمكننا معرفة الشق الذي مر من خلاله الإلكترون. وبصورة أعم، تقول النظرية الكمومية أن خصائص النظام لا تأخذ قيمًا حتى يتم قياسها. لا يعني ذلك أننا على غير دراية بقيمها حتى يتم قياسها، كما هو الحال

في الميكانيكا الكلاسيكية ، بل أن تلكم الخصائص ببساطة ليست مَعنية بأخذ قيمٍ محددة حتى تعمل رياضيات النظرية بشكل سليم .

كل هذه الخصائص غير البديهية لنظرية الكم تزداد سوءًا عندما نحاول تطبيقها على النسبية العامة . نظرًا لكون الجاذبية توصف من خلال تشوهات الزمكان ، فهذا يعني أننا سنقوم بتكميم الزمكان الذي نحن فيه . وبذا سيكون الزمكان احتماليًا ، وأحيانًا قد يتصرف كموجات ، وأحيانًا كجسيمات وسيكون غير ذي قيمة محددة حتى يُقاس . لذا ليس من المستغرب أن تتعاضد علينا المشكلات ونحن في سبيل تكميم الجاذبية .

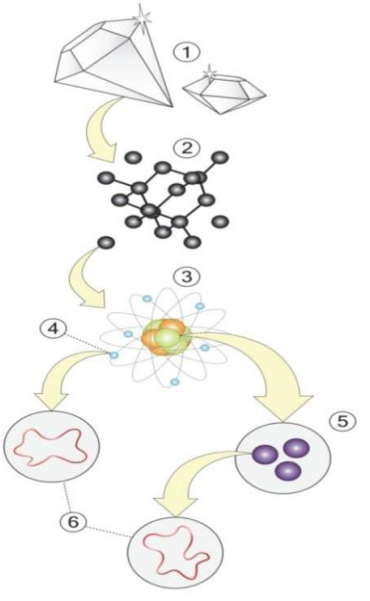
كان لابد للجاذبية من أن تُكمم ، وهو شيء نعرفه منذ عام ١٩١٦ . قال أينشتاين في ورقته البحثية عن موجات الجاذبية ، أن موجات الجاذبية يجب أن تُكمم شأنها في ذلك شأن الموجات الكهرومغناطيسية ، التي تُكمم إلى فوتونات

، يجب أن يكون هناك جسيم يُكمم الجاذبية مماثل للفوتون في تكميمه للكهرومغناطيسية : الجرافيتون . في تلك المرحلة ، لم يقم أينشتاين بأي عمل كمومي ملموس ، وفي الواقع لم تخرج نظرية الكم بكامل حلتها حتى أواخر عشرينيات القرن العشرين . بدأ فهم التفاعلات القوية والضعيفة في الأربعينيات والخمسينيات من القرن الماضي وفي الستينيات حاول الفيزيائيون تطبيق نفس التقنيات التي استخدموها لتكميم التفاعلات الضعيفة والقوية بغية تكميم الجاذبية ، لكنهم وجدوا أنفسهم إزاء مشاكل جمة . حيث نشأت اللانهائيات التي كان من المستحيل إبعادها مما كان كائنًا ، وفي الطبيعة لا شيء يمكن أن يكون لانهائيًا . لذلك كانت هناك مشاكل وتناقضات في تكميم الجاذبية . وهذا أدى بدوره إلى شرخ واسع بين علماء الفيزياء .

اعتقد شطر من العلماء أن الصعوبات التي نشأت في تكميم النسبية العامة تشي بأن نظرية أينشتاين ليست النظرية الحقّة حتى تُكمم ، ووراء تلك النظرية الأساسية لأينشتاين ، ثمة نظرية أكثر جوهرية تتمخض عن نظرية أينشتاين في العالم الكبروي ، لكنها مختلفة وأن النظرية الأكثر أساسية هذه هي النظرية التي ينبغي أن تبغيها مساعي التكميم . إن هذا الاعتقاد يجد أرضاً خصبة عند علماء نظرية الأوتار . حيث أن نظرية الأوتار هي النظرية التي ينبغي تكميمها ومن ثم تنشأ النسبية العامة كامتداد لها عند العالم الكبروي (انظر الشكل ٣,٦) .

هناك أمثلة لمثل هذه الحالات . ففي الخمسينيات من القرن الماضي وقبل أن تفهم التفاعلات الضعيفة على أنها نظريات يانغ ميلز ، كان لدى فيرمي نظرية بشأن ذلك . واجهت نظرية فيرمي أيضاً مشاكل عندما أُريد لها أن تُكمم، ثم تبين لنا

لاحقًا أنها تمثيل معين لنظرية يانغ ميلز . حيث الأخيرة هي من يجب أن تخضع للتكميم وهي خلوة من المشاكل التي واجهتها نظرية فيرمي .



الشكل ٣,٦ : في نظرية الوتر ، تتألف المادة من شبكات جزيئية تتألف بدورها من ذرات تتألف من الالكترونات ، والكواركات "التي تألف البروتونات والنيوترونات" ، وهذه الأخيرة تتألف من تذبذبات للأوتار الأساسية.

يعتقد الشطر الآخر من العلماء ، والذي يشمل اولئك الذين يعملون على الجاذبية الكمومية الحلقية ، أن نظرية أينشتاين ربما تكون صحيحة ، إنها فقط مختلفة تمامًا

عن التفاعلات الأخرى ، حيث أن ما نحن مالكون من التقنيات التي طورناها لم تؤتي أكلها وهناك حاجة إلى تقنيات جديدة .

حيث للنسبية العامة وعلى وجه الخصوص تناظر تفتقره النظريات الأخرى . نظرًا لأنها نظرية في الهندسة بحد ذاتها ، إلى أن يحلها المرء ، أي إلى أن يحصل المرء على هندسة معينة ، فإن نقاط الزمكان جميعها مكافئة لبعضها البعض ويمكن تحريكها بحرية . لتمثيل ذلك ، تصور أنك في وسط المحيط بعيدًا عن الساحل في ليلة غائمة (الشكل ٣,٧) .

لا يمكنك معرفة الموضع الذي أنت فيه . حيث جميع نقاط المحيط متكافئة . يمكنك تحريك قاربك وتغيير مقامك وسيبدو كل شيء متماثلًا بالنسبة لك . في هذا السياق فإن "وضعك لهندسة" سيحيلك قادرًا على رؤية الساحل .

عندئذٍ ، لم تعد نقاط المحيط متكافئة ، فبعضها أقرب إلى الساحل من البعض الآخر وستلاحظ ذلك إذا ما قمت بتحريك قاربك .

شكل ٣,٧ : القارب في منتصف المحيط في ليلة غائمة لن يكون قادرًا على تمييز موضع من آخر. ذات الشيء يحصل مع النظريات الهندسية للجاذبية. يعرف هذا بالثبات تحت الدفيومورسزم.

من الناحية الفنية ، يُعرف هذا التناظر باسم " الثبات في ظل الدفيومورفزم " .

إن هذا التناظر غير موجود في نظريات يانج_ميلز التي تصف جميع التفاعلات الأخرى (حيث النقاط ثابتة ومحددة جيدًا منذ البدأ) . يعتقد بعض الناس أن

التكميم الذي يتضمن الثبات في ظل الدفيومورفزم سيكون حاسما لتطوير نظرية الجاذبية الكمومية. إن الجاذبية الكمومية الحلقية تتضمن ذلك الثبات.

كما ذكرنا، فإن الجاذبية هي نظرية للعالم الكبروي، حيث التأثيرات الكمومية ليست شيئًا يذكر. وفي العالم الصغروي فأن الجاذبية لا تكاد تذكر. على سبيل المثال، يجذب إلكترونان بعضهما البعض عن طريق الجاذبية لأنهما يمتلكان كتلة ويتنافران لأن لديهما شحنة كهربائية، والتنافر الكهربائي أقوى 10^{44} مرة من الجاذبية. هذه هي الأسباب التي تعيقنا في التوصل إلى حالات تجريبية حيث تكون تأثيرات الجاذبية الكمومية بالغة الأثر. يثير هذا تساؤلًا عن علة إزعاجنا أنفسنا بتكميمها. إن الإجابة الأكثر إلحاحًا هي السعي بغية فيزياء متماسكة، وإذا كانت ميكانيكا الكم هي أساس الفيزياء، فيجب أن تكون أيضًا أساس للجاذبية حتى لو كانت آثارها ضئيلة.

ثانيًا ، كما ذكرنا ، فإن بعض الخصائص المدهشة لميكانيكا الكم ، من قبيل أن المقادير الفيزيائية لا تأخذ قيمًا حتى يقوم المرء بقياسها ، تجعل من الصعب إن لم يكن من المستحيل الجمع بين النظريات الكمومية والنظريات الكلاسيكية . أيضًا ، كما سنرى ، هناك حالات مثل الثقوب السوداء والانفجار العظيم التي تقتضي تكميمًا للجاذبية .

لذا فإنّا قد أعددنا العدة للجاذبية الكمومية الحلقية : يعتقد بعض الناس أن مشاكل تكميم الجاذبية تقتضي نظرية جديدة مثل نظرية الأوتار ، ويعتقد البعض الآخر أن المرء يحتاج إلى تقنيات تكميم أفضل ، ولا سيما تلك التي تكون متماشية مع الدفيومورفزم . من بين هذه الفئة هم أولئك الذين يعملون في الجاذبية الكمومية ، والتي ستكون موضوع الفصل التالي .

الفصل الرابع

الجاذبية الكمومية الحلقية

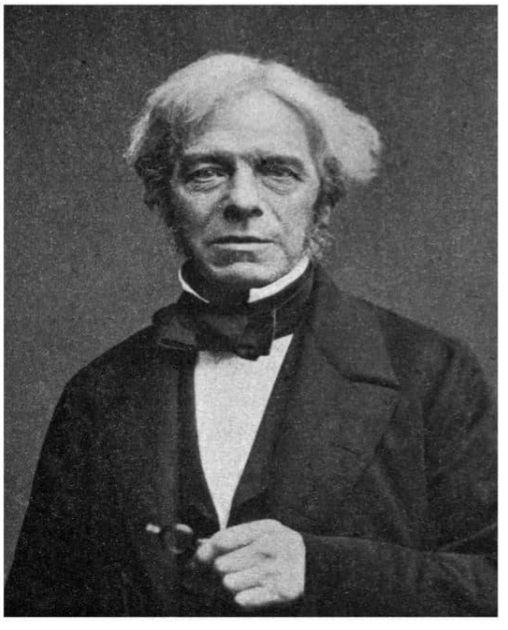
لقد بيّنا في آنف الفصول ما يعنيه مصطلحي "الجاذبية" و "الكمومية"، وإنّا الآن في سبيل مناقشة ثالث المصطلحات المتمثل ب "الحلقية" ؟

لتبيان هذا المصطلح، من المستحسن أن نعود بإيجاز إلى الكهرومغناطيسية وأحد روادها : مايكل فاراداي (الشكل ٤,١) .

كان لفاراداي تلك السمة الفارقة في ذلك الوقت، لشخص كُتب له أن يؤسس لبُنيان جديد في الفيزياء، أن يولد معدومًا في انكلترا القرن التاسع عشر، وما يعنيه ذلك من أنه لن يطأ المدرسة، فضلًا عن الجامعة. ولذا علّمَ فاراداي نفسه. وحصل على وظيفة في محلٍ لبيع الكتب وأبرم صفقة مع المالك بأنه سيقايض البقاء لساعات إضافية علاوة على تنظيف المكان إزاء السماح له بقراءة ما

يشاء . إلا إن السبيل لم يكن سَمِحًا لفاراداي لأنه لم يكن متمكنًا من الرياضيات .

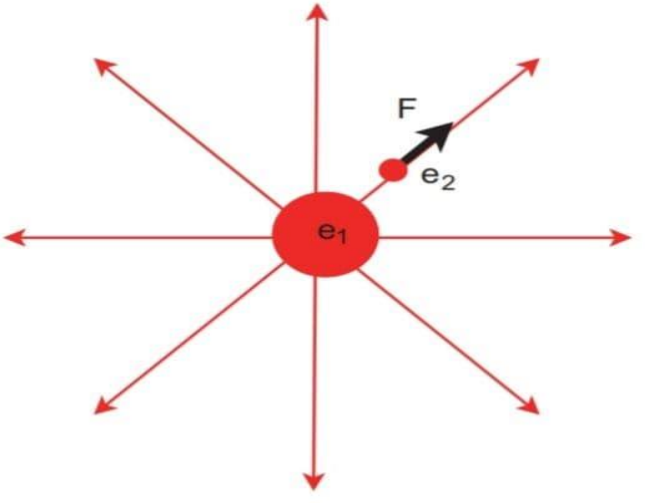
لذا بغية فهم المجالات الكهربائية ، ابتدع فاراداي وسيلة تصورية .



شكل ٤,١ : مايكل فاراداي ١٨٦١

لنفترض أن لنا مجال كهربائي . فإذا قُيد لشحنة أن تكون في هذا المجال ، فإنها ستكون تحت وطأة قوة ذلكم المجال وتُشرع في التحرك . وخطوط المجال هي خطوط تخيلية تتوافق ومسارات الشحنات الماكثة في المجال المذكور . يكمن جمال هذه الابتداع عندما نكون إزاء حالات تناظرٍ عالي ، حيث يمكن للمرء

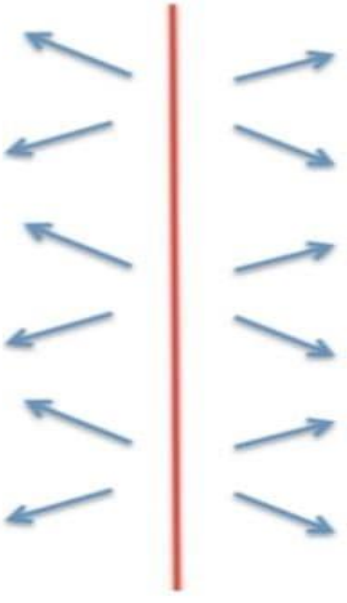
رسم خطوط المجال دون إجراء أي حسابات ، فقط عن طريق استدعاء التناظر . على سبيل المثال ، إذا كنا إزاء شحنة كروية ، فمن الواضح أن خطوط المجال هي خطوط شعاعية/قُطرية (انظر الشكل ٤,٢) . وأن أي تكوين آخر سيكون على النقيض من فرض التناظر الكروي .



شكل ٤,٢: مجال شحنة نقطية e1. الشحنة الأخرى e2 ستشعر بقوة بموازاة خطوط المجال.

وبالمثل ، إذا كان لنا سلك رأسي طويل جدًا ، فإن خطوط المجال تنبثق شعاعيًا في المستوى ، عموديًا على السلك وممتدة بقدر متساوٍ (أي مقدار آخر يتعارض

مع حقيقة أن تلك النقاط على طول السلك الطويل جدًا متكافئة؛ انظر الشكل ٤,٣) . ومن الخصائص الأخرى التي لاحظها فاراداي أن المجالات تكون أكثر كثافة حيثما تكون خطوط المجال أكثر كثافة .



شكل ٤,٣: مجال خط لا نهائي من الشحنات .

دعونا نعود إلى مثال الكرة. ونحن نتحرك مبتعدين فإن "كثافة خطوط المجال" تضمحل . وبشيء من الحساب سندرك أنها تقل بالتناسب مع التربيع العكسي للمسافة من الكرة . وهذا هو بالضبط المقدار الذي يتضاءل به المجال

الكهربائي ! وبالمثل، بالنسبة للسلك ، تتضاءل الكثافة مع معكوس المسافة .

وبهذه الكيفية بالضبط يكون مجال السلك . لذلك نحن نحسب المجالات

الكهربائية بالتفصيل فقط عن طريق رسم خطوط .

في الثمانينيات، كانت المعرفة متحجرة عند ثلاثة من التفاعلات الأربعة ،

ووصفت تلكم التفاعلات "الكهرومغناطيسية والضعيفة والقوية" من خلال

نظريات يانج_ ميلز . والتي تتجلى كتعميمات لكهرومغناطيسية ماكسويل ،

حيث العديد من المجالات الكهربائية والمغناطيسية التي تتفاعل مع بعضها

البعض . في تلك الأثناء ، وجد جامبيني و ترياس سبيل لوصف هذه النظريات

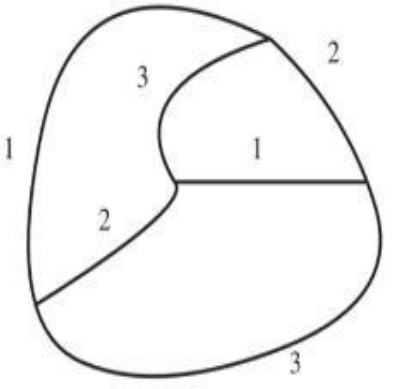
بالتعبير عنها ب " خطوط فارادي " خاصتها . فما لكل هذا والجاذبية ؟

في عام ١٩٨٦ وجد أبهي أشتكار ، في ذلك الوقت في جامعة سيراكيوز في

سيراكيوز، نيويورك، سبيلاً لكتابة نظرية آينشتاين العامة للنسبية كما لو كانت

نظرية مُعدّلة من نظريات يانج_ ميلز . اتضح أنه يمكن للمرء إعادة كتابة هندسة الزمكان بدلالة المجالين الكهربائي والمغناطيسي لتلك النظريات . خطوط فاراداي لهذه النظرية هي أكثر تعقيدًا من تلك الموجودة في الكهرومغناطيسية . يمكن على العموم أن "تتقاطع" الخطوط مع بعضها البعض ويرتبط كل جزء منها "برقم" أو "لون" . هذا يرجع إلى التفاعلات الحادثة والمجالات العديدة الماثلة . إن هذه الخطوط ، وهي خطوط "ملونة" مع التقاطعات الحاصلة بينها تمثل "الحلقات" المعنية في الجاذبية الكمومية الحلقية (في البداية لم يتم تقدير أهمية التقاطعات وفكر الناس حرفياً في الحلقات) ويُشار إليها في هذه الأيام باسم " شبكات السبين **spin networks**" (انظر الشكل ٤,٤) .

في الستينيات من القرن الماضي ، كتب الفيزيائي الإنجليزي المعروف روجر بنروز ورقة علمية أشارت إلى أن شبكات السبين يمكن أن تكون ذات صلة بالجاذبية الكمومية . وبعد خمسة وعشرين عامًا ، أُكد هذا التنبؤ بدقة .



الشكل ٤,٤ : مثال لشبكة السبين.

في عام ١٩٨٨ قرر كارلو روفيلي ولي سمولين أخذ الحلقات على محمل الجد والتأسيس لنظرية كمومية للجاذبية تتماشى وإياها تمامًا .

من العناصر المهمة في النظرية الكمومية هو "الحالة الكمومية" للنظام والتي يتم التعبير عنها بدالة تسمى "الدالة الموجية" . تمثل الدوال الموجية في الجاذبية

الكمومية الحلقية "دوال" لشبكات السبين . وبما أن النسبية العامة تحظى بذلك التناظر الذي يُمكّن المرء من أن يموضع النقاط هنا وهناك بشكل مستمر ، ذلك يعني أن الدوال الموجية التي تمثل شبكات السبين (وبدورها تمثل الزمكان الآينشتايني المتناظر) يجب أن تكون بحيث لا تتغير تحت التشوهات السلسة للمنحنيات البيانية . يُعرف فرع الرياضيات الذي يدرس هذا النوع من الدوال باسم نظرية العقدة **knot theory** . حيث ترائت بشائر علاقة جديدة بين نظرية العقدة والجاذبية الكمومية . تشير كلمة عقدة في هذا السياق حرفيًا إلى العقدة لأنه إذا كان هناك عقدة في الرسم البياني ، فلا يمكن لأحد إزالتها عن طريق تشويه سلس للرسم البياني ، وستظل موجودة دائمًا .

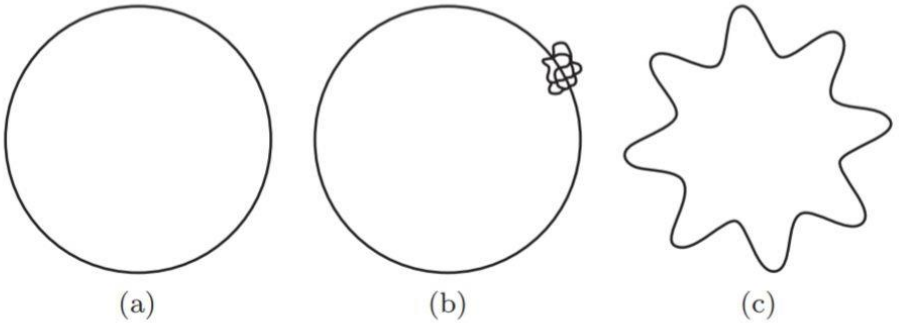
كلما تأتى فرع جديد للرياضيات بغية حل مشكلة فيزيائية معينة ، يُشرع المرء في توقع حدوث أشياء مثيرة للاهتمام . في البداية كان هناك الكثير من التوقعات ،

حتى أنه كان يعتقد أن مشكلة الجاذبية الكمومية قد حُلت . ولكن في النهاية ظهرت التعقيدات من ثنايا النسبية العامة ، وعلى الرغم من أننا لم نحل كل شيء ، فقد تم إحراز تقدم مثير للاهتمام .

بداية ، عندما يكون لدى المرء نظرية كمومية فإنه يحتاج إلى فكرة عن مدى تقارب أو تقاصي الحالات الكمومية . يُعرف هذا من الناحية التقنية بال "معيار" أو "الجداء الداخلي" . هذا ما يسمح بعمل تنبؤات فيزيائية . في بداية التسعينيات ، أدرك أبهاي أشتيكار و جيرزي ليفاندوفسكي إمكانية ابتداع "مسافة" بين الحالات في الجاذبية الكمومية الحلقية ، وهي دقيقة ومتسقة رياضيًا مع التناظر في ظل الدفيومورفزم ، وبسيطة نسبيًا حتى تُبين بيانيا .

الفكرة موضحة في الشكل ٤,٥ . الحالتان من الرسوم البيانية اللتان يمكن أن تتصيران بعضهما البعض (إمكانية تحول الرسم البياني لحالة الى أخرى) هما

متطابقتان بشكل أساسي ، "المسافة" بينهما هي صفر (الحالتان **a** و **c** في الشكل) . إن الحالتين اللتان لا يمكن تغاير احداهما الى الأخرى (الحالتان **a**, **b** في الشكل) ، فإن بينهما مسافة لا نهائية . كما يتضح من الشكل التوضيحي البياني إن الرسوم البيانية المفصولة بمسافة لانهائية يمكن أن تكون قريبة جدًا من حيث الشكل ، لكن العقدة الصغيرة تُحيل تصيير أحداهما للأخرى . التفسير بسيط ، لكن التفاصيل الفنية وراء هذا "الفارق" تمثل تحديًا كبيرًا .

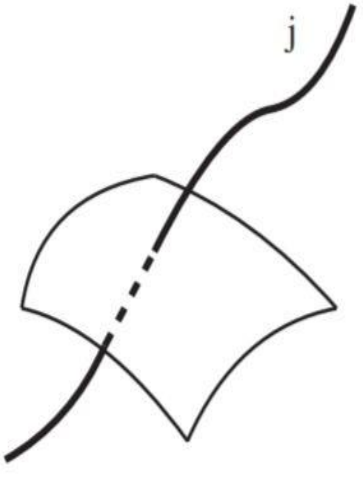


الشكل ٤,٥ : الحالات الكمومية لشبكات السبين

وما هو أكثر إثارة للاهتمام ، ما أُثبت بعد بضع سنوات ، من ليفاندوفسكي ، وأكولو ، وسهلمان ، وثيمان و فلايشاك بشكل مستقل لنظرية (تُعرف بالأحرف الأولى لهم "LOST-F") تشير إلى أن مسافة أشتيكار وليفاندوفسكي ، وفقًا لبعض الافتراضات ، مميزة بشكل أساسي . لذا فمن المثير للاهتمام أن الرياضيات تسوقنا نحو النظرية ، فهي تحدد المسافة لنا . أحد الافتراضات الرئيسية هو الثبات في ظل الدفيومورفزم وهذا أمر مثير للاهتمام لأنه في مشارب أخرى للجاذبية الكمومية ليس بالضرورة لهذا التناظر أن يكون حادثًا منذ البدأ كما هو الحال هنا .

استنادًا إلى فضاء الدوال الموجية الخاص بالمسافة التي ناقشناها ، بدأ روفيلي وسمولين وأشتيكار وليفاندوفسكي في بناء كميات فيزيائية على مستوى كمي (تعرف بإسم "المعامِلات الكمومية") التي تتوافق مع الكميات الفيزيائية

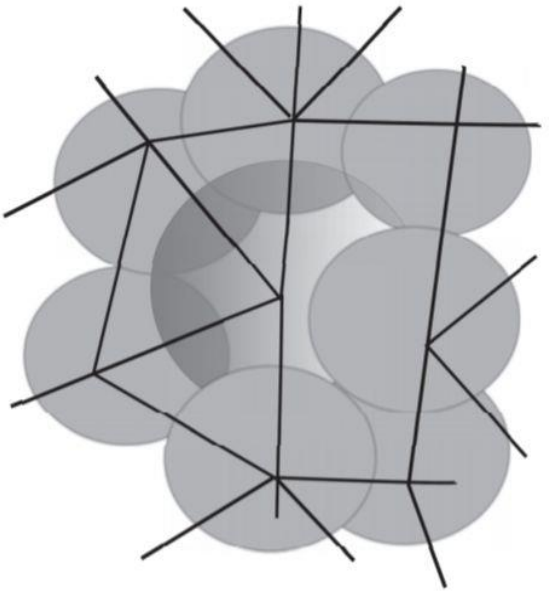
الكلاسيكية التي يمكن للمرء أن يرصدها . على سبيل المثال ، مساحة سطح أو حجم منطقة من الفضاء . في حالة مساحة السطح ، يتعلق الأمر بعدد خطوط الرسم البياني للحالة الكمومية التي تخترق السطح (انظر الشكل ٤,٦) وهذا يعني أن مساحة السطح لا يمكن أن تأخذ قيمة عشوائية لأن عدد الخطوط هو عدد منفصل (المساحة "مكممة") .



الشكل ٤,٦ : يحظى السطح بكم من المساحة أبان اختراقه من قبل خط لشبكة سبين.

بالنسبة للأسطح في حياتنا اليومية ، فإذا قمنا بقياس مساحة الطاولة على سبيل المثال ، فإن عدد الخطوط التي تتمخض خلالها هو عدد ضخم (حوالي 10^{66} لكل بوصة مربعة) ، لذا يبدو أن المساحة يمكن أن تأخذ أي قيمة . ولكن إذا كان على المرء أن يفكر في طاولة مجهرية ، فإن مساحتها يمكن أن تأخذ قيمًا معينة فقط . في الواقع ، يمكن أن يكون المرء إزاء حالة من قبيل : أن الطاولة ذات مساحة صفرية إذا لم يتجاوزها أي خط حالة كمومية . كيف يمكن أن يكون للطاولة مساحة صفرية ؟ سيكون هذا وضعًا "كموميًا للغاية" ، يختلف تمامًا عما نخبره في حياتنا اليومية .

تنطبق اعتبارات مماثلة على الحجم المعني لمنطقة ما . حيث يتناسب مع عدد تقاطعات الرسم البياني للحالة الكمومية داخل المنطقة المعنية (انظر الشكل ٤,٧) .



الشكل ٤,٧ : البنى الأساسية التي تشكل الزمكان بناء على شبكات السبين. تشكل التقاطعات كموم الحجم.

لقد تم التكهن لبرهة من الزمن بأنه يجب تكميم المساحات في الجاذبية الكمومية ولكن التكميم هنا ليس تكهنًا ، بل هو انبثاق دقيق من الأطار ومع صيغة محددة تختلف عن تلك الصيغ التي تكهن بها الناس في الماضي . على وجه الخصوص ، يشير ذلك إلى أن الأشياء الغريبة التي تحدث في العالم الصغروي تختفي سريعًا إلى حد ما عندما ينظر المرء إلى العوالم الأكبر ويظهر عالمنا اليومي بسرعة . تتكون

صورة الزمكان الكمومي التي تنشأ من شبكات السبين من لبنات من حجم معين يحدده عدد وخصائص التقاطعات المرهونة بتلك المنطقة . ستقوم الجاذبية الكمومية الحلقية بتعيين الاحتمالات لشبكات السبين المختلفة .

أخيرا ، في عام ١٩٩٦ ، تمكن توماس ثيمان من كتابة نسخة كمومية من معادلات اينشتاين بطريقة دقيقة مستخدمًا تلك المعاملات الكمومية التي ناقشناها . وأظهر أن المعادلات كانت متسقة جيدا على المستوى الرياضي ، وكانت متآلفة مع بعضها البعض ولا تذر المزيد من اللانهايات . شيد ثيمان نظرية مُعرّفة جيدًا وغير مبتذلة ، ومتسقة من الجاذبية الكمومية . لذلك قد تسأل، هل انتهينا ؟ الخطوة الوحيدة المتبقية هي التحقق من أن النظرية تتنبأ بفيزياء سليمة . المشكلة هي أن النظرية التي نتجت من الصعب جدا دراستها .

كان هناك تقدم ضئيل تأتى من هذه النظرية بشكل عام، لذلك نحن لا نعرف ما إذا كانت صحيحة . لذا ما حاول الناس القيام به هو التركيز على حالات بسيطة مع الكثير من التناظر حيث يمكن الإتيان بالحسابات تحت سيطرة أفضل . في الفصول ٥ و ٦، سندرس اثنين من التطبيقات من نظرية ثيمان لحالات مع الكثير من التناظر . أحداها الثقوب السوداء وديناميكيتها الحرارية . و الأخرى ستكون علم الكونيات : دراسة الكون ككل .

الفصل الخامس

التطبيق: الثقوب السوداء

سنشرع في هذا الفصل في تبيان الثقوب السوداء ونناقش ديناميكيتها الحرارية .

يقتضي هذا تحديد كلا المفهومين : " الثقوب السوداء والديناميكا الحرارية" .

إن الديناميكا الحرارية :هي ذلكم الفرع من الفيزياء الذي يدرس الأنظمة ذات المعلومات المنقوصة . إن أحد الأمثلة النموذجية لنظام ديناميكي حراري هو الغاز ، الذي يتكون نموذجيا من حوالي 10^{23} جزيء . من البيّن أننا لا نستطيع تتبع جميع مواقع وسرعات تلكم الجزيئات . لذلك نلجأ إلى المتغيرات "الكبروية" لتبيان حالتها ، متغيرات من قبيل الضغط ودرجة الحرارة .

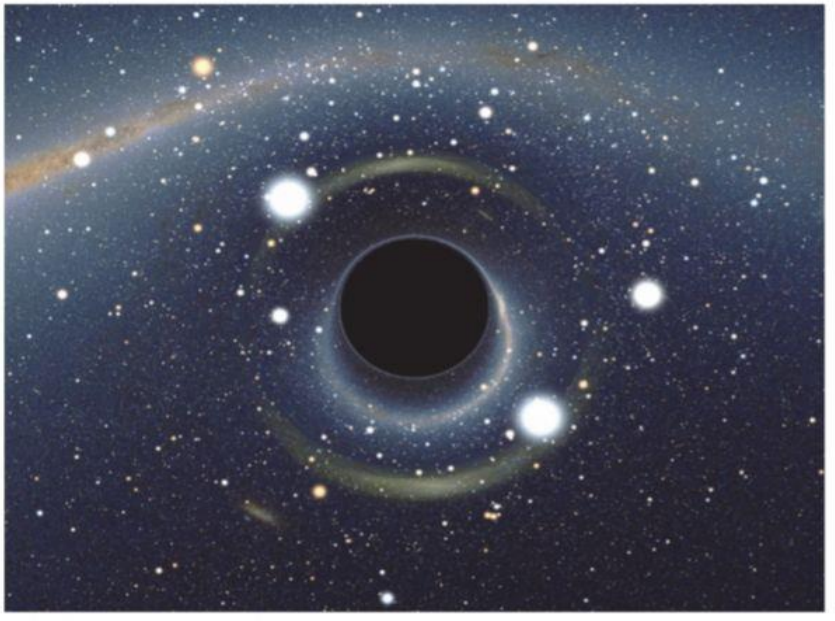
بصرف النظر عن هذه المتغيرات الكبروية المعروفة ، هناك متغير آخر قل ما يذكر في الحياة اليومية يسمى " الانتروبيا " . إنه يهب لنا مقياسًا لمستوى جهلنا بالنظام .

تتسم الانتروبيا بتلك السمة الفارقة "أنه عندما تتفاعل الأنظمة فإن الانتروبيا الكلية للنظام في ازدياد مضطرد " . قد تنخفض الانتروبيا في بعض الأنظمة الفرعية ، لكنها تزداد على المستوى العام . من أمثلة النظام الفرعي "حيث تنخفض الانتروبيا " هو بطانة الثلاجة ، حيث تعني درجة الحرارة المنخفضة مزيدًا من الرتابة ومن ثم قلة في الجهل الذي عليه نكون . لكن في الجزء الخلفي من الثلاجة تسخن شبكة تبريد الهواء ، وبالتالي تزداد إنتروبيا المطبخ برمته، بما في ذلك الثلاجة القابعة فيه . ويُعرف القانون الذي ينص على أن الانتروبيا في إزدياد دائم باسم "القانون الثاني للديناميكا الحرارية" . أما القانون الأول للديناميكا الحرارية فهو مجرد توصيف لحفظ الطاقة ، وله صيغة تربط تغيرات الطاقة بالتغيرات في الانتروبيا ودرجة الحرارة والحجم والضغط . لن نحتاجها بالتفصيل ، لكن من الجيد معرفة وجودها .

إذا كانت تلك هي الديناميكا الحرارية ، فماذا عن الثقوب السوداء ؟

الثقوب السوداء : هي مناطق في الزمكان حيث تكون الجاذبية شديدة لدرجة أن لا شيء ، بما في ذلك الضوء يمكن أن يخرج منها (انظر الشكل ٥,١) . إذا رمى المرء على الأرض جسمًا صوب السماء ، فإنه سيصل إلى ارتفاع معين ومن ثم يهبط عائدًا نحو الأرض . أما إذا رماه المرء بسرعة ٢٥٠٠٠ ميل في الساعة ، فلن يُكتب لذلك الجسم الهبوط ؛ بل سوف يفلت إلى الفضاء . هذه هي الطريقة التي تفلت بها سفن الفضاء من جاذبية الأرض . وإذا كانت الأرض أكثر كثافة ، فسيتطلب المرء سرعة أعلى بغية الهروب من جاذبيتها . ماذا لو كانت شديدة الكثافة بحيث تكون "سرعة الإفلات" مساوية أو أعلى من سرعة الضوء ؟

بما أن نظرية النسبية لآينشتاين تنص على أن لا شيء يمكن أن يسير أسرع من الضوء ، فلا شيء يمكن أن يفلت من مثل هذا .



الشكل ٥,١ : تصور لما يكون عليه الثقب الأسود .

إن مفهوم الجسم الأسود مفهوم قديم ، فقد ناقش الأسقف ميتشل في إنجلترا وبيير سيمون دي لابلاس في فرنسا هذا المفهوم في القرنين السابع عشر والثامن عشر . إن ما كان يعوزهم هو التصور المتمثل بأن سرعة الضوء هي السرعة القصوى ، لذلك لم يكونوا على دراية بأن لا شيء يمكن أن يفلت من ذلكم المكان .

تُحد الثقوب السوداء بسطح يسمى "أفق الحدث" . وأي جسم يتجاوز أفق الحدث يصير مرهوناً داخل الثقب الأسود وليس له من مفر . تتنبأ النسبية العامة

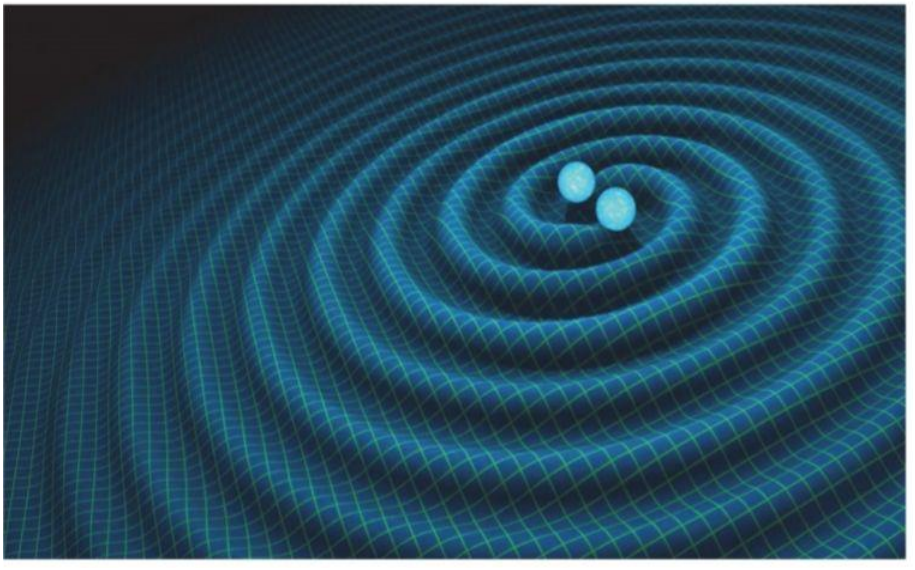
لأينشتاين بالثقوب السوداء . في الواقع ، تجلى الحل الذي يصف أبسطها (تلك التي لا تدور) بالفعل في عام ١٩١٦ . لكن لم يتم فهمه بشكل صحيح حتى الستينيات . لقد استعصى مفهوم الثقب الأسود على بعض أفضل جهابذة فيزياء القرن العشرين . إن الثقوب السوداء اليوم مفهومة ومقبولة بشكل جيد كجزء من المنظور الفلكي .

كيف يمكننا رصد الثقوب السوداء إذا كانت سوداء ؟ يكمن جواب ذلك في علة التأثيرات التي تتأتى بها في المحيط الخاص بها . تستقي العديد من الثقوب السوداء مادتها من النجوم الماكثة على مقربة منها . تستقر المادة بسرعة عن طريق التصادمات في قرص يحوم حول الثقب الأسود يشبه ذلك الذي لدى كوكب زحل يسمى (قرص التراكم) . تكون شدة الجاذبية كبيرة جدًا لدرجة أن المادة تسخن ويستتبع ذلك إصدارها ضوءً . نظرًا لأن ذلك الضوء يُنتج خارج

أفق الحدث ، يمكنه أن يصل إلينا . اُلتقط هذا بطريقة دراماتيكية إلى حد ما مؤخرًا بواسطة "تلسكوب أفق الحدث" **Event Horizon Telescope** (انظر الشكل ٥,٢) .

الشكل ٥,٢ : أول صورة للثقب الأسود مستحصلة بوساطة تلسكوب أفق الحدث.

علاوة على ذلك ،يمكننا الآن باستخدام كاشفات موجات الجاذبية **LIGO** اكتشاف موجات الجاذبية التي تتأتى من تصادم الثقوب السوداء (انظر الشكل ٥,٣) .



الشكل ٥,٢ : تصور فني لموجات الجاذبية المنتجة من تصادم ثقبين أسودين.

فتح هذا "عصرًا ذهبيًا" جديدًا من التبين التجريبي للنسبية العامة بدقة لا سابق لها . لذلك ، تُقبل الثقوب السوداء الآن كأجرام فلكية عادية ، ولكن بخاصية : أنه إذا سقط شيء فيها ، فلن يفر منها أبدًا .

ما علاقة الديناميكا الحرارية بالثقوب السوداء ؟ في البداية لا يبدو أن ثم تلك العلاقة الجلية . كون الثقب الأسود أسودًا ، لا يرتبط به أي شيء من قبيل درجة الحرارة . فهو على عكس الغاز ، موجود بسيط للغاية . تتميز الثقوب السوداء

بكتلتها وزخمها الزاوي (والشحنة الكهربائية إن لم تكن متعادلة) . وليس لديها أي خاصية مميزة أخرى. هذا يختلف تمامًا ، على سبيل المثال ، عن النجم ، الذي يشتمل على أنواع مختلفة. ومع ذلك فإننا نعتقد أن الثقوب السوداء تتشكل عندما ينهار نجم ما تحت جاذبيته الخاصة .

النجوم عبارة عن كرات من الغاز تميل إلى الانكماش بفعل جاذبيتها . ونتيجة ذلك ، تسخن ومن ثم تشرع التفاعلات النووية فيها .

تولد هذه التفاعلات ضغطًا مما يوقف الانهيار الجذبوي ويستتبع ذلك ثبات النجم بين تلك القوتين المتضادتين. كما أن التفاعلات تلك هي علة الضوء الذي ينبعث من النجم. إن هذا الضوء يسلب الطاقة التي يزهو بها النجم ومن ثم يستهلك النجم وقوده النووي وعندما تنفذ طاقة النجم لا شيء يمكن أن يوقف الانهيار الجذبوي وينكمش النجم . اعتمادًا على الكتلة ، قد يتوقف الانكماش عندما

تندمج الإلكترونات والبروتونات آيلةً إلى نيوترونات تتنافر عبر آلية تُعرف باسم مبدأ استبعاد باولي ، ويتكون نجم نيوتروني . النجم النيوتروني هو نجم كتلته كتلة شمسية واحدة أو اثنتين وحجمه حجم مدينة . لذا فهو بقية كثيفة للغاية . ولكن إذا كانت كتلة النجم الأولي أعلى من ذلك ، فإن الانهيار الجذبوي سيستمر إلى أن يؤول ثقبًا أسودًا .

دفع هذا جاكوب بيكنشتاين إلى التنظير بأن هناك "جهل كامن في الثقب الأسود" . إنه الجهل حول النجم الذي استحال اليه ، فبغض النظر عن ذلك النجم الذي شكل الثقب الأسود ، فإن ما للثقب الأسود من صفات لا تتعدى الكتلة والزخم الزاوي ليس إلا ، فنحن إزاء ضياع للمعلومات حول العديد من خصائص النجم السالف . يزداد مستوى جهلنا كلما زاد حجم الثقب الأسود . قاد هذا بيكنشتاين إلى وضع نظرية مفادها أن مساحة أفق الحدث لعبت دور

الانتروبيا ، لأنها تتمخض عن مستوى الجهل بالنظام . إذا قمت بربط ذلك بحقيقة أنه عندما تتفاعل الثقوب السوداء ، فإن أفق الحدث يكبر دائمًا (يبتلع الثقب الأسود الأشياء ويصبح أكبر ، وليس لشيء أن يخرج منه أبدا) ، فإنه ثمة لدينا قانون ثانٍ لانتروبيا الثقب الأسود . كما بيكنشتاين كتب شيئًا يشبه القانون الأول للديناميكا الحرارية للثقوب السوداء ، يربط تغيرات الطاقة (في النسبية الطاقة والكتلة قابلتين للتبادل حيث $E = mc2$) مع متغيرات المساحة وبعض المتغيرات الأخرى .

لكن الناس كانوا متشككين بشأن هذا التشبيه لأنه لم يكن هناك تصور لدرجة الحرارة للثقب الأسود . تغير هذا في عام ١٩٧٤ عندما درس ستيفن هوكينج تأثير المجال الكمومي القابع عند هندسة الثقب الأسود . لم يكمم هوكينج الجاذبية ولا الثقب الأسود ، ففي حساباته كان الثقب الأسود يبقى حيث هو

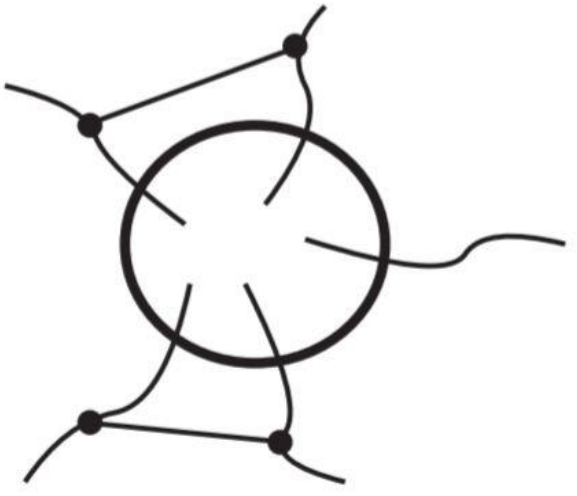
ويوفر الخلفية. وأشار إلى أن المجال الكمومي قرب الثقب الأسود يصدر إشعاعًا حراريًا (كما لو كان ساخنًا) بدرجة حرارة معينة. وتعطى درجة الحرارة تلك بواسطة الجاذبية عند سطح الأفق، وهي بالضبط الكمية التي ظهرت في قانون بيكينشتاين الأول حيث كان من المفترض لدرجة الحرارة أن تكون. لذا فإن جزئيات اللغز تتناسب تمامًا! تلخيصًا لذلك، فإن الثقب الأسود الكلاسيكي ليس نظامًا حراريًا، ولكن عندما يطلق المرء عنان ميكانيكا الكم، حتى ولو أقتصر على المجالات الكمومية التي تقبع خارج الثقب الأسود، فإن الثقب الأسود يصبح بدرجة حرارة معينة.

لذا فإن الانتروبيا مرتبطة بالمساحة وبجهل ما بداخل الثقب الأسود وهي ذات طبيعة كمومية. في هذه الحالة، قد تُلقي نظرية الجاذبية الكمومية الضوء على

العلاقة بين الانتروبيا ومساحة الأفق . لقد ناقشنا بالفعل كيفية عمل المساحات في الجاذبية الكمومية الحلقية ، لذلك دعونا نرى ما إذا كانت لها أن تعمل هنا .

يكتسب السطح مساحة عندما تخترقه خطوط شبكات السبين للحالة الكمومية الممثلة للزمكان المعطى والذي يبوء فيه السطح . يمكن أن ينبع سطح مساحة معينة من العديد من الحالات الكمومية المختلفة حيث تتجلى شبكات السبين في السطح بطرق مختلفة ولكن في النهاية فإنها تعطي نفس المساحة (انظر الشكل ٥,٥) . عندما نتحدث عن أفق مساحة معينة ، فإننا لا نعرف أي حالة كمومية تؤدي إلى نشأتها . ذلك هو الجهل الذي تدعي الجاذبية الكمومية أنه لدينا حول أفق الحدث الكلاسيكي . ويظهر حساب مفصل للجاذبية الكمومية الحلقية أنه هذا الجهل يتناسب مع المساحة . تم اقتراح هذا لأول مرة من قبل كراسنوف وروفيللي ثم نُقح لاحقًا بواسطة أشتيكار وبايز وكوريتشي

وكراسنوف . لذا فإن هذا يعطي تفسيراً أساسياً لتناسب إنتروبيا الثقب الأسود مع مساحته .



الشكل ٥,٥ : مساحة مُعطاة من الأفق يمكن أن تُدرك بواسطة شبكات سبين مختلفة مارة خلالها . وجهلنا بأي واحدة هي يُمثل بانتروبيا الثقب الأسود.

هناك تغضن في حسابات الجاذبية الكمومية الحلقية ، وهو ما للنظرية من معامل حُرِّيُعرف باسم معامل ايميرزي ويظهر في حسابات الانتروبيا . لذا فإن النتيجة تعطي تناسبًا مع المساحة فقط ، وليس معاملًا دقيقًا . ولكن مما يبعث على الرضا هو أن الحسابات قد كُررت للثقوب السوداء من أنواع مختلفة وأن المعامل

الذي يظهر هو نفس المعامل دائمًا ، لذلك ثَمَة هناك اتساق على الأقل . قد تسأل ، لماذا أمكن لهم إجراء هذه الحسابات دون غيرها ؟ لأن هذه الحسابات تعتمد فقط على كيفية اختراق خطوط شبكة السبين للسطح ؛ ولا تتطلب حلًا للنظرية الكاملة خارج أو داخل الثقب الأسود ، هذا يحيل الأشياء أكثر قابلية للتتبع .

وبصرف النظر عن إنتروبيا الثقوب السوداء ، بدأت الجاذبية الكمومية الحلقية تذر علينا بعض الإجابات الأخرى المتعلقة بالثقوب السوداء . كما ذكرنا ، تتشكل الثقوب السوداء عندما تنهار النجوم . بعد ذلك ، تستمر مادة النجم في الانكماش داخل الثقب الأسود حتى تتركز جميعها في نقطة ذات كثافة غير محدودة (تُسمى تقنيا "المتفردة") . بالطبع، لا يمكن لشيء أن يكون لا محدودًا في الطبيعة . التوقع هو أنه عندما تصبح الكثافة كبيرة، فإن ميكانيكا الكم هي

سيدة الميدان في حين أن النسبية العامة الكلاسيكية لآينشتاين لا تعد صالحة في مثل تلكم الحال. لسوء الحظ، فإن ما نحن إزاءه من نظريات الجاذبية الكمومية الحلقية ليست في وضع يمكّنها من دراسة الانهيار الجذبوي الكمومي. ولكن إذا افترضنا أن الثقب الأسود ثابت وماكث هناك إلى الأبد وليس ذو دوران، هناك ما يكفي من التناظر لحل المشكلة. هذا ما قام به مؤلفو هذا الكتاب في عام ٢٠١٣. حيث نجد أن المتفردة قد أزيلت وأبدلت بمنطقة ذات إنحناء كبير يمكن من خلالها أن يمر المرء إلى منطقة أخرى من الزمكان في المستقبل. مرة أخرى، هذه الحسابات محدودة للغاية لأننا لا ندرس انهيار فعلي للنجم. لكنها عبارة عن حساب يوضح أن ما كان غير محدود "لانهائي" في نظرية أينشتاين يمكن استبداله بشيء محدود في الجاذبية الكمومية الحلقية. هذه هي بداية فهمنا للحال، ولكنه ليس حسابا كاملا.

الحساب الكبير الذي لا الجاذبية الكمومية الحلقية ولا نظرية الأوتار قادرتين على التعاطي معه هو ما يلي: رأينا أن حسابات هوكينج الجزئية تقول بأن الثقب الأسود يبعث اشعاعًا حراريًا . وأن درجة الحرارة تتناسب عكسيا مع كتلة الثقب الأسود . أن درجة الحرارة تتضمن أن الثقب الأسود يبعث اشعاعًا يهوي بالطاقة بعيدًا عن الثقب الأسود . لذلك يجب أن يتقلص . نظرا لأنه يتقلص، فإنه سيكون إزاء خسران للكتلة، وبالتالي ترتفع درجة الحرارة (تتناسب عكسيا مع الكتلة!)، والثقب الأسود يشع أكثر فأكثر . هذا يؤدي إلى عملية مآلها أن الثقب الأسود سوف "يتبخر" في نهاية المطاف .

بالنسبة للثقوب السوداء الفلكية **ASTROPHYSICAL BLACK HOLES** فإن هذه العملية بطيئة بشكل لا يصدق . سيستغرق الأمر مرات عدة من عمر الكون للوقوف على تبخر ثقب أسود

فلكي، لذلك فإن هذا ليس مهمًا للغاية. غير أن هذا الأمر يثير هذا السؤال المفاهيمي المهم: ما هو مآل جميع المعلومات حول كيفية تشكل الثقب الأسود والقابعة وراء أفق الحدث؟ من المعروف أن أحدى الخواص الجوهرية لميكانيكا الكمومية يعرف باسم "**Unitarity**"، وهذا يعني أن النظرية "تحفظ المعلومات". إذا وجدنا أنفسنا في نهاية اليوم مع إشعاع حراري لا أكثر يتميز برقم واحد (وهو درجة الحرارة)، أين ذهبت كل المعلومات التي ذهبت إلى الثقب الأسود؟ هذا هو المعروف باسم مفارقة "ضياع المعلومات"، وفي رأينا، ربما توسم بأنها المشكلة المركزية في الفيزياء النظرية الأساسية، لأنها تتحدى النسبية العامة وميكانيكا الكم والديناميكا الحرارية في أنظمتها الأكثر تطرفا.

لاحظ أن العملية المذكورة أعلاه هي افتراضية: لا تتضمن حسابات هوكينغ " فعل عكسي "، أي الكيف التي يأثر بها الأشعاع المنبعث على الثقب الأسود.

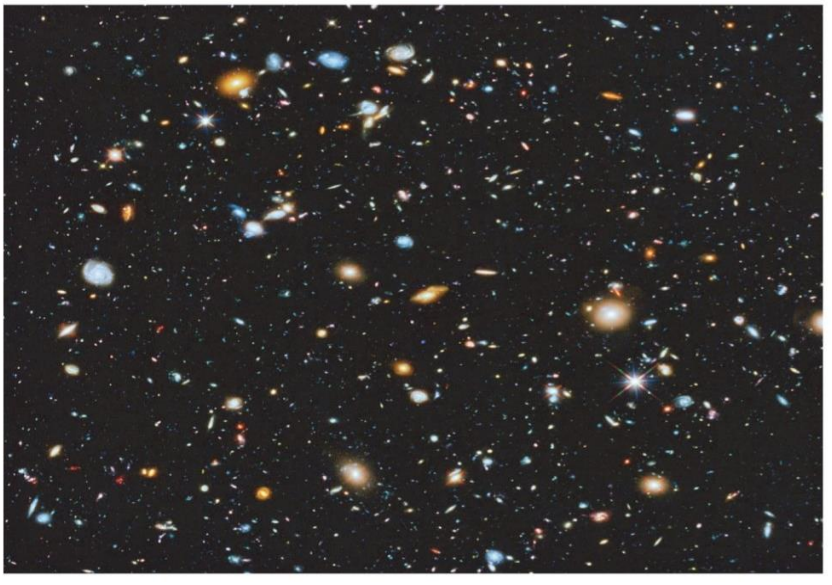
لذلك على وجه الخصوص لا يتقلص الثقب الأسود في مثل هذه الحسابات . لا نعرف حتى الآن كيفية القيام بحسابات تتعامل مع الانكماش . هذا ما يسعى إليه الجميع . تشير الحسابات السابقة التي ذكرناها والتي أجريناها في الجاذبية الكمومية الحلقية لثقب أسود أبدي يتصل بمنطقة في المستقبل إلى مخرج محتمل للمعلومات للهروب ، لكنه يفتقر إلى الكثير من العناصر (ليس هناك إشعاع هوكينغ) ليتم اعتباره تفسيرا .

الفصل السادس

التطبيق: علم الكونيات

ينبري هذا الفصل لمناقشة التطبيق الثاني ، والمتمثل بعلم الكونيات / الكوسمولوجيا "دراسة الكون ككل" . قد تسأل: أنى لنا دراسة الكون ككل ؟ الجواب: بشكل إجمالي جدًا . حيث يتغاضى المرء عن معظم تفاصيل الكون ، ويركز على ثلة منها . وفي أبسط مثال ، فإن درجة الحرية الوحيدة التي تؤخذ في الاعتبار هي " مقياس" الكون . حيث إذا نظر المرء إلى الأشياء على مقاييس واسعة ، فإن الكون متجانس **homogeneous** ومتناظر **isotropic** إلى حد ما (يبدو متماثلًا في جميع الأماكن ومتشابهًا من جميع الاتجاهات ؛ انظر الشكل ٦,١) . وليس هذا هو الحال على المقاييس الصغيرة : حيث من البيّن أن النظام الشمسي المجاور للشمس يختلف عما هو عليه قرابة

بلوتو على سبيل المثال . لكن إذا ابتغينا نطاق المجرات أو حتى عناقيد المجرات ، فإن الأشياء تبدو متجانسة إلى حد ما .



الشكل ٦,١ : المجال العميق للكون بوساطة تلسكوب هابل الفضائي.

نحن نعلم أن الكون يتمدد . علمنا ذلك هو وليد ملاحظة أن بعد المجرات عنا ، موصول بالسرعة التي تبتعد بها ، فكلما كانت تلك المجرات أبعد كلما بعدت عنا بشكل أسرع . سيكون التشبيه هنا هو الكعكة ذات الزبيب الموضوعة في الفرن . فعندما يُخبز الكعك يتمدد ومن ثم يتباعد الزبيب المغمور فيه عن بعضه

البعض ، وأبعدها عن غيرها أسرعها في التقاصي . تتنبأ نظرية أينشتاين بكون مُتمدد ، وقد لاحظ أينشتاين ذلك بالفعل في عام ١٩١٧ . إلا أنه في ذلك الوقت كان رهين الاعتقاد بسكونية الكون . فعل أينشتاين ما يفعله أي مُنظِّر جيد : "لقد تلاعب بالمعادلات ليجعله كونًا ثابتًا" ، واتضح أن هذا خطأ جلي .

فالكون الذي وجد آينشتاين نفسه إزاءه هو كون غير مستقر . وبعد اثني عشر عامًا ، تمكن إدوين هابل ، عالم الفلك التجريبي ، من أن يقيس ما للكون من توسع . لقد فوت أينشتاين فرصة رائعة لعمل تنبؤ مذهل كان من الممكن تأكيده . يقول البعض إنه وَسَمَ هذا ب"أكبر خطأ فادح في حياتي" ، على الرغم من أنه لم يُأكد أنه قال ذلك بالفعل .

وبما أن الكون يتوسع صوب المستقبل ، فإنّا بإرجاعه معكوسًا في الزمان ،سنكون إزاء كونٍ "يتقلص" . تخبرنا نظرية آينشتاين أن الكون يتقلص في نهاية

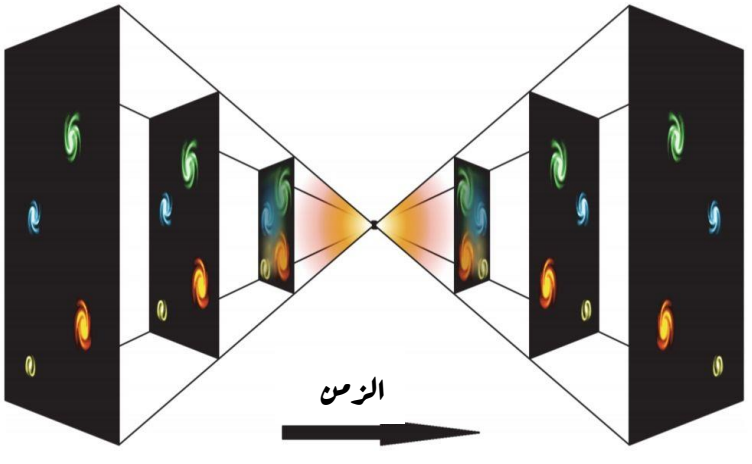
المطاف إلى نقطة يتركز فيها كل شيء ، مماثلة لتلك التي داخل الثقوب السوداء ، وتصبح الكثافة غير محدودة . إننا مرة أخرى إزاء ما يُعرف تقنيًا باسم "المتفردة" . يُعرف هذا بإسم "الانفجار العظيم" الذي أدى إلى نشوء الكون . كما ذكرنا ، لا شيء يمكن أن يكون لانهائيًا في الطبيعة ، لذا فإن التوقع هو أن التأثيرات الكمومية أبان الانفجار العظيم ستُأتي أكلها وتغير مجرى الأمور .

وقد دُرس هذا في الجاذبية الكمومية الحلقية . وبالطبع ، فإن إجراء الحساب الكامل يستلزم حل معادلة ثيمان لحالة كمومية "متجانسة ومتناظرة" كما هو الكون . إنّا نجهل تمامًا سُبل القيام بذلك ، على الرغم من إحراز بعض التقدم مؤخرًا . ما يفعله الناس هو العمل ضمن تقريب . ففي البدأ ، نقصي جميع درجات الحرية باستثناء "المقياس" . النظام الناتج بسيط للغاية ، لكن ليس للجاذبية الكمومية الحلقية فيه من حظوة ، لأنه التبسيط الناتج أقصى خطوط

فاراداي. ولكن ما يمكن للمرء فعله هو تقديم نظير لمسافة اشتكار_ ليفاندوفسكي بين الحالات. أدى ذلك إلى ظهور ما يُعرف باسم علم الكونيات الكمومي الحلقي.

نوقش علم الكونيات الكمومي الحلقي لأول مرة بواسطة مارتن بوجوالد ثم نُقح لاحقًا بواسطة أشتيكار وباولوسكي وسينغ والعديد من المؤلفين الآخرين. من المفترض أن يكون تقريب للنظرية الكاملة. لسنا على بيّنة بكم هي جيدة تلك الصورة التقريبية. لمعرفة مدى جودة القرب، يحتاج المرء إلى تجاوز التقريب وإظهار أنه يعمل بالفعل، لكن لا يمكننا فعل ذلك حتى الآن في هذه الحالة. ما يشي به هذا التقريب هو أنه عندما يكون الكون كبيرًا، يوصف كل شيء جيدًا بواسطة نظرية أينشتاين. ولكن عندما يصبح الكون صغيرًا جدًا، بدلًا من تركزه في نقطة واحدة بكثافة لانهائية، يصل الكون إلى حد أدنى للحجم ومن ثم

يُعاد الزمن إلى الوراء ويبدأ في التمدد مرة أخرى في الماضي إلى الكون الكبير قبل الانفجار العظيم. أي أن كوننا بدأ كبيرًا، ومر بفترة من الانكماش، وصل خلالها إلى كثافة عالية جدًا، وكمومية جدًا، ثم أعيد توسعه مرة أخرى آيلًا إلى الكون خاصتنا. لذلك استعيض عن الانفجار العظيم، الذي كان يمثل تلك اللحظة الأولى، بـ "الارتداد الكبير" (انظر الشكل ٦,٢).



الشكل ٦,٢: في سيناريو الارتداد الكبير، يتقلص الكون الى متفردة قبيل أن يتوسع الى حجمه الحالي.

هذا شيء كان مما كان متوقعا ، ولكن عندما أريد القيام بذلك باستخدام السبل التقليدية في الستينيات ، قيض الفشل في تحقيق ذلك . إن مسافة أشتكار ــ ليفاندوفسكي بين الحالات هو اللاعب الرئيس الجديد الذي يقود إلى ذلك . في الواقع ، حُللت نماذج أخرى من الكون ، مع اللاتنار وخصائص أُخر ، ويتجلى "الارتداد" على أنه خاصة قوية . لذلك هذا شيء مُستحسن لأنه يُظهر مستوى معينًا من المتانة لم يتم تحقيقه من قبل .

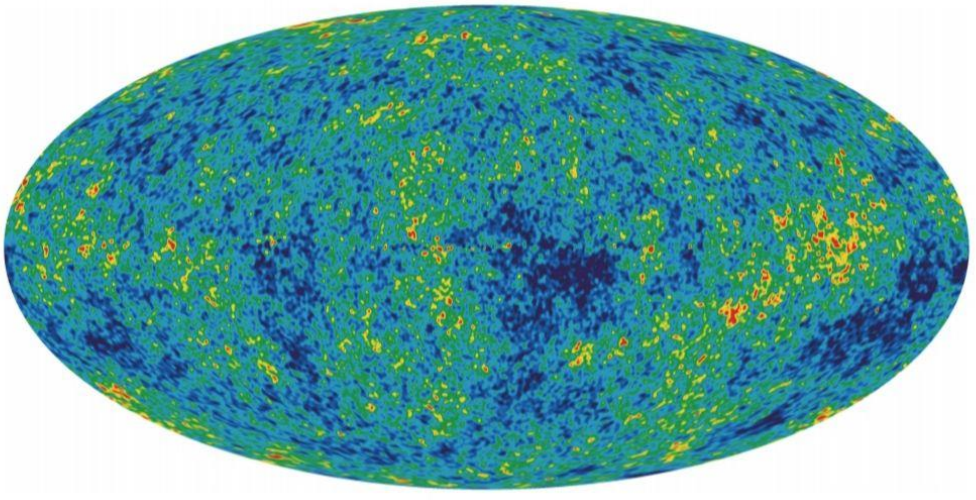
لكنك قد تسأل: هل سنتمكن يومًا من التأكد فيما إذا كان هناك ارتداد بدلاً من انفجار ؟ ألم يحدث كل ذلك في وقت مبكر جدًا ولا توجد فرصة لاستكشافه ؟ في تلك اللحظات التي كانت فيها الكثافة عالية جدًا ، تندمج البروتونات والإلكترونات في حساء بدائي لا يستطيع الضوء المرور خلاله . فقط في وقت لاحق عندما تتوسع الأشياء وتبرد تتشكل الذرات ويصبح الكون نفاذاً

للضوء . لذلك ، إذا نظرنا إلى السماء لا يمكننا رؤية أي شيء قبل الفترة التي تتشكل فيها الذرات ، لأن الضوء لا يمكنه الترحال في ذلك الحساء البدائي . أما الضوء الذي تمكن من الانفلات عندما تشكلت الذرات يمكن أن يصل إلينا ، لكنه "يبرد" مع تمدد الكون . تعني "برودة" الضوء ازديادًا في طوله الموجي . إن حقيقة أن شيئًا ما يتمدد سيبرد هو أمر معروف: إذا أخذ المرء علبة الرذاذ الجوي وترك الغاز يخرج ، فسيشعر بأن العلبة تبرد مع تمدد الغاز الى الغلاف الجوي . بحلول الوقت الذي يصل فيه إلينا ، يكون لهذا الضوء أطوال موجية كبيرة جدًا بحيث لم يعد ضوءً مرئيًا ؛ بل موجات ميكروية . إنه ما يُعرف باسم "الخلفية الكونية الميكروية" ، وهو أول ضوء يمكن أن يصل إلينا بعد الانفجار العظيم .

في الستينيات من القرن الماضي ، كان اثنان من علماء الفيزياء الفلكية في شركة بيل للهواتف يتعاملان مع "الضوضاء" في هوائي ميكروي . أدركا في النهاية أنها لم

تكن ضوضاء ، بل أن الهوائي كان يلتقط هذا الضوء من الانفجار العظيم ، والذي قل تردده بسبب تمدد الكون ، حتى أستحال ميكروًا . فاز الفيزيائيان الفلكيان من شركة بيل ، أرنو بينزياس وروبرت ويلسون ، بجائزة نوبل عام ١٩٧٨ عن اكتشافهما هذا . قيست هذه الخلفية من الإشعاع الميكروي الآن بدقة كبيرة باستخدام الأقمار الصناعية لتجنب تداخل الغلاف الجوي .

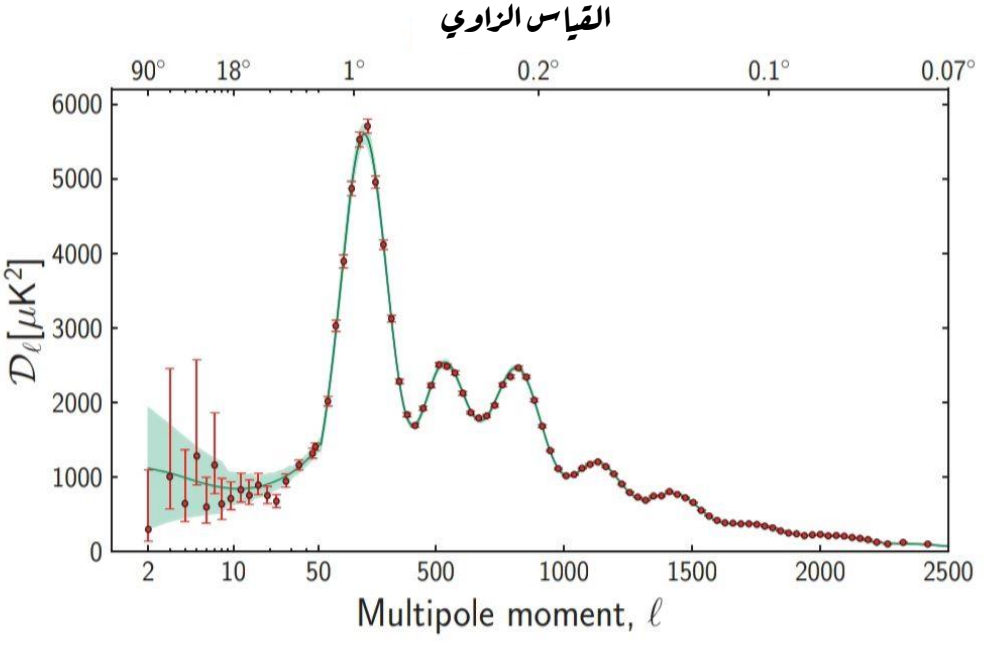
ساعدتنا الخلفية الكونية الميكروية على تأكيد "أن الكون على أعلى المقاييس هو كون متجانس ومتناظر" . إذا نظر المرء في اتجاه واحد ثم في اتجاه آخر ، فإن "درجات الحرارة" (الأطوال الموجية) للموجات الميكروية تتفق بأختلاف جزء واحد من مائة ألف . يوضح الشكل ٦,٣ "الكرة السماوية" (خريطة السماء البيضاوية) . ما فُعل هو مضاعفة التغايرات في درجات الحرارة بمقدار مائة ألف وترميزها بالألوان . تمثل الألوان المختلفة قيمًا مختلفة لدرجة الحرارة .



الشكل ٦,٣ : تمثل الألوان التغايرات في درجة الحرارة في الخلفية الكونية الميكروية في اتجاهات مختلفة من الكرة السماوية (كبّرت ١٠٠٠٠٠ مرة).

بالنظر إلى الصورة ، قد تعتقد أن "هذا يبدو عشوائيًا ، أليس كذلك ؟" لا يبدو أن هناك الكثير من البنية . لكن في الواقع ليس هذا هو الشأن . من أجل رؤية البنية ، نحتاج إلى إجراء القليل من الرياضيات ، وليس الكثير . خذ نقطة في الشكل ، ثم خذ نقطة أخرى على مسافة زاوية معينة من النقطة الأولى ، على سبيل المثال ، ٣٠ درجة . تذكر أن الأشكال البيضاوية تمثل الكرة السماوية ، لذا فإن التحرك خلالها يتم في زوايا . الآن خذ جميع النقاط على نفس المسافة

الزاوية من النقطة الأولى وقم بحساب متوسط درجة الحرارة لها جميعًا . إذا كان الرسم التخطيطي عشوائيًا حقًا وقام أحدهم برسم هذه الكمية لجميع الزوايا الممكنة ، فسيحصل دائمًا على نفس القيمة: ثابت . ولكن هذا ما لا يحصل عليه المرء . يوضح الشكل ٦,٤ النتيجة ولها بنية كبيرة . تشير هذه البنية إلى أن المجال ليس عشوائيًا ، وله ما يسمى بـ "الارتباطات" ، ولها شكل محدد .



الشكل ٦,٤ : البنية في الخلفية الكونية المايكروية

الشيء المثير للاهتمام هو أنه يمكننا التنبؤ بهذه البنية . قبل مناقشة الكيفية ،

يجب أن نتحدث حول مشكلة صغيرة في النموذج الكوني المتوسع الذي تنبأت به

نظرية أينشتاين (النموذج اللارتدادي) . إذا صوب المرء نظره إلى نقطة في الكرة

السماوية ، ثم نظر نحو نقطة أخرى في الكرة السماوية ((وهذه النقاط بعيدة جدًا

عن بعضها البعض بحيث لم يكن هناك ما يكفي الوقت في تاريخ الكون كله للضوء

(أو أي شيء آخر) للانتقال من واحدة إلى أخرى)) . لذا فإن السؤال هو: كيف

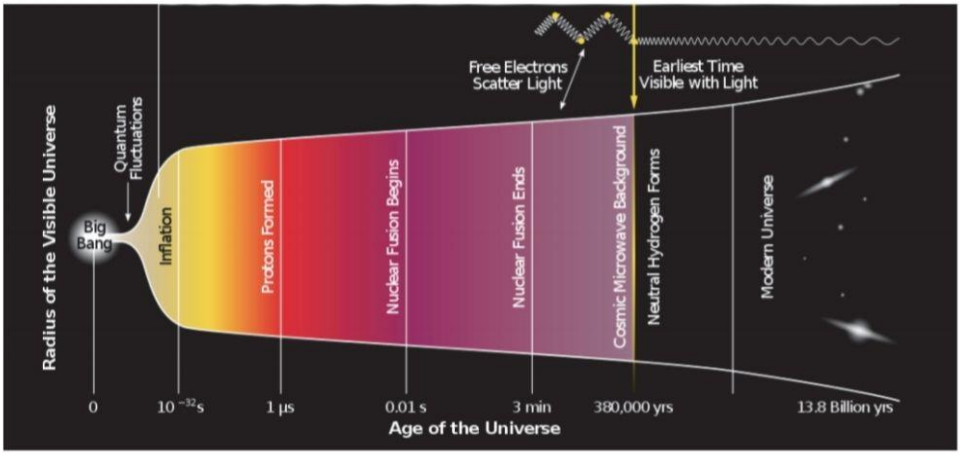
يمكن أن يكون للخلفية الكونية الميكروية لهاتين النقطتين نفس درجة الحرارة

تقريبًا إن لم تكن ثمة وسيلة لهما للتواصل مع بعضهما البعض ؟ هذا يتطلب تفسيرا

وهذا التفسير هو عملية تعرف باسم التضخم الكوني (فقط للتوضيح: لا علاقة

له بتضخم المال) . يقول التضخم أن الكون قد توسع لفترة ما في شكل متسارع ،

بحيث أن تلك النقاط المتباعدة اليوم كان لديها في الحقيقة فرصة للتواصل مع بعضها البعض في الماضي (انظر الشكل ٦,٥) .



الشكل ٦,٥ : تصور لتاريخ الكون

يقوم المرء بعملية حسابية من نفس النوع الذي قام به هوكينغ للثقوب السوداء ، واضعًا مجال كمي لكون يتضخم ويتوسع ، ويفترض المرء أنه في البداية يكون المجال الكمومي في أبسط حالاته ، المسماة "الفراغ **empty**" . هذه الحالة ليست "الخواء **vaccum**" ، حيث توجد دائمًا تقلبات كمومية في نظرية الكم . إذا طور المرء الحالة لتقول ما تقول أبان فترة التضخم ، يكتشف أن الحالة الناتجة لم

تعد هي الخواء وأن لها نوع "الارتباطات" التي يلاحظها المرء في الخلفية الكونية الميكروية. لذلك يترك المجال الكمومي بصمة تبرد بعد ذلك خلال بقية التمدد وتصل إلينا بالشكل الذي نلاحظه اليوم.

إذا رسمنا الارتباط عن طريق حساب الكمية الموصوفة أعلاه كدالة للزاوية بين نقطتين، يحصل المرء على منحنى كما هو موضح في الشكل ٦,٤. المنحنى الأخضر هو التنبؤ النظري الأكثر ملاءمة للمعاملات الحرة والنقاط الحمراء هي النقاط المقاسة في الخلفية الكونية الميكروية. تتم هذه القياسات اليوم بالأقمار الصناعية. كما ترى فإن هذا الاتفاق مدهش ويحتاج المرء أن يأخذ في الحسبان أن النموذج الذي وصفناه والذي يشرح هذا بسيط للغاية: حقل كمومي يبدأ في أبسط حالة ممكنة، ويتطور من خلال التضخم والتوسع اللاحق للكون. من الصعب التفكير في شيء أبسط وبافتراضات أقل. كما نرى في

في الصورة ، عندما ينظر المرء إلى الزوايا الكبيرة ، وهي فواصل كبيرة في النقاط المعنية ، فإن البيانات التجريبية بها أشرطة خطأ كبيرة .

ماذا تقول الجاذبية الكمومية الحلقية عن كل هذا ؟ لقد كرر الناس الحسابات المذكورة أعلاه ولكن مع النموذج الكوني الارتدادي لعلم الكونيات الكمومي الحلقي الذي تكمله فترة تضخم ، ولا سيما أججولو و اشتيكار و نيلسون ومؤلفون آخرون مثل بارو و مينا و اوليدو . الآن ، في عالم كهذا لا يوجد سبب لوضع المجال الكمومي في حالة فراغ أولية في بداية التضخم ، حيث توجد كل الديناميكيات قبله . الشيء الطبيعي هو وضعه في حالة الفراغ عندما بدأ الكون في الماضي البعيد ، قبل أن ينهار إلى الارتداد ويبدأ في التوسع مرة أخرى . ولكن بعد ذلك لم يعد المجال الكمي فراغًا في بداية التضخم .

هناك تغييرات طفيفة ودقيقة. تترك هذه التغييرات بصمة في الخلفية الكونية الميكروية عند الفواصل الزاويّة الكبيرة. هناك يختلف تنبؤ علم الكون الكمومي الحلقي عن تنبؤ ب نموذج التضخم التقليدي. لسوء الحظ، هذه هي المنطقة التي تحتوي فيها البيانات التجريبية على مجال خطأ كبير، لذلك لا يمكننا في الوقت الحالي تحديد أيهما يتوافق بشكل أفضل مع البيانات: علم الكون الكمومي الحلقي أو التضخم التقليدي. لكن ما يفتح الأمل هو أن بيانات الأقمار الصناعية في تحسن أفضل وأفضل. في المستقبل غير البعيد، سنكون في وضع يسمح لنا برؤية أي نظرية تناسب البيانات بشكل أفضل. كما في حالة انترويبا الثقب الأسود، هناك معامل حر في هذا الحساب. من الصعب إجراء عملية حسابية للكون بأكمله دون وضع افتراضات حول الظروف الأولية. في هذه الحالة تكون قيمة "**inflaton** / المجال المتضخم"، وهو المجال الذي يؤدي إلى السلوك التضخمي في بداية الكون. تعديل القيمة يمكن أن يجعل الجاذبية الكمومية

الحلقية تتفق تقريبًا مع نتائج التضخم التقليدي ، ولكنها تتطلب قيمًا أولية كبيرة بشكل مبتكر . لذا ، إذا كانت البيانات التجريبية تتفق مع التضخم التقليدي ، فيمكن تعديل علم الكونيات الكمومي الحلقي ليتفق معها أيضًا ، ولكن بطريقة غير طبيعية إلى حد ما . من ناحية أخرى ، إذا كانت النتائج التجريبية تتفق بشكل أفضل مع علم الكونيات الكمومي الحلقي ، فيمكن بناء نماذج تضخمية أكثر تعقيدًا لمطابقة الأشياء أيضًا ، ولكن مرة أخرى سيكون خيارًا أقل طبيعية . هذا هو أقرب ما يكون إلى وجود "تنبؤ" للجاذبية الكمومية الحلقية التي يمكن قياسها . مرة أخرى علينا أن نلاحظ كم هو مثير للإعجاب أنه مع مثل هذا النموذج البسيط ، يمكن أن تكون البنية المعقدة للارتباطات مناسبة تمامًا !

الفصل السابع

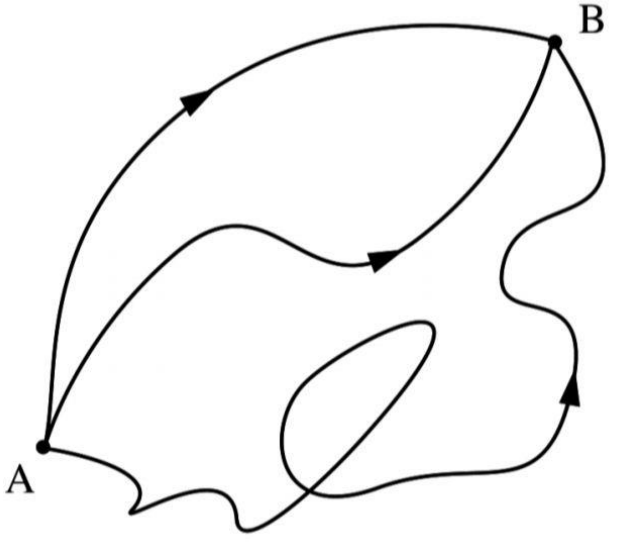
تطورات أخرى: رغاوي السبين Spin foams

لقد ناقشنا بعض الصعوبات التي تتمثل لنا عند التعامل مع نموذج ثيمان الكمومي لمعادلات آينشتاين . وقد آلَ ذلك إلى الإتيان بنهج بديل لديناميكيات النظرية ، يُعرف باسم رغاوي السبين . إن العديد من النتائج في هذا المجال تقنية للغاية ولا يمكن تغطيتها بشكل جيد في كتاب للجمهور ، سنقدم هنا فقط فكرة عامة عما تمت محاولته . يوجد كتاب تقني حول هذا الموضوع من تأليف **Rovelli** و **Vidotto** .

تستند رغاوي السبين على مقاربة بديلة لبناء النظريات الكمومية تُعرف باسم "تكامل المسار **path integral** " . والتي كان فاينمان رائدًا لها وقد وجدت قابلية تطبيقية واسعة في العديد من المعطيات الكمومية ، بما في ذلك

فيزياء الجسيمات وفيزياء المادة المكثفة. تتمثل هذه المقاربة في دراسة جميع المسارات المحتملة للنظام بين حالة أولية ونهائية مُعطاة (انظر الشكل ٧,١).

يتضمن ذلك المسارات التي لا تسمح بها المعادلات الكلاسيكية لتطور النظام.



الشكل ٧,١: في مقاربة تكامل المسار لميكانيكا الكم، كل المسارات الممكنة بين الحالة الأولية A والحالة النهائية B تأخذ بعين الاعتبار بما في ذلك تلك التي غير مسموح بها في الفيزياء الكلاسيكية. وتقدر قيم احتمالية لكل من هذه المسارات.

تُحدد الاحتمالات للمسارات باستخدام وصف محدد يتضمن دالة لمتغيرات النظام تُعرف ب " الفعل **action** " . باستخدام هذه الاحتمالات ، يمكن للمرء تعيين " القيم المتوقعة **expectation values** " للمقادير الفيزيائية، والتي تمثل تنبؤات بالقيم المحتملة للمقادير إذا ما قيست . بالتركيز على مسارات الزمكان للنظام ، فإن هذه المقاربة لا تفرق بين المكان والزمان ، وهذا شيء محبذ في سياق نظريات كالنسبية العامة ، حيث يكون المكان والزمان على قدم المساواة .

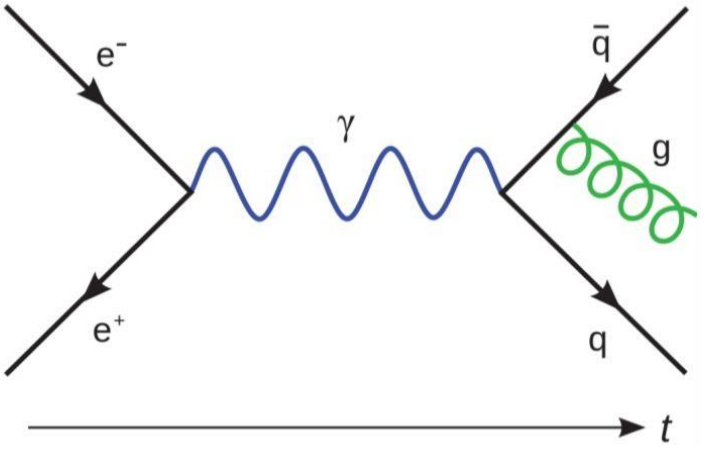
عند تطبيق هذه المقاربة للجاذبية الكمومية الحلقية ، تُعطى الحالات الأولية والنهائية ب "شبكات السبين" ، ويتراءى المسار الذي يربط بينهما ك "رغوة" ، كما لو كان المرء قد شكل شبكات السبين من الأسلاك وغمرها بالماء والصابون . قاد هذا إلى ظهور اسم "رغوة السبين" . كما آل إليه ثيمان ، فإن

الإتيان بالديناميكيات الكاملة للنسبية العامة يمثل تحدًا أيضاً في حالة رغاوي السبين . فبينما تتأتى شبكات السبين بمرور الوقت ، يمكنها تطوير آليات وروابط جديدة ، مما يعطي ثراءً جديدًا للرغوة . وهذه العمليات من شأنها أن تكشف عن ديناميكيات النظرية . هناك العديد من المقترحات حول كيفية حدوث هذه العمليات ، وتُعرف تقنيًا باسم "الذروات" . تبين أن بعض المقترحات الأصلية فشلت في استيلاد ديناميكيات النسبية العامة . وقد تفرع هذا عن مقترحات أكثر تعقيدًا ، ولكن لا يزال من غير البيّن ما إذا كانت الديناميكيات الكاملة لنظرية أينشتاين قد تأتت حقاً .

من المثير للاهتمام أن هذه المقاربة للجاذبية الكمومية أثبتت أنها مثمرة للجاذبية في الزمكان ثلاثي الأبعاد . إن جاذبية أينشتاين في أبعاد الزمكان الثلاثة هي نظرية أبسط بكثير من النسخة رباعية الأبعاد . جميع الزمكان مسطح باستثناء

عدد محدود من النقاط. هذا يجعل ديناميكيات النظرية أكثر سهولة. في الواقع ، تم تكميم النظرية بنجاح في عام ١٩٦٨ بواسطة جورجيو بونزانو و توليو ريج. ومن اللافت للنظر ، إن تقنيات رغبات السبين عندما طُبقت على الزمكان ثلاثي الأبعاد ، لوحظ أن التكميم الناتج يتطابق مع تلك الخاصة بريج و بونزانو ! تعتبر رغاوي السبين مثالاً خاصًا لفئة أكثر عمومية من النظريات المعروفة باسم "شبكات التنسور" ذات التطبيقات المهمة في فيزياء المادة المكثفة وفي نظرية الأوتار. يخمن البعض أنها يمكن أن تشكل جسرًا بين الجاذبية الكمومية الحلقية ونظرية الأوتار. وهناك وصال آخر محتمل هو ما قام به دانييل أوريتي وآخرين من بناء نظريات مجال كمومي مثل تلك التي تصف الجسيمات الأولية ، والمعروفة باسم "نظريات مجال الزمر". عند دراسة ديناميكيات هذه النظريات باستخدام تقنية تُعرف باسم مخططات فاينمان (نوع من الطريقة الرسومية لتمثيل

تفاعلات النظرية ؛ انظر الشكل ٧,٢) ، فإن المخططات الناتجة هي في الواقع رغوات سبين ! توجد سابقة لهذا النوع من التراكيب في سياق الزمكان ثنائي الأبعاد ، وهناك تُعرف باسم نماذج المصفوفة وكانت موضوع نشاط مكثف من قبل منظري الأوتار في التسعينيات .



الشكل ٧,٢ : يفني البوزيترون والالكترون بعضهما البعض فينبعث فوتونًا والذي بدوره يبعث كوارك/ مضاد الكوارك ويبعث أحد الكواركات "جلوون" (جسيم التفاعل القوي) .

إن مقاربات "تكامل المسار" مثالية لدراسة عمليات التشتت كتلك الموجودة في فيزياء الجسيمات حيث يكون لدى المرء حالات أولية ونهائية محددة جيدًا وديناميكيات معقدة بينهما . كان روفيلي ومساعدوه يقودون استخدام حسابات رغوات السبين بهذه الروح لمحاولة فهم المصير النهائي للثقوب السوداء . يبدأ المرء الحساب بالثقب الأسود وما يجده هو أن الحالة النهائية التي تؤدي إليها رغوات السبين هي "ثقب أبيض" ، وهو نوع من الثقب الأسود المعكوس بالزمن حيث تتطاير الأشياء منه بدلاً من أن تعلق فيه (يطلق عليه شعبيا "الألعاب النارية") . قد يوفر هذا حلاً لمفارقة فقدان المعلومات التي ذكرناها من قبل . الحسابات في الوقت الحالي أولية فقط ويتم العمل عليها بنشاط .

الفصل الثامن

النتائج المحتملة القابلة للرصد

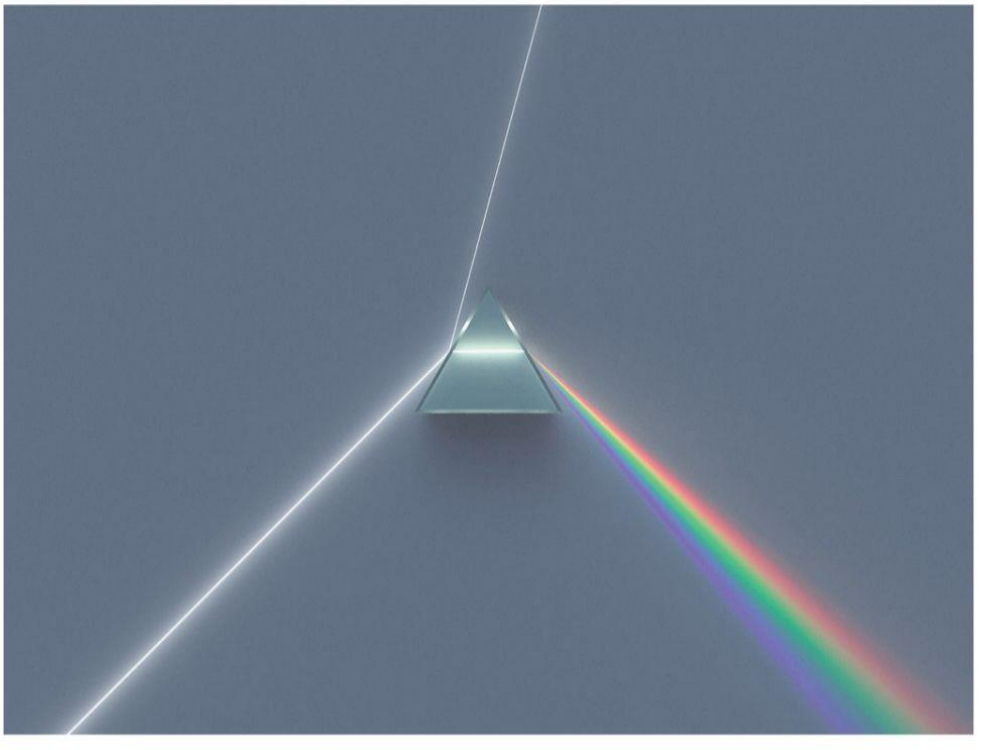
كما ذكرنا آنفًا ، لسنا على دراية بأي تجربة يمكننا إجراؤها تتطلب الجاذبية الكمومية سبيلًا لتفسيرها ، على الرغم من أننا لاحظنا في الفصل السادس أن بعض الآثار الرصدية يمكن أن تكون باقية على الخلفية الكونية الميكروية . إن الثوابت الأساسية الفاعلة في الجاذبية الكمومية هي ثابت نيوتن **G** ، وثابت بلانك لميكانيكا الكم **h** وسرعة الضوء **c** . من بين هذه الثوابت الثلاثة ، يمكن للمرء أن يستقي طولًا يسمى طول بلانك 10^{-33}سم . وهذا أصغر ب ٢٠ مرة من نصف قطر البروتون ! هو ذا المقياس حيث يتوقع المرء أن تكون الجاذبية الكمومية فاعلة مثمرة ، وبالمقارنة بهذا المقياس فإن المقاييس العيانية هائلة . إن لتلك " الحبيبية **granularity** " الكمومية للزمكان المُضمنة في تكميم

المساحات والأحجام التي ذكرناها في الجاذبية الكمومية الحلقية مثل هذا المقياس. هذا هو السبب في أن مساحات وأحجام الكائنات العيانية تبدو سلسة.

زمن وصول انفجارات أشعة جاما

عندما ينتقل الضوء عبر الوسط الحبيبي "الزمكان الكمومي"، فإن الألوان المختلفة من الضوء تنتقل بسرع مختلفة. لذلك، إذا اعتبر المرء نبضة من الضوء الأبيض، وهي تراكب لعديد من الألوان، فإن نبضة الضوء سوف تتشتت، حيث ترتحل الألوان المختلفة بسرع مختلفة. يُعرف هذا بالتشتت (انظر الشكل ٨,١). لذلك من حيث المبدأ، فإن الضوء المرتحل عبر الزمكان الكمومي يمكن أن يخضع لظاهرة كهذه. يُقدّر التأثير بطول بلانك مقسومًا على الطول الموجي للضوء. بالنسبة للضوء المرئي، فإن الطول الموجي هو 10^{-5} سم. ومقارنة

بطول بلانك ، يعد هذا كبيرًا ، لذا فإن التأثير ضئيل للغاية . وعلى أي حال ، فإن التأثير تراكمي ، فكلما طال أمد انتقال الضوء ، زاد حجم التأثير التشتتي .



الشكل ٨,١ :يتشتت الضوء الأبيض عند مروره في موشور.

في الستينيات ، بدأت الأقمار الصناعية التي أنشأتها الولايات المتحدة لمراقبة معاهدة حظر التجارب النووية في التقاط ومضاتٍ من أشعة جاما . سرعان ما تم استبعاد أنها نشأت من التجارب النووية . أظهرت المزيد من التحليلات أنها في

الواقع لم تكن من كوكبنا في الأصل ، بل جاءت من الفضاء الخارجي . في النهاية تبين أن أصلها كان خارج نطاق المجرة برمتها ، سُميتْ "انفجارات أشعة جاما" .

أخيرًا ، في عام ٢٠١٧ ، التقطت تجربة ليجو **LIGO** موجات الجاذبية المرتبطة بواحدة من هذه الانفجارات ، وحددت منشأها عن اصطدام نجمين نيوترونيين . ليست كل انفجارات أشعة جاما تنشأ عن تصادم النجوم النيوترونية ، ولكن توجد نماذج أخرى لأصلها .

العلة من طرحنا انفجارات أشعة جاما في هذا السياق هي ذات شقين . فمن ناحية ، تحدث هذه الانفجارات بعيدًا جدًا . ومن ناحية أخرى ، فإن الطول الموجي لأشعة جاما أقصر بكثير من الطول الموجي للضوء المرئي ، حوالي 10^{-9} سم . يساعد هذان العاملان على زيادة احتمالية اكتشاف تأثيرات "حبيبية الزمكان" . وضعت نماذج مفصلة إلى حد ما لانتشار أشعة جاما في

نظرية الأوتار ، بواسطة جيوفاني أميلينو كاميليا ورفاقهم ، وفي الجاذبية الكمومية الحلقية من قبل مؤلفي هذا الكتاب وغيرهم .

في الجاذبية الكمومية الحلقية ، لوحظ أنه لكي يكون التأثير في النطاق الذي كان من الممكن رصده باستخدام أقمار أشعة جاما ، كان على المرء أن يفترض نوعًا مصطنعًا من الحالة الكمومية التي تكون غير متناظرة يسار / يمين .

يمثل مرصد كومبتون لأشعة جاما قمر صناعي يمكن لإحدى التجارب المُزمعة على متنه قياس أشعة جاما ذات الترددات المختلفة . إذا كان زمن وصول رشقات الضوء الناتجة عن تلكم الانفجارات بترددات مختلفة مختلفاً ، فيمكن اعتبار ذلك دليلاً على التشتت . لسوء الحظ ، حتى الآن لم يُلاحظ أي اختلافات . والأسوأ من ذلك ، أن التناظر غير الطبيعي للحالة الكمومية المطلوبة في الجاذبية الكمومية الحلقية ليكون لها تأثير يمكن ملاحظته سيكون له

أيضًا آثار على وصول الموجات الراديوية من الكون. تُدرس هذه الموجات بدقة كبيرة ويُستبعد تأثير الجاذبية الكمومية الحلقية مع الحالة الكمومية غير الطبيعية. يستنتج أن هذا يستبعد النظرية، ولكن هذا ليس صحيحًا، فهو يستبعد الحالة الكمومية التي تم أخذها في الاعتبار. كما ذكرنا، بالنسبة للحالات الكمومية المعقولة، تكون التأثيرات صغيرة جدًا، لكن يمكن أن يكون هناك فرصة للمراقبة في التجارب المستقبلية.

قياس الأزمنة والمسافات

في عام ١٩٥٨، طرح الحائز على جائزة نوبل يوجين فيجنر مع هـ. سالكر السؤال التالي: ما هي أكثر دقة للساعة يمكن للمرء الإتيان بها؟ لمعالجة هذا الأمر، اعتبرا ساعة مثالية للغاية تتكون من مرآتين يرتد الضوء بينهما ذهابًا وإيابًا. في

كل مرة يصطدم فيها الضوء بمرآة يكون ذلك بمثابة "دقة" الساعة. لجعل الأمر سلسًا ، افترضوا أن الساعة كانت معزولة عن بقية العالم.

ولكن حتى مثل هذه الساعة سيكون بها عيوب. في نظرية الكم ، تنتشر الأشياء دون تعرضها لأي تفاعل ، وتصبح مشوشة. هذا يعني المرايا أيضاً. المرايا اليومية العادية لا تنتشر لأنها ليست معزولة: فهي تقصف باستمرار بواسطة جزيئات الهواء. مع انتشار المرايا التي اعتبروها منتشرة ، تصبح "دقات" الساعة أقل دقة. لقد حددوا عدم دقة الساعة ويتناسب عكسيا مع كتلتها. لذا ، إذا رغب المرء في الحصول على ساعة أكثر دقة ، يحتاج المرء إلى جعلها أكثر ضخامة.

ولكن بعد ذلك جاء الفيزيائيان في كارولينا الشمالية جاك نج وهانك فان دام وجادلوا بأنه لا يمكن للمرء أن يصنع ساعات ضخمة كما يرغب ، لأنها ستتحول

إلى ثقب أسود . هذا يخلق بقعة نقية من حيث المدى لدقة الساعة التي يمكن ان تكون . ونظرًا لأن التأثير ناتج عن نظرية الكم والجاذبية ، فإن للمرء مرة أخرى ثلاث ثوابت أساسية ذكرناها في القسم السابق . منها ، بالإضافة إلى تشكيل الطول ، يمكن للمرء أن يشكل زمنًا يسمى زمن بلانك ، وهو 10^{-44} ثانية . وهذا زمن قصير بشكل لا يصدق . للإشارة ، فإن لأفضل الساعات الذرية لا يقين في الدقة تتراوح من 10^{-18} ثانية .

ما لاحظه إنج وفان دام هو أن عدم الدقة الذي وجدوه كان متناسبًا بالفعل مع زمن بلانك ، لكن عامل التناسب كان كبيرًا إلى حد ما ، حوالي 10^{15} . هذا لا يكفي لوضعها في نطاق الساعات الذرية . لكن قياس الأوقات يعادل قياس المسافات . إذا ترجم المرء عدم اللايقين في الزمن إلى لايقين في المسافة ومن ثم تضرب ببساطة في سرعة الضوء ، يحصل المرء على قيمة تقع في نطاق تلك التي

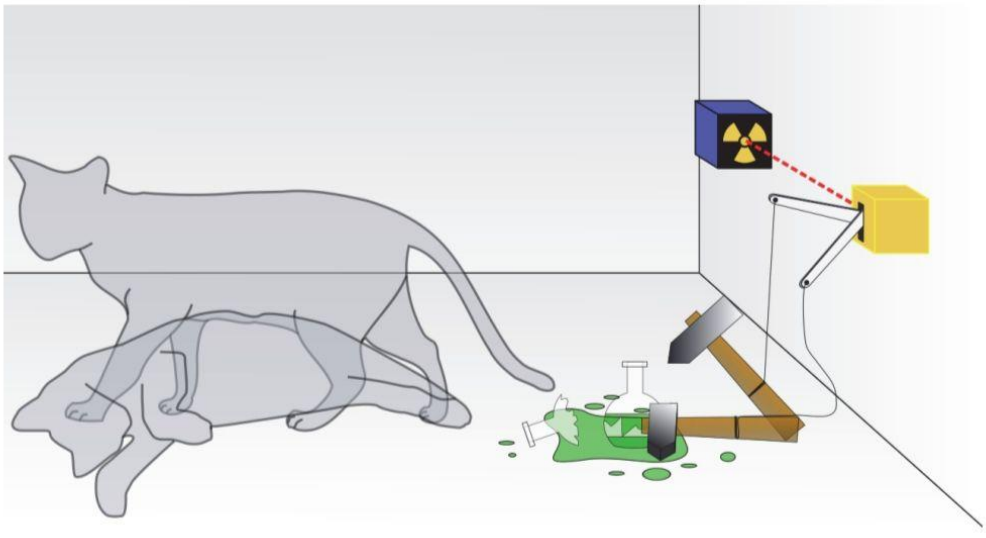
يقيسها مقاييس التداخل مثل ليجو في سعيها لاكتشاف موجات الجاذبية. لكن القصة أكثر تعقيدًا. يتضمن ليجو قوى عالية من الضوء، مما يعني العديد من الفوتونات. يتم حساب متوسط تأثير عدم الدقة على كل منهم ويختفي. لذلك لا يمكن للمرء استخدام LIGO لمعرفة عدم الدقة، وحقيقة أن المرء مع ذلك موجود في الملعب ربما يقترح تجارب أخرى لاختبار هذه القيود الأساسية في قياس الأوقات والمسافات.

نظرية بيل للترتيب الزمني

نظرية بيل هي نتيجة في ميكانيكا الكم التي تختبر أحد الجوانب "الغريبة" للنظرية: التشابك. في ميكانيكا الكم، يمكن للمرء أن يكون لديه حالات أنظمة مكونة من أنظمة فرعية يكون فيها الكل أكثر من مجموع الأجزاء. وعلاوة على ذلك: لا يمكن تحديد بعض خصائص الأجزاء دون معرفة خصائص الكل.

تتضمن نظرية بيل سلسلة من المتباينات التي تشابك الأنظمة الكمومية وأنظمة غير متشابكة كما لا تفعل الأنظمة التقليدية. للتحقق من رضاهم، يمكن تحديد أن التشابك قد حدث.

يرتبط التشابك ارتباطًا وثيقًا بالطبيعة الاحتمالية لميكانيكا الكم التي ذكرناها في الفصل ٣، ولا تتنبأ النظرية بإجابة نهائية. يمكن للمرء أن يكون لديه حالات من الأنظمة التي يظهر فيها "تراكب" من حالتين تقليديتين محتملتين. إنه أصل التجربة الفكرية الشهيرة لشرودينجر حيث ينتهي الأمر بالقطة في حالة كمومية تكون فيها ميتة وحيوية (انظر الشكل ٨,٢).



الشكل ٨,٢ : قطة شرودنجر

من الناحية العملية ، لا يحدث هذا مع القطط لأنه ، مثل المرايا التي ناقشناها في تجارب سالكر و فاجنر ، تتفاعل القطط وتتشابك مع البيئة (جزيئات الهواء ، وما إلى ذلك) .

اقترح زايج وكوستا وبيكويسكي وبروكنر أنه في الجاذبية الكمومية ، يمكن للمرء أن يمتلك كتلة في حالة كمومية حيث موقعها غير محدد جيدًا . هذا يمكن أن يؤدي إلى التشابك . عنصر أساسي في النسبية العامة هو مفهوم السببية: بعض

العمليات في زمكان معين يمكن أن تكون سببًا لأخرى بينما لا يمكن لأخرى.

والسبب هو أن لا شيء يمكنه السفر أسرع من الضوء. لذا، إذا كانت لدي عملية تحدث عند الظهر عند نقطة معينة، فلا يمكنها التأثير على إحداها ظهرًا زائد ثانية واحدة إذا كانت العملية الثانية أبعد من ٣٠٠٠٠٠ كيلومتر. إنه بعيد جدًا بحيث لا يمكن الوصول إليه حتى بالضوء في الوقت المخصص. يصبح هذا غير واضح عندما تأخذ التأثيرات الكمومية في الاعتبار. لذلك، بالنظر إلى العمليتين **A** و **B**، تعطينا النظرية كنتيجة نهائية بعض الاحتمالات "يمكن أن تؤثر **A** على **B**" و "لا يمكن أن تؤثر **A** على **B**"! يمكن اختبار هذه الخاصية للحالة الكمومية النهائية من خلال معرفة ما إذا كانت تستوفي متباينة بيل.

ويمكن أن تقدم التجارب الصغروية التي توضع فيها الكتل الصغيرة في حالات كمومية حيث يكون لموضع الكتلة احتمال التواجد في أماكن مختلفة، أمثلة على

الزمكان الكمومي الغامض . اقترح المؤلفون المذكورون طريقة لتحويل هذا إلى تجربة حول تكميم الزمكان ، لكنهم أقروا أنه مع التكنولوجيا الحالية ستكون تجربة صعبة للغاية . تم إنشاء هذه التجربة وغيرها من التجارب الصغروية لاستكشاف حدود جديدة تعرض فيها الجاذبية وميكانيكا الكم بعضاً من خصائصها دون الحاجة إلى اللجوء إلى الحبيبية الدقيقة التي ينطوي عليها طول بلانك .

كما ذكرنا في تجربة الشق المزدوج في الفصل ٣ ، تتصرف الجسيمات في ميكانيكا الكم كجسيمات وموجات . يتناسب الطول الموجي لسلوكهم المتموج عكسياً مع طاقتهم . لذا فإن التقدير يشير إلى أن فحص طول بلانك يتطلب جسيمات ذات طاقة كبيرة جدًا . تُعرف هذه الطاقة باسم طاقة بلانك ، وهي أعلى بكثير من تلك التي يمكن الحصول عليها بواسطة

مسرعات الجسيمات الكبيرة اليوم مثل مصادم هادرون الكبير في مركز الأبحاث النووية الأوروبي (**CERN** ، للأحرف الأولى من اسمها باللغة الفرنسية) وبالمقارنة ، تعتبر التجارب الصغروية "منخفضة الطاقة" . سيخبرنا الزمن ما إذا كانت هذه الأنواع من التجارب يمكن أن تكشف بعض ألغاز الزمكان الغامض للجاذبية الكمومية .

الفصل التاسع

استنتاجات

لقد راجعنا كيف أن تطبيق التقنيات الجديدة ، بناءً على خطوط المجال التي نشأت مع فاراداي منذ زمن طويل وتطبيقها على الجاذبية التي أعيد كتابتها من قبل أبهاي أشتيكار ، قد سمح ببناء نظرية كمومية للجاذبية . ما زلنا لا نمتلك علم كامل بها ، ولكن هذا النهج قد تم تطبيقه على موقفين مهمين وحقق نتائج جذابة . هناك الكثير مما ينبغي عمله . لكننا نأمل أن يدرك القارئ أن هذا المزيج من خطوط فاراداي ، وشبكات السبين لبنروز ، ومفهوم الثبات في ظل الدفيومورفزم أدى إلى رؤى جديدة حول مشكلة الجاذبية الكمومية .

تجدر بنا الاشارة إلى أن الجاذبية الكمومية الحلقية، التي يزيد عمرها عن ٣٠ عامًا ، تعد مجالًا كبيرًا وهنا قمنا بتغطية جزء صغير فقط من النتائج ، والتي نعتبرها الأكثر أهمية بعامة الناس .

كما ذكرنا في المقدمة ، فأنه ثمة هناك جدل . إذا ذهب المرء إلى الإنترنت ، فيمكنه العثور على مدونات وصفحات أخرى شديدة النقد للجاذبية الكمومية الحلقية . لا نوصي باتباع تلك المصادر . حيث كثير منها ليست على اطلاع جيد وتقفز إلى الاستنتاجات القائمة على تجهيزات . بالنسبة لأولئك الذين يرغبون في التعمق أكثر في الجدل ، هناك مقالتان ، أحدهما بقلم هيرمان نيكولاي ، تناقش بعض الانتقادات ورد ثيمان . للأسف ، تلك المقالات تقنية .

إذا كان علينا أن نلخص بإيجاز ، يمكن تلخيص النقدين الرئيسين في نقطتين . تتعلق الأول "بالمسافة" التي قدمها أشتيكار وليفاندوفسكي . إنها تختلف

بشكل كبير عن تلك المستخدمة في نظريات الكم الأخرى. وبالتالي فإن النقد هو أنها "ثورية للغاية". يرد المخالفون بالقول إن المسافات التقليدية قد تمت تجربتها في الماضي وفشلت. كان لابد من تغيير شيء ما وهذا ما تغيره هذه المقاربة. يسأل آخرون "هل جَربتَ مسافات كهذه في نظريات أخرى". الجواب هو نعم، وقد ثبت أنه يمكن للمرء أن يجعل الأشياء تعمل، لكن الأشياء ليست جذابة بالضرورة.

صيغت المسافة بوضوح مع مراعاة الثبات في ظل الدفيومورفزم والنظريات الأخرى ليس لديها هذا الثبات. يبدو الأمر كما لو أن المرء يحاول إدارة رالي داكار باستخدام سيارة فيراري. لن تعمل بشكل جيد لأنها صُممت للقيام بأشياء أخرى، لكن يمكن للقارئ أن يدرك أن هذا النقد هو اختلاف سليم في

الرأي. كما ذكرنا ، فإن المسافة المستخدمة تكون فريدة إذا افترض المرء الثبات في ظل الدفيومورفزم ، لكن هذا لا يعني أنه صحيح .

النقد الثاني يتعلق بظهور البنى المنفصلة . قد تتعارض هذه البنى مع التجارب عالية الدقة مثل تلك التي أجريت في فيزياء الجسيمات . يوجد في الفيزياء تناظر يُعرف ب"ثبات لورنتز" يربط بين كيفية تحرك مراقبين فيما يتعلق بإدراك بعضهما البعض للفيزياء . هذا الثبات موجود في الكهرومغناطيسية ونظريات التفاعلات القوية والضعيفة ، وهو موجود أيضاً في النسبية العامة ولكن على "المستوى المحلي" (أي في موضع صغير) . تم اختباره على درجة عالية من الدقة .

تمتلك البنى المنفصلة القدرة على كسر التناظر ، الذي تكون طبيعته الجوهرية مستمرة (يرتبط هذا بحقيقة أن السرعة النسبية لمراقبين هي متغير مستمر) .

لقد حاول الناس بناء حجج توضح أن البنى المنفصلة تتعارض مع هذا الثابت ،

ولكن حتى الآن دائمًا أدرك كيفية التوفيق بين الأشياء . لكن هذا لا يعني أنه لا يمكن العثور على مشاكل حقيقية في المستقبل . من وجهة نظرنا ، هذه واحدة من أكثر القضايا التي تهم منظري الأوتار حول الجاذبية الكمومية الحلقية .

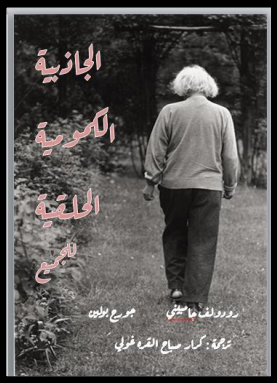
أخيرًا ، لدى بعض الناس مخاوف من أن نظرية ثيمان لا تتماشى وديناميكيات النسبية العامة بشكل جيد . كما ذكرنا ، النظرية ليست بسيطة تمامًا ، لكنها ربما ليست معقدة بما يكفي لتستوفي كل محتوى نظرية أينشتاين . هناك بعض التلميحات إلى أن هذا قد يكون صحيحًا ولكن لا يوجد دليل قاطع على ذلك حتى الآن . وحتى يحدث ذلك ، نحتاج إلى مواصلة العمل مع النظرية للحصول على نتائج مادية منها ومعرفة ما إذا كان هناك تناقض .

في النهاية ما سيأسس للنظرية أو يكسرها هو العثور على تنبؤات تجريبية يمكن اختبارها . هذا ما تدور حوله الفيزياء . لقد ناقشنا بعض الاحتمالات ولكننا

لم نصل إليها بعد ، فقد ذكر أحدهم ذات مرة للحائز على جائزة نوبل الباكستاني عبد السلام "لا توجد تنبؤات تجريبية للجاذبية الكمومية" . كان رده شيء على غرار "كيف تعرف أن النظرية لا تحتوي على تنبؤات تجريبية عندما لا يكون لديك نظرية" .

لا يعني ذلك أنه لا توجد إمكانية لإجراء تغييرات مهمة في فهمنا للطبيعة . فقط لذكر نقطة واحدة ، نحن نعلم أن ٩٦٪ من المادة في الكون ليست مادة عادية ، بل هي نوعان غريبان من المادة يتفاعلان تقريبًا عن طريق الجاذبية ، يعرفان بالمادة المظلمة والطاقة المظلمة . لذا فنحن نقول إننا لا نفهم ٩٦٪ من الكون ، ولا نعرف ما إذا كانت الجاذبية الكمومية لها علاقة بهذا أم لا ، لكنها قد تكون لها علاقة بذلك . ربما عندما نكشف عن المزيد من ميزات الجاذبية الكمومية الحلقية ، سيكون لديها ما تقوله حول هذا الموضوع . فقط المزيد من العمل سيخبرنا .

النهاية



تمثل الجاذبية الكمومية الحلقية أحدى البوادر الرئيسة لتوحيد قطبي فيزياء القرن العشرين (النسبية العامة / ميكانيكا الكم) بغية التأسيس لأطار فيزيائي شمولي واستجلاء الحلول لثلة من المشكلات المركزية في صقع الفيزياء المعاصرة. بخلاف نظرية الأوتار ترى الجاذبية الكمومية الحلقية أن لا سبيل لنا إلا بتقنيات جديدة بغية تكميم الزمكان الأينشتايني الذي يتصف دون غيره بذلك التناظر الذي سيشكل محوراً لهذ الكتاب. يأسس هذا الكتاب لمنظور تتراءى فيه الجاذبية الكمومية الحلقية على أنها مما يعول عليه في إكمال ما شرع فيه آينشتاين في سنيه الأخيرة من ابتغاء منظور لا يقل في عموميته وامتداده عن المنظورات الفلسفية واللاهوتية.