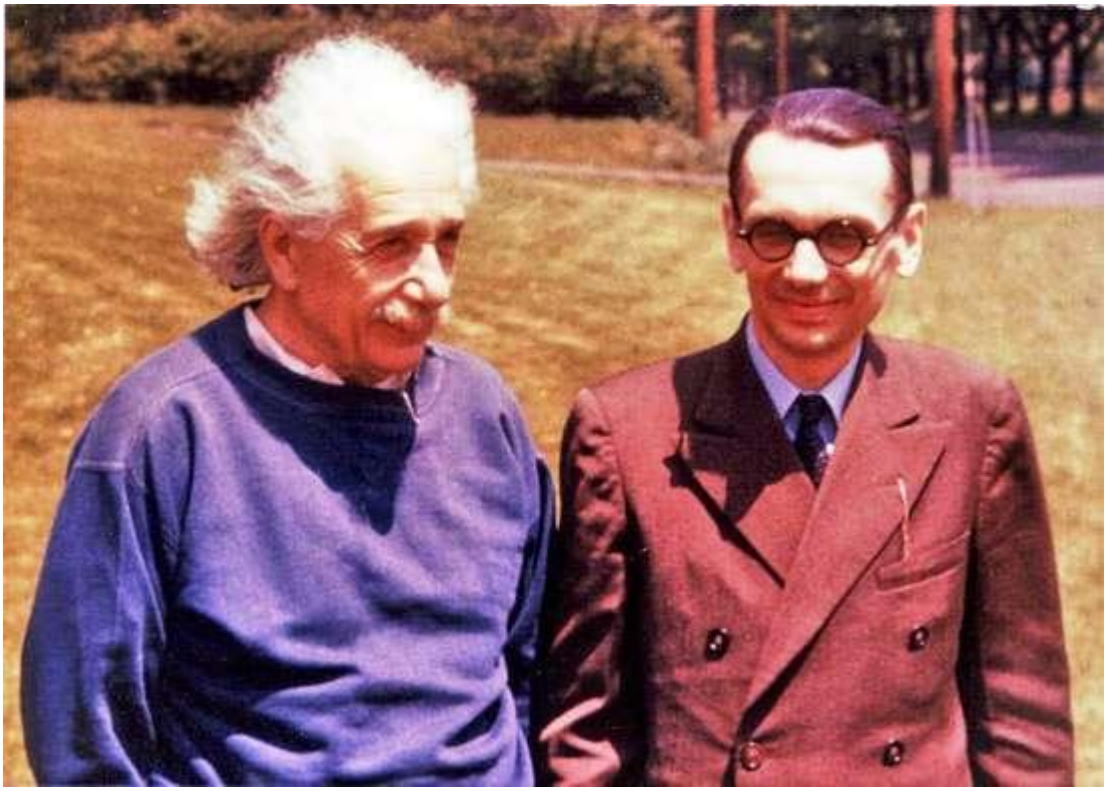
نظرية الكون التعاقبي 7

إعداد وترجمة د. جواد بشارة

كون غوديل L'univers de Gödel



كيرت غوديل وألبرت أينشتاين في جامعة برينستون، م، أرشيف معهد الدراسة المتقدمة

التعميم في إطار RG للحل النيوتوني الذي يصف مجال الجاذبية للنجم يصف فقط مع شوارزشيلد جسمًا خاليًا من الدوران. هذا ليس واقعيًا جدًا من وجهة نظر فلكية لأن النجوم، تمامًا مثل الكواكب، يتم تحريكها بواسطة حركة دوارة.

أحد الحلول الأولى التي تصف المجال الذي يولده جسم دوار هو حقل فان ستوكوم (Stockum، WJ van (1937) *The gravitational field of a distribution of particles rotating around an axis of symmetry*. Proc. Roy. Soc. Edinburgh A 57: 135. مجال الجاذبية لتوزيع الجسيمات التي تدور حول محور التناظر. (Proc. Roy. Soc. Edinburgh ج 57 ، 135). وهي قصة لمؤلفها تستحق ان تكون رواية في حد ذاتها.

إنه أيضًا المثال الأول الذي نرى من خلاله ارتباطًا بين السفر عبر الزمن ووجود دوران مرتبط بالزمكان. من المحتمل أن يكون هذا الاكتشاف مستوحى من العديد من المناقشات مع ألبرت أينشتاين (الذي كان زميلًا له وصديقًا في جامعة برينستون) حول المكان والزمان وعلاقتهما بالفيزياء والفلسفة، فاجأ عالم الرياضيات العظيم كورت غودل اوسط العلمي في عام 1949 من خلال إظهار حل لمعادلات

أينشتاين التي تصف الكون الدوار. والغريب في الأمر أن هناك مسارات داخله تسمح للمسافر بالعودة إلى ماضيه!

كيف يكون ذلك ممكنا؟ في هذا الحل يوجد محور دوران متميز في الكون، مع إيقاع ابتعادنا واقترابنا عن هذا المحور، يتغير الهيكل السببي للزمكان. هناك دائمًا حد للسرعة، ولكن إذا أدخلنا مجالًا من مخاريط الضوء un champ de cônes de lumière ، فإننا نرى أنها تميل أكثر فأكثر كلما ابتعدنا عن المحور، لذلك بحيث يتزامن اتجاه المستقبل بالنسبة للمراقب داخل مخروط الضوء الخاص به مع مسار يعود إلى الماضي! هذا الميل للمخاريط الضوئية هو بالضبط سمة مميزة للمرور من النسبية الخاصة إلى النسبية العامة، كما رأينا أن المقياس ديناميكي. إنها ظاهرة ذات أهمية كبرى، سنراها لاحقًا للثقوب السوداء أو علم الكونيات.

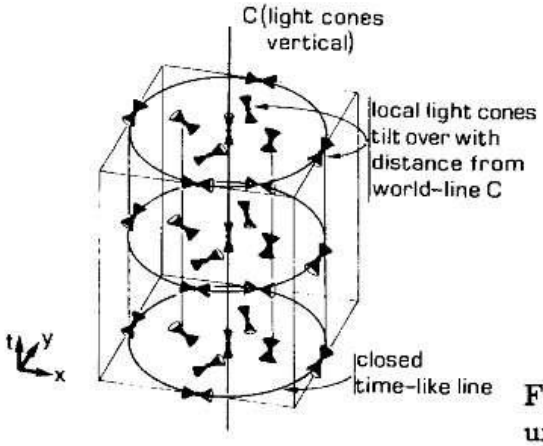
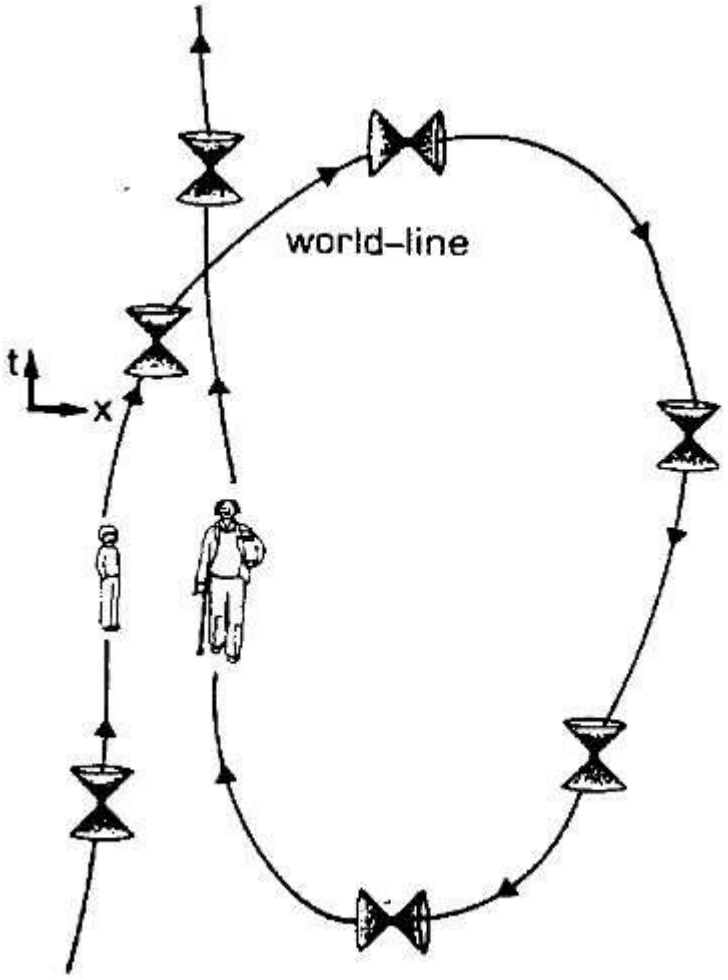


Fig. II.15 The light-cones in Gödel's stationary universe

مقتطف من تقرير Cern الأصفر 91-06. © روث م. ويليامز

وبهذه الطريقة، يوجد في حل Gödel مجموعة مما يسمى بالمسارات الزمنية المغلقة de trajectoires dites de genre temps closes والتي يسافر بها مراقب باستخدام صاروخ، من شأنها أن تسمح له بالعودة في الوقت المناسب. في حل Gödel هذا، من المهم ملاحظة أنه لا يُسمح إلا بالرحلات إلى الماضي، بصرف النظر بالطبع عن الرحلات المعتادة إلى المستقبل مثل توأمي لانجفان Langevin.



يسمح إمالة المخاريط الضوئية في كون غوديل بتشكيل حلقات زمنية على طول خطوط معينة للكون (خط عالمي*world-line*) للمسافر. مقتطف من تقرير Cern الأصفر 91-06 © .Ruth M Williams

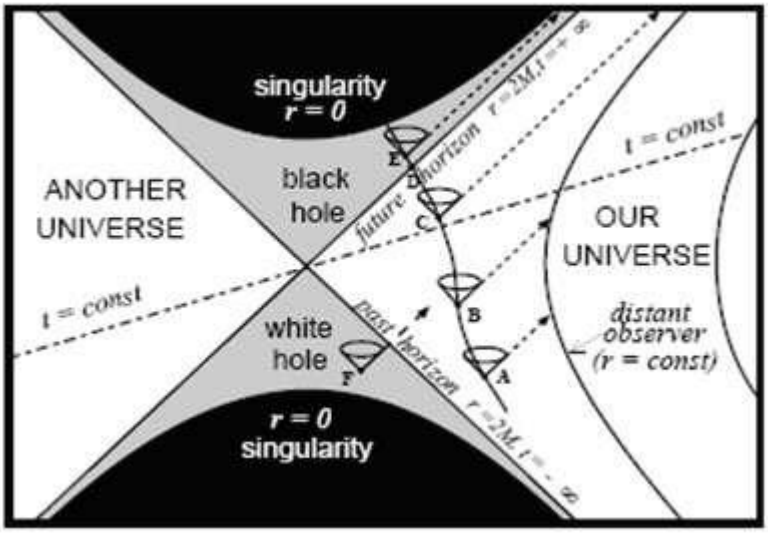
هذه ملاحظة مثيرة للاهتمام، حيث يصف هذا الحل الكوني كونًا بدون تفرد أو فرادة بدئية أساسية sans singularité initiale. إن وجود حلقات شبيهة بالزمن سببية مغلقة يرتبط ارتباطًا وثيقًا بغياب التفردات أو الفرادات بشكل عام في حلول معادلات أينشتاين. بقدر ما يحذر القارئ على الفور، فإن البيانات الناتجة عن ملاحظة خلفية الإشعاع الكوني لا تشير إلى أي علامة على الدوران العالمي للكون.

حل كير La solution de Kerr

كجزء من فهم أفضل للحلول التي تصف الأجسام الفيزيائية الفلكية الواقعية، تميزت بداية الستينيات بثورة نظرية مزدوجة. إدخال كروسكال Kruskal لنظام إحداثيات يسمح بالوصف الكامل وبشكل أكثر دقة للبنية الهندسية والطوبولوجية لحل شفارزشيلد Schwarzschild واكتشاف حل كير Kerr.

مخطط :Diagramme de Kruskal

باستخدام نظام الإحداثيات الذي قدمه إيدنغتون Eddington وأعاد اكتشافه بواسطة فينكلشتاين Finkelstein ، تمكن مارتن كروسكال Martin Kruskal من حل المشكلات المتعلقة بوصف بنية الزمكان عندما يغامر المرء تحت السطح الذي يحده نصف قطر شفارزشيلد Schwarzschild . مرة أخرى، كان النظر في مسارات أشعة الضوء هو المفتاح للتغلب على الصعوبة. يمكننا الآن تمثيل الهندسة السابقة والمستقبلية للزمكان لهذا الحل من خلال المخططات أدناه.



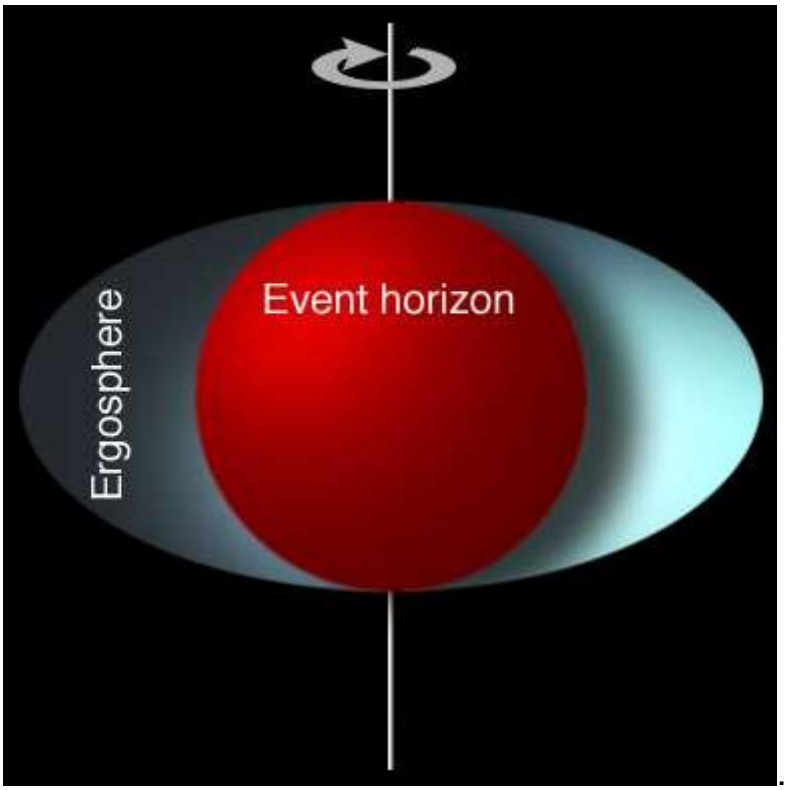
Diagrammes de la géométrie passée et future. Voir ci-dessous pour plus de détail. Extrait de Jean-Pierre Luminet - *Black Holes : A General Introduction*. © Jean-Pierre Luminet

مخططات الهندسة في الماضي والمستقبل. انظر أدناه لمزيد من التفاصيل. مقتطف من جان بيير لومينيت - الثقوب السوداء: مقدمة عامة. © جان بيير لومينيت

يحدد المخروطان المستقبل والماضي لأفق حدث الثقب الأسود، والخطوط المستقيمة ذات الشرطات والنقاط تحدد أقسام زمنية ثابتة من الزمكان، وتتوافق المنحنيات الرأسية التي تشبه القطع المكافئ مع كرات نصف قطر ثابت في الزمن المحيط بالثقب الأسود. نظرًا لأن معادلات أينشتاين متماثلة في الزمن المناسب، فإن المخروط العلوي يتوافق مع ثقب أسود لا يمكن أن يصلح فيه كل شيء إلا دون أن يغادر أبدًا؛ في حين أن المخروط السفلي يتوافق، من خلال عكس الزمن، مع حل يعرف بالثقب الأبيض أو حتى النافورة البيضاء. هنا يخرج كل شيء دون أن يتمكن من الدخول. ترتبط المنطقة الموجودة على اليسار ارتباطًا مباشرًا بصفيحة أخرى من الكون في جسر أينشتاين-روزن-pont d'Einstein Rosen أو حالة نوع ثقب ميسنر الدودي trou de ver de Misner. المناطق باللون الأسود هي تلك "المنتشرة" بواسطة نظام الإحداثيات حيث توجد الفرادة النهائية la singularité finale، حيث يتم إبادة الزمكان هناك!

سيثبت نظام الإحداثيات الجديد أنه لا يقدر بثمن لدراسة الحل الذي يصف نجمًا دوارًا وجده عالم الرياضيات النيوزيلندي روي كيرRoy Kerr. كانت دراسته المكثفة من عمل براندون كارترBrandon Carter وسوبرهماني شاندراسيخارSubrahmanian Chandrasekhar .
يصف هذا الحل فقط بالضبط ما سيُطلق عليه لاحقًا ثقبًا أسودًا ولم ينجح أحد في إثبات أن هذا هو الحل الدقيق الذي يصف الهندسة الخارجية لنجم دوار واحد. يمكن كتابة المقياس الذي يصف ثقبًا أسودًا دوارًا وجده كير على النحو التالي (إحداثيات بواير -لاندكويست Boyer-Lindquist ، عن طريق الإعداد ، G = c = 1): أو اعتمادًا على القيم الخاصة بكل من M و a ، يمكننا الحصول على حلقات تشبه زمن ينتهك متطلبات السببية في إطار هندسة الزمكان هذه. لن نتفاجأ من ارتباط a ارتباطًا مباشرًا بالزخم الزاوي J للثقب الأسود الدوار.

يحتوي ثقب كير الأسود trou noir de Kerr، بالإضافة إلى أفق الحدث، على غلاف جوي إيرغوسفير ergoshère إهليلجي. أي جسم يسقط شعاعيًا يعبر هذه المنطقة، والمعروف باسم سحب الإطار *frame dragging* وبالفرنسية *entraînement des référentiels*، سيتم جره بشكل لا يقاوم من خلال دوران الزمكان الناجم عن الثقب الأسود. لذلك سيكون لها مكون سرعة عرضية tangentielle de vitesse وسنجد أنفسنا في موقف مرتبط (ولكن ليس مطابقًا) لحالة كون غوديل.



رسم بياني يوضح الفرق بين أفق الحدث (كروي) والغلاف الجوي (الإهليلجي) لثقب كير الأسود.

بالاقتران مع الاكتشاف الأخير للكوازارات (التي كان تفسيرها في ذلك الوقت كنجوم فائقة الكتلة موصوفة بالضرورة بالنسبية العامة) ، مع الاكتشاف في عام 1965 للإشعاع الأحفوري الذي تنبأت به

النماذج الكونية من نوع الانفجار العظيم وأخيراً النجوم النابضة في عام 1967 (تأكيدًا لوجود النجوم النيوترونية) ، ستؤدي هذه الأدوات النظرية الجديدة إلى تسارع مفاجئ في تطوير الفيزياء الفلكية النسبية وإحياء البحث في النسبية العامة ، التي غابت إلى حد كبير عن ثلاثينيات القرن الماضي بنجاحات فيزياء الكموم.

نظرية الكون التعاقبي 8

إعداد وترجمة د. جواد بشارة

التفردات أو الفرادات والنسبية العامة: les singularité et la relativité générale

إن وجود التفرد أو الفرادة في قلب حل شوارزشيلد، كما رأينا، لا يجعل من الممكن عبور جسر أينشتاين روزين المرتبط به دون أن يتم سحقه تمامًا. ثم يأتي السؤال بشكل طبيعي، والحل هو نفس التناظر الكروي الخاص للغاية، ومعامل واحد فقط (الكتلة)، ألا يمكننا أن نأمل في إيجاد حل أكثر عمومية يصف الزمكان بدون تفرد أو فرادة وبمرور قابل للعبور؟

يطرح هذا السؤال في الواقع مشكلة ظهور الفرادة في النسبية العامة. تم طرح السؤال في منتصف الستينيات من قبل ستيفن هوكينغ وروجر بنروز وروبرت غيروش وجورج إيليس في سياق انهيار النجوم أو نظيرها، عن طريق انعكاس الزمن، في سياق الحلول الكونية التي تصف الأكوان المتوسعة.

بشكل عام هذه مشكلة معقدة للغاية. إذا أخذنا حالة النجم، فهو ليس متجانسًا تمامًا أو منبسطاً، ولا كرويًا، فهو يدور، وله مجال مغناطيسي وتحدث ظواهر غير خطية للغاية في المرحلة الأخيرة من انهياره. كالاضطرابات، وموجات الصدمة، والتفاعلات النووية المعقدة بين الهادرونات، إلخ.

ومع ذلك، فقد نجحوا عن طريق الأساليب القوية للطوبولوجيا التفاضلية. ـ وبعض الفرضيات الفيزيائية البسيطة، لإثبات أن ظهور التفرد أو الفرادة كان حتميًا.

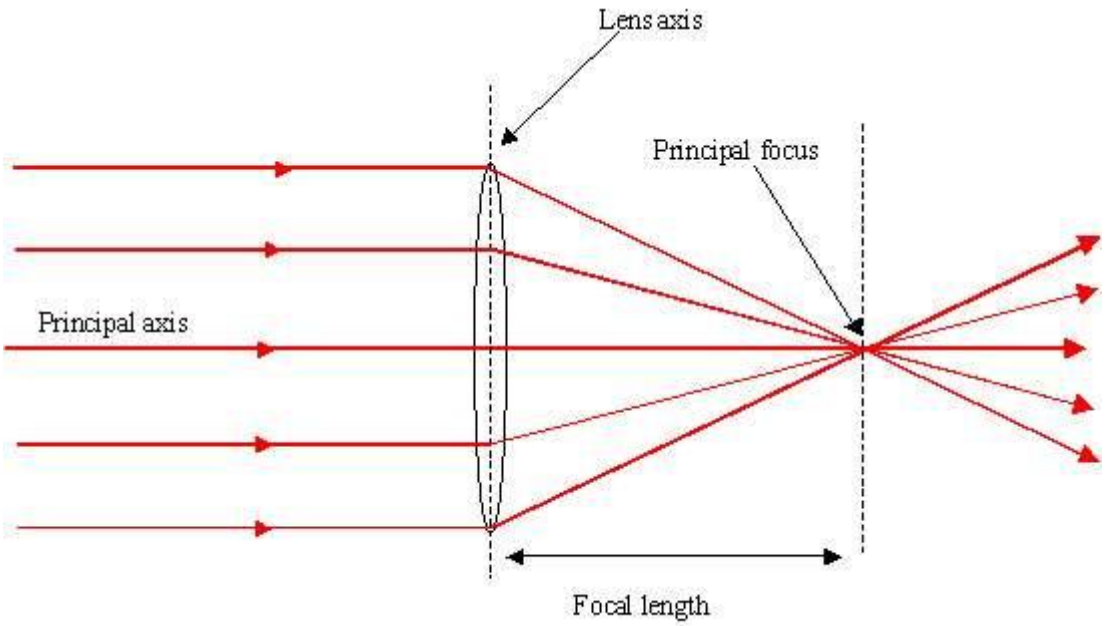
وهكذا اعتمد بنروز وكارتر وهوكينغ على مخططات الزمكان من خلال ترجمة فيزياء انهيار الجاذبية وخصائص الثقوب السوداء وظهور التفردات أو الفرادات إلى خصائص الطوبولوجيا والهندسة التفاضلية المرتبطة بسلوك تطابق مسارات جسيمات المادة، أو أفضل من الفوتونات، في الزمكان المنحني.

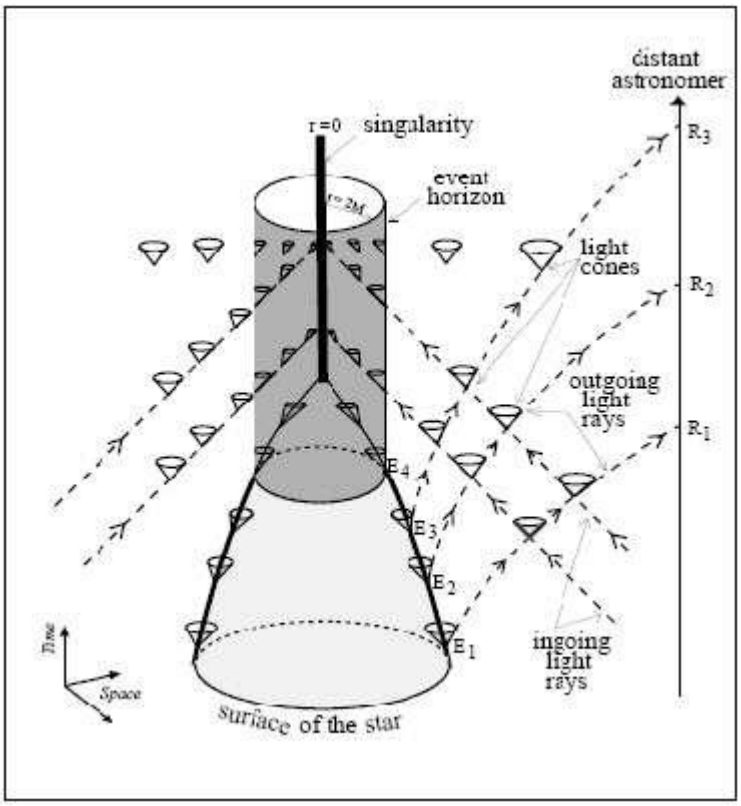
يقودنا ذلك بشكل طبيعي إلى نظريات تشبه تلك المتعلقة بالخطوط الحالية في الديناميكا المائية، أو الأفضل في علم البصريات الهندسية.

يتشابه تشكيل التفرد أو الفرادة بعد ذلك مع وجود نقطة التقاء أشعة الضوء للأنظمة الضوئية. إذا اعتبرنا أن الأفق يشبه إلى حد ما حافة العدسة المتقاربة، فيجب أن يركز كل شيء يعبره على نقطة واحدة، هي البؤرة، والتي تتوافق هنا إلى مركز الفرادة. بنفس الطريقة التي نتحدث بها عن معدل التمدد / التقارب /

الدوران للخطوط الحالية في مائع، سيكون لدينا ما يعادل عائلات مسارات الفوتون. وبالتالي، فإن إثبات وجود التفرد سيرتبط بوجود معدل غير محدود من الانكماش لحزمة من هذه المسارات أثناء تحركها أسفل الأفق، وبالتالي فإن جميع المسارات التركيز والانتهاء في نقطة واحدة ونفس التفرد.

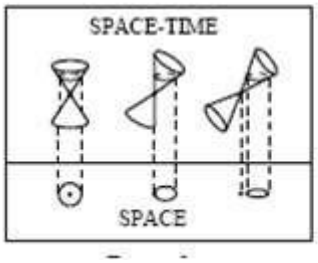
يمكن ملاحظة ذلك في الرسم البياني أدناه:

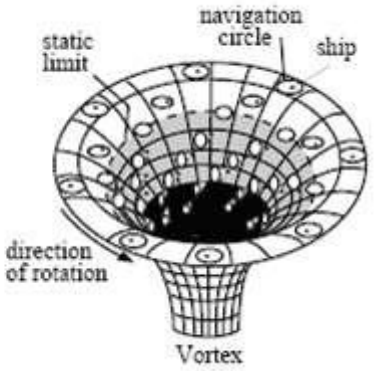




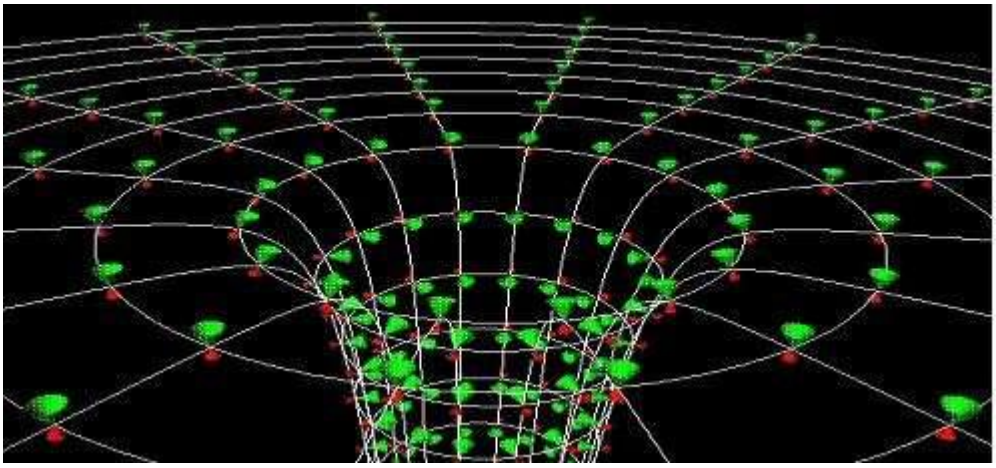
مقتطف من Jean-Pierre Luminet -Black Holes: مقدمة عامة. انظر التفسيرات أدناه. © جان بيير لومينيت

العنصر الأساسي في النظريات هو الأسطح المحاصرة. أي شعاع ضوئي ينبعث من هذه سيشهد تناقص مساحتها.





مقتطف من JP Luminet - Black Holes: A General Introduction. التفاصيل أدناه. © جان بيير لومينيت



في هذه المخططات الثلاثة المقابلة لتشكيل ثقب أسود بانهيار نجم، بالإضافة إلى هيكل ثقب أسود دوار، ثقب كير الأسود Kerr، يمكننا أن نرى بوضوح ميل المخاريط الضوئية. لاحظ أيضًا إسقاط رأس المقطع المخروطي المستقبلي لحدث معين بالإضافة إلى هذا الحدث كنقطة.

وبالتالي، يمكن رؤية حتمية الانهيار بوضوح من سلوك مجال المخاريط الضوئية لأنها تميل كلما اقترب المرء من الأفق، وهي مماسة له. ثم تتحول ci تمامًا بحيث تتقارب جميع المسارات نحو فرادة مركزية حيث يتم القضاء على الزمكان. لذلك لا يمكن أن يخرج أي شيء من الثقب الأسود وكل ما يدخل فيه يجب أن يصل إلى التفرّد أو الفرادة بدقة شديدة بسبب هذا التغيير في البنية السببية للزمكان حيث يتغير المجال المخروطي إلى مجال جاذبية قوي. التعبير.

علاوة على ذلك، يجب أن ندرك أن هناك وقتًا يكون فيه الضغط الإضافي لمعارضة الانهيار يتوافق مع زيادة كثافة الطاقة بدلاً من معارضة ذلك، بل على العكس يفضله، وهو الزمكان نفسه الذي ينهار.

لذلك، لم يعد من الممكن استخدام أي قوة تنافر ناتجة عن الانحطاط الكمومي للجسيمات المفترضة، ولكن غير المعروفة، للجسيمات التي تسمى حاليًا الجسيمات"الأولية".

يُذكر أن الأقزام البيضاء تستمد ثباتها من ضغط تنكس الإلكترونات، مما يعطي حجمًا من ترتيب الأرض لنجم من كتلة الشمس. بينما بالنسبة للنجوم النيوترونية، التي تكون أصغر بكثير لأن قطرها لا يتجاوز بضع عشرات من الكيلومترات، فإن التفاعل النووي القوي للنيوترونات، الذي يكون مثيرًا للاشمئزاز على مسافات قصيرة، هو الذي يلعب دوره.

أخيرًا، نلاحظ أن نظريات التفرد تستند إلى الفئتين الرئيسيتين التاليتين من الفرضيات.

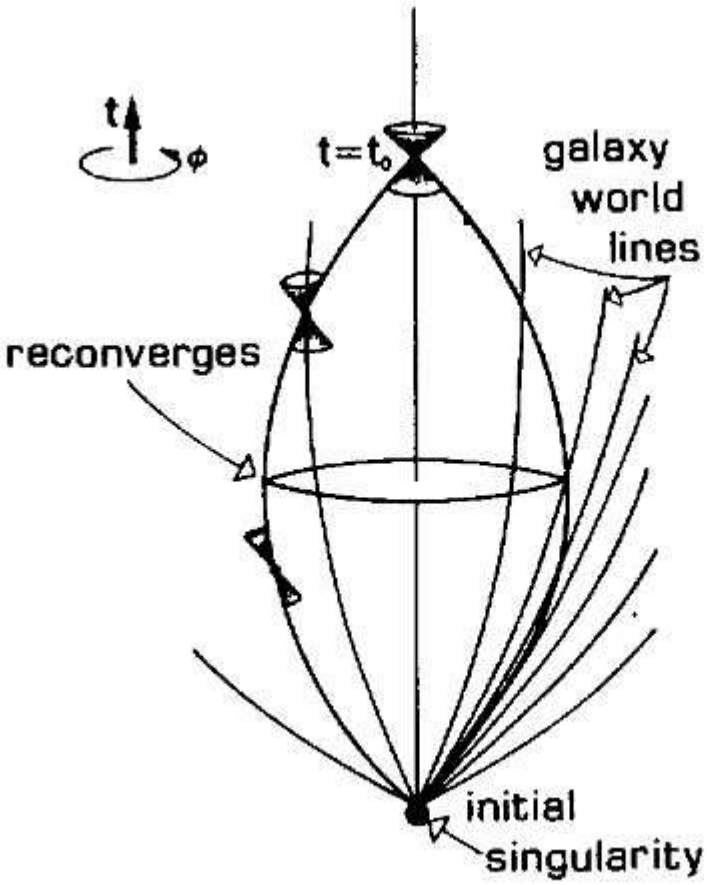
• شروط على الزمكان

سطح كوشي، لا حلقات زمنية، قيود على دوران الكون أو الأجسام.

• القيود على الطاقة

الشروط القوية والضعيفة والمهيمنة على ايجابية الطاقة. هذه هي الشروط الأخيرة التي ستقود ثورن إلى انتهاكها من أجل الحصول على الثقوب الدودية، فهي تتعلق أساسًا بموتر الطاقة النبضي، وهو مصدر مجال الجاذبية.

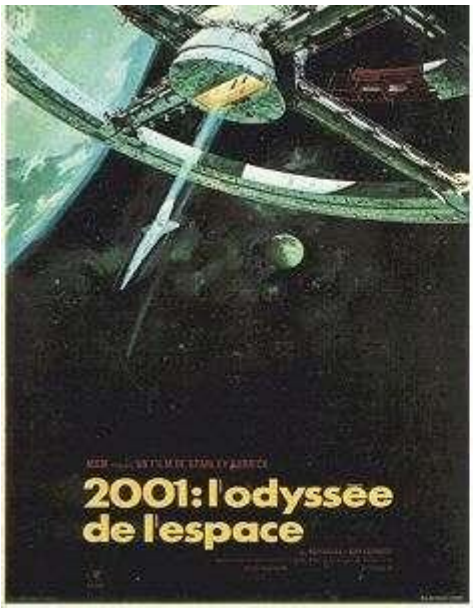
وبالمثل، سيتم دراسة ظهور التفردات في علم الكونيات وإثباتها من السلوك المائل لمخاريط الضوء و "تركيز" مسارات أشعة الضوء عندما يصعد المرء في زمن. هذا ما نراه في الرسم البياني التالي:



مقتطف من تقرير Cern الأصفر 91-06 © Ruth M. Williams

سلسلة من النظريات الهامة والعامة للغاية، فيما يتعلق بـعلم الكونيات، حصل عليهما بالاشتراك بين هوكينغ وبينروز في عام 1970. وقد أعطى الأخير نظرية أولى لانهيار النجوم في عام 1965.

باختصار، لن يكون هناك إذن ممر عبر الزمكان يفتح على البشرية طريق النجوم أو إمكانية السفر عبر الزمن.

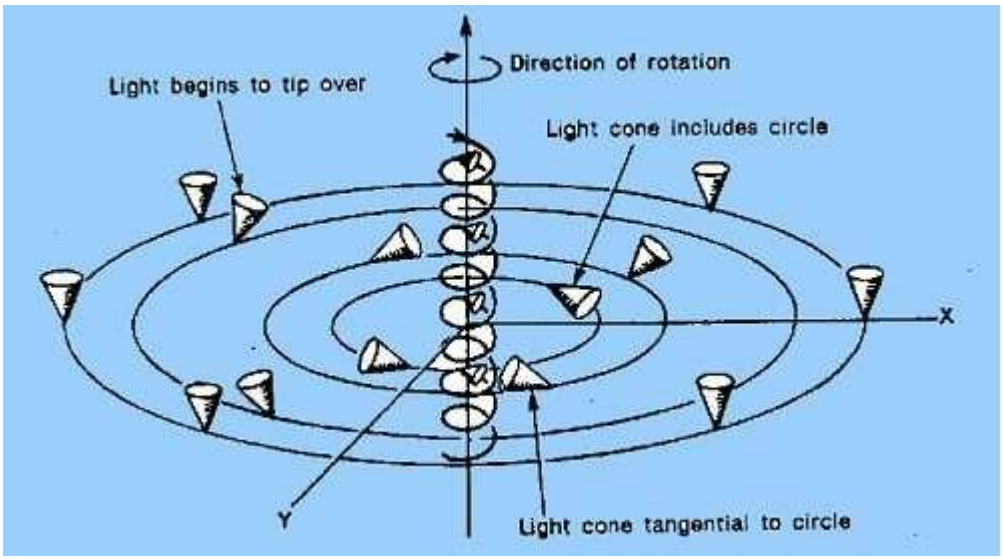


أوديسة الفضاء 2001 رحلة فضائية أو مغامرات فاليريان ولوريلين!

اسطوانة تبلر **Le cylindre de Tipler**

ثم انتهت السبعينيات بانتصار نظرية الثقوب السوداء واستحالة استخدامها كآلات للزمكان.

ومع ذلك، ظهرت بعض العلامات التحذيرية في وقت واحد:

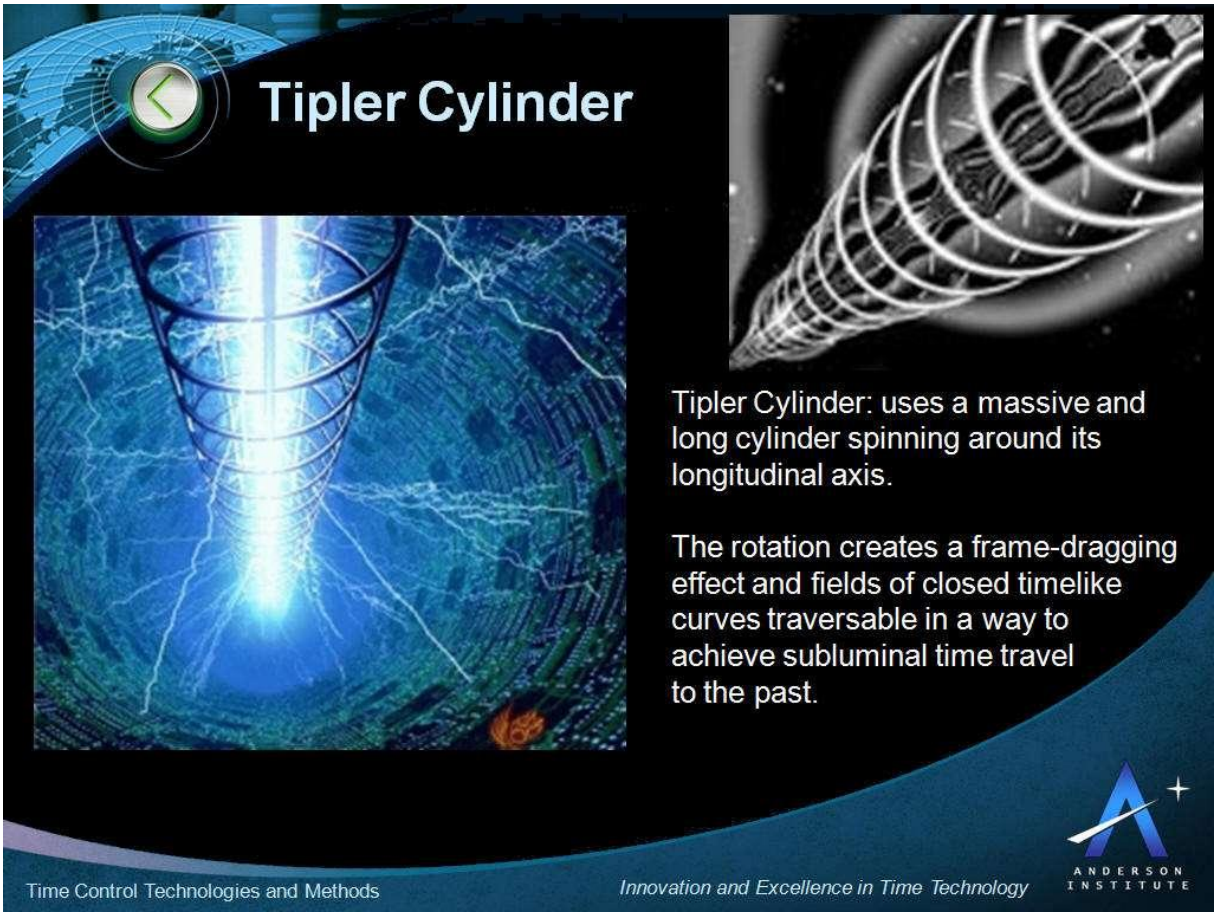


في هذا الرسم البياني يمكننا أن نرى بوضوح، مرة أخرى، إمالة المخاريط عندما نقترب من الأسطوانة وظهور مسارات محتملة نحو الماضي.

إمالة الأقماع.

في وقت لاحق تبين أن أسطوانة يبلغ طولها بضعة آلاف من الكيلومترات ولها كتلة وكثافة عدد قليل من النجوم النيوترونية ستكون كافية.

من المهم أن نفهم أن مثل هذه الآلة لا تسمح بالعودة إلى الماضي في وقت أبكر من تاريخ إنشائها، أو الذهاب إلى المستقبل أبعد من تاريخ التدمير أو الإغلاق.



انطباع فنا في نفس الوقت الذي شرع فيه ستيفن هوكين في تحليل سلوك حقل كمي في زمكان منحني بالقرب من ثقب أسود. عندما بدا أن كل شيء يشير إلى أنه لا يمكن أن يأتي شيء منه، اكتشف لدهشة أنه يمكن للمرء ربط الإشعاع بأي ثقب أسود. كيف يكون ذلك ممكنا؟ لا تزال خدعة سحرية الكم. الفراغ، كما سنرى لاحقًا، لا يتم تحريكه حقًا وبشكل مستمر بواسطة أزواج من الجسيمات والجسيمات المضادة التي تظهر بشكل عابر قبل أن يتم إبادتها عن طريق إعادة التركيب. نتحدث عن العمليات والجسيمات الافتراضية الجسيمات وقوى المد والجزر، ومع ذلك، إذا أخذنا في الاعتبار اثنين من هذه الفوتونات (وهما جسيمتان مضادتان) بالقرب من أفق الحدث للثقب الأسود، فإن قوى المد كافٍ لسقوط المرء في الحفرة أثناء عبور الأفق. العمل الذي قدمته جاذبية المد والجزر لفصل الجسيمات والتي وفرت بعد ذلك طاقة كافية للجسيمات لتصبح حقيقية وواحدة للهروب إلى اللانهاية، كما يتضح من الرسم التخطيطي أدناه يمكننا حساب احتمالية حدوث ذلك. كلما صغر الثقب الأسود، زادت قوى المد والجزر وزادت احتمالية فصل الجسيمات.

النتيجة النهائية هي انخفاض سريع بشكل متزايد في كتلة الثقب الأسود، لأن الطاقة التي يحملها الجسيم الهارب يجب أن تكون على حساب تلك المخزنة به. يجب الاعتراف بأن هناك نوعًا من التيار من الطاقة السالبة يخترق داخل الثقب الأسود. هذا أبعد ما يكون عن التافه، لأنه منذ نشأتها يبدو أن ميكانيكا الكم تتطلب إبعاد الطاقات السلبية كحلول فيزيائية محتملة لمعادلاتها.

ظاهرة التبخر هذه رائعة وستحتاج إلى ملف كامل لتحقيق العدالة، وهو أمر لن نفعله هنا للأسف. إلى جانب المظهر الإشكالي لحالات الطاقة السلبية (رأس المال كما سيظهر في بقية دراستنا في الثقوب الدودية) ، هناك ظاهرة أخرى جديرة بالملاحظة.

وقد أطلق عليه مفارقة المعلومات. دعونا نرى ما هو عليه.

مفارقة المعلومات نظريًا يبتلع الثقب الأسود كل ما يعبر أفقه دون أن يترك أي شيء يبرز. يمكن وصفه فقط وبشكل كامل من خلال كتلته وزخمه الزاوي (يتم إهمال العلبة المحملة). لذلك، مهما كان ما يسقط في الداخل، فإن الثقب الأسود سيحتفظ بكتلته فقط ولا شيء آخر في حالة عدم وجود الزخم الزاوي. بالإضافة إلى ذلك، يحدث تبخره مع ما يسمى بالإشعاع الحراري، أو إشعاع الجسم الأسود، والذي يكون "مضطربًا" قدر الإمكان.

المعلومات المرتبطة بتنظيم أجسام من نفس الكتلة (على سبيل المثال) تبدو مفقودة إلى الأبد عندما تُلقى في ثقب أسود! وهذا يتناقض مع القواعد الأساسية لميكانيكا الكم والتي مع ذلك ضروري لتحقيق هذه النتيجة، ومن ثم استخدام تعبير مفارقة المعلومات.

في الثمانينيات ، تلقت نظرية الثقب الدودي فرصة جديدة للحياة ، خاصةً تحت تأثير هوكينج. في الواقع ، إنها إمكانية منطقية لتفسير مفارقة المعلومات الشهيرة مع الثقوب السوداء ، والتي أكد هوكينغ نفسه على أهميتها أولاً.

هيكل دودي

يعد وجود الثقوب الدودية بين الأجزاء الداخلية والخارجية للثقوب السوداء آلية محتملة لشرح كيفية الحفاظ على المعلومات وإطلاقها من خلال تبخرها. التقدم الناتج عن برنامج الجاذبية الكمومية الإقليدية (مع تطبيق مسار ريتشارد فاينمان المتكامل) ، تلك الخاصة بعلم الكونيات الكمومية (مع معادلة ويلر دي ويت) ثم سمحت لهوكينغ بالنظر في مسألة قليلا أقرب.

لقد رأينا أيضًا أنه وفقًا لـ Wheeler، يمكن تفسير الشحنة الكهربائية وكتلة الجسيمات بدءًا من طوبولوجيا الزمكان. كانت أزواج الجسيمات - الجسيمات المضادة للفراغ تظهر بعد ذلك وتختفي الثقوب الدودية لميزنر بسبب التقلبات الكمية للمتر. وبطبيعة الحال، يمكن بالتالي ربط كل ثوابت الكتلة والشحنة بتأثيرات هذه الثقوب الدودية. مع ظهور أسئلة إعادة تطبيع الجسيمات في نظرية المجال الكمومي للكتل وشحناتها، من السهل فهم الإمكانات الكاملة لنظرية الثقب الدودي لفيزياء الجسيمات.

علاوة على ذلك، اقترح جون ويلر، متبعًا تقديرًا رقميًا بسيطًا، أن هذا الهيكل المتذبذب للثقوب الدودية كان مسؤولاً عن إلغاء، أو على الأقل إضعاف، الثابت الكوني. تعد مشكلة التقدير النظري للثابت الكوسمولوجي من أهم المشاكل في الفيزياء الحديثة، كما سنرى لاحقًا.

من السهل أن نفهم، إذا كانت كثافة الثقوب الدودية الافتراضية كبيرة بما يكفي، فإنها تمتلك طاقة جاذبية للتفاعل والتي من المرجح أن تنظم طاقة الفراغ وتعطيها قيمة مماثلة لتلك التي نحن ملاحظ. أظهرت حسابات أولية أخرى أجراها هوكينج، وخاصة سيدني كولمان، أن هذا كان بالفعل تفسيرًا محتملاً. على الرغم من أنه لا يمكن إجراء مظاهرة قوية حقًا.

كانت الثقوب الدودية التي تمت دراستها من نوع Misner بقدر ما كانت من نوع Einstein-Rosen. في الحالة الأخيرة، كان لدينا أطفال الكون نبتوا من أطفالنا وأصبحنا بحجم بلانك. كانت نظرية الكون الطفل الشهيرة.

كان هوكينغ من أشد المدافعين، حتى وقت قريب، عن أن هذا هو ما يحدث بالفعل. من ناحية أخرى، عارضها دائمًا جيرارد هوفت وليونارد سسكيند. يبقى السؤال مفتوحًا على الرغم من التطورات الحديثة في نظرية الأوتار وهوكينغ نفسه، مما يشير إلى أنه في الواقع ستظل المعلومات محفوظة. لن يكون الإشعاع المنبعث من الثقب الأسود مضطربًا تمامًا لأنه ليس مستقلاً تمامًا عن المحتويات الداخلية لهذا الثقب.

في نفس الوقت الذي شرع فيه ستيفن هوكينغ في تحليل سلوك حقل كمومي في زمكان منحني بالقرب من ثقب أسود. عندما بدا أن كل شيء يشير إلى أنه لا يمكن أن يأتي شيء منه، اكتشف لدهشته أنه يمكن للمرء ربط الإشعاع بأي ثقب أسود. كيف يكون ذلك ممكنا؟

لا تزال خدعة سحرية كمومية. الفراغ، كما سنرى لاحقًا، لا يتم تحريكه حقًا وبشكل مستمر بواسطة أزواج من الجسيمات والجسيمات المضادة التي تظهر بشكل عابر قبل أن يتم إبادتها عن طريق إعادة التركيب. نحن نتحدث عن العمليات والجزيئات الافتراضية.

الجسيمات وقوى المد والجزر:

الآن إذا أخذنا في الاعتبار اثنين من هذه الفوتونات (وهما جسيمتان مضادتان) بالقرب من أفق الحدث لثقب أسود، فإن قوى المد كافية لسقوط أحدهما في الثقب. عبور الأفق. العمل الذي قدمته جاذبية المد والجزر لفصل الجسيمات والتي وفرت بعد ذلك طاقة كافية للجسيمات لتصبح حقيقية وواحدة للهروب إلى اللانهاية، كما يتضح من الرسم التخطيطي أدناه.

يمكننا حساب احتمال حدوث ذلك. كلما صغر الثقب الأسود، زادت قوى المد والجزر وزادت احتمالية فصل الجسيمات.

النتيجة النهائية هي انخفاض سريع بشكل متزايد في كتلة الثقب الأسود، لأن الطاقة التي يحملها الجسيم الهارب يجب أن تكون على حساب تلك المخزنة به. يجب الاعتراف بأن هناك نوعًا من التيار من الطاقة السالبة يخترق داخل الثقب الأسود. هذا أبعد ما يكون عن التافه، لأنه منذ نشأتها يبدو أن ميكانيكا الكم تتطلب إبعاد الطاقات السلبية كحلول فيزيائية محتملة لمعادلاتها.

ظاهرة التبخر هذه رائعة وستحتاج إلى ملف كامل لتحقيق العدالة، وهو أمر لن نفعله هنا للأسف. إلى جانب المظهر الإشكالي لحالات الطاقة السلبية (رأس المال كما سيظهر في بقية دراستنا في الثقوب الدودية) ، هناك ظاهرة أخرى جديرة بالملاحظة.

وقد أطلق عليه مفارقة المعلومات. دعونا نرى ما هو عليه.

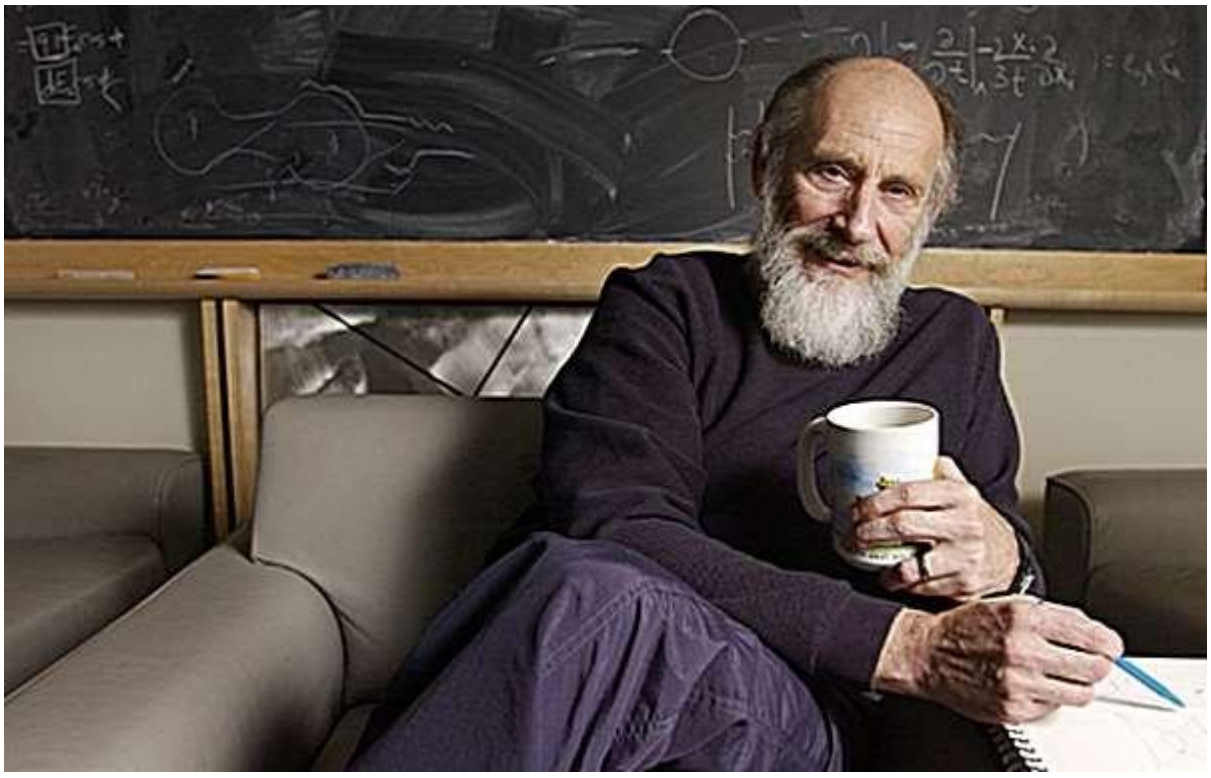
مفارقة المعلومات:

من الناحية النظرية، يبتلع الثقب الأسود كل ما يعبر أفقه دون أن يترك أي شيء يبرز. يمكن وصفه فقط وبشكل كامل من خلال كتلته وزخمه الزاوي (يتم إهمال العلبة المحملة). لذلك، مهما كان ما يسقط في الداخل، فإن الثقب الأسود سيحتفظ بكتلته فقط ولا شيء آخر في حالة عدم وجود الزخم الزاوي. بالإضافة إلى ذلك، يحدث تبخره مع ما يسمى بالإشعاع الحراري، أو إشعاع الجسم الأسود، والذي يكون "مضطربًا" قدر الإمكان.

لذلك يبدو أن المعلومات المرتبطة بتنظيم أجسام من نفس الكتلة (على سبيل المثال) ضاعت إلى الأبد عند رميها في ثقب أسود!

رسم توضيحي لنظرية اللا شعر، بغض النظر عما يقع في الثقب الأسود ، فإنه سيحتفظ فقط بالكتلة والشحنة والزخم الزاوي المرتبط بالجسم. © جان بيير لومينيت

هذا يتناقض مع القواعد الأساسية لميكانيكا الكم والتي تعتبر مع ذلك ضرورية للوصول إلى هذه النتيجة ، ومن هنا يتم استخدام تعبير مفارقة المعلومات.



ليونارد سسكيند. © جامعة ستانفورد

كان هوكينغ من أشد المدافعين، حتى وقت قريب، عن أن هذا هو ما يحدث بالفعل. من ناحية أخرى ، عارضها دائمًا جيرارد هوفت وليونارد سسكيند. يبقى السؤال مفتوحًا على الرغم من التطورات الحديثة

في نظرية الأوتار وهوكينج نفسه ، مما يشير إلى أنه في الواقع ستظل المعلومات محفوظة. لن يكون الإشعاع المنبعث من الثقب الأسود مضطربًا تمامًا لأنه ليس مستقلاً تمامًا عن المحتويات الداخلية لهذا الثقب.

في الثمانينيات من القرن الماضي، أعطت نظرية الثقوب الدودية فرصة جديدة للحياة، خاصةً تحت تأثير هوكينج. في الواقع، هم لو احتمالالجيولوجيا لشرح مفارقة المعلومات الشهيرة مع الثقوب السوداء، والتي أكد هوكينغ نفسه على أهميتها أولاً.

هيكل دودي:

يعد وجود الثقوب الدودية بين الأجزاء الداخلية والخارجية للثقوب السوداء آلية محتملة لشرح كيفية الحفاظ على المعلومات وإطلاقها من خلال تبخرها. التقدم الناتج عن برنامج الجاذبية الكمومية الإقليدية (مع تطبيق مسار ريتشارد فاينمان المتكامل)، تلك الخاصة بعلم الكونيات الكمومية (مع معادلة ويلر دي ويت) ثم سمحت لهوكينغ بالنظر في مسألة قليلا أقرب.

لقد رأينا أيضًا أنه وفقًا لـ Wheeler، يمكن تفسير الشحنة الكهربائية وكتلة الجسيمات من طوبولوجيا الزمكان. كانت أزواج الجسيمات - الجسيمات المضادة للفراغ تظهر بعد ذلك وتختفي الثقوب الدودية لميزنر بسبب التقلبات الكمية للمتر. وبطبيعة الحال، يمكن بالتالي ربط كل ثوابت الكتلة والشحنة بتأثيرات هذه الثقوب الدودية. مع ظهور أسئلة إعادة تطبيع الجسيمات في نظرية المجال الكمومي للكتل وشحناتها، من السهل فهم الإمكانات الكاملة لنظرية الثقب الدودي لفيزياء الجسيمات.

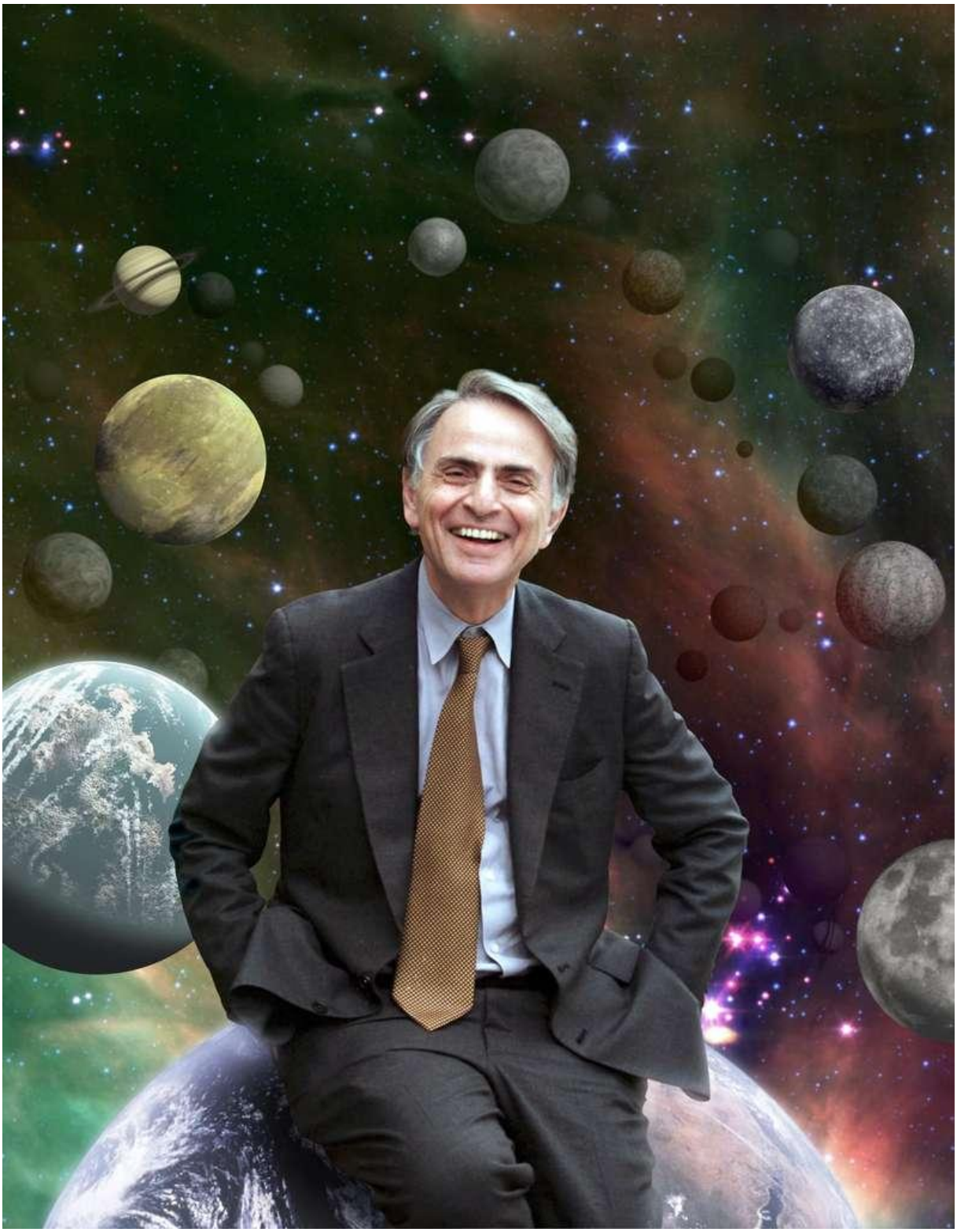
علاوة على ذلك، اقترح جون ويلر، متبعًا تقديرًا رقميًا بسيطًا، أن هذا الهيكل المتذبذب للثقوب الدودية كان مسؤولاً عن إلغاء، أو على الأقل إضعاف، الثابت الكوني. تعد مشكلة التقدير النظري للثابت الكوسمولوجي من أهم المشاكل في الفيزياء الحديثة، كما سنرى لاحقًا.

من السهل أن نفهم، إذا كانت كثافة الثقوب الدودية الافتراضية كبيرة بما يكفي، فإنها تمتلك طاقة جاذبية للتفاعل والتي من المرجح أن تنظم طاقة الفراغ وتعطيها قيمة مماثلة لتلك التي نحن ملاحظ. أظهرت حسابات أولية أخرى أجراها هوكينغ، وخاصة سيدني كولمان، أن هذا كان بالفعل تفسيرًا محتملاً. على الرغم من أنه لا يمكن إجراء مظاهرة قوية حقًا.

كانت الثقوب الدودية التي تمت دراستها من نوع Misner بقدر ما كانت من نوع Einstein-Rosen. في الحالة الأخيرة، كان لدينا أطفال الكون نبتوا من أطفالنا وأصبحنا بحجم بلانك. كانت نظرية الكون الطفل الشهيرة.

كان كل شيء في مكانه الآن لكي يقوم كيب ثورن Kip Thorne باكتشافه المدمر.

بشكل لا يصدق، بدأ كل شيء مع كارل ساجان. سعى إلى جعل كتاب جهات الاتصال الخاص به موثوقًا به. عبرت بطلتها إليانور أرواي Eleanor Arroway في البداية ثقبًا أسود هناك لتنضم إلى كوكب سلالة غريبة قديمة أرسلت رسالة لاسلكية إلى الكون لإظهار وجودها.



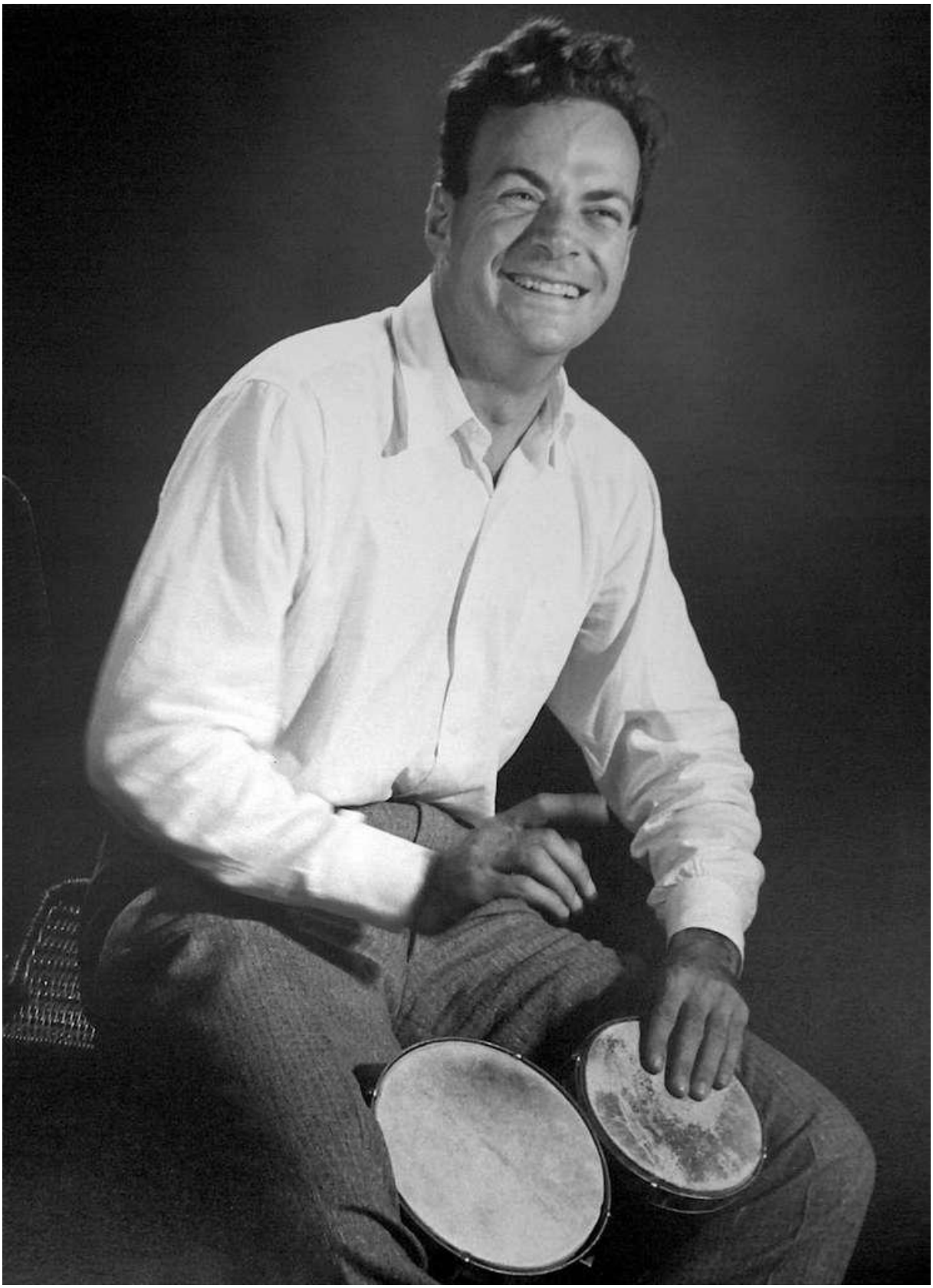
كان كارل ساغان ، مؤلف كتاب Cosmos and Contact ، عالم كواكب بارزًا وشائعًا. اشتهر بمشاركته في برنامج SETI. © ناسا

وشمل ذلك خطط آلة تجعل من الممكن السفر من نجم إلى آخر عن طريق فتح ممر الزمكان في شكل ثقب أسود بينهما.

من الواضح أن هذا أمر مستحيل كما رأينا سابقًا. لذلك خاطب ساجان صديقه كيب ثورن ، وهو متخصص كبير في الفيزياء الفلكية النسبية وطالب سابق في ويلر. لم يستغرق الأمر وقتًا طويلاً لإيجاد حل ، فقد كان كافياً لانتهاك شروط الطاقة الخاصة بالنظريات التي تضمن ظهور التفرد. لذلك كان من الضروري إيجاد الطاقة بشكل سلبي ولكن هل يوجد مثل هذا الشكل من الطاقة "الغريبة" في الكون؟

كانت الإجابة تأتي من ميكانيكا الكموم (اختصار MQ).

تعود الجسيمات إلى زمن فاينمان



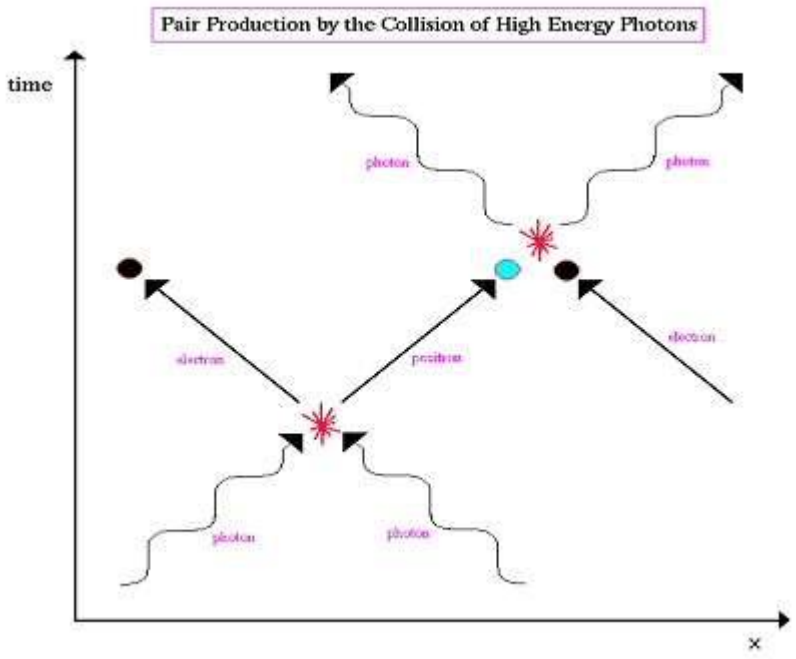
ريتشارد فاينمان ، الحائز على جائزة نوبل في الفيزياء ، عمل على مسألة السفر عبر الزمن. © توم هارفي

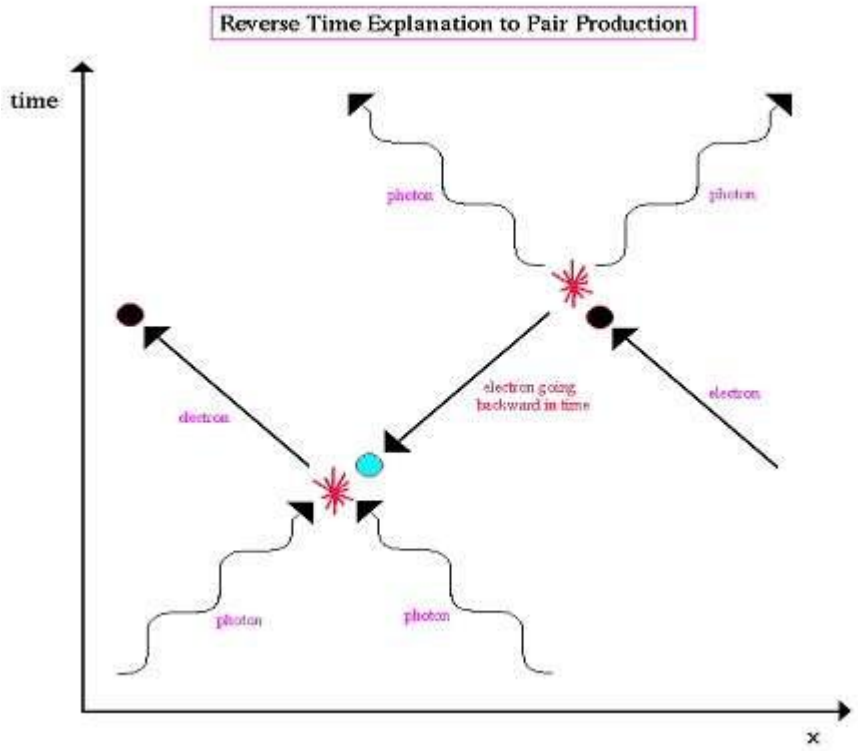
لقد علمنا بالفعل من عمل ريتشارد فاينمان أن ميكانيكا الكم يمكن أن يكون لها رأي في مشكلة السفر عبر الزمن. في عمله على الديناميكا الكهربية الكمومية، وبأخذ فكرة من ويلر (مرة أخرى)، أظهر أنه يمكننا تمثيل الجسيم المضاد، على سبيل المثال البوزيترون، مثل الإلكترون ولكن العودة في الوقت المناسب.

إذا أخذنا في الاعتبار جسيم من المادة المضادة، ولكنه ذو طاقة سالبة، فإن دالة الموجة التي تصف هذا الجسيم في MQ هي دالة للمنتج E * t. لذلك إذا كانت E 0 تتحرك بشكل طبيعي في الوقت المناسب.

يتضح أن هذا ممكن إذا تم تغيير الشحنة الكهربائية في نفس الوقت، ومن هنا جاء هذا التأكيد المذهل: حالات الطاقة السلبية للجسيمات التي تعود بالزمن هي في الواقع حالات إيجابية تنتقل بشكل طبيعي من الماضي إلى المستقبل ولكن مع تهمة معاكسة.

وهو وصف الجسيم المضاد مثل البوزيترون أو البروتون المضاد.





رسم تخطيطي لتفسير زوج جسيم مضاد. انظر الى التفاصيل بالاسفل. © د

وبالتالي يمكن إعادة تفسير تجسيد زوج جسيم-جسيم مُضاد متبوعًا بإفنائه على أنه إلكترون واحد ولكنه متعرج في الزمكان بعد امتصاص أو انبعاث الفوتونات. ما نراه في الشكلين المعطيين.

التقلبات الكمومية في الفراغ Les fluctuations quantiques du vide

إحدى النتائج المهمة لنظرية الكم هي تذبذب الفراغ الكمومي. ذلك بالقول؟

في الفيزياء الكلاسيكية، الجسيمات غير قابلة للتدمير ويتم الحفاظ على الطاقة دون أي استثناء للقاعدة.

في العالم السحري لنظرية الكموم، خاصةً عندما تجد نفسك في نظرية الحقل أو المجال، لم يعد هذا هو الحال. إذا أخذنا في الاعتبار متباينة هايزنبرغ الرابعة، فيمكننا فهمها بسهولة. لنتذكر أنه لا يوجد شيء محدد أو ثابت تمامًا في إدارة الجودة حيث يوجد غموض وإثارة تحكمهما قوانين احتمالية.

مثل عدم المساواة التي تحد من القيمة الدقيقة المتزامنة لموضع وسرعة الجسيم، لا يمكن للمرء أن يربطها بدقة مع طاقة معينة في لحظة محددة دون عدم اليقين دلتا E بشأن قيمة هذه الطاقة وتلك دلتا في اللحظة التي يتم فيها إجراء قياس لهذه الطاقة

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

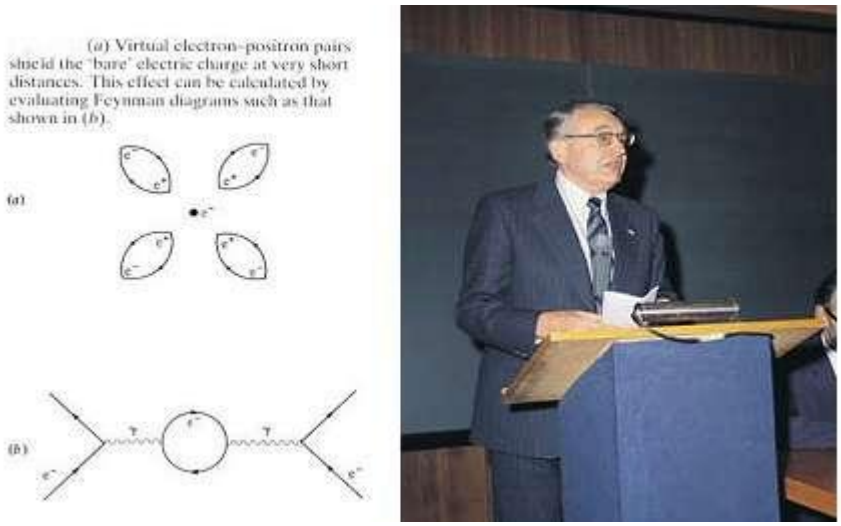
لذلك يمكننا أن ننتهك مبدأ الحفاظ على الطاقة بشكل أكبر لأن هذا الانتهاك لا يزال قصيرًا. كما علمنا أينشتاين أن الطاقة يمكن أن تتحول إلى جسيم من كتلة معينة M، يترتب على ذلك أن MQ يجبر الفراغ على تكوين فقاعات أزواج من الجسيمات المضادة من جميع الأنواع وجميع الكتل (الإلكترونات والكواركات والفوتونات، الثقوب السوداء الصغيرة، وما إلى ذلك) تظهر وتختفي باستمرار. نظرًا لأن هذه العمليات لا تدوم ولأنها غير قابلة للرصد بشكل مباشر، فإننا نتحدث عن العمليات الافتراضية.

وفقًا لـ RG ، يجب ألا يكون هناك فقط غرافيتونات ("فوتونات" مجال الجاذبية) وثقوب صغيرة سوداء ولكن مجال الجاذبية نفسه لهذه الجسيمات الافتراضية التي تشوه باستمرار وتمزق الفضاء- الوقت على نطاق مجهري. هذه في الحقيقة مجرد نسخة بديلة مكملة لصورة ويلر للتقلبات الكمومية للمقياس، والنتائج هي نفسها إلى حد كبير.

لا تزال هناك تفاصيل صغيرة غير سارة. تطبيق MQ المطبق على الحقول، سواء كانت جزيئات من المادة أو التفاعل، يقدم كثافة طاقة للفراغ الكمومي إما لانهائي أو كبير جدًا. لقد صادفنا المشاكل الشهيرة للطاقة المتبقية من نقطة الصفر وإعادة التطبيع في نظرية المجال الكمومي، والتي تتضمن ثابتًا كونيًا أكبر من القيمة المرصودة. تكمن المشكلة الأولى في قلب العمل على الطاقة المظلمة.

تأثير كازيميرL'effet Casimir

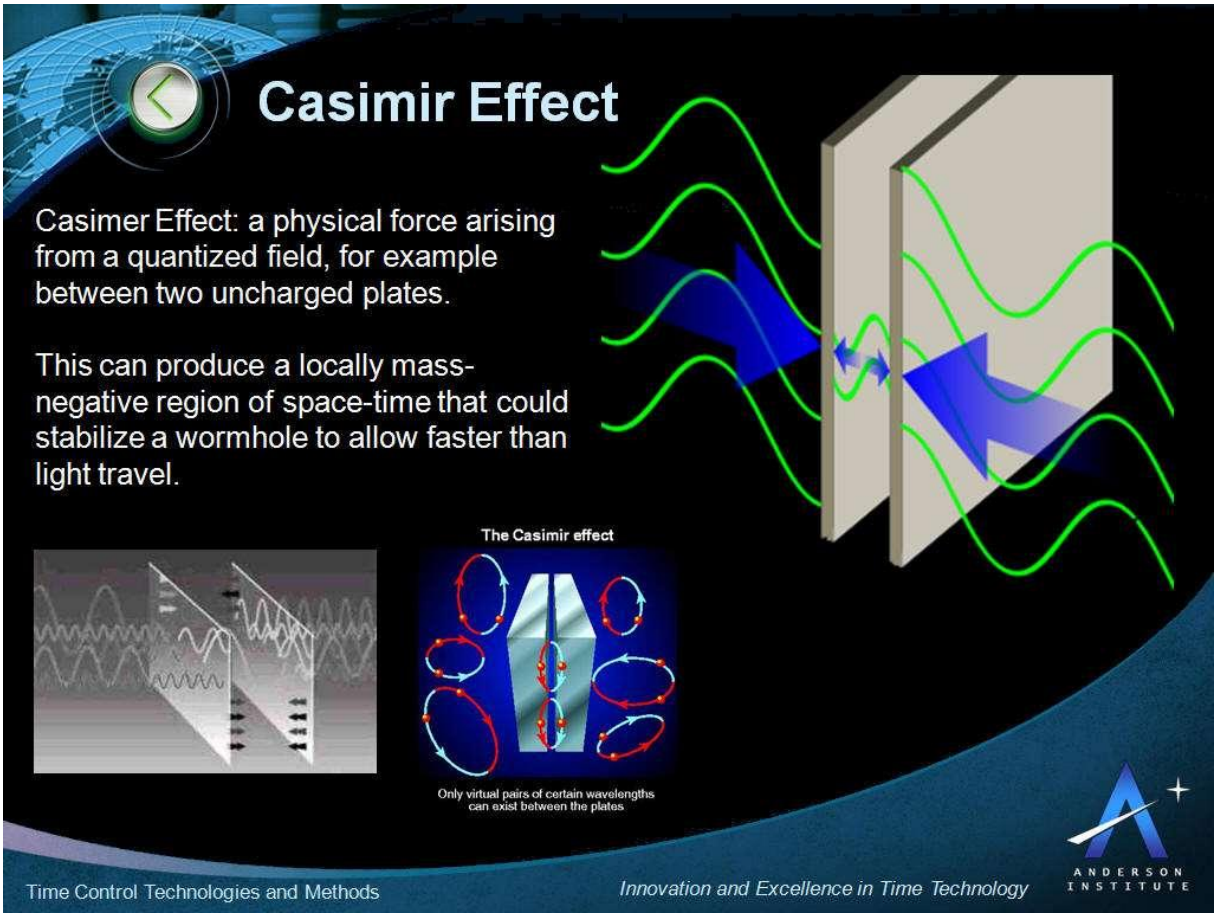
هذه التقلبات الكمومية fluctuations quantiques ليست وجهات نظر للعقل لأنها محسوسة بشكل غير مباشر في عمليات تفاعلات المادة مع الإشعاع. إن قيمة الكتلة والشحنة والعزم المغناطيسي للإلكترونات تشهد على ذلك بالإضافة إلى ما يسمى بتأثير لامب Lamb وخاصة تأثير كازيمير Casimir. في الواقع، يُلاحظ الظهور / الاختفاء المستمر لأزواج الجسيمات الافتراضية المشحونة الموصوفة في مخططات فاينمان أدناه في تعديل قيمة الشحنة وكتلة الإلكترون التي ستُنسب إليها في غياب هذه التقلبات.



مخططات Feynman - Hendrik Casimir لتقلبات أزواج الكم. © د

من خلال دراسة هذه التأثيرات الدقيقة في الفيزياء الذرية، توصل هندريك كازيمير إلى اكتشافه الأكثر شهرة.

نظرًا لأن الكهرومغناطيسية هي القوة الأكثر كثافة على مقياسنا، فمن السهل ملاحظة تأثيرات التقلبات الكمية في الفراغ في سياقها. إذا أدخلنا لوحين موصلين منفصلين بشكل ضعيف، فإن الأطوال الموجية المرتبطة بالجسيمات الافتراضية التي تثير الفراغ، مثل الفوتونات في هذه الحالة، تكون أقصر بين الصفيحتين المعدنيتين عنها في الخارج. هذا يغير قيمة طاقة الفراغ الذي يتصرف كما لو كان لدينا طاقة سالبة. هذا هو السبب في أننا نقيس القوة التي تجذب الصفيحتين ونجبرهما على الاقتراب (انظر الشكل أدناه).

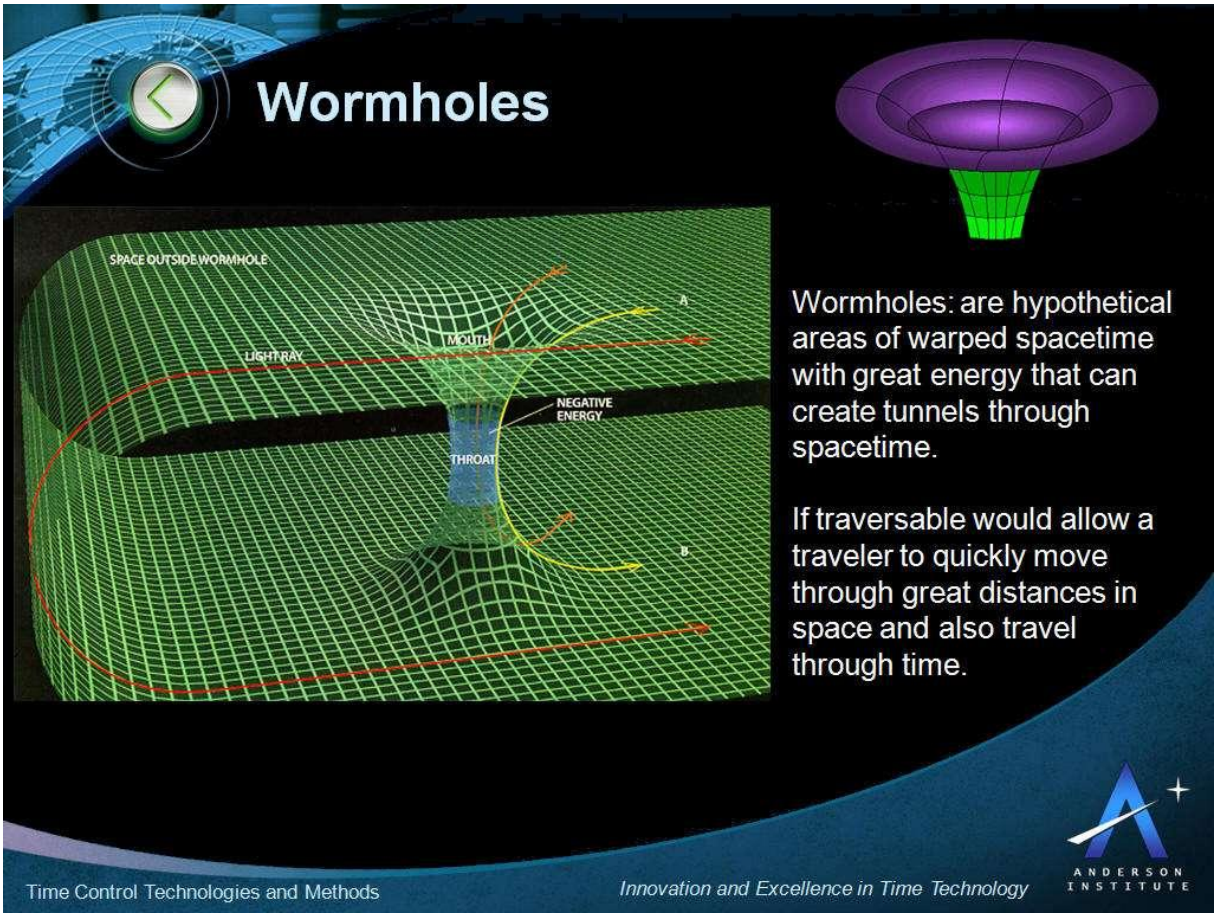


رسوم توضيحية لتأثير كازيمير بين لوحين. © معهد أندرسون.

هذا هو التأثير الشهير الذي توقعه كازيمير عام 1948!

نجح ستيف لامورو Steve Lamoreaux من مختبر لوس ألاموس الوطني *Los Alamos National Laboratory* في عام 1997 مع زملائه في قياسه بدقة. هذا هو أبسط مثال، وقبل كل شيء يتم ملاحظته تجريبياً، حيث يمكننا أن نرى أن ميكانيكا الكموم يمكن أن تنتج ما يسمى بالتأثيرات "الغريبة" فيما يتعلق بالطاقة. لذلك هذا هو المفتاح الذي تبحث عنه ثورن! هذه الطاقة السلبية موجودة

بالفعل في الكون، وبالتالي يجب أن تُبقي الثقب الدودي مفتوحًا. يكفي "ربط" هذا بالطاقة السلبية، أنتجت بواسطة آلية مشابهة لتأثير كازيمير، لخرق شروط إيجابية الطاقة التي تنطوي على مظهر التفرد.



الثقوب الدودية والزمكان. © معهد أندرسون

من المهم جدًا أن نفهم من ناحية أن تأثير الطاقة السلبية هذا هو بالضبط ما يتدخل أيضًا في تبخر الثقوب السوداء وفقًا لآلية إشعاع هوكينغ، ومن ناحية أخرى أن هذه الطاقة السلبية ليست كذلك. من المادة المضادة. ينتج عن فيزياء الحقول الكمومية في الزمكان المنحني، في الأفق فقط، تدفق طاقة سالبة بداخله يعوض بدقة عن رحيل الجسيمات المشعة إلى اللانهاية بواسطة الثقب الأسود ومما تسبب في انخفاض كتلته.

بقي أن نرى ما ستقوله معادلات أينشتاين مقترنة بتوزيع "مادة غريبة" مع طاقة سالبة.