محاضرة البروفيسور روجر بنروز:

متفرّدات الثقوب السوداء والكونيّات الدوريّة

ترجمة وإعداد: نضال شمعون

Arab Physical Society

7 April 2022

Black-Hole Singularities to Cyclic Cosmology

Roger Penrose
University of Oxford

يتناول البروفيسور روجر بنروز في هذه المحاضرة مجموعةً من القضايا الفيزيائية العميقة التي تتعلق بطبيعة الزمكان، والمتفرّدات singularities الكونية، والانفجار العظيم، ومسألة الزمن في ميكانيك الكم. تُعدّ هذه المحاضرة امتدادًا لتاريخه الطويل في تقديم رؤى غير تقليدية تهدف إلى سد الفجوات بين النظريات الفيزيائية الكبرى. في هذا السياق، يسلّط الضوء على تحديات دمج النسبية العامة مع ميكانيك الكم، ومفهوم التفرّد، والأدوار الممكنة للجاذبيّة الكموميّة Quantum Gravity.

المُقدِّم (محمد صندوق):

أنا فخور جدًا بتقديمكم، سيّدي روجر بينروز (في الواقع، التقيتُ بالسيّد بنروز قبل حوالي خمس سنوات). السيّد (السير Sir) بنروز أستاذ فخري متقاعد –يحتلّ مقعد راوز بول– للرياضيات في جامعة أكسفورد، وحصل فيها وفي كليّات أخرى على العديد من الجوائز، منها جائزة وولف في الفيزياء لعام 1988، التي تقاسمها مع ستيفن هوكينغ عن نظريّة تفرّد بنروز–هوكينغ، كما حاز مناصفةً جائزةَ نوبل في الفيزياء لعام 2020 لاكتشافه أن معلوماتِ الثقب الأسود نتاجٌ قوي للنظرية النسبيّة العامة.

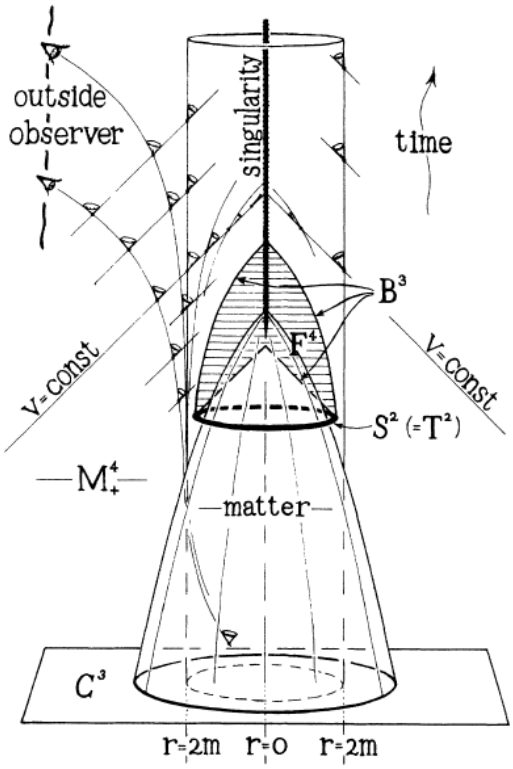
لحسن الحظ، ويسعدنا جدًا القول إن السير روجر بنروز معنا اليوم ليُلقي علينا محاضرة عن "متفرّدات الثقوب السوداء في علم الكونيات الدوري". نرحّب بكم معنا، السيد بنروز، والكلمة لكم.

بنروز:

1) المتفرّدات والثقوب السوداء

1–1) نموذج أوبنهايمر–سنيدر لانهيار نجم متناحٍ يشكّل ثقبًا أسود

أردتُ التحدث عن عملي الذي نلتُ به جائزةَ نوبل حول التنبؤ بوجود الثقوب السوداء، ولكن من الناحية التقنيّة كان للتنبؤ بحتميّة حدوث المتفرّدات. أعتقد أنه لم يتم بعْدُ إثبات ضرورة كون المتفرّدات خارج الثقوب السوداء غيرَ مستقرة (ما يُعرَف باسم الرقابة الكونية cosmic censorship التي تؤكّد ضرورةَ وجود المتفرّدات المستقرة ضمن ثقوبٍ سوداء)، ولكن دعني أنسى ذلك وأفترض بشكلٍ طبيعيّ أنه إذا كانت هناك متفرّدات فهي بالضرورة مخفية في ثقوبٍ سوداء. الصورة التالي هي مخطّط من ورقتي:



الشكل 1: انهيار الثقب الأسود نحو متفرّدة

اتّجاه الزمان في الصورة نحو الأعلى، وهناك من أجل التمثيل على الأقلّ بعدٌ مكانيّ واحد ملغيّ. يمثّل الشكل 1 الانهيارَ المتناظِر كرويًا (المتناحي spherically symmetric)، حيث بيّن أوبنهايمر وسنايدر في عام 1939 أنه إذا كانت لديك سحابةُ غبارٍ متناحيةٌ منهارة collapsing فإن هذا الانهيارَ المتناحي نحو الداخِل سوف يُفضي بالضرورة إلى نقطة متفرّدة حيث تصبح الكثافات لا نهائية، وهذا أمرٌ ليس بغريب لأن الغبار يعني انعدامَ الضغط، والأهم من

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

ذلك لأن التناظر الكروي يعني أن كلَّ شيء مركّز على نقطة مركزية، وبالتالي فليس من المستغرب أن نحصل على تفرّد في المركز، في هذه الأوضاع.

1–2) حتميّة نشوء الثقوب السوداء

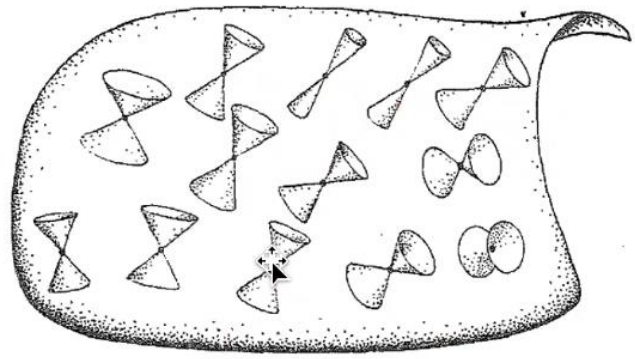
ولكن ما تمكّنتُ من إظهاره هو أنه في الوضع العَموميّ، عندما نُدخِل اضطراباتٍ perturbations على هذا النموذج، فإن التفرّد يبقى. في الواقع، يقترض الشكل 1 تناظرًا كرويًّا، ويمكنك أن ترى أن المادة تسقط إلى الداخل ولديك تفرّد في المركز، ولكن إذا تخيّلت الآن لاانتظاماتٍ irregularities، فإن نوعًا من الاعتقاد كان موجودًا بأننا لن نحصل على تفرّدات، وكان ذلك إلى حدّ كبير بسبب ورقة بحثية نشرها الروسيّان ليفشيتز وكالاتنيكوف حيث حاججا بأن المادة سوف تنهار إلى الداخل عبر إجرائيّة معقدة، مستمرّةً في الدوران ثم تنضغط للخارج مرة أخرى، وأعتقد أن هذه كانت وجهةَ نظر شائعة لدى الناس في أن الابتعاد العملي عن التناحي سوف يُجنِّبنا حدوثَ التفرّد. لقد ألقيتُ نظرةً على الورقة ولم أقتنع بقوّة أساليبها، وفي الواقع كان هناك خطأ في الورقة لم أرَه (أعتقد أن بيلينسكي –بالتعاون مع الاثنين الآخرَين– اكتشف الخطأ في الورقة ولم أكن أعرف ذلك)، ولكنّي فكّرت بشكل مستقل في الانهيار العام، وفي حاجتنا إلى معيار ثابتٍ لا يتأثّر بإدخال اضطرابٍ على الحالة الابتدائيّة.

1–3) فكرة السطح المحبوس

لنعدْ إلى الشكل 1، ولنرَ هذه الحلقةَ الصغيرة في المنتصف: عليك إضافة بُعد آخر بحيث تغدو الحلقة سطحًا كرويًا، وخصوصيتها هي أنها إذا تخيّلتَ وميضًا من الضوء على تلك الحلقة/الكرة التي أسميها سطح المصيدة أو السطح المحبوس trap surface، فإن وميضَ الضوء إلى الداخل سوف يُقلِّل من مساحة منطقتها، وبدوره يُنقِص وميضُ الضوء إلى الخارج أيضًا من مساحتها، وهذا أمرٌ غير معتاد، فأصف السطحَ بأنه محبوس. يمكن إحداثُ اضطراب على هذا السطح، ولكنك لن تتمكن من إزالة هذه الحالة، ويمكنك البرهان على ذلك من خلال تقنياتٍ سأشير إليها بإيجاز.

الشكل 2: المخروط الضوئي

قبل كل شيء، لدينا مخاريط ضوئية (الشكل 2)، وهذا جزء أساسي من الصورة، ففي كل نقطة لديك المخروط الصفري الذي يمثل الإشاراتِ الضوئيّةَ التي يجب أن تنتقل بمحاذاته أو الماديّةَ المنتشرة داخل المخروط المستقبلي، وهذه هي الطريقة التي تنتشر بها الأشياء في النسبية العامة. أمّا الشكل 3 فيمثّل سطحًا والمخاريطَ الصفريّةَ في كلّ مكانٍ منه.

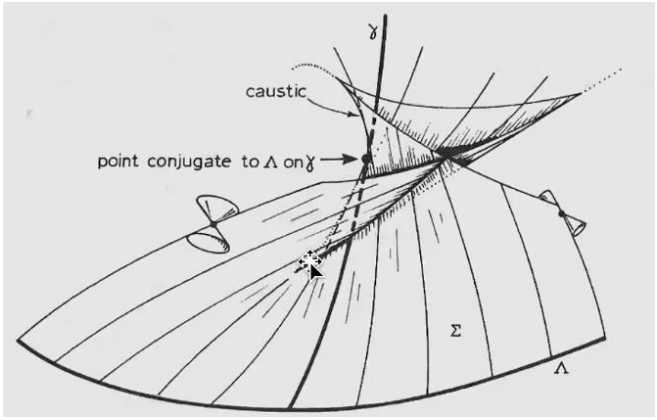


الشكل 3: مجموعُ المخاريط الضوئيّة على سطح تبيّن مستقبلَه.

1–4) مستقبل السطح المحبوس ودور حدود مستقبله

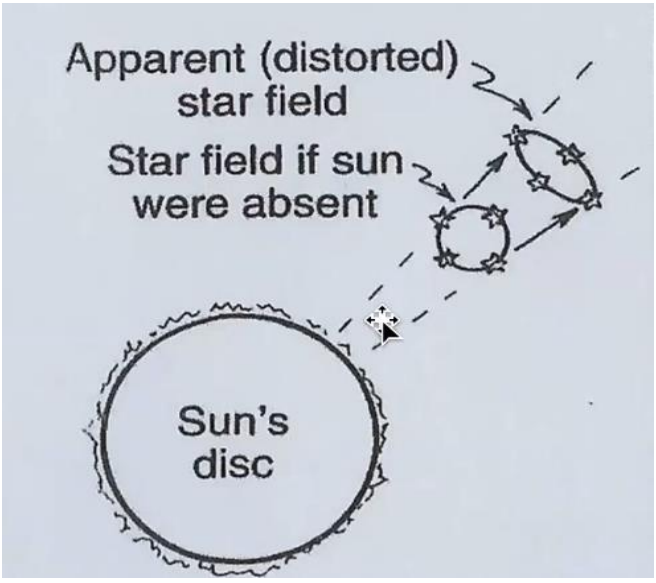
© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

لنعد إلى صورة الثقب الأسود (الشكل 1)، ولتتخيّلْ مستقبلَ هذه المنطقة الخاصّة بالحلقة (الشكل 4): هذا ما كنت أفكر فيه حقًا. انظرْ إلى السطح المحاصر المحبوس، وانظر إلى مستقبله المُمثَّل بالمنطقة المظلَّلة، ثم انظر إلى حدود هذا المستقبل. هناك أشياء مختلفة يمكنك إثباتها حول حدود المستقبل، منها أنها تسلك سلوكًا جيّدًا للغاية.



الشكل 4: الكاوية (منطقة مُغلَّف الأشعة الضوئيّة caustic)

إذا نظرت إلى الحدود سوف تتخيّل حدوث أشياء مُروِّعة مثل الكاوية (منطقة مُغلَّف الأشعة الضوئيّة caustic) ومناطق التقاطع/العبور crossing regions، لذا قد تتساءل كيف يمكنني قولُ أيّ شيءٍ عمّا يحدث، ولكن ما هو لطيف بشأن حدود المستقبل هو أن هذه الأشعة التي تكتبها الآن هي أشعة واقعة على الحدود، ولكنها عندما تبدأ في العبور، فإنها لا تبقى على الحدود، لذلك سوف تتوقف، ويتكوّن لديك سطح لطيف. لن أدخل في تفاصيل المحاججة هنا، ولكن الوصفَ السابق يعطيك صورة عامة.

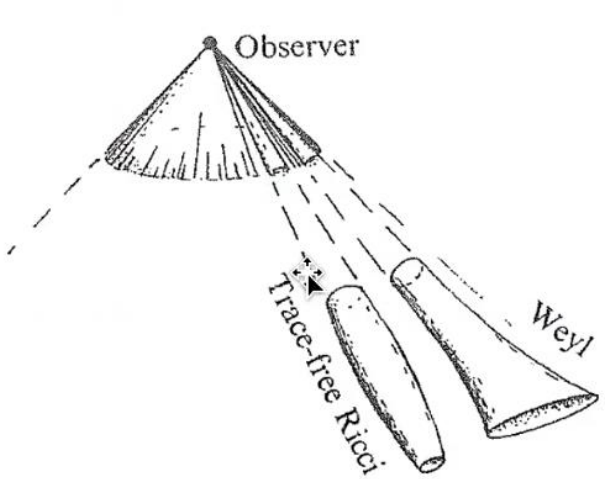


الشكل 5: الحقل الظاهري لنجمٍ، بوجود أو غياب الشمس

هناك نقطة أولى تكمن في التبئير focusing من حيث أن حدود المستقبل يتمّ إنشاؤها بواسطة أشعة الضوء، بينما تُعلمنا النقطةُ الثانية بوجود أنواع مختلفة للانحناء curvature. تمّ توضيح هذه الأنواع بشكل جيد من خلال الرصد المبكِّر الأكثر قدمًا للنسبية العامة، وعلى وجه الخصوص بعثة إدينغتون التي بحثت عن كسوف الشمس ورؤية النجوم بعدَه وقد تمّت إزاحتُها نحو الخارج outwards بسبب تأثيرات التبئير على أشعة الضوء. الآن، هناك تأثيران يمكنك رؤيتهما هنا في وقت واحد، أحدهما تأثير الشمس إذا تخيّلتَها شفافة تمامًا بدون أي معامل انكسار حيث تبرز أشعة الضوء مارّةً من بؤرةٍ بسبب البئر الجاذبيّ نحو الداخل inward، أي تلعب الشمس دورَ عدسة مكبّرة، بينما الآخر يتمثل في لعبها دورَ عدسة لا بؤريّة.

1-5) الهندسة والانحناءات في النسبيّة العامة: موتّر (ممتدّ tensor) ريتشي وموتّر فايل:

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء



الشكل 6: نوعا الانحناء، ريتشي معدوم الأثر وفايل.

حسنًا دعني أدفع الصورة التالية (الشكل 6) التي أعتقد أنها توضِّح هذا الأمرَ بشكل أفضل. إذا نظرت إلى الوراء على طول المخروط الضوئي فإنك ترى انحناء ريمان Riemann، الذي ينقسم في الحقيقة إلى جزأين أحدهما هو جزء فايل Weyl والآخر هو جزء ريتشي معدوم الأثر trace–free[1]. وفقًا لمعادلات أينشتاين، جزء ريتشي هو مصدر ومنبع الجاذبية أو الثقالة gravity (يسمح بتحديد شدة الحقل الثقالي ومدى حنْيِه للزمكان بسبب الكتلة والطاقة)، أمّا جزء فايل فهو حقل أو مجال الجاذبية الحرّ (بغياب المادّة، جزء فايل هو الجزء الوحيد غير المعدوم من الانحناء). لا يميل الناس إلى التفكير في الأمر بهذه الطريقة ولكنها في الحقيقة طريقة جيدة، إذ أنها تشبه إلى حد ما معادلات ماكسويل، حيث لديك المنبع وهو متّجه الشحنة–التيار ولديك المجال وهو مجال ماكسويل.

في النسبية العامة، يحدث الأمر نفسه، فالمصدر هو موتّر ريتشي والمجال هو موتّر فايل، ومن المفيد جدًا التفكير في هذا الفصل بين الجزأين، حيث لكلّ منهما عشرة مكوّنات. الآن، يقوم انحناء ريتشي بالتبئير، فيلعب دورَ عدسة موجبة، لذلك تتصرّف الشمس كعدسة موجبة تكبّر الصورة، أي أن الأشياء التي كانت إلى الداخل يتم دفعها نحو الخارج، فيبدو الأمر وكأنه تكبير (الشكل 5)، وهذا هو الشكل المباشر لانحناء ريتشي. أمّا الأمر الثاني فهو تأثير انحناء فايل، ويكمن في أن الدفع نحو الخارج يقلّ في الاتجاه الشُّعي radial، بينما يبرز في الاتجاه الزاوي، لذا نرى تشوُّهَ النمط الدائري إلى نمط بيضوي، وبالتالي فإن انحناء فايل يشبه عدسة لا بؤريّة (astigmatic)، تُغيّر السماتِ الدائريةَ إلى سمات إهليلجية، بينما تأثير انحناء ريتشي هو –ببساطة– التكبير، وهذه طريقة مفيدة للتفكير في الأشياء. الآن، إذا كان لديك الكثير من انحناءات فايل المهتزّة oscillating Weyl curvature، فإنها تسلك سلوكَ موتّر ريتشي، إذ يبرز نوعٌ من التأثير المتبقي residual يقابل في الحقيقة طاقةً.

تمنحك الطاقةُ في المادة تبئيرًا وتركيزًا موجبًا، بينما تأتي الطاقة في الموجة الثقالية من التذبذب والاهتزاز بين اللاتبئير في اتجاه واحد ثم في الاتجاه الآخر، فينجمَ حدُّ تصحيحٍ correction term يعطي تركيزًا وتبئيرًا، لذا فإن التبئير يكون دائمًا إلى الداخل، وهذه هي الحقيقة التي تمكّن من إظهار أنه عندما نبدأ بالأشعة المُركَّزة المتبؤِّرة focus نحو الداخل، فإنها ستستمر في التبؤّر والتركيز إلى الداخل، ويتولّد لدينا ذاك السطح المحبوس الذي كنت أصفه (الشكل 4). دعني أعدْ إلى الصورة، إذ نجد أن مساحةَ حدود المستقبل تنقص بالضرورة، وبالتالي نحصل على شيء يتمركز نحو الداخل، ما يعطي سطحًا متراصًّا compact surface يقود إلى تناقض مع التطور انطلاقًا من سطح أولي غير متراصّ non–compact. لن أدخل

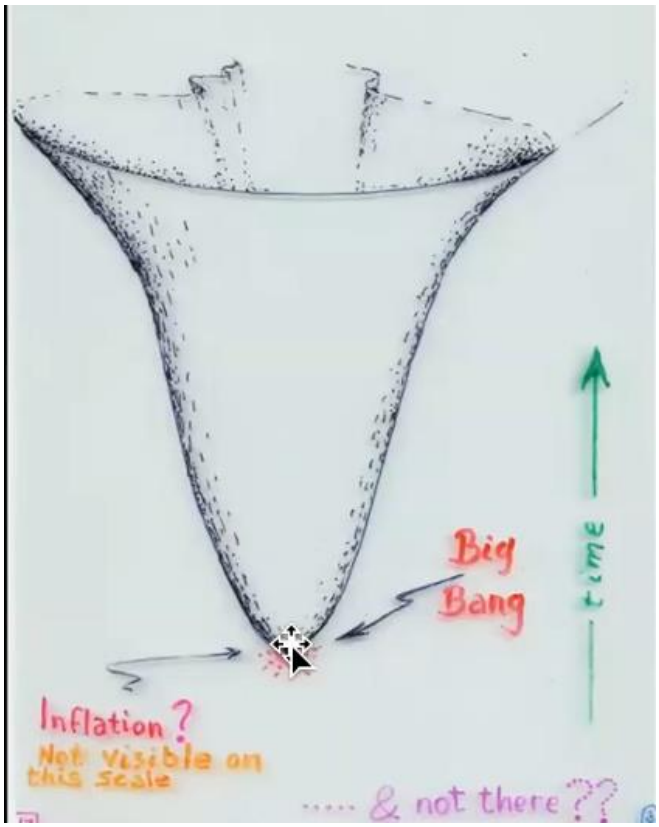
[1] يُحلَّل موتّر ريمان للانحناء إلى موتّر فايل عديم الأثر وموتّر ريتشي، وكلاهما بعشر درجات حريّة، كما يُحلَّل موتّر ريتشي إلى سلّميّة ريتشي (درجة الحريّة الواحدة الموافقة للأثر) وموتّر ريتشي معدوم الأثر. يتناسب موتّر ريتشي مع موتّر الطاقة–الإجهاد للمادّة وبالتالي ينعدم بغياب المادّة (الحقول غير الثقاليّة) حيث لا يبقى هنا إلاّ موتّر فايل الذي يصف الموجات الثقاليّة، والذي يعبّر عن تغيّر الشكل لأنه الجزء الصامد تماثليًّا (أمام تغيير المقاس conformally–invariant)، بينما موتّر ريتشي يعبّر عن تغيّر الحجم. في كثيرٍ من الأوضاع، مثل الضوء، تكون المادّة بأثر معدوم، وبالتالي يكون كذلك موتّرُ ريتشي. المترجم

في تفاصيل ذلك، ولكن حجتي كانت خرقاء بعض الشيء في نقطة ما، بينما استطاع تشارلز مايسنر إنتاجَ حجة أكثر أناقة، تُظهِر التناقض بين السطح غير المتراصّ الأولي والحدود المتراصّة compact لمستقبل سطح المصيدة.

لا أريد الخوض في التفاصيل أكثر من ذلك، ولكن دعنا الآن نتحدث عن...

2) الأنتروبيّة وسهم الزمن

2-1) مفارقة الأنتروبيّة عند الكون المبكّر

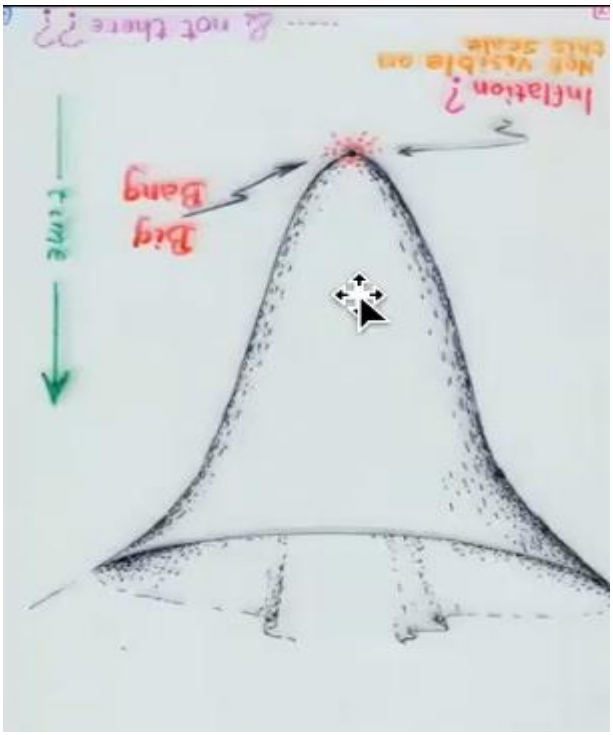


الشكل 7: حدوث متفرّدة الانفجار العظيم

عندما ألقيت محاضرة عن هذا الأمر في كلية كينجز بلندن عام 1964، كان ستيفن هوكينج –وفقًا للفيلم– هناك، مع شرارات تخرج من رأسه أو شيء من هذا القبيل، ولكنه في الواقع لم يكن حاضرًا في تلك المحاضرة. ومع ذلك، سمع دينيس شياما Sciama الذي كان في كامبريدج في ذلك الوقت عن محاضرتي، ثم ألقيتُ محاضرة أخرى في كامبريدج، وتحدثتُ عن تفاصيل الحجة مع ستيفن هوكينج، ثم أعتقد أن جورج إليس بعدها كان حاضرًا في مناقشة خاصّة أجريتها معهما، وقد طوّرا الحججَ (وخاصّة هوكينغ) لتطبيق نظريّة حتميّة التفرّد على علم الكونيات.

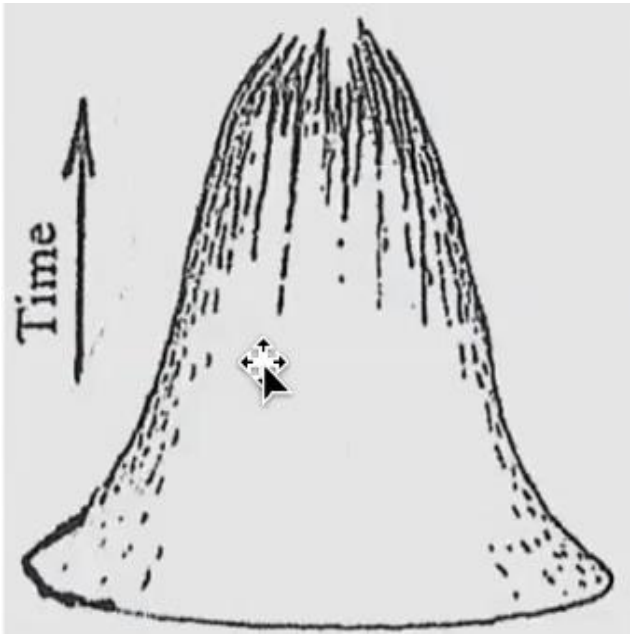
لدينا هنا الصورة (الشكل 7) عن تمدّد الكون واتّساعه، حيث الانفجار العظيم في الأسفل، والزمن يصعد إلى الأعلى. تُبيّن الصورة أيضًا التوسّع الكوني المتسارعَ الذي نراه بسبب ما يسميه الناس الطاقة المظلمة dark energy، وأعتقد أنه يتوافق تمامًا مع الحدّ الكوني cosmological term في معادلات أينشتاين، والذي يعني... ثابتًا كونيًّا موجبًا، وأيًّا كان التعليل، يبدو أن التمدّدَ الأسي يُفسَّر تمامًا بالثابت الكوني الموجب الذي أدخله أينشتاين لسبب خاطئ، فقد أراد كونًا ساكنًا static، ثم حاول التراجع عن ثابته الكوني الموجب، ولكن –لحسن الحظ– بمجرد اقتراحه أخذه الناس على محمل الجد، وهو أفضل تفسير لهذا التمدّد الأسي. هذه ليست النقطة التي أريد توضيحها. في الشكل 7، قد ترى في الخلف شيئًا معقدًا يحدث، وذلك لأنه من الصعب رسم كون مفتوح، وكنت أفترض أن الكونَ قد يكون مفتوحًا مكانيًّا أو مغلقًا مكانيًا، وهذا لا علاقة له بالحجج التي أريد استخدامها، ولكن إذا كان مفتوحًا، يمكنك أن تتخيّلَ استمرارَ ذاك الشيء في الخلف أو عدمه، ولكن هذا لا يهم. بشكلٍ تقريبي، ما استطاع ستيفن إظهارَه باستخدام التقنيات، حيث كتب ثلاث ورقات بحثية في الجمعية الملكية، ثمّ اجتمعنا معًا وكتبنا الورقة الرابعة، كان تبيانَ وجودِ اعتبارات عامة جدًا تُفيد بأنه لا يمكن التخلص من هذه المتفرّدة الأوليّة عن طريق إحداث اضطراب عليها.

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء



الشكل 8: الكون المنسحِق collapsing

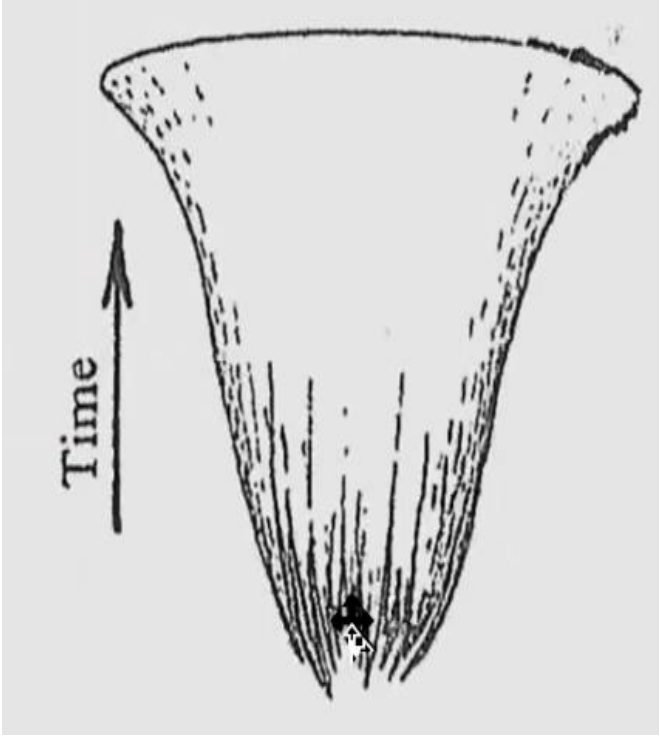
هناك مشكلة كبيرة حول هذا الأمر، إذ يميل الناس إلى الاعتقاد بأن الانهيار أو الانسحاق الجاذبي gravitational collapse ينجم أساسًا عن قلْب الزمن للانفجار العظيم، وبالتالي لدينا في الشكل 8 تصوّرٌ لكون منهار، عبر إجراء عمليّةِ قلْبٍ وعكْسٍ على الشكل 7، ولكن إذا تخيّلت وجودَ لاانتظاماتٍ، فلن تبدوَ إطلاقًا مثل الانفجار العظيم، بل ستظهر لاانتظاماتٌ معقدة تسبّب ثقوبًا سوداء، يمكنها أن تتجمّد، وسنحصل على الشكل 9 بدلًا من الصورة الجميلة للشكل 8.



الشكل 9: الكون المنسحِق مع وجود لاانتظاماتِ ثقوب سوداء

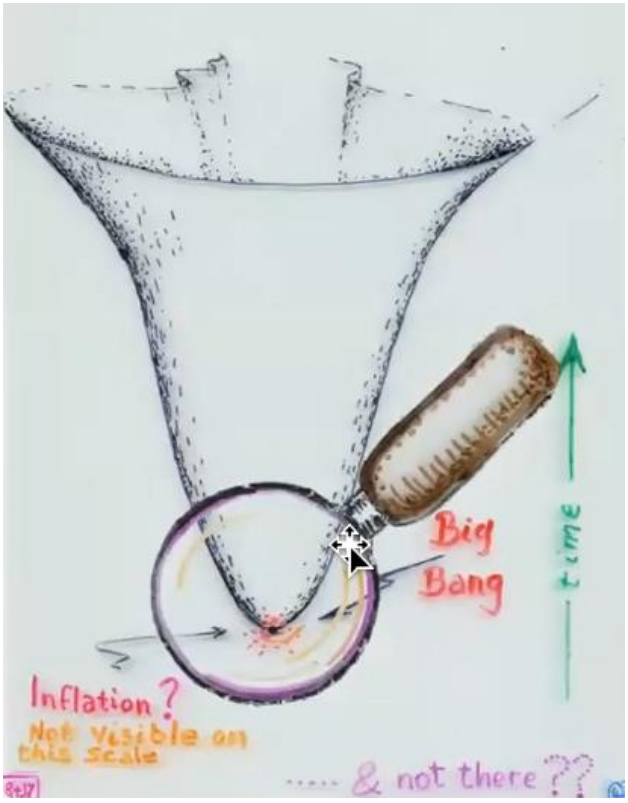
لدينا في الشكل 9 انهيارٌ معقد للغاية، رسمته تخطيطيًا على هذا النحو مع الكثير والكثير من متفرّدات الثقوب السوداء، التي سوف تتجمد فنحصل على فوضى لا تُصدَّق بدلاً من أن يصبح انحناء فايل صغيرًا جدًا (أذكر هنا أن انحناء فايل في الانفجار العظيم يبدو صغيرًا جدًا)، وفي المستقبل البعيد، سنحصل على حالة غير منتظمة جاسئة جدًا، وستكون هذه هي الحالة الأكثر شيوعًا، وبدا لي لغزًا كبيرًا لماذا لم نحصل على شيء مماثل في الانفجار العظيم (الشكل 10).

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء



الشكل 10: لماذا حالةُ انفجارِ الكون العظيم البدئيّة لا تمتلك لاانتظاماتٍ، بل هي عالية الانتظام.

يمثّل الشكل 10 حالةً ابتدائيّة معقدة للغاية لا تماثل ما لدينا بالفعل، وأتذكر أنني تحدّثت مع جيم بيبلز في وقت ما في مطلع القرن الحادي والعشرين، وطرحت السؤال: "لماذا لم يأخذ علماء الكونيات في الاعتبار هذه المواقف المعقدة؟ هناك العديد من الأمثلة على مواقف معقدة للغاية معروفة، ومعظمها غير معروف"، فقال: "حسنًا، لأن الكون ليس كذلك". أفترض أنه اعتمد في إجابته على اتّساق الخلفية المكروّية الكونية cosmic microwave background، وكان هذا بالنسبة لي بمثابة كشف عظيم، لأنه أفاد بعدم حدوث هذه الحلول المعقّدة للغاية، في حين أنه من المتوقع عمومًا وجودُها باحتمال كبير جدًا. أعني أنه يمكنك حساب أنتروبية الثقب الأسود باستخدام صيغة بيكنشتاين–هوكينج، لترى أنها هائلة، وبالتالي في الزمن العكسي لدينا احتمالٌ كبير جدًا لوجود هذه الحالات ذات الأنتروبية العالية، فلماذا إذن لا نرى الكون فيها؟ بدا لي ذلك لغزًا كبيرًا.



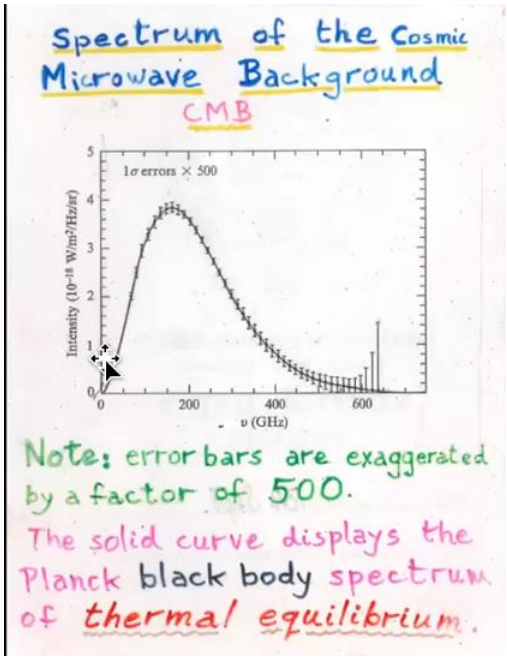
الشكل 11: حتى بوجود التضخّم، أنتروبيّة الحالة البدئيّة غير عالية

بالطبع، أحد التفسيرات التي يميل الناس إلى طرحها هو أنه يجب علينا –بطريقة ما– أن نأخذ التضخم في الاعتبار (الشكل 11)، ولذلك تخيّلْ في الشكل 12 أنه لدينا عدسة مكبّرة تُرينا شكلَ التضخم، وتكمن الحجةُ هنا في وجود شيءٍ يشبه التمدّد الأسّي في الكون المبكر جدًا. لكن هذا لا يحل المشكلة، لأننا قد نسأل لماذا لا يكون التضخّم موجودًا في المستقبل أيضًا؟ في الواقع، يمكنك إدخال حقل التضخم، ولكنه لن يُحدِث أيَّ فرقٍ يُذكَر في الصورة، لذا فهو لا يتغلب على مشكلة الحالة الأولية الغريبة جدًا للكون.

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

الشكل 12: لا يحلّ وجودُ التضخّم لغزَ أنتروبيّة الحالة البدئيّة

الآن، هناك ميزة أخرى أريد الإشارة إليها، وهي معطيات القمر الصنعي (الساتِل) كوبي COBE المبكرة جدًا لخلفية الموجات المِكروية، مُعطيةً هذا الرسم البياني المشهور جدًا في الشكل 13.



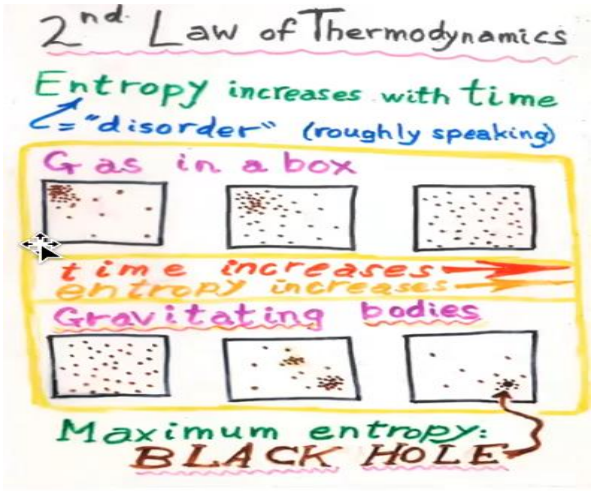
الشكل 13: طيف الخلفيّة المكروية الكوني وفق ساتِل COBE

نرى هنا منحنيَ خلفيّة الموجات المِكروية، حيث الشدة (التردّد) على المحور الشاقولي (الأفقي)، وهو قريب جدًا من منحني بلانك بشكل استثنائي، إذ –كما ترون– أشرطة الخطأ error bars في الشكل مُكبَّرة بعامل 500. لذا، حتى في أسوأ الاحتمالات عند الطرف اليمين للمنحني، تقع معطيات الرصد ضمن سماكة خطّ المنحني، وما نراه هو منحنٍ مثالي لبلانك من أجود ما حصلنا عليه في الفيزياء على الإطلاق.

ولكن هذا الأمر يُخبرنا بأن ما نراه من المادة والإشعاع يكون في حالة توازن حراري. ماذا يعني ذلك؟ يعني أنه لدينا قيمة قصوى للأنتروبية. بدا لي الأمر متناقضًا، لأنك تنظر إلى أقدم شيء في الكون، أو بالأحرى أقدم شيء نراه. يجب أن تزداد قيمة الأنتروبية مع مرور الزمن أثناء تطوّر الكون، لذا، إذا رجعت بالزمن إلى الوراء، يجب أن تنخفض الأنتروبية باستمرار، بينما أقدم شيء نراه يوافق قيمةً قصوى للأنتروبية! بدا لي هذا غريبًا جدًا.

2-2) الأنتروبية والانتظام/التجانس: الجاذبية تغيّر قواعد الأنتروبية

بالطبع، الكون يتمدّد، لكن ذلك ليس هو الإجابة، ودعني لا أخوض في تفاصيل ذلك. الحقيقة هي أن ما نراه هو في الواقع أنتروبية أعظميّة فيما يتعلق بالإشعاع والمادة، حيث الإشعاع الكهرومغناطيسي للمادة في حالة توازن حراري تقريبًا، لذا دعونا ننتقل إلى الأمام ونرى ما تخبرنا به صور الشكل 14 حقًا.



الشكل 14: ينصّ القانون الثاني على ازدياد الأنتروبيّة مع الزمن

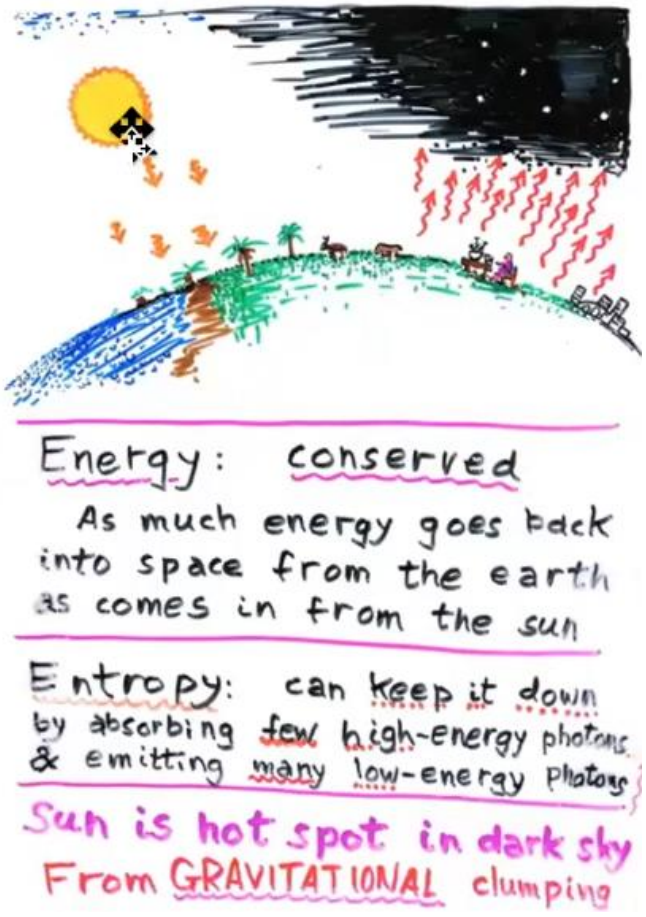
© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

سأنتقل في الزمان من اليسار إلى اليمين. في الأعلى ثلاثة أشكال: تخيّل غازًا موضوعًا في صندوق أصغر، مقيدًا بأن يكون في زاوية واحدة، تفتحه فينتشر. تزداد الأنتروبية (أو الفوضى disorder) من اليسار إلى اليمين، مع تزايد الزمن، ويزداد الاتّساق/التجانس والانتظام (uniformity) من اليسار إلى اليمين. هذا هو ما تتوقعه عادةً للنظم الفيزيائيّة.

ولكن بالنسبة للجاذبية، الأمر مختلف: تخيل صندوقًا مجرّيًا به الكثير من النجوم تدور ضمنه، والآن تزداد الأنتروبية من اليسار إلى اليمين مع تزايد الزمن، ولكن لديك صورة معاكسة تمامًا فيما يخصّ الانتظام. يوافق الاتّساقُ/التجانسُ قيمةً للأنتروبية منخفضةً جدًا، بينما ما يمثّل أنتروبيةً مرتفعةً هو الثقوب السوداء. في الواقع، أنتروبية الثقب الأسود مرتفعة للغاية، فعندما تفكّر في صيغة بيكنشتاين–هوكينغ، تراها ترتفع بشكل هائل عند وجود ثقوب سوداء.

لذا ما تراه هو هذا المزيج الغريب بين الإشعاع (أعلى الصورة: الإشعاع الكهرومغناطيسي والمادّة)، أعني الإشعاع المغناطيسي والمادة في حالة توازن، وهي منتشرة بالتساوي، بينما تكون درجاتُ الحرية للجاذبيّة غيرَ مُفعّلة، لذا لديك اتّساق في الأعلى اليمين وفي الأسفل اليسار، لكن هذا يعني أن درجات الحرية الجاذبيّة كانت مُقيّدةً لتكون منخفضةً لسبب ما، وهذا لغز حقيقي. لماذا يجب أن تكون مُقيّدة بحيث تكون منخفضة؟ أهو فِعْل إلهي أو ما شابه؟ حسنًا، نحن نحاول دراسة الفيزياء، لذا لا نريد التحدث عنها بهذه الطريقة.

يجب أن أذكر هنا النقطةَ التي طرحها شرودنجر، وهي وثيقة الصلة بكل هذه الاعتبارات. كيف نستفيد من الأنتروبية المنخفضة؟ حسنًا، ماذا نستفيد من الشمس؟ كما ترى في الشكل 15، تُطلِق الشمسُ أشعتَها نحو الأرض ما يسمح باستمرار الحياةِ عليها، ويقول الناس إننا نحصل على الطاقة من الشمس. لكن شرودنجر كان صائبًا عندما أشار إلى أن هذا خطأ، لأن طاقة الشمس تتلاشى تقريبًا. بالطبع هناك احتباس حراري، وبالتالي فهي لا تختفي تمامًا، لكن التأثير الرئيس هو أنها تدخل من الشمس خلال النهار، وتعود إلى السماء ليلًا. مرة أخرى، لا نحصل على الطاقة من الشمس، ما نحصل عليه أساسًا هو التباين بين الشمس، وهي نقطة ساخنة في سماء مظلمة، وما حولها، لذلك ما نستفيد منه هو التباين بين البقعة الساخنة والسماء المظلمة.



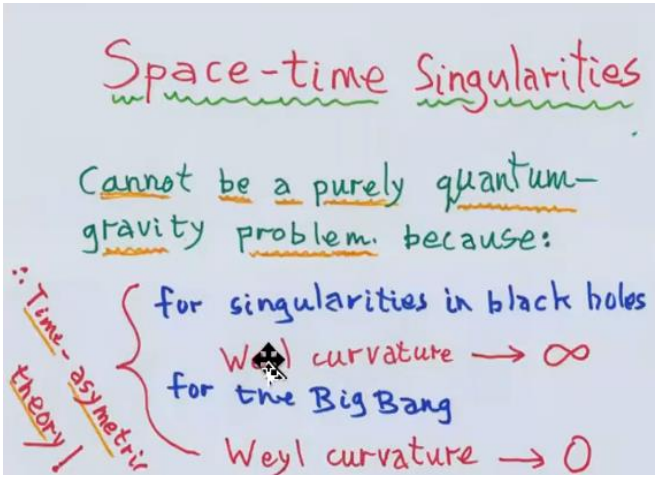
الشكل 15: يعود الفضل في الحياة على الأرض للأنتروبية المنخفضة التي تُشعّها الشمس إلينا

تعني البقعةُ الساخنة أنّ لدينا فوتوناتٍ واردةً عاليةَ التردد نسبيًا، بينما في السماء المظلمة لدينا فوتوناتٌ مبتعدةٌ عنا منخفضةُ التردد نسبيًا، لذا نحتاج إلى عدد أكبر

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

بكثير من الفوتونات لحمْل كمية الطاقة نفسها التي ترد من الشمس. تكمن النقطةُ الأساسية هنا في أن الشمس بقعة ساخنة ضمن سماء مظلمة، وأنك تستخدم حقيقةَ أن الطاقة تنتشر إلى درجاتِ حريةٍ أكبر بكثير عندما تخرج، ما يقلّل أنتروبيّة الأرض، وهذا ما تعيش عليه النباتات، والكائنات الحيّة. وبالتالي لا نستفيد حرفيًّا من وجود الشمس كبقعة ساخنة، بل من التباين بينها والسماء المظلمة، ولو كانت درجة حرارة السماء مساويةً لتلك التي للشمس، فلن يكون للأخيرة أيّ فائدة لنا على الإطلاق. نحن نستفيد من اختلال التوازن، وهذا الاختلال يأتي من جميع أنواع الفيزياء النووية التي تحدث في الشمس، لكن النقطة الأساسية هي أنها موجودة من الأساس، وهي موجودة بسبب الثقالة الجاذبيّة. لولا الحريّةُ الناجمة عن الجاذبيّة والمُكتسَبة أثناء إجراء تكتّل وتراكم المادة الموزَّعة بشكل منتظم سابقًا، فلن نتمكن من العيش على الأرض، لذا فإن النقطة الأساسية هي أن الانتظامَ الموافِق لانخفاض الأنتروبية في درجات الحرية الجاذبيّة، هو ما نعيش عليه.

2-3) علاقة انحناء الزمكان مع الأنتروبيّة



الشكل 16: قيمتا موتّر انحناء فايل عند متفرّدتَي الثقب الأسود والانفجار العظيم مختلفتان تمامًا

حسنًا، إذا عدنا إلى الانفجار العظيم، وهو شيء نراه، فإن انحناءَ فايل يصف درجاتِ الحريّةِ الجاذبيّةَ المضبوطةَ عنده تقريبًا على الصفر (بينما انحناء ريتشي كبيرٌ في الانفجار العظيم حيث كثافة المادّة عالية)، لذا فإن التفرّد في الانفجار العظيم أمرٌ مثيرٌ للفضول، حيث انحناء فايل معدومٌ تقريبًا، ولدينا تباين هائل بين متفرّدة الماضي –أي الانفجار العظيم– والمتفرّدات المستقبلية في الثقوب السوداء، والتي لا تشبه بعضها البعض[2].

2-4) الجاذبيّة الكموميّة غير متناظرة بالنسبة للزمان

مهما حاول الناس قولَه في أن متفرّدات الماضي والمستقبل متماثلة وفي أنها جزءٌ من القصة نفسها، فإن الأمرَ ليس كذلك! حسنًا، لماذا لا تكون الجاذبيّة الكمومية هي الإجابة؟ بالتأكيد نحن نبحث عن نظريةِ جاذبيّةٍ كموميّة لمحاولة تفسير التفرّدات، من حيث أنه إذا لم يكن هناك تفردات فلأنها –ربّما– مُرَوّضة tempered بطريقةٍ ما عبر الجاذبية الكمومية. نعم، ربّما يكون الأمر كذلك، ولكن في حال كانت الجاذبيّة الكمومية هي ما يتعامل مع التفرّدات، فهي نوع غريب جدًا غير متناظر asymmetric تمامًا بالنسبة للزمن، وهذا ما اعتقدته منذ وقت طويل: نحن نبحث عن نظريةٍ غير متماثلة تمامًا بالنسبة للزمن.

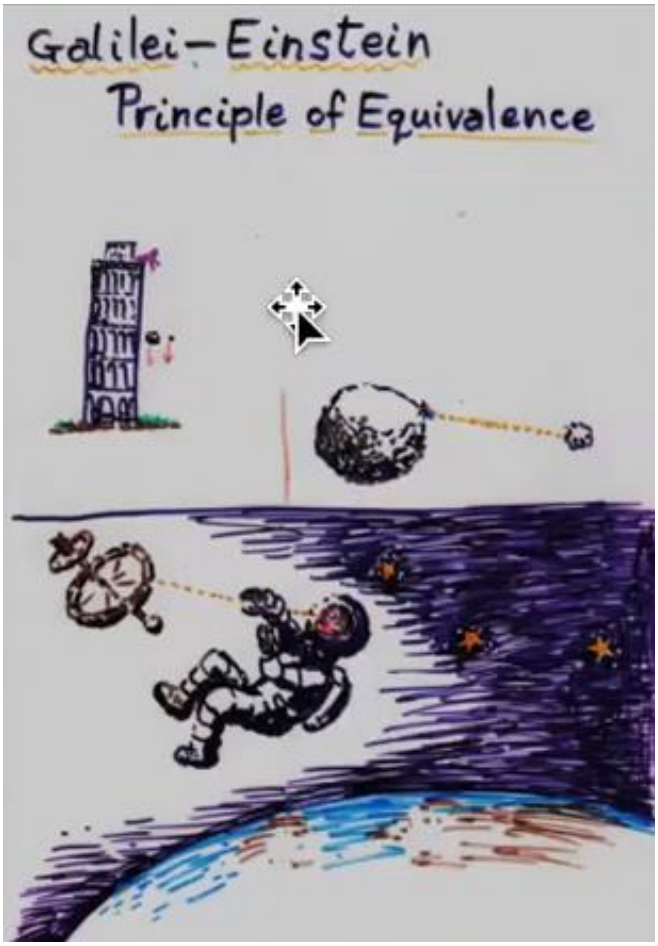
3) الجاذبية وميكانيك الكمّ

3-1) مبدأ التكافؤ: الجاذبيّة وحيدة في تحقيقها لهذا المبدأ، فالقوى الأخرى اللاثقاليّة لا يمكن إلغاؤها باختيار مرجع عطالي

في الواقع، هناك أسباب للاعتقاد بأن الجاذبية الكمومية –أيًّا كانت طبيعتُها–، أو لنقل ذلك بطريقة مختلفة لأنّني أفضّل أن أقول إن الجمع بين النسبية العامة

[2] تعبّر متريّةُ FRW التي تصف كونَنا وتتنبأ بالانفجار العظيم عن زمكان مستوٍ تماثليًّا، وبالتالي انحناء فايل معدوم فيمكن تعليل فرضيّة بنروز بانعدامه عند متفرّدة الانفجار العظيم. أمّا بالنسبة لمتريّة شفارتزشيلد التي تصف ثقبًا أسودَ فتعطي حتى بغياب المادّة خارج الأفق قيمةً غير معدومة لانحناء فايل، ومع سعي القوى المدّ–جزريّة tidal إلى اللانهاية مع الاقتراب من التفرّد فيمكن تعليل سعي انحناء فايل إلى قيمٍ لا متناهية في الكبر عند متفرّدة الثقب الأسود. المترجم

وميكانيك الكم هو مزيج غريب جدًا. لماذا أقول ذلك؟ لأن الجاذبية تتميز بميزة رائعة لا تمتلكها أيّ قوّة فيزيائيّة أخرى، وهي مبدأ التكافؤ، الذي نشرحه في الشكل 17. ربما جاليليو –ولا أعتقد أنه فعل ذلك بنفسه– كان يفكّر في حالة سقوط صخرة كبيرة وصخرة صغيرة من برج مائل، وأنه أثناء سقوطهما يُلغى تأثير الجاذبية، فينجم مبدأ التكافؤ في أن المرجع المتسارع بغياب حقل ثقالي يكافئ مرجعًا عطاليًّا تخيّم فيه الثقالة، ما يعني أنهما سوف تصلان للأرض في الوقت نفسه. إن الثقالة الجاذبيّة هي حقل القوة الوحيد في الفيزياء الذي يتضمّن مبدأ التكافؤ، وإذا كانت هذه هي السمة التي تستند إليها النسبية العامة، فقد تمكن أينشتاين من ابتكار نظرية مبنية على مبدأ التكافؤ، حيث يمكنك إلغاءُ حقل الجاذبيّة محليًا بالسقوط الحر.

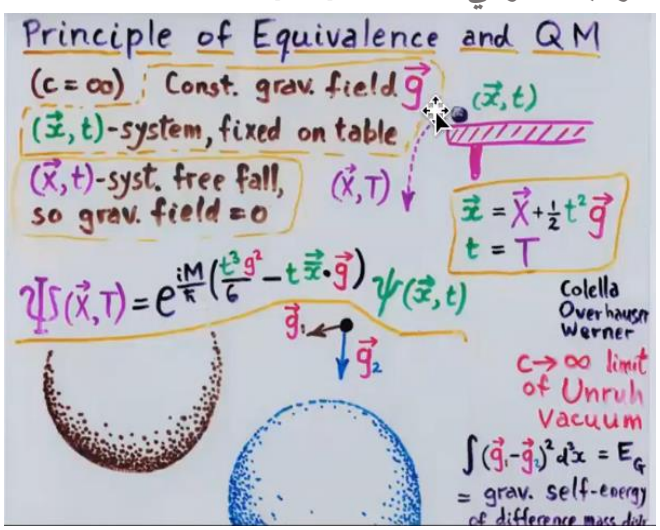


الشكل 17: مبدأ التكافؤ

لقد لفت انتباهي كمفارقة كبيرة في تاريخ العلم أن النظريةَ التي طوّرت الفيزياء – كبلر، غاليليو، ثم كتاب المبادئ لنيوتن – درست جميعَ أنواع القوى الأخرى، ليس الجاذبيّة فحسب، بل أيضًا أدّى فهمُنا عمومًا إلى أنواع أخرى من القوى: الكهرومغناطيسية، وفيزياء الجسيمات، وجميع أنواع القوى الأخرى، حيث يشمل الإطارُ العام معادلاتِ هاميلتون ولاغرانج، وما شابه ذلك. ومع ذلك، فإن النسبية العامة تُعتبر استثناءً من كل هذه الأمور، وهي مثال رائع مثير للفضول، وكان لا بد من أن تستند النسبية العامة إلى هذا الاستثناء. لدينا هنا في الشكل 16 محطةُ فضاء مستقبلية، ورائد الفضاء يطفو بحرية. بسبب مبدأ التكافؤ، ورغم وجود الأرض هناك، بالكاد يلاحظ رائد الفضاء وجودَها، وهذه هي السمة الغريبة للنسبية العامة.

3–2) التحدّي الكبير: تعارض ميكانيك الكمّ مع مبدأ التكافؤ

تجربة ذهنيّة: يمكن تحويل مسائل الثقالة في النسبية العامة إلى مسائل في مراجع متسارعة تختفي فيها الثقالة، بينما في النظم الكمومية (مثل الجسيمات في حقل ثقالي) يغدو هذا التحويل غيرَ متّسقٍ مع مبدأ التراكب الكمومي superposition

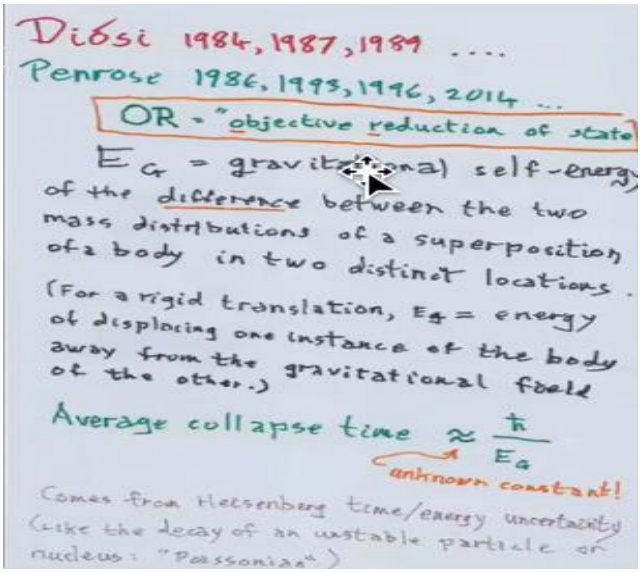


الشكل 18: مبدأ التكافؤ وميكانيك الكمّ

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

يمكنك القيام بحسبةٍ ذات صلة إذا كنت تتخيل تجربةَ كرةٍ تقع من على طاولة (الشكل 18)، وتريد أخذ مجال جاذبية الأرض بعين الاعتبار. هناك طريقتان للقيام بذلك. تكمن إحداهما –وهي الطريقة التي يتبعها عادةً فيزيائيو الجسيمات أو ميكانيك الكم– في إضافة حدٍّ إلى الدالّة الهاميلتونيّة يشمل كمون الثقالة، ثم إجراء الحساب كالمعتاد. هذا هو المنظور النيوتني للمسألة. أمّا الطريقة الأخرى وفق المنظور الأينشتايني، فتقول: "لا، لا تفعل الحسْبةَ بهذه الطريقة. انتقل إلى مرجعٍ ساقط سقوطًا حرًّا، وبالتالي لا يوجد مجال جاذبية ضمنه". لذا، هناك طريقتان لإجراء الحساب نفسه، واللافت للنظر أنهما تكادا تكونان متطابقتين، وفي الشكل 18 توافق الإحداثيات أرجوانية اللون مرجعَ السقوط الحر، بينما الخضراء اللون توافق المنظور النيوتني، الفرق بينهما هو عاملُ طورٍ phase factor. قد تقول: "لا يهم، إنه مجرد عامل طور، وما نقوم به لاحقًا هو تربيع المطال (الطويلة modulus) على أي حال"، ولكن إذا نظرتَ بعناية أكبر، سوف ترى أن عامِل الطور يتضمن حدًّا تكعيبيًّا للزمن مضروبًا بمربع مجال تسارع الجاذبية. يعني هذا أنّ لدينا فراغًا مختلفًا، أي أن حالةَ الخلاء مختلفة في منظور نيوتن عنها في منظور أينشتاين، قد تقول: "من يهتم؟ التزم بخلائك وستكون بخير".

لا بأس، هذا حسن حتى تبدأ بالتفكير في تراكبٍ superposition بين مجالَين جاذبيَّين مختلفَين، وهنا تبدأ بالقلق. تخيّل أنك تضع كتلةً إضافيّة من المادة، وعندها لا يقتصر الأمرُ على مجال الأرض فقط، بل تفكّر الآن –في تجربتك– في تراكبٍ بين مجالَين جاذبيَّين. إذا حاولت استخدام منظور نيوتن، فيمكنك فعل ذلك بالطبع لأن الحقلَ الإضافي يُعامَل تمامًا مثل أيّ قوة أخرى. ولكن ما الذي سيقوله منظور أينشتاين: "لا، الحقل الجديد مثل التسارع، وعلينا التخلّص منه". يمكننا فعل ذلك موضعيًّا، لكن لا يمكننا فعله شموليًّا globally، لأنه لا يمتدّ عالميًا، لذا فنحن في ورطة. كل ما نستطيع فعله في هذه المرحلة هو القولُ إننا نحاول قياس الخطأ في الطاقة والقيامُ بمكاملةٍ عبر الفضاء، فنحصل على عدمِ يقينٍ في قياس الطاقة النهائيّة، ما يعطينا قياسًا لعمرِ حياةٍ افتراضي للتراكب.



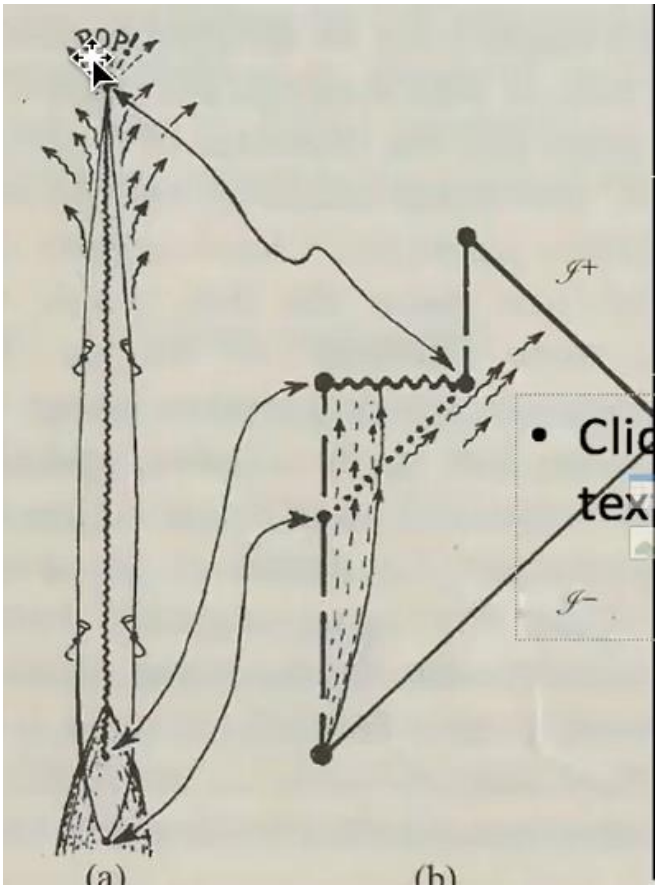
الشكل 19: بسبب الثقالة، هناك عمرُ حياةٍ لتراكبِ حالتَين يؤول خلالَه إلى إحدَيهما

لا أريد الخوض في تفاصيل ذلك، لكنني أرى أن هناك حججًا قوية تقول بأن تأثير الجاذبيّة على ميكانيك الكمّ سوف يكون أكثر أهمية بكثير من تأثير ميكانيك الكمّ على الجاذبيّة، والنقطة التي أطرحها هنا هي أنه إذا حاولتَ استيعاب مبدأ التكافؤ، فستجد نفسك أمام صورة هذا الانهيار التي وضعها ديوشي Diosi في الأصل، ثم التقطتُها باستخدام هذا النوع من المحاججة التي عرضتها عليك للتوّ، والتي تُظهر أنها متأصّلة في منظور أينشتاين للنسبية العامة، وبما يعطينا عمرًا للتراكب (الشكل 19). لذلك كلّه، أحاول القول إن مسألةَ القياس هي في الواقع مسألةٌ تتعلّق بنظريّةٍ –لن أسمّيَها جاذبيّةً كمومية لأن هذا المصطلح أشبه بتطبيق الجاذبية gravitize على

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

ميكانيك الكم، بل أفضّل قولَ الجمع بين الجاذبية وميكانيك الكم– لن تكون واحديّة unitary.

3-3) الحل المقترَح: انتهاك الواحديّة في اجتماع ميكانيك الكمّ والجاذبيّة، ومفارقة المعلومات



الشكل 20: مفارقة فقد المعلومات

هذا يتعلق –أنا متأكد من أننا سنرى هذا النوع من الحجج يقدمه آخرون لاحقًا– بما يسمى مفارقة المعلومات أو مفارقة المعلومات في النسبية العامة عند الانهيار إلى ثقب أسود، انظر الشكل 20 حيث يبدو أن المعلومات تُتلَف، فكيف يمكن أن يكون ذلك إذا كنّا ننشد نظرية واحديّة، وإذا رسمتَ مخططًا مطابقًا تماثليًا conformal، فستجد أن المتفرّدةَ من طبيعة مكانية spacelike، ومن الصعب جدًا عليّ فهمُ كيف يُمكننا الحصول على المعلومات التالفة، لأنه –ببساطة، ما لم تنتهك مبدأ عدم استنساخ ميكانيك الكم no cloning quantum mechanics أو ما شابه– ستُدمَّر معلوماتُك عبر المتفرّدة، لكن هذه ليست مشكلة بالنسبة لي، لأن ميكانيك الكم كما نستخدمه في مسألة القياس –أي عندما تتسبّب بانهيار collapse الدالّة الموجيّة، وفقًا لكيفيّة تطبيق ميكانيك الكمّ على العالَم– ليس واحديًّا.

ما أحاول قولَه هو إنه عندما تكون الجاذبيّة مهمة، ستراها بوضوحٍ غيرَ واحديّة. الآن، أعلمُ أن هذا ليس الرأيَ الذي يُعبِّر عنه كثيرٌ من الناس يدّعي بوجوب نَشْدِ نظريةٍ واحديّة للجاذبيّة الكمومية. أحاول مناقشة اعتبارات الثقوب السوداء وما إلى ذلك، لتخبرَنا أنها ليست واحديّة، وهذه الاعتبارات هي من النوع الذي قدّمته للتو، أي تتعلّق بإعطاء عمرٍ، أو عدمِ يقينٍ للطاقة، تأخذ مقلوبَ اللاحق فتحصل على السابق، تمامًا مثل علاقات عدم اليقين في الزمن والطاقة وفقًا لهايزنبرغ، حيث لديك عدمُ يقينٍ في الطاقة ما يمنحك عمرًا. نعم، عادةً ما تجادل في الاتجاه المعاكس: إذا كانت لديك نواة غير مستقرة، فسيكون لديك عمر حياةٍ لها، وهذا العمر متناسبٌ عكسًا مع الارتياب في طاقة النواة. ما أقوله هو أنه إذا كان لديك ارتيابٌ في الطاقة، وهو ما يبدو أنك تمتلكه إذا أخذتَ منظور أينشتاين، فهذا يمنحك عمرًا، وبالتالي لا توجد لديك واحديّة.

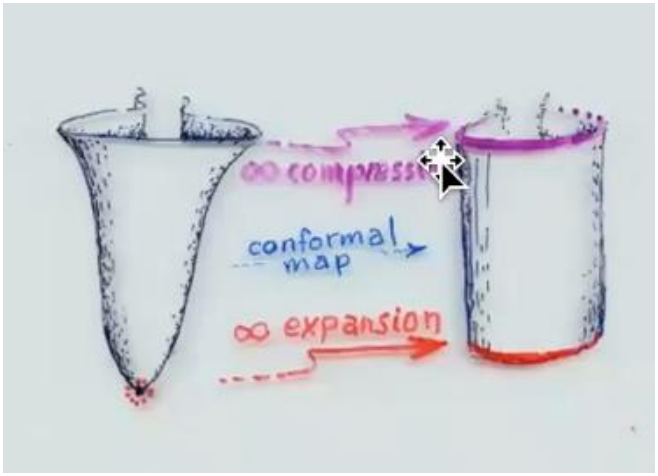
مع أنني أعلم أن هذا يُعدّ انتهاكًا لحرمات الكثيرين، إلا أنني أحاول القول إنه عندما يكون لديك ثقوب سوداء، فهي تجعل الوضعَ متعلّقًا بالجاذبيّة إلى حد كبير، لذا ليس من المستغرب على الإطلاق أن يحدث انتهاك للواحديّة، ولا أعتقد أن المعلومات في الكون تعود بطريقة ما. هذه وجهة نظري، وهي ليست النقطة الرئيسية في محاضرتي، ولكنني قصدتُ ذكرَها، إذ من المفترض أن تكون ذاتَ صلة بمحاضرات الآخرين لاحقًا في يوم حفل افتتاح جمعيّتكم.

4) الكون الدوري

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

4-1) المتفرّدة من منظور آخر (التطبيق/التحويل التماثلي conformal mapping): ضغط المستقبل وتمديد الانفجار الكبير

حسنًا، دعوني أنتقل الآن إلى مسألة التفرّد وكيف ننظر إليها بطريقة مختلفة. كما ترون في الشكل 21، لدينا هنا في الأعلى المستقبل البعيد. هذا رسم كاريكاتوري لتمدّد الكون كما بيّنّا سابقًا، والآن أريد أن أتناول المستقبل البعيد وأقوم بسحقه وهرسِه squash down عبر إجراء تطبيق تماثلي conformal map. هذه خدعة مفيدة جدًا للاستخدام عندما نريد التحدّث عن الإشعاع الجاذبي الثقالي، وكنت أستخدمها لفترة طويلة عند الحديث عن الطاقة والإشعاع الجاذبي وأشياء من هذا القبيل، فهي أمر مفيد جدًا لسحق اللانهاية إلى شيء منته.



الشكل 21: التطبيق التماثلي في ضغط المستقبل وتوسعة الماضي

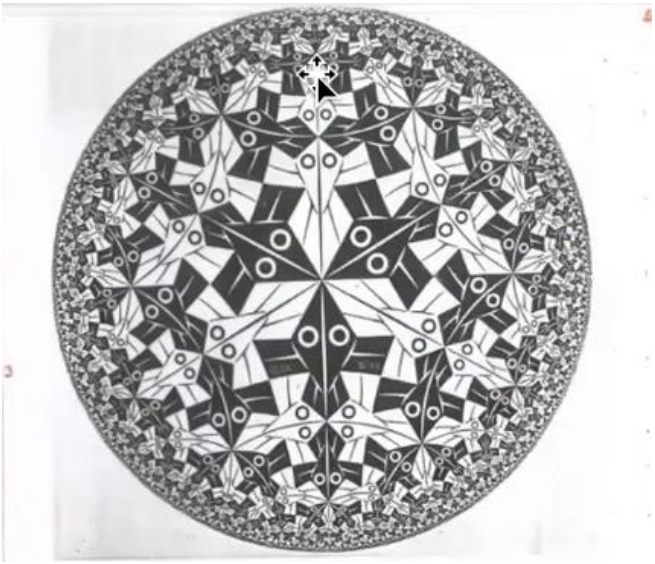
اعتبرتُ هذه الحججُ في الماضي أوضاعَ موافقةً لكونٍ مسطّحٍ مستوٍ بشكلٍ مُقارَب asymptotically flat، لكننا نعلم الآن أن هناك ما يشبه الثابت الكوني، بقيمة موجبة، وهذا يعني أن اللانهايةَ المستقبلية ذاتُ طبيعة مكانية حقًا، بدلًا من أن تكون صفريّة كما كانت في الاعتبارات السابقة. إذن لدينا فضاءٌ مثل اللانهاية نقوم بهرسه، ويمكنك الحديث عن المستقبل البعيد، المليء بالإشعاع، فإذا كان بالكامل –أو معظمه– عبارة عن فوتونات لما وُجدت طريقة لتوسيعه وضرب مقاسه بعامِل scaling. سأصل إلى هذه النقطة لاحقًا، ولكن تذكّر أنه يمكنك سحق اللانهاية، وعندها سيغدو المستقبلُ البعيدُ شديدُ التخلخل والبرودة شيئًا ليس فائقَ البرودة والتخلخل.

ماذا عن الانفجار العظيم؟ إليك الآن هذه الطريقة للنظر إلى الكون الموغل في القدم، فبدلًا من القول إن انحناء فايل يسعى إلى الصفر، وهذه هي الفرضية التي ذكرتُها سابقًا، نقوم بأَمْلَسةِ متفرّدةِ البدء عبر إجراء تطبيق تماثلي. من قام بذلك كان طالبي السابق الأستاذ الجامعي بول تود –وهو الآن متقاعد ما يُخبرني أنني وصلتُ إلى مرحلة متقدمة من العمر حيث تقاعد جميع طلاّبي للدراسات العليا graduate من عملهم كأساتذةٍ جامعيّين وما شابه، أو ممّا أضحَوا عليه– حيث طرح الفكرة، وحدّد أهميتَها البالغة بقوله: "لا تكتفِ بقول إن انحناءَ فايل مساوٍ للصفر، بل قلْ إن الانفجار العظيم –عندما تُمدِّدَه عبر تطبيق تماثلي– يصبح أملسَ.

تكمن هذه الفكرة إذن في أنه يُمكنك تطبيق هاتين الحيلتَين: نضغط اللانهاية، ونمدّد الانفجار العظيم لنجعلهما ذوَي حدودٍ ملساء، وهذه طريقة أفضل بكثير من أجل الحديث عن الشروط الخاصّة للانفجار العظيم. لا بد من وجود قيدٍ هائل على الانفجار العظيم، يُزيل جميعَ تلك الإمكانيّاتِ المُعقّدة والمُرعبة التي لا تحدث، وبطريقة ما يقضي على درجات الحرية في الكون المُبكّر. إنها مجرد فرضية، ولكن مع ذلك، عندما بدأتُ أفكر فيها، بدت بالنسبة لي هذه الأشياءُ متشابهةً للغاية، لأن الانفجار العظيم كان شديد الحرارة والكثافة، ولكن عند تمديده حصلنا على شيء يمكن مقارنته بالمستقبل البعيد جدًا. هذه صورة جميلة جدًا ويمكن أن تكون طريقة جيدة لوصف الكون، ولكن أريد الآن أن أقول شيئًا أكثر غرابة.

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

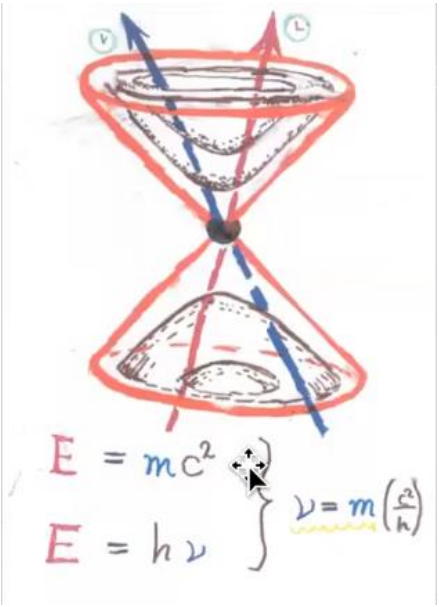
4-2) الصمود أمام الضرب بمقاس scaling: الهندسة التماثليّة



الشكل 22: الهندسة التماثليّة القطع زائديّة conformal hyperbolic في صورة فنيّة لـ موريس إيشير Escher

حسنًا، سأتحدث عن انضغاط اللانهاية، والذي تمّ توضيحه بشكل جيد في صورة إيشر في الشكل 22 عن الملائكة والشياطين، حيث ترى أن الحدود محدودة. هذا في الواقع هندسة زائدية hyperbolic geometry، حيث يمكننا وبشكلٍ رائع تمثيل المستوي داخل ما يسمى بقرص بلترامي Beltrami Disc (حسنًا، يسميه الناس قرص بوانكاريه Poincare. ولكن في الواقع، كان بلترامي أول من ابتكره، وأعتقد أن ريمان كان لديه هذه الصورة تقريبًا). يمكنك أن ترى أنها صورة تماثليّة conformal تحافظ على الزوايا: كما ترى فعيون السمكات دوائر، وتبقى دوائرَ حتى بالقرب جدًا من الحدود، وهذا توضيح جيّد للطبيعة التماثليّة –المحافظة على الشكل– للصورة. أنت تفعل شيئًا مشابهًا على الانفجار العظيم.

4-3) الكتلة والزمن: وجود الكتلة يعرِّف الزمن عبر التواترات الداخليّة للجسيمات



الشكل 23: ترابط الكتلة مع التردّد وبالتالي مع الزمن

هناك سمةٌ مهمّة في الشكل 23 حيث لدينا المعادلتان الأشهر في فيزياء القرن العشرين، معادلة أينشتاين عن مساواة الطاقة E للجداء mc^2، ومعادلة ماكس بلانك عن مساواة طاقة الفوتون للجداء hυ، ودمجُ هاتين المعادلتين يخبرنا أن تكافؤَ الطاقة والكتلة من جهة، وتكافؤَ الطاقة والتردّد من جهة أخرى، يؤدّيان إلى أن الكتلةَ والتردّدَ متكافئان، أي إذا كانت لديك كتلة، فسيكون لديك تردّد. أي جسيم ذو كتلة massive هو ساعة، حيث التردّد في الأساس مرتفع جدًا بحيث لا يمكن استخدامه مباشرةً، لذا علينا تصغيرُه من أجل ساعاتنا الذرية أو النووية، التي تبقى مثاليةً في هذا الخصوص، لذا فإن الميزة التي نحن بصددها تكمن في أن الكتلة تعطيك زمنًا.

ولكن إذا كانت لديك كتلة معدومة، ولنقل فوتونات، عندها لن ترى هذه السطوح التي تُخبرك بما يحدث في التكّات الأولى والثانية والثالثة وهكذا. إذن الساعة تُعطى بالكتلة، والعكس صحيح، فعندما لا تكون لديك كتلة، لا توجد ساعات، وبالتالي لديك هندسة تماثليّة، لذا فإن فكرة الهندسة التماثليّة تتجلّى في أنها الهندسة عند غياب الكتلة. لنعد إلى الشكل 21 والذي كنت أتحدث عنه سابقًا عندما لا يكون لديّ كتلة.

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

4-3) الكتلة متلاشية في الماضي السحيق وفي المستقبل البعيد

ولكن ماذا عن المستقبل البعيد؟ حسنًا، ستُهيمن الفوتونات بشكل كبير. صحيحٌ أنه سيكون لديك جسيمات ذات كتلة، مثل جزيئات الهيدروجين، تدور، والكثير من الهيدروجين يدور لفترة طويلة، ولكنني أريد أن أفترض أنه في المستقبل البعيد جدًا هناك ميزة تقضي على الكتلة. هذا أمرٌ غير تقليدي، وربما هي فكرة ليست غبيّة جدًا لأن إحدى طرق تصنيف الجسيمات، وأول شيء نفعله في فيزياء الجسيمات هو كتابة مُؤثّرات كازيمير Casimir operators لزمرة بوانكاريه. من المفترض أن تكون زمرة بوانكاريه أساسية جدًا في فيزياء الجسيمات، ولكن إذا كان لديك الثابت الكوني، يمكنك بالتأكيد القول إن الزمرة الأساسيّة ربما تكون زمرة ديسيتر di Sitter group، وهنا عندما تنظر إلى مؤثِّرات كازيمير، تجد أن الكتلة ليست منها، وبالتالي إذا كنت تنظر إلى مقاييس زمنية من رتبة عمر الكون، فقد تتوقع أن الكتلة –ربّما– ليست وسيطًا parameter جيداً.

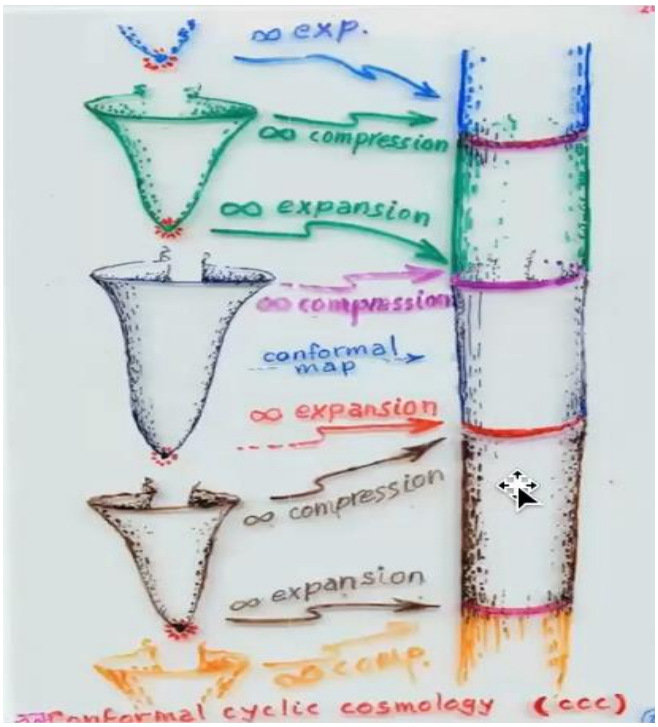
هذا تكهن ليس لدي أيّ مبرر نظري له، باستثناء أنه يُبقي احتمالَ تلاشي الكتلة في المستقبل البعيد مفتوحاً، وهو الافتراض الذي أطرحه عن الفيزياء في المستقبل البعيد، فالأمر لا يقتصر على الفوتونات فحسب، بل إن الكتلة بأكملها ستغدو صفراً.

ماذا عن الوضعِ في البداية عند الانفجار العظيم؟ حسنًا، على الرغم من كونه على العكس تماماً من الخاتمة عند المستقبل البعيد، ولكنه يعطي النتيجة نفسَها، أي أن طاقات الجسيمات تصبح عالية جداً لدرجة أنها تتحرك بسرعات كبيرة تغدو معها الكتلة غيرَ ذات صلة. بالطبع، هذا يعتمد على فيزياء الجسيمات إلى حد ما، ولكن مع ذلك، فإن الحجّة العامة تقول بأن قيمةَ الكتلة تصبح مهملة. إن فيزياء الانفجار الكبير، ومع اقترابك منه، تعود فيزياءَ عديمةَ الكتلة مرة أخرى، لذا فالمُسلَّمة هنا تقول بأنه لديك فيزياء عديمة الكتلة في كلتا النهايتَين، وأن الانفجار الكبير يُشبه إلى حد كبير المستقبلَ البعيد، وهذه هي الصورة التي أطرحها هنا.

4-4) نموذج الكون الدوري: الانفجار الكبير استمرار للمستقبل البعيد لدهر سابق. حلّ معضلة الأنتروبيّة: الضغط والتمديد كـ "ماحٍ للفوضى" (الثقوب السوداء المتبخّرة تُطلِق إشعاعًا ولكن يتمّ انضغاطه في المستقبل ما يمحي الفوضى والأنتروبيّة، ونبدأ بأنتروبيّة منخفضة في الكون اللاحق)

هذا مُثير للدهشة، أقول إن انفجارنا العظيم هو استمرار للمستقبل البعيد لدهرٍ Aeon سابق، وهذا سيقضي تلقائيًا على انحناء فايل، لأنه في الواقع، إذا نظرت إلى المستقبل البعيد، ستجد أن المعادلات الناظمة –والتي عمل عليها بشكلٍ خاصّ هيلموت فريدريش– تُظهر لك تحديدًا التوقّعَ بأن يسعى انحناء فايل إلى الصفر في المستقبل البعيد، ومن السهل جدًا إدراك عموميّة هذا الوضع، حيث ينعدم انحناء فايل، فلا تغدو قيمتُه محدودةً فحسب، بل أضحت صفرًا. وبالتالي، لديك شرط أقوى يحقّقه الانفجارُ العظيم، ألا وهو انعدام انحناء فايل، وهذا شرط لنموذجنا هنا في أن مستقبلنا البعيد سيغدو انفجارًا عظيمًا لشخص آخر، بينما كان انفجارُنا الكبير استمرارًا لمستقبلٍ بعيدٍ لشخص مرّ بمرحلة كانت الكتلة فيها صفرًا فعليًا.

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

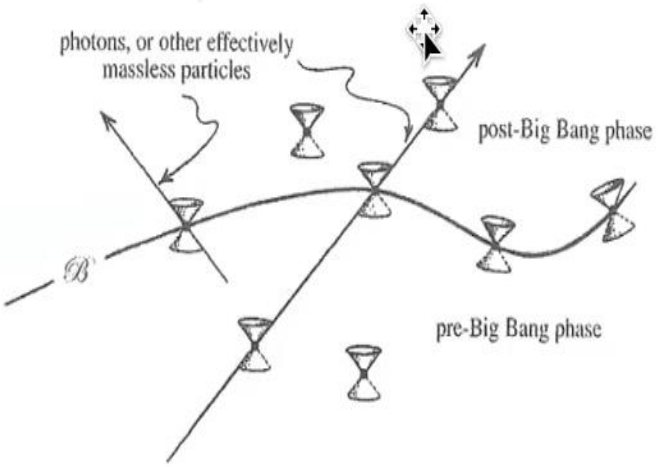


الشكل 24: الكون الدوري

5) تنبّؤات قابلة للاختبار: إشارات مُحتمَلة عبر الحدود بين العصر الماضي والعصر المستقبلي

5-1) التساؤل عن دلائل تجريبيّة على النموذج

بالطبع نحتاج إلى معادلات تصف ذلك، ويمكن في الواقع كتابة مثل هذه المعادلات، حيث لكلّ شخص معادلاتُه الخاصة التي تختلف اختلافًا طفيفًا فيما بينها. لا أريد الخوض في تفاصيل هذه الأمور، لكن ما أودّ قوله هو أنه يمكنك التفكير في هذه الأوضاع.



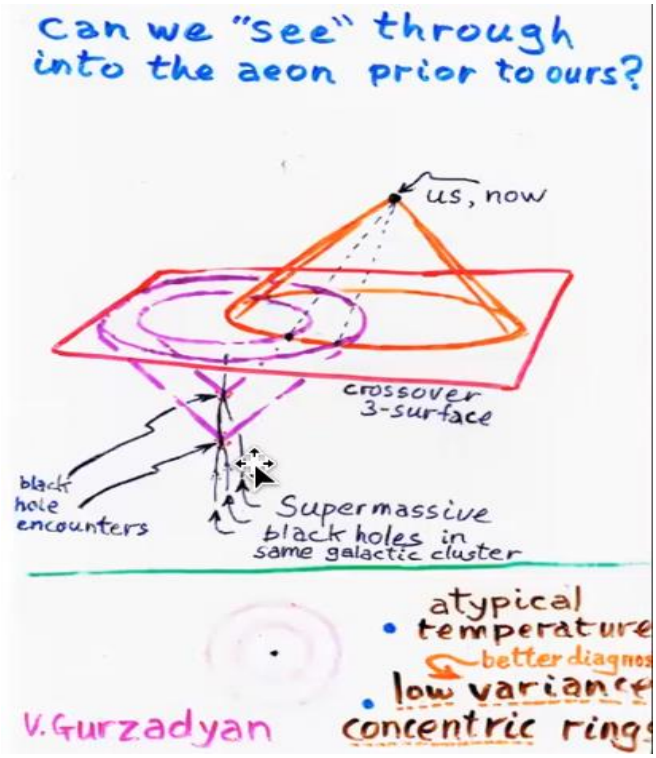
الشكل 25: إشارات عن الكون الدوري تعبر من دهرٍ لآخر

أتذكر أنني كنتُ أؤمن بهذا الرأي لفترة طويلة، ... لا أتذكر كم سنة مضت (في جميع الأحوال لم يكن ذلك قبل أكثر من 15 عامًا)، ولكنني كنتُ أفكّر أنني سأستمر في الحديث عن هذا إلى الأبد، ولن يتمكن أحد من إثبات من أنني على خطأ. ولكن بعد ذلك بدأت أفكّر... حسنًا، ربما توجد ملاحظات يمكنها اختبارُ هذه النظرية، وكانت أول فكرة خطرت لي حول هذا الأمر هي أنه يمكنك تخيّل إشارات قادمة (انظر الشكل 25) ... فإذا كانت لديك إشارات عديمة الكتلة، لربّما انتقلت فوتونات ذات تردّد منخفض جدًا، أو مجالات مغناطيسية، أو شيء من هذا القبيل.

ولكن ماذا عن إشارات الموجات الثقالية؟ نعم، يجب أن تكون قادرة على الانتقال، لذا يمكنك تخيّلُ أنّ إشارةَ موجةٍ ثقاليّةٍ قويةً بما يكفي يمكن أن تنتقل من دهرٍ لآخر. يجب أن أقول إن الخط المنحني في منتصف الشكل 25 هو التقاطع بين الدهرَين: الدهر الماضي هنا في الأسفل، ومستقبله هو في الدهر الراهن في الأعلى، حيث يمكن للإشارات أن تنتقل، فإذا كانت لديك إشارةٌ جاذبيّةٌ قويةٌ بما يكفي، فربما تعبر.

5-2) الملاحظات الكونيّة وإشارات الدهور السابقة: مراكز حلقات منخفضة التباين في معطيات بلانك

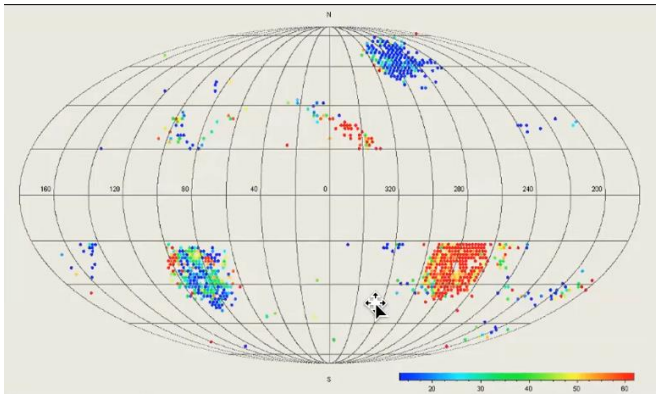
© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء



الشكل 26: هل يمكننا "رؤية" دهور قبل دهرنا؟

ثم بدأت أفكر فيما يمكن أن تكون عليه هذه الإشارات. كما ترى في الشكل 26 ، لديّ في المنتصف سطح التعابُر crossover بين الدهر Aeon السابق ومستقبلِه المُمثَّل بدهرنا، حيث نحن في الأعلى تمامًا ننظر إلى الوراء. في الدهر السابق (أُطلِق على هذه العصور الزمنيّة اسمَ الدهور المختلفة)، لدينا ثقبان أسودان فائقا الكتلة يتصادمان، وفي عنقودٍ مجرّي قد تتوقع حدوث هذا مرات عديدة، لذا سيتصادم ثقبان مرارًا وتكرارًا، وفي كل مرة يحدث فيها هذا التصادُم تجد حلقةً (عليك إضافة بُعد آخر بالطبع حتى يشكِّلَ التقاطعُ هنا كرةً). هنا تجد مخروطَنا الضوئي الماضي حيث يتقاطع مع سطوح الكرات، بينما الانفجار العظيم المُمَدَّد لدهرنا هو المستقبل البعيد للدهر السابق وقد تمّ انهيارُه/تراصّه، وتبدو هذه الإشارات الصادرة عن الانهيار مثل كرات أخرى، وستكون تقاطعاتُها دوائرَ/حلقات، وهكذا ...

إذا حدث هذا الأمرُ في العنقود المجرّي نفسِه، فستكون هناك حلقاتٌ متحدة المركز، وهذه إشارةٌ كان زميلي غورزاديان يبحث عنها. قد أقول إن هناك جدلاً واسعاً حول هذه الأمور، لكن دعوني أريكم الشكل 27 الذي يصعب الجدال حول صحّةِ صورته التي تُظهرها بيانات بلانك: إنها تبيّن مراكزَ الحلقات المتمركزة منخفضة التباين. لذا، لم يبحث زميلي عن حلقاتٍ أكثر دفئاً أو برودةً من البقية، لكن عن حلقاتٍ حيث تباينُ درجة الحرارة حول الحلقة يجب أن يكون أقلَّ قليلاً من المعتاد، وحيث أن الإشارة ليست قوية بما يكفي لحلقة واحدة، لذا، كان يبحث عن ثلاث حلقات متحدة المركز ذات تباين variance منخفض. هذا ما بحث عنه، وأنا أرسم فقط صورةَ ما وجده، ولا أقلق بشأن الدلالة أو أي شيء آخر. إذن، تُظهر لكم الصورة في بيانات بلانك مراكزَ ثلاث حلقات منخفضة التباين، وهي متكتّلة بشكل غير عادي. إنها ليست منتظمة على الإطلاق، لذا أيًّا كان مصدرُ هذه الإشارات، لا بد أن يكون شيئًا غيرَ منتظمٍ تمامًا. الآن، يمكنك فهمُ عدم التجانس والانتظام، إذا كان ناجمًا عن عدمِ تجانسٍ واسعِ النطاق في الكون، وهذا بالطبع يتعارض مع المبدأ الكوني، وبالتالي هناك الكثير ممّن لا يحب أن يصدّق هذا، لكن كيف تفسِّر هذه الصورة؟



الشكل 27: مراكز الحلقات منخفضة التباين في بيانات بلانك

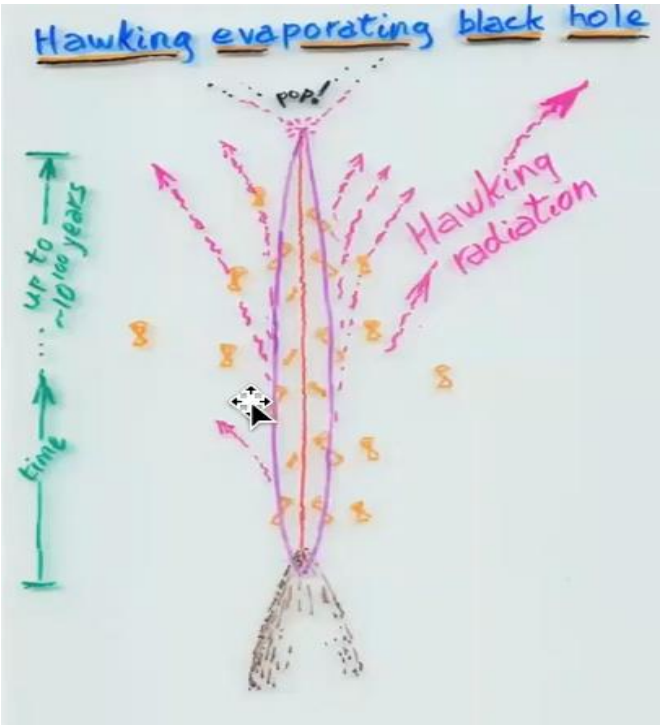
أريد أن أشير إلى أن اللون أيضًا اختلف من مكان لآخر، وزميلي لم يكن يقيس اختلافاتٍ في درجة الحرارة، بل بالأحرى كان يبحث عن تباينٍ منخفض. اللون هو

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

درجة الحرارة. الآن، الأحمر معقد للغاية، ولكن الأحمر يعني في الواقع أن المسافة الفاصلة بعيدة، ما يوافق مناطقَ أكثر برودةً. هذا صحيح: الأحمر هو الأبرد، والأزرق هو الأسخن. تكمن النقطة الرئيسية هي أن الأحمر –وفقًا للنظرية– كان بعيدًا جدًا. الآن، كما ترى، التكتّل ليس فقط في مكان تجمّع النقاط في السماء، بل في لونها. لماذا هذا؟

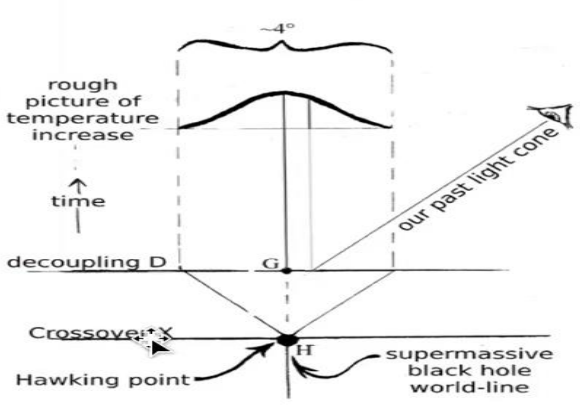
الآن، من الناحية النظرية، الأمر منطقي لأن لديك توزيعًا هائلًا لعناقيد مجرّية بعيدة جدًا: لدينا هنا عند الأزرق عنقودٌ أحدثُ وأقرب بكثير ضمن أفق جسيماتنا الماضي، بينما هنا عند الأحمر سيكون هذا خارجَ أفق جسيماتنا. تذكّرْ أنه يمكن أن تأتيَ الإشارات من خارج أفق الجسيم وتتجلّى في الصورة، لأن الهندسةَ لا تزال صالحةً تعمل أثناء المرور من دهر إلى آخر، فيمكن أن تكون خارجَ أفق جسيماتنا. باختصار، الجسيمات الحمراء ستكون متكتّلة على مسافات بعيدة جدًا، بينما الزرقاء داخل أفق جسيماتنا، ما قد يشي بتأثيرات نراها ربّما في توزيعات الكوازِرquasars. في الواقع، يبدو أن هناك بعض التأثيرات، ولكن لن أؤكّد عليها لأنني أعتقد أن معلوماتِ المعطيات هنا لا تزال ضعيفةً جدًا، لكنني أقول فقط إنه من الصعب تفسير هذه الصورة مهما اعتبرْتَ تفسيرًا للإشارات التي تراها. إذن، هذه الصورة موجودة وحقيقيّة، ولم أر أحدًا يناقضها.

3–5) تبخّر الثقوب السوداء من العصر السابق: بقع هوكنغ (إشعاع هوكنغ من العصر السابق يعبر الحدود ويظهر في كوننا كبقعة دائريّة في الـ CMB)



الشكل 28: إشعاع هوكنغ في دهرٍ سابق قد يُعطي بقعَ هوكنغ في دهرنا

الحجة الأخرى التي أريد طرحها تتعلق بتبخّر الثقب الأسود (انظر الشكل 28). عليكَ الانتظار لفترة طويلة جدًا قبل أن تبدأ الثقوب السوداء في التبخر، فبالنسبة للثقوب السوداء الكبيرة حقًا، علينا الانتظار لمدّة من رتبة (ابحث في جوجل) 10^{100} عام، ربّما $10^{10^{9}}$ أعوام، إذن علينا الانتظار طويلًا جدًا قبل أن يتبخّر الثقب، ومع ذلك، لا يزال موجودًا كما يلي.



الشكل 29: تتالي دهورٍ في الكون الدوري

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

يقدّم الشكل 29 صورةً من ورقة كتبتها أنا وكريستوف مايسنر، وبافل نيروفسكي، ودانيال آن، ونُشرَت في مجلّة الإشعارات الشهرية للجمعية الفلكية الملكية قبل حوالي عامَين. لم أرَ أي تعليق على تلك الورقة، بينما رأيتُ تعليقات على الورقة التي كانت في الأرشيف، وهي مختلفة نوعًا ما عن الورقة المنشورة. ربما توجد تعليقاتٌ على هذه الورقة، بينما رأيتُ العديد منها في الأرشيف، لكن لا شيء يتعارض مع البيانات المُقدَّمة في الورقة (ربّما في مكان إجراء التحليل، وهذا أمرٌ يمكن التطرق إليه لاحقًا).

كما ترى في الصورة، الزمن يصعد للأعلى، بينما الخط الأفقي في الأسفل هو سطح التعابُر من الدهر السابق، أمّا الخطّ الشاقولي هنا فيمثّل خطَّ العالَم worldline لثقبٍ أسود فائق الكتلة، لا يبدأ تبخرُّه حتى يقعَ تحت سطح التعابُر بشكل لامتناه في الصغر تقريبًا. وهكذا يظهر هذا الثقبُ المتبخِّر –في دهرنا– في نقطة ما، وينتشر على مدى 380,000 عام قبل أن يصبح جزءًا من الخلفية الميكروية التي نقيسها. نرى أنه سيتمثّل في بقعةٍ في السماء، ومقاسُ هذه البقعة مثير للاهتمام بعض الشيء، لأن ما نراه عادةً له يكون حوالي أربع درجات عرضًا في السماء، وهو ما يعادل ثمانية أضعاف قطر القمر الكلي، أي ما يُشبه البدر. كما أشار آلان غوث، باستخدام آلةٍ حاسبةٍ قياسية، يمكننا أن نرى هذه الأشياء بمقاس ثمانية أضعاف قطر القمر، بينما وفقًا لحسابات فيزياء الجسيمات، يجب أن يكون قطرها حوالي خمسة أضعاف قطر القمر. حسنًا، هذا أمر غريب بعض الشيء، لكن كريستوف، الذي يعرف أكثر مني في فيزياء الجسيمات، يقول إن هناك العديد من الافتراضات التي تدخل في هذا التقدير، ومن الصعب بعض الشيء تقديمُ قيمٍ دقيقة، حيث يعتمد هذا التقدير على إعادة الاستنظام

التفردات (Singularities) وتبخر هوكينج: كيف تتجاوزها النظرية؟

أ. مصير الثقوب السوداء في المستقبل البعيد هو تبخّر هوكينج (Hawking Evaporation):
الثقوب السوداء تفقد كتلتها عبر إشعاع هوكينج، وتختفي في النهاية، لكن التفرد الداخلي (Singularity) يظل موجودًا حتى اللحظة الأخيرة.

ب. ماذا يحدث للتفرد عند التبخّر الكامل؟
رأي بنروز الثوري: لا تختفي التفرّدات، بل تصبح "نقاطًا" متناهية الصغر عند مقاس بلانك، وهذه النقاط تعبر الحدود بين العصور الكونية عبر التحويل المطابق (Conformal Mapping) الذي يضغط التفرّد إلى سطح منتهٍ. تعود هذه النقاط للظهور كـ "بذور" لبنى جديدة في الكون التالي (مثل بقع هوكينج).

ج. لماذا لا نستطيع وصف هذه العملية؟
بسبب غياب نظرية كمومية للجاذبية، فنحن لا نعرف كيف تتصرّف التفردات عند مقياس بلانك، إذ تفشل المعادلات الحالية في وصف الزمكان عند هذه النقاط.

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

renormalization في نقاط مختلفة، وبالتالي هناك تساؤلات عن وثوقيّته.

حسنًا، هذا مجرد كلام، ولكن على أي حال، ما نراه هو بقع قطرها ثمانية أضعاف قطر القمر تقريبًا، وتُرى هذه البقع بمستوى ثقة يقارب 99.98%. هناك نقطة صغيرة أناقشها هنا، وهي أن هذا ما نراه، حيث يبلغ قطر هذه البقع ثمانية أضعاف قطر البدر، بعرضٍ زاويّ 4 درجات تقريبًا، ما يمثِّل إشارة واضحة جدًا. إذا اعتبرنا أنه إذا كان من الممكن أن تقيس الإشارةُ قيمةً أخرى، فربما يجب تقليل مستوى الثقة إلى شيء أقلّ قليلًا، ولكنه بالتأكيد ليس أقل من مستوى ثقة 99%.

لذا يبدو لي أن الإشارات موجودة، وعلينا شرحُ سبب وجودها. يجب أن أشرح أيضًا أنها لا تُرى فقط في بيانات بلانك. في الحقيقة، إذا نظرت إلى أقوى خمس بقع –لست متأكدًا من أنني سأثق بجميع المواقع، ولكن إذا نظرت إلى مواقع أقوى خمس بقع– في بيانات بلانك، ثم نظرْتَ أيضًا إلى بيانات wmap، لوجدتَ أن هذه البقع الخمس تقع في الأماكن نفسِها تمامًا في كلتا مجموعتَي البيانات. هناك أيضًا نقطة سداسية، وهي بنفس القوة تقريبًا في بيانات wmap وموجودة أيضًا في بيانات بلانك. لذا أقول إن هذه النقاط الخمس الأقوى –ما أسميه نقاط أو بقع هوكينج– موجودة بالفعل بمستوى ثقة قوي، أيًا كان تفسيرها، ومن الصعب شرحها بالنظرية التقليدية.

هذا كل ما لديّ لأقوله في الوقت الحالي، لذا أود سماع تعليقات الحضور الآن.

مناقشة وتأملات

المُقدِّم: شكرًا جزيلاً، سيدي. إنها محاضرة شيقة للغاية، وهناك العديد من الأسئلة.

بروفسور توفت: أعتقد أنني أريد التحدث. معذرة.

المُقدِّم: حسنًا، من فضلك، مرحبًا.

توفت: هل يمكنني طرح السؤال التالي؟ عند الثقب الأسود. هل نظرتَ إلى كيفية تفاعل الجسيمات الواردة جاذبيًا مع الجسيمات الصادرة؟ أزعم أن ذلك يمكن أن يستعيد واحديّة unitarity منظومة الثقوب السوداء بأكملها.

بنروز: هل تقول إن ظاهرة تبخّر هوكينج، أعني، هل توافق على حدوثها؟

توفت: يمكن التوفيق بين تبخّر هوكنغ والواحديّة، إذا أخذت في الاعتبار التفاعلات بين الجسيمات الداخلة والجسيمات الخارجة، فهذا ادّعائي، ويمكنني أن أضيف إلى ذلك سؤالاً آخر لك، وهو: ألا تحتاج إلى الواحديّة لضمان أن مجموع الاحتمالات يساوي واحدًا؟ أعتقد أن معظم النظريات الفيزيائية تفعل ذلك.

بنروز: لا أعتقد –كما ترى– ولا أعرف كيف نستمر في الواحديّة مع المحافظة على القياس؟ ألا ترى معي أن عمليّةَ القياس تحدث. لسببٍ ما، يُصرّ الناس على الواحديّة، ولكن عندما نلاحظ ونرصد أشياءَ في ميكانيك الكم، فإن الواحديّة تُنتهك، وغالبًا ما تُنتهك في القياس.

توفت: ليس ذاك النوع من الواحديّة التي نحتاجها لفهم أن مجموع الاحتمالات مساوٍ للواحد. هل يتمّ انتهاك هذه الحقيقة حتى ولو قمتَ بالقياس؟

بنروز: لديك سعات amplitudes، فكيف تحصل على الاحتمالات من السعات دون وجود قياس؟ إنك تحصل على سعاتٍ في الواحديّة.

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

توفت: تتحدّث عن السعات بدلًا من القواعد، وهناك قواعد تُخبرك بكيفية حساب احتمال أيّ شيء، ثم يمكنك قياسه ومعرفة ما إذا كان صحيحًا، لكنني أعتقد أن هذا صحيح بوضوح.

بنروز: أعلم أن هذه عقيدة dogma، وأنا أفهمها، لكنني لا أصدقها. العقيدة هي أنك تُصر على الواحديّة، لأنك بطريقة ما لا تُصدق أن القياسات تحدث، لست متأكدًا تمامًا من كيفية عمل ذلك جيدًا.

توفت: القياسات جزء من هذا الكون أيضًا!

بنروز: ولكنها تنتهك الواحديّة!

توفت: لكن ألا تعتقد أن الاحتمالات تُجمع إلى واحد؟ ألا يُشكِّل ذلك أساسَ نظريةٍ جيدة، حيث يمكنك التفكير في احتماليةٍ لحدوث هذا الأمر أو ذاك. وهذا هو المقصود لا أكثر ولا أقلّ.

بنروز: لا، لا. الواحدية –كما ترى– : إلى أيّ مدى تعتبر هذه الحالة state حقيقية؟ أعتقد أنها مسألةُ ما إذا كنت تعتبر الحالةَ شيئًا حقيقيًا فيزيائيًا أم لا.

توفت: نعم، أنا أعتبرها حقيقية!

بنروز: إذن، لا يمكنك إجراء قياسات إلّا أحيانًا عندما تقيس حالةً ذاتيةً eigenstate مباشرةً.

توفت: رأيتُ في أحاديث سابقة أن الناس يقيسون الكثير من الأشياء، فلماذا لا؟

بنروز: أقول شيئًا واضحًا تمامًا عن ميكانيك الكم، والذي يبدو أنه يتمّ تجاهله، ولا أفهم لماذا؟ إما أنك ستتجه إلى منظور العوالم المتعددة أو إلى شيء يتعلق بميكانيك الكم. في هذه الحالة، لديك...

توفت: سأشرح في محاضرتي كيف تسير الأمور

بنروز: حسنًا، عليّ انتظار محاضرتك، لكن بالنسبة لي، تقول وجهةُ نظري بأنك تأخذ ميكانيك الكم كما نراه، وميكانيك الكم يقول إنّ الحالةَ تتطوّر وفقًا لمعادلة شرودنجر التي هي واحدية. نعم، إنك تتجنّب هذا الأمرَ، ثم عند نقطة معينة تقول إن القياسَ يحدث، وعندما تقول إن القياسَ يحدث، فأنتَ تنتهك الواحديّة لأنك تقول إن لديك خليطًا احتماليًّا لعددٍ من الحالات المختلفة، ولا تقول إن لديك خليطَ سعاتٍ لعدد معيّن من الحالات. الحالة هي مزيجٌ لسعات ...

توفت: الأمر متطابق تقريبًا، يمكن تربيع السعات، ثم نقول: نعم هذه هي الاحتماليّات، ومجموعها يساوي واحدًا، فماذا تريد فوق ذلك؟

بنروز: أريدها أن تكون .... الحالةُ المُمثِّلة للمنظومة ليست كذلك، إذ ماذا تقول عن ماهيّة الواقع والحقيقة؟ هل تقول إن الواقع يتبع معادلة شرودنجر؟

توفت: لا، سأشرح ذلك في محاضرتي.

بنروز: نعم، في محاضرتك بالتأكيد.

توفت: بضع كلمات كهذه.

بنروز: نعم، لكنني لا أستطيع فهم وجهة النظر هذه. أعلم أنها لدى الكثيرين، بمن فيهم أشخاص بارزون جدًا مثلك، أتفق معك بالتأكيد. هذه وجهةُ نظرٍ لدى الناس، لكنني لا أستطيع فهمها، كما لم يستطع أينشتاين فهم الأمر. لم يستطع شرودنجر أن يفهمها، ولم يستطع ديراك فهمها لأنهم جميعًا زعموا أنك بحاجة إلى توسيع ميكانيك الكم.

توفت: وهذا خطأ.

بنروز: لكنك تقول: هذا خطأ، وربما هناك أشخاص بارزون آخرون إلى جانبك. أتفق مع حقيقة أن هناك الكثيرَ ممّن يتبنّى هذا الرأي، ولكنه ليس رأيي. رأيي هو أن الحالةَ تُوصف بدالة الموجة لفترة، ثم تقفز أثناء إجراء القياس.

توفت: سوف أشرح في محاضرتي بأنك لست بحاجة إلى هذه القفزة، فالطبيعة دائمًا ما تعتني بهذه القفزات بمجرد قياس شيء ما.

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

بنروز: لكنني أتحدث عن محاضرتي الآن، محاضرتك ستكون لاحقًا، في محاضرتي أدّعي أن القياس عملية تنتهك الواحديّة. وأزعم أيضًا من خلال الحجة الصغيرة التي قدمتها أنه إذا كنت تريد الحفاظ على مبدأ التكافؤ في النسبية العامة، فأنت في ورطة إذا كنت تريد الحفاظ على الواحديّة. وأعتقد أن هذه الحجةَ بحاجة إلى إعادة نظرٍ وإلى تأمّل فيها.

توفت: ألا توافق على أن ميكانيك الكم نموذجٌ صالحٌ لحساب احتمالية حدوث هذا أو ذاك؟ ألا توافق على أن المخارج مهما كانت، يجب أن يكون مجموعُ احتمالاتها واحدًا صحيحًا؟

بنروز: النموذج ليس له وجودٌ متّسق consistent ontology. النموذج يغيّر رأيَه بشأن ما يفعله العالَم الحقيقي.

توفت: نعم، أوافق.

بنروز: بعد القياس، العالَم الحقيقي هو نتيجة القياس. قبل القياس، يتضمن العالَم الحقيقي تراكبًا في السعة للبدائل المختلفة. هذا تحوّل shift في الوجود ontology. حسنًا، يمكنك تبني هذا الرأي، فهو يعمل بشكل جيد، وأنا أوافق بالتأكيد على أنه يعمل بشكل جيد، لكنه ليس وجودًا متّسقًا للكون. يتطلب الوجودُ المتّسق أن تقفز الحالة وفقًا لعملية القياس.

توفت: حسنًا، هذه قصص طويلة، ليس من السهل شرحها ببضع كلمات، لكن يمكنني تقديمُ شرحٍ لكيفيّةِ حدوثِ انهيارِ دالة الموجة فعليًا أم لا، وستجد أن هذا مجرد رياضيات بسيطة ومباشرة.

بنروز: أتفّق تمامًا.

توفت: المعادلات بسيطة نوعًا ما، لذا... لا يمكننا الاختلاف حول المعادلات ...

بنروز: إنها مسألة علم الوجود ontology، كيف ترتبط الرياضيات بالعالَم؟ ليس الأمر متعلقًا بالرياضيات بحد ذاتها، بل بكيفية وصف العالَم وفقًا للرياضيات؟ كيف يبقى وصفًا جيدًا للعالَم؟ وأنت تقفز عندما تستخدم...

توفت: حسنًا، حتى في النظرية الكلاسيكية –ولكن ربما يرغب آخرون في طرح أسئلة، لن أطيل كثيرًا–، يمكنك رمي النرد، ويمكنك أن تسأل ماذا يحدث لحجرَي النرد قبل رميهما وبعد رميهما. هل تغيّرت الاحتمالات؟ الإجابة واضحة. حسنًا، خذ نردك وارمِه وسترى ما يحدث. الأمر سهل جدًا، كان بإمكانك فعل ذلك في العصر الحجري دون مشاكل في الفهم، لكن الاحتمالات تُحدِث قفزةَ دلتا. كلما وصلت أحجارُ النرد إلى موضع معين ....

بنروز: عندما تُجري قياسًا، ما الذي يخرج من النرد؟

توفت: تنظر إليه، لذا نتفق جميعًا على ما نفعله فيزيائيًا.

بنروز: أفضّل أن ننتقل إلى سؤال آخر. لأنني لا أعتقد أننا سنصل إلى أي مكان في هذا السؤال.

توفت: حسنًا،

بنروز: آسف على ذلك. هل لدينا أي أسئلة أخرى؟

المُقدِّم: هناك سؤال من...

همام: شكرًا لك على هذه المحاضرة الرائعة يا أستاذ، وأنا من أشد المعجبين بك. سؤالي هو: هل تعتقد أنه يمكننا أن نمتلك مفهومًا مطلقًا للثقوب السوداء في المستقبل؟ وما هو أهم شيء يجعل الثقب الأسود يفقد أكبر قدر من الطاقة؟

بنروز: حسنًا، الحجة هي إجرائيّة هوكينج Hawking Process. أعني أنه في الواقع لا تعتمد الصورةُ التي عرضتُها في المحاضرة بالمعنى الدقيق للكلمة على إجرائيّة هوكينج. كما ترى، تُخبرُكَ إجرائيّةُ هوكينج أنه عندما تكون هناك درجة حرارة فهناك عدّة أمور. أولًا، يعني هذا أن الثقب الأسود لديه درجة حرارة. لذلك، تمكّن ستيفن هوكينج

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

من إثبات وجوب كونِ درجةِ حرارة الثقب الأسود منخفضةً جدًا. الآن، إنها منخفضة جدًا لدرجة أنك لا تقلق بشأنها عادةً على الإطلاق، ولكن عندما يتمدد الكون ويتمدد ويصبح أكثر برودة، فإننا نصل إلى نقطة تكون فيها درجةُ الحرارة المحيطة أقلَّ من درجة حرارة الثقب الأسود، فالثقوب الأصغر هي الأكثر سخونة، والأكبر هي الأبرد، لذا عليك الانتظار طويلًا جدًا قبل أن تنخفض درجةُ حرارة الكون المحيطة عن درجة حرارة الثقب الأسود. ثانيًا، ووفقًا لهوكينغ وأعتقد أن هذه الحجة سليمة، سوف يفقد الثقبُ الأسود طاقتَه في الإشعاع، وستتقلص كتلته تدريجيًا، وفي النهاية سيختفي، وبالتالي ستختفي بعض المعلومات أو الطاقة، أو أيًا كان نوعها، وستذهب المعلومات الموجودةُ في الثقب الأسود إلى الإشعاع، وسيتدمّر بعضها في التفرّد. ما مقدار هذا؟ لا يُحدث هذا فرقًا كبيرًا في تصوري. لكن الثقب الأسود سيختفي في النهاية، وأنا أتفق تمامًا مع هذا الرأي، مع أنه لا يهمّ كثيرًا بالنسبة للحجة التي قدمتها. قد تستمر الثقوب السوداء إلى الأبد، وستظهر ببساطة خلال الدهر التالي.

وفيما يتعلق بالملاحظات، لا أرى أيَّ فرق بين طبيعة بقع هوكينغ، كما أسميها، وما إذا كانت الثقوب السوداء ستتبخر أم لا، لكنني سعيد جدًا بتبخّرها تمامًا في اللحظة نفسها. النقطة الأخيرة: عندما تختفي، تصبح كائنًا ذا مقاس بلانك أو شيئًا ما إلى ذلك، وعليك انتهاكُ المألوف. حسنًا، ربما عليك إدخال الجاذبيّة الكمومية في تلك المرحلة، وهو أمر جيد، لكنها تختفي في النهاية. لا أعرف إن كان إجابتي موافقةً لسؤالك.

المُقدِّم: حسنًا. هناك سؤال من

محمد إسماعيل. شكرًا لك. بين الرياضيات والفيزياء، هل يمكننا القول إن مركز التفرّد الكامل له قطر مئوي بطول بلانك؟

بنروز: لا أعتقد أنه يمكننا قول أي شيء عن ذلك على الإطلاق. كما ترى، لا نعرف حقًا أي شيء عن طبيعة التفرّدات بشكل عام، ربما تكون معقدة للغاية. إذا تابعتَ أعمال ليشتسون وكالاتنيكوف وبيلينسكي وميزنر، فإن الأعمال التي ناقشوها للتو في التفرّدات المعقدة هي معقدة للغاية، وما يمكنك قوله عن حجم التفرّدات لا معنى له تقريبًا. أعتقد أن مقاس بلانك سيكون أمرًا معقولًا، لكن فيزياء هذا المقاس... غير معروفة تماما.

بالطبع، ربما يظن البعض أنهم يعرفون الإجابةَ عن فيزياءِ مقاس بلانك. برأيي، لا نعرف، لكن هذا لا يؤثر في الواقع على أيّ شيء. الصورة التي أعرضها هي أن المتفرّدات، بشكل تقريبي، تظهر كنقاط هوكينج. كما ترى، البقع على جانبنا: العنقود المجرّي في النهاية، يكاد الثقب الأسود يبتلعه بالكامل، ثم يتبخّر هذا الثقب الأسود في النهاية. ربما، أو ربما يبقى هناك إلى الأبد. أعتقد أنه يتبخر. أعتقد أن هوكينج كان محقًا. كلُّ الإشعاع الذي تبخر يصل إلى نقطة واحدة في الدهر التالي، وهذه النقطة أصغر بكثير من مقاس بلانك. لذلك في الانفجار الكبير الأولي، تلك النقاط الصغيرة، من يدري ماذا يحدث هناك؟

أود أن أقول إنه يجب أن تَفقِد المعلومات. في الواقع، هكذا يكون لديكَ قانونٌ ثانٍ للديناميكا الحرارية (الترموديناميك)، وهو أمر منطقي لأنه يجب تدمير المعلومات التي كانت جالسة داخل الثقب الأسود، إن شئت، أو كانت موجودة فيه، أو من خلال تبخّر "هوكينغ" الذي لا يُحدِث فرقًا يُذكر في الصورة، لأن التبخّرَ والثقبَ الأسود نفسه مُركّزان ببساطة على مقاس بلانك، وليس أصغر بكثير من مقياس بلانك، لذا من يدري ما هي الفيزياء على الجانب الآخر؟ إنه في الأساس حقنةٌ لكمية هائلة من الطاقة عند تلك النقطة، والتي تنتشر إلى ما يُقارب ثمانية أضعاف قطر القمر، وهناك جدل حول

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

حجمها –كما أشار آلان غوث– في هذه المرحلة، ما بين خمسة وثمانية أضعاف حجم القمر (ما يبدو أننا نراه هو ثمانية أضعاف)، وهذا هو المكان الذي تذهب إليه الطاقة، ونراها في هذه البقع.

المُقدِّم: حسنًا، ليس لدينا وقت كافٍ، هذا هو **السؤال الأخير**. حسنًا، ما هي قاعدة التفرّد في حوادث اندماج الثقب الأسود؟

بنروز: أتوقع أنها سوف تميل إلى التجمد، كما ترى، من الصعب جدًا معرفة ذلك، لأن كل تفرّد سيكون ذا طبيعة مكانيّة (شبيهًا بالمكان spacelike)، ومن المحتمل أن يُشكّل منطقة كبيرة شبه مكانيّة. كما ترى، تكمن المشكلة في أن حجمها أصغر من مقاس بلانك. لا يمكننا التحدّث عن ذلك لأن الفيزياء غير معروفة تمامًا. لديك انحناءات عالية جدًا، وبمعنىً ما إنها تتجمّد، لكنها لا تتجمد بشكل اعتباطي من الأشكال، ممّا يسمح لها بالتأثير على بعضها البعض، لأنني أعتقد أنها منفصلة بمسافات شبه مكانيّة.

في الصور التي نرسمها لثقب أسود واحد، تكون المتفردة شبه مكانيّة، بحيث تكون أجزاء المتفرّدة منفصلة، وليست مرتبطة سببيًا ببعضها البعض. لذلك عندما يكون لديك ثقبان أسودان متجمّدان، فإنهما يظلان شبه مكانيَّين، إن شئت، ولا علاقة بينهما، ويدمّران الزمكان قبل أن يتوفر لهما الوقت للتواصل.

أعني أن هذه الصورة قد تكون خاطئة. لأن الجاذبيّة الكمومية، أيًا كانت، يمكن أن تأتي وتغيّر الصورة في تلك المرحلة. لكنها ليست ذات فائدة كبيرة لنا لأنها... إنها غير قابلة للرصد، فكلّ شيء موجود داخل الثقب الأسود. لذا، تكمن المشكلة في الحديث عن الفيزياء هنا في أنه لا توجد أي آثار رصدية، على حد علمي. أعني، ربما في النهاية، قد يكون هناك آثار في الأجزاء المتحركة، وربما يمكننا فحص هذه النقاط بعناية كافية لمعرفة شيء ما عن طبيعة التفرد، لكنني لا أرى أي شيء قريب من ذلك حاليًا.

المُقدِّم: شكرًا جزيلاً لك يا سيدي. وأعتذر عن الآخرين، فليس لدينا وقت كافٍ للإجابة. هناك الكثير من الأسئلة، لكنني آسف لعدم وجود وقت كافٍ الآن، علينا الانتقال إلى الجلسة الثانية.

أخبار علميّة

الصين تطلق أول مفاعل نووي تشغيلي يعمل بالثوريوم: إنجاز علمي يُعيد تشكيل مستقبل الطاقة

في خطوة تُجسد الإرادة العلمية والبُعد الاستراتيجي، أعلنت الصين عن تشغيل أول مفاعل نووي في العالم يعمل بالثوريوم ضمن تقنية الملح المنصهر، ليُشكل منعطفًا تاريخيًّا في مسيرة الطاقة النظيفة. جاء هذا الإعلان بعد نجاح فريق من العلماء الصينيين في إضافة وقود جديد للمفاعل أثناء تشغيله — وهي سابقة عالمية في هذا النوع من المفاعلات، ما يُبرز التقدم الهندسي والفيزيائي المحقق.

المفاعل التجريبي، الذي يقع في صحراء غوبي غرب الصين، يستخدم الملح المنصهر كوسيط تبريد ونقل حراري، والثوريوم كوقود نووي — وهو عنصر متوافر بكثرة في القشرة الأرضية وأكثر أمانًا من اليورانيوم. وقد بلغ المفاعل مرحلة "الحَرِجية النووية" في أكتوبر/تشرين الأول 2023، ووصل إلى التشغيل الكامل في يونيو/حزيران 2024، بقُدرة إنتاجية تبلغ 2 ميغاواط.

رئيس المشروع، العالِم "شو هونغجيه"، وصف التحديات التي واجهها الفريق بأنها "اختبار للصبر الاستراتيجي"، مؤكدًا أن النجاح لم يكن صدفة، بل ثمرة عقود من البحث المضني وتفكيك الوثائق الأمريكية المُعلنة منذ ستينيات القرن الماضي — حين كانت الولايات

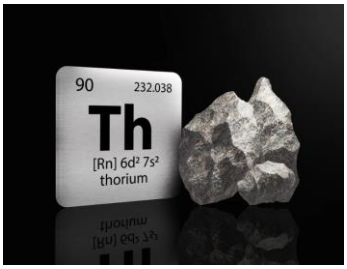
© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

المتحدة أول من طوّر هذه التقنية لكنها تخلت عنها لصالح أنظمة اليورانيوم.

وفي رمزية تاريخية لافتة، أشار شو إلى أن المفاعل بلغ التشغيل الكامل في يوم 17 يونيو/حزيران — وهو نفس اليوم الذي فجّرت فيه الصين أول قنبلة هيدروجينية قبل 57 عامًا، في إشارة إلى تحوّل الطاقة النووية من سلاح إلى أداة تنموية.

يُذكر أن الصين تعمل حاليًا على إنشاء مفاعل ثوريوم ملحي أكبر بقدرة 10 ميغاواط بحلول عام 2030، كما كشفت عن تصميمات لسفن شحن عملاقة تعمل بنفس التقنية، ما قد يُحدث ثورة في النقل البحري الخالي من الانبعاثات.

هذا الإنجاز يفتح الباب أمام عصر جديد من الطاقة النظيفة والآمنة، ويؤكد أن المثابرة العلمية والتخطيط بعيد المدى قادران على إعادة رسم خريطة القوى التكنولوجية في العالم. المصدر



الشمس الصناعية" الصينية تحقّق إنجازًا قياسيًّا يمهّد لعصر طاقة الاندماج النووي

حققت الصين إنجازًا علميًا غير مسبوق في مجال أبحاث طاقة الاندماج النووي، إذ نجح جهاز التوكاماك المتقدم فائق التوصيل (EAST)، المعروف بلقب "الشمس الصناعية"، في الحفاظ على حالة تشغيل ثابتة لبلازما عالية الحبس لمدة 1,066 ثانية — وهو رقم قياسي عالمي جديد يُعدّ خطوة جوهرية نحو تحقيق حلم توليد طاقة اندماجية مستدامة ونظيفة.

وقد أُنجز هذا التقدم العلمي في "معهد فيزياء البلازما" التابع لأكاديمية العلوم الصينية في مدينة هيفي، ويُنظر إليه على أنه معلم محوري على طريق تصميم مفاعل اندماج فعّال يمكنه محاكاة العمليات النووية التي تحدث في قلب الشمس.

يتطلب الحفاظ على بلازما شديدة الحرارة — بدرجات تتجاوز 100 مليون درجة مئوية — في حالة استقرار لفترات طويلة، سيطرة تقنية معقدة على تسخين البلازما وتوجيهها مغناطيسيًّا دون فقد للطاقة أو انهيار النظام. وقد تمكّن العلماء في EAST من مضاعفة قدرة نظام التسخين مقارنة بالتجارب السابقة، مع الحفاظ على الاتساق التشغيلي.

منذ إنشائه عام 2006، عمل جهاز EAST كمنصة اختبار مفتوحة للعلماء الصينيين والدوليين، وساهم في وضع الأسس التقنية لمشروعات كبرى مثل المفاعل التجريبي الحراري الدولي (ITER) الذي يُبنى حاليًا في فرنسا، والمفاعل الهندسي التجريبي الصيني للاندماج النووي(CFETR).

ويُعَدّ الهدف النهائي من تطوير "شمس صناعية" هو إنتاج طاقة اندماجية تحاكي تلك التي تغذّي نجمَنا، مما يوفر مصدرًا لا نهائيًا وآمنًا للطاقة، خاليًا من الكربون والمخلفات الإشعاعية الخطرة. ويأمل الباحثون في توسيع نطاق التعاون الدولي عبر مشروع EAST، للإسراع بتطبيق الطاقة الاندماجية عمليًا في المستقبل القريب.

المصدر

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء