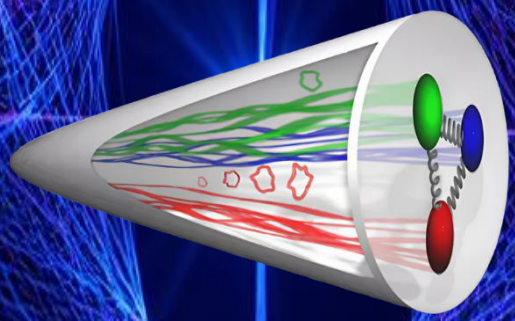
# مسارات في الفيزياء

## المثنوية (الازدواجيّة) الهولوغرافية عبر الأبعاد: ثقالة/جسيمات

AdS/CFT DUALITY

$$D+1 \leftrightarrow D$$



**مقابلة مع جوانا إردمينجِر**
أستاذة الفيزياء النظريّة والرياضيّة
في جامعة فورتسبورغ

**محاضرة البروفسور بنروز**
-الحائز على جائزة نوبل-
في افتتاح الجمعيّة العربيّة للفيزياء

العدد الخامس
مارس/ آذار 2025
© 2025 الجمعية العربية للفيزياء

# مسارات في الفيزياء

**رئيس الجمعية العربية للفيزياء**
شعبان خليل

**رئيس التحرير**
نضال شمعون

**فريق التحرير**
عادل عوض
شوقي الدّلال
أحمد معروف
محسن زهران

**اللجنة الاستشارية**
السيّد إبراهيم لاشين
عمار سكجي
مصطفى الأعصر

**الهيئة التنفيذية**
راوية رمضان
إيمان طه
رند الفار
دانا عبد الغني
ريم بري

**فريق التصميم**
مسار المطيري
أفنان محمد علي

روابط في الغلاف
Photos: https://images.app.goo.gl/1vXPWWfQTMKaMQo27
Minkowski tube, Image: M. Ammon (Physikalisch-Astronomische-Fakultät Jena)

https://images.app.goo.gl/xestvVB3xPntL6PBA
(Nobel Prize Outreach. Photo: Fergus Kennedy ©)

**نبذة عن المجلّة:** تهدف مجلّة "مسارات في الفيزياء"، الصادرة عن الجمعية العربية للفيزياء، إلى جعل المعلوماتِ المَعرفيّة العميقة مُتاحةً للقارئ المُثقَّف في العالَم العربي. تشرح مقالاتُ المجلّة، باستخدام عباراتٍ بسيطة في اللغة العربية الفُصحى، الأبحاثَ المُتقدِّمةَ في العلوم الفيزيائية/الرياضية، والتي تُغطّي موضوعاتٍ في علوم الفيزياء/الكيمياء/الرياضيات والهندسة. المجلّةُ ملتزمة بنشر المعرفة الموثوقة، وبتعزيز فهمنا للطبيعة، وبتشجيع الثقافة العلمية في العالَم العربي. كما أنها تبقي القارئ على اطّلاع بأحدث الأخبار العلمية والتقانيّة والابتكارات والأفكار في عالَم العلوم المُثير والمتطوِّر دائمًا. تحتوي المجلّة على مقابلات مع علماء مشهورين وعلى معلوماتٍ إثرائيّة مُفيدة لطلاّب المرحلة الجامعيّة.

"Trajectories in Physics", published by the Arab Physical Society, makes what would otherwise be inaccessible, specialist knowledge, accessible to the lay reader in the Arab World. Its articles explain, using simple terms in standard Arabic language, advanced research in the physical/ mathematical sciences, including physics/chemistry/ mathematics and engineering topics. It is committed to disseminating trustworthy knowledge, enhancing our understanding of the nature, and promoting scientific culture in the Arab World. It also will keep the reader up-to-date with the latest scientific and technological news, innovations and ideas in the exciting, ever-changing world of science. It features interviews with renown scientists and some pedagogical notes useful for university students.

# المحتويات

مقدمة رئيس التحرير ..... 3
ثنائية فراغ دي سيتر المضاد ونظرية الحقل الامتثالي.....5
التضخم الكوني.....16
مقابلة مع جوهانا إردمينجِر.....26
محاضرة البروفيسور روجر بنروز.....33
المواد والحضارة البشريّة.....60
حلم نظريّة الأوتار: الطريق لعزف سمفونيّة النظريّة الموحّدة.....79
معلومات إثرائيّة - مراجعة لكتاب.....92
معلومات إثرائية - مربٍّ وعالِم..... 95
معلومات إثرائية - نوبل في الفيزياء: 2011..... 97
معلومات إثرائية - معارِف: 1) مثنوية كوارك-هادرون، 2) المثنوية في الفيزياء
الإحصائيّة، 3) مثالا مثنويّة بسيطان..... 98
معلومات إثرائية - مسألة للطلاّب ..... 107
معلومات إثرائية - إعلان.....111


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

# مقدّمة رئيس التحرير

يسرّني أن أرحّب بقرّاء العدد الخامس –شتاء 2025– من مجلّة "مسارات في الفيزياء" الصادرة عن الجمعيّة العربيّة للفيزياء، وأتقدّم بالشكر لمن ساهم وساعد في إتمامِه، وأعتذر جدًّا عن التأخّر في إعلانه بسبب ظروفٍ استثنائيةٍ وقرارِنا تحويلَ محاضرات افتتاح الجمعيّة العربيّة للفيزياء لمقالاتٍ تُنشَر تباعًا في المجلّة. تُعَدّ هذه المحاضرات التي قدّمها حائزون على جوائز نوبل وفيلدز وديراك قيمةً مُضافةً إلى إنجازات الجمعيّة، وتعتزّ مجلّتُنا بأنها سوف تقوم بمهمّة إعدادها وترجمتها ونشرها كمقالات باللغة العربيّة. نبتدئ في هذا العدد بمحاضرة البروفسور روجر بنروز الحائز على جائزة نوبل عام2020 بعنوان "متفرّدات الثقوب السوداء والكونيّات الدوريّة" يقدّم فيها رؤى غير تقليديّة حول طبيعة الزمكان تنقلنا من الثقوب السوداء إلى الثقالة الكموميّة فالكون الدوريّ، وتضمّ مناقشتُها الختاميّة خلافًا بالرأي بين بنروز و توفت – الحائز الآخر على نوبل– حول مفهوم الواحديّة unitarity في ميكانيك الكمّ. موضوع هذا العدد هو المثنوية (وتُدعى أحيانًا في مناطق مختلفة من العالَم العربي "الازدواجيّة" أو "الثنائيّة" أو "الثنوية" وفقًا لما هو مألوف فيها عن ترجمة مصطلَح الـ


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

Duality)، وهو موضوع يعود إلى ازدواجيّة الموجة – الجسيم ولكن ما نتطرّق له في هذا العدد يتناول مفاهيمَ متقدّمة تربط بين نظريّاتٍ متباينة، وقد بدأت مع الثورة الثانية في نظريّة الأوتار، كما يوضّحه مقالٌ عن نظريّة الأوتار، بينما يتعرّض مقالٌ آخر لمراجعة عامة حول مفاهيم المثنويّة، وبشكل خاصّ لمثنويّة AdS/CFT التي تربط بين نظريّةٍ ثقاليّة ضمن فضاءٍ خاصّ وبين نظريةِ حقول كمومية لجسيمات تعيش على حدود الفضاء بأبعاد أقلّ، ممّا يستدعي مفهوم الهولوغرافيا (التصوير المجسّم) والتساؤل فيما إذا كان كونُنا الذي نعيش فيه هولوغرامًا. اكتُشفت هذه المثنويّة في رحاب نظريّة الأوتار ولكن تطبيقاتٍ لها وجدت طريقًا تتجلّى فيه ضمن مجالات عديدة من الفيزياء لا تقتصر فقط على ذاك الخاصّ بالطاقات العالية والثقالة. هناك مقالان آخران أحدهما عن فيزياء وتقانة المواد يعرض أهميّتها من صروح العمارات الضخمة ولغاية تصميمها على المستوى النانوي، بينما يقدّم الآخر سيناريو التضخّم الكوني، وكيفيّة حلّه لمشاكل نموذج الانفجار الكبير مع عرضٍ لمبادئ نظريّة الاضطرابات الكونيّة وكيفية تقديمها للبذور الأولى في تشكيل بنية الكون.

أجرينا في هذا العدد مقابلة مع الدكتورة جوهانا إردمينجِر، أستاذة الفيزياء النظريّة في جامعة فورتسبورغ، والشهيرة بأعمالها في مجال تطبيقات المثنويّة في فيزياء المادّة الكثيفة بالإضافة لأعمالها في مجال فيزياء الجسيمات وعلوم الكون والميكانيك الإحصائي، كما أنها المتحدّث الرسمي لقسم الفيزياء النظريّة والرياضيّاتيّة في الجمعيّة الفيزيائيّة الألمانيّة، أجابت فيها على أسئلة ثقافيّة عموميّة إضافةً إلى أسئلة تقنيّة عن المثنويّة وتطبيقاتها في الفيزياء.

وكالعادة، يضمّ العدد بابَ أخبارٍ علميّة، وبابَ معلوماتٍ إثرائيّة ضمّ من بين ما حواه لمحةً عن الحائزين على جائزة نوبل عام 2011 بيرلموتر وشميدت وريس عن اكتشافهم تمدّدَ الكون المتسارع أو ما يُعرَف باسم الطاقة المظلمة، مع شرحٍ في قسم المعارِف عن مثنويّة الكوارك–الهادرون في الكروموديناميك الكمومي وتطبيقات المثنويّة في الفيزياء الإحصائيّة. في سياق موضوع العدد، اخترنا تقديمَ كتابٍ لِلأستاذة إردمينجِر عن مثنوية الثقالة/المعيار، مع كتابٍ آخر قمتُ بترجمته إلى العربيّة بناءً على طلب مؤلِّفه الأستاذ المشهور فافا بعنوان "ألغاز تكشف عن جوهر الكون". هناك إعلانان عن مؤتمرَين يساهم فيهما أعضاء من الجمعيّة العربيّة للفيزياء، كما نورد حلَّ مسألة العدد السابق مع مسألةٍ جديدة، بينما نقدّم في هذا العدد نبذة عن مربٍّ وعالِمٍ سوري هو المرحوم الدكتور محمد البغدادي الذي أسّس قسم الفيزياء النظريّة في جامعة محمد الخامس بالرباط في المغرب.

في الختام، أعود وأقدّم كامِل شكري لكلّ من ساهم بإخراج هذا العدد إلى الضوء، وبانتظار مساهماتكم في عدد ربيع–2025 اللاحق.

نضال شمعون


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

# ثنائية فراغ دي سيتر المضاد ونظرية الحقل الامتثالي

## (Anti de Sitter Space–Conformal Field Theory Duality)

عادل عوض

أستاذ بقسم الفيزياء كلية العلوم–جامعة عين شمس

**ملخص:** في هذا المقال أستعرض أحد أهم تطورات نظرية الأوتار في العقدَين الماضيَين، وهو ثنائية فراغ دي سيتر المضاد ونظرية الحقل الامتثالي. لقد قدمت هذه الثنائية أدواتٍ وطرقًا جديدة لفهم ودراسة عدد من المشاكل الصعبة والمزمنة في مجال الفيزياء النظرية مثل مشكلات الاقتران القوي للمجالات الكمومية وكذلك مفارقة فَقْد المعلومات في فيزياء الثقوب السوداء. أحاول هنا أن أعطي القارئ فكرة مبسطة عن المفاهيم والمبادئ التي ساعدت في ظهور وصياغة هذه الثنائية، كذلك أشير سريعًا إلى أهم تطبيقات هذه الثنائية في مجالات الفيزياء المختلفة.

## من الثقوب السوداء إلى أغشية دريشلي Dirichlet:

في العقود الماضية قدمت النظريةُ النسبية العامة إطارًا نظريًا ملهمًا لوصف وتفسير أحد أهم القوى الأساسية وهي الجاذبية (الثَّقالة) وحققت العديد من النجاحات التجريبية، فصارت بذلك النظريةَ القياسية Standard Theory للظواهر الجاذبية. كذلك تمّ من خلالها بناء مجالات بحثية جديدة مثل علم الكونيات وعلم فيزياء النجوم وغيرها، كما صار لها تَطبيقات تكنولوجية مهمة مثل أنظمة جي بي إس Global Positioning System (GPS) المستخدمة في هواتفنا اليوم. مع ذلك، ورغم أثرها الواضح، كانت النسبية العامة حتى وقت قريب مجالًا بحثيًا محدودًا تقوم به مجموعة من العلماء كانت في معزل عن التخصصات الأخرى.

لكن على مدى العقدَين الماضيين، قام عدد من فيزيائي المجالات الأخرى بتَبنّي العديد من أدوات وأفكار النسبية العامة. فيمكنك اليوم أن تجد مجموعات من فيزيائيّ المادة المكثفة condensed matter، والتفاعلات النووية nuclear interactions، والمعلومات الكمومية



© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

quantum information، وغيرها من المجالات، مهتمَّةً بأدوات النسبية ومفاهيمها. تسبّبتْ في هذا التَغير عدةُ عوامل أهمها هو اكتشاف ثنائية (أو ثِنوية، أو مثنوية) duality بين فيزياء الجاذبية في فراغ دي سيتر–المضاد anti de Sitter space(وهو زمكان spacetime له ثابت كوني سالب cosmological .conformal field theory تُعنى هذه الثنائية بوجود تكافؤ مثير بين وصف ظواهر الجاذبية في فراغ دي ستر–المضاد وظواهر نظرية أخرى كمومية وقياسية Gauge بالأساس ولا تحتوي على أية تفاعلات جاذبية، وهي نظرية الحقل الامتثالي. الثنائية بين نظريتين لا تعني فقط أنهما طريقتان مختلفتان لوصف نفس الظواهر، بل تعني أيضًا أنه يوجد لكل كمية فيزيائية محسوبة في أي منهما مقابلٌ في النظرية الأخرى، لذلك فمعرفتنا لهذه الثنائية تعني بالضرورة معرفةَ المعجم الذي يُترجم لنا الكمياتِ والمفاهيم من إحداهما للأخرى.

كان لهذا التكافؤ تَبعاتٌ متنوعة على عدد من المجالات مثل الفيزياء النووية وفيزياء المادة المكثفة وفيزياء الموائع وكذلك علم الكونيات، حيث سهّل العديدَ من الحسابات المعقدة في تلك المجالات. التكافؤ بين هاتين النظريتين هو موضوع هذا المقال وسنرمز له بالرمز AdS/CFT.

دعنا نعُدْ لعدة عقود لبداية القصة وهي مبرهنات التفرّد Singularity Theorems لبنروز وهوكينج التي ظهرت في ستينات القرن الماضي والتي أوضحت أن المتفرّدات موجودة بشكل شائع في النسبية العامة وليست كحالات خاصةٍ نتيجة لتَناظرات symmetries معينة. فإذا كانت الجاذبية هي القوة الغالبة فسينهار أيّ تجمعٍ للمادة/طاقة مع الوقت على نفسه مكوّنًا مُتفرّدةً انحنائية Curvature Singularity. كذلك صرّح العالمان أن النظرية لا تستطيع تقديمَ وصفٍ مُتسق لقوانين الفيزياء بالقرب من تلك المتفردات. مثل هذه المتفردات نجدها في حلول شفرشيلد Schwartzschield التي تصف الثقوب السوداء ذات التَناظرات الكروية، وكذلك في النماذج الكونية المستخدمة في علم الكونيات Cosmology (كنموذج الانفجار الكبير). اعتقد الفيزيائيون لعقود أن التأثيرات الكمومية في النهاية ستحلّ مشكلةَ المتفردات ليكتمل وصفُ الجاذبية ميكروسكوبيًا أو كموميًا، لكن ظهرت مشكلة واضحة في هذا الاتجاه. تَكمن المشكلة في عدم توافق ميكانيكا الكم مع النسبية العامة، فقد حاول الفيزيائيون لعقود صياغةَ النسبية العامة لتكون نظرية كمومية أو قابلة لإعادة المعايرة (الاستنظام) Renormalization، لكن للآسف فشلت تقنياتُ نظريات المجال الكمومية Quantum Field Theories المعروفةُ في تحقيق ذلك. إعادة المعايرة هي مفهوم أساسي لحساب التأثيرات الكمومية يختبر التوافقَ الداخلي للنظرية عن طريق حساب كميات فيزيائية مقاسة تجريبيًا مثل الشحنة أو الكتلة ...إلخ. في معظم الأحيان تعطي هذه الحسابات نتائج لانهائية، لكن لا يعني هذا بالضرورة أن هناك مشكلة فعند حدوث ذلك يمكننا، في بعض الأحيان، إعادة تعريف الشحنة أو الكتلة وغيرها من الكميات عبر طُرق معروفة للتخلص من هذه اللانهائيات. فإذا نجحنا في ذلك نسمي النظريةَ "قابلة لإعادة المعايرة" Renormalizable، وتغدو خالية من التناقضات واللانهائيات، ويمكن حينها حساب التأثيرات الكمومية بدقة. لكن في بعض النظريات، constant) وفيزياء نظرية الحقل الامتثالي مثل النسبية العامة ونظرية فيرمي للتفاعلات النووية الضعيفة، لا نستطيع أن نطبق طريقة إعادة المعايرة ولهذا لا نستطيع حساب التأثيرات الكمومية في هذه النظريات!


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

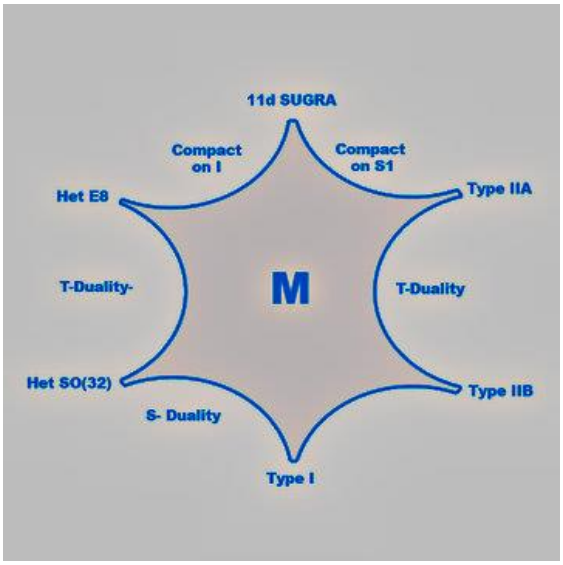
في كثير من الأحيان تحتاج النظريات غير القابلة لإعادة المعايرة إلى إضافة مجالات أو جسيمات أخرى عند طاقات عالية فيتغير سلوك النظرية في الطاقات العالية ونتمكن بذلك من التخلص من تلك اللانهائيات العنيدة وعندها تصبح النظرية قابلة لإعادة المعايرة. المثال على ذلك هو نظرية فيرمي فعند إضافة ثلاث بوزونات قياسية W−,W+,Z gauge bosons تصبح النظرية قابلة لإعادة المعايرة وبذلك نتمكن من حساب التأثيرات الكمومية للنظرية ومقارنتها بالتجربة.

لذلك قد تشير هذه المشكلة في النسبية العامة إلى وجوب إضافة جسيمات أو فيزياء جديدة تُعدّل من سلوك النظرية في الطاقات العالية. بالفعل وجد الفيزيائيون طريقةً للسيطرة على هذه اللانهائيات وهي افتراض أن المادة في تركيبها الدقيق تتكون من أوتار Strings بالغة الصغر (طول الوتر $\ell_s = 10^{-33}$ سم) وقابلة للاهتزاز كأوتار الآلات الموسيقية. فكل اهتزاز لها يُفَسر كجسيم أولي كالإلكترون أو الكوارك أو غيرها من الجسيمات المعروفة (أرجو الرجوع لمقالَي الدكتور نضال شمعون في العدد الأول والدكتور علي الزبيدي في هذا العدد لمعرفة المزيد عن نظرية الأوتار [1,2]).

في الواقع، تضم نظرية الأوتار تلقائيًا جميع الأفكار السابقة لها والتي حاولت تعميم النموذج القياسي لجلاشو–سلام–واينبرج مثل أفكار التوحيد الكبير Grand Unification Theories، التناظر الفائق Supersymmetry، وكالوزا–كلاين Kaluza–Klein Theories. تتميز هذه النظرية بأن لها عشرةَ أبعاد، كما أنها تؤول عند الطاقات المنخفضة إلى النسبية العامة (وهي النظرية الوحيدة التي تقوم بذلك بشكل كمومي متسق) وتُنتج كذلك جميع الجسيمات المعروفة بالإضافة إلى الجرافيتون أو الجسيم الناقل للتفاعلات الجاذبية! هذه النتائج القوية والتي لا تشاركها فيها أي نظرية أخرى هي ما جَذب العديدَ من الفيزيائيين النظريين لها.

في الثمانينات من القرن الماضي تحولت نظرية الأوتار إلى صرح ضخم يحتوي على العديد من التقنيات والأدوات النظرية والرياضية المميزة. بالطبع كانت هناك مشكلة واضحة في هذه النظريات وهي أنه يمكن اختبارها تجريبيًا فقط عند طاقات عالية جدًا تصل إلى $10^{19}$ GeV (جيجا إلكترون فولت) وهي أكبر بمليار مليون مرة من طاقة أكبر المعجلات (المُسرِّعات) التي لدينا الآن. فالوصول لمثل هذه الطاقات يتجاوز بكثير قدرة معجلاتنا الحالية وربما المستقبلية، لذا لا تستطيع هذه النظريات الاسترشاد بالتجربة. لكن هناك مبادئ أخرى يمكن للنظرية الاسترشاد بها، مثل قابليتها لإعادة المعايرة وقدرتها على تفسير ظواهر الجاذبية الكمومية وكذلك اتساقها الداخلي. من حسن الحظ أن اتساقها الداخلي يتطلب شروطًا بالغة الصرامة، لذا يوجد منها 6 نظريات فقط اكتشفنا بعد ذلك أنها بالفعل أوجه مختلفة لنفس النظرية [1,2]. فقد وجدنا أن النظريات الستة مرتبطة بشبكة من الثنائيات dualities كما في الشكل الموضح فهي في النهاية نظرية واحدة!

العلاقة بين نظرية M و نظريات الأوتار المختلفة (المصدر)





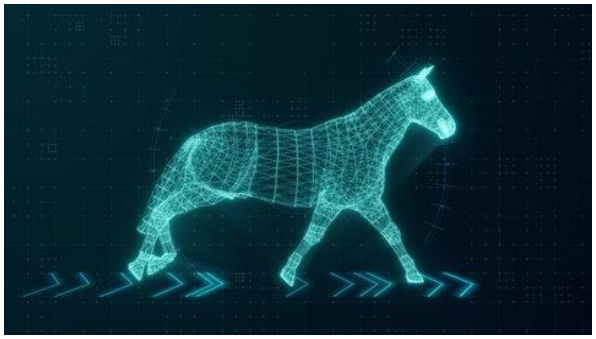
© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

من المهم أن نصرح هنا أن كون هذه النظريات غير قابلة للاختبار في الوقت الحالي جعلها هدفًا للنقد من قبل عدد من الفيزيائيين في العقود الثلاثة الماضية. لكن نظرًا لعدم وجود منافس حقيقي لهذه النظرية ولقوة بنائها الرياضي لم يتخل عنها الفيزيائيون النظريون، بل صارت مصدرًا لأدوات نظرية تحليلية ورياضية عديدة تساعدنا في فهم الظواهر الفيزيائية المعقدة في عدة مجالات، ليس في فيزياء الجسيمات الأولية فحسب لكن في مجالات أخرى، كما سنرى لاحقًا.

أثناء السعي المستمر نحو الجاذبية الكمومية، كانت الثقوب السوداء توفر لنا "المعمل النظري" الأكثر فائدة، والذي تمت فيه اختبارات متنوعة لأفكار عديدة. أهم هذه الأفكار التي صَمدت أمام الاختبار هي أفكار الفيزيائي الفذّ ستيفن هوكينج عن إشعاع الثقوب السوداء الكمومي. لم يقدّم هوكينج نظرية كمومية للجاذبية لكنه درس مجالاتٍ كموميةً لجسيمات أولية موجودة حول الثقب الأسود، فحصل على نتائج مدهشة نحاول إلى اليوم فهمَ تَبعاتها. اكتشف هوكينج أن الثقوب السوداء لا تَبتلع الأشياء فقط، بل أنها تَبعث إشعاعًا حراريًا، مثل أي جسم حراري، كنتيجة لتفاعل المجال الجاذبي مع المجالات الكمومية في منطقة أفق الحدث Event horizon.

مكّنت هذه النتائج هوكينج من وصف الثقب كنظام حراري يطيع قوانين الديناميكا الحرارية (الترموديناميك) المعروفة، بل وتتناسب درجة حرارة الثقب عكسيًا مع الكتلة وتتناسب مساحة أفق حدثه مع أنتروبيّته. كذلك أبرزت حسابات هوكينج إحدى أهم المفارقات paradoxes في الفيزياء النظرية والخاصة بإشعاع الثقب الأسود. فإشعاع الثقب هو إشعاع حراري يعتمد فقط على درجة حرارة الثقب والتي تتناسب عكسيًا مع كتلته ولا يعطي أيةَ معلومات أخرى عنه. فلو افترضنا أننا صنعنا ثقبَين أسودَين لهما نفس الكتلة، أحدهما به معلومات قليلة وآخر به قدر هائل منها (تَربط نظرية المعلومات information theory بين المعلومات والأنتروبيّة، فإذا زادت المعلومات ازدادت الأنتروبيّة وإذا قلّت كانت الأنتروبيّة قليلة) فلن نشاهد أي فرق في الاشعاع الخارج منهما لأنه لا يحمل أيةَ معلومات! لكن هذه النتيجة تناقض ما نعرفه من مبادئ فيزياء الكم والتي تؤكد على بقاء ومصونيّة كمية المعلومات في الأنظمة المعزولة مثل الثقب الأسود! هذا التناقض يسمى بمفارقة المعلومات المفقودة للثقب الأسود.

قبل حسابات هوكينج ببضعة أعوام قدّم جاكوب بكنشتين اقتراحا تنبأ فيه بأن أي ثقب أسود سيكون له أنتروبيّة تساوي S=A/4 أي تتناسب مع مساحة أفق الحدث، لكن لم يأخذ الفيزيائيون هذا الاقتراح بجدية كون الثقب الأسود كلاسيكيًا يبتلع كلَّ ما يقابله ولا يَدفع بأي شيء للبيئة المحيطة، لذلك لن يكون هناك تبادل حراري وتباعًا لن يصل الثقبُ لاتزان حراري.



(المصدر)

بعد ذلك بسنوات طور بكنشتين أفكارًا عديدة مهمة منها فكرة الأنتروبيّة القصوى لأي نظام فيزيائي. صاغ بكنشتين محاجّاةً خاصة لهذه الفكرة فكانت بمثابة البذرة البدائية لثنائية فراغ دي- سيتر-المضاد ونظرية الحقل الامتثالي. كانت فكرة بكنشتين هي الآتي: لنفترض وجود نظام فيزيائي يشغل فراغًا أو حجمًا معيّنًا V، يقودنا ذلك لوجود أنتروبيّة قصوى تساوي مساحة السطح A المحيط بالحجم V!


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

كي نُوضح تلك الفكرة دعنا نتخيل أننا نُزيد كمية المادة بالتدريج في الحجم V لكي نحصل على أعلى كثافة ممكنة. لاحظ بكنشتين أيضًا أنه ستكون هناك زيادة مطردة للأنتروبيّة حتى حد معين! نعم فالنسبية العامة تخبرنا أنه عند حد معين ستنهار المادة مكونة ثقبًا أسودًا له أنتروبيّة قدرها S=A/4، لذلك فإن هذه القيمة هي أقصى أنتروبيّة يمكن الحصول عليها لنظام فيزيائي يشغل هذا الحجم!

استخدم كلٌّ من الفيزيائيَّين جيرارد إتهوفت وليونارد سسكايند محاجّاةَ بكنشتين كي يقدما فكرة أخرى مثيرة تسمى اليوم "مبدأ الهولوجرام"، الذي اقترحه إتهوفت عام 1993 ثم طوره ليونارد سسكيند ليصير بالفعل فكرة ثورية في الفيزياء. يُشير المبدأ إلى أن "المعلومات أو الأنتروبيّة الموجودة في حيز مكاني له حجم ما يمكن أن تُشفَر بالكامل على السطح المحيط لذلك الحجم والذي له بالطبع أبعاد أقل"، تمامًا كما يعرض الهولوجرام مُجسمًا ثلاثي الأبعاد مستخدمًا معلومات سطح ثنائي الأبعاد، كما في الصورة الموضحة. لاحظْ أن مصدرَ الضوء هو السطح أسفل الصورة والذي يمر منه الضوء ليعطي في النهاية صورة مجسمة!

كان مبدأ الهولوجرام جديدًا ومثيرًا للفيزيائيين لكنهم اعتقدوا حِينها أنها فكرة بلا تطبيق، فلا توجد نظريات معروفة تُحقق ذلك المبدأ. سرعان ما تغير ذلك الاعتقاد بعد بضع سنوات عندما قدم خوان مالداسينا ثنائيّتَه التي صارت من أحد أهم تطورات الفيزياء النظرية في أواخر القرن العشرين.

لكن دعنا نسأل: إذا كانت لدينا حقا نظريةٌ للجاذبية الكمومية وهي نظرية الأوتار فلماذا لم نَستطِع الإجابة على الأسئلة السابقة الخاصة بالثقوب السوداء؟ تكمن المشكلة في أن نظرية الأوتار قبل عام 1995 كانت مُعروفة كنظرية اضطرابية perturbative theory فقط، أي أننا نستطيع أن نحسب كمياتها عندما يكون ثابت الاقتران $g_s<<1$. لكن من المعروف أن هناك علاقةً في هذه النظرية تربط ثابتَ الجذب العام وثابت الاقتران وهي $G_N=g_s^2 \ell_s^8$. معنى هذا أنه بما أننا نستطيع أن نحسب التأثيرات الكمومية فقط عندما يكون $g_s<<1$، فعند ذلك تكون شدة المجال الجاذبي $G_N$ صغيرة أيضًا، وبالتالي فإن هذه الحسابات صالحة فقط لأنظمة ذات مجال جاذبي ضعيف ولا تستطيع وصف أنظمة مثل الثقوب السوداء! لذلك كان الفيزيائيون مهتمين بمحاولة صياغة نظرية الأوتار في إطار غير–اضطرابي يسمح بالقيام بحسابات لها ثابت اقتران قوي $g_s>>1$، فكان اكتشاف أغشية دريشلى محطة مهمة على هذا الطريق الذي قاد إلى ثنائية AdS/CFT والتي يعتبرها العديد من النظريين إحدى الصياغات غير الاضطرابية لنظرية الأوتار.

دعْنا نعدْ قليلًا لحسابات هوكينج في إشعاع الثقب الأسود والأنتروبيّة والتي حاول العديد من الفيزيائيين فهم أصلها الميكروسكوبي أو الإحصائي. علمتنا الفيزياء الإحصائية أن الديناميكا الحرارية ما هي إلا وصف ظواهري phenomenological أو عياني (ماكروسكوبي) Macroscopic للأنظمة الفيزيائية ودائما ما يكون لها أصل ميكروسكوبي Microscopic أي ميكانيكي إحصائي. في الميكانيكا الإحصائية نستطيع دائمًا حساب الأنتروبيّة للنظام عندما نعلم عدد الحالات الميكروسكوبية Ω المُكوِّنة له عبر العلاقة

$$S = k \ln (\Omega)$$

حيث k هو ثابت بولتزمان. السؤال الآن ماهي النظرية الميكروسكوبية التي يمكنها تفسير سلوك الثقب الأسود ولها عدد الحالات Ω؟ لم يستطيع أي فيزيائي الإجابة على هذا السؤال لمدة عقدين إلى أن قدّم كلٌّ من أندرو سترومنجر وكمرون فافا A. Strominger and C. Vafa في عام 1996 إجابة لهذا السؤال مستخدمين


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

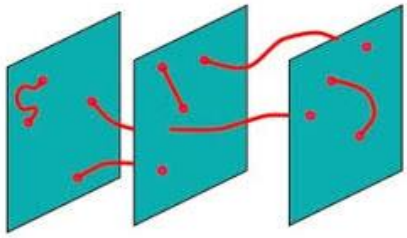
نظرية الأوتار. كوّن سترومنجر ووافا ثقبًا أسودَ مستخدمَين ما يعرف بأغشية دريشلي D–Branes او–Dirichlet Branes. تلك الأغشية عبارة عن أسطح ذات أبعاد متعددة (قد يكون لها بُعد واحد أو اثنان أو أكثر) اكتشفها جوزيف بولشينسكي عام 1995 كتشكيلاتٍ ديناميكية في نظرية الأوتار وسنتحدث عنها لاحقًا. استخدم سترومنجر ووافا خصائص تلك الأغشية في عَدّ الحالات الميكروسكوبية للثقوب السوداء فوجدا أنها تنتج تمامًا قيمة الأنتروبيّة كما حسبها هوكينج للثقب الأسود، أي كربع مساحة أفق الحدث A/4. كانت النتيجةُ بالفعل مبهرة بالرغم من أن نموذج سترومنجر ووافا كان لثقب أسود ذي طبيعة مختلفة عن ثقب شفرشيلد المعروف، فقد كان ثقبًا في خمسة أبعاد وله تماثل فائق supersymmetric. إلا أن هذا البحث قد أوضح لنا الطريق لحل تلك المسألة الصعبة وكذلك لإدراك أهمية أدوات نظرية الأوتار في فهم ألغاز الثقب الأسود. أستطاع بعدها عدد من الفيزيائيين تحسين تلك النتيجة عن طريق كسر بعض القيود السابقة في حسابات سترومنجر ووافا ممّا خلق ثقة أكبر في صحتها. نعم، بحلول عام 1996 حققت نظرية الأوتار تقدمًا كبيرًا نحو فهم الجوانب الكمومية للثقوب السوداء وبالرغم من تفاؤل باحثي نظرية الأوتار وقتها إلا أننا لم نكن نتوقع تلك القفزة الكبيرة الذي شهدها العام التالي وهو اكتشاف ثنائية AdS/CFT.

## مالداسينا وثنائية AdS/CFT:

كي نفهم هذه الثنائية دعنا نعد إلى سبعينات القرن الماضي عندما ظهرت أولى الثنائيات والتي ألهمت الفيزيائيين النظريين للوصول إلى كل ما جاء بعدها من ثنائيات وهي ثنائية مونتُنِن وأوليف Montonen–Olive Duality. كانت فكرة مونتن وأوليف بسيطة ومعنية بنظريات الحقل الكمومي، خاصة نظريات يانغ–ميلز Yang–Mills. تقترح هذه الثنائية أن هناك تكافؤًا بين وصفَين مختلفَين لنظرية الحقل الكمومي في بعض نظريات يانغ–ميلز:

1. وصف أول، تكون الجسيمات المشحونة كهربائيًا (مثل الإلكترونات) هي الجسيمات الأولية fundamental particles ولها كتل صغيرة، بينما الشحنات المغناطيسية (أحاديت القطب أو المونوبولات monopoles) هي إثارات جَمعية collective excitations (تسمى أيضًا أشباه جسيمات quasiparticles) تتكون من عدد كبير من الجسيمات الأولية. في هذا الوصف يكون ثابت الاقتران (الذي يصف شدة التفاعل بين الجسيمات) صغيرًا g<<1، وتكون النظريةُ قابلة للحساب والتقريب، وتُسمَّى حينها اضطرابيةً perturbative، وتكون كتل المونوبولات كبيرة.

2. وصف ثاني، تكون فيه المونوبولات هي الجسيمات الأولية fundamental particles، بينما الشحنات الكهربية هي إثارات جَمعية مُكوَّنة من عدد كبير من الجسيمات الأولية. في هذا الوصف، يكون ثابت الاقتران (الذي يتحكم في شدة تفاعلات المونوبولات) كبيرًا $g_m=1/g>>1$، وتكون النظريةُ غيرَ اضطرابية وكتل جسيماتها المشحونة كبيرة.



(المصدر)

لاحظ أنه يمكننا استخدام هذه الثنائية لحل مسائل صعبة في الحالات الغير اضطرابية أو ($g_m=1/g>>1$) وتحويلها لحسابات مكافئة نستطيع القيام بها في الصياغة الاضطرابية (g<<1).


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

ظهرت أهمية ثنائية مونتن وأوليف عندما اكتشف بولشينسكي عام 1995 أن أغشية دريشلى ثُلاثية البعد أو D–3 في الصياغة الاضطرابية، تسلك سلوكَ مونوبولات وشحنات مونتن وأوليف، خاصة في نظريات الاوتار المغلقة من النوع الثاني–ب أو Type IIB. في تلك الصياغة تُكوِّن أغشية دريشلي مناطق حدية (أي حدودًا) تَنتهي عندها الأوتار فإذا وضعنا عددًا من الأغشية بجانب بعضها استطاعت الأوتار الوقوفَ عند غشاءٍ ما بطرف والوقوفَ عند غشاءٍ آخر بطرفها الآخر. كذلك يحتوي كل وتر على مجال قياسي gauge field واحد فلو كان لدينا عدد أغشية N فوق بعضها البعض فسيكون لدينا $N^2$ وتر مختلف وكذلك $N^2$ مجال قياسي. وجد بولشينسكي أن هذه الأغشية تصف لنا نظرية يانج–ميلز القياسية للزمرة U(N)والتي عدد مجالاتها هو$N^2$.

كانت تبعاتُ اكتشافات أغشية دريشلى كبيرة حيث اكتشف الفيزيائيون عددًا من الثنائيات التي تربط كل نظريات الأوتار المعروفة وبذلك أصبحت جميع هذه النظريات متكافئة فيزيائيًّا (أنظر مقال د. نضال شمعون في العدد الأول [1]).

إحدى هذه الثنائيات تسمى "ثنائية S" وهي تربط بين نظرية الأوتار IIB عندما يكون ثابت اقترانها ضعيفًا أو g<<1 ونفس النظرية عندما يكون ثابت اقترانها قويًّا أو g>>1. أيضًا تتبادل أغشيةُ درشلي والأوتار الأدوارَ في هاتين النظريّتَين مثلما فعلت الشحنات الكهربائية والمغناطيسية في ثنائية مونتن وأوليف.

دَرس مالداسينا نظرية الأوتار IIB عند وجود عددٍ كبير من أغشية درشلي الثُلاثية، D–3 قدره N، عند ذلك يصبح ثابت الاقتران $g_sN$ وليس $g_s$ (ثابت اقتران الأوتار). لاحظ مالداسينا أن هناك وصفَين لنفس النظرية عند دراسة الأوتار قرب الاغشية وعند الطاقات الضعيفة: الأول هو نظرية يانج ميلز–U(N) عندما يكون ثابتُ الاقتران صغيرًا $g_sN <<1$ ، أما الثاني فيكون نظريةَ الأوتار المغلقة في فضاء $AdS_5xS^5$ وبثابتِ اقترانٍ كبير $g_sN >>1$. بالنسبة للوصف الأول نستطيع أن نرى أنه نتيجةٌ طبيعيةٌ لوجود الأغشية كما أسلفنا. أما الوصف الثاني ففسّره مالداسينا كالآتي: في هذا الوصف تكون محصلة كتل أغشية D–3 كبيرة جدًا لأنها تتناسب مع العدد N، بل ثقيلة لدرجة أنها تحني الفضاء حولها مكوِّنةً أفقَ حدثٍ مماثلًا لأفق حدث الثقوب السوداء. وبدراسة فضاء النظرية (ذي العشرة أبعاد) قرب أفق الحدث وجد أنه يتكون هندسيًّا من حاصل ضرب فضاء كروي خماسي الابعاد مع فضاء دي–ستر–مضاد خماسي الابعاد، أي $AdS_5xS^5$. أي أن الأوتار في هذه الحالة تتحرك في ذلك الفضاء!

وهكذا استنتج أو تنبّأ مالداسينا بثنائية نظريات يانج ميلز–U(N) الفائقة ونظرية الأوتار في فضاء $AdS_5xS^5$ عندما يكون العدد N كبيرًا!

لاحظ مالداسينا أنه يمكن تقريب نظرية الأوتار $AdS_5xS^5$ في هذه الثنائية للنسبية العامة في فضاء $AdS_5$ مستخدمًا انضغاط (تراصّ compactification) كالوزا–كلاين وبذلك أضاف عددًا من الجسيمات أو المجالات fields الأخرى عوضًا عن الأبعاد الخمس. أعطى هذا الأمرُ الثنائية القدرةَ على تحويل حسابات معقدة في نظرية يانج ميلز–U(N) إلى حسابات أسهل كثيرًا في النسبية العامة المتعلّقة بفضاء $AdS_5$. لاحظ أنه عندما تسعى $N\to\infty$ في نظرية الأوتار $AdS_5xS^5$ يكون نصف القطر الانحنائي radius of curvature, R كبيرًا جدًا مقارنة بطول بلانك، $l_p$: $N \sim (R/l_p)^4$.

عند ذلك يكون من الممكن إهمال تأثيرات الجاذبية الكمومية وبذلك تكون النسبية العامة كافية لوصف



© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

التفاعلات الجاذبية. كذلك يتحول الفضاء الكروي $S^5$ عن طريق انضغاط –كالوزا–كلاين Kaluza–Klein Compactification إلى مجال يانج ميلز لزمرة SO(6) والذي يضاف للمجالات الأخرى التي تعيش في فراغ $AdS_5$.

لثنائية AdS/CFT خاصيّتان أساسيّتان: أولهما أنها تحقق مبدأ الهولوجرافي حيث تستطيع المعلومات الكامنة في نظرية مجالٍ كموميّة في أربعة أبعاد تمثيلَ المعلومات الكامنة في نظريةِ جاذبيةٍ في خمسة أبعاد ($AdS^5$) بشكل تام! أما الخاصية الثانية فإنها تمثل تكافؤَ نظريّتَين إحداهما يمكن أن تكون لها ثابت اقتران ضعيف $g_s<<1$ (الجاذبية) والأخرى لها ثابت اقتران قوي $g_s>>1$ ، ممّا يعطي للثنائية قدرة عالية على القيام بحسابات نظرية يانج–ميلز غير الاضطرابية! من أمثلة نظريات يانج–ميلز غير الاضطرابية هناك الكروموديناميكا الكمومية QCD (Quantum Chromodynamics). لاحظ أن هذه النوعية من الثنائيّات لا يستطيع أحدٌ إثباتَها بالطرق الاضطرابية through perturbation theory لكننا نستطيع إدراكَ صحتها بطرق أخرى غير اضطرابية. فمثلًا تتطابق تناظرات النظريّتَين فالتناظرات الزمكانية في فضاء دي–ستر–المضاد خماسي الأبعاد يُعبَّر عنها بزمرة SO(2,4) وهي نفس زمرة التناظر الخاصة بنظريات المجال الامتثالي (الزمرة الامتثالية هي زمرة بونكاريه Poincare group بالإضافة لتحويلات الانقلاب inversion transformation وتحويلات التمدد dilation). كذلك النظريّتان لهما نفس مقدار التناظر الفائق (وهي تناظرات تُحوِّل الفرميونات إلى بوزونات وتفعل العكس أيضًا) فكل من النظريتين لهما 16 شحنة فائقة! كذلك تتطابق زمرة تناظر الكرة خماسية الأبعاد في الجزء الجاذبيّ من الثنائية وهي SO(6) مع التناظر العام للشحنات الفائقة (R–symmetry) في الجزء الخاص بنظريات U(N) يانج–ميلز الفائقة.

علاوةً على ذلك، تمّ حسابُ دوال الترابط (Correlation functions) المتنوعة لهذه النظريات وتمّ إثبات تطابقها (دوال الترابط هي دوال تعبر عن احتمالات تصادم الجسيمات الأولية، وهي دوال مهمة في فيزياء الجسيمات الاولية). كذلك هناك عددٌ كبير من الاختبارات غير الاضطرابية التي تمّ اختبارها وأُثبِت تطابقها في النظريتين، وغيرها من الاختبارات العديدة التي طُبِّقت على هذه الثنائية وتمّ التحقق منها جميعًا بنجاح.

في العقدين الماضيين تمّ تعميمُ هذه الثنائية وفك ارتباطها بنظرية الأوتار لتكون بناءً نظريًّا غيرَ مرتبط بفرضيات نظرية الأوتار، وتمت صياغتها كالتالي: إن ظواهر الجاذبية في فراغ دي ستر–المضاد AdS والذي له d+1 بعدًا تكافئ ظواهرَ نظريات المجالات الكمومية والموجودة على سطح فضاء AdS الحَدّي والذي له عدد أبعاد d.

لنستعرض الآن أهم تطبيقات ثنائية AdS/CFT.

**أولًا الكروموديناميكا الكموميّة:**

من المعروف أن الكروموديناميكا الكمية هي نظرية غير اضطرابيه حيث لها ثابت اقتران $g_{QCD}>1$ ولذلك يصعب استخدامُها في حساب الكميات الفيزيائية، وخاصة عند الطاقات المنخفضة، مثل حساب كتلة البروتون أو النيوترون. لذلك توفِّر ثنائية AdS/CFT إطارًا مهمًا لدراسة QCD عند الطاقات المنخفضة والاقتران القوي، حيث تفشل الطرقُ الاضطرابية التقليدية. من خلال عملِ نماذجَ قريبةِ التشبّه بالكروموديناميكا وباستخدام نماذجَ هولوجرافية مثل **AdS/QCD**، يمكن للباحثين تحليلُ ظواهر مهمة غير اضطرابية مثل الحبس (الاحتجاز) confinement، وبلازما كوارك–


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

جلوون (Quark–gluon–plasma). من أهم هذه النتائج على سبيل المثال، التنبؤ بنسبة لزوجة القص shear viscosity إلى كثافة الأنتروبيّة ($\eta/s = 1/4\pi$) والتي تتطابق مع نتائج تجارب تصادمات الأيونات الثقيلة في مصادمات RHIC و LHC. بالإضافة إلى ذلك، تتيح ثنائية AdS/CFT حسابَ أطياف الهادرونات، وكتل الجلوونات، والخصائص الحرارية للهادرونات عن طريق ربطها بديناميكيّات الجاذبية في فضاء AdS متعدد الأبعاد.

**ثانيًا فيزياء الثقوب السوداء الكمومية:**

كذلك تقدِّم ثنائية AdS/CFT إطارًا نظريًا لحلّ مفارقة المعلومات المفقودة للثقب الأسود، والتي تتساءل إذا كانت المعلوماتُ تُفقَد عند تبخّر الثقب الأسود عبر إشعاع هوكينغ؟ في هذا السياق، تُقدِّم نظريةُ المجال الامتثالي (CFT) على الحدود (وهي نظرية كمومية لها تطور واحديّ unitary evolution أي تحافظ على المعلومات) وصفًا لفضاء AdS بما في ذلك تكوّن الثقوب السوداء وتبخّرها في فراغ AdS، عبر عمليات CFT الواحدية، بما في ذلك انتقالاتٌ إلى حالة حرارية (تكوين الثقب الأسود) ثم العودة إلى الحالة غير الحرارية. يتضح من هذه الثنائية منذ ظهورها أن المعلومات مُحافَظٌ عليها من حيث المبدأ لكن كيف تتمّ عملية استرجاعها؟ ذلك ما قادت إليه أبحاث AdS/CFT في الثماني سنوات الأخيرة، حيث بيّن بينينجتون، والمهيري، وإنجلهارت وماكسفيلد Penington, Almheiri, Engelhardt, and Maxfield إمكانيةَ ذلك ونالوا جائزةَ النيو هورايزون في الفيزياء 2021. بعد زمن معين يسمى زمن بيج، يبدأ الثقب الأسود في إظهار بعض المعلومات والتي يمكن حسابها عن طريق ما يسمى منحنى بيج وعددٍ من الأدوات الأخرى ممّا مكنهم من حساب أنتروبية التشابك بين إشعاع هوكينغ والثقب الأسود! وبحساب هذه الأنتروبيّة باستخدام طرق AdS/CFT وُجِد أن المنحني مماثل لمنحني بيج ممّا يحلّ المفارقة، على الأقل من حيث المبدأ!

**ثالثًا ديناميكا الموائع:**

أحدثت ثنائية AdS/CFT تغييرًا واضحًا في فهمنا لديناميكا الموائع من خلال التكافؤ الهولوجرافي بين نظريات الجاذبية في فضاء دي سيتر–المضاد (AdS) وموائع نسبويّة relativistic fluids في نظرية المجال الحدودية، حيث توفِّر هذه الطريقة إطاراً قوياً لدراسة الموائع ذات الاقتران القوي التي تتجاوز نطاق الطرق الاضطرابية التقليدية. ومن الإنجازات البارزة في هذا المجال اشتقاقُ معادلات نافييه–ستوكس النسبويّة انطلاقًا من معادلات أينشتاين في فضاءAdS، حيث تُتَرجَم ديناميكياتُ أفق الثقب الأسود إلى ديناميكيات الموائع على الحدود. تتنبأ الثنائية بمعاملات نقل transport coefficients غير معتمدة على النظرية، أبرزها النسبة الشهيرة بين لزوجة القص وكثافة الأنتروبية $\eta/s=1/4\pi$ والتي تمّ التحقق منها تجريبياً. علاوة على ذلك، تُمكِّننا ثنائية AdS/CFT من دراسة ظواهر الاضطراب والموائع غير النيوتونية وديناميكيات الأنظمة البعيدة عن التوازن من خلال تحليل انهيار الجاذبية وتشكّل الثقوب السوداء في AdS. وقد برز استخدام الثنائية بشكل خاص في الحالات التي تتفاعل فيها درجاتُ الحرية المجهرية للسائل بقوة ويكون متوسط المسار الحر مماثلًا لأبعاد النظام، ممّا يجعل نظرياتِ الحركة التقليدية غيرَ كافية لتفسير تلك الظواهر.

**رابعًا فيزياء المادة المكثفة:**

أصبحت ثنائية AdS/CFT أداةً ثورية في فيزياء المادة المكثفة، خاصةً لدراسة الأنظمة الكمومية ذات الاقتران القوي والتي تقاوم الطرق النظرية التقليدية. تُحوِّل


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

هذه الثنائية المشاكلَ المعقدة للأنظمة الكمومية متعددة الجسيمات في أبعاد عددها d إلى نظريات جاذبية أبسط في فضاء دي سيتر–المضاد والذي له (d+1) بعدًا. من التطبيقات البارزة للثنائية هناك دراسة المُوصِّلات الفائقة ذات درجة الحرارة العالية، حيث يصف نموذج "المُوصِّل الفائق الهولوغرافي" تحولاتِ الطور phase transitions والوصولَ للتوصيل الفائق عبر فيزياء الثقوب السوداء في حيّز – AdS حيث يتوافق سلوكُ المجال السلّمي scalar field على أفق الثقب الأسود مع تكاثف أزواج كوبر في نظرية المجال الحدودية. وقد قدّمتْ ثنائية AdS/CFT رؤيةً عميقة للظواهر الحرجة الكمومية، والسوائل غير الفرمية Non–Fermi Liquids، والمعادن الغريبة Strange Metals، كما تنبأت بمقاومة خطية في المُوصِّلات الفائقة والتي تحتوي على رقائق أكاسيد النحاس. وقد فَسَّر هذا الإطارُ بنجاح خصائصَ النقل الشاذة في شبه الفلزّات من نوع ديراك ووايل Dirac/Weyl semimetals، وتم تطبيقه لدراسة أنظمة هال الكمومية Quantum Hall Systems، ومواد الفيرميونات الثقيلة Heavy Fermion Materials، والأطوار الطوبولوجية للمادة Topological Phases of Matter.

**المراجع:**

[1] الدكتور نضال شمعون، "نظرية الأوتار وما وراءَها" مسارات في الفيزياء، في العدد الأول.

[2] الدكتور علي كريم الزبيدي، "حلم نظريّة الأوتار: الطريق لعزف سمفونيّة النظريّة الواحدة" مسارات في الفيزياء، في العدد الحالي.

# أخبار علمية

## خليطةٌ خاليةٌ من تعب المعادن ذاتُ تطبيقاتٍ واعدة في هندسة الطيران

حقق علماء صينيون تقدمًا غير مسبوق في مجال علم المواد، إذ نجحوا في تحويل الفولاذ المقاوم للصدأ إلى مادة خارقة تقاوم ما يُعرف بـ"تعب المعادن (Metal Fatigue)"، وهو التدهور البطيء في قوة المادة نتيجة التعرض المتكرر للإجهادات. هذا الإنجاز، الذي نُشر مؤخرًا في مجلة *Science* المرموقة، قد يُحدث تحولًا جذريًا في مجالات الطيران، الفضاء، والهندسة البحرية.

اعتمد فريق البحث، من معهد أبحاث المعادن التابع للأكاديمية الصينية للعلوم، على تقنية مبتكرة تقوم على "لَيّ" البنية الداخلية للفولاذ بطريقة تشبه عصر المنشفة. ورغم أن مظهر السطح لم يتغير، إلا أن التركيب البلوري الداخلي خضع لتحوّل جوهري، أدى إلى مضاعفة مقاومة الخضوع (Yield Strength) ، وزيادة قدرة المعدن على مقاومة الإجهاد المتراكم بمعدّل يصل إلى عشرة آلاف ضعف.

وتكمن العبقرية في هذا الابتكار في أنه كسر "المثلث المستحيل" في علم المواد، والذي كان يفترض استحالة الجمع بين القوة، الليونة، والثبات الهيكلي في معدن واحد. وقد أصبحت هذه المعادلة ممكنة بفضل البنية المجهرية الجديدة، التي وصفها البروفيسور لو لي، قائدة الفريق، بقولها: "الهيكل العظمي للمعدن يبلغ جزءًا من ثلاثمائة من قطر شعرة الإنسان، لكنه يلعب دورًا حاسمًا في تحمّل الضغط".

تتعدد التطبيقات المحتملة لهذا الإنجاز، من أنابيب أعماق البحار ومكونات المحركات عالية التحمل مثل أعمدة الكَرَنْك (أذرع التدوير)، إلى تصنيع معدات هندسية فائقة الأداء في الصناعات المتقدمة. ويُعدّ هذا


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

التطور بمثابة دعم تكنولوجي مهم للمجالات التي تتطلب أداءً ميكانيكيًا طويل الأمد تحت ظروف تشغيل قاسية.

يُعيد هذا الابتكارُ تشكيلَ فهمِنا لحدود المواد المعدنية، ويفتح الباب أمام هندسة جيل جديد من السبائك الذكية المصممة بدقة ذرية لتلائم متطلبات المستقبل الصناعي والفضائي.

China's fatigue-free alloy breakthrough paves way for aerospace revolution

## قطة شرودنجر" تقود طفرة في الحوسبة الكمومية نحو معالجات خالية من الأخطاء

في تقدم علمي واعد قد يُغيّر قواعد اللعبة في مجال الحوسبة الكمومية، أعلن فريق من الباحثين عن اكتشاف طريقة جديدة لتقليل الأخطاء في الحواسيب الكمومية — التحدي الأكبر الذي يعيق تطبيقها العملي الواسع. ويستند هذا الاكتشاف إلى تجربة "قطة شرودنجر" الشهيرة، حيث تمكّن العلماء من تصميم "كيوبت" كمومي مستوحى من فكرة تراكب الحالات، باستخدام ذرة الأنتيمون المزروعة داخل شريحة سيليكون كمومية.

في الفيزياء الكمومية، يُمثل الكيوبت وحدة المعلومات الأساسية، والتي يمكن أن تكون في حالتين (0 و 1) في آنٍ معًا، ولكن هذه القدرة على التراكب تجعلها عرضة للأخطاء الناتجة عن "الضجيج" الكمومي. الحل الجديد يتمثل في تخزين المعلومات داخل ذرة الأنتيمون التي تملك ثمانية اتجاهات للسبين(Spin directions) ، مما يوفر بنية أكثر استقرارًا بكثير من الكيوبتات التقليدية ذات الحالتين فقط.

يشير الباحثون إلى أن هذه الذرة، التي أُطلق عليها تشبيهًا "قطة شرودنجر"، لا تنهار عند أول خطأ. وكما يقول الباحث بنجامين ويلهلم: "قِطتنا المجازية تملك سبع أرواح، وتحتاج إلى سبعة أخطاء متتالية لتنهارَ حالتها الكمومية". هذا التعدد في طبقات الحماية يُمكّن المعالج الكمومي من اكتشاف الخطأ وتصحيحه قبل أن يتفاقم أو يُدمّر البيانات.

وفي تعبير طريف، شبّه البروفيسور أندريا موريللو النظام الجديد بقطة "عائدة من معركة"، قائلاً: "نعرف أنها دخلت شجارًا، ويمكننا تتبع ما حدث ومن كان الخصم، قبل أن يتكرر الخطأ مرة أخرى."

نُشرت الدراسة في مجلة *Nature Physics*، وتُعدّ خطوة بارزة نحو بناء حواسيب كمومية أكثر موثوقية واستقرارًا — حلم يصفه العلماء بـ"الكأس المقدسة" لتقنيات المستقبل.

**Schrödinger's Cat breakthrough could usher in the 'Holy Grail' of quantum computing, making them error-proof**

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

# التضخم الكوني

محمود الحلّاق

جامعة العين، الإمارات العربيّة المتّحدة

يعرض المقالُ دراسةً على المستويين التقليدي والكمومي لنموذجَ التضخم الكوني. نستعرض بدايةً مشاكل الانفجار العظيم، وكيفيّة حلّها عبر فكرة التضخم، ثم نتحدث عن تقريب التدحرج البطيء، قبل الانتقال لمعالجة النموذج التضخمي كموميًّا بشكلٍ وجيز، من خلال تناول الاضطرابات الكونية الناجمة عن التأرجحات الكمومية لحقل التضخم أثناء مرحلة التدحرج البطيء، والتي ستنعكس كاضطرابات في كلّ من المادة والمتريّة في الكون، تتحوّل بدورها إلى منبع للتجمّعات المادية.

## 1) المسائل والمشاكل الأساسية في نظرية الانفجار العظيم

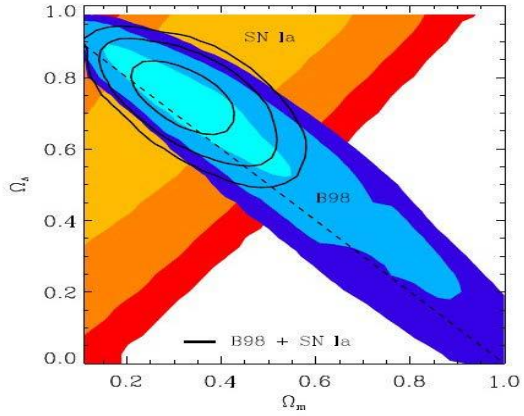
قدّمت نظرية الانفجار العظيم التفسير الصحيح للعديد من المسائل الكونية العالقة، ولعلّ أهمّها إيضاح سبب الوفرة الحالية لعناصر مثل الهيدروجين والهليوم وعناصر أخرى في الكون، كما أنّ اكتشاف بنزياس وويلسون من مختبرات بِل عام 1965 لإشعاعات الخلفية الميكروية "كمُخلّفات بدئية للانفجار العظيم ما زالت تحيط بنا" توافقت وبشكل كبير مع تنبؤات النظرية، التي تفيد بأنّ درجة حرارة الكون تناقصت تدريجياً مع تمدّده، لتصل حالياً إلى **2.7 K**، وهو ما تؤكّده البيانات التجريبية لبعض المهامّ والإرساليّات الرصديّة مثل **COBE** و **Wmap** وغيرها.

على الرّغم من النجاحات التي أبدتها نظرية الانفجار العظيم، إلا أنّها تعاني من مشاكل لم يتمّ التمكّن من حلّها ضمن إطار النظرية ذاتها، نذكر منها:

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

### 1-1) مسألة الاستواء

تشير الأرصاد الحالية إلى أنّ كونَنا ذو هندسة مستوية لدرجة كبيرة وبكثافة كونية كليّة مساوية تقريباً للكثافة الحرجة للكون. إلا أنّ هذه النتيجة التجريبية بعيدة عمّا تتوقّعه النظرية، التي تتنبأ بحالة من عدم الاستقرار لهذا الكون المستوي، فأيُّ انحراف عن حالة الاستواء سوف يؤدي إمّا إلى كون مغلق، ينهار على نفسه آنياً، و إمّا أن يؤدي إلى كون مفتوح يتبرّد إلى ما دون **3K** خلال الثّانية الأولى من وجوده.



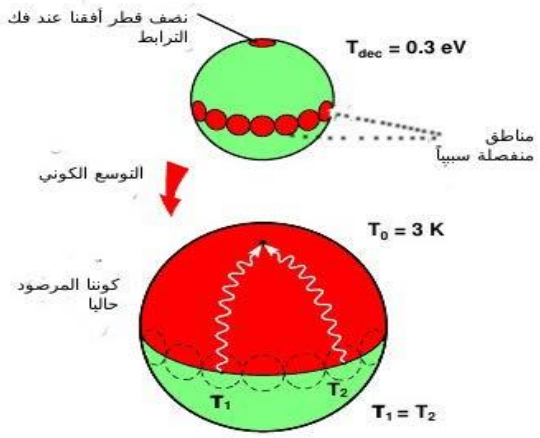

الشكل 1: يمثل المحور الشاقولي قيم وسيط كثافة الثابت الكوني، بينما يمثّل المحور الأفقي قيمَ وسيط كثافة المادة العادية. توافق المنحنيات المغلقة الثلاثة مستوياتِ ثقةٍ **σ-3-2-1**. يوضح المستقيم المتقطع إلى أن مجموع الوسيطين في الوقت الراهِن مساوٍ إلى الواحد تقريبًا، ما يشير إلى كونٍ مستوٍ.

بالنظر للمسألة بشكل معاكس، ينبغي للحصول على القيمة الراهنة للكثافة أن تكون قيمتها عند فترة "إعادة الاتحاد **recombination**" قريبةً من الكثافة الحرجة لدرجة 4 من مائة ألف، بينما يجب عليها أن تكون عند فترة التخليق النووي قريبة من الكثافة الحرجة ولغاية 1 من أصل تريليون!

يطرح هذا الأمر سؤالاً مهماً دون إجابة واضحة: كيف يمكن للكون أن يكون مستوياً لهذه الدرجة العالية في اللحظات الأولى من خلقه؟

### 2-1) مسألة الأفق

يتناسب الأفقُ الذي يمثّل المسافةَ العظمى التي يمكن للضّوء أن يقطعها منذ تشكّل الكون مع مقلوب ثابت هَبِل، أي طردًا مع الزمن. يبلغ الأفق بضع ثوان ضوئية عند بداية مرحلة التخليق النووي، بينما يبلغ بسبب التناسب الطردي المذكور بضعَ دقائق ضوئية عند نهايتها، وفي الوقت ذاته يتناسب معامل مقاس الكون خلال هذه المرحلة حيث يهيمن الإشعاع على المادّة مع الجذر التربيعي للزمن، فيكون أكبرَ من الأفق، ما يعني أنّ الكون كان يتألف من مناطق لم تتواصل سببيّاً فيما بينها أبداً.




الشكل 2: مسألة الأفق التي تمثّل المشكلة الأكثر إشكاليّة في نموذج الانفجار الكبير، وتتمثل في عدم القدرة على تفسير التجانس المتناحي لأشعة الخلفية الميكروية، فعند زمن انطلاق هذه الأشعة، كان الكونُ الذي تمدّد ليغدو كونَنا المرصودَ حاليًّا مُكوَّنا من عدد كبير من مناطقَ غيرِ مترابطةٍ سببيًّا توافق – عند رصدها اليوم– مسافاتٍ فاصلةً زاويّةً أكبر من 1 درجة، بينما ما نرصده اليوم لفوتونات قادمة من هذه المناطق يوافق طيفَ إشعاعِ جسم أسود متجانس ومتناحٍ.

وبالتالي، تكون أشعة الخلفية الميكروية قد أتت من مناطق منفصلة عن بعضها البعض بما يتجاوز مقدارَ الأفق عند السطح الأخير للتبعثر –الموافق لنطاقٍ زاوي حوالي **1°** في رصدنا الحالي– الأمر الذي يعني عدم تمكّنها من التآثر قبل رصدها حاليًّا، إلّا أن الأرصاد الراهنة لهذه الأشعّة تُظهر تجانساً و تناحيًا كبيرَين للأشعة القادمة


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

من هذه المناطق المنفصلة سببيّاً عند رصد السماء ضمن نطاقات أكبر من 1 درجة، وبالتالي تعجز النظرية عن شرح سبب تساوي درجة الحرارة لأشعة الخلفية الميكروية.

**1-3) مسألة التجانس والتناحي**

تتوزع المادة في الكون على المقياس الكبير بشكل منتظمٍ لافتٍ للنظر، فعبر أكثر من 10 بلايين سنةٍ ضوئيَّةٍ يحيد توزُّع المادَّة عن التَّجانس التَّام بأقلَّ من جزءٍ من 10000. لوقتٍ طويل، لم يكن لدى أحد فكرة عن سبب هذا التجانس، وعلى الرغم من أن أحد الأركان الاساسية لعلم الكونيّات هو المبدأ الكوني الذي ينص على وجوب تجانس الكون، إلا أن هذه الفرضية لا تساعد كثيراً، إذ يحتوي الكون على انحرافات كبيرة عن مبدأ التجانس بما يحويه من عناقيد مجرية ومجرات وغير ذلك من التجمّعات المادية.

نحن بحاجة إذن إلى نظرية تعمل على إيضاح سبب انتظام الكون على المقياس الكبير من جهة وأن تفسِّر في الوقت ذاته الآليةَ التي تؤدي إلى تشكل المجرات والتجمعات المادية من جهة أخرى، وهذا ما لا توفره نظرية الانفجار الكبير.

**1-4) مسألة المُخلَّفات الكونية البدئية الغير منشودة**

عند دمج نظرية الانفجار الكبير مع نظريات التوحيد الكبير في فيزياء الجسيمات، تظهر مُخلَّفات كونية غير مرغوب بها عند بداية الكون، من حيث أنها لا بدّ وأن تكون موجودة في وقتنا الحاضر، بما يخالف التجارب، ويتعارض مع الأرصاد الحالية للكون من حولنا، إذ يفترض التسليم بوجودها مثلا كثافةً للكون أكبر من الكثافة الحالية المرصودة.

لعلّ أكثر هذه المخلفات إشكاليةً هي جسيمات الغرافيتينو **gravitino** التي تتنبأ بها نظريات الثقالة الكمومية فائقة التناظر، كمرافقاتٍ بسبين **3/2** لجسيمات الغرافيتون حامِل القوى الثقالية. يمتلك الغرافيتينو في معظم نماذج الثقالة الكموميّة كتلةً تصل إلى **100 GeV**، وبوجود مثل هذه الجسيمات تغدو مرحلة تخليق النوى متقلقةً بسبب نواتج تحلّل الغرافيتينو التي يمكن أن تؤثّر على سيناريو التخليق النووي.

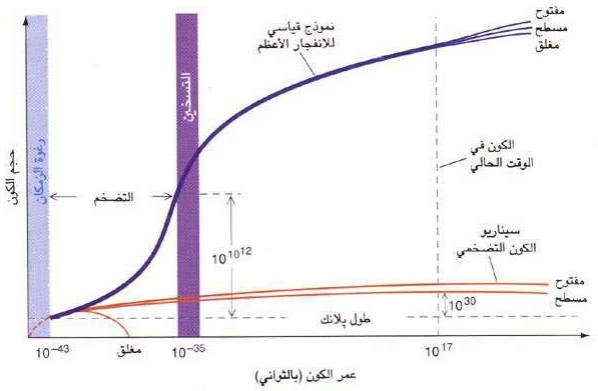
علاوةً على ذلك، تتنبّأ نظرياتُ التوحيد الكبير أيضًا بإنتاج أحاديات قطب مغناطيسيّة عند كسر تناظر النظريّة آنيًّا، وبوفرة أكبر بكثير ممّا تسمح به نتائج الرصد، حيث تقارب قيمُها وفقًا لنموذج الانفجار الكبير مقاديرَ البروتونات، ما يعطي كثافةً للكون أكبر بنحو 15 مرّة من قيمتها المرصودة حالياً.

**2) التضخم الكوني**

اقترح غوث 1981 لحلِّ مشاكل الانفجار العظيم فكرةَ التَّضخم الكوني، كمرحلةٍ حدثت في وقتٍ مبكِّر جداً من عمر الكون، تتمثَّل بتمددٍ متسارعٍ "أسِّيّ" للكون في لحظاته الأولى، وعلى الرَّغم من أن فترة التَّضخم استمرت وفقاً لبعض النَّماذج التَّضخُّميَّة زمنًا لا يتجاوز $10^{-35}$ **s**، إلّا أن مقاس الكون الذي كان من رتبة طول بلانك ($10^{-33}$ **cm**) عند بدء التضخّم أضحى بعده كبيرًا بمقدارٍ لا يمكن تصديقه، فوفق بعض النَّماذج التَّضخميَّة أمكن له بلوغ $10^{10^{12}}$ $cm$، وهذا أكبر بكثيرٍ جداً من مقاس الجزء المرصود من الكون والذي يبلغ حوالي $10^{28}$ **cm**، وهذا هو السَّبب الذي يُبطِل الحاجةَ إلى بدء جميع أجزاء الكون بالتَّمدد في اللحظة نفسها، إذ أن منطقةً واحدةً بأصغر مقاسٍ ممكن (طول بلانك) أكثرُ من كافية لكي تُخرِجَ جميعَ ما نراه الآن.



© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء




الشكل 3: يختلف نشوء الكون في سيناريو التضخم عنه في نظرية الانفجار العظيم الدارجة. يتسبّب التضخمُ بزيادة حجم الكون بمقدارٍ كبير لدرجة أن الأجزاء الصغيرة التي لا يتجاوز مقاسُها طولَ بلانك تكبر متجاوزةً نصف قطر الكون المرئي، بخلاف نموذج الانفجار الكبير حيث تبلغ رتبة السنتيمتر فقط. يتنبأ التَّضخم أيضاً بأنَّ الكون يكون غالبًا مُسطَّحًا بحيث تبقى الخطوط المتوازية فيه متوازيةً، بخلاف الكون المغلق (المفتوح) حيث تتقاطع (تتباعد).

### 2-1) حلّ مسائل الانفجار الكبير

يسمح النُّمو المفاجئ والهائل للكون بحلِّ معظم مشاكل نموذج الانفجار العظيم، إذ يغدو الكونُ الناجمُ عن التضخّم منتظماً، بسبب تمدّدِ جميع ما فيه من أنماطِ عدمِ تّجانسٍ بمقدارٍ كبير، ما يُخفِّض بدرجةٍ هائلة كثافةَ المخلَّفات غير المرغوب بها. كما أن الكون أضحى نتيجة التَّوسُّع التَّضخُّميّ الهائل كبيراً جداً لدرجة أنَّه لا يمكننا معها رؤيةُ إلاّ جُزءٍ ضئيلٍ جداً منه، ولذلك فإنَّ الجزء الذي نعيش فيه يبدو منبسطاً، تماماً كما يبدو السطحُ الصَّغير من الأرض الكروية مستويًا.

### 2-1-1) حل مسألة الاستواء

يمكن حل مشكلة الاستواء من خلال التضخم الكوني، حيث يؤدي التوسع المتسارع إلى تسطيح الكون بشكل كبير، وذلك من خلال تقليل قيمة مقلوب عامل المقاس المضروب بثابت هبل، ممّا يؤدي إلى اقتراب قيمة وسيط الكثافة من الواحد.

يمكن تبيان ذلك من خلال معادلة تطور وسيط الكثافة مع الزمن، حيث نجد أن قيمة وسيط الكثافة تقترب من الواحد بشكل كبير خلال مرحلة التضخم، وذلك بسبب التوسع المتسارع للكون.

### 2-1-2) حل مسألة الأفق

يمكن حل مسألة الأفق من خلال التضخم الكوني، حيث يؤدي التوسع المتسارع إلى زيادة المسافة الفيزيائية بين النقاط بشكل كبير، وبالتالي يمكن للمناطق التي كانت متصلة سببياً قبل مرحلة التضخم أن تصبح منفصلة سببيّاً بعد مرحلة التضخم.

يمكن تبيان ذلك من خلال حساب الأفق الجسيمي، حيث نجد أنه يتناقص نسبيًّا خلال مرحلة التضخم، فبالرغم من تناسبه مع سرعة الضوء تعريفًا، ولكن ازديادَه مهملٌ تمامًا أمام اتّساع عامل المقاس بسرعات فوق ضوئيّة، وبالتالي ما يبدو لنا بعيدًا جدًا عن بعضه البعض اليوم كان قريبًا من بعضه قبل التضخّم بحيث أمكنه حينها التآثر وتحقيق التجانس.

### 2-1-3) حل مسألة التجانس والتناحي

يمكن حل مسألة التجانس والتناحي من خلال التضخم الكوني، حيث يؤدي التوسع المتسارع إلى تجانس الكون بشكل كبير، وذلك من خلال تمديد المناطق المتجانسة بشكل كبير، وبالتالي يمكن للمناطق التي كانت متجانسة قبل مرحلة التضخم أن تصبح متجانسة على مقياس أكبر بعد مرحلة التضخم. يمكن تبيان ذلك من خلال حساب المسافة الفيزيائية بين النقاط، حيث نجد أن هذه المسافات تزداد بشكل كبير خلال التضخم.

### 2-1-4) حل مسألة المخلفات الكونية البدئية

يمكن حل مسألة المخلّفات الكونية البدئية من خلال التضخم الكوني، حيث يؤدي التوسع المتسارع إلى تخفيف تركيز هذه المخلّفات بشكل كبير، وذلك من خلال الزيادة الهائلة في حجم الكون ما يقتضي تناقصًا كبيرًا في كثافتها.


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

**2-1-5) حل مسألة تشكّل المجرّات**

لعلَّ السُّؤال الذي يطرح نفسه هنا هو: إذا انبسطت جميع اللاتجانسات بفعل التَّضخم، فكيف تكوّنت المجرَّات والتَّجمعات المادّية التي نرصدها من حولنا؟

تكمن الإجابة في أنه أثناء إزالة اللاتجانسات الموجودة، فإن النموذج التضخمي يولّد في الوقت ذاتِه لاتجانساتٍ جديدةً تنشأ عن التأثيرات الكمومية، فوفقاً للميكانيك الكمومي يكون الفراغ مملوءاً بتموُّجاتٍ كموميَّةٍ صغيرة يمكن اعتبارها تموُّجاتٍ في الحقول الفيزيائيَّة. لهذه التَّموُّجات أطوال موجيَّة متنوّعة، وهي تتحرَّك في جميع الاتجاهات، إلا أنَّه ليس بالإمكان كشفها بسبب طبيعتها المجهريّة وزمن حياتها قصيرة الأمد.

تؤدّي فترة التَّضخُّم إلى مطِّ هذه الموجات بسرعة، وما إن تصبح أطوالها الموجية كافية، حتى تستشعر انحناءَ الكون فتحدث عمليةُ تجميدٍ **freezing** لهذه الأطوال الموجية عندما تزيد أطوالها عن مقاس الأفق. في الواقِع إذا اعتبرنا تراوحًا كموميًّا بطول موجة ابتدائي $\boldsymbol{a\lambda \sim \frac{a}{k}}$ أصغر من الأفق أو نصف قطر هبِل $\boldsymbol{(1/H)}$، فعندها تقارب معادلةُ حركته تلك التي لهزّازٍ توافقي، ما يعني أن التراوح سوف يهتزّ لغاية أن يغدو طول موجته أكبر من الأفق، فينجم حينها عن معادلة حركته ثباتٌ في مقداره، فنقول إنه "تجمّد"، وأضحى تراوحًا كلاسيكيًّا.

يؤدي إذن تجميد الأطوال الموجيَّة إلى ثبات التَّموُّجات المُمثِّلة للّاتجانسات الكونية دون حركةٍ أو تلاشٍ، ما يؤدّي بدوره إلى زيادة قيمة الحقل السلَّمي المسؤول عن التضخّم الذي يملأ الخلاء في بعض المناطق وتخفيضها في مناطق أخرى، وبذلك تُخلَق اضطراباتٌ في كثافة الكون، ما يؤدّي لاحقًا إلى تشكيل المجرَّات.

**3) حقل المُضخِّم (الإنفلاتون)**

يمكن تحقيق التضخّم من خلال حقلٍ سلمي يدعى الإنفلاتون أو المُضخِّم **inflaton field**، يصف جسيماتٍ بسبين معدوم ذات خواصّ غير اعتياديَّة تتمثَّل بالضَّغط السَّالب. على الرَّغم من عدم وجود رصدٍ مباشر لمثل هذه الجُسيمات إلا أنَّها مُكوِّن أساسيٌّ في نظريات فيزياء الجسيمات الأولية، تمّ اقتراحها قبل أن يلجَ علمُ الكون هذا البابَ بكثير، فهي تلعب دوراً أساسياً في كسر التناظر بين القوى الأساسية في نظريات التوحيد الكبير، من مثل جسيم هيغز الذي تمّ اكتشافُه تجريبيًّا عام 2012. يتميّز الإنفلانتون بكمون **V** ذي قيمة كبيرة وثابتة تقريباً خلال مرحلة التضخم، ممّا يؤدي إلى تحقيق شرط التوسّع المتسارِع.

**3-1) خصائص الإنفلاتون**

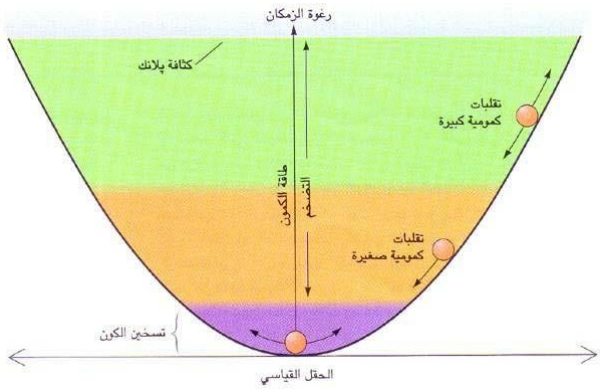
تعطى كثافة الطَّاقة لحقلٍ سلَّميٍ $\boldsymbol{\phi}$ متجانسٍ كمجموع حدَّين يعبِّر أولهما (ثانيهما) عن الطاقة الحركية (الكامنة)، بينما يُعطى الضغط كحاصل طرح هذَين الحدَّين، ويمكن الوصول لمعادلة حركة الإنفلاتون بالشكل (**H** هو ثابت هَبِل، وتعني النقطة اشتقاقًا بالنسبة للزمن):

$$\boldsymbol{(1)\ \ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} = -\frac{dV}{d\phi}}$$

تُظهر المعادلة الأخيرة تشابهاً واضحاً مع معادلة الحركة لكرةٍ تتدحرج على جدار إناءٍ كبيرٍ نحو قاع الإناء الذي يمثِّل القيمة الصُّغرى للطَّاقة، بينما يقابل موضعُ الكرة قيمةَ الحقل السلَّمي. يمثِّل الحدُّ الثَّاني من معادلة الحركة حدَّ احتكاكٍ أو لزوجة، حيث تماثل هذه الحالة وضعَ سائلٍ لزجٍ في الإناء، تقابل لزوجتُه طاقةَ الحقل، إذ كلَّما ازداد ارتفاع الكرة في الإناء غلظ قوام السَّائل، ومن ثمَّ فإذا كان الحقل كبيراً جداً في البداية فإن الطاقة تنخفض ببطء.



© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء




الشكل 4: يمكن نمذجة الحقل القياسي في كون تضخمي بكرة تتدحرج على السطح الداخلي لوعاء ، فحافة الوعاء تقابل كثافة بلانك للكون، وتعلوها «رغوة» الزمكان، وهي منطقة تقلبات كمومية قوية، بينما تكون التقلبات في المنطقة أسفل الحافة (الخضراء) أضعف، ولكن يحتمل أنها مازالت تكفُل التجدّد الذاتي للكون، وإذا بقيت الكرة في الوعاء، فإنها تتحرك نحو المنطقة الأقل طاقة (البرتقالية) حيث تنزلق إلى الأسفل ببطء شديد. وينتهي التضخم بمجرد أن تقترب الكرة من القيمة الصغرى للطاقة (اللون الأرجواني) حيث تتذبذب حولها وترفع درجة حرارة الكون.

### 3-2) تقريب التدحرج البطيء

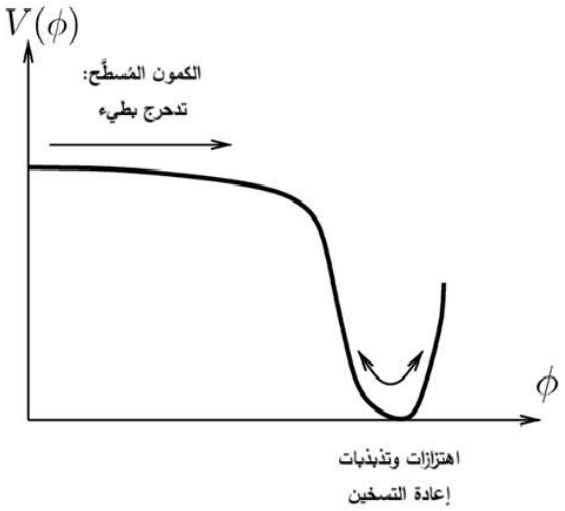
يمثِّل تقريب التَّدحرج البطيء **Slow-roll approximation** التِّقنيَّة الأساسيَّة لدى دراسة التَّضخُّم الكوني، ويتمثَّل بفرض هيمنة الطاقة الكامنة على الطاقة الحركيَّة للحقل السلَّمي، ما يشابه تدحرجاً بطيئاً للكرة ضمن السَّائل في الإناء، فيتدحرج الإنفلاتون ببطء نحو القيمة الصغرى للكمون، وخلال هذه العملية يحدث التضخم الكوني.

### 3-2-1) شروط التحرج البطيء

هناك شرطان أساسيان لتحقيق تقريب التدحرج البطيء، وهما:

1. يجب أن يكون الكمون مسطحاً بشكل كافٍ، بحيث يكون مشتق الكمون صغيراً بالنسبة للكمون نفسه (معامل التدحرج الأوّل).
2. يجب أن يكون المشتق الثاني للكمون صغيراً بالنسبة للكمون نفسه (معامِل التدحرج الثاني).

إذن، لتحقيق هيمنةِ الطاقة الكامنة يجب أن تكون قيمُ معاملات التدحرج البطيء صغيرة بالنسبة للواحد.




الشكل 5: يتدحرج الإنفلاتون ببطء على الجزء المُسطَّح من الكمون حيث يبقى ثابت هَبِل ثابتًا عندها ويتضخّم الكون أسّيًّا. ينتهي التضخّم عند هبوط الإنفلاتون إلى موضع قاع الكمون واهتزازه حوله مُطلقًا طاقتَه الكامنة على شكل جسيمات وحرارة تُفيد في رفع درجة حرارة الكون (مرحلة إعادة التسخين).

### 3-2-2) معادلات التدحرج البطيء

يمكن تبسيط معادلة الحركة للحقل السلمي باستخدام تقريب التدحرج البطيء، حيث نهمل الحد الثاني من المعادلة (1) فنحصل على $3H\dot{\phi} \approx -\frac{dV}{d\phi}$ ويكون ثابتُ هَبِل ثابتًا تقريبًا $\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = H^2 \approx \frac{V}{3}$، ما يعطي توسّعًا أسيّا لمقاس الكون $a(t) \propto e^{Ht}$.

### 3-2-3) إعادة التسخين

من خلال حساب معادلات الحركة، نجد أن الإنفلاتون في النهاية سوف يهبط إلى موضع قعر الكمون، حيث يبدأ بالتذبذب حول القيمة الصغرى للكمون، وخلال هذه العملية يتحول جزء من طاقته إلى جسيمات أولية، وحرارة تؤدي إلى تسخين الكون وعودة إلى مرحلة الانفجار العظيم.

## 4) الاضطرابات الكونيّة: البذور الأولى للبنى الكونيّة


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

تعتبر الاضطرابات الكونية من أهم نتائج نظرية التضخم الكوني، حيث تنشأ هذه الاضطرابات من تأرجحات وتقلّبات كمومية لحقل الإنفلاتون تضخّمت أثناء مرحلة التضخم، ثمّ تحوّلت بعده إلى اضطرابات في كثافة المادة والإشعاع وفي المتريّة، أدّت لاحقًا إلى تشكل المجرات والبنى الكونية الكبيرة.

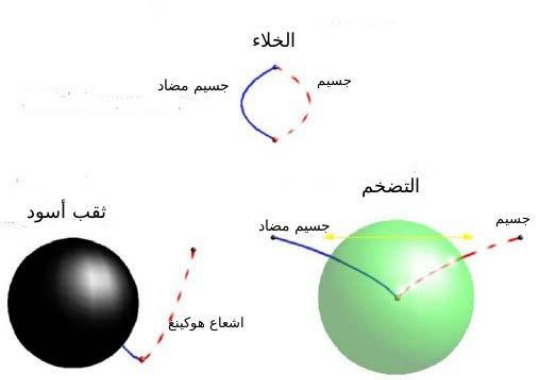
يمكن تبيان ذلك من خلال حساب طيف استطاعة الاضطرابات الكونية، حيث نجده تقريباً ثابتاً على المقاييس الكبيرة، وهذا ما تؤكده الأرصاد الحالية لأشعة الخلفية الميكروية.

### 4-1) أصل الاضطرابات

خلال التضخم الكوني، أدت التقلبات الكمومية في حقل التضخم (الإنفلاتون) إلى ظهور اضطرابات في كثافة الطاقة. يمكن تشبيه هذه العملية بـ:

- ظهور أزواج من الجسيمات الافتراضية
- انفصال هذه الأزواج بسبب التمدد الكوني السريع
- تجمُّد هذه الاضطرابات عند تجاوز حجم الأفق الكوني (أو مقلوب ثابت هَبِل)

في الواقِع، تمَّ العمل على فكرة التَّأرجحات الكموميَّة و بشكلٍ مستقلٍ وضمن مجالاتٍ مختلفةٍ من قبل كلّ من ستاروبينسكي، وهوكينغ، وغوث. تحدّث ستاروبينسكي عن تأرجحات كموميَّة في فضاء منكوفسكي، تقابل عمليّاتِ خلقٍ وفناءٍ آنيَّين لجسيماتٍ افتراضيَّة في الفضاء، وفق مبدأ الارتياب لهايزنبرغ. أمَّا هوكينغ فقد تحدَّث عن تشكُّل هذه الأزواج قرب أفق الحدث لثقبٍ أسود، حيث يقع أحد عنصرَي الزوج الافتراضي في شرك أفق الثقب تاركاً الجُسيمَ الآخر ليفلت بعيداً في الفضاء كإشعاعٍ حراريٍّ يعرف بإشعاع هوكينغ. بيّن غوث حدوثَ آليَّةٍ مشابهة في حالة التَّضخُّم الكوني حيث يسبّب التَّوسُّع السَّريع جداً للكون ارتدادَ عنصرَي زوج الجُسيمين الافتراضيَّين عن بعضهما البعض بفضل المطِّ الهائل للزَّمكان، لينفصل الجسيمان عن بعضهما ويغدوا واقعَين في مناطق غير متصلة سببيًّا، وبالتالي ليس بالإمكان أن يجدا بعضهما البعض، وبهذا الشكل تصبح التأرجحاتُ الكمومية ذاتَ نمطٍ كلاسيكي للحقل. يوضح الشكل 6 مقارنةً بين الحالات الثلاث آنفة الذكر.




الشكل 6: تشكُّل جسيمات افتراضية في فضاء منكوفسكي (علاقات الارتياب لهايزنبرغ) وبالقرب من أفق الحدث لثقبٍ أسودٍ (إشعاع هوكنغ) وفي فضاءٍ يعاني تضخماً كونياً

### 4-2) نموذج رياضي بسيط

نقسم حقل الإنفلاتون السُّلمي $\boldsymbol{\phi(x,t)}$ إلى جزأَين: أولهما $\boldsymbol{\phi(t)}$ هو الجزء المتجانس غير المضطرب وثانيهما $\boldsymbol{\delta\phi(x,t)}$ الاضطراب:

$$\boldsymbol{\phi(x,t) = \phi(t) + \delta\phi(x,t)}$$

فيخضع الاضطراب لمعادلة مماثلة للمعادلة (1):

$$\boldsymbol{\delta\ddot{\phi} + 3H\delta\dot{\phi} - \nabla^2\delta\phi = -V''\delta\phi} \quad (2)$$

فإذا حلّلنا الاضطراب $\boldsymbol{\delta\phi}$ إلى مركّبات فوريه $\boldsymbol{\delta\phi_k}$ الموافقة فإننا نجد أثناء التدحرج البطيء مع إهمال المشتق الثاني للكمون أن مركّبة فوريه تخضع للمعادلة:

$$\boldsymbol{\delta\ddot{\phi}_k + 3H\delta\dot{\phi}_k - (\frac{k}{a})^2\delta\phi_k = 0} \quad (3)$$

وبالتالي هناك سيناريوهان ($\boldsymbol{\lambda}$ هو الطول الموجي وفق الإحداثيّات الموافقة للحركة **comoving**، بينما $\boldsymbol{a\lambda}$ هو الطول الموجي الفيزيائي):

**4-2-1) دون الأفق:** $\boldsymbol{a\lambda = a\frac{2\pi}{k} < \frac{2\pi}{H}}$


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

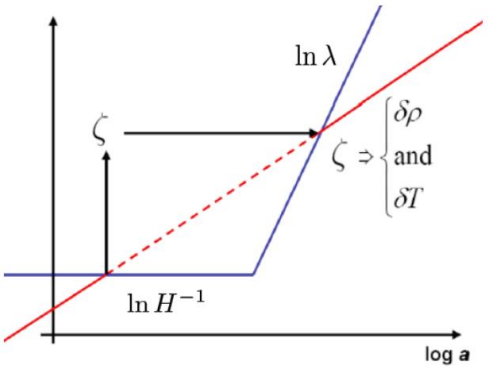
يُهمَل الحد الثاني أمام الحدّ الثالث في الطرف اليسار من المعادلة (3)، فنحصل على معادلةِ هزّاز توافقي، ما يعني أن الأنماط الموافقة تهتزّ داخل الأفق.

**4-2-2) فوق الأفق:** $a\lambda = a\frac{2\pi}{k} > \frac{2\pi}{H}$

يُهمَل الحد الثالث أمام الحدّ الثاني في الطرف اليسار من المعادلة (3)، فنحصل على معادلة حلّها ثابت، أي أن تأرجحات الإنفلاتون ثابتة على مقاساتٍ أكبر من الأفق، فنقول إنها "تجمّدت".

**4-3) مصير الاضطرابات – اضطرابات الانحناء**

يضمحلّ حقل الإنفلاتون عند نهاية فترة التَّضخم، وبالتَّالي تفقد تأرجحاته معناها، لذلك لا نستخدم عادةً اضطرابات الإنفلاتون بشكلٍ مباشرٍ، بل ندرس التأرجحات المتحرِّضة في متريّة الزَّمكان، أو بشكلٍ أكثر تحديداً نهتم بدراسة اضطرابات الانحناء الموافقة للحركة **comoving curvature perturbations** التي تتميّز كاضطرابات الإنفلاتون بثباتها عند تقاطعها مع مقاس الأفق، وبقائها معرَّفةً بشكلٍ جيّد بعد زوال الإنفلاتون. تمثِّل اضطرابات الانحناء أداةً فعَّالة للرَّبط ما بين اضطرابات فوق الأفق خلال التَّضخم و الاضطرابات في مرحلة هيمنة الإشعاع المبكِّرة –دون القلق بشأن جهلنا لتفاصيل مرحلة إعادة التسخين– التي ستغدو بذورًا لنمو المجرّات والعناقيد المجريّة. في الواقع، وحيث أن الثقالة الجاذبيّة تتآثر مع مجمل مكوّنات الكون، فإن اضطرابات الإنفلاتون سوف تقتضي اضطراباتٍ في المتريّة يمكن تخيّلها ككمون ثقالي جاذبيّ). أثناء فترة التضخّم سرعان ما "تتقاطع" هذه الاضطرابات مع الأفق فـ "تخرج منه" – أي يتجاوزه طولُها الموجي– وتغدو كلاسيكيّة متجمّدة، ولكنها بعد التضخّم فإنها سوف "تعود وتلج" الأفق –أي يتجاوزها الأفقُ– وعندها تبعًا لمعادلة بواسون فإن هذا الكمون الثقالي الجاذبيّ سوف يولّد كثافةً طاقيّة لمادّة أو إشعاع.




الشكل 7: خروج الأطوال الموجيّة من الأفق أثناء التضخّم، ثم العودة والدخول ضمنه بعد التضخّم [1].

**4-3-1) اختيار المعيار Gauge Choice**

لعلّ الأمر الأكثر إرباكاً لدى دراسة التّأرجحات الكونية، يكمن في حقيقة أنّ التقسيم إلى جزءٍ متجانس وآخر مضطرب ليس وحيداً، بل يعتمد على اختيار الإحداثيات (المعيار). عند تعريف جملة إحداثياتٍ محدَّدةٍ لدراسة اللاتجانسات الكونيَّة فإنَّه من الممكن أن نُعرِّف ضمنيًّا اضطراباتٍ زائفةً (خيالية) لا تنبع عن تأرجحاتٍ فيزيائيَّة حقيقية، وإنَّما تنبع من تثبيتنا لجملة الإحداثيات. لحلِّ هذا الالتباس بين الاضطِّرابات الحقيقيَّة والاضطرابات التَّخيُّليَّة في النَّظريَّة النّسبيّة العامّة، فإنَّنا بحاجة في معادلات آينشتاين إلى اعتبار جملة الاضطرابات بكلا نوعَيها: الاضطرابات في كثافة المادَّة والاضطرابات في المتريَّة، ومن خلال اختيار معيارٍ مناسبٍ يتوافق و الحالة المدروسة نستطيع أن نساوم **trade** أحدهما مقابل الآخر.

من المفيد أيضاً دراسة تركيبات الاضطراب الخطيّة الصامدة معياريًّا، حيث أن هذه التركيبات لا يمكن إزالتها من خلال التَّحويلات الإحداثية.

**4-3-2) الاضطرابات السلّميّة scalar**

تنشأ الاضطرابات السلمية من التأرجحات الكمومية للجزء السلّمي من حقل الإنفلاتون، وتتحول إلى


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

اضطرابات في كثافة المادة والإشعاع بعد التضخم، يكون طيفُ استطاعتها ثابتاً على المقاييس الكبيرة، وهذا ما تؤكده الأرصاد الحالية. تؤدّي هذه الاضطرابات إلى نموِّ بعض المناطق لتغدو أكثرَ كثافةً من مناطق أخرى، و بالتَّالي فإنَّها تفسِّر تشكُّل البنى المادِّية في الكون (مجرّات وعناقيد) انطلاقًا من اضطراباتٍ بدئيَّةٍ صغيرةٍ.

**4-3-3) الاضطرابات التنسورية (الموتّريّة)**

تنشأ الاضطرابات التنسورية من التأرجحات الكمومية للجزء التنسوري من حقل الإنفلاتون، وتتحول إلى موجات ثقاليّة جاذبيّة أوليّة بعد التضخم، ويكون طيفُ استطاعتها ثابتاً على المقاييس الكبيرة، وهذا ما تؤكده الأرصاد الحالية للموجات الثقاليّة البدئيّة. إن كانت هذه الاضطرابات قوية كفاية، فإنَّها ذات أثرٍ يمكن رصده، وذلك من خلال تأثيرها على اللاتناحي في إشعاع الخلفيّة الكونيّة.

**4-4) طيف الاستطاعة Power spectrum**

إنه بصمة التضخم على الكون، فهو مقدار قابل للقياس يمثل توزيع الاضطرابات حسب تواتراتها، ويعبّر عن تحويل فوريه لدالّة ترابط **correlation function** المقدار قيد الدراسة (أي قيمة توقّع الخلاء لدالّة الترابط الذاتي عند نقطتَين).

**4-4-1) طيف الاستطاعة بالنسبة للاضطرابات السلّمية والتنسوريّة**

على المقاسات الكبيرة، تتنافس الثقالة الجاذبيّة مع التمدّد الكوني، فتنمو البنى الكونيّة بحيث يكون حقل كثافة الاضطراب غوصيًّا، أي تسلك مكوّناتُه التواتريّة سلوكًا مستقلًّا عن بعضها البعض، وبالتالي يكفي طيفُ الاستطاعة لتوصيف الحقل تمامًا.

بالنسبة للاضطرابات السلّميّة المسؤولة عن تشكيل البنى الكونيّة، فإن طيف الاستطاعة يكون متناسبًا مع العدد الموجي مرفوعًا إلى قوة $(n_s-1)$، حيث تُعرَف $n_s \approx 1$ باسم القرينة الطيفيّة **spectral index**.

بالنسبة للتأرجحات التنسورية، فإن هناك نوعَين من الاستقطاب لها، النمط الأول تدرّجي طولاني بشكل مشابه لحالة الحقل الكهربائي ويعرف عادة بالنمط **E**، بينما النمط الثاني عرضاني دوّاري بشكل مشابه للحقل المغناطيسي، ويعرف بالنمط **B**، وتتناسب استطاعة الطيف لكلّ منهما مع مربّع ثابت هَبِل عند التقاطع مع الأفق.

**4-4-2) نسبة التنسور إلى السلمي**

تعتبر نسبة سعة التأرجحات التنسوريّة إلى السلميّة من أهم المؤشرات التي يمكن قياسها لتأكيد نظرية التضخم الكوني. يمكن تبيان ذلك من خلال حساب نسبة طيف الاستطاعة التنسوري إلى السلّمي، حيث نجد أن هذه النسبة ترتبط بشكل مباشر بمعامل التدحرج البطيء الأول، وبالتالي يمكن استخدامها للتمييز بين نماذج التضخم الكوني المختلفة.

تُعَد هذه النسبة **r** مهمّة لأنها تحدد مقياس طاقة التضخم، وتعطينا معلومات عن نوع حقل الإنفلاتون، كما يمكن رصدها من خلال استقطاب إشعاع الخلفية الكونية.

**5) الأدلة التجريبية على التضخم الكوني:**

في الحقيقة، هناك نتائج رصديّة -يتعلّق أهمّها بالقرينتَين الطيفيّتَين $n_s$ و$r$- يمكنها اختبار التنبؤات النظريّة للنماذج التضخميّة، التي تتّفق بشكل ممتاز مع توزيع المجرات على النطاق الكبير، ومع نمط اللاتناحيات في إشعاع الخلفية الكونية، ومع قياسات الانزياح الأحمر للمجرات.

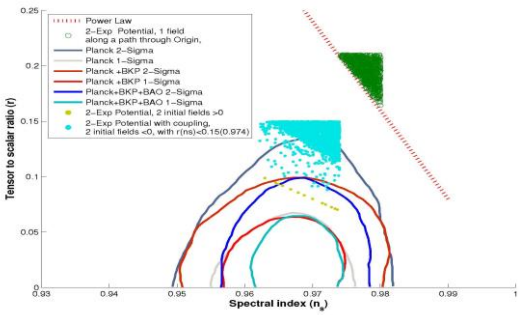
**5-1) قياسات طيف الاستطاعة**

كما ذكرنا، فإن الأرصاد الحالية لأشعة الخلفية الميكروية تبيّن أن طيف استطاعة الاضطرابات الكونية


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

يكون تقريباً ثابتاً على المقاييس الكبيرة، كما تتنبأ به نظرية التضخم الكوني، فتقيس الانحرافات الصغيرة عن حالة التراوحات الصامدة مقاسيًا **scale−invariant fluctuations** **($n_s \approx 1$)**. تجريبيًا نجد $n_s = 0.968 \pm 0.006$، فيدلّ هذا الانزياح نحو الأحمر **($n_s-1<0$)** أن التراوحات ذات المقاسات الكبيرة عانت تضخّمًا أكبر من قريناتها ذات المقاسات الأصغر.

أمّا بالنسبة لـ **r** فلدينا تجريبيًّا **$r<0.11$**، وهناك تنبؤات دقيقة للعلاقة بين **$n_s$** و**r** وفقًا للنموذج التضخّمي المُعتمَد يمكن اختبارُها.




الشكل 8: النتائج الرصديّة مع تنبّؤات نموذج تضخّمي يتضمّن كمونه حدَّين أسّيَّين [2].

**2-5) قياسات الموجات الثقاليّة الجاذبيّة**

تتنبأ نظرية التضخم الكوني بوجود موجات ثقاليّة جاذبية بدئيّة، يمكن رصدها من خلال استقطاب أشعة الخلفية الميكروية. يمكن تبيان ذلك من خلال حساب طيف استطاعة الاضطرابات التنسورية، حيث نجده تقريباً ثابتاً على المقاييس الكبيرة، كما يتنبأ بذلك السيناريو التضخّمي.

**6) خاتمة**

تظل نظرية التضخم أفضل إطار نظري لفهم الكون المبكر، رغم أن بعض التفاصيل مثل طبيعة حقل التضخم لا تزال موضوع بحث نشط. قد تمنحنا التطوراتُ المستقبلية في رصد الموجات الثقالية البدائية اختباراتٍ حاسمةً لهذه النظرية.

تعتبر نظرية التضخم الكوني من أهم النظريات في علم الكونيات الحديث، حيث تقدم حلولاً للعديد من المشاكل التي تواجه نظرية الانفجار العظيم، وتتنبأ بالعديد من الظواهر التي يمكن رصدها تجريبياً، فعلى سبيل المثال تُفسِّر نظريّةُ الاضطرابات الكونية الناتجة عن التضخم كيف نشأت البنى الكونية من تراوحات كمومية مجهرية، وتقدِّم تعليلًا لسبب كون الكون متجانسًا على النطاق الكبير في حين أنه غير منتظم على النطاق الصغير.

على الرغم من النجاحات الكبيرة لنظرية التضخم الكوني، إلا أنها ما زالت تواجه بعض التحديات، ومن أهمها تحديد طبيعة حقل التضخم وربطه بالفيزياء الأساسية، وكذلك تحديد آلية بدء وانتهاء مرحلة التضخم. تستمر الأبحاث في مجال التضخم الكوني لتحسين فهمنا لهذه النظرية ولتطوير نماذج جديدة يمكن اختبارها تجريبياً، وذلك من خلال الأرصاد الحالية والمستقبلية لأشعة الخلفية الميكروية والموجات الثقاليّة الجاذبية البدئيّة.

يمكن القول إن نظرية التضخم الكوني قد غيرت بشكل جذري فهمنا للكون وأصله وتطوره، وما زالت تقدم إطاراً نظرياً قوياً لفهم الكون في لحظاته الأولى، وربط علم الكونيات بالفيزياء الأساسية.

المراجع:

[1] **A. Riotto, "Inflation and the Theory of Cosmological Perturbations", arXive: hep-ph/0210162** (2017).

[2] **M. AlHallak and N. Chamoun, JCAP 09(2016)006**.

[3] شعبان خليل، "الثقوب السوداء وموجات الجاذبيّة"، مجلّة مسارات في الفيزياء، العدد الأوّل (مارس 2024).


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

# مقابلة

من الأبواب الثابتة في مجلّة مسارات إجراء مقابلة مع إحدى الشخصيّات العلميّة المهمّة في العالَم العربي أو في العالَم. يسعدنا ويشرفنا أن نرحب بكِ، الأستاذة الدكتورة جوهانا إردمينجر Johanna ERDMENGER، في هذه المقابلة الخاصة مع مجلتنا "مسارات في الفيزياء"، التي تنشرها الجمعية العربية للفيزياء.

الأستاذة الدكتورة جوهانا إيردمِنغِر

الدكتورة إردمينجر، لديكِ مسيرة علمية متميزة، حيث عملتِ في بعضٍ من أنشط مجموعات البحث في الفيزياء النظرية في العالم:

باحثة لمرحلة ما بعد الدكتوراه في جامعة لايبزيغ، ثم في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، ثم قائدة مجموعة إيمي نوثر في جامعة هومبولت–برلين، قبل أن تنتقلي إلى معهد ماكس بلانك في ميونيخ، حيث شغلتِ، بالإضافة إلى ذلك، منصبَ أستاذ فخري، ومنذ عام ٢٠١٦ لديكِ كرسي أستاذية خاص بك في جامعة فورتسبورغ. أنتِ معروفةٌ بأعمالِك في مجال الموافقة بين (تطابُق) نظرية المعيار/نظرية الأوتار Gauge theory/Strings theory، وتطبيقاتها على فيزياء المادة المكثفة/فيزياء الجسيمات وعلم الكونيات. كما أنكِ معروفة بأعمالِك في مجال التناظرات التماثليّة conformal symmetries، وإعادة الاستنظام Renormalization، والثقالة الفائقة Supergravity، والميكانيك الإحصائي، كما أنكِ المتحدث الرسمي المنتخَب لقسم الفيزياء النظرية والرياضيّة في الجمعية الفيزيائية الألمانية (GPS).

اسمحي لنا أن نقدِّم لكِ مجلتَنا بإيجاز، فهي تهدف إلى شرح الأبحاث المتقدمة في العلوم الفيزيائية للجمهور، وتتبع للجمعية العربية للفيزياء (ArPS) التي تهتم بنشر المعرفة العلمية، وتعزيز فهم الجمهور للفيزياء، وتقوية الثقافة العلمية في العالم العربي.

أنا، نضال شمعون، ومعي عادل عوض، من هيئة تحرير المجلة، سعيدان جدًا بلقائكِ.

**نضال:** هل يمكنكِ البدءُ عبر مشاركتِكِ لنا القليلَ من شغفِكِ المبكر بالعلوم؟ ما هي اللحظات المحورية التي وضعتْكِ على هذا المسار؟ أَعطينا لمحةً موجزة عن رحلتِكِ الشخصية في الفيزياء النظرية حتى توليتِ مسؤوليةَ كونِكِ


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

المتحدثَ باسم قسم الفيزياء النظرية / الرياضية في الـ GPS.

**جوهانا:** كنتُ بالفعل مهتمّةً جدًا بالفيزياء أثناء دراستي الثانوية. قرأتُ كتبًا عن تطوّر الفيزياء الحديثة، مثل كتب هايزنبرغ، ثم عند نهاية دراستي الجامعية للفيزياء في هامبورغ، قررتُ أنني أرغب في مواصلة البحث العلمي. وهكذا تقدّمتُ بطلبٍ إلى كامبريدج وكنتُ محظوظةً بقبولي هناك. وبعد ذلك بكثير –بالطبع– كانت اللحظة المحورية عندما تقدّمتُ بطلب إلى جامعة فورتسبورغ وتم تعييني أستاذةً.

**عادل:** أكملتِ دراساتِك العليا في جامعة كامبريدج، حيث التحقْتِ –مع نضال– ببرنامج الماجستير الجزء الثالث، ثم ببرنامج الدكتوراة، حيث حصلْتِ على جائزة ج. ت. نايت J.T.Knight. هل تعتقدين أن الدراسة في مثل هذه الجامعات المرموقة شرطٌ أساسيٌّ لمسيرتِك العلمية الناجحة؟ ما الذي يمكنكِ قولُه لطلاب الفيزياء في العالم الثالث، بما في ذلك العالم العربي، عن عناصر النجاح في الفيزياء النظرية من وجهة نظرِكِ؟ وما هي المجالات الشيقة الأخرى غير نظرية الأوتار التي قد يختار الطالبُ الشاب العملَ فيها الآن؟

**جوهانا:** في حالتي، كان الحصول على تعليم ممتاز في كامبريدج مفيدًا بالتأكيد. ومع ذلك، فإن أهمَ النقاط هي الدراسة بمثابرة ومتابعة التطورات الحالية، أينما كنتَ. ومن النقاط المهمة الأخرى بناء شبكة من الفيزيائيين، إن أمكن من خلال حضور ورش العمل والمؤتمرات.

بالطبع، لا يزال هناك العديد من الأسئلة المهمة المفتوحة في نظرية الأوتار ومثنوية المعيار/الجاذبيّة. بالإضافة إلى ذلك، هناك العديد من التطورات المهمة في مجال المعلومات الكمومية. علاوةً على ذلك، نظرًا للتطورات الحالية في تطبيقات الذكاء الاصطناعي، يجب الأخذ في الاعتبار أن الذكاء الاصطناعي يعتمد على نماذج فيزيائية، وبالتالي فهناك الكثير مما يجب فعله لتحسين الذكاء الاصطناعي استنادًا إلى رؤى فيزيائية.

**نضال:** يعتقد الكثيرون اليوم أن نظرية الأوتار، نظرًا لتعريفها عند مقاسٍ طاقيّ عالٍ جدًا، لا يُمكن أن تُؤثر على العالَم الحقيقي. ومع ذلك، في مقاربة الأسفل–نحو–الأعلى bottom to top approach، تمّ تقدير بعض الخصائص الظواهريّة باستخدام نماذج الغشائيّات Branes. هل يُمكنكِ مُشاركتُنا رؤيتَكِ حول سبب اعتقادِكِ بأهمية نظرية الأوتار في فهم جوانب مُختلفة من التآثرات الأساسية الأربعة، وهل ستُقدِّم أيَّ ظواهر قابلة للاختبار في المستقبل القريب؟

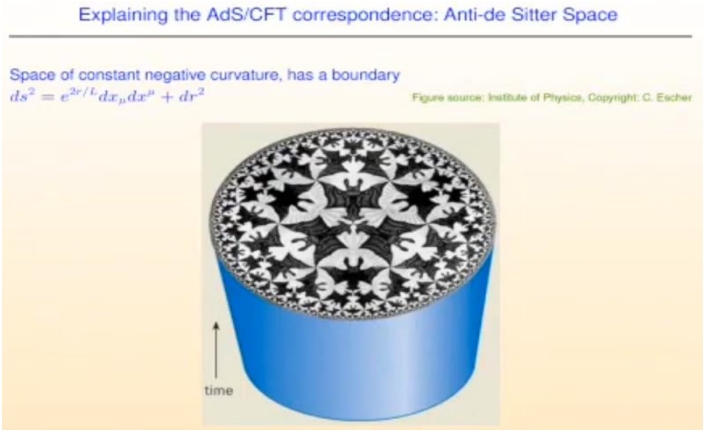
**جوهانا:** تهدف نظرية الأوتار إلى تكميم الجاذبية وتوفير إطار مُوحد لجميع التآثرات أو التفاعلات الأساسية الأربعة، أي الجاذبية والتآثرات الثلاثة التي يصفها النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات. من الصعب التنبؤ بالمستقبل، ومع ذلك، يبقى من غير المُرجح العثور على دليل تجريبي مُباشر على وجود الأوتار، إذ يُتوقع أن تكون بالغة الصغر، وبالتالي تتجاوز بكثير النظام المُتاح لمُسرّعات الجسيمات الحالية. ومع ذلك، من المُحتمل أن تُختبر نظرية الأوتار يومًا ما بشكل غير مُباشر من خلال مقترحات جديدة للمادة المظلمة أو تناظرات جديدة لنماذج فيزياء الجسيمات التي قد تُشتق منها. من المحتمل، في وقتٍ لاحق، أن يكون من الممكن رصد بنية الموجات الثقالية بدقةٍ عاليةٍ تُمكّن من إجراء اختباراتٍ غير مباشرةٍ لنظرية الأوتار. لكن كل هذه الأمثلة لا تزال تُثير علامات استفهام. تكمن ميزة نظرية الأوتار في أنها تُوفر إطارًا موحّدًا للجوانب الرياضية للفيزياء النظرية. على سبيل


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

المثال، ربما لم يكن من الممكن اكتشاف تطابُق AdS/CFT ورؤاه المفاهيمية المهمة وتطبيقاته العملية لولا نظرية الأوتار، وأفضل الأمثلة المفهومة لتطابق AdS/CFT متجذرةٌ بقوة في نظرية الأوتار. وبشكلٍ أعمّ، تُوفر نظرية الأوتار إطارًا عالَميًا لنظريات الحقل الكمومي المتّسقة والخالية من اللانهائيّات في مجال الطاقات العالية فوق البنفسجية.

**عادل:** اقتُرحتْ مُخمَّنة مالداسينا AdS/CFT Maldacena conjecture Anti di Sitter/ ) (Conformal Field Theory ضمن نظرية الأوتار، بينما تُطبّق بعضُ أعمالِك مثنويّة المعيار/الجاذبية (Gauge/Gravity Duality) على مجالات لا علاقة لها مُسبقًا بنظرية الأوتار. هل يُمكن المحاججة حول مبدأ الهولوغرافيا، أو مثنويّة المعيار/الجاذبية خارج نطاق نظرية الأوتار؟

**جوهانا:** هذا سؤالٌ مُثيرٌ للاهتمام ووثيق الصلة، وهو موضوعُ أبحاثٍ راهنة. كما ذكرتُ، ربما لم يكن من المُمكن اكتشاف تطابُق AdS/CFT لولا نظرية الأوتار. ومع ذلك، يُتوقع أن يبقى مبدأ الهولوغرافيا الذي يوافِق بين نظريات الجاذبية وبين النظم الكمومية عند حدودها قائمًا بشكلٍ عام. ولكن ما هو نطاق تطبيقه بالضبط؟ لم يُحدَّد هذا بدقة بعد. وُجد العديدُ من النتائج المهمة في السنوات العشر أو الخمس عشرة الماضية، والتي تستخدم مفاهيمَ من نظرية المعلومات الكمومية لمعالجة هذا السؤال، لا سيما في سياق وصف الخصائص الكمومية للثقوب السوداء. ولا يزال هذا مجالًا بحثيًا نشطًا للغاية، وأتوقع المزيد من النتائج المهمة في المستقبل القريب. وربما تضيف هذه الأفكار أيضًا مكوّناتٍ جديدةً نحو فهم نظرية الأوتار نفسها.



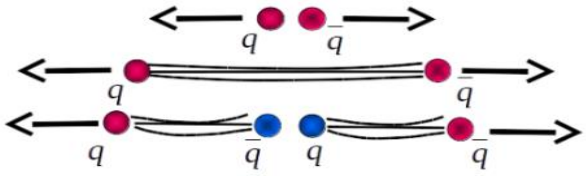

فضاء دي سيتر المضاد (للفنّان إيشير M.C. Escher): هندسة لاإقليديّة بانحناء سالب.

**نضال:** نعلم أن هناك العديد من الأعمال التي تحاول استخدام مثنويّة المعيار/الجاذبية لفهم وشرح السمات الأساسية للـQCD، وهي نظرية التفاعلات القوية، مثل احتجاز الكواركات Quarks Confinement وكسر التناظر اللاانطباقي (الكيرالي) Chiral symmetry breaking. إلى أي مدى تمكنت هذه النماذج من الوصول إلى حل لهذه المسائل؟

**جوهانا:** أثبتتْ تعميماتُ الـ AdS/CFT أنه واعدٌ جدًا لدراسة النظريات المقترنة بشدّة، وخاصةً تلك التي تقتضي ظاهرة الاحتجاز والحصر. في الواقع، وجدتُ أنا وزملائي نموذجًا قائمًا على أغشية D7 مغمورة في خلفية حاصِرة تُؤدي إلى كسر التناظر الكيرالي كما هو الحال في الـ QCD. قمنا بحساب كتل الميزونات المماثلة لميزونات باي π و رو ρ، ووجدنا توافقًا جيدًا مع نتائج نظرية الشبيكة المعياريّة Lattice gauge theory. علاوة على ذلك، بالنسبة للنظريات المقترنة بشدّة في نماذج جسيمات هيغز المُركَّبة التي تتجاوز النموذج القياسي، وضعنا تنبؤاتٍ لكتل الحالات المُقيّدة أكدتْها لاحقًا نظرية الشبيكة المعياريّة. هذه بالطبع نتائج جيدة تُعزّز فهمَنا للفيزياء


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

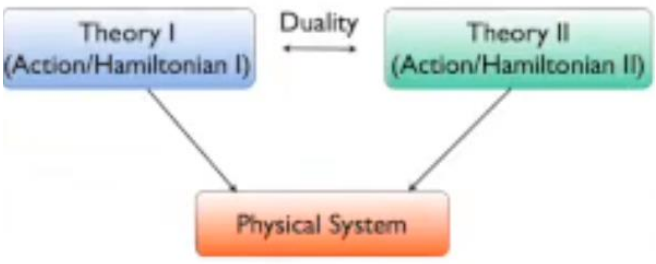
المقترنة بشدّة. ومع ذلك، فإن تفسير الاحتجاز في حدّ ذاته لا يزال بعيداً جداً.




احتجاز وحصر الكواركات

**عادل:** هل يمكنك توضيحُ مجال أبحاثِكِ تحديدًا في تطبيقات مثنويّة المعيار/الجاذبية على فيزياء الجسيمات والمادة الكثيفة؟ ماذا تعني؟ وما علاقتها بمُخمَّنة مالداسينا؟

**جوهانا:** من المثير للاهتمام أن مُخمَّنة مالداسينا قد تتجاوز النظريات التماثليّة ذات التناظر الفائق لتشملَ نظمًا ذات صلة بفيزياء الجسيمات والمادة الكثيفة. ما يُعجبني تحديدًا هو أن هذه المقاربة الأساسيّة تسمح بتحقيق تعاونٍ بين فيزيائيين من خلفيّات متنوعة للغاية. وهذا بحد ذاته قدّمَ العديدَ من الرؤى الجديدة. على وجه الخصوص، تسمح مثنويّة المعيار/الجاذبية بحساب معاملات النقل ذات الصلة بالنظم المترابطة بقوة، حتى للمواد في فيزياء المادة الكثيفة.




***تسمح المثنويّة بين نظريّتَين مختلفتَين بتطبيقهما على نفس النظم الفيزيائيّة***

**نضال:** في العديد من سيناريوهات فيزياء الطاقة العالية، نُهمل تأثيرات درجة الحرارة، ونستخدم نظرية الحقل الكمومي (QFT) عند قيمة T=0. ومع ذلك، عند التعامل مع فيزياء المادة الكثيفة، يجب أخذ تأثيرات T في الاعتبار. بتطبيق المثنويّة على فيزياء المادة الكثيفة، ما هو العنصر الجديد الذي يجب إضافته إلى صورة الجاذبية المثنويّة التي تأخذ درجة الحرارة في الاعتبار؟ هل هو إدخال ثقوب سوداء "فيزيائية" بدرجة حرارة معينة؟ أم مجرد بعض التقنيات الرياضية، مثل مطابقة درجة الحرارة بمقلوب نصف القطر للزمن الإقليدي المتراصّ compactified Euclidean time؟

**جوهانا:** بالطبع، يُعد توليدُ درجة حرارة عن طريق إدخال ثقب أسود في فضاء دي سيتر المُضادّ Anti-de Sitter نهجًا رياضيًا لا أكثر، لأنه –بخلاف فضاء Anti-de Sitter– يمتلك كونُنا ثابتًا كونيًا موجبًا، وليس سالبًا. لكن هذا النهجَ الرياضي ناجحٌ بشكل لا يصدق، ويُولِّد دوالّ غرين المتأخرة والمتقدّمة بطريقة طبيعية جدًا انطلاقًا من البنية السببيّة لمتريّة الثقب الأسود.

**عادل:** نفهم مثنويّة AdS/CFT على أنها تربط نظريةَ المعيار بالجاذبية في ظروف خاصة: فهناك تناظرات تماثليّة شموليّة، حيث تحتوي نظرية المعيار الفائق التناظر على عدد لا نهائي من "الألوان"، بينما تعيش الجاذبية في فضاء مضاد لـ di Sitter. نعلم أن كونَنا لا يمتلك هذه الخصائص، فكيف يمكننا أن نأمل أن تساعدنا هذه المثنويّة في الإجابة على بعض الأسئلة المستعصية في عالمنا الحقيقي؟

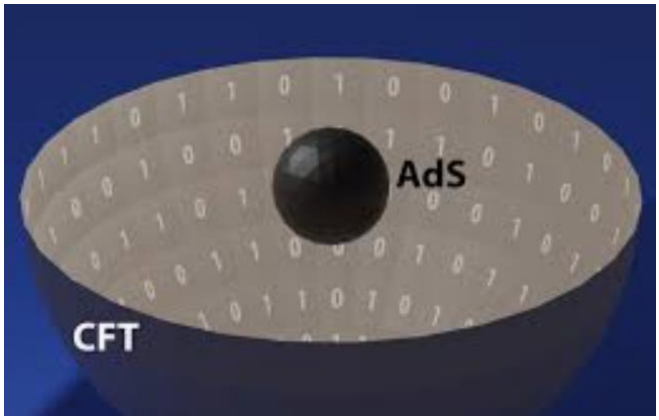
**جوهانا:** صحيح أن جميع الأمثلة التي ذكرتَها تعمل عند نهاية "N" الكبيرة (large N limit) التي لا تتحقق في الطبيعة. يكمن فنّ البحث العلمي في مثنويّة المعيار/الجاذبية في إيجاد أمثلة يمكن من خلالها استخراج معلومات جديدة من هذا النهج تكون ذات صلة بأسئلة


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

بحثية يمكن الوصول إليها تجريبيًا. في الأمثلة التي ذكرتَها (كسر التناظر الكيرالي، خصائص النقل)، هذا هو الحال بالفعل.

**نضال:** هل يمكنك شرح مبدأ "الهولوغرافية" بإيجاز ضمن المثنويّة، وهل اختزال البعد على جانب نظريّة المعيار أمرٌ أساسي أم مجرد مصادفة، من أن حيث نظرية المعيار المثنويّة مع الجاذبية عُرِّفت على حدود المتنوِّع manifold حيث تعيش الجاذبية؟ هل هناك علاقة بين هذه الفكرة وبعض سيناريوهات "الأبعاد الإضافية" حيث يمكن للجاذبية وحدها اختراق بعض الأبعاد الإضافية بينما تقتصر قوى المعيار gauge على الغشائيّات الفرعية sub-branes؟

**جوهانا:** مبدأ الهولوغرافية خاصية أساسية للثقوب السوداء، أو الجاذبية الكموميّة بشكل عام، وهو أصل صيغة بيكنشتاين-هوكينغ التي تنص على أن أنتروبيّة الثقب الأسود تتناسب طردًا مع مساحة أفق شفارتزشيلد الخاص به، وليس مع حجمه. لا يزال نطاقُ تطبيق هذا المبدأ العميق غيرَ مفهوم تمامًا، وهو موضوعُ أبحاثٍ راهنة. يشير مبدأ الهولوغرافية إلى أن عدد درجات الحرية لنظريتي الهوّة الجَسِيمة ذات الحجم الكبير bulk والحدود متطابق.




***تعيش الثقالة في القاع الجسيم بينما تعيش نظرية الحقل التماثلي على الحدود.***

**عادل:** أستاذة إردمينجر، أنتِ معروفةٌ جدًا بعملِكِ في مجال الإنشاءات النظريّة من الأعلى إلى الأسفل للـ QCD الهولوغرافي، كما أنّكِ بيّنْتِ أن نظرية الأوتار تتنبأ بمعامل نقلٍ مُعيّن في ديناميكيّة السوائل (الهدروديناميكا)، ثم طبّقْتِ مبدأَ الهولوغرافيا نفسَه في فيزياء المادة المُكثّفة، مثل تأثير كوندو. لماذا لدينا هذه "الشمولية universality" التي تجعل المثنويّة مفيدةً في مجالات مُتنوّعة ومتباينة، بغض النظر عن التفاصيل المجهرية؟

**جوهانا:** بالطبع، من الضروري أن تتطابق تناظرات النظريّتين في المثنويّة، وأن يتطابق عدد درجات الحرية بما يتوافق مع مبدأ الهولوغرافيا. ومع ذلك، فإن الفهمَ الكامل لسبب نجاح المثنويّة بهذه الدرجة يتطلب فهمًا كاملًا لنطاق تطبيق مبدأ الهولوغرافيا، والذي -كما وضّحْتُ سابقًا- لا يزال سؤالًا مفتوحًا.

**نضال:** سمع قرّاء المجلة عن مفارقة المعلومات للثقوب السوداء وإشعاع هوكينج. هل يُمكن فهم نظرية المعلومات الكمومية، التي لم تُعرَّف جيدًا بَعْدُ مقارنةً بنظرية المعلومات الكلاسيكية، من خلال مفاهيم معلومات الثقوب السوداء؟ أو العكس: هل يُمكن لمفاهيمِ المعلومات الكمومية وصفُ الإجرائيّات والعمليّات داخل الثقوب السوداء؟

**جوهانا:** يُعدّ استخدام مفاهيم المعلومات الكمومية، مثل أنتروبيّة التشابك entanglement entropy، أو التعقيد الحسابي الكمومي quantum computational complexity، أو المعلومات المتبادلة mutual information، لوصف الخصائص الكمومية للثقوب السوداء مجالًا بحثيًا نشطًا للغاية. على سبيل المثال، بالنسبة للتعقيد الحسابي الكمومي، من الضروري أولًا


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

إثبات المثنويّة على مستوى البوّابات الفردية، وهو مجالُ بحوثٍ نشطٌ للغاية.

**عادل:** مع الثورة الحالية في الذكاء الاصطناعي، هل يُمكنني القول إنكِ تعملين على مثنويّة أخرى بين تدّفق زمرة الاستنظام Renormalization group (RG) flowوتعلّم الشبكات العصبونيّة؟ هل هناك أي صلة بين هذه المثنويّة ومثنويّة المعيار/الجاذبية؟ على الجانب التطبيقي من عملِكِ، هل يُمكن لحسابات المثنويّة، عند تطبيقها على المادة الكثيفة أو الهيدروديناميك، أن تؤدّي من حيث المبدأ إلى موادّ كموميّة جديدة ذات خصائص مرغوبة؟

**جوهانا:** من المثير للاهتمام للغاية أن مفاهيمَ من الفيزياء النظرية، وتحديدًا مثنويّة المعيار/الجاذبية، يُمكن استخدامها لتحسين قدرات التعلّم في الشبكات العصبونيّة للذكاء الاصطناعي. لقد بدأنا للتو العملَ على هذه الصلة. ونعم، نحن نتعاون مع فيزيائيّي المادة الكثيفة لاقتراح موادّ كموميّة جديدة – وإن كان ذلك لا يزال على المستوى النظري.

**نضال:** نغيّر الاتجاهَ الآن، واسمحي لنا بإبلاغ القرّاء بأنكِ حصلتِ من عام 1999 إلى عام 2005 على منحة بحثية ضمن برنامج إيمي نويثر Emmy Noether التابع لمؤسسة الأبحاث الألمانية، والذي عملتِ ضمنه في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، حيث التقى بكِ عادل، وفي جامعة هومبولت. اسمحي لنا أيضًا بإعلام القرّاء بأن إيمي نويثر كانت، على سبيل المثال، واحدةً من أبرز العلماء في كلّ من الرياضيات البحتة والفيزياء النظرية، ولكنها حُرمت من الأستاذية في أوائل القرن العشرين بسبب دينها وجنسها. سؤالي لكِ هو: هل واجهتِ أيَّ عقبات في مسيرتكِ المهنية كامرأة في مجال العلوم؟ وإذا كان الأمر كذلك، فكيف تعاملتِ معها؟

**جوهانا:** كامرأة، لا يزال من الصعب بناءُ مسيرةٍ مهنيّة في مجال الفيزياء النظرية حتى اليوم. بالطبع لا ينبغي أن يكون هذا هو الحال! آمل أن أتمكنَ من المساهمة في تغيير هذا. يجب أن تُدرك المجتمعاتُ والأفراد أن أيَّ إنسان قادرٌ على القيام بعملٍ علميّ عظيم. يجب أن تختفيَ الأحكامُ المسبقة، ويجب وضعُ تدابير داعِمة مناسِبة في كلّ مكان. آمل أن أساهم في نشر هذه الرؤية. من ناحية أخرى، آمل أن أشجّع الشاباتِ على الثقة بأنفسهنّ، والسعي وراء اهتماماتهن بعزيمة، وبناء شبكاتٍ تُسهم في تعزيز مسيرتهن المهنية. في جامعتَي فورتسبورغ ودريسدن، أنشأنا "شبكة غريت هيرمان Grete Hermann" الدولية للفيزيائيّات في مجال فيزياء المادة الكثيفة من أجل تعزيز هذه الأهداف. كانت غريت هيرمان رائدةً في ميكانيك الكم، وطالبةَ دكتوراة لدى إيمي نويثر. يمكن لأي باحثة في فيزياء المادة الكثيفة والمجالات ذات الصلة التقدمُ بطلب للانضمام إلى شبكة غريت هيرمان.

**عادل:** في هذا الصدد، ما نصيحتكِ للفيزيائيين الشباب الطامحين لبناء مسيرةٍ مهنية في مجال العلوم، وخاصةً النساء؟ كيف يمكن للدول النامية، وخاصةً العربية، أن تقدّم للنساء المزيدَ من الدعم والفرص لتشجيعهن على الانخراط أكثر في مجالات العلوم، والتكنولوجيا والهندسة والرياضيات؟

**جوهانا:** من الضروري، خاصةً للنساء، تشجيعُهُنّ على ممارسة العلوم منذ الصغر، أي في المرحلة الثانوية وحتى الابتدائية. من الضروري دعمُ مواهبهن وتقديرُ عملهن. سيكون من الرائع إرسال الطلاب الشباب، وخاصةً الإناث، إلى مؤتمرات أو ورش عمل لعرض أعمالهم والالتقاء


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

بفيزيائيين آخرين. العلمُ هو مستقبل العالَم، لا سيما في ظل التحديات العالمية الراهنة، مثل تغير المناخ، ونحن بحاجة إلى مساهمةِ كلّ مهتمٍ في البحث العلمي والتعليم الجامعي!

**نضال:** نسعى في الجمعية الفيزيائية العربية (ArPS) إلى تطبيق برنامج دورات صيفية/شتوية، وتقديم ندوات/محاضرات للطلاب في العالَم العربي، ممّن لا يستطيعون حضور هذه المحاضرات في جامعاتهم، نظرًا لافتقار العديد من المؤسسات إلى البنية التحتية اللازمة، وعدم وجود مناهج أكاديمية بمستوى الدراسات العليا المتقدمة. برأيكِ، كيف ينبغي لنا فتحُ قنواتِ تعاونٍ مع جمعيات فيزيائية أخرى، كالجمعية الألمانية، من أجل تحقيق أهدافنا في تعزيز العلوم في بلداننا؟

**جوهانا:** على سبيل المثال، لدى الجمعية الفيزيائية الألمانية شراكات مع جمعيات فيزيائية في دول أخرى. من المفيد بالتأكيد التواصل مع مجلس إدارة الجمعية الفيزيائية الألمانيّة (GPS) الحالي ومناقشة خططكم –مثل عقد اجتماعات مشتركة– معهم.

**عادل:** في وقت فراغِكِ، هل لديكِ أيّ هوايات؟ كثيرون في العالَم العربي لديهم تصوّرٌ خاطئ عن الفيزيائي النظري النمطيّ كإنسانٍ منغمسٍ في عالمه الخاص، يتواصل بشكل سيء مع الآخرين! هل تعتقدين أن قضاءَ وامتلاكَ أوقاتِ فراغٍ أمرٌ مفيدٌ عندما يعمل المرء بدوام كامل منغمسًا في العلوم؟

**جوهانا:** أعزف كثيرًا على الموسيقى الكلاسيكية: البيانو والأوبوا، وأيضًا في فرق موسيقية. من المهم جدًا الاسترخاءُ بطريقة متمِّمة ولكن بنّاءة. نختتم بهذا السؤال من **قراء المجلة:** أين ترون الفيزياء النظرية بعد عشر سنوات؟ هل ستكون الأدوات غير الاضطرابية، المدعومة بحجج المثنويّة، متوفّرة بكثرة، أم أن التقدّمَ في الكونيات الجسيميّة particle cosmology سيكون المجالَ الأنسب لتحقيق أكبر قدرٍ من التقدم، أم...؟

**جوهانا:** أنا متأكّدة من أن المقاربات اللااضطرابية ستواصل لعبَ دورٍ مهم. وأعتقد أن مفاهيم المعلومات الكمومية ستواصل إحداثَ ثورة في الفيزياء الأساسية والجاذبية الكمومية. وبالطبع، سيكون من الرائع أيضًا إحرازُ تقدّم في فهم المادة المظلمة والطاقة المظلمة.

**أسرة المجلّة:** نحن ممتنون جدًا، أستاذة جوهانا إردمينجر، لإتاحة الفرصة لنا لإجراء مقابلةٍ معك: شكرًا جزيلاً على وقتِكِ.


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

# 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.

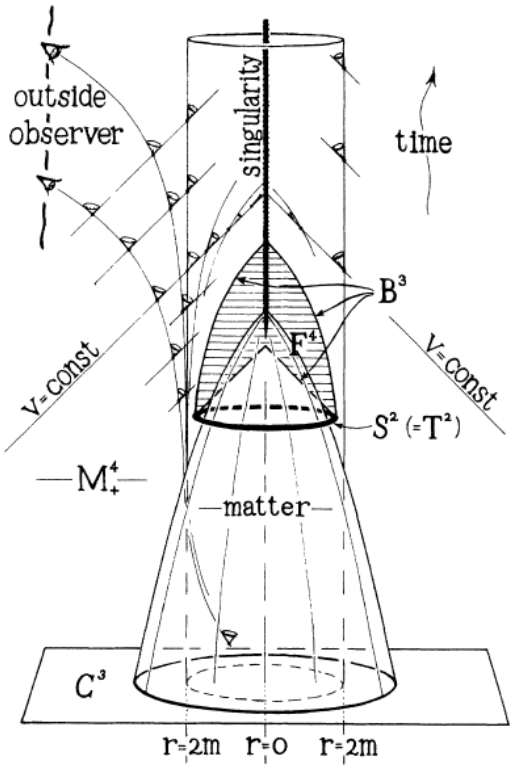
لحسن الحظ، ويسعدنا جدًا القول إن السير روجر بنروز معنا اليوم ليُلقي علينا محاضرة عن "متفرّدات الثقوب السوداء في علم الكونيات الدوري". نرحّب بكم معنا، السيد بنروز، والكلمة لكم.

**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

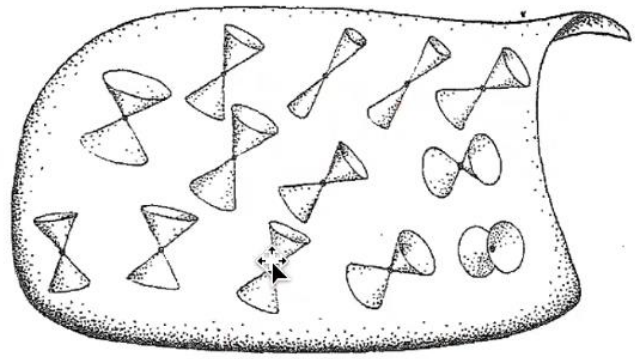
ولكن ما تمكّنتُ من إظهاره هو أنه في الوضع العَموميّ، عندما نُدخِل اضطراباتٍ perturbations على هذا النموذج، فإن التفرّد يبقى. في الواقع، يقترض الشكل 1 تناظرًا كرويًّا، ويمكنك أن ترى أن المادة تسقط إلى الداخل ولديك تفرّد في المركز، ولكن إذا تخيّلت الآن لاانتظاماتٍ irregularities، فإن نوعًا من الاعتقاد 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.

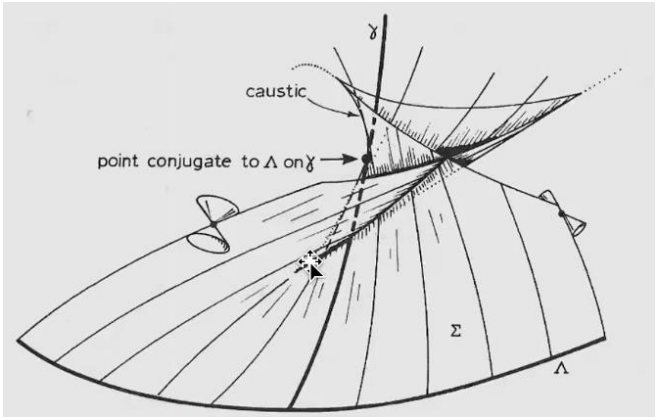


الشكل 3: مجموعُ المخاريط الضوئيّة على سطح تبيّن مستقبلَه.

### 1–4) مستقبل السطح المحبوس ودور حدود مستقبله

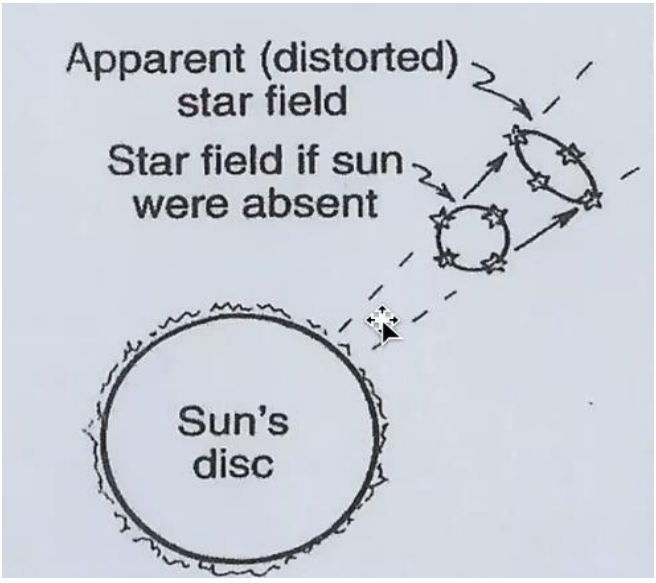

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

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.

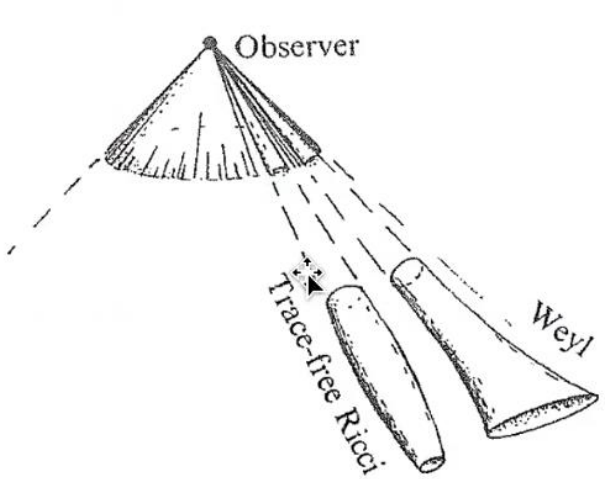



الشكل 5: الحقل الظاهري لنجمٍ، بوجود أو غياب الشمس

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

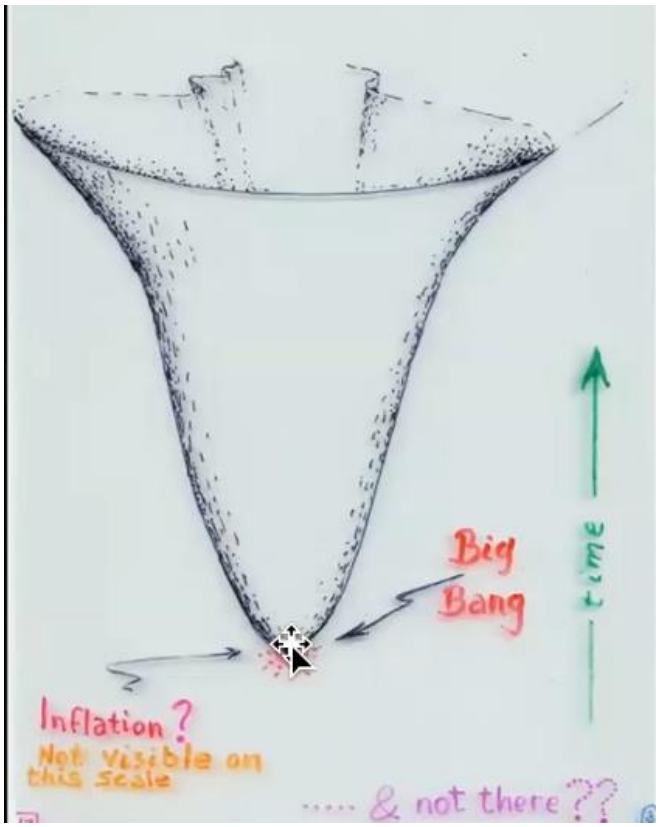
[1] يُحلَّل موتّر ريمان للانحناء إلى موتّر فايل عديم الأثر وموتّر ريتشي، وكلاهما بعشر درجات حريّة، كما يُحلَّل موتّر ريتشي إلى سلّميّة ريتشي (درجة الحريّة الواحدة الموافقة للأثر) وموتّر ريتشي معدوم الأثر. يتناسب موتّر ريتشي مع موتّر الطاقة–الإجهاد للمادّة وبالتالي ينعدم بغياب المادّة (الحقول غير الثقاليّة) 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

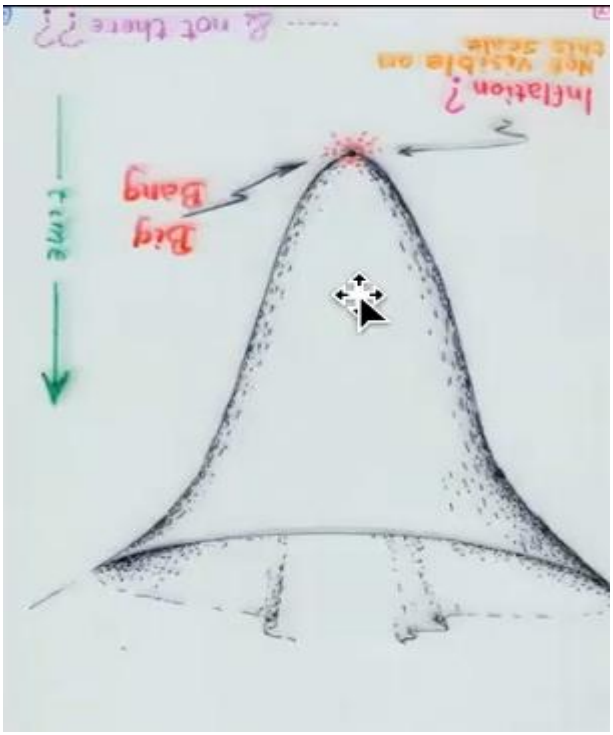



الشكل 7: حدوث متفرّدة الانفجار العظيم

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.

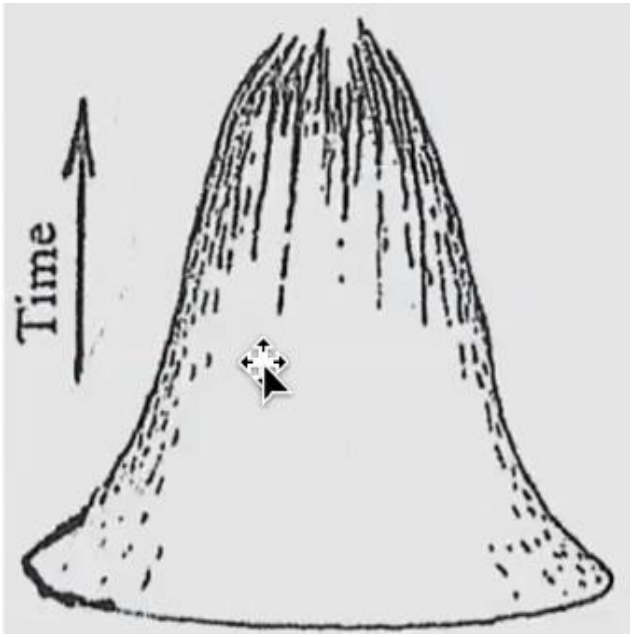
لدينا هنا الصورة (الشكل 7) عن تمدّد الكون واتّساعه، حيث الانفجار العظيم في الأسفل، والزمن يصعد إلى الأعلى. تُبيّن الصورة أيضًا التوسّع الكوني المتسارعَ الذي نراه بسبب ما يسميه الناس الطاقة المظلمة dark energy، وأعتقد أنه يتوافق تمامًا مع الحدّ الكوني cosmological term في معادلات أينشتاين، والذي يعني... 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

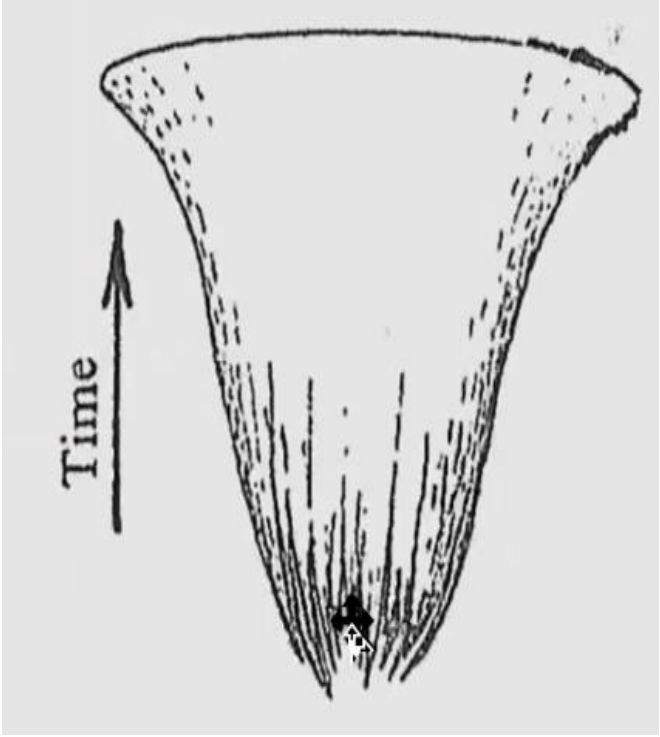
هناك مشكلة كبيرة حول هذا الأمر، إذ يميل الناس إلى الاعتقاد بأن الانهيار أو الانسحاق الجاذبي gravitational collapse ينجم أساسًا عن قلْب الزمن للانفجار العظيم، وبالتالي لدينا في الشكل 8 تصوّرٌ لكون منهار، عبر إجراء عمليّةِ قلْبٍ وعكْسٍ على الشكل 7، ولكن إذا تخيّلت وجودَ لاانتظاماتٍ، فلن تبدوَ إطلاقًا مثل 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

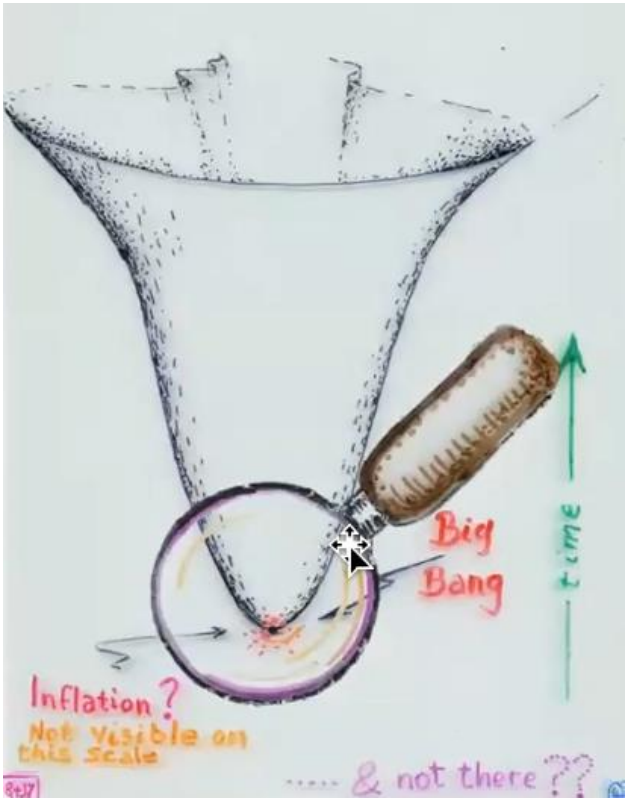
لدينا في الشكل 9 انهيارٌ معقد للغاية، رسمته تخطيطيًا على هذا النحو مع الكثير والكثير من متفرّدات الثقوب السوداء، التي سوف تتجمد فنحصل على فوضى لا تُصدَّق بدلاً من أن يصبح انحناء فايل صغيرًا جدًا (أذكر هنا أن انحناء فايل في الانفجار العظيم يبدو صغيرًا جدًا)، وفي المستقبل البعيد، سنحصل على حالة غير منتظمة 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.



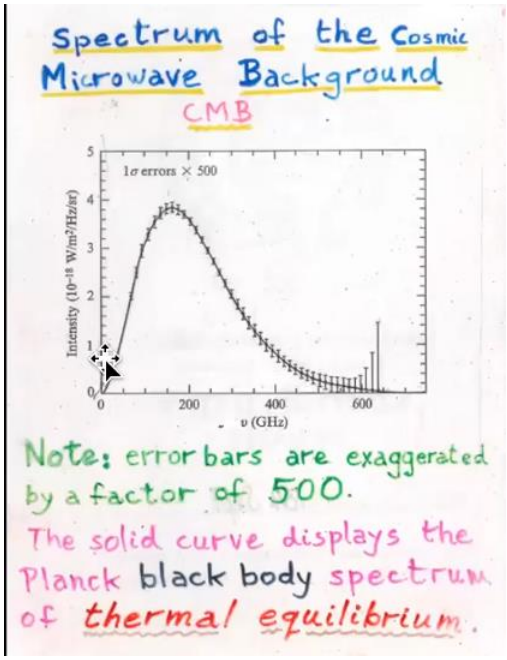

الشكل 11: حتى بوجود التضخّم، أنتروبيّة الحالة البدئيّة غير عالية

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.



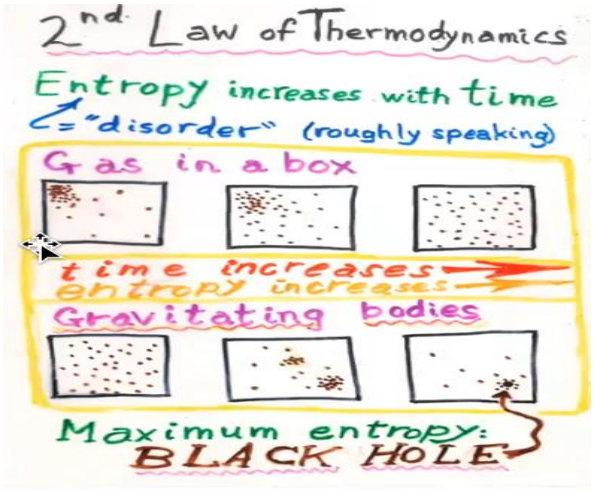

الشكل 13: طيف الخلفيّة المكروية الكوني وفق ساتِل COBE

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

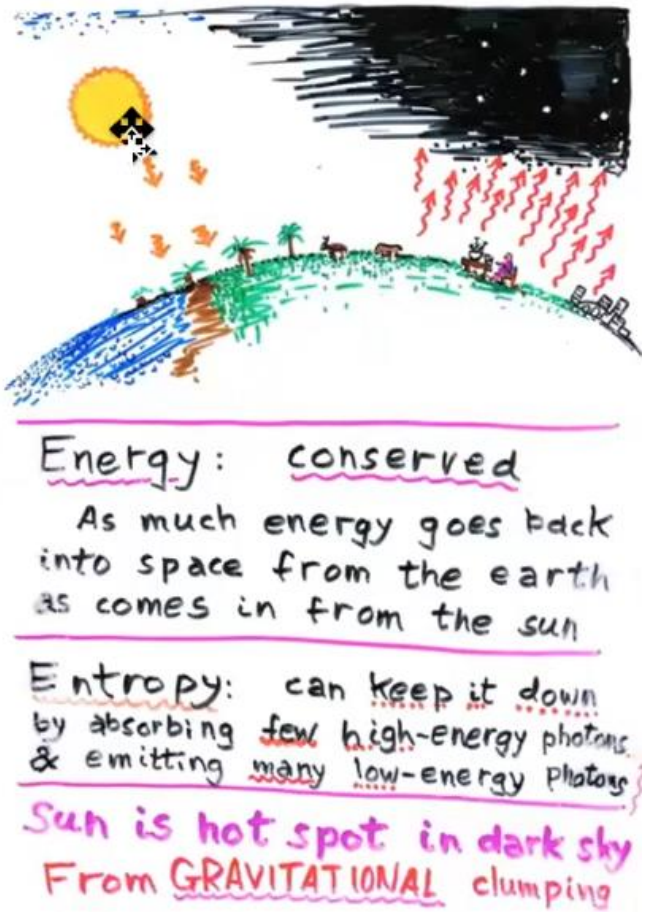

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

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.



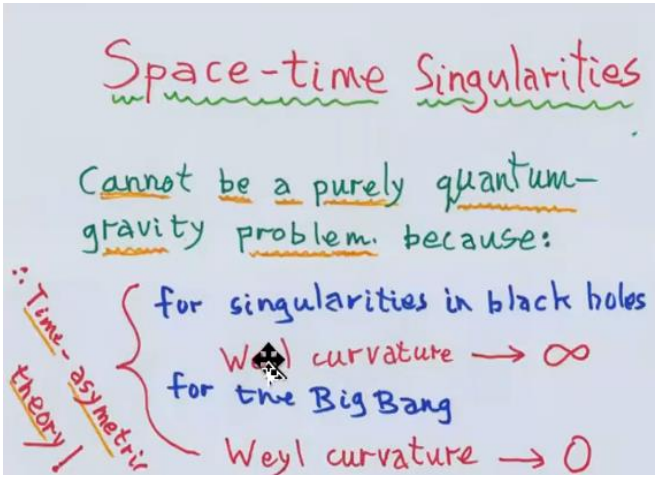

الشكل 15: يعود الفضل في الحياة على الأرض للأنتروبية المنخفضة التي تُشعّها الشمس إلينا

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.

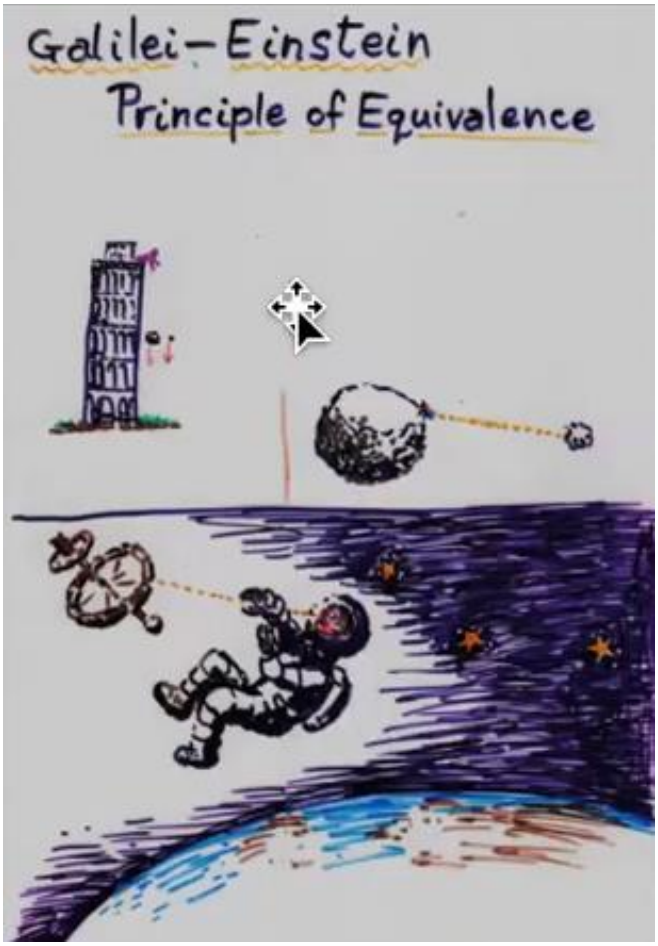
## 3) الجاذبية وميكانيك الكمّ

### 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.

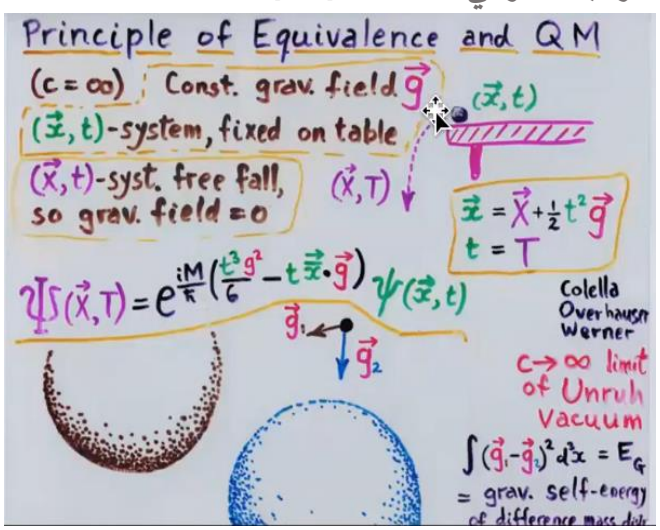



الشكل 17: مبدأ التكافؤ

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**

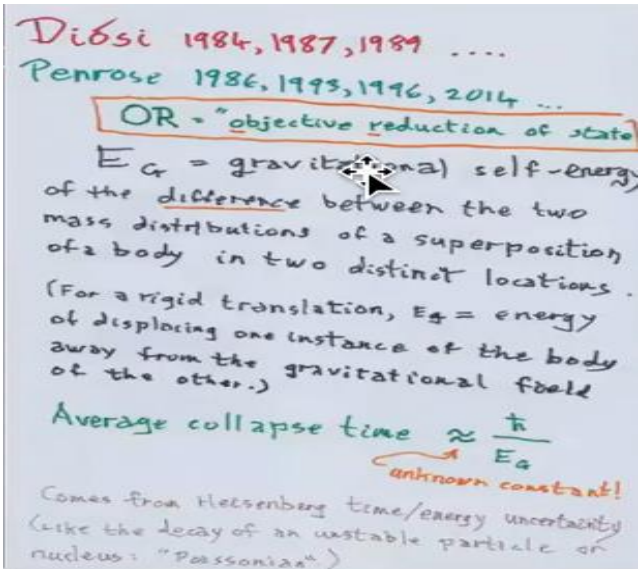



الشكل 18: مبدأ التكافؤ وميكانيك الكمّ


© 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.



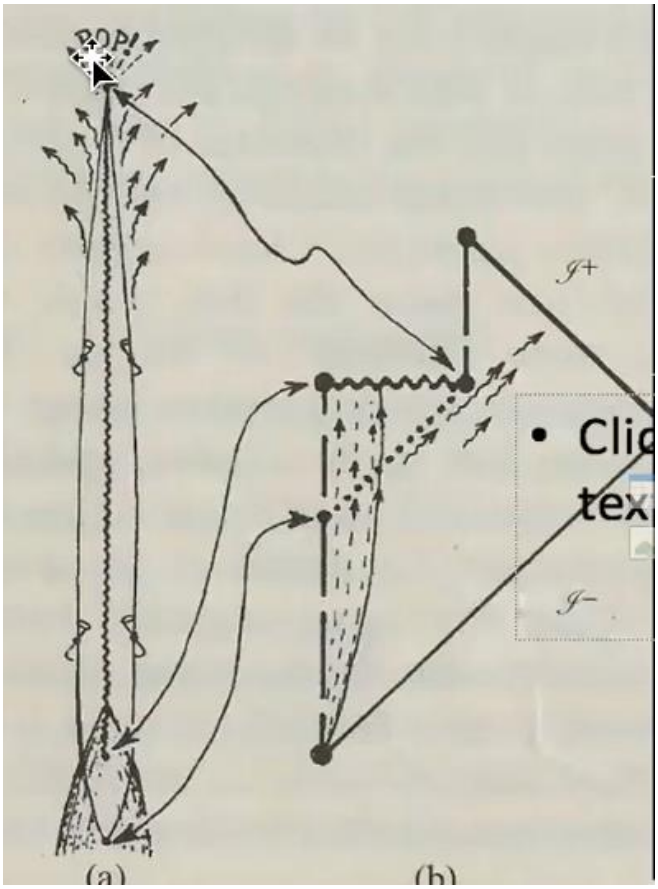

الشكل 19: بسبب الثقالة، هناك عمرُ حياةٍ لتراكبِ حالتَين يؤول خلالَه إلى إحدَيهما

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.

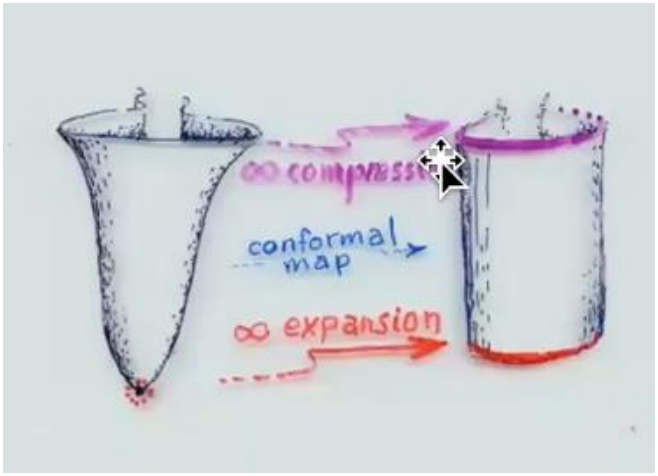
مع أنني أعلم أن هذا يُعدّ انتهاكًا لحرمات الكثيرين، إلا أنني أحاول القول إنه عندما يكون لديك ثقوب سوداء، فهي تجعل الوضعَ متعلّقًا بالجاذبيّة إلى حد كبير، لذا ليس من المستغرب على الإطلاق أن يحدث انتهاك للواحديّة، ولا أعتقد أن المعلومات في الكون تعود بطريقة ما. هذه وجهة نظري، وهي ليست النقطة الرئيسية في 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

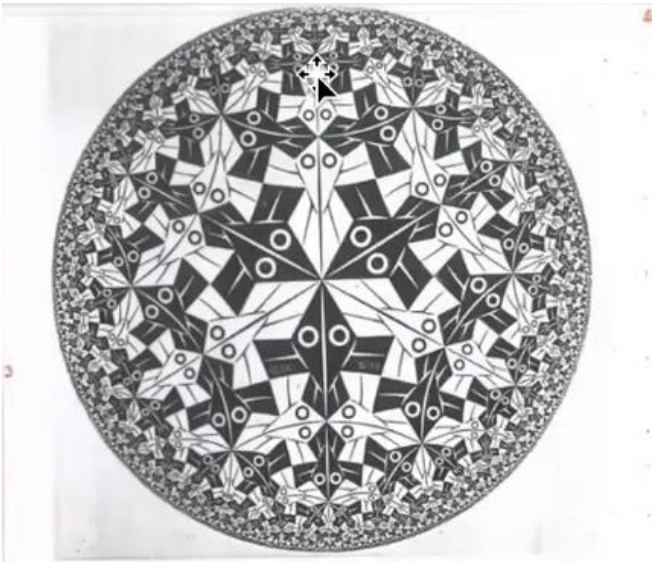
اعتبرتُ هذه الحججُ في الماضي أوضاعَ موافقةً لكونٍ مسطّحٍ مستوٍ بشكلٍ مُقارَب asymptotically flat، لكننا نعلم الآن أن هناك ما يشبه الثابت الكوني، بقيمة موجبة، وهذا يعني أن اللانهايةَ المستقبلية ذاتُ طبيعة مكانية حقًا، بدلًا من أن تكون صفريّة كما كانت في الاعتبارات السابقة. إذن لدينا فضاءٌ مثل اللانهاية 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

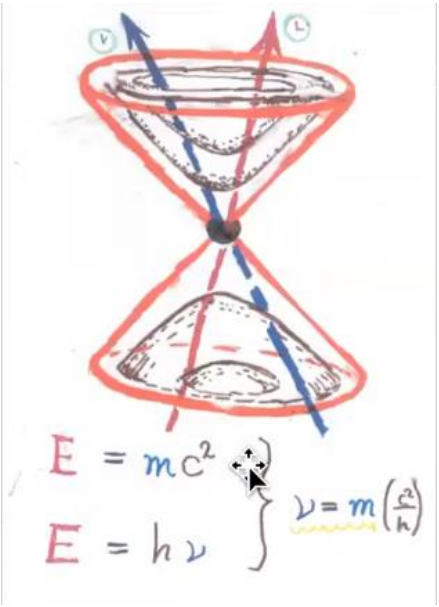
### 4-2) الصمود أمام الضرب بمقاس scaling: الهندسة التماثليّة



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.

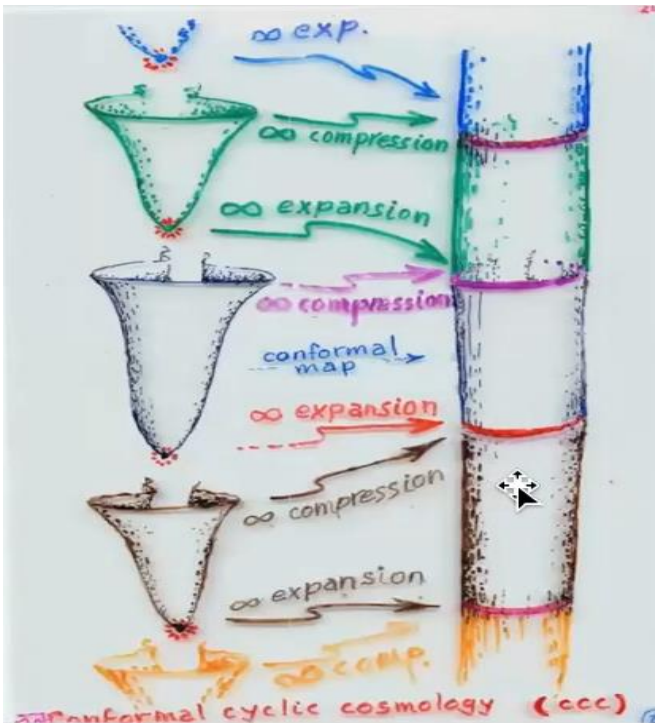
هذا تكهن ليس لدي أيّ مبرر نظري له، باستثناء أنه يُبقي احتمالَ تلاشي الكتلة في المستقبل البعيد مفتوحاً، وهو الافتراض الذي أطرحه عن الفيزياء في المستقبل البعيد، فالأمر لا يقتصر على الفوتونات فحسب، بل إن الكتلة بأكملها ستغدو صفراً.

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

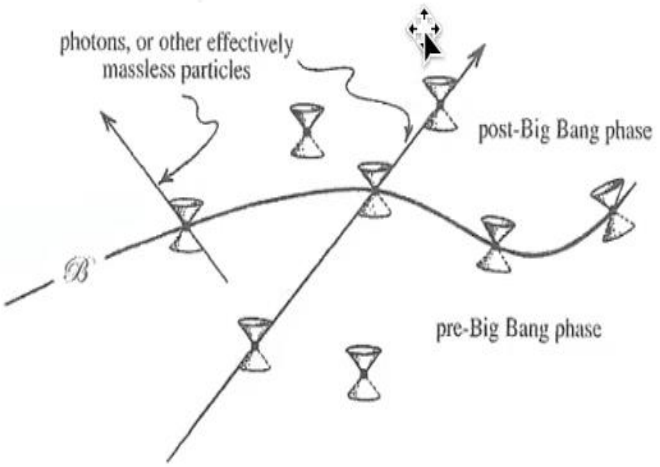



الشكل 24: الكون الدوري

### 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.



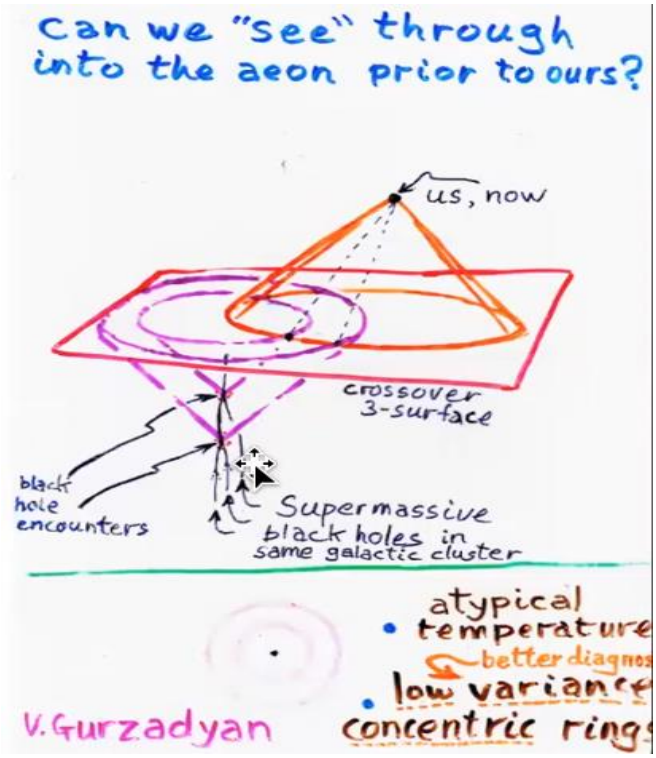

الشكل 25: إشارات عن الكون الدوري تعبر من دهرٍ لآخر

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

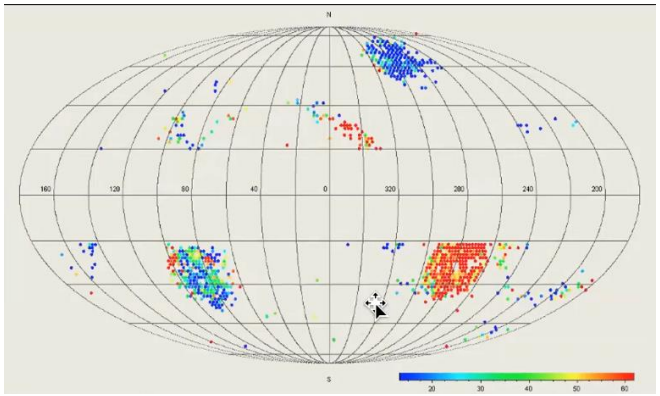

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء




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

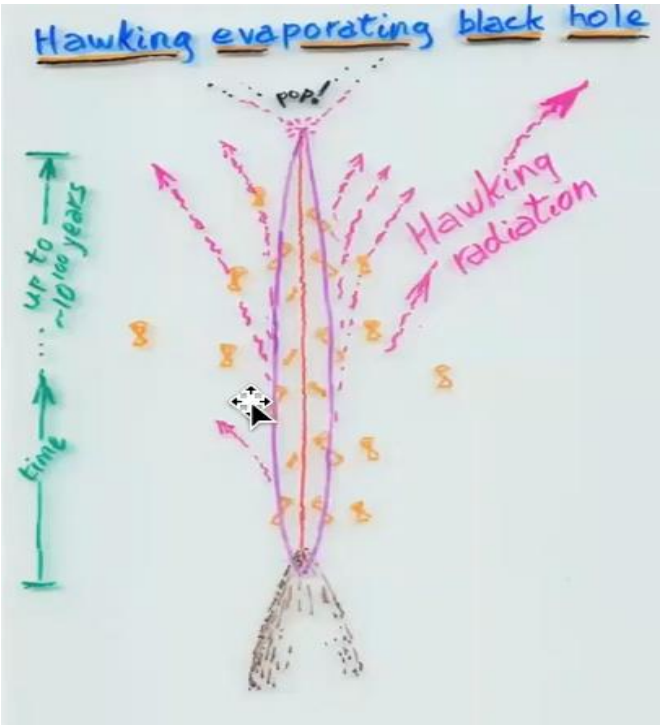
أريد أن أشير إلى أن اللون أيضًا اختلف من مكان لآخر، وزميلي لم يكن يقيس اختلافاتٍ في درجة الحرارة، بل بالأحرى كان يبحث عن تباينٍ منخفض. اللون هو


© 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؟

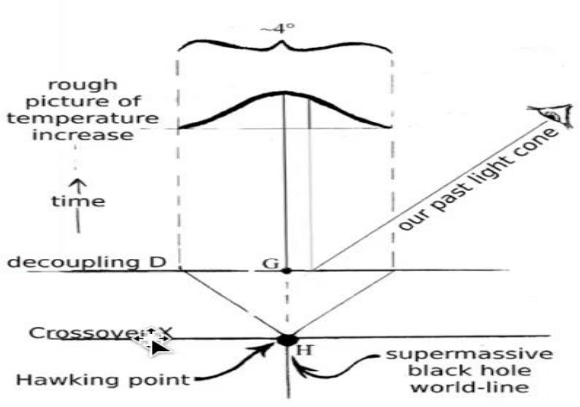
الآن، من الناحية النظرية، الأمر منطقي لأن لديك توزيعًا هائلًا لعناقيد مجرّية بعيدة جدًا: لدينا هنا عند الأزرق عنقودٌ أحدثُ وأقرب بكثير ضمن أفق جسيماتنا الماضي، بينما هنا عند الأحمر سيكون هذا خارجَ أفق جسيماتنا. تذكّرْ أنه يمكن أن تأتيَ الإشارات من خارج أفق الجسيم وتتجلّى في الصورة، لأن الهندسةَ لا تزال 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

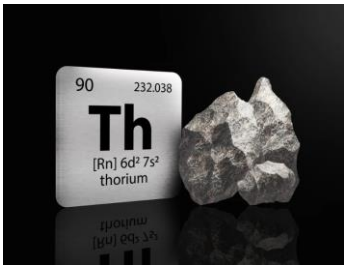

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

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

# المواد والحضارة البشرية: من صروح العمارة الضخمة إلى تصميم المواد على المستوى النانومتري

د. رفيع جبره
المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، دمشق– سوريا

على مر العصور، لطالما استجابت المواد لطموحات البشرية في تشييد صروح العمارة الضخمة من سور الصين العظيم وأهرامات مصر الشامخة إلى برج خليفة في دبي والجسر المُعلّق في مدينة ميو (Millau)– في فرنسا. ولعلّ ما يسترعي الانتباه كلمة المواد في صيغة الجمع (materials) ومفردها كلمة مادة، وهي ثنائية الدلالة لأنها تقابل على السواء تعبيري (matter) و (material). وللتمييز بين هذين المصطلحين، يأتي مقترح مصطلح مادة هندسية مقابل تعبير (material)، وحصر تعبير مادة مقابل تعبير (matter). وينسجم ذلك مع مصطلحات راسخة مثل مصطلح فيزياء المادة الكثيفة (condensed matter physics)، ومصطلح فيزياء المادة الطرية (soft matter physics). والمادة الهندسية هي كل مادة تدخل في تصنيع منتج ذي تطبيق محدد مهما كانت درجة تطوره وتعقيده. ويمتد تعبير منتج من مستوى العنصر (component) الميكانيكي أو الكهربائي أو الكيميائي إلى مستوى الجهاز (equipment)، فالنظام (system)، وحتى البنية الإنشائية (structure). وبإيجاز، فالمادة الهندسية هي المادة التي تؤدي وظيفة (function) تتمثّل في نقل القوى ومقاومتها في المواد الهندسية الإنشائية (structural material)، وفي نقل الطاقة والمعلومات وتخزينها على شكل طاقة أو ضوء أو حرارة في المواد الهندسية الوظيفية (functional material). وفي هذا السياق، يأتي التمييز بين مواد أولية (raw materials)، ومواد هندسية (materials)، ومواد طبيعية (natural materials)، ومواد صنعية (synthetic materials)، ومواد عضوية (organic materials)، ومواد لا عضوية (inorganic materials)، ومواد حية (living materials)، ومواد غير حية (nonliving materials)، ومواد حيوية (biomaterials).

## 1. المواد والتطور التكنولوجي.

منذ العصر الحجري مروراً بعصري البرونز والحديد وصولاً إلى عصر السيليكون اليوم، ارتبط كل تقدم كبير في الحضارة الإنسانية بتحقيق تطور أساسي في علم المواد. لقد تزامن الانتقال من مجتمع الصيد وجمع الثمار إلى اعتماد الزراعة في ثورة العصر الحجري الحديث مع التطور في طرائق التعامل مع المواد الطبيعية كالحجر، مما أتاح إنتاج أدوات الطحن أو القطع. أدى اكتشاف المواد المركبة، على سبيل المثال، إلى ربط شفرات حجرية بمقابض خشبية مزودة بألياف أو راتنجات، مما وفّر


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

مقاومة إضافية على الأدوات اليدوية. كانت المعادن في البداية نادرة، وكانت قطع النحاس والفضة والذهب المحلية تُستخدم في المقام الأول للزينة والأغراض الاحتفالية. لكن اكتشاف عملية الصهر لاستخراج المعادن من الخامات المعدنية بشّر بعصر جديد، هو عصر البرونز، المرتبط بتأسيس المدن وبداية الحِرَف والتجارة. من الصعب تقدير مدى التقدم الملحوظ الذي يمثله تطوير البرونز في علم المعادن الأساسي. أولاً، تتطلب عملية الصهر درجات حرارة أعلى من درجة انصهار المعدن (حوالي 1000 درجة مئوية للنحاس)، بالإضافة إلى جو مُرجِع، وهي شروط ربما وُجدت صدفة لأول مرة في أفران شي الخزف. ثانياً، تنجم الخصائص المميزة للبرونز عن مزج عناصر معادن مختلفة (في هذه الحالة النحاس والقصدير)، ولا تزال الفيزياء الأساسية التي تشرح سبب تحسين التسبيك لسلوكه موضوعاً لاهتمام بحثي مُعاصر! ومن الواضح أنه لولا اكتشاف هذه المادة الأساسية، الذي أدى إلى تغيير كامل في مسار تطور التقدم البشري، لكان العالم اليوم مختلفاً عمّا نعرفه الآن. وفيما بعد، أدى اعتماد الحديد – الذي يمكن تطريقه بدلاً من صبه – في العصر الحديدي إلى تغييرات جذرية في الزراعة، وبالطبع في صناعة الأسلحة، مما أدى إلى تأسيس دول وإمبراطوريات، وتزامن مع بداية الأدب المُدوّن. ومن المثير للاهتمام أن العديد من هذه التطورات العلمية المُبكِّرة انتشرت من خلال التجارة، أو ما نسميه الآن التعاون الدولي. ولا يزال الفولاذ يلعب دوراً محورياً على مر التاريخ، ويبلغ ذروته بعد حوالي 4000 عام من التطورات في علم المعادن مع الثورة الصناعية. وإذ ارتبط مصير البشرية بالمواد منذ فجر التاريخ، فقد نُسبت عصور الحضارة البشرية إلى المادة الهندسية المهيمنة في كل عصر، وهكذا برزت مفاهيم العصر الحجري وعصر البرونز وعصر الحديد، وواكبت المواد الهندسية تطور البشرية التقاني الذي اعتمد على خصائص المواد الطبيعية وسلوكها، وعلى تطور قدرة الإنسان على تكييف هذه المواد، ومن ثم تحويلها، وأخيراً الجمع فيما بينها لتلبية حاجاته المتزايدة في المأكل والملبس والمأوى والأمان. وإذا تخيّلنا صورة الأرض بعد الانفجار العظيم، فقد كانت على الأرجح خالية من المواد الهندسية التي ترافق ظهورها مع بداية ظهور شروط الحياة على الأرض، وما نتج عنها من عوامل ميكانيكية وكيميائية وحرارية ساعدت على تشكّل أشكال المواد البدائية مثل الصخور والحجارة والمساحيق الترابية. ولا بد أن الإنسان البدائي قد تلمّس بالحس بعض المفاهيم الحديثة في سلوك المواد مثل القصافة (brittleness) في الحجارة والصخور، واللدونة (plasticity) في مزيج التربة والماء، وفي بعض المعادن الطبيعية (native metals)، وهذا ما ساعده على تشكيل أدواته البدائية للقص والقطع والدفاع عن النفس بالاعتماد على الكسر القصف في الصخور والحجارة، ومن ثم الاستفادة من لدونة عجينة التربة والماء لتشكيل الأدوات الفخارية البدائية، ومن لدونة المعادن الطبيعية الأولية في ظهور عصور تعدين النحاس والبرونز والحديد.

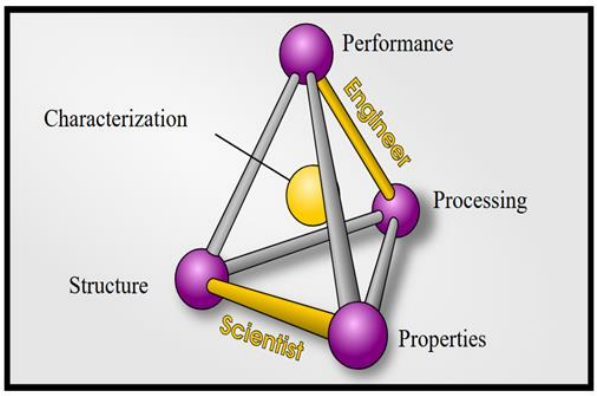
وقد كانت لحضارات الشرق مساهمات بارزة في تطوير المواد الهندسية في جميع عصور الحضارة البشرية، فالشواهد التاريخية على تطوير الزجاج تعود إلى بلاد الشام، أو بلاد ما بين النهرين، أو بلاد حوض النيل. ويتفق جميع المؤرخين على أن تقنية نفخ الزجاج ( glass blowing) تُنسَب إلى الفينيقيين في النصف الأول من القرن الميلادي الأول، ولا تزال هذه التقنية تهيمن على جميع طرائق تشكيل كل منتجات الزجاج المجوف. وإذ يرجع ظهور الخزف، وفقاً لدراسات حديثة، في مناطق جغرافية مختلفة وعند ثقافات متعددة إلى حقبة الصيد


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

والقطاف، ويقترن تطوره بحقبة استقرار البشر، فقد مثّل تطوير البورسلين الصيني، واقتناؤه في خزائن الأسر الملكية الحاكمة حافزاً لتقليده واقتنائه في القرن التاسع عشر لدى عدد من ممالك أوروبا ودوقياتها. وفي الطريق بين الصين شرقاً وأوروبا غرباً، برزت مساهمات العالمين الإسلامي والعربي في تقانة الخزف من خلال تطوير البلاط الخزفي القاشاني نسبة إلى مدينة كاشان في إيران، والبلاط الخزفي ايزنيك نسبة إلى مدينة ايزنيك في تركيا، والطلاء المعدني اللماع (luster) أثناء الخلافة العباسية. وعلى الرغم من مرور ألفيات على تعدين النحاس والبرونز والحديد، شكّل تطوير السيف الدمشقي وتصنيعه نقلة نوعية في علم التعدين الحديث، حيث قادت دراسة خصائص فولاذ هذا السيف وبنيته إلى إقامة الترابط بين بنية هذه المادة الهندسية المجهرية، وخصائصها العيانية، وأدائها، وطرائق تصنيعها من عمليات إحماء وإسقاء وتطريق متكررة.

## 2. نشأة علم المواد.

يقود ما سبق إلى منشأ علم المواد ومجاله العلمي والتقاني. وعلى الرغم من العلاقة الأزلية بين عصور الحضارة البشرية والمواد الهندسية، يعود ظهور علم المواد فقط إلى ستينيات القرن العشرين في بعض الجامعات الأمريكية وبعض مراكز البحوث في شركاتها الكبرى. ويرى Robert W Cahn، أحد كبار علم المواد، أن علم التعدين (metallurgy)، وخاصة علم التعدين الفيزيائي (physical metallurgy)، هو الأب الروحي لعلم المواد من خلال مفاهيم مخططات الأطوار واستثمارها، وتحولات الأطوار، والسيطرة على الإشابة (doping) والنقاوة (purity)، وأخيراً، دراسة البنية المجهرية وفهمها والتحكم بها. ولقد ساهم تطور وسائل التوصيف (characterization) وطرائقه خلال القرن العشرين، ولا سيما انعراج الأشعة السينية، والمجهر الالكتروني، ومِجس التحليل الإلكتروني، وطرائق التحليل الحراري، في تعميق هذه المفاهيم وترسيخها ومواكبة تطور علم المواد الجديد. ويعود ظهور هذا العلم وتطوره من جهة إلى تطوير تدريجي حدث في أواخر القرن التاسع عشر وأوائل القرن العشرين نتج عنه إقامة مقاربة علمية منهجية شاملة لدراسة أي مادة هندسية وتطويرها. وتقوم هذه المقاربة على ما سُمّي رباعي وجوه المواد الذي يشتمل على أربعة عناصر تلبي متطلبات تطوير أي مادة هندسية ودراستها، وهي طريقة التصنيع، والبنية المجهرية، والخصائص، والأداء.




رباعية البنية والخصائص والسلوك وتكنولوجيا التصنيع.

من جهة أخرى، إذا كانت المنتجات التقانية في عصور الحضارة البشرية السابقة تقتصر على مادة هندسية واحدة، أو عدد صغير منها، فإن المنتجات التقانية الحديثة تشتمل على عدد متزايد من المواد الهندسية، فالسيارة والطائرة والدارة المتكاملة، رغم صغر أبعادها المجهرية، تحتوي على مواد معدنية، ومواد بوليميرية، ومواد سيراميكية وزجاجية، ومواد نصف ناقلة، أي جميع عائلات المواد الهندسية، وذلك لتحقيق وظائف محددة بأقل التكاليف، وأطول عمر خدمة. وبدلاً من تأهيل مختص في كل عائلة مواد، يسمح علم المواد وهندستها في تأهيل


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

مختص واحد يمكنه التعامل مع قضايا المواد المختلفة ومشاكلها.

وهكذا، ظهر علم المواد في الجامعات الأمريكية في مطلع ستينات القرن العشرين، وبدأ يتوسع في أوروبا والعالم في مطلع السبعينات. ويظهر ذلك جلياً في تغيير أسماء العديد من الأقسام الجامعية في العالم، وفي تطور توجهات مؤسستين علميتين شهيرتين، هما المدرسة العليا للمناجم في باريس– فرنسا، وقسم المواد في جامعة شفيلد– بريطانيا. بدأت مدرسة المناجم، كما يوحي اسمها، بالاهتمام بهندسة إقامة المناجم وتشييدها واستثمارها، ثم تعمّقت في تطوير منتجاتها من معادن وسبائك ودراستها (علم التعدين metallurgy)، وأخيراً، أصبحت من أهم مراكز البحث والتطوير في معالجة المواد البوليميرية وتقانات تشكيلها. أما قسم المواد في جامعة شفيلد، فقد بدأ في العقد الثالث من القرن العشرين كأول قسم جامعي يعنى بتقانة الزجاج، ودراسة بنيته وخصائصه، ثم تطور نحو علم المواد وهندستها، بما في ذلك المواد المعدنية والسيراميكية والزجاجية والبوليميرية.

عرّفت الأكاديمية الوطنية في أمريكا علم المواد على أنه العلم الذي "يعنى بتوليد المعارف التي تربط بين تركيب المواد وبنيتها وطريقة تصنيعها وخصائصها واستعمالاتها، وتطبيق هذه المعارف" على المواد الهندسية، مهما كان منشؤها وطبيعتها. وإذا كانت بعض الاختصاصات العلمية تُشتق من اختصاصات أساسية، فإن علم المواد يتسم بطبيعة جامعة متعددة الاختصاص، لأنه يستند على علوم أساسية، مثل الكيمياء والفيزياء والميكانيك والرياضيات، ويُعدّ صلة وصل بينها وبين العلوم الهندسية، مثل الهندسة الكيميائية، والهندسة الميكانيكية، وهندسة التعدين وغيرها.

## 3. طيف المواد الهندسية في الصناعة والاقتصاد.

جاء ظهور علم المواد وتطوره تتويجاً لعصور الحضارة البشرية، حيث توسّع طيف المواد الهندسية من عدد محدود يقتصر على الصخور والحجارة والغضار والجلد والخشب وغيرها من المواد الطبيعية إلى عددٍ ينوف على 160000 مادة هندسية يمكن تصنيفها ضمن عائلات المواد الهندسية الرئيسية، وهي: المواد المعدنية والسبائك (metallic materials and alloys)؛ المواد السيراميكية والزجاجية (ceramic and glass materials)؛ المواد البوليميرية (polymeric materials)؛ المواد المركبة (composite materials). ويعتمد هذا التصنيف على نوع الرابطة الكيميائية في كل عائلة من المواد الهندسية، وطبيعة هذه الرابطة، وعلى التشابه في الخصائص والسلوك بين مواد كل عائلة. وهكذا، لا منافس للمعادن والسبائك في الناقلية الكهربائية والحرارية واللدونة والمطاوعة، ولا منازع للمواد السيراميكية في القساوة والمقاومة الحرارية والكيميائية، ولا شريك للزجاج في الشفافية والتلوّن وإظهار مفاتن الضوء وسحره وجماليته، ولا بديل للمواد البوليميرية في خفة الوزن وقابلية التشكيل وتعدّد المنتجات، ولا مثيل للمواد المركبة في مقاومة التعب (fatigue) وخفة الوزن والاستجابة لمتطلبات التصميم.

وتشهد قطاعات الاقتصاد والصناعة والانتاج على توسّع طيف المواد الهندسية وانتشارها، وخير دليل على ذلك المقارنة بين المواد المستعملة في صروح الحضارة البشرية التاريخية مثل الأهرامات في مصر، وسور الصين العظيم، وبرج إيفل في فرنسا، وقصر الزجاج في لندن– بريطانيا، وفي المشاريع الهندسية المعاصرة مثل برج خليفة


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

في الإمارات، والجسر المُعلّق في مدينة ميو (Millau)– فرنسا، ومحطة الفضاء الدولية. ولا تخلو أية منشأة مدنية معاصرة من جميع عائلات المواد الهندسية لمقاومة الحمولات، ولتوفير شبكة الكهرباء والاتصالات، وشبكة المياه والصرف الصحي. ويحلم الخيال البشري في تشييد أبنية المستقبل ذات الاكتفاء الذاتي طاقياً ( energy self– sufficient buildings)، والجسور ذاتية الاصلاح (self– healing bridges).

لقد مكّنت السيطرة على الإشابة (doping) في المواد نصف الناقلة، والنقاوة (purity) في الزجاج خلال القرن العشرين من تطوير أنصاف النواقل، والدارات المتكاملة، والمعالجات الصغرية، والألياف الضوئية، وشبكة الانترنت، والهواتف المحمولة التي أصبحت جميعها جزءاً لا يتجزأ من الحياة اليومية للبشر.

في قطاع النقل والمواصلات، تجتمع المواد الهندسية لإنجاز أعمال شق الطرقات وتعبيدها، وإنتاج جميع وسائط النقل من سيارات وقطارات وسفن وطائرات ومركبات فضاء، حيث تتضافر المواد الهندسية التقليدية والجديدة لتوفير سرعة التنقل والراحة والأمان. وفي قطاع الصحة، تتطور المواد الحيوية (biomaterials) الترميمية والتعويضية لتلبية حاجات طب الأسنان والجراحة العظمية وتوسيع الشرايين وصمّامات القلب الصنعية واستبدال الأنسجة وتجديدها، حتى أن مصطلحات جديدة بدأت في الظهور، مثل مصطلح هندسة الإلكترونيات الحيوية (bionics). ولتغذية نحو 10 مليار من البشر على وجه المعمورة في عام 2050، تلعب المواد الهندسية دوراً متنامياً في مجالات حفظ المواد الغذائية والمشروبات والأدوية، وتعليبها. وهنا، تبرز منافسة شديدة بين عائلات المواد الهندسية، وخاصة في خيارات التعليب البلاستيكي، والتعليب المعدني، والتعليب في الزجاج، وتكون الغلبة لصالح الميزات المتأصلة في كل مادة وبعض مُحدّداتها العملية. ومع هذا التزايد السكاني، وتوسّع النشاطات الاقتصادية، تتفاقم قضية مصادر الطاقة. وفي هذا المجال، تستمر المواد الهندسية في تأدية دور مركزي في تلبية الحاجات المتزايدة لمصادر الطاقة التقليدية، ومصادر الطاقة البديلة، وذلك على جميع مستويات توليد الطاقة، وحفظها، وتوزيعها. ويتطلّب تطوير الطاقة الشمسية مواد نصف ناقلة جديدة، وبطاريات تخزين الطاقة، ومكثفات فائقة، وغير ذلك. وفي مجال طاقة الرياح، يحتاج التوسّع فيها إلى عنفات ريحية خفيفة الوزن، ومنخفضة الكلفة، وعالية المردود والديمومة. وهنا، توفّر المواد المركبة (بوليمير – ألياف تقوية) بدائل مناسبة. وفيما يختص بالطاقة النووية، يمتد دور المواد الهندسية من المواد الإنشائية في شروط العمل القاسية في المفاعلات النووية، إلى حفظ النفايات النووية النشطة إشعاعياً، واحتضانها في مواد زجاجية تتحمّل ضررها الإشعاعي حتى تلاشيه.

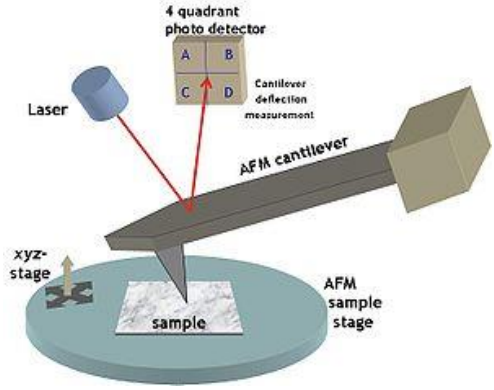
## 4. من المواد الحجمية واسعة الإنتاج إلى المواد النانومترية محدودة الإنتاج.

ظهرت التكنولوجيا النانوية، التي يطلق عليها غالباً "علم الصغير"، كواحدة من أكثر التقنيات تحويلاً في القرن الحادي والعشرين. تعمل هذه التقنية عند مقياس النانو – جزء من المليار من المتر – وتتضمن معالجة المواد على المستوى الذري والجزيئي. من الطب والإلكترونيات إلى تطبيقات الطاقة والبيئة، تحمل التكنولوجيا النانوية وعداً بإحداث ثورة في قطاعات متعددة. ومع ذلك، فقد تَشكل تطورها من خلال التحديات العالمية الملحة، بما في ذلك الاستدامة البيئية وكفاءة الطاقة ومتطلبات الرعاية الصحية وندرة الموارد.


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

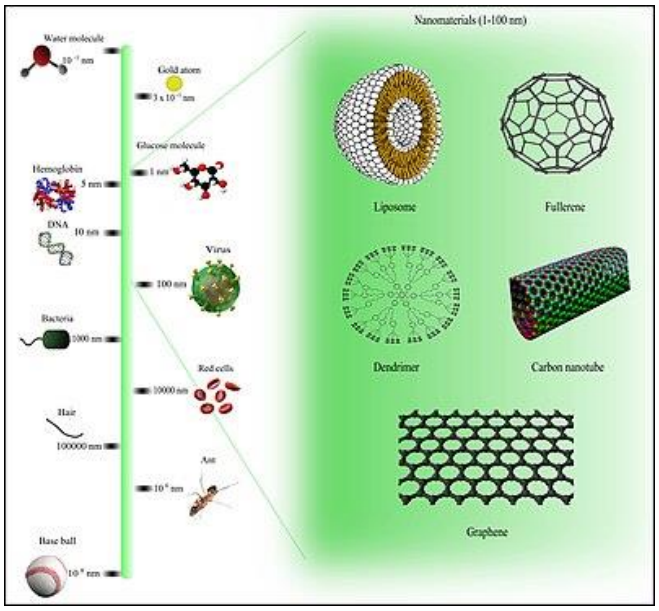
## 1.4. تاريخ التكنولوجيا النانوية وتعريفها.

تعود جذور التكنولوجيا النانوية إلى محاضرة ريتشارد فاينمان الشهيرة عام 1959، "هناك حيز كبير في القاع"، حيث تصوّر التعامل مع الذرات المنفردة لتحضير مواد جديدة. ومع ذلك، فإن مصطلح "تكنولوجيا النانو" صاغه نوريو تانيجوتشي (Norio Taniguchi) لأول مرة في عام 1974، في إشارة إلى التصنيع الدقيق على مقياس النانو. وتشمل المعالم المهمة اختراع المجهر النفقي الماسح (scanning tunneling microscope STM) في عام 1981 ومجهر القوة الذرية (atomic force microscope)، والذين سمحا للعلماء بمعاينة الذرات والتعامل معها، واكتشاف الفوليرين (fullerenes) (كرات البوكي) في عام 1985.




مخطط نموذجي لمجهر القوة الذرية. يتم انحراف ذراع صغير مصنوع بدقة عالية ذي طرف حاد بواسطة تضاريس سطح العينة، تماماً كما هو الحال في الفونوغراف ولكن على نطاق أصغر كثيراً. ينعكس شعاع الليزر عن الجانب الخلفي للذراع إلى مجموعة من أجهزة الكشف الضوئية، مما يسمح بقياس الانحراف وتجميعه في صورة لتضاريس السطح.

شهدت التسعينيات تطوير أنابيب الكربون النانوية والتقدم في تقنيات التصنيع على نطاق النانو. وبحلول العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، بدأت الحكومات في جميع أنحاء العالم في الاستثمار بكثافة في أبحاث تكنولوجيا النانو. أطلقت الولايات المتحدة مبادرة تكنولوجيا النانو الوطنية (National Nanotechnology Initiative NNI) في عام 2000، بميزانية أولية قدرها 500 مليون دولار. وتبع ذلك مبادرات مماثلة في أوروبا واليابان والصين، مما يُمثِّل بداية سباق عالمي لتسخير علم النانو للإبداع.




مقارنة أبعاد الأجسام النانوية.

### تعريف تكنولوجيا النانو: القضايا والآفاق.

تفتقر تكنولوجيا النانو إلى تعريف متفق عليه عالمياً، مما يُعقِّد تنظيمها وتسويقها. وعلى نطاق واسع، تنطوي تكنولوجيا النانو على التعامل مع المواد التي تتمتّع ببعد واحد على الأقل بين 1 و100 نانومتر. وغالباً ما يختلف تعريف تكنولوجيا النانو بناءً على التركيز على التخصصات المختلفة:

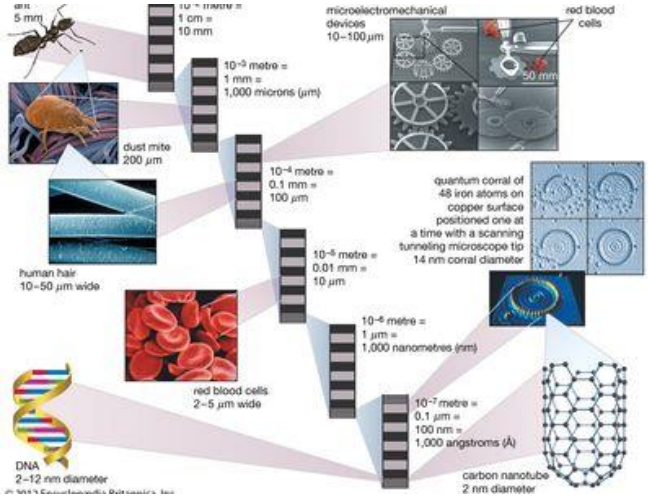
**العلوم الفيزيائية:** يُركّز التعريف على البعد والتأثيرات الكمومية.

**العلوم البيولوجية:** يُركّز التعريف على العمليات النانوية في الأنظمة الحية.


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

**الهندسة:** يُركّز التعريف على الاهتمام بتقنيات التصنيع النانوية.

يؤدي هذا الغموض التعريفي إلى تحديات في براءات الاختراع وتخصيص التمويل والاتصال العام بين الأطراف ذات الصلة. على سبيل المثال، يختلف الإطار التنظيمي للطب النانوي في إدارة الغذاء والدواء بشكل كبير عن الإطار التنظيمي للمواد النانوية في المنتجات الاستهلاكية في وكالة حماية البيئة.




تُظهِر قوى 10 أمثلة من العوالم البيولوجية والميكانيكية "أوامر الحجم" المختلفة (قوى 10)، من 10−2 متر إلى 10−7 متر.

## 2.4. تطبيقات تكنولوجيا النانو عبر القطاعات الاقتصادية وسوق تكنولوجيا النانو.

تستفيد من إمكانات تكنولوجيا النانو قطاعات اقتصادية متعددة:

### أ .الطب والرعاية الصحية:

- تساهم أنظمة توصيل الأدوية المستهدفة باستخدام الجسيمات النانوية على تحسين الفعالية وتقليل الآثار الجانبية.
- تسمح أجهزة الاستشعار النانوية من الكشف المبكر عن الأمراض بدقة عالية.

يُقدّر حجم سوق الطب النانوي بنحو 200 مليار دولار في عام 2023، بمعدل نمو سنوي مركب قدره 12.%

### ب . الطاقة:

- تساهم المواد النانوية في تعزيز كفاءة الألواح الشمسية وأجهزة تخزين الطاقة.
- تُقلِّل الطلاءات النانوية من ضياع الطاقة في العمليات الصناعية.

### ت . البيئة:

- تُستعمل المواد النانوية في أنظمة تنقية المياه لإزالة الملوثات على المستوى الجزيئي.
- تحتجز أنابيب الكربون النانوية الغازات المسببة للاحتباس الحراري بكفاءة.

### ث . الإلكترونيات:

- يردي وصول الترانزستورات في المعالجات إلى أبعاد النانو، إلى تحسين القدرة الحسابية.
- يجري تمكين الإلكترونيات المرنة والقابلة للارتداء باستعمال المواد النانوية.

### ج . المنتجات الاستهلاكية:

- تدخل تكنولوجيا النانو في مستحضرات التجميل والمنسوجات وتغليف الأغذية لتحسين أدائها.

**سوق تكنولوجيا النانو.**


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

قُدِّرت قيمة سوق تكنولوجيا النانو العالمية بنحو 2,1 تريليون دولار في عام 2023 ومن المتوقع أن تصل إلى 6 تريليون دولار بحلول عام 2030. وتشمل محركات النمو الرئيسية زيادة الإنفاق على البحث والتطوير، والتقدم في المواد النانوية، والطلب المتزايد على المنتجات عالية الأداء. وتتصدر منطقة آسيا والمحيط الهادئ السوق، حيث تُعدّ الصين واليابان من المساهمين الرئيسيين بسبب التمويل الحكومي الكبير والتطبيقات الصناعية.

## 3.4. أهمية تكنولوجيا النانو عبر القطاعات الاقتصادية وإنجازاتها الرئيسية.

**أ . الرعاية الصحية:**

- تُعدّ تكنولوجيا النانو أمراً بالغ الأهمية في تطوير أدوات التشخيص المتقدمة، مثل أجهزة الاستشعار الحيوية النانوية وعوامل التصوير.
- يدعم سوق الطب النانوي، وهو جزء كبير، الاختراقات في علاج السرطان والطب التجديدي وأنظمة توصيل الأدوية.
- تعتمد المستشفيات وشركات الأدوية بشكل متزايد على الابتكارات النانوية لتحسين نتائج المرضى وخفض التكاليف.

**ب . الطاقة:**

- يستفيد قطاع الطاقة من تكنولوجيا النانو من خلال حلول الطاقة المتجددة المُحسّنَة، مثل الخلايا الكهروضوئية عالية الكفاءة والبطاريات عالية السعة.
- تدعم ابتكارات النانو التحول إلى أنظمة الطاقة المستدامة من خلال تقليل خسائر الطاقة وتعظيم قدرات التخزين.

تتضمن أفلام الألواح الشمسية الجديدة جُسيمات نانوية لإنشاء خلايا شمسية خفيفة الوزن ومرنة. (الصورة مقدمة من شركة نانوسيس Nanosys).

**ت. التصنيع والمواد:**

- تُمكِّن التكنولوجيا النانوية من إنتاج مواد أخف وأقوى وأكثر متانة لصناعات الطيران والسيارات والبناء.
- تعمل تقنيات التصنيع بالإضافة ( Additive manufacturing) التي تتضمن مواد نانوية على إعادة تشكيل عمليات الإنتاج، مما يوفّر دقة أعلى ونفايات أقل.

**ث . الإلكترونيات:**

- تدعم تقنية النانو التقدم في التصغير، وهو أمر ضروري للإلكترونيات الحديثة مثل الهواتف الذكية وأجهزة الكمبيوتر المحمولة وأجهزة إنترنت الأشياء.
- كما أنها تدفع تطوير الإلكترونيات المرنة وأشباه الموصلات من الجيل التالي، وتلبية المطالب بزيادة القوة الحسابية وكفاءة الطاقة.


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

يعرض مايكل ليهر (Michael Liehr) من كلية علوم وهندسة النانو بجامعة ولاية نيويورك، على اليسار، وبالا هاراناند (Bala Haranand) من شركة آي بي إم رقاقة مكونة من شرائح 7 نانومتر في غرفة نظيفة بتقنية إن إف إكس (NFX) في ألباني، نيويورك. (الصورة مقدمة من آي بي إم).

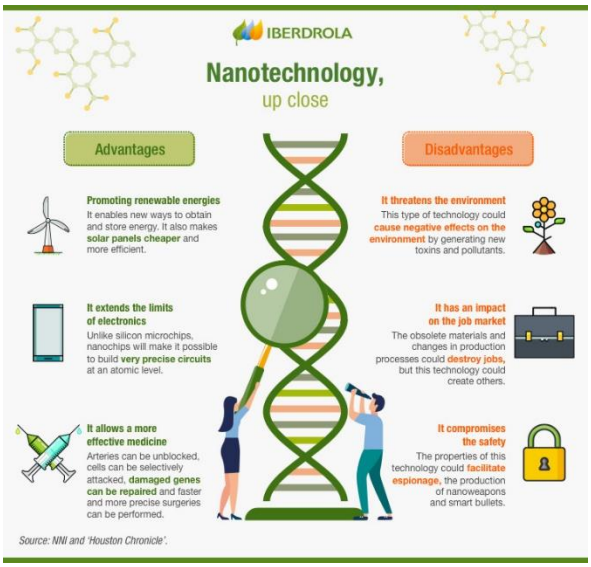
## ج . الزراعة والأغذية:

- تُعزِّز تطبيقات تقنية النانو في الزراعة غلة المحاصيل من خلال التوصيل المستهدف للأسمدة والمبيدات الحشرية.
- في تكنولوجيا الأغذية، تعمل المواد النانوية على تحسين التعبئة والتغليف من خلال إطالة العمر الافتراضي وضمان سلامة الغذاء.

## ح . التطبيقات البيئية:

- يشهد سوق المواد النانوية في معالجة البيئة نمواً مطرداً، مع حلول مبتكرة لتنقية الهواء ومعالجة المياه وإدارة النفايات.
- تؤكد تقنية النانو الخضراء على عمليات الإنتاج المستدامة، مما يُقلِّل من البصمات البيئية عبر الصناعات.

مع تطبيقاتها الواسعة ونمو السوق، تُعدّ تقنية النانو حجر الزاوية في الابتكار، حيث تقدم حلولاً تحويلية تُعزِّز الإنتاجية والاستدامة والقدرة التنافسية العالمية عبر القطاعات.




مزايا تكنولوجيا النانو ومشاكلها.

## الإنجازات والنتائج الرئيسية.

تتضمن بعض الإنجازات البارزة في مجال تكنولوجيا النانو ما يلي:

- **الجرافين:** تم اكتشاف هذه المادة الكربونية التي يبلغ سمكها ذرة واحدة في عام 2004، وهي أكبر متانة من الفولاذ بمقدار 200 مرة وتوصل الكهرباء بأقل قدر من المقاومة.
- **العلاج النانوي للسرطان:** لقد حسّنت الأدوية المُعتَدة من إدارة الغذاء والدواء الأمريكية القائمة على الجسيمات النانوية مثل دوكسيل (Doxil) نتائج علاج السرطان.


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

- **السطوح ذاتية التنظيف:** مستوحاة من أوراق اللوتس، تُستخدم هذه السطوح على نطاق واسع في صناعات البناء والسيارات والمُنشآت الطبية.

## 4.4. المشاكل الكبرى التي تدفع تطوير تكنولوجيا النانو ومستقبلها القريب والبعيد.

تتضمن التحديات العالمية التي تحفز نمو تكنولوجيا النانو ما يلي:

**أ . أزمة الطاقة:**

لقد أدّت الحاجة إلى أنظمة طاقة متجددة وفعّالة إلى دفع الابتكارات في المواد النانوية للبطاريات والخلايا الشمسية.

**ب . متطلبات الرعاية الصحية:**

يتطلب الانتشار المتزايد للأمراض المزمنة أدوات تشخيصية وعلاجية متقدمة.

**ت. الاستدامة البيئية:**

تتطلب معالجة ندرة المياه والتلوث أنظمة ترشيح ومعالجة تعتمد على تكنولوجيا النانو.

**ث . ندرة الموارد:**

تُمكِّن تكنولوجيا النانو من استبدال المواد وإعادة التدوير، مما يُقلِّل من الاعتماد على الموارد النادرة.

**ج . الأمن الغذائي:**

تعمل تقنية التغليف النانوي على تعزيز توصيل العناصر الغذائية في الزراعة، وتعمل المواد النانوية على تحسين تغليف الأغذية للحد من التلف.

**المستقبل القريب والبعيد لتكنولوجيا النانو.**

**أ . الآفاق القريبة الأجل:**

- دمج تكنولوجيا النانو في الإلكترونيات الاستهلاكية والأجهزة القابلة للارتداء والمواد المتقدمة.
- تسويق الأدوية النانوية وأجهزة الاستشعار النانوية.

**ب . الآفاق البعيدة الأجل:**

- تطوير المُجمِّعات الجزيئية ( molecular assemblers) للتصنيع من الأسفل إلى الأعلى.
- التبني الواسع النطاق لتكنولوجيا النانو في استكشاف الفضاء، مما يتيح مواد خفيفة الوزن ومتينة.
- الأطر الأخلاقية والتنظيمية لمعالجة الآثار المترتبة على السلامة والمجتمع.

## 5. مواد جديدة خفيفة كالستايروفوم ومتينة كالفولاذ الكربوني.

لطالما كان الجمع بين الخفة والمتانة في علم المواد هدفاً سعت إليه مختلف الصناعات، من الفضاء إلى السيارات والبناء. تقليدياً، كانت المواد تُقدِّم تنازلات: فالخفيفة غالباً ما تفتقر إلى المقاومة (مثل الرغوة والبلاستيك)، بينما تميل المواد المتينة إلى الكثافة والثقل (مثل الفولاذ والتيتانيوم). ومع ذلك، فقد أتاحت التطورات الحديثة في تكنولوجيا النانو والمواد الخارقة والتصميم الهيكلي تطوير مواد جديدة خفيفة كالستايروفوم ومتينة كالفولاذ الكربوني. يمكن لهذه الابتكارات أن تُحدِث ثورة ليس فقط في الهندسة والتصنيع، بل أيضاً في الاستدامة العالمية من خلال توفير الوقود وخفض الانبعاثات. ووفقاً لتقرير ماكينزي لعام 2023، من المتوقع أن يتجاوز السوق العالمي للمواد المتقدمة خفيفة الوزن 250 مليار دولار


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

بحلول عام 2030، مدفوعاً بشكل كبير بقطاع الفضاء والبنية التحتية الخضراء.

السيارات والمواد الجديدة.

صُنعت سيارة أودي RSQ باستخدام روبوتات كوكا الصناعية سريعة النمذجة.

## 1.5. مفهوم مواد جديدة خفيفة الوزن ومتينة.

يكمُن جوهر هذه المواد الرائدة في تحقيق كثافة منخفضة (أقل من 100 كغ/م³) ونسب عالية من المقاومة إلى الوزن (تُضاهي أو تتجاوز مقاومة الفولاذ الكربوني التي تبلغ حوالي 500 ميجا باسكال عند كثافة حوالي 7850 كغ/م³). ومن الأمثلة البارزة على ذلك الشبكات الدقيقة المعدنية فائقة الخفة، وهي هياكل هندسية تحاكي مواد طبيعية كالعظام أو الخشب، ولكن على نطاق مجهري، مما يُحقق فوائد أداء فائقة. غالباً ما تتكون هذه المواد من معادن أو سيراميك أو بوليمرات أو مواد مركبة مرتبة في هيكل شبكي أو شبيه بالرغوة، مما يوفر متانة مع كتلة ضئيلة.

طُوِّرت شبكة دقيقة من النيكل، أخف وزناً بمئة مرة من الستايروفوم، وبقوة الفولاذ تحت الضغط.

**تاريخ المواد الجديدة خفيفة الوزن والمتينة وتطورها.**

بدأت الرحلة في منتصف القرن العشرين مع الرغوات الاصطناعية مثل البولي يوريثان والبوليسترين الموسع (الستايروفوم)، والتي استُخدمت بشكل رئيسي للعزل والتغليف. ورغم خفة وزنها، كانت مقاومتها الميكانيكية منخفضة. في تسعينيات القرن الماضي، أدت التطورات في المحاكاة الحيوية والتصنيع النانوي إلى إلهامات تصميمية جديدة – من البنية الخلوية للخيزران إلى الهندسة الداخلية لعظام الطيور.

حدثت القفزة الحقيقية في العقد الثاني من القرن الحادي والعشرين مع تطورات الشبكات النانوية والهلام الهوائي:

• 2011: كشفت مختبرات HRL عن أخف مادة – وهي شبكة دقيقة معدنية بكثافة 0.9 ملغم/سم³، أي ما يعادل واحداً على ألف من كثافة الفولاذ.

• 2014: ابتكر معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا (MIT) رغوة جرافين فائقة الخفة تتميز بمقاومة ومرونة استثنائيتين.

• 2016–2022: بدأ تطوير المواد المركبة المقواة بأنابيب الكربون النانوية، والرغويات الخزفية والمعدنية المطبوعة بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، يكتسب اهتماماً صناعياً.

تم تقديم مواد هلامية هوائية قائمة على أنابيب الكربون النانوية، تتميز بصلابة شبيهة بالصلابة الفولاذية ووزن أقل بواحد من المائة.

## 2.5. النهج ومبادئ العمل في المواد الجديدة خفيفة الوزن والمتينة وأدوات تطويرها.

يكمن مبدأ العمل في التصميم الهندسي على حساب الكتلة – ما يُعرف بالمواد الميكانيكية الخارقة. فبدلاً من الاعتماد فقط على مقاومة المادة الجوهرية، يُصمِّم


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

الباحثون دعامات مجهرية، وعوارض مجوفة، وهياكل شبكية لمقاومة الأحمال بكفاءة.

تشمل التقنيات الرئيسية ما يلي:

• **تحسين الطوبولوجيا:** تُولّد خوارزميات الكمبيوتر ترتيبات هندسية مثالية للقوة وخفة الوزن.

• **التصنيع بالإضافة** (الطباعة ثلاثية الأبعاد): يُمكّن من تصنيع دقيق لأشكال هندسية داخلية معقدة.

• **المحاكاة الحيوية:** محاكاة هياكل مُحسّنة طبيعياً مثل الدياتوميت، والعظام الإسفنجية، وأقراص العسل.

جسر ستوفبروج [هولندا] في أمستردام، أول جسر معدني مطبوع بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد.

**أدوات ووسائل تطوير المواد الجديدة خفيفة الوزن والمتينة.**

يتضمن إنتاج هذه المواد المتقدمة ما يلي:

• الطباعة الحجرية بشعاع الإلكترون والتلبيد بالليزر: للأنماط النانوية.

• الطحن باستخدام شعاع أيوني مُركّز: لنحت هندسي دقيق.

• الطابعات ثلاثية الأبعاد متعددة المواد: قادرة على مزج السيراميك والبوليمرات والمعادن.

نموذج محرك نفاث مطبوع بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد.

• المجهر الإلكتروني الماسح (SEM): لتحليل البنية الدقيقة وسلامتها.

• تحليل العناصر المنتهية (FEA): لمحاكاة الاستجابة الميكانيكية تحت الضغط.

**ملاحظة اقتصادية:** قد تصل تكلفة أدوات التصنيع النانوي ثلاثي الأبعاد المتقدمة إلى ما بين مليون وخمسة ملايين دولار أمريكي، إلا أن التوسُّع السريع ومكتبات التصميم


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

مفتوحة المصدر تُخفّض التكاليف بنسبة تقارب ٢٠٪ سنوياً.

## 3.5. التنفيذ التجريبي لمواد جديدة خفيفة الوزن ومتينة ومزاياها.

قامت مختبرات حول العالم بتصنيع واختبار نماذج مختلفة:

• شبكة نيكل دقيقةHRL) ، 2011 :(مضغوطة تحت ضغط 50% مع استعادة كاملة، مما يُظهر مرونة.

• هلاميات الجرافين الهوائيةMIT) ، 2014 :(أظهرت نسبة مقاومة إلى وزن أكبر بعشر مرات مقارنةً بالفولاذ.

• شبكات بوليمر–سيراميكCaltech) ، 2021 :(حققت مقاومة ضغط >150 ميجا باسكال عند كثافة <10 ملغ/سم$^3$.

**ملاحظة إحصائية:** تُظهر مواد الشبكة الدقيقة كفاءة امتصاص للطاقة تتراوح بين 80% و90%، مقارنةً بنسبة 40% و60% للرغويات القياسية.

**مزايا المواد الجديدة خفيفة الوزن والمتينة وقيودها ومحاور تطويرها المستقبلية.**

**المزايا.**

• خفة الوزن للغاية: أقل من 10 ملغ/سم$^3$.

• مقاومة تحمل عالية: أكثر من 200 ميجا باسكال.

• قابلية إعادة التدوير: بعض الأنواع (مثل الشبكات الدقيقة البوليمرية) قابلة لإعادة التدوير بالكامل.

• العزل الحراري والصوتي: مفيد في مجالي الفضاء والدفاع.

• استعادة بعد التضرُّر والتشوّه: تُظهر بعض التصاميم استعادة كاملة لشكلها بعد التشوه

المواد الجديدة وخفة الأحذية الرياضية.

**القيود.**

• التكلفة: تصل إلى 2000 دولار أمريكي/كغ للنماذج الأولية.

• قابلية التوسُّع: العديد من التصاميم قابلة للتنفيذ فقط على المقاييس الدقيقة/النانوية.

• القصافة عند الشد: مقاومة ضغط عالية ومقاومة شد منخفضة في بعض الأنواع.

• تعقيد التصنيع: يتطلب أدوات عالية الدقة.

**محاور تطوير جديدة للمواد الجديدة خفيفة الوزن والمتينة.**

تستكشف التطورات المستقبلية ما يلي:

• **المواد الذكية الهجينة:** دمج أجهزة الاستشعار أو السبائك المتذكرة للشكل.

• **الشبكات الدقيقة القائمة على المواد الحيوية:** من ألياف السليلوز النانوية أو شبكات الفطريات.

• المواد المركبة ذاتية الشفاء: استخدام كبسولات دقيقة تُطلق مادة لاصقة عند الكسر.

• **تكامل المواد الكمومية:** لتحقيق تعدد الوظائف – الخصائص الميكانيكية والإلكترونية.

**الاستثمار العالمي:** خصصت مبادرة "أفق أوروبا" التابعة للاتحاد الأوروبي ووكالة مشاريع البحوث الدفاعية المتقدمة الأمريكية (DARPA) أكثر من 1,5 مليار دولار


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

أمريكي (2020–2025) للبحث والتطوير في مواد الجيل التالي.

**التوقعات المستقبلية للمواد الجديدة خفيفة الوزن والمتينة.**

**المستقبل واعد:**

• **صناعة السيارات:** يمكن أن يُقلِّل وزن المركبات بنسبة 30%، مما يُحسّن الاقتصاد في استهلاك الوقود بنسبة 20–25%.

• **صناعة الطيران:** تستكشف شركتا بوينغ وإيرباص هذه المواد لألواح المقصورات ودعامات هيكل الطائرة.

• **البناء:** يمكن للمواد خفيفة الوزن أن تُمكّن من بناء هياكل مقاومة للزلازل.

• **المنتجات الاستهلاكية:** تُعدّ العبوات الواقية والخوذات والأحذية تطبيقات محتملة على المدى القريب.

**توقعات السوق:** من المتوقع أن ينمو الطلب العالمي على المواد فائقة الخفة وعالية المقاومة بمعدل نمو سنوي مركب نسبته 18%، ليصل إلى 300 مليار دولار أمريكي بحلول عام 2040.

## 4.5. مقاومة نوعية فائقة من خلال التحسين البايزي (Baysian) للشبكات الكربونية النانوية.

أُحرز تقدمٌ كبيرٌ في علم المواد من خلال التحسين البايزي (Baysian) للشبكات الكربونية النانوية، مما أتاح اكتشاف هياكل ذات مقاومة نوعية فائقة – وهو مقياسٌ حاسمٌ للتطبيقات التي يكون فيها توفير الوزن ضرورياً. يدمج هذا النهج القائم على التحسين الذكاء الاصطناعي والمحاكاة الميكانيكية والتصنيع النانوي لتصميم مواد تتفوق في أدائها على كلٍّ من المواد الهندسية التقليدية وتصميمات الشبكات النانوية السابقة.

**الخلفية والمفهوم.**

تُعرّف المقاومة النوعية بأنها نسبة مقاومة المادة إلى كثافتها، وهي خاصيةٌ أساسيةٌ في تطبيقات الفضاء والإنشاءات. تبلغ المقاومة النوعية للفولاذ الكربوني حوالي 65 كيلو نيوتن متر/كغ. وتصل مقاومة سبائك التيتانيوم إلى حوالي 260 كيلو نيوتن متر/كغ. يمكن أن تتجاوز الشبكات النانوية الكربونية المُحسّنة 600 كيلو نيوتن متر/كغ، وفقاً لدراسات حاسوبية تجريبية حديثة.

يكمن الابتكار الرئيسي في استخدام التحسين البايزي، وهو أسلوب تعلّم آلي، لاستكشاف مساحة تصميمية واسعة لهياكل الشبكات ثلاثية الأبعاد القائمة على هياكل نانوية كربونية مُنمّاة بتقنية الترسيب الكيميائي للبخار.

**المنهجية والتحسين البايزي.**

استخدم فريق البحث من معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا ومعهد كاليفورنيا للتكنولوجيا خوارزمية تحسين بايزية للقيام بشكل متكرر بما يلي:

- ✓ توليد طوبولوجيات شبكية متنوعة لخلية الوحدة.
- ✓ محاكاة الخواص الميكانيكية باستخدام تحليل العناصر المنتهية (FEA).
- ✓ تقييم النتائج باستخدام المقاومة النوعية كدالة مقارنة.
- ✓ حسّن البحث باستخدام النمذجة الاحتمالية (العمليات الغوسية).

درس الباحثون أكثر من 100,000 تصميم محتمل، وحصروا الخيارات المتاحة إلى أفضل 50 تصميماً للتصنيع والاختبار. صُنّعت الهياكل باستخدام الطباعة الحجرية ثنائية الفوتون، ثم حُلّلت حرارياً إلى كربون زجاجي.

**البيانات التجريبية الرئيسية.**



© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

**قيمة الخاصة.**

- ✓ الكثافة: 0.85–1.0 ملغم/سم³،
- ✓ مقاومة الضغط: 200–500 ميجا باسكال،
- ✓ المقاومة النوعية: 350–600 كيلو نيوتن/م³/كغ،
- ✓ امتصاص الطاقة: 85–90%،
- ✓ معامل يونغ: حتى 15 جيجا باسكال،
- ✓ حجم السمة الحرجة: 200–500 نانومتر (بنية نانوية)،
- ✓ نسبة التعافي بعد التشوه: >95% لطوبولوجيات مُحسّنة.

**النتيجة الملحوظة:** أظهرت هندسة "ثمانية–جملون هجين 3" مقاومة أكبر بنحو 2,5 مرة من الشبكات النانوية السابقة القائمة على الجملون عند كثافة مكافئة.

**الأهمية والتداعيات**

إن الجمع بين المقاومة الجوهرية للكربون، والطوبولوجيا المُحسّنة، والحجم النانوي للهندسة المعمارية يُنتج مادةً:

- ✓ أخف من الماء،
- ✓ أقوى من الفولاذ،
- ✓ أكثر كفاءة من معظم الرغويات أو المواد المُركّبة المعروفة.

تُتيح هذه التطورات إمكانيات تحوّل نحو ما يلي:

- ✓ المكونات الهيكلية لقطاع الطيران والفضاء،
- ✓ معدات الحماية المُتطورة،
- ✓ الأنظمة الكهروميكانيكية الدقيقة (MEMS)،
- ✓ أنظمة النقل الموفرة للطاقة

**اقتباس:** "تُثبت أن التصميم الهندسي المُوجّه بالذكاء الاصطناعي يُمكن أن يتجاوز الحدس البشري ويُنتج مواد بأداء لم يكن مُتوقعاً من قبل"، تشين وآخرون (2021).

**التحديات والتطوير المُستقبلي.**

على الرغم من الخصائص الرائعة، لا تزال هناك العديد من التحديات:

- ✓ **قابلية التوسُّع في التصنيع:** الطرق الحالية، مثل الطباعة الحجرية ثنائية الفوتون، بطيئة ومُكلفة.
- ✓ **تحويل المواد:** يُمكن أن يُسبب التحلل الحراري انكماشاً أو تشوهاً في الأشكال الهندسية المُعقّدة.
- ✓ **الاستقرار البيئي:** تتحلّل بعض البنى النانوية الكربونية تحت الأكسدة أو التعرض للأشعة فوق البنفسجية.

تشمل التوجهات المستقبلية ما يلي:

- ✓ **الطباعة ثلاثية الأبعاد النانوية المتوازية،**
- ✓ **نماذج التعلم الآلي الهجينة للتحسين الفوري،**
- ✓ **مواد خام بديلة** (مثل ألياف السليلوز النانوية، ونيتريد البورون)



© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

**التوقعات الاقتصادية.**

- ✓ تكلفة الغرام الواحد من الشبكات النانوية الكربونية المُحسّنة: 500–1500 دولار أمريكي (على نطاق المختبر)،
- ✓ التكلفة الصناعية المتوقعة بحلول عام 2030 (مع التوسُّع): أقل من 50 دولاراً أمريكياً للغرام،
- ✓ يُقلِّل التصميم المُوجّه بالذكاء الاصطناعي من وقت التجربة والخطأ بنسبة 90%، مما قد يوفِّر ملايين الدولارات في البحث والتطوير لكل تطبيق رئيسي للمواد.

**التوقعات:** من المتوقع أن ينمو سوق المواد الفائقة المُحسّنة بالذكاء الاصطناعي بمعدل نمو سنوي مُركَّب قدره 28%، ليصل إلى 75 مليار دولار أمريكي بحلول عام.

## 6. المواد الهندسية متعددة الخيوط (polycatenated architected materials PAMs)- التصميم الميكروي للمواد.

**تعريف المواد الهندسية متعددة الخيوط.**

منذ نشأته في منتصف القرن العشرين، اعتمد علم المواد على رباعية البنية والخصائص والسلوك وتكنولوجيا التصنيع، كما ركَّز على دور البنية المجهرية في تفسير خصائص المواد وفهم شلوكها. وفي هذا السياق، يأتي تطوير المواد الهندسية متعددة الخيوط ترجمة لأساسيات علم المواد. ففي تقدم رائد، قدم العلماء فئة جديدة من المواد المعروفة باسم المواد الهندسية متعددة الخيوط (السلاسل) (polycatenated architected materials PAMs). تتميز هذه المواد بخصائص بنيوية وميكانيكية فريدة، مما يفتح آفاقاً جديدة في علم المواد وهندستها.

المواد الهندسية متعددة الخيوط هي بُنى ثلاثية الأبعاد تتألف من جزيئات مترابطة، مثل الحلقات أو الأقفاص، تشكل شبكات متماسكة. على عكس المواد التقليدية التي تعتمد فقط على التركيب الكيميائي، تستمد المواد الهندسية متعددة الخيوط خصائصها من التنظيم الهندسي لعناصرها الداخلية. يضفي هذا التصميم سلوكيات شبيهة بالجسم الصلب وبالسائل، وهي ثنائية لا تُلاحظ في المواد التقليدية.

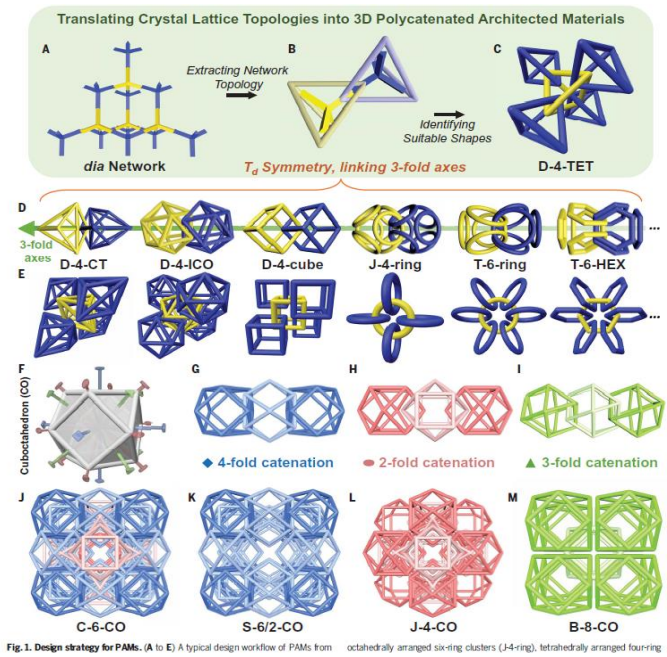
الوحدات الأساسية للمواد الهندسية متعددة الخيوط: حلقات منفصلة أو جزيئات تشبه القفص مترابطة بطريقة متعددة الخيوط، تشبه درع الزرد (السلاسل).

### 1.6. الوحدات البنيوية والترابط في المواد الهندسية متعددة الخيوط وخصائصها وتطبيقاتها.

الوحدات الأساسية للمواد الهندسية متعددة الخيوط هي حلقات منفصلة أو جزيئات تشبه القفص مترابطة بطريقة متعددة الخيوط، تشبه درع الزرد (السلاسل). توفر هذه الترابطات المرونة والقدرة على الصمود، مما يسمح للمادة بالاستجابة ديناميكياً للقوى الخارجية. إن الترابط بين هذه الوحدات ميكانيكي وليس كيميائياً، مما يمنح


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

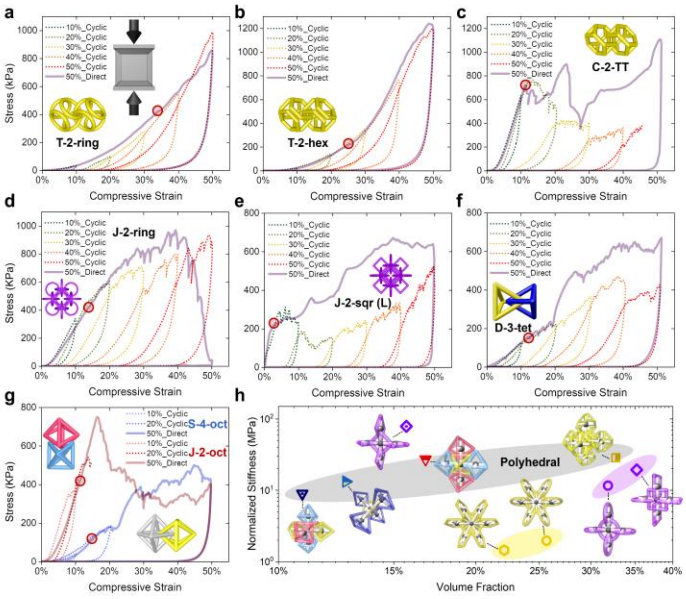
الجسيمات الفردية درجة من الحرية الحركية مع الحفاظ على سلامة البنية بشكل عام.




بعض طرائق الترابط بين الوحدات البنيوية في المواد الهندسية متعددة الخيوط.

**الخصائص والتطبيقات.**

تظهر المواد الهندسية متعددة الخيوط PAMs استجابات ميكانيكية فريدة بسبب تصميمها الهندسي. تحت الأحمال الخارجية الصغيرة، تتصرف مثل السوائل غير النيوتونية، حيث تُبدي خصائص القص والترقق والتكثيف. عند الإجهادات الأكبر، تنتقل إلى سلوك يشبه الجسم الصلب مع علاقات إجهاد–تشوه غير خطية. هذا التنوع يجعل هذه المواد مناسبة للتطبيقات التي تتطلب امتصاص الطاقة، مثل معدات الحماية أو المواد المقاومة للصدمات. بالإضافة إلى ذلك، فإن قدرتها على على تغيير الشكل استجابة للشحنات الكهروستاتيكية على النطاق المجهري تشير إلى إمكانات في تطوير أنظمة تستجيب للمحفزات والهياكل المتغيرة.




السلوك الميكانيكي الفريد للمواد الهندسية متعددة الخيوط من خلال شكل منحنيات الإجهاد– تشوه في اختبارات ضغط.

## 2.6. البنية المجهرية في المواد الهندسية متعددة الخيوط وطرائق تحضيرها وتطبيقاتها المتوقعة.

على المستوى المجهري، تتكون المواد الهندسية متعددة الخيوط PAMs من جزيئات مُجمَّعَة في الاتجاهات ثلاثية الأبعاد، وتشكل شبكات متشابكة. يسمح هذا الهيكل بالتوازن بين التماسك والمرونة، مما يُمكِّن المادة من تكييف شكلها وخصائصها الميكانيكية استجابةً للمحفزات الخارجية. تضمن الطبيعة المتشابكة للجسيمات أن المادة تحافظ على سلامتها حتى في ظل التشوه الكبير.

**طرائق التحضير.**

يتضمن تصنيع المواد الهندسية المتعددة الخيوط انتقال الشبكات البلورية الاعتباطية إلى مجموعات جسيمات متصلة. تتضمن هذه العملية تصميم هندسة الجسيمات الفردية وترابطاتها لتحقيق الخصائص الميكانيكية المطلوبة. يتم استخدام تقنيات التصنيع


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

المتقدمة، مثل الطباعة ثلاثية الأبعاد والتجميع على نطاق النانو، لبناء هذه الهياكل المُعقَّدة بدقة عالية.

على نطاق المختبر، يتم إنتاج PAMs عادةً باستخدام تقنيات التصنيع الإضافي عالية الدقة، مثل البلمرة ثنائية الفوتون والطباعة باستعمال شعاع الإلكترون. تسمح هذه الأساليب للباحثين بإنشاء نماذج أولية صغيرة الحجم بتكوينات هيكلية دقيقة، مما يتيح دراسة سلوكها وخصائصها الميكانيكية.

بالنسبة للإنتاج على نطاق صناعي، يتم استكشاف التطورات في طرق التصنيع القابلة للتطوير، بما في ذلك القولبة بالحقن، والمعالجة من لفة إلى لفة، والطباعة ثلاثية الأبعاد عالية الإنتاجية. تهدف هذه التقنيات إلى خفض تكاليف الإنتاج مع الحفاظ على البنية المعقدة للمواد الهندسية المتعددة الخيوط PAMs. ومن المتوقع أن تتحسن الجدوى الصناعية لـ PAMs مع المزيد من البحث في تركيب المواد وأتمتة التجميع، مما يمهد الطريق للتصنيع على نطاق واسع والتطبيقات التجارية.

**التطبيقات المتوقعة.**

إن الخصائص الفريدة للمواد الهندسية المتعددة الخيوط PAMs تضعها في مجموعة واسعة من التطبيقات. تجعلها قدراتها على امتصاص الطاقة مثالية لمعدات الحماية وأنظمة تخفيف التأثير. يمكن أن تؤدي طبيعة PAMs المستجيبة للمُحفِّزات إلى ابتكارات في مجال الروبوتات الناعمة، حيث تحتاج المواد إلى تكييف شكلها وصلابتها ديناميكياً. علاوة على ذلك، تشير قابلية التوسع وخصائصها القابلة للضبط إلى استخدامات محتملة في مجال الفضاء والأجهزة الطبية الحيوية والإلكترونيات المرنة.

## 7. مستقبل البحث والتطبيقات في علم المواد الهندسية.

منذ فجر التاريخ، وحتى المستقبل المنظور، تحيط المواد الهندسية بالعنصر البشري في كل مكان، من الملبس إلى المأكل، وحتى المأوى والتنقل والاتصالات والصحة. إنها تُشكّل أساس الكون، ولا غرابة بعد كل تلك التطورات العلمية والتقانية العميقة في ظهور علم المواد الذي انتشر خلال الربع الأخير من القرن العشرين في معظم الجامعات والمعاهد العليا على مستوى العالم من خلال تأسيس أقسام جامعية في علم المواد، وافتتاح درجات علمية هندسية وعليا، ومن خلال ارتقاء قضايا المواد، واستخراجها، وتدفقها، واستعمالها، وانعكاساتها على البيئة والمجتمع إلى مصاف السياسات الاقتصادية والصناعية الحكومية والدولية. ويلعب التعليم والتأهيل والتدريب في مجالات علم المواد وتطبيقاتها دوراً محورياً في تأهيل الأطر المناسبة، والتواصل، ودقة التعبير، ونشر المعرفة والخبرة بين الأطراف المجتمعية المعنية بإنتاج المواد الهندسية، وتطبيقاتها، ورسم السياسات الرشيدة ذات الصلة.

تعالج الإمكانات التحويلية لتكنولوجيا النانو بعض التحديات الأكثر إلحاحاً في العصر الحديث، من الرعاية الصحية إلى الاستدامة البيئية. وبينما يستمر المجال في التطور، فإنه يواجه تحديات تعريفية وتنظيمية وأخلاقية. ومع ذلك، ومع النمو القوي للسوق والإنجازات الرائدة، تستعد تكنولوجيا النانو للعب دور محوري في تشكيل مستقبل العلوم والتكنولوجيا والمجتمع. يُمثل تطوير مواد خفيفة كالبوليسترين ومتينة كالفولاذ الكربوني فصلاً فارقاً في علم المواد. فهو يجمع بين تكنولوجيا النانو والمحاكاة الحيوية والتصنيع الرقمي لحل مفارقات هندسية قديمة. ورغم استمرار التحديات المتعلقة بالتكلفة وقابلية التوسُّع، إلا أن الطريق إلى الأمام واعدٌ للغاية – من وسائل نقل


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

صديقة للبيئة إلى بنية تحتية متينة. ومع انتقال هذه المواد من المختبر إلى أرض المصنع، فإنها قد تُعيد تعريف ليس فقط كيفية البناء، بل أيضاً كيفية معيشة الإنسان.

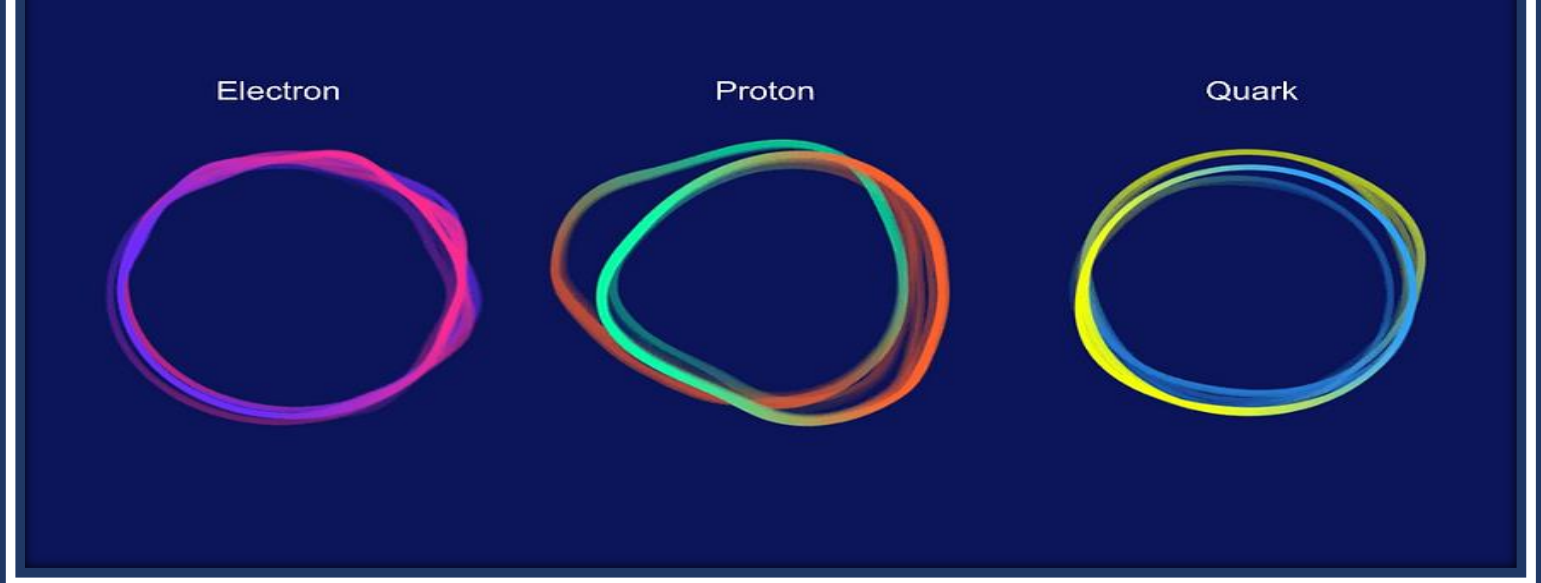
من المتوقع أن يركز مستقبل البحث في المواد الهندسية المتعددة الخيوط على تحسين تقنيات التصنيع، وتحسين أداء المواد، وتوسيع نطاق تطبيقاتها. وسوف تُسهِّل التطورات في تكنولوجيا النانو والنمذجة الحاسوبية تصميم المواد الهندسية المتعددة الخيوط باستجابات ميكانيكية دقيقة مصممة لصناعات محددة. ومن المرجح أيضاً أن يستكشف البحث المواد الهجينة التي تجمع بين هياكل المواد الهندسية المتعددة الخيوط والبوليمرات والمعادن المتقدمة لتحقيق متانة وقابلية للتكيُّف غير مسبوقة. ومن المتوقع اقتصادياً أن ينمو سوق المواد الهندسية بشكل كبير، مدفوعاً بالطلب المتزايد في قطاعات الطيران والدفاع والطب. وتشير تقارير الصناعة إلى أن السوق العالمية للمواد المتقدمة قد تتجاوز 200 مليار دولار بحلول عام 2030، حيث تلعب المواد الهندسية المتعددة الخيوط دوراً حاسماً في حلول الهندسة من الجيل التالي.

**مراجع للاستزادة.**


- الرمل والسيليكون: علم غيَّر العالم، دنيس ماكوان، ترجمة رفيع جبره، المنظمة العربية للترجمة– لبنان.
- Satya Prakash Pandey, Vishwajeet Singh, The Importance of Engineering Materials in Present World, International Journal of Science and Research (IJSR), (2015), Volume 6 Issue 3, March 2017, 433- 441.
- Diran Apelian, looking beyond the last 50 years: the Future of Materials science and engineering, JOM • February (2007), 65-73.
- J.O. Cross, R.L. Opila, I.W. Boyd, and E.N. Kaufmann, Materials characterization and the evolution of materials, M R S B U L L E T I N • VOLUME 40 • DECEMBER 2015, 1019- 1033.
- Craig J. Donahue, J. Chem. Educ. 2019, 96, 2682−2688.
- Claes Fredriksson, Innovative Software for Integrating Materials and Manufacturing Education, American Society for Engineering Education, (2021), ASEE Annual conference, July 26-29, Paper ID #33486.
- T A Schaedler et al, Ultralight Metallic Microlattices, Science, 2011, 334, 962,
- P. Serles, J. Yeo, M. Haché, P. G. Demingos, J. Kong, P. Kiefer, S. Dhulipala, B. Kumral, K. Jia, S. Yang, T. Feng, C. Jia, P. M. Ajayan, C. M. Portela, M. Wegener, J. Howe, C. V. Singh, Y. Zou, S. Ryu, and T. Filleter, Ultrahigh Specific Strength by Bayesian Optimization of Carbon Nanolattices, Adv. Mater., 2025, 37, 2410651, p1-11.
- Zhou et al., 3D polycatenated architected materials, Science, (2025), 387, p269–277.



© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء




# حلم نظرية الأوتار: الطريق لعزف سمفونية النظرية الموحدة

**علي عبد اللطيف كريم الزبيدي**

**أستاذ الفيزياء النظرية والنووية – قسم الفيزياء – كلية العلوم– جامعة بغداد**

تُعدّ نظرية الأوتار من أعظم الأهداف العلمية على الإطلاق. ولا يهدف هذا المسعى إلى شيء سوى تقديم وصف كامل للواقع المادي على الأقل على مستوى الجسيمات الأساسية، والتفاعلات، وربما الزمكان نفسه. ومن حيث المبدأ، وبمجرد معرفة النظرية الأساسية بالكامل، يمكن للمرء أن يستنتج النظرية النسبية والنظرية الكمية باعتبارهما حدوداً للطاقة المنخفضة للأوتار. وتهدف النظرية إلى القيام بما لم تتمكن أي نظرية أخرى من القيام به منذ أوائل القرن العشرين وهو الجمع بين النظرية النسبية العامة والنظرية الكمية في إطار موحد واحد. وهو برنامج طموح شغل أفضل العقول في الرياضيات والفيزياء لعقود من الزمان، بما فيهم ألبرت اينشتاين، الذي كرس سنواته الأخيرة في محاولة لبناء نظرية موحدة. لكنه، رغم عبقريته، فشل في تحقيق هذا الهدف، ليس بسبب نقص في الرؤية، بل لأن الأدوات الرياضية والمفاهيم الفيزيائية اللازمة لم تكن متوفرة في زمنه. فمفاهيم الميكانيك الكمي لم تكن قد نضجت بعد، ولم تُكتشف حينها القوى النووية أو مفهوم التناظر الفائق، ولا الأبعاد الإضافية التي تُعد من الركائز في نظرية الأوتار. كما أن النظريات الحديثة مثل الديناميكا الكمية (الحراكيّات الكموميّة Quantum Dynamics) للحقل أو النموذج القياسي للجسيمات لم تكن قد ظهرت بعد. وهكذا، فإن ما نحوزه اليوم من أدوات رياضية وفيزيائية متقدمة هو ما يُتيح لنا متابعة هذا الحلم الذي بدأه أينشتاين، لكن لم تسنح له الفرصة لإتمامه.

## نبذة تاريخية

ظل علماء الفيزياء يدركون أن الفيزياء الحديثة تقوم على ركيزتين أساسيتين. الأولى هي النسبية العامة لألبرت أينشتاين، التي توفر إطاراً نظرياً لفهم الكون على أكبر المقاييس: النجوم والمجرات وتجمّعات المجرات، وما وراء الامتداد الهائل للكون نفسه. والركيزة الثانية هي الميكانيك الكمي، التي توفر إطاراً نظرياً لفهم الكون على



© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

أصغر المقاييس: الجزيئات والذرات، وصولاً إلى الجسيمات دون الذرية والنووية مثل الإلكترونات والكوراكات. ومن خلال سنوات من البحث، أيقن علماءُ الفيزياء تجريبياً بدقة لا يمكن تصورها وعلى مدى سنوات تقريباً صحّةَ كل التنبؤات التي قدمتها هاتين النظريتين، وفي نفس الوقت يوجد عدم توافق بينهما في بعض الجوانب. ذلك أن النظريتين اللتين تشكلان أساس التقدم الهائل الذي شهدته الفيزياء خلال المائة عام الماضية . التقدم الذي أوضح توسع الكون والبنية الأساسية للمادة . لا يمكن أن تتفقا مع بعضهما البعض.

إن نظرية الأوتار الفائقة (Superstring Theory)والتي تعتبر نظرية ناشئة حديثة العهد مقارنة بالصرحين العظيمين الميكانيك الكمي والنسبية العامة تستند نظريًا على المبادئ الأساسية لكليهما. وتبعا لهذا فإن التزاوج بين قوانين الأنظمة الكبيرة والصغيرة لم يعد شيئا مرضيا فحسب، بل أصبح حتميًا. إن نظرية الأوتار الفائقة وتسمى اختصاراً بـ نظرية الأوتار (String Theory) تذهب بهذا الاتحاد إلى خطوة عملاقة نحو الأمام. فعلى مدى ثلاثة عقود من الزمان، سعى أينشتاين إلى التوصل إلى نظرية موحدة للفيزياء، نظرية من شأنها أن تنسج بين كل قوى الطبيعة الاساسية الأربعة ومكوناتها المادية في نسيج نظري واحد، ولكنه فشل. يدّعي أنصار نظرية الأوتار أن خيوط هذا النسيج الموحد الغامض قد كُشِفَت أخيراً. إن هذه النظرية لديها القدرة على إثبات أن كل الأحداث العجيبة في الكون . من التذبذب المحموم للكواركات دون الذرية إلى الحركة العظيمة للنجوم الثنائية التي تدور حول بعضها البعض– إنما تندرج ضمن إطار نظريّ واحد.

**حلم فيزيائي ممكن تحقيقة**

تعود أصول فكرة الأوتار إلى أواخر ستينات القرن العشرين وإلى أعمال عالم الفيزياء النظري غابرييل فينيزيانو G. Veneziano عندما حاول علماء الفيزياء فهم كيفية ترابط الكواركات بعضاً ببعض. فإذا تصورنا أن الكواركات هي نهايات قطع صغيرة مطاطة، وليست جسيمات حرة، فإن هذا سوف يساعد على تفسير عدم رؤية كواركات حرة إطلاقاً. لكن هذه الفكرة سقطت وتناست عندما ظهر الكروموديناميك الكمي Quantum Chromodynamics (QCD) في أواسط سبعينات القرن العشرين، وهو العلم الذي قدم وصفاً مشجعاً للقوى فيما بين الكواركات. هذا فقد اكتشف المتحمسون لفكرة الأوتار عام 1984 أن الأوتار الكواركية تقود بشكل طبيعي إلى نظرية تشتمل على التناظر الفائق، هذا النهج المبتكر لمزاوجة الكواركات والليبتونات المعروفة مع جسيمات جديدة، لم تكتشف بعد. لقد نشأت نظرية الأوتار الفائقة وأثبتت نجاحها حيث فشلت نظرية المجال الكمي Quantum Field Theoryفحلت المشكلة البارزة في علم الفيزياء خلال العقود المنصرمة، وذلك بمزاوجة الميكانيك الكمي مع النسبية العامة . نظريـة أينشتاين للجاذبية.

كان العالم غابرييل فينيزيانو يكافح من أجل فهم مختلف الخصائص التي تم رصدها تجريبياً للقوة النووية القوية. كان فينيزيانو، والذي كان آنذاك زميلاً باحثاً في سيرن –المنظمة الأوروبية للأبحاث النووية في جنيف،


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

سويسرا، CERN, The European Organization for Nuclear Research in Geneva, witzerland – قد عمل على جوانب هذه المشكلة لسنوات عديدة، حتى عثر ذات يوم على اكتشاف مذهل. فقد أدرك، لدهشته الشديدة، أن الصيغة الغامضة التي ابتكرها عالم الرياضيات السويسري الشهير ليونارد أويلر Leonhard Eulerقبل نحو مائتي عام لأغراض رياضية بحتة . ما يسمى بدالة بيتا لأويلر – بدت وكأنها تصف العديد من خصائص الجسيمات المتفاعلة بقوة في ضربة واحدة. وقد وفّرت ملاحظة فينيزيانو تلخيصاً رياضياً قوياً للعديد من سمات القوة النووية القوية، وأطلقت موجة مكثفة من الأبحاث التي تهدف إلى استخدام دالة بيتا لأويلر، والتعميمات المختلفة، لوصف الكم الهائل من البيانات التي يتم جمعها من مختلف محطمات الذرات في جميع أنحاء العالم. ومع ذلك، كان هناك شعور بأن ملاحظة فينيزيانو كانت غير مكتملة. فمثل الصيغ المحفوظة التي يستخدمها الطالب الذي لا يفهم معناها أو مبررها، بدا أن دالة بيتا لأويلر تعمل، ولكن لا أحد يعرف السبب. كانت هذه صيغة تبحث عن تفسير. وقد تغير هذا في عام 1970 عندما كشفت أعمال يويتشيرونامبو من جامعة شيكاغو، وهولجر نيلسن من معهد نيلز بور، وليونارد سوسكيند من جامعة ستانفورد عن الفيزياء غير المعروفة حتى ذلك الحين التي كانت كامنة وراء صيغة أويلر. وقد أظهر هؤلاء الفيزيائيون أنه إذا قمنا بنمذجة الجسيمات الأولية على أنها أوتار صغيرة مهتزة أحادية البعد، فإن تفاعلاتها النووية يمكن وصفها بدقة من خلال دالة أويلر. وإذا كانت قطع الوتر صغيرة بالقدر الكافي، فقد استنتجوا أنها ستظل تبدو وكأنها جسيمات نقطية، وبالتالي يمكن أن تكون متوافقة مع القياسات التجريبي.

مجتمع الفيزياء لم يستقبل الاقتراح الخاص بنظرية الاوتار بحماس جامح. حيث كان هنالك تجاهل عالمي للأعمال المُقدَّمة من قبل العلماء والباحثين في هذه النظرية. وكان مسار التقدم مليئاً بالفعل بالعديد من المحاولات الفاشلة للجمع بين الجاذبية ومبادئ الميكانيك الكمي. فقد ثبت خطأ نظرية الأوتار في جهودها الأولية لوصف القوة القوية، وبدا للكثيرين أن محاولة استخدام النظرية لتحقيق هدف أعظم أمر لا معنى له.

والأمر الأكثر تدميراً هو أن الدراسات اللاحقة التي أجريت في أواخر سبعينيات وأوائل ثمانينيات القرن العشرين أظهرت أن نظرية الأوتار والميكانيك الكمي تعانيان من صراعات خفية خاصة بهما. وبدا أن قوة الجاذبية قاومت مرة أخرى دمجها في الوصف المجهري للكون. لقد كانت هذه هي الحال حتى عام 1984. ففي ورقة بحثية بارزة تكللت بأكثر من اثني عشر عاماً من البحث المكثف الذي تجاهله إلى حد كبير ورفضه أغلب علماء الفيزياء آنذاك، أثبت جرين وشوارتز أن الصراع الكمي الدقيق الذي يبتلي نظرية الأوتار يمكن حله. وعلاوة على ذلك، أظهرا أن النظرية الناتجة كانت تتمتع باتساع كاف لاحتواء القوى الأربع وكل المادة أيضاً. ومع انتشار خبر هذه النتيجة في مجتمع الفيزياء العالمي، تخلى مئات من علماء فيزياء الجسيمات عن مشاريعهم البحثية لشن هجوم واسع النطاق على ما بدا أنه ساحة المعركة النظرية الأخيرة في السعي القديم لفهم أعمق آليات عمل الكون.

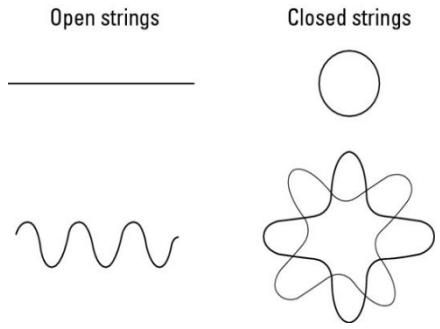

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

لقد أصبحت الفترة من عام 1984 إلى عام 1986 معروفة باسم ثورة الأوتار الفائقة الأولى ( First Superstring Theory). فخلال تلك السنوات الثلاث كتب علماء الفيزياء من مختلف أنحاء العالم أكثر من ألف ورقة بحثية عن نظرية الأوتار. وقد أظهرت هذه الأعمال بشكل قاطع أن العديد من سمات النموذج القياسي . وهي السمات التي تم اكتشافها بشق الأنفس على مدى عقود من البحث . نشأت بشكل طبيعي وبسيط من البنية الكبرى لنظرية الأوتار. وكما قال مايكل جرين: "في اللحظة التي تواجه فيها نظريةَ الأوتار وتدرك أن كل التطورات الكبرى تقريباً في الفيزياء على مدى المائة عام الماضية نشأت . وبمثل هذه الأناقة . من نقطة انطلاق بسيطة، فإنك تدرك أن هذه النظرية المقنعة بشكل لا يصدق تنتمي إلى فئة خاصة بها". وعلاوة على ذلك، فإن نظرية الأوتار تقدم للعديد من هذه السمات، تفسيراً أكثر اكتمالاً وإرضاءً بكثير مما نجده في النموذج القياسي ( The Standard Model). وقد أقنعت هذه التطورات العديد من علماء الفيزياء بأن نظرية الأوتار كانت في طريقها إلى الوفاء بوعدها بأن تكون النظرية الموحدة النهائية.

عُقد عام 1995 في جامعة جنوب كاليفورنيا مؤتمرٌ خاص عن نظرية الأوتار. أعلن في هذا المؤتمر العالمُ إدوارد ويتن (Edward Witten)، وهو عالم فيزياء نظرية أمريكي معروف بمساهماته في نظرية الأوتار ونظرية المجال الكمي، عن خطة لاتخاذ الخطوة التالية. وبالتالي تمّ إشعالُ فتيل "ثورة الأوتار الفائقة الثانية"، حيث عمل علماء نظرية الأوتار بقوة على شحذ مجموعة من الأساليب الجديدة التي تعد بالتغلب على العقبات النظرية التي واجهتهم في السابق. وسوف تختبر الصعوباتُ التي تنتظرنا بشدة القوةَ التقنية لعلماء نظرية الأوتار الفائقة في العالم، ولكن الضوء في نهاية النفق، وإن كان لا يزال بعيداً، ربما أصبح أخيراً مرئياً.

**المفاهيم الأساسية لنظرية الاوتار**

طبقا للمبادئ الأساسية لنظرية الاوتار، فإن الجسيمات الأساسية ليست نقاطًا، بل هي عبارة عن أوتار، كما هو موضح في الشكل رقم (1).




شكل رقم (1) الأوتار المفتوحة والمغلقة حسب نظرية الأوتار.

هذه الأوتار يمكن أن تكون مفتوحة أو مغلقة أي أن الأطراف في هذا النوع تكون متصلة. الحالات المتهيجة للوتر تعطي جسيمات أساسية مختلفة. عندما يتحرك الجسيم عبر الزمكان، فإنه يرسم خطًا للعالَم (world line)، بينما عندما يتحرك الوتر عبر الزمكان، فإنه يرسم ورقةَ عالَم (world sheet). لذا، وفقًا لنظرية الأوتار فإن الأجسام الأساسية عبارة عن أوتار صغيرة يبلغ طولها حوالي مقياس بلانك ($10^{-33}$ cm). كما هو معروف لدينا عن طبيعة الاوتار، هذه الأوتار الأساسية يمكن أن تهتز عند ترددات رنينية مختلفة.


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

تخيل أن وترًا مهتزًا له أوضاع مختلفة بنفس الطريقة التي يمكن بها لوتر آلة الكمان أن يهتز بترددات مختلفة. فبدلاً من وجود وفرة من "الجسيمات الأساسية" ذات الأصل الغامض، يوجد كائن أساسي واحد فقط وهو الوتر الذي يهتز بأنماط مختلفة مما يعطي الانطباع بوجود كائنات أساسية متعددة. ويظهر كل نمط كجسيم مختلف، لذا يمكن أن يكون أحدُ الأوضاع إلكترونًا، بينما يمكن أن يكون نمطٌ آخر مختلفٌ كواركًا. هذه الأوتار من الممكن لها أن تنقسم وتتحد. حيث أن الوتر الرئيسي يمكن أن يهتز في وضع يتوافق مع الجسيم A، وبالإمكان أن ينقسم إلى اثنين، مع اهتزاز الأوتار الفرعية الناتجة في أوضاع تتوافق مع الجسيم B وC على التوالي فإن عملية الانقسام هذه تتوافق مع تحلل الجسيم:

$$A \longrightarrow B+C$$

وعلى العكس من ذلك، يمكن للأوتار أن تتحد أيضًا، فتتحد لتكوين وتر واحد. وهذه عملية كنا نعتبرها حتى الآن بمثابة امتصاص للجسيمات. وبالتالي، فإن العمليات التي تبدو أكثر غموضًا، مثل تحلل الجسيمات، يمكن تفسيرها باستخدام إطار مفاهيمي بسيط.

## أنواع نظريات الأوتار

يوجد هنالك خمسة أنواع مختلفة من نظرية الأوتار، ولكن ثبت أنها عبارة عن طرق مختلفة للنظر إلى نفس النظرية، مع ارتباط الأنواع المختلفة بثنويات. الأنواع الخمسة الأساسية هي كما يلي:

**1.نظرية الأوتار البوزونية ( Bosonic String Theory):** تُعد نظرية الأوتار البوزونية أول نموذج نظري مكتمل وُضع في إطار نظرية الأوتار، وقد ظهرت كمحاولة أولى لفهم التفاعلات بين الجسيمات الأولية من خلال افتراض أن هذه الجسيمات ليست نقاطًا عديمة البُعد، وإنما أوتار دقيقة تهتز بأنماط مختلفة. وتُنتج هذه الاهتزازات جسيماتٍ بوزونيةً فقط، أي تلك التي تنتمي إلى الفئة التي تحمل القوى في الطبيعة، مثل الفوتونات (للكهرومغناطيسية) والغلونات (للقوة القوية). إلا أن هذه النظرية تعاني من قيود أساسية تجعلها غير قابلة للتطبيق كنموذج واقعي لوصف العالم الفيزيائي. فهي، أولاً، لا تتضمن تناظرًا فائقًا (Supersymmetry)، وهو عنصر أساسي في النظريات الأحدث يسمح بوجود علاقة رياضية بين الجسيمات الحاملة للقوى (البوزونات) والجسيمات المكوّنة للمادة (الفرميونات). وثانيًا، لا تحتوي هذه النظرية على فرميونات إطلاقًا، وبالتالي فهي عاجزة تمامًا عن وصف المادة التي تُشكّل الكون المرصود، كالذرات والإلكترونات والكواركات. ولهذا السبب، يُنظر إليها على أنها نموذج رياضي مبدئي يُستخدم كقاعدة لفهم المفاهيم الأساسية في نظرية الأوتار، أكثر من كونها نظرية طموحة لوصف الواقع الفيزيائي. ولهذا السبب تُوصف أحيانًا بأنها "نظرية لعبة" أو Toy Theory. وعلى الرغم من هذه القيود، فإن لنظرية الأوتار البوزونية أهمية كبيرة من الناحية المفاهيمية والرياضية، إذ أنها قدمت اللبنات الأساسية التي استندت إليها النظريات الأكثر تطورًا لاحقًا، مثل نظرية الأوتار الفائقة (Superstring Theory).

وتتميز هذه النظرية بأنها تشمل الأوتار المفتوحة والمغلقة معًا، وتُصبح متسقة رياضيًا فقط إذا افترضنا أن الكون يتكوّن من 26 بُعدًا للزمان والمكان، وهو عدد


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

يتجاوز بكثير الأبعاد الأربعة (3 مكانية + 1 زمنية) التي نعيش فيها، مما يتطلب افتراض أن معظم هذه الأبعاد "مضغوطة" على نطاق صغير لا يمكن رصده تجريبيًا. إن القيمة الحقيقية لهذا النموذج لا تكمن في قدرته على وصف الكون بدقة، بل في كونه يُمثل نقطة انطلاق مفهومية لفهم الطبيعة غير النقطية للجسيمات، ودور البُنى الممتدة مثل الأوتار في إعادة صياغة قوانين الفيزياء على المستويات الدقيقة، وهو ما ساعد في فتح الطريق أمام تطوير الأطر النظرية اللاحقة.

**2.نظرية الأوتار من النوع الأول ( Type I String Theory):** هي واحدة من النماذج الخمسة الأساسية في إطار نظرية الأوتار الفائقة. تجمع هذه النظرية بين البوزونات والفرميونات ضمن بنية تحتوي على تناظر فائق (Supersymmetry)، وتشمل أوتارًا مفتوحة ومغلقة تتطلب فضاءً مكوّنًا من 10 أبعاد لتكون متسقة رياضيًا. تتميز هذه النظرية بارتباطها بمجموعة تناظر رياضية تُعرف باسم$SO(32)$ ، وهي اختصار لـ "Special Orthogonal group in 32 dimensions"، أي مجموعة التناظر الدوراني في 32 بُعدًا. وتحدِّد هذه المجموعة نوع التماثلات (التناظرات) الممكنة للجسيمات، وهي ضرورية لتجنّب التناقضات الرياضية مثل الشذوذ (anomalies)في النظرية. بفضل هذه الخصائص، تُعد نظرية Type I مكافئة في بعض الجوانب لنظرية الأوتار المتغايرة (Heterotic $SO(32)$)، ما يدعم فكرة أن كل نماذج الأوتار المتعددة قد تكون جوانب مختلفة لنظرية موحدة أعمق تُعرف بـ نظرية الغشاء (M-Theory).

**3.نظرية الأوتار من النوع الثاني-أ ( Type II-A String Theory):** تُعد هذه النسخة من نظرية الأوتار واحدة من النماذج التي تتضمن التناظر الفائق (Supersymmetry)، وتشمل كلاً من الأوتار المفتوحة والمغلقة. ما يميز هذا النوع هو أن نهايات الأوتار المفتوحة تكون مرتبطة بأجسام ذات أبعاد أعلى تُعرف باسم "أغشية-د" (D-branes)، وهي كيانات أساسية في نظرية الأوتار تلعب دورًا محوريًا في تفسير التفاعلات بين الجسيمات. وتتميز هذه النظرية أيضًا بأن الفرميونات فيها ليست كيرالية (لا انطباقيّة)، أي أنها لا تفرّق بين الاتجاهين (اليسار واليمين) في خواص الدوران والزخم.

وعلى العكس، الفرميونات الكيرالية مثل الإلكترونات والكواركات في النموذج القياسي تظهر خاصية تُعرف بـ"الكيرالية" أو "اليدوية"، وهي مرتبطة باتجاه دوران الجسيم بالنسبة إلى اتجاه حركته. إذا كان دوران الجسيم متوافقًا مع زخمه يُسمى "فرميون كيرالي يميني"، وإذا كان الدوران عكس اتجاه الزخم يُسمى "فرميون كيرالي يساري". يُشتق مصطلح "كيرالية" (Chirality) من الكلمة اليونانية "cheir" والتي تعني "اليد"، في إشارة إلى التماثل غير الفائق بين اليد اليمنى واليسرى، حيث لا يمكن مطابقة الواحدة على الأخرى بمجرد التدوير. هذا المفهوم يُستخدم في الفيزياء للتعبير عن حالات فيزيائية لا تنطبق عليها التناظرية العكسية تمامًا. وتكمن أهمية هذه الخاصية في كونها تؤثر مباشرة على التفاعلات الأساسية في الطبيعة، إذ إن بعض القوى مثل القوة النووية الضعيفة، تتفاعل فقط مع الفرميونات الكيرالية اليسارية. لذلك، فإن غياب الكيرالية في نموذج Type IIA يجعله مختلفًا من الناحية


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

الفيزيائية عن نظيره Type IIB، الذي يحتوي على فرميونات كيرالية. هذا الاختلاف له تبعات جوهرية عند محاولة مطابقة النظرية مع خصائص الجسيمات في الكون الحقيقي.

**4.نظرية الأوتار من النوع الثاني–ب ( Type II–B String Theory):** تعتبر هذه النظرية من أكثر أشكال نظرية الأوتار تطورًا، وتُعد شقيقة لنظرية النوع الثاني–أ، لكنها تختلف عنها في نقطة رئيسية وهي وجود الفرميونات الكيرالية. من الجانب الرياضي، تتطلب هذه النظرية وجود 10 أبعاد للزمان والمكان، وهي تُستخدم بكثرة في الأبحاث الحديثة التي تحاول الربط بين الجاذبية والميكانيكا الكمية، كما أنها تلعب دورًا محوريًا في نظريات أكثر شمولًا مثل نظرية الغشاء (M–theory) أو ازدواجية (ثنويّة) AdS/CFT.

**5.نظرية الأوتار المتغايرة ( Heterotic String Theory):** تتضمن هذه النظرية التناظر الفائق ولا تسمح إلا بالأوتار المغلقة. تتطلب أوضاع الحركة إلى اليسار واليمين على الوتر في الواقع عددًا مختلفًا من أبعاد الزمكان (10 و26).

**<u>الأبعاد الأعلى في نظرية الأوتار</u>**

نحن نعيش في عالم بثلاثة أبعاد مكانية. وباختصار، يعني هذا أن هناك ثلاث اتجاهات مميزة يمكن من خلالها الحركة: للأعلى وللأسفل، ولليسار ولليمين، وللأمام وللخلف. بالإضافة إلى ذلك، لدينا تدفق الزمن (للأمام فقط بقدر ما نعلم). من الناحية الرياضية، يمنحنا هذا الأمرُ الوصفَ النسبي للإحداثيات (x, y, z, t).

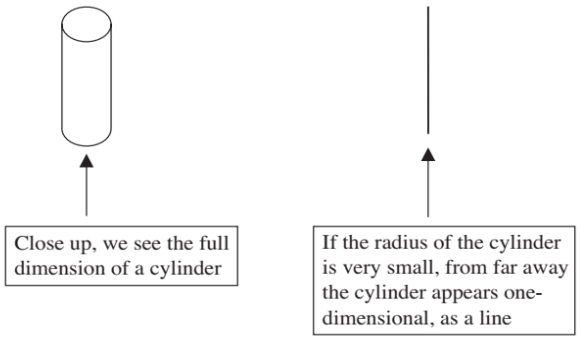
من الممكن أن نتخيل عالمًا تمت إزالة أحد الاتجاهات أو الأبعاد المكانية فيه (على سبيل المثال، أعلى وأسفل). وقد وصف إدوارد أبوت (Edward Abbott) هذا العالم ثنائي الأبعاد في كتابه الكلاسيكي الأرض المسطحة (Flatland). ماذا لو أضفنا أبعادًا بدلاً من ذلك؟ هذه الفكرة مفيدة جدًا في الفيزياء، لأنها توفر مسارًا نحو توحيد النظريات الفيزيائية المختلفة.

تم طرح هذا النوع من التفكير في الأصل من قبل العالمَين الفيزيائيَّين كالوزا وكلاين ( Kaluza and Klein) في عشرينيات القرن العشرين. كانت فكرتهما هي جلب قوى الجاذبية والكهرومغناطيسية في إطار نظري موحد من خلال تخيل أن هاتين النظريتين كانتا حدودًا رباعية الأبعاد لنظرية فائقة خماسية الأبعاد. لم تنجح هذه الفكرة، لأنه في ذلك الوقت لم يكن الناس يعرفون عن نظرية المجال الكمي وبالتالي لم تكن لديهم صورة كاملة لتفاعلات الجسيمات، ولم يكونوا يعرفون أن الوصف الصحيح تمامًا للتفاعلات الكهرومغناطيسية يتم توفيره من خلال الديناميكا الكهربائية الكمية ( Quantum Electrodynamics (QED). لكن لهذه الفكرة جاذبية كبيرة مما أدى الى ظهورها مرة أخرى في نظرية الأوتار.

كان على كالوزا وكلاين أن يبررا سبب عدم ملاحظتنا للأبعاد الإضافية التي افترضا وجودها، فاقترحا فكرة تُعرف اليوم بـ "الضغط (التراصّ)" (Compactification)، وهي عملية يتم فيها طيّ أو لفّ الأبعاد الإضافية لتصبح صغيرة جدًا، بحيث لا يمكن اكتشافها عند مستويات الطاقة المتاحة حاليًا. أي أن هذه الأبعاد قد تكون موجودة بالفعل، لكنها مضغوطة على مقياس صغير للغاية، أقرب إلى


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

مقياس بلانك (~$10^{-33}$ سم)، وهو أصغر بكثير من أن تتمكن أدواتنا التجريبية من رصده. وفقًا لهذا الطرح، فإن الجسيمات التي تتحرك عبر هذه الأبعاد الصغيرة لا تظهر سلوكًا مختلفًا على المستويات العادية من الطاقة، مما يجعلنا نعتقد أننا نعيش في عالم بأربعة أبعاد فقط (3 مكانية + 1 زمنية)، رغم أن الواقع قد يحتوي على أبعاد أكثر، لكنها مخفية بسبب صغر حجمها الشديد. ويوضح الشكل رقم (2) هذا المفهوم تصويريًا.




الشكل رقم (2) : تفسير عملية ضغط الأبعاد الإضافية في نظرية الأوتار. .

## الازدواجيـــة (الثنويّة) في نظرية الأوتـــــار

### الأصل والنشأة الفكرية للازدواجية في نظرية الأوتار

تُعبّر كلمة "الازدواجية (Duality)" في الفيزياء عن وجود حالتين فيزيائيتين تبدوان مختلفتين في الشكل أو التمثيل الرياضي، ولكنهما تُعطيان نفس النتائج الفيزيائية تمامًا، بحيث لا يمكن التمييز بينهما من حيث المحتوى أو السلوك الفيزيائي.

تُعد الازدواجية في نظرية الأوتار من أعمق المفاهيم التي غيّرت النظرة التقليدية للكون في الفيزياء النظرية المعاصرة، فهي لم تَعُد مجرد أداة رياضية لتبسيط الحسابات، بل أصبحت مبدأً أساسياً يشير إلى أن هناك أكثر من طريقة صحيحة لوصف الظواهر نفسها، خاصة عند التعامل مع الأنظمة ذات الطاقات العالية جدًا أو في الأبعاد مجهرية شديدة الصغر، حيث تنهار الحدود التقليدية بين النماذج المختلفة وتتكشف وحدتها العميقة.

بدأت فكرة الازدواجية في الظهور في نظرية الأوتار من خلال ما يُعرف بـ ازدواجيةT (T–Duality) ، والتي ظهرت عند دراسة حركة الأوتار في فضاءات ذات أبعاد صغيرة مضغوطة (Compactified Spaces) سُميت بهذا الاسم لأن التناظر الذي تكشفه لا ينبع فقط من خصائص الأوتار نفسها، بل من بنية الفضاء الخارجي الذي تتحرك فيه. أظهرت الدراسات أن الطاقة الكلية للوتر في مثل هذه الفضاءات تتكوّن من جزأين: طاقة الزخم (Kaluza–Klein Modes)الناتجة عن حركة الوتر داخل البعد المضغوط، وطاقة الالتفاف (Winding Modes)الناتجة عن التفاف الوتر حول هذا البعد.

وعند استبدال نصف القطر R هذا البعد بمقلوبه 1/R، تتبادل هاتان الطاقتان أدوارهما، بينما تبقى النتائج الفيزيائية الكلية ثابتة .هذا يُظهر أن الفضاءات الكبيرة والصغيرة يمكن أن تكون مكافئة تمامًا من منظور الوتر، وهي خاصية لا وجود لها في الجسيمات النقطية التقليدية. ثم ظهرت ازدواجيةS (S–Duality) ، والتي تُعد نقلة نوعية لأنها تربط بين نظريتين تتعاملان مع اقترانات مختلفة الشدة .فهي تُحوّل نظرية ذات اقتران قوي جدًا $g_s \gg 1$ إلى نظرية مكافئة لها ولكن ذات اقتران ضعيف $g_s \ll 1$، والعكس صحيح. ويُعرف $g_s$ بـ ثابت اقتران الأوتار (String Coupling Constant) ، وهو مقياس لشدة التفاعل بين الأوتار في النظرية. تسمح هذه


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

الازدواجية بدراسة الأنظمة المعقدة التي يصعب التعامل معها رياضيًا عند اقتران قوي، من خلال تحويلها إلى نسخة مكافئة ذات اقتران ضعيف يمكن تحليلها.

أما الثورة الحقيقية فجاءت مع ازدواجية AdS/CFT (Anti–de Sitter / Conformal Field Theory Duality)، التي طرحها الفيزيائي خوان مالداسينا عام 1997. وقد اقترحت هذه الازدواجية وجود تطابق تام بين نظرية جاذبية كمية في فضاء منحني من نوع Anti–de Sitter، ونظرية حقل كمي كونفورمي أو متناظر شكليًا (Conformal Field Theory) تقع على "حدود" هذا الفضاء ذات عدد أبعاد أقل. تمثل هذه الازدواجية اختراقًا غير مسبوق في الفيزياء النظرية، لأنها فتحت الطريق لفهم الجاذبية الكمية باستخدام أدوات الحقل الكمي، وأسهمت في تقدم مجالات مثل دراسة الثقوب السوداء، والأنظمة ذات التفاعل القوي، بل وحتى تطبيقات في الحوسبة الكمومية ونظرية المعلومات.

**الدور الحاسم للازدواجية في نجاح وتطور نظرية الأوتار**

شكّلت الازدواجية نقطة تحول جوهرية في مسيرة نظرية الأوتار، وأسهمت بشكل حاسم في إنقاذها من الانهيار وتوسيع آفاقها النظرية. ويمكن تلخيص أهم أدوارها فيما يلي:

**1.تجاوز العقبات الرياضية** :ساعدت مفاهيم الازدواجية في حل مشكلات رياضية معقدة، كانت تُهدد تناسق النظرية، مما أعاد الثقة في صلاحيتها كنموذج موحِّد.

**2.كشف وحدة النماذج الخمسة** :أظهرت الازدواجيات أن النماذج الخمسة لنظرية الأوتار التي بدت مختلفة ومتعارضة في البداية ما هي إلا أوجه متعددة لنفس النظرية الأساسية، وهو ما مهّد لفكرة التوحيد الأعمق.

**3.التمهيد لنظرية الغشاء (M–Theory):** وفّرت الازدواجية الأساس المفاهيمي والرياضي لنشوء نظرية الغشاء، التي تُوحّد كل نظريات الأوتار في إطار ذي أحد عشر بُعدًا، وتُعد اليوم المرشح الأبرز لما قد يكون "نظرية كل شيء."

**المفاهيم الأساسية الازدواجيات في نظرية الأوتار**

**1.ازدواجية T–Duality) T)**

تُعد ازدواجية T من أول وأهم أشكال الازدواجية التي ظهرت في نظرية الأوتار، وتكشف عن خاصية مذهلة، الفضاء الصغير جدًا قد يكون مكافئًا فيزيائيًا لفضاء كبير، من منظور الأوتار. لفهم هذه الفكرة، تخيّل بعدًا مكانيًا مضغوطًا على شكل دائرة نصف قطرها $R$ (وهو المسافة من مركز الدائرة إلى محيطها). في هذا البُعد الدائري، يمكن للوتر أن يتفاعل بطريقتين:

أولاً: من خلال الحركة داخل البُعد، مما يولّد ما يُعرف بـ أوضاع الزخم (Momentum Mode) . هنا لا يستطيع الوتر أن يتحرك بأي كمية حركة مستمرة كما في الأبعاد غير المكبوسة، بل يأخذ الزخم $p_n$ (كمية الحركة) فقط القيم المتكممة التالية:

$$\frac{n}{R} = p_n$$



© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

حيث أن $n$ هو عدد صحيح يمثل رقم النمط (mode number) و $R$ هو نصف القطر كما سبق. كلما صغر $R$، زاد الزخم المتاح، وبالتالي زادت الطاقة المرتبطة به.

ثانيًا: من خلال الالتفاف حول البُعد (Winding Mode) ، أي أن الوتر يلفّ مرة أو أكثر حول الدائرة، فيما يُعرف بـ أوضاع الالتفاف. هذا يولّد طاقة إضافية للوتر تتناسب مع:

$$R.m \ \alpha \ E_w$$

حيث أن $E_w$ هي طاقة الالتفاف، m هو عدد مرات الالتفاف (عدد صحيح) و $R$ هو نصف القطر نفسه. في هذه الحالة، كلما ازداد $R$، زادت الطاقة اللازمة للالتفاف. يكشف هذا السلوك الثنائي عن وجود تناظر عميق في نظرية الأوتار: لا يمكن للوتر أن يميز بين بُعد نصف قطره $R$، وآخر نصف قطره $\alpha'/R$ حيث أن $\alpha'$ ثابت أساسي في نظرية الأوتار، يُمثل مربع طول الوتر (وله أبعاد الطول تربيع).

هذا ما يُعرف بـ ازدواجيةT، وهي تعني أن النظام الفيزيائي يبقى كما هو تمامًا إذا استبدلنا:

$$m \leftrightarrow n, \quad \frac{\alpha'}{R} \leftrightarrow R$$

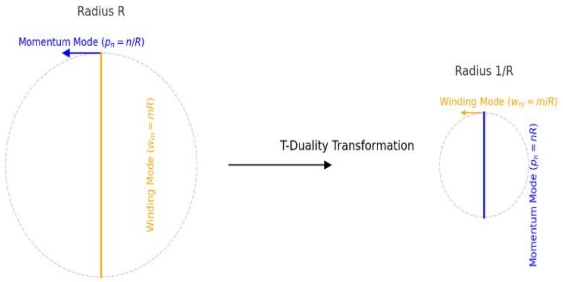
ويظهر هذا بوضوح في صيغة الكتلة الكلية للحالة المهتزة للوتر:

$$+\left(\frac{mR}{\alpha'}\right)^2 + \left(\frac{n}{R}\right)^2 = M^2$$

مساهمات من الاهتزازات الداخلية

حيث أن M تمثل كتلة الحالة المهتزة.

يوضِّح الشكل رقم (3) المفهوم بصريًا. في الجهة اليسرى: وتر يتحرك في بُعد نصف قطره $R$، حيث الزخم منخفض والطاقة الناتجة عن الالتفاف عالية. في الجهة اليمنى: نفس الوتر في بُعد نصف قطره $1/R$ ، حيث تنعكس الأدوار فيغدو الزخم مرتفعًا والطاقة الناتجة عن الالتفاف منخفضة. وهكذا، تُظهر ازدواجية T–أن الفضاء الصغير ليس فراغًا عديم الخصائص، بل إن الأوتار تستطيع الالتفاف فيه عدة مرات، مما يُنتج طاقات عالية حتى عند أصغر المسافات. وهذا يُعيد تعريف معنى "المسافة" و"الفضاء" في الفيزياء: فالمكان في نظرية الأوتار ليس مجرد امتداد سلبي، بل بنية ديناميكية تتفاعل معها الأوتار بطرق لا يمكن للجسيمات النقطية أن تدركها.




الشكل رقم (3) تبادل أنماط الزخم والالتفاف تحت ازدواجية-T

## 2.الازدواجية–S (S–Duality)

تُعد ازدواجية S من أعمق المفاهيم التي طرحتها نظرية الأوتار، وقد لعبت دورًا محوريًا في فهم الأنظمة الفيزيائية ذات التفاعل القوي، وفي دفع النظرية نحو


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

وحدوية أشمل. تختلف هذه الازدواجية عن ازدواجية T في أنها لا تتعلق ببنية الفضاء، بل بشدة التفاعل نفسه.

عندما يكون $g_s \ll 1$ ، يكون النظام في حالة اقتران ضعيف، ويمكن تحليل سلوكه باستخدام التقريبات الاضطرابية (perturbation theory). أما إذا كان $g_s \gg 1$، فإن النظام يدخل في نطاق التفاعل القوي، وتصبح الحسابات غير ممكنة تقريبًا بسبب الطبيعة غير الخطية للتفاعلات. هنا تبرز قوة ازدواجية–S، إذ تُظهر أن النظام الفيزيائي في حالة اقتران قوي يمكن أن يكون مكافئًا تمامًا لنظام آخر في حالة اقتران ضعيف. بعبارة أخرى، يتم استبدال ثابت الاقتران كما يلي:

$$\frac{1}{g_s} \leftrightarrow g_s$$

وبالتالي، يصبح من الممكن دراسة نظام شديد التفاعل (يصعب حله مباشرة) من خلال نظام آخر مزدوج له ذو تفاعل ضعيف. هذا المفهوم لا يُعتبر مجرد أداة رياضية، بل يعكس حقيقة فيزيائية عميقة: إن الوصف الفيزيائي للواقع قد لا يكون وحيدًا، وإن ما يبدو نظامًا معقدًا من منظور، يمكن أن يكون بسيطًا عند إعادة صياغته في نظرية أخرى مكافئة.

لقد أسهمت ازدواجية S في كشف علاقات جوهرية بين النظريات الخمسة المختلفة للأوتار، وربطت بينها كوجوه لنظرية موحدة. كما مهدت الطريق لفهم ديناميكا الأغشية (branes) في نظرية الأوتار، ولعبت دورًا أساسيًا في تطوير نظرية الأوتار الفائقة (Superstring Theory)، والتي كانت بدورها نقطة الانطلاق نحو نظرية الغشاء (M–Theory) في 11 بُعدًا.وباختصار، فإن ازدواجية S– قد نقلت الفهم الفيزيائي من النظر إلى التفاعل كقيمة مطلقة، إلى فهمه كخاصية نسبية تعتمد على زاوية الرصد وطبيعة التمثيل الرياضي، مما يدعم الرؤية الوحدوية التي تسعى إليها نظرية الأوتار في وصف الكون.

### 3.الازدواجية (Anti–de Sitter/Conformal Field Theory Duality) AdS/CFT

تُعد ازدواجية AdS/CFT من أهم وأشهر الازدواجيات في نظرية الأوتار والفيزياء النظرية الحديثة، وقد طرحها الفيزيائي Juan Maldacena سنة 1997، وهي تمثل قفزة نوعية في فهم العلاقة بين الجاذبية الكمية ونظريات الحقل الكمي. اقترح هذا العالِم وجودَ تطابقٍ تامٍّ بين نظرية الجاذبية الكمية في فضاء منحنٍ يعرف بفضاء Anti–de Sitter (AdS) ونظرية حقول كمية كونفورميّة (Conformal Field Theory – CFT) على حدود هذا الفضاء في أبعاد أقل.

أهمية هذه الازدواجية لا تقتصر على الناحية النظرية فقط، بل لها تطبيقات كبيرة في وصف خصائص الثقوب السوداء، خاصة سلوكها الديناميكي والحراري، وفي دراسة الأنظمة الفيزيائية ذات التفاعلات القوية في فيزياء المادة المكثفة، كما في محاكاة الأنظمة المعقدة في الحوسبة الكمية ونظرية المعلومات.


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

**الصيغة الرياضية العامة للازدواجية**

$$CFT_d / \ Field\ Theory \ \Leftrightarrow \ AdS_{d+1} / \ Gravity$$

حيث:

$AdS_{d+1}$ هو فضاء منحنٍ ذو انحناء سلبي بأبعاد $d+1$

$CFT_d$ هي نظرية حقل كمي كونفورمي (متناظر شكلياً) في $d$ أبعاد.

**خاتمــة**

إنّ ما استعرضناه في هذا المقال ليس مجرد عرض لتطور نظرية فيزيائية، بل هو رحلة فكرية نحو فهم أعمق لطبيعة الكون. لقد بيّنا كيف استطاعت نظرية الأوتار، من خلال مفاهيمها الثورية مثل الأبعاد الإضافية والازدواجيات، أن تتجاوز حدود النماذج التقليدية وتعيد صياغة الأسئلة الجوهرية التي لطالما أرّقت العلماء: ما هو أصل المادة؟ كيف تنشأ القوى؟ وهل يمكن توحيد الجاذبية مع بقية التفاعلات في وصف واحد؟ لقد تبيّن أن الازدواجية ليست مجرد أداة رياضية لتبسيط الحسابات، بل هي مبدأ فيزيائي يعكس وحدة عميقة بين أوصاف مختلفة لنفس الواقع. من ازدواجية– T التي تعيد تعريف مفهوم "المسافة"، إلى ازدواجية– Sالتي تقلب قوة التفاعل، وصولًا إلى ازدواجية AdS/CFT التي تربط بين الجاذبية والحقول الكمية، نجد أنفسنا أمام نظرية لا تحاول فقط وصف الظواهر، بل تعيد التفكير في أسس الوصف ذاته. وهكذا، فإن نظرية الأوتار لا تزال مرشحة بقوة لأن تكون الإطار الموحد الذي طالما حلم به الفيزيائيون، لكنها في الوقت ذاته تطرح تحديات فكرية ورياضية عميقة تتطلب أدوات غير تقليدية لفهمها. وفي الوقت الذي لم تصل فيه بعد إلى إثبات تجريبي قاطع، فإن قوتها التفسيرية وشمولها الرياضي يجعلها واحدة من أكثر النظريات إثارة في الفيزياء المعاصرة.

**References**

[1] B. Zwiebach, *A First Course in String Theory*, 2nd ed., Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009.

[2] J. Polchinski, String Theory Vol. 1: *An Introduction to the Bosonic String, Cambridge*, UK: Cambridge University Press, 1998.

[3] K. Becker, M. Becker, and J. H. Schwarz, *String Theory and M-Theory: A Modern Introduction*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.

[4] B. Greene, *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*, New York, NY, USA: W. W. Norton & Company, 1999.

[5] D. McMahon, *String Theory DeMYSTiFieD*, New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2009.

[6] E. Kiritsis, *String Theory in a Nutshell*, 2nd Ed., Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2019.


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

[7] R. Blumenhagen, D. Lust, and S. Theisen, *Basic Concepts of String Theory*, Berlin, Germany: Springer, 2013.

[8] Tripathi, Ayush. "*String Theory: Dimensional Implications, M-Theory.*" Medium. March 24, 2024.

**مصادر باللغة العربية**

[9] الدكتور نضال شمعون، "نظرية الأوتار وما وراءها" مسارات في الفيزياء العدد الاول.

[10] الدكتور عادل عوض، "ثنوية فراغ دي سيتر المضاد ونظرية الحقل الامتثالي، العدد الراهن.

تهنئ أسرة تحرير مسارات

ابنتها الدكتورة إيمان

على إنجازها العلمي

ألف مبارك

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

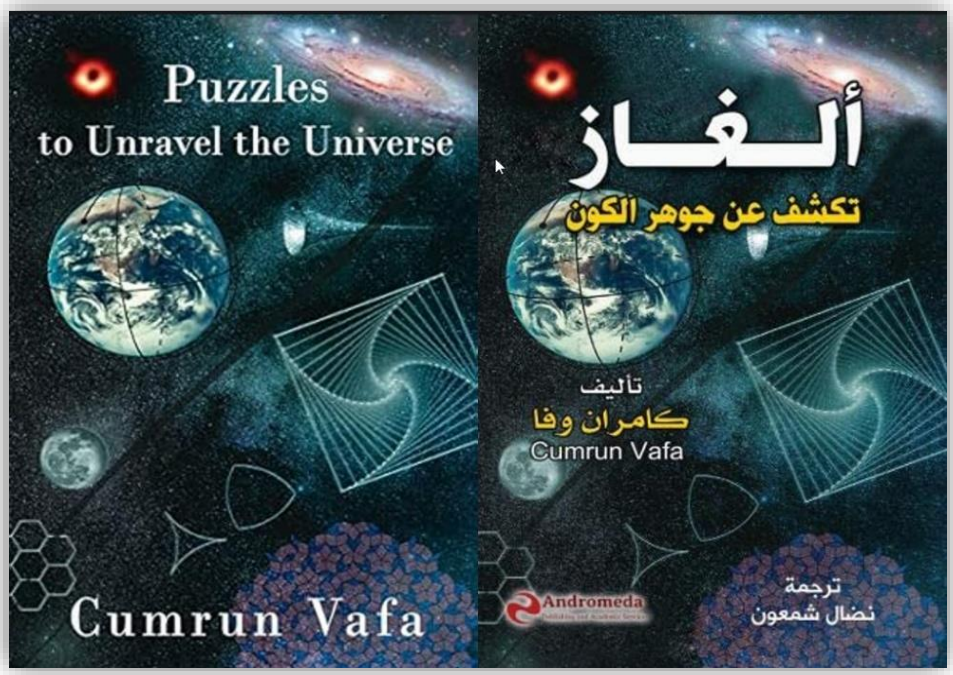
# موضوعات إثرائية: مراجعة لكتاب

## (1) ألغاز تكشف عن جوهر الكون

## Puzzles to Unravel the Universe

الناشر: Andromeda Publishing and Academic Services
أيّار–مايو 2022 :

ترجمة: نضال شمعون




في هذا العمل المميز، يقدم الفيزيائي النظري الشهير كامران وفا رؤية فريدة لفهم القوانين الأساسية التي تحكم كوننا، مستخدماً أداة غير تقليدية: الألغاز الرياضية والمنطقية. وقد أُتيحت للقارئ العربي فرصة الاطلاع على هذا العمل من خلال ترجمة رصينة للدكتور نضال شمعون، الذي نجح في نقل الروح العلمية والفلسفية للكتاب إلى العربية بلغة دقيقة وسلسة .ينتمي هذا الكتاب إلى الأدبيات العلمية التثقيفية ذات الطابع التأملي، لكنه يتجاوز مجرد التبسيط العلمي ليُدخل القارئ في عمق مفاهيمي يتناول موضوعات الفيزياء النظرية الحديثة من خلال سلسلة من الألغاز التي تستدعي التأمل، التفكير النقدي، وأحياناً إعادة النظر في المسلمات العلمية والرياضية.

ينقسم الكتاب إلى اثني عشر فصلاً، تبدأ بمقدمة شاملة عن مفاهيم الفيزياء الحديثة، وتنتقل بعد ذلك إلى مواضيع متعددة تشمل: **التماثل** أو **التناظر** (**symmetry**)، **قوانين الحفظ** أو **المصونيّة** (**conservation laws**)، **كسر التناظر** (**symmetry breaking**)، **مذهب الطبيعية وعدم الطبيعية في الثوابت الفيزيائية** (**naturalness vs. unnaturalness**)، **النسبيّة**، **الكمّ**، **والثنائية** أو **المثنويّة** (**duality**)، وغيرها من القضايا المركزية في علم الكون والفيزياء النظرية.



© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

ما يميز هذا العمل هو إدماج الألغاز الذهنية كنقطة انطلاق لفهم أفكار معقدة مثل نظريّة نويثر (Noether's Theorem)، ميكانيك الكمّ، أو حتى هندسة الزمكان. فعلى سبيل المثال، يُستخدَم لغزٌ حول تغطية رقعة الشطرنج لشرح مفهوم المصونيّة، ويُستَخدم لغز بسيط عن توزيع الطلاء لإبراز مفاهيم التناظر وقلْب الزمان.

من الفصول اللافتة أيضاً الفصل الذي يناقش العلاقة بين الدين والعلم، والذي يعالجه وفا من منظور فلسفي عميق، معزِّزاً الطرح بأمثلة من ألغاز رياضية وبتأملات في فكر أينشتاين، هوكينغ، وفاينمان .كما يُكرَّس الفصل الحادي عشر لمفهوم **الثنائية**، وهو أحد المحاور الأساسية في نظرية الأوتار، مستعرضاً كيف يمكن أن تؤدي مفاهيم متضادة – مثل الزمان والمكان، الجاذبية والمجال، الجسيم والموجة – إلى انسجام بنيوي أعمق يكشف عن الطبيعة الحقيقية للواقع الفيزيائي.

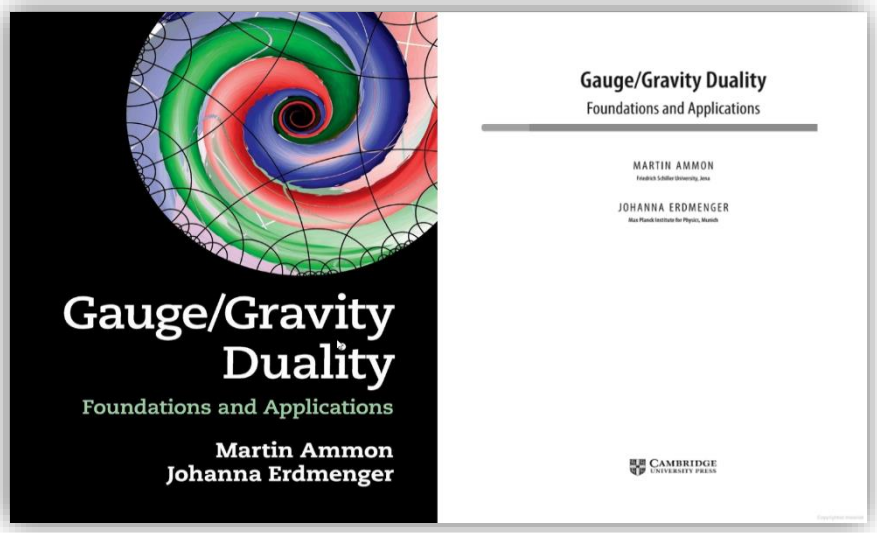
الكتاب مناسب للقارئ المهتم بالعلوم، من طلاب الجامعات إلى الأكاديميين، كما يمكن استخدامُه كمرجع مكمّل في مساقات ومقرّرات الفيزياء التمهيدية والنظرية. إن الجمع بين الطابع التأملي والتقني يجعله عملاً تربوياً بامتياز، يعيد صياغة العلاقة بين الرياضيات والفيزياء في قالب مشوق وغير تقليدي.

**الترجمة العربية:**

جاءت الترجمة التي قدمها الدكتور **نضال شمعون** عالية الجودة، سواء من حيث **الدقة العلمية** أو **السلاسة اللغوية** .الترجمة حافظت على روح الكتاب الأصلية دون الوقوع في التبسيط المخل أو التعقيد غير الضروري، ممّا يجعلها مناسبة لكلٍّ من القارئ العام والمتخصّص.

## (2) ثنائية الجاذبية والمقياس (مثنويّة المعيار/الثقالة): الأسس والتطبيقات

## Gauge/Gravity Duality: Foundations and Applications




تأليف: مارتن أمون (Martin Ammon) ويوهانا إردمنغر (Johanna Erdmenger)

الناشر: Cambridge University Press– 2015



© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

في سياق البحث عن الوحدة بين القوى الأساسية في الطبيعة، برزت "ثنائية المقياس/الجاذبيّة (مثنويّة المعيار/الثقالة) (Gauge/Gravity Duality)" كأحد أكثر المفاهيم إثارة في الفيزياء النظرية الحديثة، واضعة جسراً عميقاً بين نظريتين متباعدتين ظاهريًّا: نظرية الحقل الكمومي المعيارية ونظرية الجاذبية (وخاصة النسبية العامة ونظريات الأوتار). يعالج هذا الكتاب، الصادر عن دار نشر جامعة كامبردج عام 2015، هذه الثنائية من منظور أكاديمي معمّق لكنه منظّم تربوياً، ممّا يجعله مرجعاً قيّماً للباحثين وطلبة الدراسات العليا على حدّ سواء.

الكتاب من تأليف مارتن أمون ويوهانا إردمنغِر، وهما من أبرز الباحثين في هذا الحقل، ويقدّم عرضاً متكاملاً يبدأ من الأسس المفاهيمية والتقنية لنظرية المجال الكمومي ونظرية الأوتار، ثم يتدرج إلى شرح صيغة الثنائيات، بدءًا من الـ AdS/CFT (نظرية الحقول المطابقة تماثليًّا/ فضاء دي-سيتر المضاد) حتى تطبيقاتها في فيزياء المادّة الكثيفة/الحالة الصلبة والنقل الهيدروديناميكي.

يقع الكتاب في أكثر من 500 صفحة، ويتميّز بتنظيم دقيق: تبدأ الفصول الأولى بمراجعة موجزة لكن مكثفة لأسس الجاذبيّة الكلاسيكيّة والنسبيّة العامة، يليها شرح مفصل لنظرية الأوتار (خاصة في حدودها ذات الطاقات المنخفضة)، بما في ذلك البنى الرياضية للفضاءات المنحنية والحلول من نوع Anti-de Sitter. ثم يتم الانتقال إلى توضيح صياغة ثنائية المقياس/الجاذبية، مع تسليط الضوء على التجسيد الشهير: ثنائية مالداسينا Maldacena.

ما يميز هذا المرجع هو اهتمامه بتوضيح التطبيقات العملية للنظرية: من وصف سلوك البلازما الكواركية-الغليونيّة في سياق الكروموديناميك الكمومي QCD، إلى استخدامه في وصف الموصّلات الفائقة غير التقليدية في الحالة الصلبة. وقد تم توظيف معادلات الجاذبيّة لعكس خصائص حرارية ونقلية في نظم فيزيائية كمومية قوية الارتباط.

أسلوبُ الكتاب يمزج بين الدقة الرياضية والإيضاح الفيزيائي، مع إدراجِ كمّ كبير من التمارين الموزعة عبر الفصول، ممّا يعزز قيمته التربوية. كما أنه يتفادى الافتراض المسبق للخبرة العالية في نظرية الأوتار، ممّا يتيح مدخلاً تدريجيًّا للقرّاء من خلفيات متنوعة في الفيزياء النظرية.

يوصى بهذا الكتاب لطلبة الدكتوراه والباحثين في الفيزياء النظرية وعلم الكون والجاذبية الكمومية. كما يمكن أن يشكّل نواةً لمقرَّرٍ جامعي متقدم في "الثنائيات الهولوغرافية" أو "الجاذبيّة الكمومية غير التقليدية".


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

# موضوعات إثرائية: علماء، معلِّمون ومربّون

## الدكتور الراحِل: محمد البغدادي (1930 – 2020): العالم الذي نذر عمره للعربية والفيزياء

في زقاق قديم من أزقة حيّ العمارة بدمشق، وفي بيت متواضع في محلّة "الشرف الأعلى"، وُلد محمد البغدادي عام 1930، ليكبر ويصبح أحد أعلام الفيزياء النظرية في العالم العربي. لم تكن بداياته تشير إلى أنه سيغدو عالمًا فيزيائيًا، إذ التحق بدايةً بكلية الحقوق في جامعة دمشق. غير أن القدر كان يخبّئ له مسارًا مختلفًا، فبعثة دراسية إلى فرنسا فتحت أمامه أبواب الرياضيات والفيزياء، لتأخذه بعيدًا عن مرافعات القضاة إلى معادلات الكون.

### من القانون إلى المعادلة: ميلاد الفيزيائي



© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

في باريس، تعلّم البغدادي أن الرياضيات ليست فقط أداةً للعدّ والحساب، بل لغةً لفهم العالم. حصل على إجازة في الرياضيات، ثم الدكتوراه في الفيزياء النظرية، مركّزًا على الجوانب الرياضية العميقة في تفسير الظواهر الطبيعية. تلك الحقبة صاغت شخصيته كعالم يتقن المزاوجة بين الصرامة الرياضية والرؤية الفلسفية للعلم.

بعد عودته إلى سوريا، بدأ البغدادي مسيرته الأكاديمية أستاذًا في كلية الهندسة بجامعة دمشق. لم يكن مجرد معلّم، بل مصلحًا تعليميًا يحمل همًّا حضاريًا: أن تُدرَّس الفيزياء والعلوم بلغتنا الأم. لم يكن هذا الموقف شعارًا، بل خيارًا أكاديميًا عميقًا نبع من إيمانه بأن اللغة العربية، إذا ما أُتيح لها المحتوى العلمي الرصين، يمكن أن تعود إلى سابق عهدها كلغة علم وفكر.

ولأن الطموح لا يُحبّ القيود، انتقل البغدادي للعمل في المغرب، أولًا كخبير في "اليونسكو"، ثم أستاذًا في جامعة محمد الخامس بالرباط، حيث أسّس قسم الفيزياء النظرية، ودرّس لعقود طويلة باللغتين العربية والفرنسية. خرّج أجيالًا من الفيزيائيين المغاربة والعرب، طلاب ماجستير ودكتوراه، كثير منهم صاروا أساتذة في الجامعات.

## موسوعة على ضوء الشمعة

ربما أعظم ما يميز البغدادي هو عمله الموسوعي الضخم" **:أسس الفيزياء المعاصرة**"، الذي قضى سنوات طويلة في تأليفه منفردًا دون دعم مؤسساتي. خمس مجلدات متكاملة في الميكانيكا، الديناميكا الحرارية، الكهرومغناطيسية، ميكانيكا الكم، والفيزياء الإحصائية. صُممت الموسوعة لتخاطب القارئ العربي بلغة علمية دقيقة، مستخدمة مصطلحات عربية رصينة ومراجع حديثة، وبنية منهجية تسمح باستخدامها كمصدر أكاديمي معتمد بعد المرحلة الجامعية الأساسية. لم يكن ذلك مجرد عمل علمي، بل مشروعًا حضاريًّا، يعبّر عن قناعة البغدادي العميقة بأن اللغة العربية قادرة على احتضان العلم الحديث دون استجداء أو تبعية.

رغم عمله الأكاديمي الرفيع، لم يكن البغدادي ينعزل في برج عاجي. لقد خاض معارك فكرية وثقافية للدفاع عن التعليم باللغة العربية، وكان حاضرًا في الحوارات التربوية الكبرى في الشام والمغرب، صوته هادئ، لكن حجته رصينة. وكان من أصدقائه المقربين العالم الباكستاني محمد عبد السلام، الحائز على جائزة نوبل، وقد عمل معه في المركز الدولي للفيزياء النظرية في تريستي بإيطاليا.

## إرث لا يموت

توفي الدكتور محمد البغدادي يوم 17 مارس 2020 في مدينة الرباط، بعد حياة حافلة امتدت لتسعة عقود، كرّسها للعلم والتعليم والتأليف. رحل بعيدًا، لكن علمه لم يرحل، وموسوعته ما تزال مرجعًا ينتظر الاكتشاف في كثير من مكتباتنا.


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

## نوبل فى الفيزياء

*"تُعد جائزة نوبل رمزًا عالميًا للتميّز الإنساني، شاهدةً على إبداع الإنسان ومثابرته في السعي وراء المعرفة. أُسست الجائزة وفقًا لوصية ألفريد نوبل عام 1895 لتكريم الإنجازات البارزة في مجالات الفيزياء، الكيمياء، الطب، الأدب، السلام، والعلوم الاقتصادية. وفي مجال الفيزياء تحديدًا، تبرز الجائزة الاكتشافات التي وسّعت مداركنا عن الكون، بدءًا من أدق الجسيمات إلى الفضاء الشاسع. يتم اختيار الفائزين بعناية فائقة كل عام لضمان أن عملهم يمثل تقدماً كبيراً، مما يلهم الأجيال القادمة لمزيد من الابتكار والاستكشاف. . تهدف هذه السلسلة من المقالات الى تسليط الضوء على الإنجازات الاستثنائية للفائزين بالجائزة فى الفيزياء، ومساهماتهم التي أثرت في العلم الحديث وفهمنا للعالم."*

**الفائزون بجائزة نوبل في الفيزياء لعام 2011م**

في عام 2011، لم تُمنح جائزة نوبل في الفيزياء لاكتشاف جسيمٍ جديد، ولا لاختراع آلةٍ مدهشة، بل لأمرٍ أعظم من ذلك: كشفُ سرٍّ كونيّ غيّر نظرتنا للعالم إلى الأبد. ذهب نصف الجائزة إلى الفيزيائي الأمريكي **ساؤول بيرلمُتر(Saul Perlmutter)** ، فيما تقاسم النصفَ الآخر العالمان **براين شميدت (Brian P. Schmidt)** وآدم **ريس(Adam G. Riess)**، لقاء اكتشافهم أن **الكون لا يتوسع فقط، بل يتسارع في توسعه** —كما لو أن يدًا خفية تدفع المجرات بعيدًا بسرعات متزايدة.

**البداية... من وهج النجوم**

كل شيء بدأ بمراقبة نوعٍ خاص من النجوم المحتضرة يُدعى **المستعر الأعظم من النوع Ia**. هذه الانفجارات النجمية مدهشة بحد ذاتها، لكنها بالنسبة للفلكيين أشبه بـ"مصابيح كونية" موثوقة يمكن من خلالها قياس بعد المجرات في أعماق الفضاء. الفريقان المتنافسان — أحدهما بقيادة بيرلمتر، والآخر بقيادة شميدت وريس — سافرا عبر الزمن من خلال ضوء هذه المستعرات، في محاولة لفهم كيف تغيّر معدل توسع الكون عبر مليارات السنين.

لكن ما وجده الفريقان لم يكن متوقعًا على الإطلاق. وفقًا لحساباتهم، كان من المفترض أن تبطئ جاذبيّةُ المادة الكونية التوسعَ بمرور الوقت، كما لو أن الكون يسير في طريقٍ منحدرٍ يصعده ببطء. إلا أن النتائج قالت شيئًا آخر تمامًا: الكون يتسارع في توسعه! المستعرات البعيدة كانت أكثر خفوتًا مما ينبغي، ما يشير إلى أنها أبعد مما يُفترض، وأن الضوء منها استغرق وقتًا أطول للوصول — لأن الكون توسّع بسرعةٍ متزايدة أثناء رحلته.

إنها لحظةٌ يمكن تشبيهها بركوب دراجة في طريق منحدر، لكن بدلاً من التباطؤ بسبب الجاذبية، تجد نفسك تزداد سرعة كما لو أن قوة خفية تدفعك للأمام.

**الطاقة المظلمة: اللغز الجديد**

هذا التسارع كشف عن وجود شيء جديد وغامض تمامًا أُطلق عليه اسم **الطاقة المظلمة (Dark Energy)**، وهي قوة لا تُرى ولا تُقاس مباشرة، لكنها تملأ الفضاء وتدفع الكون للتوسع بسرعة متزايدة. ووفقًا للقياسات الحديثة، فإن الطاقة المظلمة تمثّل ما يقارب 70% من محتوى الكون —ما يجعل كل ما نعرفه من نجوم ومجرات ومادة مرئية لا يشكل سوى القليل جدًا من المشهد الكوني.



© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

جائزة نوبل لعام 2011 لم تُمنح فقط لمجموعة من الحسابات الدقيقة، بل لتغييرٍ جذري في نظرتنا للكون. لقد أجبرتنا هذه الاكتشافات على إعادة كتابة كتب علم الكونيات، وفتحت الباب لأسئلة أكبر: ما هي الطاقة المظلمة؟ هل ستستمر إلى الأبد؟ هل سينتهي الكون بانفجار آخر، أم بانفصال كل شيء عن كل شيء؟ ، كما فتحت الباب أمام برامج بحثية كبرى مثل **مرصد بلانك (Planck Observatory)**و**مرصد فيرا روبين القادم (Vera C. Rubin Observatory)**، والتي تسعى إلى قياس خصائص الطاقة المظلمة بدقة أكبر.

## معلومات إثرائيّة – معارِف

### I) مثنويّة الكواركات–الهادرونات

**الرقصةُ اللامرئيّة: استكشاف المثنويّة العميقة بين الكواركات والهادرونات**

في قلب المادة، وعلى المستوى المجهري أسفل الذرات والجزيئات المألوفة، يكمن عالمٌ يحكمه جمالٌ متناقض: عالم الكروموديناميك الكمومي (QCD) للكواركات والهادرونات، حيث تختبئ لبنات البناء الأساسية –الكواركات–إلى الأبد، مترابطةً في جسيمات مركبة –هادرونات–مثل البروتونات والنِترونات.

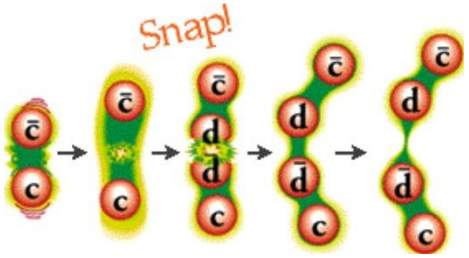
هذه العلاقة ليست هرمية فحسب؛ بل تُجسّد مثنويّة عميقةً وجوهرية، يُعَدّ فهمُها في إدراكِ كيف تُجسّد الكواركاتُ غيرُ المرئية واقعَها فقط من خلال الهادرونات المرصودة، وكيف تنبثق خصائص الهادرونات من ديناميكيّات مُكوِّناتها المحتَجَزة– أمرًا أساسيًّا لكشف القوة النووية الشديدة وبنية المادة المرئية ذاتها.

**اللاعبون: الكواركات وخاصيّة الاحتجاز**

تبدأ قصتنا في ستينيات القرن العشرين، فأمام كمٍّ هائلٍ من الجسيمات المكتشَفة حديثًا، اقترح موراي جيلمان وجورج زويج، كلٌّ على حدة، حلاً جذريًا: تتكون جميعُ هذه الجسيمات (الهادرونات) من كيانات أكثر جوهرية، أُطلق عليها اسمٌ غريب هو "الكواركات". تتكوّن البروتونات والنِترونات –العمود الفقري للنوى الذرية– من ثلاثة كواركات (سُمِّيت لاحقًا "علوي" و"سفلي")، بينما تتكوّن الميزونات، مثل البيون، من أزواج كوارك–كوارك مضاد. ومع ذلك، مثّلت الكواركات مفارقة مباشرة. فعلى الرغم من الأبحاث المكثفة، لم تنجح أي تجربة في عزل كوارك حر، فهي محتَجَزة دومًا داخل الهادرونات، ما يعطي قاعدةً


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

راسخة لظاهرةٍ سُميَّت احتجاز الكواركات quark confinement، وهي حجر الزاوية في نظرية الكروموديناميك الكمومي التي تصف القوة النووية الشديدة.




احتجاز الكواركات ضمن الهادرونات (المصدر)

تمتلك حاملاتُ القوة في هذه النظرية –ما يُدعى الغلوونات Gluons–"شحنة لونية" (مشابهة للشحنة الكهربائية ولكن بثلاثة أنواع: أحمر، أخضر، أزرق)، والأهم من ذلك، تحمل الغلوونات نفسُها شحنةً لونية، ممّا يؤدي إلى خاصية فريدة تنصّ على أن شدّة القوة بين الكواركات تزداد مع المسافة، على عكس القوى الكهرومغناطيسية أو الثقاليّة المألوفة. تخيّلْ كواركاتٍ متّصلةً بأشرطة مطاطيّة تمثّل حقلَ الغلوونات؛ وقم بمحاولة فصلِها، سوف تزداد الطاقة المخزنة في الغلوونات حتى يصبح من المناسب طاقيًّا تكوين زوج جديد من الكواركات وأضدادها من الخلاء، ما يشكّل هادرونات جديدة بدلًا من تحرير الكواركات الأصلية. وهكذا، تكون المادة المرصودة دائمًا "حياديّةَ اللون" – فالهادرونات إما مزيج "أبيض" من ثلاثة كواركات (باريونات) أو أزواج من الكواركات المتضادّة (ميزونات).

**بزوغ المثنويّة: الداخل مقابل الخارج، الصغري (المجهري) مقابل الكبرى (العياني)**

وهنا تتجذر المثنويّة، إذ لدينا منظوران يبدوان متعارضين:

**1– صورة الكوارك–الغلوون (المنظور الصغري):**

على المستوى الأساسي، البروتونات والنِترونات والبيونات وجميع الهادرونات ليست أساسية، بل هي عوالم مجهرية معقدة، هائجة، تحتوي على كواركات نقطيّة (وكواركات مضادة) تتبادل سيلاً من الغلوونات فيما بينها. تنشأ خصائص الجسيمات المرصودة –الكتلة، والسبين، والشحنة– في نهاية المطاف من خصائص هذه الكواركات المحتَجَزة وديناميكيات حقل الغلوونات التي يحكمها الكروموديناميك الكمومي، وبالتالي فما يُشكِّل درجاتِ الحرية الأساسية للنظرية هو الكواركات.

**2–الصورة الهادرونية (المنظورالعيانيّ/الظواهري):**

تجريبياً، نرصد الهادرونات ونتفاعل مباشرةً معها فقط، فهي الجسيمات الفعّالة effective التي تشارك في التفاعلات النووية، فتُشكِّل النوى، وتشكل الجزء الأكبر من الكتلة المرئية في الكون. عندما نسبر أغوار المادة، فإننا نقوم ببعثرة الإلكترونات أو الجسيمات الأخرى عن الهادرونات، وليس عن الكواركات الفردية. من المفيد للغاية–لأغراض عمليّة عديدة، وخاصةً عند الطاقات المنخفضة أو عند وصف البنية النووية– التعاملُ مع الهادرونات كما لو كانت جسيماتٍ أوليّةً بحدّ ذاتها، تتفاعل عبر قوى فعالة (مثل تبادل البيونات لتوصيف القوى النووية، وبالتالي تشكِّل الهادرونات في هذا المنظور درجات الحريّة الأساسيّة.

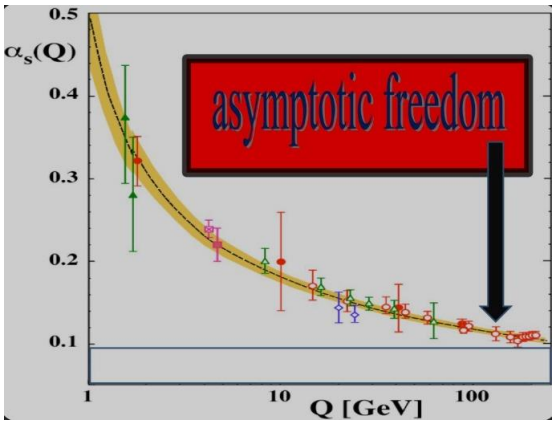
تكمن المثنويّة في أن كلتا الصورتين صحيحتان وجوهريّتان، تبعًا لمقياس الطاقة والمسألة المطروحة، فهما وصفان متكاملان لنفس الواقع، مرتبطان بديناميكيات الـ QCD المعقدة.

**الحرية التقاربيّة: الجسر بين العوالم**

المحور الذي يُمكّننا من اجتياز هذه المثنويّة هو خاصيّة أخرى ملحوظة لـ QCD : الحريّة التقاربيّة Asymptotic Freedom، التي اكتشفها ديفيد غروس، وفرانك ويلتشيك، وديفيد بوليتزر (وحازوا بفضل ذلك على جائزة نوبل عام 2004). تنصّ هذه الخاصية على أن


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

التآثر القوي بين الكواركات يضعف مع ازدياد مقياس الطاقة (أو بشكلٍ مكافئ، مع تناقص المسافة المرصودة).




يتضاءل ثابت القرن القوي مع ازديادِ الطاقة المُتضمَّنة أو بشكلٍ مكافئ–نقصان المسافة الفاصلة. (المصدر)

هناك إذن عالَمان:

1–**طاقة عالية / مسافة قصيرة (عالَم الكواركات)**: عندما يصطدم جسيمٌ عاليُ الطاقة جدًا (إلكترون مثلًا) ببروتون مع حدوث انتقالِ اندفاعٍ–زخمٍ عالٍ (تبعثر عميق لامرن DIS)، فإنه فعليًّا يسبر البروتون على نطاق زمني ومسافة قصيرين جدًا. بفضل الحرية التقاربيّة، تبدو الكواركاتُ داخل البروتون شبهَ حرة خلال هذا اللقاء القصير العنيف، فيقوم الإلكترون بتشتيت كواركات (أو غلوونات) فرديّة تكون تقريبًا غيرَ متآثرة. كشفت تجاربُ مثل تلك التي أُجريت في الـ SLAC عن هذه الحقيقة المذهلة: لم يكن البروتون كائنًا أملسَ، بل احتوى على مُشتِّتات ومُبعثِراتٍ صلبة شبيهة بالنقاط – ألا وهي الكواركات. تهيمن هنا إذن صورة الكواركات والغلوونات؛ حيث نرى المُكوِّنات الأساسية الأوليّة.

2– **طاقة منخفضة / مسافة طويلة (عالَم الهادرونات)**: عندما يحاول الكواركُ المتبعثرَ الإفلات، أو عندما نعتبر البروتون في حالة سكون، فإننا ننتقل إلى مسافات أكبر وطاقاتٍ أقلّ، وهنا تغدو القوة الشديدة مهيمنةً. يقوم الكوارك المتبعثِر، والمتحرّك بعيدًا، بمطّ حقل الغلوون حتى ينكسر، ما يخلق هادرونات جديدة (عملية الهدرنة Hadronization أو التشظّي Fragmentation)، وبالتالي فما نرصده في تجاربنا ليس الكواركَ المتبعثرَ نفسَه، بل دفقاتٍ نفّاثة من الهادرونات المتناثرة، تشير إلى اتجاه الكوارك الأصلي. عند هذه المقاييس، يسود الاحتجاز، ويتجلى السلوك الجماعي المُعقَّد للكواركات والغلوونات المحتجَزة كخصائص للهادرونات المنفصلة. في هذا العالَم، تكون الصورة الهادرونية هي الأكثر عمليّة.

يكمن جوهرُ المثنويّة في هذه الازدواجيّة للسلوكِ المعتمِد على الطاقة، إذ يكشف البروتون عن بنيته الكواركية الداخلية تحت مجهر عالي الطاقة (DIS)، إلا أنه نفسَه يتصرف ككيان واحد متماسك مع غيره عند ربطه ضمن نواة ذات طاقة منخفضة. "الكوارك" و"الهادرون" وجهان لنفس الجسم الكمومي، يظهران في ظروف مختلفة.

**مظاهر المثنويّة**

تتجلّى مثنويّة الكوارك والهادرون في مجالات عديدة ضمن فيزياء الجسيمات:

1– **مطيافية الهادرونات:** تُعدّ قيمُ الكتلة، والسبين، والأعداد الكموميّة لمجموعة واسعة من الهادرونات المرصودة (الباريونات والميزونات) نتائجَ مباشِرةً للتركيبات المحتملة للكواركات المحتجَزة وتآثراتها عبر الغلوونات. تتيح لنا المثنويّة فهمَ الهادرونات المعقدة كتركيبات من لَبِنات بِناءٍ كواركيّة أبسط (على سبيل المثال، ننظر للرنين $\Delta^{++}$ كثلاثة كواركات "علوية" في حالة سبينيّة مُحدّدة)، مع الاعتراف في الوقت نفسه بأن خصائصها المرصودة هي ظواهر ناشئة عن الاحتجاز.

2–**إنتاج الدفقات النفثيّة Jets:** في التصادمات عالية الطاقة (كما في مُصادم الـ LHC)، لا تتمكّن الكواركاتُ أو الغلوونات الناجمة عن الاصطدام الأولي من الإفلات.


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

بدلًا من ذلك، تتحوّل الطاقةُ التي ضُخَّت عند خلقِها – عبر القوى النووية القوية– إلى تياراتٍ متدفّقة من الهادرونات تُسمى النَفَثات، يعكس اتجاهُها وطاقتُها اتجاهَ وطاقةَ الكوارك أو الغلوون الأصلي غير المرئي. تعَدّ النفثاتُ إذن "التجسيدَ" الهادروني للمكوّنات الأساسيّة.

3– **بلازما الكوارك–الغلوون (QGP):** عند قيمٍ عالية جدًا لدرجة الحرارة وللكثافة، كتلك التي تحدث أثناء تصادمات الأيونات الثقيلة خالقةً ظروفًا مماثلة لما خيّم في الكون خلال الميكروثانية الأولى من عمره، يحدث انتقال طوري phase transition، إذ ينهار الاحتجاز، فتتواجد الكواركات والغلوونات في حالةٍ غير مُحتجَزة، ندعوها بلازما الكوارك–الغلوون QGP. والأهم من ذلك، إننا لا "نرى" هذه البلازما مباشرةً، ولكننا نستنتج خلقَها وخصائصَها من خلال تحليل أنماط ووفرة الهادرونات التي "تتجمد" (تثبت قيمُها) مع تبرّد الـ QGP وعودة الاحتجاز إلى فرض ذاته. تُعتبَر الهادرونات إذن رُسُلَ عالَم الكواركات غير المحتجَزة.

**الأهمية الفلسفية والعملية**

تتحدى هذه المثنويّةُ المفاهيمَ التبسيطية للحقيقة "الأساسيّة". فالكواركات، رغم كونها الحقول الأساسية في الـ QCD، لا يمكن رصدها مباشرةً، بل يُستنتج واقعها بالكامل من خلال سلوك الهادرونات المُركَّبة التي تُشكلها. وبدورها، تتصرّف الهادرونات، رغم كونها مُركَّبة، كجسيمات أولية في سياقات عديدة. يُجبرنا كلُّ هذا على التفكير من منظور درجات الحرية الفعالة: ما هي "الجسيمات" الأكثر فائدة لوصف الفيزياء عند مقاسٍ معين؟

عمليًا، تُعد هذه المثنويّة أمرًا لا غنى عنه. فحساب خصائص الهادرونات منخفضة الطاقة مباشَرةً انطلاقًا من المعادلات المعقدة للكروموديناميك الكمومي أمرٌ بالغ الصعوبة (أحرز مجالُ بحوث الكروموديناميك الكمومي الشبيكيّ Lattice QCD تقدمًا، ولكنه يستلزم حساباتٍ هائلةً)، ولكن نموذجَ الكوارك يوفّر إطارًا حدسيًّا وقويًا لتصنيف الهادرونات وفهم خصائصها الساكنة. وعلى العكس، تتطلّب الإجرائيّاتُ عالية الطاقة التي تنطوي على الهادرونات (كتلك الموجودة في الـLHC ) صورةَ الكوارك–الغلوون من أجل فهم أحداث التبعثر القاسي (المتضمّن لانتقالات اندفاع–زخم كبيرة) التحتيّة، على الرغم من أن المخارج المرصودة دائمًا ما تكون هادرونات.

**الخاتمة: تكافل دائم**

ليست مثنويةُ الكواركات والهادرونات تناقضًا يجب حلُّه، بل هي سمة أساسية من سمات الطبيعة في ظل القوة النووية القويّة. إنها علاقة تكافلية تنبع من الاحتجاز والحرية التقاربيّة، إذ تُقدّم الكواركات النظريةَ الأساسيةَ التحتيّةَ التي يُبنى عليها تفسيرُ وجود الهادرونات وتصنيفها، بينما تُقدّم الهادرونات المظهرَ المرصود الذي تُكشف من خلاله خصائص وديناميكيات الكواركات والغلوونات.

نتنقل بسلاسة بين هذه الأوصاف: من استخدام نموذج الكوارك للتنبؤ بحالة هادرون جديدة، إلى استخدام نفثات الهادرونات لسبر كُنْه الغلوون كسبينه مثلًا. تظل هذه الرقصةُ المتناغمة بين المُكوّنات الخفيّة ومُركَّباتِها المرئية أحدَ أعمق سمات العالَم دون الذري وأكثرها تميزًا، تذكّرنا دائمًا بأن الحقيقةَ الفيزيائيّة، وخاصةً عند الحدود الكمومية، غالبًا ما تُوصف على أفضل وجهٍ من خلال وجهات نظر متكاملة ومتشابكة. إن فهم هذه المثنوية هو مفتاحُ كشفِ أسرار بنية المادة الأعمق.


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

## II) المثنوية في الفيزياء الإحصائيّة

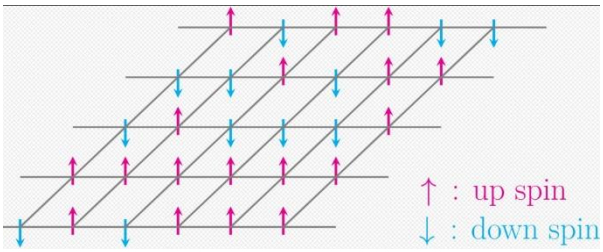
المثنوية مفهومٌ عميقٌ وواسع الانتشار في الفيزياء الإحصائية، ويلعب دورًا حاسمًا في فهم الانتقالات الطوريّة، والظواهر الحرجة، والطرائق الحاسوبيّة الموافقة، وحتى صلات الفيزياء الإحصائيّة بنظرية الحقل الكمومي وفيزياء الثقالة. وبرغم اختلافها عن مثنوية الكوارك–الهادرون في تجليّاتها الخاصّةِ المعتمدةِ على مقاس المسألة المطروحة، فإن فكرتَها الأساسية –أي وجود أوصاف رياضيّاتيّة مختلفة تُجسّد فيزياءَ قاعديّة واحدة– تبقى نفسَها.

فيما يلي تفصيلٌ لأهم مفاهيم المثنوية في الفيزياء الإحصائية:

### 1) المثنوية كمطابقة دقيقة بين نماذج مختلفة:

**آ) الفكرةُ الأساسية:** إيجاد تحويل رياضيّاتي دقيق يُطابق نموذجَ ميكانيك إحصائي مُعرَّف على شبيكة مُحدَّدة (أو ذات بُعد مُحدَّد) مع نموذج مختلف، غالبًا ما يكون مُعرّفًا على شبيكة ثِنويّة.

**ب) مثال كلاسيكي: نموذج آيزينغ ثنائي الأبعاد 2D– Ising**




نموذج آيزينغ ثنائي الأبعاد: تتآثر السبينات بشكلٍ رئيس مع السبينات المتجاورة. (المصدر)

–النموذج A (الأصلي): قيم السبينات $\sigma_i = \pm 1$ على مواقع شبيكة مربعة ثنائيّة الأبعاد. تُكتَب طاقة التآثر وفق العلاقة: $-J \sum_{i,j} \sigma_i \sigma_j$–، حيث المجموع على المواقع المتجاورة الأقربnearest neighbours، ونُركِّز على قيم السبينات (متحوّلات الموقِع).

–النموذج B (الثِّنوي): تتعرّف المتحوّلات من خلال روابط أو لويحات الشبيكة الأصلية (والتي تُقابل مواقعَ في الشبيكة الثنويّة، وغالبًا ما تكون مربعة أو مثلثة). تصف المتحوّلات الثنويّة عادة جدرانًا نطاقيّة domain wall.

–تحويل المثنوية (كرامرز–وانير Kramers–Wannier): تربط إجرائيّة رياضيّاتيّة مُحدّدة دالةَ التجزئة $Z(J, T)$ لنموذج آيزينغ الأصلي بدالة التجزئة $\tilde{Z}(\tilde{J}, T)$ لنموذج آيزينغ مختلف مُعرّف على الشبيكة الثنوية، ولكن بثابت اقتران مختلف $\tilde{J}$ متعلِّق بـ $J$.

**– الدلالة:**

تتُيح مثنوية كرامرز–وانير تحديدَ النقطة الحرجة، إذ تنبّأت وبدقة بدرجة الحرارة الحرجة $T_c$ لنموذج آيزينغ ثنائي الأبعاد قبل أن يحلَّه أونساغر Onsager كليّةً عبر افتراض مثنوية ذاتية ($J = \tilde{J}$) عند النقطة الحرجة. كما أنها تربط بين الطورَين المُرتَّب وغيرَ المرتب، إذ تُقابل طورَ درجة الحرارة المنخفضة للنموذج الأصلي (السبينات المُرتَّبة) مع طورِ درجة الحرارة المرتفعة للنموذج الثِّنوي (متحوّلات ثنويّة غير مرتّبة، تمثل جدرانًا نطاقيّة)، والعكس صحيح. تسمح المثنوية بمبادلة بارامترات الترتيب واللاترتيب.

**ج) أمثلة أخرى:** توجد المثنوية في نماذج أخرى (نماذج Potts، نموذج XY بأبعاد مُحدَّدة)، وبين أشكال هندسية مختلفة (على سبيل المثال، نموذج آيزينغ ذو شبيكة مربعة ثنائيّة الأبعاد ثنويٌّ مع نموذج آيزينغ ذي شبيكة مربّعة أخرى؛ بينما نموذج آيزينغ ذو شبيكة مثلثة ثنائية الأبعاد ثِنويّ مع نموذج آيزينغ ذي شبيكة شبيهة بقرص العسل).

### 2) المثنوية كعلاقة بين اقتران ضعيف–اقتران قوي:

**آ) الفكرة الأساسية:** يقوم تحويل المثنوية بربط نموذجٍ ذي ثابتِ اقترانٍ تآثرٍ ضعيف بنموذجه الثنوي ذي ثابت الاقتران القوي، والعكس صحيح. تُعد هذه الطريقة فعّالة


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

للغاية عندما يكون أحدُ النموذجَين سهلَ الحل بينما الآخر صعبًا.

**ب) مثال: مثنوية T عالية/T منخفضة (تعميم مثنوية آيزينغ)**

–غالبًا ما يكون مجالُ درجةِ الحرارة العالية (حيث يكون التآثر J ضعيفًا) لنموذجٍ ما مطابقًا صوريًّا لمجال درجة الحرارة المنخفضة (حيث يكون التفاعل J̃ قويًا) في نموذجه الثنوي.

**– الأهمية:**

يسمح ذلك بمعالجة مجال الاقتران القوي، فيمكن استنتاج خصائص المنظومة ذات الاقتران القوي في النموذج الأصلي (والذي يصعب حسابُه مباشرةً) من خصائص منظومة الاقتران الضعيف للنموذج الثنوي (الذي يسهل حسابه). كما أن المثنويّة تسمح بفهم فكرة العالَمية (الشموليّة) universality، لأنها تكشف عن روابط عميقة بين نماذج تبدو مختلفة عند نقاطها الحرجة.

**ج) مثال: مثنويّة الجسيم–الدوامة (نموذج المائع الفائق ثنائي الأبعاد/XY)**

– في نموذج XY ثنائي الأبعاد (أو نموذج المائع الفائق ثنائي الأبعاد مثل غشاء الهيليوم–4)، توجد مثنويّة بين الجسيماتِ (الأصلية) التي تقدِّم درجاتِ حريةٍ بوزونيةً (زوايا الطور $\theta_i$) تُمثِّل وسيطَ (بارامتر) ترتيب المائع الفائق (بينما تُعَدّ الدوّاماتُ عيوبًا طوبولوجيّةً)، وبين الدوامات (الثنويّة) التي تقدِّم درجاتِ الحريةِ الأساسيةَ في نظرية ثِنويّة، حيث تتآثر عبر كمونٍ لوغاريتمي (مثل غاز كولومب ثنائي الأبعاد).

**– الأهمية:**

تسمح هذه الصورة الثّنويّة بتوصيف انتقال بيريزنسكي–كوستيرليتز–ثاولس (BKT) الشهير، وهو انتقال طوري طوبولوجي يُقاد عبر تفكك الدوّامات.

كما ويتوافق طور الميوعة الفائقة superfluid phase (نموّ تماسك الطور phase coherence) مع طور "غاز كولومب" حيث تكون الدوامات مترابطةً ضمن أزواج (محتجَزة)، بينما يتوافق الطور الطبيعي (فقدان جساءة الميوعة الفائقة superfluid stiffness) مع دوّامات غير محتجَزة (حرة).

تربط هذه المثنوية الاقترانَ الضعيف للبوزونات الأصلية (تماسك طوري شديد) بالاقترانِ القوي (الترابط) للدوامات، والعكس صحيح.

**3) مثنوية خطّ العالَم wroldline / صفحة العالَم worldsheet وتكاملات المسارات path integrals:**

**آ) الفكرة الأساسية:** غالبًا ما تُكتب دالة التجزئة (التحاصّ partition function) في الميكانيك الإحصائي التقليدي أو الكمومي كمجموع تشكيلاتٍ configurations لعُرواتٍ مغلقة closed loops ("خطوط العالم" للجسيمات، و"صفائح العالم" للأوتار/العُروات) تُمثل مسارات الجسيمات أو الإثارات الطوبولوجية.

**ب) المثنوية:** يمكن أن يكون هناك وصف ثِنوي حيث يُعبَّر عن دالة التجزئة نفسها كمجموع تشكيلاتٍ لأنواعٍ مختلفة من العُروات أو السطوح مُعرَّفةٍ على الشبيكة الثنويّة.

**ج) الأهمية:**

–تُقدم المثنويّة تفسيراتٍ هندسيّةً بديلة للتراوحات والتأرجحات fluctuations.

– تُعَدّ المثنويّة جوهريّةً لصياغة نظريات معيار (غوج) شبيكيّة lattice gauge وفهم انتقالات الاحتجاز/إزالة الاحتجاز (على سبيل المثال، المرصود الفيزيائي الذي تعبِّر عنه عروات ويلسون Wilson loops في الكروموديناميك الكمومي الشبيكي lattice QCD هو ثنويٌّ للمجموع على صفائح العالَم).



© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

– تُشكل المثنويّة أساسًا لتقنيات عدديّة فعّالة مثل خوارزميات الدودة Worm algorithms في برمجيّات محاكاة مونت كارلو.

**4) المثنوية الهولوغرافية (تطابُق AdS/CFT):**

**آ) الفكرة الأساسية:** هذه مثنوية مُفترضة نشأت في نظرية الأوتار، ولكن لها آثار عميقة على الفيزياء الإحصائية. تقترح تكافؤًا صحيحًا دقيقًا (مثنوية) بين:

– النظرية A: نظرية حقلٍ كمومي (QFT) بدون ثقالة، وعادةً ما تكون نظريةَ حقلٍ تماثلي (CFT) مقترنة بقوة في زمكان بأبعاد d (على سبيل المثال، نظرية مشابهة لبعض النقاط الحرجة في المادة المكثفة).

– النظرية B: نظرية ثقالة كموميّة (وبالتحديد، نظرية الأوتار) في زمكان دي سيتر مُضادّ (AdS) ذي أبعاد (d+1).

**ب) الدلالة بالنسبة للفيزياء الإحصائية:**

– حلّ الاقتران القوي: توفّر المثنويّة أداةً فعّالة لحساب خصائص النظم الكمومية شديدة الاقتران والقريبة من الحرجيّة (وهذا أمرٌ يصعب أو يستحيل تحقيقه بالطرق القياسية) عن طريق ربطها بنظريةِ ثقالةٍ جاذبيّةٍ ضعيفة الاقتران في أبعاد أعلى.

– فهم النقل: تُستخدم المثنويّة لحساب معاملات النقل (اللزوجة، والموصليّة) في السوائل الكمومية الغريبة شديدة الترابط.

– إنتروبيا التشابك entanglement entropy: تُقدّم المثنويّة تفسيراتٍ هندسيةً للتشابك الكمومي في النظرية الواقعة على الحدود من خلال خصائص هندسة المنطقة القاعديّة الكبيرة bulk.

– الاستخماد الكمومي quenches وتحقيق التوازن الحراري الكمومي thermalization: تسمح المثنويّة بنمذجة ديناميكيّات عدم التوازن في نظرية الحقل التماثلي CFT الحدودية باستخدام الانهيار التجاذبي الثقالي في المنطقة القاعديّة الكبيرة bulk.

**ج) العلاقة مع الفيزياء الإحصائيّة:** على الرغم من كون المثنويّةِ الهولوغرافيّة مثنويّةَ ثقالةٍ كموميّة في جوهرها، إلا أنها تعالج بشكل مباشر مسائلَ ميكانيك الكم الإحصائي بدرجة حرارة غير معدومة للنظم شديدة الترابط.

**لماذا تُعدّ المثنوية مهمةً في الفيزياء الإحصائية؟**

**آ) حل النماذج:** تُوفّر المثنويّة حلولاً دقيقة صحيحة أو مناهجَ تقريبيّة فعّالة (النشر وفق قوى T–عالية/T–منخفضة) لنماذج مُعقّدة (مثل النقطة الحرجة لنموذج آيزينغ ثنائي الأبعاد).

**ب) فهم انتقالات الطور:** تكشف المثنويّة عن روابط عميقة بين الأطوار المختلفة (الترتيب/اللاترتيب والفوضى، الاحتجاز/الحريّة وغياب الاحتجاز)، وتتيح تحديدَ مواقع النقاط الحرجة بدقة. غالبًا ما تسمح المثنوية بمطابقة الأطوار المُرتَّبة بأطوار غير مرتّبة في النموذج الثِّنوي.

**ج) أطر توحيديّة:** تُظهر المثنويّة تكافؤاتٍ غيرَ متوقَّعة بين نظم فيزيائية أو صياغات رياضيّاتيّة تبدو منفصلةً تمامًا (مثل نماذج السبين spin models ونظريات القياس الغوجي gauge theories).

**د) القدرة الحسابية:** تدعمُ المثنويةُ خوارزمياتِ مونت كارلو الفعّالة (مثل خوارزميات العناقيد cluster المُستوحاة من المثنوية)، وتُوفّر أطرًا لمعالجة مسائل الاقتران القوية (عبر المبدأ الهولوغرافي).

**هـ) رؤية مفاهيمية:** تُقدّم المثنويّة منظورات هندسية أو طوبولوجية مختلفة حول التقلّبات والسلوك الجماعي (خطوط العالَم، الدوّامات، الأوتار).

**الخلاصة:**

في جوهرها، تُمثل المثنوية في الفيزياء الإحصائية إدراكًا قويًا بأن السلوكَ المعقد والناشئ للعديد من درجات



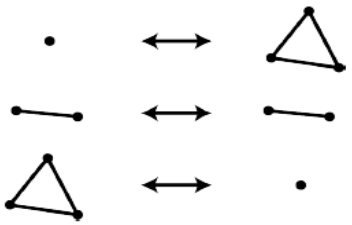
© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

الحرية المتفاعلة يمكن غالبًا تصويره بشكلٍ مساوٍ في الدقّة– وأحيانًا بشفافية أو سهولة أكبر – من خلال وصفٍ مختلف تمامًا، ولكنه مكافئٌ رياضيّاتيًا، قائمٌ على كينونات أو متحوّلات أساسية مختلفة. إنها شهادةٌ على البنى الرياضيّاتيّة العميقة التي تقوم عليها الظواهر الفيزيائية.

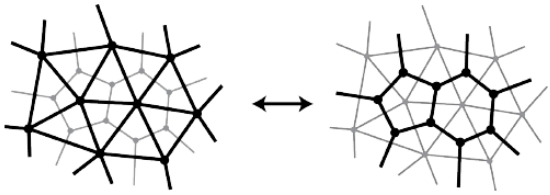
**********

## III) مثالان رياضيان بسيطان عن فكرة المثنوية (من كتاب " ألغاز تكشف عن جوهر الكون": تأليف كومرون وفا وترجمة نضال شمعون)

لنفترضْ أننا في فضاءٍ عددُ أبعاده D، وأننا نأخذ باعتبارنا كائناتٍ $A_\ell$ ذات أبعاد $\ell$=0, …, D. ثم لنفترضْ وجودَ مثنوية بين $A_\ell$ و $A_{\tilde{\ell}}$، حيث $\tilde{\ell} = D - \ell$. أي بعبارةٍ أخرى، تأخذ المثنوية كائناتٍ ذاتَ بعد $\ell$ إلى كائناتٍ ذات بعد $\tilde{\ell}$. على سبيل المثال، من أجل D = 2، ينتقل وفق المثنوية كائنٌ ذو بعدٍ صفري (نقطة) إلى كائنٍ ثنائي الأبعاد (مثل مثلث) والعكس بالعكس، أمّا المستقيمات فهي ثنويّةٌ لمستقيماتٍ أيضاً، كما هو موضَّحٌ أدناه. هذا مظهرٌ من مظاهر مثنوية "بوانكاريه Poincaré".



في المثال ثنائي الأبعاد في الشكل التالي، يتمّ تبادل النقاط مع الوجوه، وتكون المستقيمات ثنويةً لمستقيماتٍ أخرى. وتمتلك أيُّ إفادةٍ حول التثليث triangulation نظيراً تماثلياً ثنويّاً.



مثالٌ على مثنوية بوانكاريه في بعدَين اثنَين.

كمثالٍ آخر على المثنويّة الرياضية، افترضْ أننا نحاول حلّ المعادلة التفاضلية

$$\sum_{n=0}^{N} a_n \frac{d^n f}{dx^n}(x) = 0$$

يبدو هذا معقّداً بشكلٍ رهيبٍ، لكنْ لنفترضْ أننا نجرّب دالّةً من الشكل $f(x)=e^{px}$. عندها تغدو عملية الاشتقاق $\frac{d}{dx}$ عمليةَ ضربٍ بـ p، وتصبح المعادلة التفاضلية

$$\sum_{n=0}^{N} a_n p^n = 0$$

وهكذا أخذنا معادلةً تفاضليةً ذاتَ مظهرٍ مخيفٍ، وحوّلناها إلى معادلةٍ كثير حدوديّة. يمكن أن يكون ذلك مفيداً جداً، لأنّ المعادلات الحدوديّة –بشكلٍ عام– أسهلُ بكثيرٍ على الحلِّ من المعادلات التفاضلية. التحويلُ الذي قمنا به مثالٌ بسيطٌ على تحويل فورييه Fourrier transform. عندما نُجري تحويلَ فورييه، نكتب الدالّة f(x) كمجموعٍ (أو تكاملٍ) قوىً أسّيّة عقدية:= $f(x) = \Sigma c_\alpha e^{i\alpha x}$. لا يمثِّل تحويلُ فورييه تقريباً للدالّة؛ بل هو طريقةٌ ثِنويّةٌ لوصفها. وعبر إجراء تحويل فورييه على f(x) من فضائه الاعتيادي إلى ما يُعرَف بفضائه الترّددي، تمكّنّا من جعل مسألةٍ صعبةٍ بسيطةً تافهةً.

هناك مثنوياتٌ يمكننا صياغتُها رياضياً والبرهان عليها بدقّة. لكنْ في الآونة الأخيرة اكتشفنا في الفيزياء مثنوياتٍ أكثرَ غموضاً وأقوى بكثيرٍ من تحويل فورييه. من وجهة نظرٍ رياضيةٍ، لم نجد بعدُ تفسيراً واضحاً لهذه المثنويات. تخيّلْ لو كنت تحاول حلّ معادلةٍ تفاضليةٍ غريبةٍ عجيبةٍ، وتَمثَّل أسلوبُ حلِّك بصندوقٍ أسود من شأنه أن ينتِجَ إجابةً عن هذه المعادلة، بحيث تستطيع بعد الحصول على تلك الإجابة التحقّقَ منها لمعرفة ما إذا كانت صالحةً أم لا. هناك الكثير من التصريحات والإفادات من هذا القبيل في الفيزياء الحديثة اليوم. يشبهُ


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

الوضعُ كما لو كنتَ تملك رِمازاً code سحريّاً للنظر إلى المسائل من خلاله، أي شيئاً يقارب أن يكون حلّالاً رئيسياً للأحجيات. نحن لا نعرف كيف أو لماذا تعمل المثنويات وتنجح في عملها، لكنها تفعل ذلك على أيّة حال. لوضع هذا الأمر في المشهد القائم نقول إنه يمكن لهذه الطرائق القائمة على المثنويات أن تحلَّ مسائلَ رياضيةً لم تُحَلّ من قبل! بكلماتٍ أخرى، يمكنها أن تعطيَنا الإجابةَ الصحيحة بدون إعطاء تفسيرٍ عميقٍ يشرح كيف وصلنا إلى هناك.

# خبر علمي

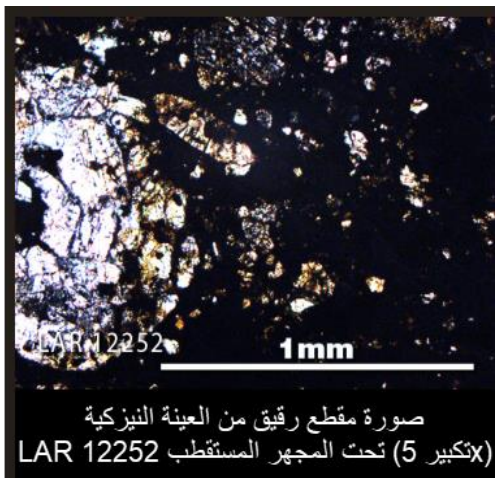
## اكتشاف يكشف أن مياه الأرض قد تكون نابعة من أصلها لا من الفضاء

في اكتشاف ثوري قد يُعيد كتابة أحد أكثر فصول العلم الكوني إثارة، توصل علماء من جامعة أكسفورد إلى دليل جديد يقوّض النظرية السائدة بأن المياه على الأرض جاءت بفعل اصطدام كويكبات غنية بالماء في المراحل المبكرة من تشكّل الكوكب. وبدلاً من ذلك، تشير نتائج الدراسة إلى أن الأرض كانت، منذ نشأتها، غنية بالهيدروجين — العنصر الجوهري لتكوين الماء — وهو ما يفتح آفاقًا جديدة لفهم أصل المياه التي غمرت كوكبنا.
اعتمد الفريق البحثي على تحليل نيزك نادر يُدعى "لار 12252(LAR 12252)12252 "، عُثر عليه في القارة القطبية الجنوبية. هذا النيزك ينتمي إلى فئة "كوندريت الإينستاتيت"، ويُعتقد أن تركيبته الكيميائية تشبه إلى حد كبير المادة التي تكوّنت منها الأرض في بداياتها، قبل 4.55 مليار سنة.

من خلال تقنيات متقدمة في تحليل الامتصاص بالأشعة السينية(XANES) ، استطاع الباحثون تحديد كميات غير متوقعة من مركبات كبريتيد الهيدروجين في البنية الدقيقة للنيزك، لا سيما في مناطق لا تحمل آثار تلوث أرضي مثل الصدأ أو الشقوق. وقد تبين أن هذه المركبات لا يمكن أن تكون ناتجة عن تلوث لاحق، ما يعزز من فرضية أن الهيدروجين كان جزءًا أصيلًا من تركيب الأرض الأولي.

يرى الباحث توم باريت، قائد الدراسة، أن هذه النتائج تمثل "دليلاً مباشراً على أن الأرض وُلدت مزودة بالمكونات الأساسية لتكوين الماء"، لا أنها تلقّتها لاحقًا من اصطدامات كونية. وقد علق الأستاذ المشارك جيمس برايسون قائلاً: "ما كان يُعتقد أنه نتيجة حادث فلكي عشوائي، بات الآن يُرى كجزء طبيعي من تطور كوكبنا".
نشرت الدراسة في مجلة *Icarus*، وتشكل هذه النتائج حلقة مفصلية في فهم أصول الحياة على الأرض، وقد تفتح آفاقًا جديدة للبحث عن الظروف المشابهة في كواكب أخرى.

The Origin Of Water On Earth



صورة مقطع رقيق من العينة النيزكية
LAR 12252 تحت المجهر المستقطب (تكبير 5x)


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

# مسألةٌ للطلاب

نهدف في هذه الزاوية إلى تدريب طلّابنا على حلّ بعض المسائل التي تتطلّب بعض التفكير. نختار عادةً مثل هذه المسائل من الأسئلة التي تُلقى في المسابقات ( ومنها مسابقات الأولمبيادات الدوليّة). في كلّ عدد، سوف نعرض حلّاً لمسألة عُرضت في العدد السابق ونقدِّم مسألة جديدة

- **مسألة غير محلولة (فيزياء، سنة أولى بعد أخذ مقرّرٍ في الميكانيك):**

**يدور ساتِلان (قمران صنعيّان) حول الأرض في مستوٍ واحد وفق مسارَين إهليلجيَّين بتباعدَين مركزيَّين $e_1$ و$e_2$، وحيث الزاوية بين محورَيهما الرئيسيَّين هي $\alpha$، ونرمز لمعدّلَي مسحِ المساحة لقطعتَين مستقيمتَين تربطان الساتِلَين بمركز الأرض بـ $L_1$ و$L_2$. ما هي أقصى سرعة نسبية للساتلَين؟ أوجد إجابة مبسطة من أجل $\alpha = 90°$ و$L_1=L_2$، علمًا بأن نسبة دورَي الساتلَين عددٌ غير عادي irrational. يُرمز لكتلة الأرض بالرمز M، وثابت الجاذبية بالرمز G.**

**مسألة العدد الماضي (فيزياء، سنة ثانية بعد أخذ مقرّرٍ في ميكانيك الموائع):**

**تُغمَر اسطوانةٌ صمّاء بنصف قطر R وارتفاع H، وكثافة $\rho_c$ في ماء كثافتُه $\rho_w$. في البدْءِ نبقي على الأسطوانة ساكنةً بحيث محورها شاقولي والمسافة بين وجهها السفلي وقعر الماء h. لحاوية الماء قعرٌ صلبٌ مستوٍ، وعمق الماء داخلها أكبر من H+h. في لحظةٍ ما نترك الاسطوانةَ، فتبدأ بالسقوط. ما هو الزمن المُستغرَق حتى تصدم الأسطوانةُ قعرَ الحاوية؟ أهمِل اللزوجة، وافترض**

$$\rho_c > \rho_w, \quad H < R,$$
$$10\rho_c h \ll \rho_w R.$$

**الحلّ:**

قد يفكّر الطالب أولًا باقتصار القوى المسلَّطة على الأسطوانة على الثقالة ودافعة أرخميدس، ولكن هذا خطأ لأن الأسطوانة في حالة حركة وهناك مقاومة الماء التي ليس لدينا معلومات عنها. يوحي إهمال اللزوجة بتطبيق مصونيّة الطاقة:

$E = K_c + K_w + U_c + U_w$. نرمز بـ x للمسافة بين أسفل الأسطوانة وقاع الحاوية، فيكون (بأخذ مبدأ الطاقة الكامنة للأسطوانة عند القعر):

$$K_c = \frac{1}{2}\pi R^2 H \rho_c \dot{x}^2,$$
$$U_c = \pi R^2 H \rho_c g x,$$
$$U_w = -\pi R^2 H \rho_w g x.$$

في الحقيقة، بالنسبة لطاقة الماء الكامنة، عندما تنخفض الأسطوانة بمقدار h−x، فإن مقدارًا من الماء قدره $\pi R^2(h-x)$ سيُدفَع للجانب ويحلّ محلّه مقدار مماثل فوق الأسطوانة يعلوه بمقدار H، وبالتالي لدينا التغيّر:


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

$\Delta U_w = \pi R^2(h-x)\rho_w gH$، وباختيار المبدأ عند ركون الأسطوانة تتفسّر الصيغة المكتوبة.

بسبب الفرضيّات، لدينا h<<R، وبالتالي يمكن افتراضُ أن الحركةَ أسفل الأسطوانة شُعّيّة radial بشكلٍ رئيس. تقتضي مصونيّة الكتلة:

$$-\pi r^2 dx\rho_w = 2\pi r x dr\rho_w \overset{dr=v_w dt}{\Rightarrow} -\pi r^2\dot{x} = 2\pi r x v_w \Rightarrow v_w = \frac{r\dot{x}}{2x}$$

ما ينسجم بسبب $(r \le R \gg h > x)$ مع $v_w \gg \dot{x}$ بالنسبة لأغلب قيم r، وبالتالي الطاقة الحركيّة للماء أسفل الأسطوانة:

$$K_w = \int_{r=0}^{r=R} 2\pi r x dr.\frac{1}{2}\rho_w\left(\frac{r\dot{x}}{2x}\right)^2 = \frac{\pi\rho_w R^4\dot{x}^2}{16x}$$

(أخذنا حدّ التكامل إلى r=0 لأن مساهمةَ جوار الصفر في التكامل مهملة). بالنسبة لمساهمة مركّبة السرعة الشاقوليّة في الطاقة الحركيّة أسفل الأسطوانة فهي من رتبة

$$\frac{1}{2}\pi R^2 x\dot{x}^2\rho_w \ll K_w$$

وكذلك نهمل الطاقة الحركيّة للماء فوق الأسطوانة حيث سيبقى الماء عمليًّا ساكنًا. أمّا على جانب الأسطوانة فلدينا بسبب الاستمراريّة:

$\pi R^2\dot{x} + Av = 0$ حيث A سطح الحاوية منقوصًا منه سطح الأسطوانة، وبالتالي المساهمة في الطاقة الحركيّة ستكون من رتبة $\frac{1}{2}AH\rho_w\left(\frac{\dot{x}\pi R^2}{A}\right)^2 = \frac{H\rho_w\dot{x}^2\pi^2R^4}{2A}$ التي نهملها بافتراض $\frac{hH}{A} \ll 1$.

علاوةً على ذلك، وبسبب فرضيّات المسألة لدينا $K_c << K_w$، إذن الطاقة الكليّة المَصونة تُعطى إذن بالعلاقة:

$$\frac{\pi\rho_w R^4\dot{x}^2}{16x} + \pi R^2 H(\rho_c-\rho_w)gx = \pi R^2 H(\rho_c-\rho_w)gh$$

وبالتالي:

$$\dot{x} = -4\sqrt{\frac{gH}{R^2}\left(\frac{\rho_c}{\rho_w}-1\right)x(h-x)}$$،

وبإجراء المكاملة

$$\int_h^0 \frac{dx}{\sqrt{x(h-x)}} = -\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{2h\sin\theta\cos\theta\, d\theta}{\sqrt{h\sin^2\theta\,(h-x)}} = -\pi = -4\sqrt{\frac{gH}{R^2}\left(\frac{\rho_c}{\rho_w}-1\right)}\int_0^T dt$$

أي

$$T = \frac{\pi R}{4\sqrt{gH\left(\frac{\rho_c}{\rho_w}-1\right)}}$$

---

# خبر علمي

---

## نظرية الانفجار العظيم ليست وحدها: هل الكون أزلي بلا بداية؟

رغم أن نظرية الانفجار العظيم (Big Bang) تُعد النموذج الكوني القياسي السائد لتفسير نشأة الكون، إلا أن بعض العلماء باتوا يرون أنها تواجه تحديات متزايدة من حيث التوافق مع الأدلة الرصدية. في مقال نشره الباحث مارتين لوبيز كورّيدويرا (Martín López Corredoira) من معهد الفيزياء الفلكية بجزر الكناري،


© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

يُعيد النظر في هذه النظرية التي ظلّت لعقود تُلقَّن كحقيقة راسخة، ويستعرض نماذج بديلة تستحق الاهتمام.

النموذج المهيمن اليوم (ΛCDM)، المستند إلى معادلات فريدمان والنسبية العامة لأينشتاين، يفترض كونًا يتمدد من نقطة ساخنة وكثيفة قبل 13.8 مليار سنة، ويُفسّر العديد من الظواهر مثل الخلفية الإشعاعية الكونية، وتوزيع المجرات، ونسب وفرة العناصر الخفيفة. لكنه في الوقت ذاته يتطلب مكونات غير مُفسّرة مثل الطاقة المظلمة والمادة المظلمة والتضخم الكوني.

في المقابل، تُطرح نماذج بديلة غير مرتبطة بالانفجار العظيم، أبرزها **نظرية الحالة المستقرة (Steady-State Cosmology)**، التي اقترحها فريد هويل وهيرمان بوندي وتوماس غولد في الأربعينيات. تفترض هذه النظرية أن الكون لا بداية له، وأن المادة تُخلَق باستمرار في الفضاء بمعدل يُبقي على كثافته ثابتة رغم التمدد، مما يُنتج مجرات جديدة تحلّ محل تلك التي تبتعد مع الزمن.

حتى منتصف القرن العشرين، حظيت النظريتان بدعم متوازن، خاصة في تفسير وفرة العناصر الخفيفة، غير أن المجتمع العلمي حسم أمره لصالح الانفجار العظيم، خاصة بعد اكتشاف إشعاع الخلفية الكونية في الستينيات. لكن، كما يشير المقال، لم تُمنح النماذج البديلة فرصة متكافئة، وأُهملت رغم قدرتها على تفسير بعض التناقضات في النموذج القياسي، مثل شباب المجرات البعيدة، أو فائض مصادر الراديو، أو توزيع الكوازارات.

يدعو كورّيدويرا إلى إعادة فتح باب النقاش العلمي حول طبيعة الكون وأصوله، دون افتراض مُسبق بأن للكون بداية. فربما يكون أزليًا، أو يخضع لدورات كونية متكررة — وهو طرح يتطلب جرأة علمية وتحرّرًا من المسلمات السائدة.

## The Big Bang Theory Is Not The Only Game In Town

© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

## إعلان:

**مؤتمر "ما بعد النموذج المعياري: من النظرية إلى التجربة" BSM-2025**

يسر مجلة *مسارات في الفيزياء* أن تعلن عن انعقاد مؤتمر **BSM-2025** تحت عنوان:

**ما بعد النموذج المعياري: من النظرية إلى التجربة**
**Beyond Standard Model: From Theory to Experiment (BSM-2025)**

وذلك في مدينة إسطنبول التركية، من **6 إلى 9 أكتوبر-تشرين الأول 2025**، بتنظيم مشترك بين مجلة *Progress in High Energy Physics (PHEP)* وجامعة صابانجي.

يركّز المؤتمر على آخر التطورات في الفيزياء النظرية والتجريبية والرصدية خارج إطار النموذج المعياري، ويجمع نخبة من العلماء لمناقشة مواضيع تمتد من فيزياء الجسيمات الأولية إلى علم الكون والجاذبيّة.

**يتضمن البرنامج:**

- محاضرات رئيسية يقدمها متحدثون مدعوّون من أبرز الباحثين في المجال.
- جلسات شفوية لمشاركات مختارة من الملخصات المقدّمة.
- جلسة ملصقات علمية لعرض أحدث الأبحاث ومناقشتها تفاعليًا.
- ترشيح الأوراق المقبولة للنشر في مجلة *PHEP*.

ندعو الباحثين في مجالات فيزياء الطاقة العالية، والنظرية الكمومية، وعلم الكون إلى المشاركة بأبحاثهم.

رابط المؤتمر:

https://indico.cern.ch/event/1507517/overview

## إعلان:

المؤتمر الدولي "الفيزياء في التصادم" PIC-2025

تدعوكم مجلة *مسارات في الفيزياء* لحضور فعاليات الدورة الجديدة من:

## المؤتمر الدولي للفيزياء في التصادم PIC 2025
## Physics in Collision – PIC-2025

والذي يُعقد في **مدينة زويل للعلوم والتكنولوجيا – مصر**، خلال الفترة من **20 إلى 23 أكتوبر 2025**.

منذ انطلاقه في عام 1981، يُعَدّ هذا المؤتمر منصة عالمية مرموقة تركّز على استعراض نتائج الأبحاث التجريبية الأحدث في فيزياء الجسيمات، بالإضافة إلى مجالات الفيزياء الفلكية للجسيمات، وفيزياء الأيونات الثقيلة، والفيزياء الجاذبيّة.

*أبرز فعاليات المؤتمر:*

- محاضرات مراجَعة يلقيها متحدثون مدعوّون من الخبراء العالميين.
- جلسات موازية وملصقات تتيح تبادلًا علميًا غير رسمي.
- نقاشات معمقة حول المكتشفات الحديثة وأثرها النظري والتجريبي.

رابط المؤتمر:

https://indico.cern.ch/event/1488071/

# هذه المجلة

- صادرة عن الجمعية العربيّة للفيزياء ArPS
- تهدف إلى تبسيط العلوم الفيزيائيّة والرياضيّة وجعل المعارف العميقة في هذه العلوم متاحةً أمام القارئ العربي المثقَّف

**يحوي العدد الخامس:**

- مقالًا ترجمةً لمحاضرة البروفسور روجر بنروز (جائزة نوبل 2020) التي ألقاها في افتتاح الجمعيّة العربيّة للفيزياء عن رؤاه حول متفرّدات الثقوب السوداء والكون الدوريّ.
- مقابلةً مع الدكتورة جوهانا إردمينجر Johanna Erdmenger أستاذة الفيزياء النظريّة في جامعة فورتسبورغ-ألمانيا، والشهيرة بأعمالها في مجال تطبيقات المثنويّة في فيزياء المادّة الكثيفة بالإضافة لأعمالها في مجال فيزياء الجسيمات وعلوم الكون.
- مقالاً أساسيًّا يغطّي أساسيّات المثنويّة وخاصّة مثنويّة AdS/CFT والمبدأ الهولوغرافي.
- ثلاثة مقالات عن نظريّة الأوتار وتحويلات المثنويّة بين نظريّاتها المتنوّعة، وعن فيزياء وتطبيقات الموادّ، وعن سيناريو التضخّم الكوني وكيفيّة حلّه لمشاكل نموذج الانفجار الكبير.
- تغطيةً لأخبار علميّة متنوّعة تمتدّ من إنجازات الصين العلميّة والتقانيّة في الاندماج النووي وعلم المواد، إلى الحوسبة الكمومية ودور قطّة شرودينغر في تحقيق معالَجة خالية من الأخطاء، مرورًا باقتراح أشكال جديدة للطاقة و/أو للمادّة المظلمة، أو لنظريّات بديلة عن الانفجار الكبير، وأصل مياه كوكبنا، وغيرها.
- مواضيعَ إثرائيّةً عديدة، منها شرحٌ عن الحائزين على جائزة نوبل للفيزياء للعام 2011 بفضل اكتشافهم التسارعَ الراهنَ في تمدّد الكون، ومعارفُ عن مثنويّة الكوارك-الهادرون في الكروموديناميك الكمومي وتطبيقات المثنويّة في الفيزياء الإحصائيّة، مع استعراضِ كتبٍ مرجعيّة وعرضِ مسألةٍ ذات فوائد تعليميّة، بالإضافة إلى إعلانٍ عن مؤتمرَين علميَّين تساهم فيهما الجمعية العربيّة للفيزياء، ونبذةٍ عن أستاذ مُربٍّ هو الدكتور المرحوم محمد البغدادي كشخصية علمية عربية.