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.

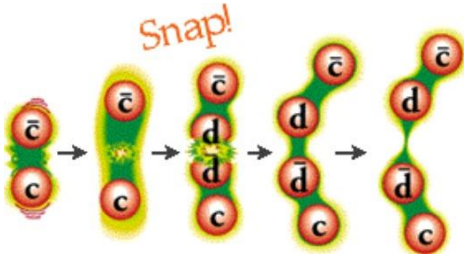
هذه العلاقة ليست هرمية فحسب؛ بل تُجسّد مثنويّة عميقةً وجوهرية، يُعَدّ فهمُها في إدراكِ كيف تُجسّد الكواركاتُ غيرُ المرئية واقعَها فقط من خلال الهادرونات المرصودة، وكيف تنبثق خصائص الهادرونات من ديناميكيّات مُكوِّناتها المحتَجَزة– أمرًا أساسيًّا لكشف القوة النووية الشديدة وبنية المادة المرئية ذاتها.

**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.

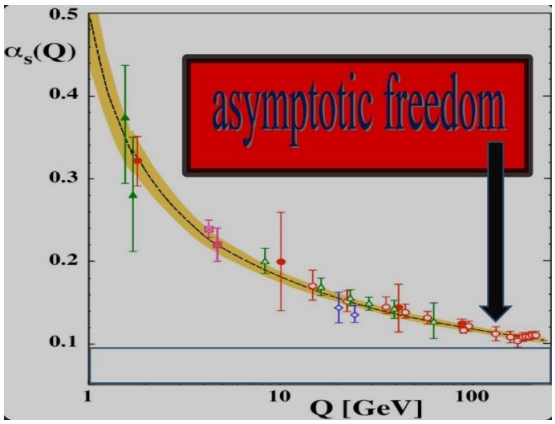
تكمن المثنويّة في أن كلتا الصورتين صحيحتان وجوهريّتان، تبعًا لمقياس الطاقة والمسألة المطروحة، فهما وصفان متكاملان لنفس الواقع، مرتبطان بديناميكيات الـ QCD المعقدة.

**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

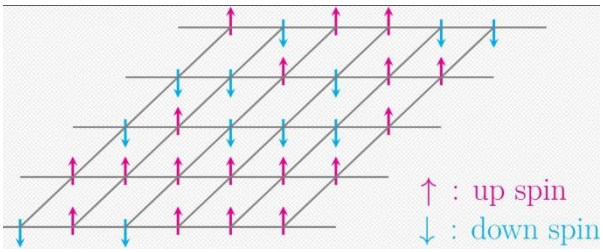
المثنوية مفهومٌ عميقٌ وواسع الانتشار في الفيزياء الإحصائية، ويلعب دورًا حاسمًا في فهم الانتقالات الطوريّة، والظواهر الحرجة، والطرائق الحاسوبيّة الموافقة، وحتى صلات الفيزياء الإحصائيّة بنظرية الحقل الكمومي وفيزياء الثقالة. وبرغم اختلافها عن مثنوية الكوارك–الهادرون في تجليّاتها الخاصّةِ المعتمدةِ على مقاس 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



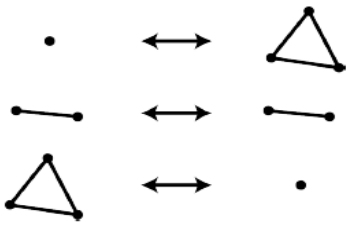
© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

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.

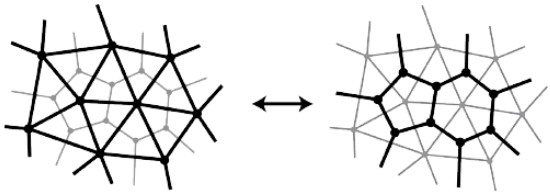
**********

## 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

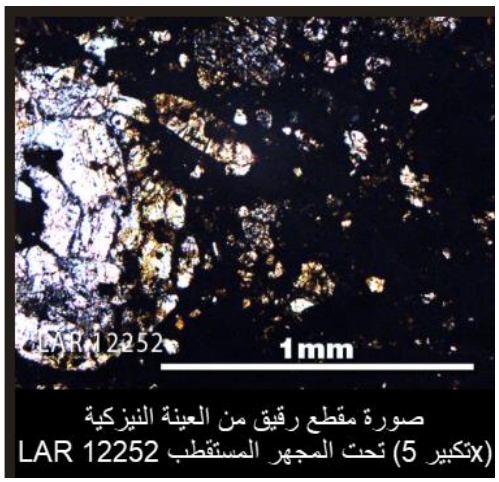
## اكتشاف يكشف أن مياه الأرض قد تكون نابعة من أصلها لا من الفضاء

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