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

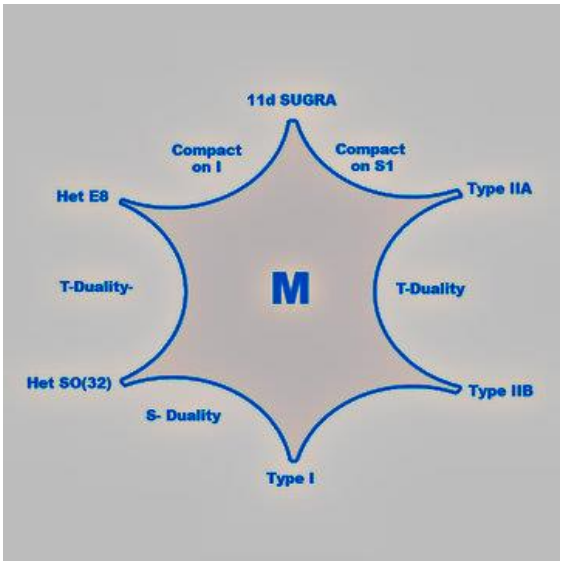
في كثير من الأحيان تحتاج النظريات غير القابلة لإعادة المعايرة إلى إضافة مجالات أو جسيمات أخرى عند طاقات عالية فيتغير سلوك النظرية في الطاقات العالية ونتمكن بذلك من التخلص من تلك اللانهائيات العنيدة وعندها تصبح النظرية قابلة لإعادة المعايرة. المثال على ذلك هو نظرية فيرمي فعند إضافة ثلاث بوزونات قياسية 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)



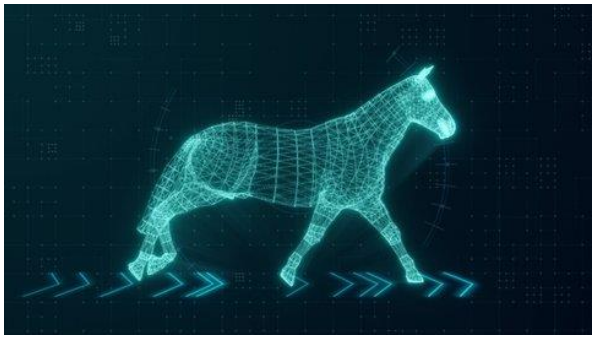
© 2025 الجمعيّة العربيّة للفيزياء

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

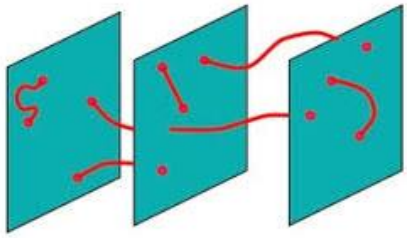
نظرية الأوتار. كوّن سترومنجر ووافا ثقبًا أسودَ مستخدمَين ما يعرف بأغشية دريشلي D–Branes او–Dirichlet Branes. تلك الأغشية عبارة عن أسطح ذات أبعاد متعددة (قد يكون لها بُعد واحد أو اثنان أو أكثر) اكتشفها جوزيف بولشينسكي عام 1995 كتشكيلاتٍ ديناميكية في نظرية الأوتار وسنتحدث عنها لاحقًا. استخدم سترومنجر ووافا 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 هوN^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

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 هوN^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