https://farid.ps/articles/physics_beyond_the_standard_model/ar.html

الفيزياء ما وراء النموذج القياسي

بحلول عام 2012، مع تأكيد وجود بوزون هيغز في مصادم الهادرونات الكبير في CERN، كان النموذج القياسي (SM) قد اكتمل نظريًا. تم العثور على كل جسيم تم التنبؤ به. وقد نجحت معادلاته في اجتياز كل اختبار تجريبي بدقة مذهلة.

ومع ذلك، لم يكن الشعور في الفيزياء شعورًا بالإنجاز، بل بالنقص. مثل قوانين نيوتن قبل آينشتاين، أو الفيزياء الكلاسيكية قبل ميكانيكا الكم، كان النموذج القياسي ناجحًا جدًا في النطاقات التي يمكننا اختبارها، لكنه عاجز عن الإجابة على الأسئلة الأعمق. كان خريطة شبه مثالية - ولكن لجزء صغير فقط من المشهد.

الجاذبية: القوة المفقودة

أبرز النواقص هي الجاذبية.

- يصف النموذج القياسي ثلاثًا من القوى الأساسية الأربع المعروفة: الكهرومغناطيسية، والقوة الضعيفة، والقوة القوية.
- الجاذبية، التي يصفها **النسبية العامة (GR)** لآينشتاين، غائبة تمامًا.

هذا ليس مجرد إغفال. النسبية العامة تعامل الجاذبية كانحناء في الزمكان، وهو حقل هندسي سلس، بينما يعالج النموذج القياسي القوى كحقول كمية تنتقل بواسطة جسيمات. محاولات تكميم الجاذبية بنفس الطريقة تصطدم بتضخمات لا يمكن إعادة تطبيعها.

النموذج القياسي والنسبية العامة هما كنظامي تشغيل مختلفين - رائعان في مجالاتهما، لكنهما غير متوافقين أساسًا. التوفيق بينهما هو ربما أكبر تحد في الفيزياء اليوم.

كتل النيوترينو

يتوقع النموذج القياسي أن تكون النيوترينوات بلا كتلة. لكن التجارب، بدءًا من كاشف سوبر-كاميوكاندي في اليابان (1998) وتأكيدًا عالميًا، أظهرت أن النيوترينوات تتذبذب بين الأنواع (الإلكترون، الميون، التاو). التذبذب يتطلب كتلة.

كان هذا أول دليل مؤكد على الفيزياء ما وراء النموذج القياسي. حاز الاكتشاف على جائزة نوبل لعام 2015 لكاجيتا وماكدونالد.

النيوترينوات خفيفة للغاية، أخف بمليون مرة على الأقل من الإلكترون. لا يفسر النموذج القياسي كتلها - لكنها قد تشير إلى فيزياء جديدة، مثل **آلية الأرجوحة**، أو النيوترينوات العقيمة، أو صلات بالكون المبكر. في بعض السيناريوهات، تمكّن النيوترينوات الثقيلة للأرجوحة **الليبتوجينيسيس**، حيث يتم إنشاء عدم تناسق الليبتون في الكون المبكر ويتحول لاحقًا إلى **عدم تناسق المادة-المادة المضادة** المُلاحظ.

المادة المظلمة

تشكل المادة المرئية التي يصفها النموذج القياسي أقل من 5% من الكون. الباقي غير مرئي.

- **المادة المظلمة** (~27% من الكون) تظهر فقط من خلال الجاذبية: تدور المجرات أسرع مما تسمح به المادة المرئية، وتنحني مجموعات المجرات الضوء أكثر مما ينبغي، ويتطلب إشعاع الخلفية الكونية الميكروي كتلة إضافية غير مرئية.
- لا يمكن لأي من جسيمات النموذج القياسي تفسيرها. النيوترينوات خفيفة جدًا وسريعة جدًا. المادة العادية نادرة جدًا.

تفترض النظريات جسيمات جديدة: WIMPs (جسيمات ضخمة ضعيفة التفاعل)، أكسيونات، نيوترينوات عقيمة، أو شيء أغرب. لكن على الرغم من عقود من البحث - كواشف تحت الأرض، تجارب المصادم، المسوحات الفلكية - لا تزال المادة المظلمة بعيدة المنال.

الطاقة المظلمة

الأكثر غموضًا هي **الطاقة المظلمة**، القوة التي تدفع التوسع المتسارع للكون.

- اكتُشفت في عام 1998 من خلال ملاحظات السوبرنوفا، تشكل الطاقة المظلمة ~68% من الكون.
- من حيث المبدأ، يمكن تفسيرها كـ"طاقة الفراغ" للحقول الكمية. لكن الحسابات البسيطة لنظرية الحقل الكمي تتنبأ بكثافة طاقة فراغ كبيرة بمقدار 120 درجة من القوة - أسوأ توقع في الفيزياء.

تُعد **مشكلة الثابت الكوني** الصدام الأكثر حدة بين نظرية الحقل الكمي والجاذبية. النموذج القياسي لا يقول شيئًا عن الطاقة المظلمة. إنها ثقب هائل في فهمنا للكون.

مشكلة التسلسل الهرمي

لغز عميق آخر يكمن داخل بوزون هيغز نفسه.

تم قياس كتلة هيغز بـ 125 جيجا إلكترون فولت. لكن التصحيحات الكمية يجب أن تدفعها إلى ما يقرب من مقياس بلانك (10^{19} جيجا إلكترون فولت)، ما لم تكن هناك إلغاءات معجزة. لماذا هي خفيفة جدًا مقارنة بمقاييس الطاقة الطبيعية للجاذبية؟

هذه هي **مشكلة التسلسل الهرمي**: يبدو هيغز مضبوطًا بدقة غير طبيعية. يشتبه الفيزيائيون بوجود فيزياء جديدة، مثل **التناظر الفائق (SUSY)**، التي يمكن أن تستقر كتلة هيغز من خلال إدخال جسيمات شريكة تلغي التصحيحات الخطيرة. (تشمل النقاشات حول **الطبيعية** أفكارًا من الحلول الديناميكية إلى التفكير **الأنثروبي** في "مشهد" محتمل من الفراغات.)

عدم تناسق المادة-المادة المضادة

يتضمن النموذج القياسي بعض انتهاكات CP، لكنها ليست كافية تقريبًا لتفسير لماذا يمتلئ الكون اليوم بالمادة بدلاً من كميات متساوية من المادة والمادة المضادة. كما ذُكر أعلاه، توفر آليات مثل **الليبتوجينيسيس** (غالبًا ما تُربط بأصل كتل النيوترينو في الأرجوحة) مسارًا جذابًا حيث تميل الفيزياء ما وراء النموذج القياسي إلى إمالة الميزان.

صورة جميلة لكنها ناقصة

يُطلق على النموذج القياسي أحيانًا "أنجح نظرية في الفيزياء". تتطابق تنبؤاته مع التجارب بدقة تصل إلى 10-12 منزلة عشرية. إنه يفسر تقريبًا كل ما نراه في مسرعات الجسيمات والمختبرات.

لكنه ناقص:

- يتجاهل الجاذبية.
- يفشل في تفسير كتل النيوترينو.
- لا يمكنه تفسير المادة المظلمة أو الطاقة المظلمة.
- يترك ألغازًا عميقة مثل مشكلة التسلسل الهرمي وعدم تناسق المادة-المادة المضادة دون حل.

يواجه الفيزيائيون الآن لحظة مألوفة في التاريخ. مثلما أفسحت ميكانيكا نيوتن المجال للنسبية، والفيزياء الكلاسيكية لميكانيكا الكم، يجب أن يفسح النموذج القياسي المجال في النهاية لشيء أعمق.

الكأس المقدسة: نظرية موحدة

الهدف النهائي هو **نظرية التوحيد الكبرى (GUT)** أو حتى **نظرية كل شيء (ToE)**: إطار يوحد القوى الأربع، ويفسر جميع الجسيمات، ويعمل باستمرار من أصغر المقاييس (الجاذبية الكمية) إلى الأكبر (علم الكونيات).

هذه هي الكأس المقدسة للفيزياء الحديثة. لهذا السبب يدفع الباحثون المصادمات إلى طاقات أعلى، ويبنون كواشف نيوترينو ضخمة، ويرسمون خريطة الكون بتلسكوبات، ويخترعون رياضيات جديدة جريئة.

ستستكشف الفصول القادمة المرشحين الرئيسيين:

- **التناظر الفائق (SUSY)** - تناظر بين جسيمات المادة والقوة.
- **نظرية الأوتار ونظرية M** - حيث الجسيمات عبارة عن أوتار تهتز، ويظهر الجرافيتون بشكل طبيعي.
- **الأبعاد الإضافية** - من فكرة كالوزا-كلاين المبكرة إلى نماذج راندال-سوندروم الحديثة.
- **مقاربات أخرى** - مثل جاذبية الكم الحلقية والسلامة التدريجية.

كل هذه الأفكار نشأت ليس كعقيدة، بل كعلم في أفضل حالاته: ملاحظة الشقوق، بناء نظريات جديدة، واختبارها ضد الواقع.

التناظر الفائق: التناظر العظيم القادم؟

للفيزياء تاريخ طويل من التوحيد من خلال التناظر. وحدت معادلات ماكسويل الكهرباء والمغناطيسية. وحدت النسبية الخاصة الزمان والمكان. وحدت نظرية الكهروضعيفة اثنتين من القوى الأساسية الأربع. كل قفزة إلى الأمام جاءت من اكتشاف تناظر مخفي في الطبيعة.

التناظر الفائق - أو SUSY، كما يسميه الفيزيائيون بحب - هو الاقتراح الجريء بأن التناظر العظيم التالي يربط بين فئتين مختلفتين ظاهريًا من الجسيمات: **المادة** و**القوى**.

الفيرميونات والبوزونات: المادة مقابل القوة

في النموذج القياسي، تنقسم الجسيمات إلى عائلتين عريضتين:

- **الفيرميونات (سبين 1/2):** تشمل الكواركات والليبتونات، لبنات بناء المادة. سبينها نصف صحيح يعني أنها تتبع مبدأ استبعاد باولي: لا يمكن لفيرميونين متطابقين احتلال نفس الحالة. هذا هو سبب وجود قذائف منظمة في الذرات ولماذا تكون المادة مستقرة.

- **البوزونات (سبين صحيح):** تشمل الفوتونات، الجلوونات، بوزونات W وZ، وهيغز. تنقل البوزونات القوى. على عكس الفيرميونات، يمكنها التكدس في نفس الحالة، وهذا هو سبب وجود الليزر (الفوتونات) وتكثيف بوز-آينشتاين.

باختصار: الفيرميونات تشكل المادة، والبوزونات تنقل القوى.

فرضية التناظر الفائق

يفترض التناظر الفائق وجود تناظر يربط الفيرميونات والبوزونات. لكل فيرميون معروف، هناك شريك بوزوني. ولكل بوزون معروف، شريك فيرميوني.

- الكواركات ← **سكواركات**
- الليبتونات ← **سليبتونات**
- الجلوونات ← **جلوينو**
- قطاع القياس/هيغز ← **نيوترالينو** (خليط من بينو، وينو، هيجزينو؛ محايد) و**شارجينو** (خليط من وينو، هيجزينو؛ مشحون)

("فوتينو" و"زينو" هما ألقاب قديمة لحالات القياس الذاتية؛ التجارب تبحث فعليًا عن **حالات الكتلة الذاتية** المذكورة أعلاه.)

لماذا نقترح مثل هذا التضاعف الجذري لعالم الجسيمات؟ لأن التناظر الفائق يعد بحلول أنيقة لبعض المشكلات الأعمق التي تركها النموذج القياسي.

حل مشكلة التسلسل الهرمي

أحد أعظم جاذبيات التناظر الفائق هو قدرته على معالجة **مشكلة التسلسل الهرمي**: لماذا يكون بوزون هيغز خفيفًا جدًا مقارنة بمقياس بلانك.

في النموذج القياسي، يجب أن تدفع التصحيحات الكمية من الجسيمات الافتراضية كتلة هيغز إلى قيم هائلة. يقدم التناظر الفائق جسيمات شريكة تلغي هذه التضخمات. النتيجة: تثبت كتلة هيغز بشكل طبيعي، دون ضبط دقيق (على الأقل في طيف "طبيعي" للتناظر الفائق).

التناظر الفائق والتوحيد الكبير

دافع آخر للتناظر الفائق يأتي من توحيد القوى.

- تشغيل ثوابت اقتران القوة القوية، والضعيفة، والكهرومغناطيسية إلى طاقات أعلى يظهر أنها، في النموذج القياسي، تكاد تلتقي عند نقطة واحدة لكنها لا تفعل ذلك تمامًا.
- في التناظر الفائق، مع مساهمة الجسيمات الشريكة في الحسابات، تلتقي الثوابت بشكل جميل عند حوالي 10^{16} جيجا إلكترون فولت.

هذا يشير إلى أنه عند طاقات عالية جدًا، قد تتوحد القوى الثلاث في **نظرية توحيد كبرى (GUT)**.

التناظر الفائق كمرشح للمادة المظلمة

يوفر التناظر الفائق أيضًا مرشحًا طبيعيًا لـ **المادة المظلمة**.

إذا كان التناظر الفائق صحيحًا، يجب أن يكون أحد الجسيمات الشريكة مستقرًا ومحايدًا كهربائيًا. المرشح الرئيسي هو **أخف نيوترالينو**، خليط من البينو، الوينو، والهيجزينو.

ستتفاعل النيوترالينو فقط بشكل ضعيف، مما يناسب ملف WIMPs (جسيمات ضخمة ضعيفة التفاعل). إذا تم اكتشافها، يمكن أن تفسر 27% المفقودة من مادة الكون.

البحث التجريبي عن التناظر الفائق

لعقود، كان الفيزيائيون يأملون أن تظهر الجسيمات الفائقة التناظرية فوق نطاقات الطاقة التي تم استكشافها بالفعل.

- **LEP (CERN، 1990s):** لم يتم العثور على جسيمات فائقة التناظر حتى ~100 جيجا إلكترون فولت.
- **Tevatron (Fermilab، 1990s-2000s):** لم يتم العثور على جسيمات شريكة.
- **LHC (CERN، 2010s-2020s):** تصادمات البروتون-البروتون حتى **13.6 تيرا إلكترون فولت** (التصميم: **14 تيرا إلكترون فولت**). على الرغم من البحث الضخم، لا توجد دلائل على السكواركات، الجلوينو، أو النيوترالينو حتى نطاقات متعددة التيرا إلكترون فولت.

كان عدم اكتشاف التناظر الفائق في LHC مخيبًا للآمال. تم تقييد العديد من أبسط إصدارات التناظر الفائق، مثل "النموذج القياسي الفائق التناظر الأدنى" (MSSM)، بشكل كبير. يتم دفع طيف "الطبيعية" إلى أثقل، مما يعني المزيد من الضبط إذا كان التناظر الفائق يعيش بالقرب من نطاق التيرا إلكترون فولت.

ومع ذلك، لم يتم استبعاد التناظر الفائق. تنبأ نماذج أكثر تعقيدًا بجسيمات شريكة أثقل أو أكثر دقة، ربما خارج نطاق وصول LHC، أو بتفاعلات ضعيفة جدًا بحيث لا يمكن اكتشافها بسهولة.

الجمال الرياضي للتناظر الفائق

إلى جانب دوافعه الفينومينولوجية، يتمتع التناظر الفائق بأناقة رياضية عميقة.

- إنه التمديد الوحيد الممكن لتناظرات الزمكان المتسقة مع النسبية وميكانيكا الكم.
- النظريات الفائقة التناظر غالبًا ما تكون أكثر قابلية للحساب: إنها تروض التضخمات وتكشف عن هياكل مخفية في نظرية الحقل الكمي.
- في نظرية الأوتار، التناظر الفائق ضروري للتوافق: بدونه، تحتوي النظرية على تاكيونات وأمراض أخرى.

حتى لو لم تتحقق الطبيعة من التناظر الفائق عند طاقات يمكن الوصول إليها، فقد أثرت رياضياته بالفعل في الفيزياء.

حالة التناظر الفائق

اليوم، يحتل التناظر الفائق مكانة غريبة.

- يظل أحد أكثر الأطر القسرية للفيزياء ما وراء النموذج القياسي.
- يحل مشكلة التسلسل الهرمي، ويدعم التوحيد، ويقدم مرشحًا للمادة المظلمة.
- ومع ذلك، لم يتم العثور على دليل تجريبي بعد.

إذا استمر LHC وخلفاؤه في عدم العثور على شيء، فقد يتحقق التناظر الفائق فقط عند نطاقات طاقة بعيدة عن متناولنا - أو ربما اختارت الطبيعة مسارًا مختلفًا تمامًا.

طريقة، وليس عقيدة

يوضح التناظر الفائق الطريقة العلمية في العمل.

حدد الفيزيائيون المشكلات: مشكلة التسلسل الهرمي، التوحيد، المادة المظلمة. اقترحوا تناظرًا جديدًا جريئًا يحلها جميعًا. صمموا تجارب لاختباره. حتى الآن، النتائج سلبية - لكن هذا لا يعني أن الفكرة كانت مضيعة. لقد شحذ التناظر الفائق أدواتنا، وأوضح ما نسعى إليه، ووجه أجيالًا كاملة من البحث.

مثل الأثير أو الدورات الملحمية من قبله، قد يكون التناظر الفائق حجر زاوية نحو الحقيقة الأعمق، سواء نجا كالكلمة الأخيرة أم لا.

نظرية الأوتار ونظرية M

غالبًا ما تكون الفيزياء ما وراء النموذج القياسي مدفوعة بالتصحيحات: حل مشكلة التسلسل الهرمي، تفسير المادة المظلمة، توحيد اقتران القياس. نظرية الأوتار مختلفة. لا تبدأ بلغز معين. بدلاً من ذلك، تبدأ بالرياضيات - وتنتهي بإعادة تشكيل مفهومنا الكلي للمكان، والزمان، والمادة.

الأصول: نظرية ولدت من الفشل

بدأت نظرية الأوتار، بشكل مفاجئ، ليس كنظرية كل شيء، بل كمحاولة فاشلة لفهم القوة النووية القوية.

في أواخر الستينيات، قبل تطوير QCD بالكامل، كان الفيزيائيون يحاولون تفسير حديقة الهادرونات. لاحظوا أنماطًا في بيانات التبعثر تشير إلى أن الرنين يمكن نمذجته بواسطة أوتار تهتز.

نموذج "الرنين المزدوج"، الذي قدمه فينيزيانو في عام 1968، وصف التفاعلات القوية كما لو كانت الهادرونات هي اهتزازات أوتار صغيرة. كان أنيقًا ولكنه تُرك بسرعة بمجرد ظهور QCD كنظرية حقيقية للقوة القوية.

ومع ذلك، رفضت نظرية الأوتار أن تموت. كانت مخفية داخل معادلاتها ميزات رائعة بدت وكأنها تشير إلى ما هو أبعد من الفيزياء النووية.

الاكتشاف المذهل: الجرافيتون

عندما قام المنظرون بتكميم اهتزازات الأوتار، اكتشفوا أن الطيف يتضمن بالضرورة **جسيمًا بلا كتلة ذو سبين 2**.

كان هذا صادمًا. أظهرت نظرية الحقل الكمي أن الجسيم بلا كتلة ذو سبين 2 فريد من نوعه: يجب أن يكون الكم للجاذبية، **الجرافيتون**.

كما علق جون شوارتز لاحقًا: **"لكن ظهرت حقيقة مذهلة: تضمنت رياضيات نظرية الأوتار بالضرورة جسيمًا بلا كتلة ذو سبين 2 - جرافيتون."**

ما بدأ كنظرية للهادرونات أنتج عن طريق الخطأ لبنة بناء الجاذبية الكمية.

الفكرة الأساسية: الأوتار، وليس النقاط

في جوهرها، تحل نظرية الأوتار محل الجسيمات النقطية بأجسام أحادية البعد صغيرة: الأوتار.

- يمكن أن تكون الأوتار **مفتوحة** (بها نقطتا نهاية) أو **مغلقة** (حلقات).
- تتوافق أوضاع اهتزاز الأوتار المختلفة مع جسيمات مختلفة.
    - قد يظهر اهتزاز معين كفوتون.
    - آخر كجلوون.
    - آخر ككوارك.
    - ووضع واحد، حتماً، كجرافيتون.

هذا التحول البسيط - من النقاط إلى الأوتار - يحل العديد من التضخمات التي تعاني منها الجاذبية الكمية. حجم الأوتار المحدود يوزع التفاعلات التي كانت ستنفجر عند المسافة الصفرية.

التناظر الفائق والأوتار الفائقة

كانت الإصدارات المبكرة من نظرية الأوتار تعاني من مشكلات: تحتوي على تاكيونات (عدم استقرار) وتتطلب ميزات غير واقعية. جاء الاختراق مع إدخال **التناظر الفائق**، مما أدى إلى **نظرية الأوتار الفائقة** في السبعينيات والثمانينيات.

قضت الأوتار الفائقة على التاكيونات، وأدرجت الفيرميونات، وجلبت تناسقًا رياضيًا جديدًا.

لكن كان هناك عائق: تعمل نظرية الأوتار فقط في أبعاد أعلى. على وجه التحديد، **10 أبعاد زمكانية**.

- الأربعة التي نراها (ثلاثة للمكان، واحد للزمان).
- ستة أخرى، مضغوطة أو ملفوفة على مقاييس صغيرة، غير مرئية للتجارب الحالية.

هذه الفكرة، مهما بدت جذرية، لم تكن جديدة تمامًا. في العشرينيات، كانت **نظرية كالوزا-كلاين** قد ألمحت بالفعل إلى أن الأبعاد الإضافية يمكن أن توحد الجاذبية والكهرومغناطيسية. أحيت نظرية الأوتار هذه الفكرة وقامت بتوسيعها بشكل هائل.

النظريات الخمس للأوتار

بحلول منتصف الثمانينيات، وجد الفيزيائيون أن نظرية الأوتار ليست فريدة، بل تأتي في **خمس إصدارات متميزة**:

1. **النوع الأول** - أوتار مفتوحة ومغلقة، تشمل الأوتار الموجهة وغير الموجهة.
2. **النوع IIA** - أوتار مغلقة، موجهة، غير كايرالية.
3. **النوع IIB** - أوتار مغلقة، موجهة، كايرالية.
4. **هيتيروتيك SO(32)** - أوتار مغلقة ببنية هجينة.
5. **هيتيروتيك $E_8 \times E_8$** - إصدار عالي التناظر، لاحقًا حاسم للربط بالفيزياء الواقعية للجسيمات.

كل واحدة بدت متسقة رياضيًا، لكن لماذا يجب أن تختار الطبيعة واحدة؟

ثورة الأوتار الفائقة الأولى

في عام 1984، أظهر مايكل جرين وجون شوارتز أن نظرية الأوتار يمكن أن تلغي الشذوذات الكمية تلقائيًا - شيء كان يجب على نظريات الحقل الكمي تصميمه بعناية. أدى هذا الاكتشاف إلى إطلاق **ثورة الأوتار الفائقة الأولى**، حيث تحول آلاف الفيزيائيين إلى نظرية الأوتار كمرشح لنظرية موحدة لجميع القوى.

كانت أول إطار جدي تجعل فيه الجاذبية الكمية ليست متسقة فقط بل حتمية.

ثورة الأوتار الفائقة الثانية: نظرية M

في منتصف التسعينيات، تكشفت ثورة ثانية. اكتشف إدوارد ويتن وآخرون أن النظريات الخمس للأوتار ليست منافسة، بل حدود مختلفة لنظرية واحدة أعمق: **نظرية M**.

يُعتقد أن نظرية M تعيش في **11 بعدًا** وتشمل ليس فقط الأوتار ولكن الأجسام ذات الأبعاد الأعلى المسماة **الأغشية** (اختصار للأغشية).

- الأغشية أحادية البعد = الأوتار.
- الأغشية ثنائية البعد = الأغشية.
- الأغشية ذات الأبعاد الأعلى حتى 9 أبعاد مكانية.

أدت هذه الأغشية إلى إمكانيات جديدة غنية: يمكن أن توجد أكوان بأكملها كأغشية ثلاثية الأبعاد تطفو في فضاء ذي أبعاد أعلى، مع تسرب الجاذبية إلى الكتلة بينما تظل القوى الأخرى محصورة. ألهم هذا الصورة نماذج الأبعاد الإضافية الحديثة مثل **راندال-سوندروم**.

أمثلة بارزة: كالوزا-كلاين وراندال-سوندروم

- **كالوزا-كلاين (1920s):** اقترح بعدًا خامسًا إضافيًا لتوحيد الجاذبية والكهرومغناطيسية. تم تأجيل الفكرة لعقود، لكن نظرية الأوتار أحيتها بشكل أعظم. تظل الأبعاد الإضافية المضغوطة ميزة أساسية في نماذج الأوتار.

- **راندال-سوندروم (1999):** اقترح أبعادًا إضافية "مشوهة"، حيث يكون كوننا غشاء ثلاثي الأبعاد مدمج في أبعاد أعلى. تنتشر الجاذبية في الكتلة، مما يفسر لماذا هي أضعف من القوى الأخرى. تتنبأ هذه النماذج بإشارات محتملة في مصادمات الجسيمات أو انحرافات عن قانون نيوتن على مسافات قصيرة جدًا.

التلميحات التجريبية والتحديات

تقدم نظرية الأوتار ادعاءات جريئة، لكن اختبارها صعب للغاية.

- **الأبعاد الإضافية:** يمكن أن تكشف عن نفسها من خلال إشارات الطاقة المفقودة أو **إثارة كالوزا-كلاين** - ربما لـ **الجرافيتونات أو حتى حقول النموذج القياسي**، حسب الإعداد. تصل قيود المصادم عادةً إلى نطاق **متعدد التيرا إلكترون فولت**.
- **الجرافيتونات:** يُتوقع وجود جسيم بلا كتلة ذو سبين 2، لكن اكتشاف جرافيتون واحد خارج عن التقنية الممكنة. التأثيرات غير المباشرة، مثل الانحرافات في الموجات الجاذبية، ممكنة.
- **التناظر الفائق:** تتطلب نظرية الأوتار التناظر الفائق عند مقياس ما، لكن LHC لم يجد بعد جسيمات شريكة.
- **علم الكونيات:** قد يحمل الكون المبكر، والتضخم، وإشعاع الخلفية الكونية الميكروي بصمات لفيزياء الأوتار، على الرغم من أن النتائج حتى الآن غير حاسمة.

على الرغم من التحديات، قدمت نظرية الأوتار أرضًا خصبة للرياضيات، ملهمة التقدم في الهندسة، والطوبولوجيا، والثنائيات مثل AdS/CFT (تربط الجاذبية في الأبعاد الأعلى بنظرية الحقل الكمي بدون جاذبية).

الجمال والجدل

يجادل المؤيدون بأن نظرية الأوتار هي الطريق الأكثر وعدًا لنظرية موحدة: تشمل الجاذبية الكمية، توحد جميع القوى، وتفسر لماذا يجب أن يوجد جرافيتون.

ينتقد النقاد أنه بدون تأكيد تجريبي، فإن نظرية الأوتار تعرض خطر الانفصال عن العلم التجريبي. "مشهدها" الشاسع من الحلول الممكنة (بقدر 10^{500}) يجعل من الصعب استخراج تنبؤات فريدة.

يتفق الطرفان على شيء واحد: لقد غيرت نظرية الأوتار طريقة تفكيرنا في الفيزياء، مقدمة لغة جديدة للتوحيد.

نحو نظرية كل شيء

إذا كان التناظر الفائق هو الخطوة التالية بعد النموذج القياسي، فإن نظرية الأوتار هي الخطوة التالية بعد ذلك: مرشحة لـ **نظرية كل شيء** التي طال البحث عنها.

ادعاؤها الأجرأ ليس فقط أنها تشمل النموذج القياسي والجاذبية، بل أن هذه نتائج حتمية لأوتار تهتز في أبعاد أعلى. الجرافيتون ليس إضافة - إنه مدمج.

ما إذا كانت الطبيعة قد اختارت هذا المسار يبقى ليتم اكتشافه.

استكشاف الحدود: التجارب ما وراء النموذج القياسي

النظريات هي شريان الحياة للفيزياء، لكن التجارب هي نبضها. التناظر الفائق، ونظرية الأوتار، والأبعاد الإضافية هي بنى رياضية جميلة، لكنها تعيش أو تموت بالدليل. إذا كانت ستكون أكثر من تكهنات، يجب أن تترك بصمات في البيانات.

لقد ابتكر الفيزيائيون طرقًا ذكية للبحث عن هذه البصمات - في المصادمات، في الكون، وفي هيكلية الزمكان نفسه.

المصادمات: البحث عن الجسيمات الشريكة والجرافيتونات

مصادم الهادرونات الكبير (LHC) في CERN هو أقوى مسرع جسيمات في العالم، يصطدم بالبروتونات عند طاقات تصل إلى **13.6 تيرا إلكترون فولت** (التصميم: **14 تيرا إلكترون فولت**). لقد كان الأداة الأساسية للبشرية لاستكشاف الفيزياء ما وراء النموذج القياسي.

التناظر الفائق في LHC

- **البحث عن الجسيمات الشريكة:** فحصت تجارب ATLAS وCMS البيانات بحثًا عن السكواركات، الجلوينو، والنيوترالينو/الشارجينو. غالبًا ما تظهر هذه كإشارات "الطاقة المفقودة"، حيث تهرب جسيمات التناظر الفائق من الكشف.
- **النتائج:** لم يتم العثور على جسيمات فائقة التناظر مؤكدة حتى نطاق متعدد التيرا إلكترون فولت. هذا استبعد العديد من أبسط نماذج التناظر الفائق ويدفع التناظر الفائق "الطبيعي" إلى أراضي أثقل وأكثر ضبطًا.

الجرافيتونات والأبعاد الإضافية

- **أوضاع كالوزا-كلاين:** إذا وجدت أبعاد إضافية، قد تظهر **الجرافيتونات أو حتى حقول النموذج القياسي** كإثارة كالوزا-كلاين ضخمة، يمكن اكتشافها كرنين في قنوات الديليبتون، الديفوتون، أو الديجيت.
- **إشارات راندال-سوندروم:** يمكن أن تنتج الأبعاد الإضافية المشوهة رنين الجرافيتون بأنماط زاوية مميزة للسبين 2.
- **النتائج:** لم تجد عمليات البحث في LHC دليلاً حتى الآن، لكنها دفعت الحدود إلى نطاق **متعدد التيرا إلكترون فولت**، مقيدة حجم الأبعاد الإضافية، وتشوهها، وهندستها.

الثقوب السوداء المجهرية

تشير بعض النظريات إلى أنه إذا أصبحت الجاذبية قوية عند نطاق التيرا إلكترون فولت، فقد تتشكل ثقوب سوداء صغيرة في تصادمات LHC، تتبخر في انفجارات من الجسيمات. لم يُرَ مثل هذه الأحداث.

التجارب الدقيقة: اختبار الجاذبية على نطاقات صغيرة

إذا وجدت أبعاد إضافية، فقد ينهار قانون نيوتن للجاذبية على مسافات قصيرة.

- **تجارب التوازن الالتوائي ("Eöt-Wash"):** تختبر قانون التربيع العكسي حتى **نطاقات دون المليمتر** - حاليًا **عشرات الميكرونات (~50 ميكرومتر)**.
- **النتائج:** لم يتم العثور على انحرافات. تستبعد هذه التجارب فئة واسعة من سيناريوهات الأبعاد الإضافية بأطوال مميزة **أكبر من ~10^{-4} متر** (يعتمد على النموذج).

تتمتع هذه التجارب المنضدية بحساسية مذهلة، تستكشف نطاقات غير متاحة للمصادمات.

الموجات الجاذبية: نافذة جديدة على الجاذبية الكمية

فتح اكتشاف الموجات الجاذبية بواسطة LIGO في عام 2015 حدودًا جديدة.

- **الاستقطابات الإضافية / الانتشار المعدل:** تتنبأ بعض نماذج الجاذبية الكمية أو الأبعاد الإضافية بانحرافات عن النسبية العامة (استقطابات إضافية، تشتت، أو رنين معدل).
- **الطيف الرنيني:** قد يكشف "رنين" الثقوب السوداء بعد الاندماج عن انحرافات دقيقة عن النسبية العامة.
- **الموجات الجاذبية الأولية:** قد تحمل تموجات من الانفجار العظيم بصمات لفيزياء الأوتار، يمكن اكتشافها بواسطة مراصد مستقبلية مثل LISA أو تلسكوب آينشتاين.

حتى الآن، تتفق الملاحظات مع النسبية العامة ضمن الشكوك الحالية، لكن دقة أعلى قد تكشف عن مفاجآت.

علم الكونيات: الكون كمختبر

الكون نفسه هو مسرع الجسيمات النهائي.

- **إشعاع الخلفية الكونية الميكروي (CMB):** تعكس التقلبات الصغيرة الكون المبكر. تتنبأ بعض نماذج الأوتار بإشارات محددة، مثل عدم الجوسيانية أو ميزات تذبذبية.
- **التضخم:** قد يكون التوسع السريع للكون مدفوعًا بحقول مرتبطة بنظرية الأوتار. سيكون اكتشاف أوضاع B الأولية في CMB دليلاً قويًا.
- **البحث عن المادة المظلمة:** النيوترالينو من التناظر الفائق هي مرشحة رئيسية للمادة المظلمة. تبحث تجارب مثل LUX-ZEPLIN، XENONnT، وPandaX عن WIMPs عبر الارتدادات النووية.
- **الأكسيونات:** تتنبأ نظرية الأوتار أيضًا بجسيمات شبيهة بالأكسيون، يمكن اكتشافها عبر تجاويف رنينية أو ملاحظات فلكية.

حتى الآن، السماء صامتة. لم يتم اكتشاف المادة المظلمة، وتتفق بيانات الكونيات مع نموذج ΛCDM بدون بصمات واضحة للأوتار.

الحالة الحالية: القيود، وليس التأكيدات

لم تؤكد عقود من البحث التناظر الفائق، أو الأبعاد الإضافية، أو إشارات الأوتار. لكن غياب الدليل ليس دليلاً على الغياب:

- قد يوجد التناظر الفائق عند نطاقات خارج متناول LHC أو في طيف أقل وضوحًا؛ تفضل النتائج السلبية حتى الآن **إصدارات أكثر ضبطًا ("أقل طبيعية")** إذا كان التناظر الفائق قريبًا من نطاق التيرا إلكترون فولت.
- قد تكون الأبعاد الإضافية أصغر، أكثر تشوهًا، أو مخفية بطريقة أخرى عن المسبارات الحالية.
- قد تترك نظرية الأوتار بصمات يمكن اكتشافها فقط في الكون المبكر جدًا، متاحة فقط من خلال علم الكونيات.

قليل من **الشذوذات الدقيقة** (مثل قياس **(g-2)** الميون وبعض **توترات فيزياء النكهة**) تظل **مثيرة للاهتمام لكنها غير مستقرة**؛ إنها تحفز التدقيق المستمر دون قلب النموذج القياسي بعد.

ما فعلته التجارب هو **تضييق فضاء المعلمات**. لقد أخبرتنا أين لا يوجد التناظر الفائق، ومدى صغر الأبعاد الإضافية، ومدى قوة أو ضعف تفاعل المادة المظلمة.

الطريق إلى الأمام

تعد التجارب المستقبلية بدفع أعمق:

- **LHC عالي الإضاءة (HL-LHC):** سيجمع ~10 أضعاف البيانات، مستكشفًا التناظر الفائق حتى كتل أعلى والعمليات النادرة.
- **مصادم الدائرة المستقبلية (FCC-hh):** مقترح مصادم 100 تيرا إلكترون فولت، قوي بما يكفي لاستكشاف نطاقات الطاقة حيث قد تظهر فيزياء GUT.
- **LISA (2030s):** مرصد موجات جاذبية قائم على الفضاء، حساس للإشارات الأولية من الكون المبكر.
- **كواشف المادة المظلمة من الجيل القادم:** بحساسية للإشارات الضعيفة، قد تلتقط أخيرًا WIMP أو أكسيون.

العلم كرحلة

قصة التجارب لفيزياء ما وراء النموذج القياسي ليست قصة فشل، بل عملية.

- النتائج السلبية تستبعد النماذج البسيطة وتحدد نظرياتنا.
- كل قيد يوجهنا نحو أطر أكثر دقة وتنبؤية.
- غياب التناظر الفائق أو الأبعاد الإضافية عند نطاق التيرا إلكترون فولت لا يقتل الأفكار - إنه يدفعها إلى أراضي جديدة.

مثلما حطمت تجربة رقاقة الذهب لرذرفورد نموذج بودنغ البرقوق، أو حطمت LIGO الشكوك حول الموجات الجاذبية، قد يأتي الاكتشاف الكبير التالي فجأة - ويغير كل شيء.

نحو نظرية كل شيء

لقرون، تقدمت الفيزياء من خلال التوحيد. وحد نيوتن السماء والأرض تحت قانون واحد للجاذبية. وحد ماكسويل الكهرباء والمغناطيسية. وحد آينشتاين الزمان والمكان. أظهرت نظرية الكهروضعيفة أن قوتين مختلفتين جدًا هما جوانب لقوة واحدة.

الخطوة التالية الطبيعية هي الأكثر جرأة حتى الآن: توحيد **جميع التفاعلات الأساسية الأربعة** - القوية، الضعيفة، الكهرومغناطيسية، والجاذبية - في إطار واحد متسق ذاتيًا. هذه هي الكأس المقدسة للفيزياء: **نظرية كل شيء (ToE)**.

لماذا تهم نظرية كل شيء

التوحيد الكامل ليس مجرد أناقة فلسفية؛ إنه يعالج مشكلات عملية ومفاهيمية عميقة:

- **الجاذبية الكمية:** تنهار النسبية العامة عند مقياس بلانك (10^{19} جيجا إلكترون فولت). فقط نظرية كمية للجاذبية يمكن أن تفسر الثقوب السوداء وتفرد الانفجار العظيم.
- **الطبيعية والضبط الدقيق:** مشكلة التسلسل الهرمي ومشكلة الثابت الكوني تصرخان للحصول على تفسير أعمق.
- **معلمات النموذج القياسي:** لماذا تمتلك الجسيمات الكتل والشحنات التي لديها؟ لماذا ثلاثة أجيال من الكواركات والليبتونات؟ قد تفسر نظرية كل شيء هذه الألغاز.
- **علم الكونيات:** المادة المظلمة، والطاقة المظلمة، والتضخم قد تكون جميعها مرتبطة بفيزياء عند مقياس التوحيد.

لن توحد نظرية كل شيء القوى فقط - بل ستوحد المقاييس، من أصغر أوتار نظرية الكم إلى أكبر الهياكل الكونية.

التناظر الفائق والتوحيد الكبير

التناظر الفائق (SUSY)، إذا تحقق في الطبيعة، يوفر حجر زاوية لنظرية كل شيء.

- **حل مشكلة التسلسل الهرمي:** تلغي الجسيمات الشريكة التصحيحات المتضخمة لكتلة هيغز.
- **توحيد اقتران القياس:** مع التناظر الفائق، تتقارب قوى القوى الثلاث بشكل جميل عند 10^{16} جيجا إلكترون فولت، مما يشير إلى **نظرية توحيد كبرى (GUT)**.
- **مرشح المادة المظلمة:** يوفر النيوترالينو تفسيرًا طبيعيًا للمادة المظلمة الكونية.

تتصور GUTs المستوحاة من التناظر الفائق (مثل SO(10)، SU(5)، أو E_6) أنه عند طاقات عالية جدًا، تتوحد الكواركات والليبتونات في مجاميع أكبر، وتندمج القوى في مجموعة قياس واحدة.

لكن التناظر الفائق لم يظهر بعد في التجارب. إذا وجد فقط عند نطاقات خارج متناولنا، فقد تظل قوته التوحيدية مغرية ولكن مخفية.

نظرية الأوتار: الجاذبية الكمية والجرافيتون

تذهب نظرية الأوتار أبعد. بدلاً من تصحيح النموذج القياسي، فإنها تعيد كتابة الأساس:

- **الأوتار، وليس النقاط:** جميع الجسيمات هي اهتزازات لأوتار صغيرة.
- **يظهر الجرافيتون بشكل طبيعي:** الإثارة بلا كتلة ذات سبين 2 حتمية، مما يعني أن الجاذبية الكمية مدمجة.
- **التوحيد:** تنتج أوضاع اهتزاز مختلفة جميع الجسيمات المعروفة - الكواركات، الليبتونات، بوزونات القياس، هيغز - ضمن إطار واحد.
- **الأبعاد الإضافية:** تتطلب نظرية الأوتار 10 أبعاد زمكانية؛ تتطلب نظرية M 11، مع أبعاد مخفية مضغوطة أو مشوهة.

في هذه الرؤية، التوحيد ليس صدفة - إنه هندسة. تختلف القوى لأن الأوتار تهتز بطرق مختلفة، مشكلة بطوبولوجيا الأبعاد الإضافية.

نظرية M وعوالم الأغشية

أدى اكتشاف أن النظريات الخمس للأوتار مترابطة بالثنائيات إلى نظرية M، إطار أعظم:

- تشمل الأوتار، والأغشية، والأغشية ذات الأبعاد الأعلى.
- تقترح أن يكون كوننا غشاء ثلاثي الأبعاد مدمج في كتلة ذات أبعاد أعلى.
- تقدم تفسيرات طبيعية لماذا تكون الجاذبية أضعف (تنتشر في الأبعاد الإضافية) وكيف يمكن أن توجد أكوان متعددة في "متعدد الأكوان".

لا تزال نظرية M غير مكتملة، لكنها تمثل الخطوة الأكثر طموحًا نحو نظرية كل شيء تمت محاولتها على الإطلاق.

طرق أخرى للجاذبية الكمية

نظرية الأوتار ونظرية M ليستا المسارات الوحيدة. يستكشف الفيزيائيون أطرًا متعددة، كل منها بقوى مختلفة:

- **جاذبية الكم الحلقية (LQG):** تحاول تكميم الزمكان مباشرة، تتنبأ بأن الفضاء منفصل عند مقياس بلانك.
- **السلامة التدريجية:** تقترح أن الجاذبية قد تكون حسنة السلوك عند طاقات عالية بسبب نقطة ثابتة غير تافهة.
- **التقسيمات الديناميكية السببية (CDT):** تبني الزمكان من كتل بناء هندسية بسيطة.
- **نظرية التويستر وأمبليتوهيدرا:** أطر رياضية جديدة تعيد تخيل الزمكان وتشتت السعات.

بينما لا ينافس أي منها بعد نطاق التوحيد لنظرية الأوتار، فإنها تجسد ثراء البحث.

دور التجربة

يجب أن تكون نظرية كل شيء قابلة للاختبار في النهاية. على الرغم من أن مقياس بلانك بعيد جدًا عن التجارب الحالية، يبحث الفيزيائيون عن أدلة غير مباشرة:

- **المصادمات:** جسيمات التناظر الفائق، الأبعاد الإضافية، أو الثقوب السوداء المجهرية.
- **اختبارات الدقة:** الانحرافات عن قانون نيوتن على نطاقات قصيرة.
- **الموجات الجاذبية:** استقطابات غريبة أو أصداء الأبعاد الأعلى.
- **علم الكونيات:** بصمات التضخم، مرشحي المادة المظلمة، أو الأكسيونات التي تتنبأ بها نظرية الأوتار.

حتى الآن، لا تزال نظرية كل شيء بعيدة المنال، لكن كل نتيجة سلبية تقطع الإمكانيات.

الجمال والتحدي

نظرية كل شيء الحقيقية لن توحد الفيزياء فقط - بل ستُوحد **المعرفة البشرية**. ستجسر بين ميكانيكا الكم والنسبية، الصغير والكبير، الجسيم والكون.

ومع ذلك، تواجه مفارقة: المقياس الذي يحدث فيه التوحيد قد يكون خارج نطاق التجربة إلى الأبد. يستكشف مصادم 100 تيرا إلكترون فولت جزءًا صغيرًا فقط من الطريق إلى مقياس بلانك. قد نضطر إلى الاعتماد على علم الكونيات، أو الاتساق الرياضي، أو الإشارات غير المباشرة.

يبقى الحلم حيًا بسبب الأناقة العميقة للأطر. كما علق ويتن، نظرية الأوتار ليست مجرد "مجموعة من المعادلات" بل "إطار جديد للفيزياء".

العلم كطريقة، وليس عقيدة

السعي وراء نظرية كل شيء لا يتعلق بإعلان نظرية الأوتار، أو التناظر الفائق، أو أي فكرة واحدة "حقيقية". إنه يتعلق بـ **الطريقة العلمية**:

- تحديد الشقوق في النظريات الحالية.
- اقتراح أطر جديدة جريئة.
- اختبارها ضد الواقع، التخلص منها أو تهيئتها حسب الحاجة.

القصة لم تنته بعد. لكن هذا الانفتاح بالذات - الرفض لمعاملة أي نظرية كمقدسة - هو ما يجعل الفيزياء علمًا حيًا، وليس عقيدة.

الأفق القادم

قد يكشف القرن القادم من الفيزياء عن:

- دليل على التناظر الفائق أو بدائله.
- بيانات كونية تؤكد أو تنفي تنبؤات الأوتار.
- إعادة صياغة أعمق للزمكان نفسه.

أو ربما تكون نظرية كل شيء الحقيقية شيئًا لم يتخيله أحد بعد.

لكن السعي نفسه - الدافع للتوحيد، للتفسير، لرؤية الطبيعة كاملة - هو جزء من الإنسانية بقدر ما هي المعادلات نفسها.

المراجع والقراءة الإضافية

التناظر الفائق والتوحيد الكبير

- ويس، ج.، وباغر، ج. (1992). **التناظر الفائق والجاذبية الفائقة**. مطبعة جامعة برينستون.
- باير، هـ.، وتاتا، إكس. (2006). **التناظر الفائق على نطاق ضعيف: من الحقول الفائقة إلى أحداث التبعثر**. مطبعة جامعة كامبريدج.
- جورجي، هـ.، وجلاشو، إس. إل. (1974). "وحدة جميع قوى الجسيمات الأولية." **رسائل المراجعة الفيزيائية**، 32(8)، 438.

نظرية الأوتار ونظرية M

- جرين، إم. بي.، شوارتز، ج. إتش.، وويتن، إي. (1987). **نظرية الأوتار الفائقة** (المجلدان 1 و2). مطبعة جامعة كامبريدج.
- بولشينسكي، ج. (1998). **نظرية الأوتار** (المجلدان 1 و2). مطبعة جامعة كامبريدج.
- ويتن، إي. (1995). "ديناميكيات نظرية الأوتار في أبعاد مختلفة." **الفيزياء النووية B**، 443(1)، 85-126.
- بيكر، ك.، بيكر، إم.، وشوارتز، ج. إتش. (2006). **نظرية الأوتار ونظرية M: مقدمة حديثة**. مطبعة جامعة كامبريدج.

جاذبية الكم الحلقية والبدائل

- روفيلي، سي. (2004). **الجاذبية الكمية**. مطبعة جامعة كامبريدج.
- ثيمان، تي. (2007). **النسبية العامة الكمية الحديثة الكنسية**. مطبعة جامعة كامبريدج.
- أمبيورن، ج.، يوركيويتز، ج.، ولول، آر. (2005). "إعادة بناء الكون." **المراجعة الفيزيائية D**، 72(6)، 064014.

الحدود التجريبية

- عاد، ج.، وآخرون. (تعاون ATLAS). (2012). "ملاحظة جسيم جديد في البحث عن بوزون هيغز للنموذج القياسي." **رسائل الفيزياء B**، 716(1)، 1-29.

- شاترتشيان، إس.، وآخرون. (تعاون CMS). (2012). "ملاحظة بوزون جديد بكتلة 125 جيجا إلكترون فولت." **رسائل الفيزياء B**، 716(1)، 30-61.
- أبوت، بي. بي.، وآخرون. (تعاون LIGO العلمي وتعاون Virgo). (2016). "ملاحظة الموجات الجاذبية من اندماج ثقب أسود ثنائي." **رسائل المراجعة الفيزيائية**، 116(6)، 061102.

حسابات شعبية يسهل الوصول إليها

- جرين، بي. (1999). **الكون الأنيق: الأوتار الفائقة، الأبعاد المخفية، والبحث عن النظرية النهائية**. دبليو. دبليو. نورتون.
- راندال، إل. (2005). **الممرات المشوهة: كشف أسرار الأبعاد المخفية للكون**. هاربر بيرينيال.
- روفيلي، سي. (2016). **سبع دروس قصيرة في الفيزياء**. ريفيرهيد بوكس.
- ويلتشيك، إف. (2008). **خفة الوجود: الكتلة، الأثير، وتوحيد القوى**. الكتب الأساسية.