

نظرية الأوتار وما وراءها

نضال شمعون

أستاذ في المعهد العالي للعلوم التطبيقية
والتكنولوجيا، دمشق، سوريا

نتعرّض بشكلٍ وصفيّ لنظرية الأوتار، ونبيّن أن صورها الخمس ما هي إلا أوجه لنظرية واحدة أعمق لا زالت بنيتها التفصيلية مجهولة، ثم نتعرّض لبعض التطبيقات في عالم الغشائيات والتطورات الحديثة في مفاهيم "المشهد الوترى" و"أرض المستنقعات".

نظرية الأوتار هي المرشح الأهمّ الذي يجمع بين النسبية العامة وميكانيك الكم. تعتبر هاتان النظريتان الأساس الذي تقوم عليه فيزياء اليوم وتصلح النسبية لوصف المظاهر العيانية الكبيرة والثقيلة (كالنجوم والمجرات) بينما يصلح ميكانيك الكم لوصف الأشياء الصغيرة والخفيفة (مثل الذرات). احتاج الفيزيائيون في دراستهم لظواهر الطبيعة حتى الآن إلى تطبيق إحدى هاتين النظريتين فقط ولم يتعرضوا إلى ضرورة تطبيقهما معاً. مع ذلك تصبح الأشياء في مراكز الثقوب السوداء ثقيلة وصغيرة مما يعني الحاجة إلى تطبيق النظريتين معاً هناك، وهنا يظهر التعارض بين بنيتيهما.

لرؤية هذا التعارض نذكّر بأن أساس النسبية العامة هو الهندسة الريمانية القائلة بأن الخلفية الزمكانية هي متنوع (منطوي manifold) أملس يسبب وجود الكتل فيه تشوهات في بنيته تنتقل بسرعة الضوء وتعبّر عن حقل الثقالة (الجاذبية gravity). حيث أن لبّ ميكانيك الكم ذو علاقة وثيقة بعلاقات الارتياح لهايزنبرغ فإن الفراغ الكمومي يعج بتراوحات هائجة تسمح باستيراد طاقة تكفي لخلق أزواج من الجسيمات وأضدادها تدوم لفترة قصيرة يفني بعدها بعضها بعضاً، وبالتالي فإن حالة الخلاء الكمومي ليست ملساء كما تفترض الهندسة الريمانية في حال رغبتنا بإيجاد نظرية كمومية للثقالة،

وهذا مكنم التعارض بين النظريتين.

تُخفّف نظرية الأوتار من هذا التعارض وبالتالي يمكن اعتمادها لإنشاء نظرية كمومية عن الثقالة. علاوة على ذلك تسمح النظرية بالإجابة عن أسئلة جوهرية لا تتعرض لها النظريات الأخرى، فمثلاً نعرف أن الجسيمات الأولية التي تكوّن اللبّات الأساسية للكون تأتي ضمن ثلاث عائلات تتدرّج في قيم كتلتها التي تُعتبر معطيات دخل لنموذج واينبرغ-سلام المعياري الذي يوصّف الجسيمات الأولية دون السؤال عن سبب امتلاكها لقيم كتلتها. تطرح نظرية الأوتار على نفسها مثل هذه الأسئلة الجوهرية فتسأل لماذا البروتون أثقل بحوالي 2000 مرة من الإلكترون وتسأل عن سبب وجود عائلات ثلاث فقط في الطبيعة، ومن أجل ذلك تسمّى أحياناً بـ"نظرية كل شيء".

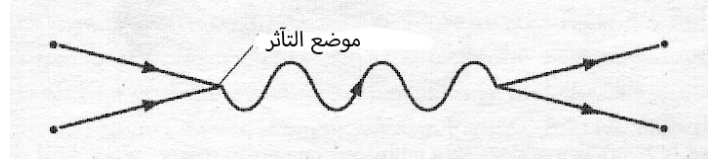
ابتدأت نظرية الأوتار تاريخياً أواخر الستينات حيث فكّر فينيزيانو Veneziano بتوصيف القوى الشديدة بين كواركين من خلال أوتار تصل بينهما وكلما ازداد الشدّ ازدادت إمكانية انفصام الوتر وبالتالي خلق كوارك وكوارك مضاد ممّا يتوافق مع فكرة احتجاز الكواركات. لم تتوافق النتائج النظرية لهذه الصورة مع المعطيات التجريبية ولذلك عُضّ الطرف عن النظرية في بادئ الأمر، ولكن ما لفت النظر لها هو البرهان عام 1974 على وجوب النظر إلى الأوتار على أنها نظرية لجميع القوى بما في ذلك الثقالية وأن سبب فشل الأوتار السابق هو حصر استخدامها خطأ لوصف القوى النووية الشديدة فقط. تكمن الفكرة الأساسية في الأوتار على أن اللبنة الأساسية للكون هي الوتر وعلى أن جميع الجسيمات الأولية مع جسيمات الرسل المسؤولة عن انتقال القوى، مُعبرة عن كمّاتها، إنما هي أنماط اهتزازية لهذا الوتر الأساسي. وُجد أن هناك دوماً نمطاً اهتزازياً كتلته معدومة وتدويمه (سبين) مساو لـ 2، بما يوافق جسيم الغرافيتون (الجذبون) الافتراضي

ينبغي على الأوتار في حال توصيفها لفرميونات أن تتمتع بالتناظر الفائق، وتبين الحسابات أنه من أجل انسجام النظرية (وبصورة خاصة، من أجل عدم الحصول على قيم سالبة لاحتمالية) لا بد للكون في النظرية من امتلاك تسعة أبعاد مكانية يهتز فيها الوتر. إن فكرة الأبعاد الإضافية ابتكرها كالوزا وكلاين في العشرينيات وهدفاً فيها لتوصيف الكهرومغناطيسية في أربعة أبعاد من خلال اعتبار الثقالة في خمسة أبعاد، بينما وجود الأبعاد الإضافية في نظرية الأوتار هو نتيجة حتمية تقتضيها النظرية. تلتف هذه الأبعاد الإضافية على نفسها ضمن بناء هندسي عليه أن يحقق بعض الخواص من أجل تضمين التناظر الفائق، وأبسط أشكاله كعكبات مجوّفة (طارات Tori) وأفضل منها ظاهرياً نوعٌ خاص من الفضاءات الرياضية تُعرف باسم فضاءات كالابي-ياو.

بعد الثورة الأولى للأوتار في الثمانينيات مع البرهان على عدم وجود الشذوذات anomaly في النظرية (لابد لأي نظرية كمومية مقبولة أن تغيب فيها هذه الشذوذات التي ترافق غياباً لتناظرات كلاسيكية ناجماً عن تكميم النظرية)، كانت هناك خمس طرق لتضمين التناظر الفائق في الأوتار وبالتالي كان

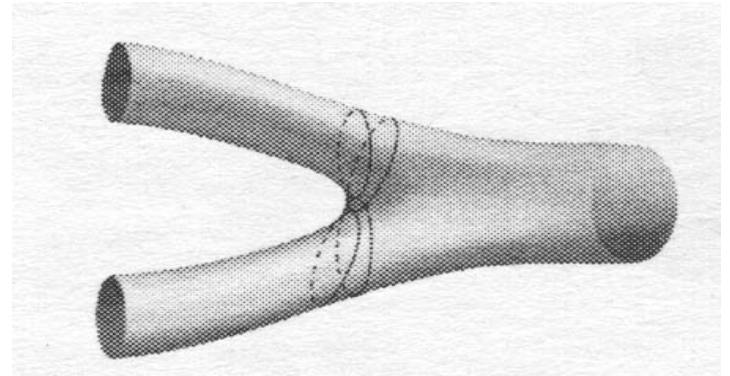
المعبر عن كمّات الثقالة، وبالتالي ننظر إلى الأوتار على أنها نظرية كمومية قادرة على وصف الثقالة. بما أننا لا نرى هذه الأوتار فإننا نتوقع طولها صغيراً جداً من مرتبة طول بلانك، يوافق توتراتٍ كبيرة جداً من مرتبة طاقة بلانك، ولكن بسبب وجود التراوحات الكمومية فإنه هناك أحياناً حذفات كبيرة بينها، وهذه حال الجسيمات الأولية الخفيفة التي نراها في كوننا بطاقات أصغر بكثير من طاقة بلانك (في حالة الغرافيتون هناك حذف تام بين طاقات التوتّر البلاكنية وطاقات التراوحات الكمومية).

كيف تعالج الأوتار التعارض بين النسبية العامة والكم؟ إذا ما نظرنا إلى حادثة تبعثر جسيمين عبر جسيم رسول فإن نظريات الحقول الكمومية تعرّف حادثة في الزمكان يتم فيها التبعثر بين الجسيمين حيث يُخلق الجسيم الرسول.

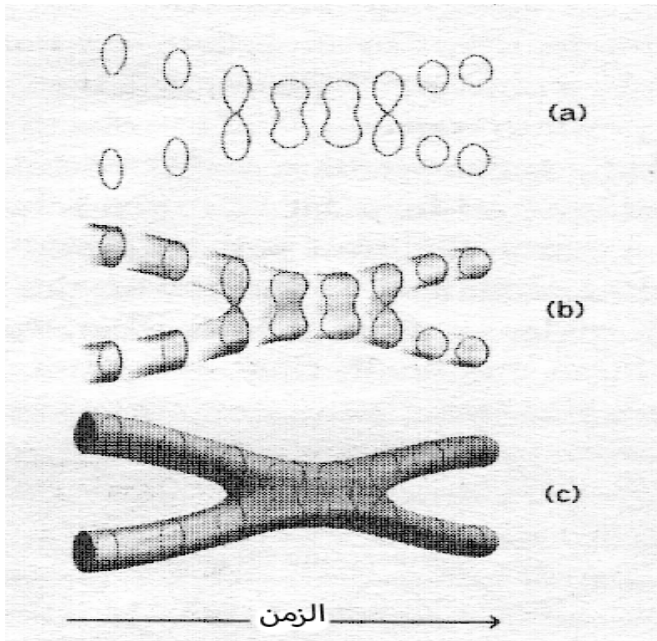


الشكل 1: نقول نظريات الجسيمات النقطية بوجود نقطة واحدة يتم فيها التأثير بين جسيمين متبعثرين.

من وجهة نظرية الأوتار، لا توجد حادثة واحدة (نقطة هندسية في الزمكان) يتفق جميع المراقبين على حدوث التأثير فيها. يكفل توزيع التأثير بين نقاط عديدة إزالة المقادير اللانهائية الشاذة التي تظهر في نظريات الحقول الكمومية عندما يتمركز في نقطة واحدة.



الشكل 2: من وجهة نظرية الأوتار، لا يمكن القول بوجود نقطة واحدة يتفق جميع المراقبين على حدوث التفاعل فيها.

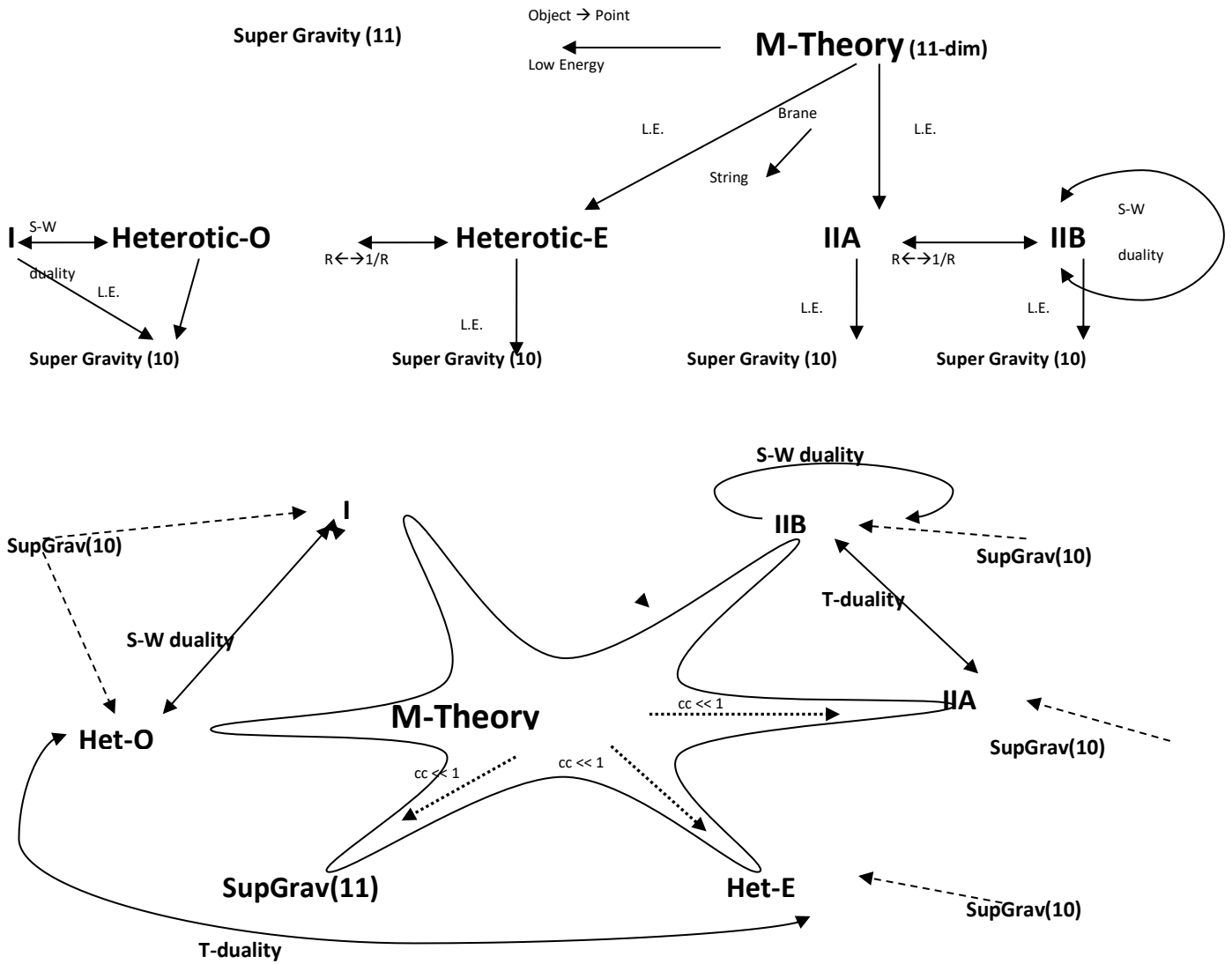


بالإضافة إلى العرى الوترية المغلقة أوتاراً ذات نهايات طليقة تُعرف بالأوتار المفتوحة.

هناك نوع آخر من الحركة للوتر لا يتوافر في حالة الجسيمات الأولية إذ يمكن له الالتفاف حول بُعد إضافي سنفترضه للتبسيط على شكل خرطوم سقاية، وتحدد كتلة الوتر الأصغرية من مقياس هذا البعد الدائري وعدد مرات الالتفاف، وبالتالي يمكن تصنيف حركة الوتر الاهتزازية إلى: اهتزازات تارحية تنقسم إلى اهتزازات عادية (يتم حذف أغلبها مع التراوحات الكمومية في حالة الجسيمات الخفيفة) واهتزازات منتظمة توافق حركة انزلاقية للوتر على طول الخرطوم، أما النوع الآخر من الاهتزازات فهو اهتزازات التفافية حول الخرطوم. هناك مثنوية، تسمى مثنوية T، بين نصف قطر البعد الإضافي ومقلوبه $R \leftrightarrow \frac{1}{R}$ ، توافق في الحقيقة تبديلاً للاهتزازات المنتظمة مع الاهتزازات الالتفافية، حيث تتناسب طاقة الوتر في الأولى (الثانية) عكساً (طرداً) مع R. تسمح هذه المثنوية بالقول إن هناك كوناً فيزيائياً واحداً (جسيماتٍ بقيم كتلٍ معطاة) ناجماً عن فضاءين رياضياتيين مختلفين $(R, \frac{1}{R})$ ، مما يسمح أحياناً بحلّ مشاكل رياضياتية معقدة في فضاء أول ما عبر الذهاب إلى الفضاء الثاني والذي يقنضي الكون الفيزيائي نفسه للأول.

بقيت معالجتنا لنظرية الأوتار لغاية منتصف التسعينات اضطرابية، وكمنت المشكلة في أنه -على خلاف ما اعتدناه عند تطبيق نظرية الاضطرابات في ميكانيك الكم، حيث نعرف المعادلة ولكن نحصل على تقريب جيد للحل- لدينا في نظرية الأوتار صيغ تقريبية فقط عن معادلاتها المجهولة، ولا نعرف فيما إذا كانت نظرية الاضطرابات صالحة للتطبيق أم لا. استمر ذلك حتى بزوغ الثورة الثانية عام 1995 عندما فاجأ إدوارد ويتن Edward Witten نظري الأوتار باقتراحه استراتيجي جديدة غير

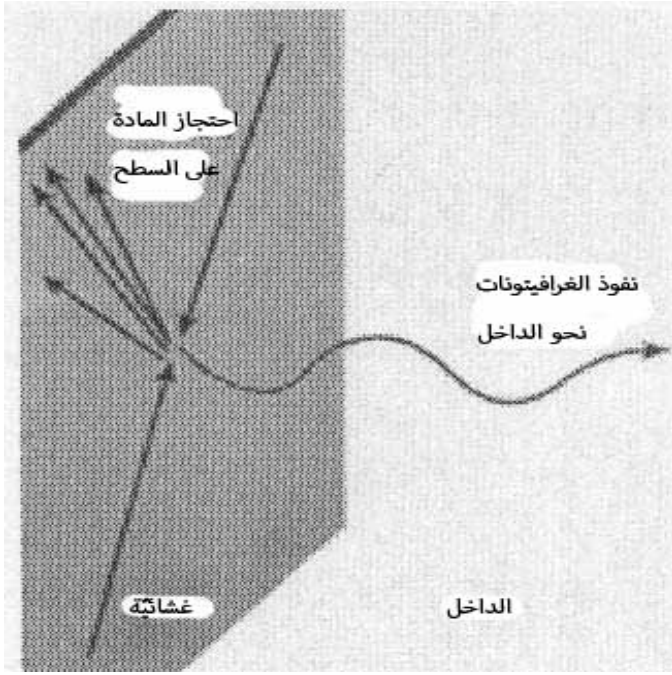
لدينا خمس نظريات أوتار تدعى: نظرية النوع الأول I، نظرية النوع الثاني IIA، نظرية النوع الثاني IIB، نظرية النوع المتغاير O (Heterotic O) ونظرية النوع المتغاير E (Heterotic E)، ولم نعرف لفترة طويلة كيفية اختيار واحدة منها. لتبيان الاختلافات بين النظريات هذه، نشير إلى أن الاهتزازات التي تلحق بعروة وترية تجري، بصورة مبسطة، إمّا باتجاه عقارب الساعة أو بعكسه. تختلف نظرية IIA عن نظرية IIB في أن نوعي الاهتزازين هذين يتمثلان (بتعارضان) في النظرية اللاحقة (السابقة)، فتدوم الجسيمات في اتجاه (اتجاهين) واحد (اثنتين)، أي أن لها نوعاً (نوعين) من اللانطباقية chirality، فنقول عنها إنها انطباقية (لانطباقية). أما نظريتنا النوعين المتغايرين، فتختلفان في أن كل واحد من اهتزازاتها باتجاه عقارب الساعة يبدو كاهتزاز النوع الوتري الثاني (سواء أكان في IIA أم IIB لأنها متمثلان عندما نقتصر على هذا الاتجاه)، لكن اهتزازاتها بعكس هذا الاتجاه فهي كاهتزازات نظرية الوتر البوزوني الأصلية. ورغم ما يثيره هذا الوتر البوزوني من صعوبات لا يمكن التغلب عليها، فقد يَبِين سنة 1985 أن نظرية كاملة ودقيقة تظهر عند دمج نظرية الوتر البوزوني التي تقتضي 26 بعداً زمكانياً مع نظرية النوع الوتري الثاني التي تقتضي عشرة أبعاد زمكانية فقط، أي أن إنشاء الوتر المتغاير يشكّل هجيناً غريباً تجري فيه الاهتزازات في 10 أبعاد أو 26 بعداً بحسب كونها تجري باتجاه عقارب الساعة أو بعكسه! مع ذلك، تلتفت الأبعاد الإضافية الستة عشر في نظرية الوتر البوزوني حول ذاتها بإحكام في هيئة شكلٍ من بين شكلين خاصين جداً لطارة ذات أبعاد كثيرة، مؤدّة النوعين المتغايرين O و E، اللذين يسلكان بسبب الالتفاف المُحَكَّم كما لو كانا نظرية ذات عشرة أبعاد فقط كما نظرية النوع الثاني. نشير أخيراً إلى أن نظرية النوع I قريبة جداً من نظرية IIB باستثناء أن فيها



الشكل 3: النظرية الأم وعلاقتها بالصور الخمس لنظرية الأوتار. يعني الرمز L.E. انتقالنا إلى مجال الطاقات المنخفضة، أما الرمز $cc \ll 1$ فيعني أن ثابت الربط صغير جداً وبالتالي يمكن تطبيق نظرية الاضطرابات. ترمز S-W duality إلى مثوية ثابت الربط القوي-الضعيف، أما T-duality فترمز إلى المثوية الهندسية بين نصف القطر ومقلوبه.

كبيراً فلا يمكن تطبيق نظرية الاضطرابات، إلى وصفٍ مكافئ لنظرية| في حالتها الاضطرابية عندما يكون ثابت الربط ضعيفاً وبالتالي يمكننا إجراء الحسابات. يبين ويتن أمراً آخرَ لافتاً للنظر وهو أننا غفلنا عن وجود بعدٍ آخر في دراستنا السابقة وبالتالي فإن كوننا بأحد عشر بعداً زمكانياً (10 مكاني و 1 زمني). كيف نوافق ذلك مع وجود تسعة أبعاد مكانية يهتز فيها الوتر؟ ما يبيته ويتن هو وجود بعد مكاني آخر في بنية الوتر نفسه لا يتحرك ضمنه ولا يبدو للعيان إلا إذا زدنا الطاقة كثيراً. أدى ذلك إلى وجود كائنات جديدة في كوننا وليس الوتر هو اللبنة

جديدة غير اضطرابية لمعالجة المسائل، وبيّن أن النظريات الخمس السابقة ما هي إلا صور خمس مختلفة لنظرية واحدة تضمها كلها سماها باسم نظرية ال-M (النظرية الأم الشمولية) والتي لا نعرف عنها الكثير لغاية الآن. ما يبيته الأبحاث اللاحقة هو وجود علاقات مثوية قوية بين النظريات الخمس فمثلاً تسمح المثوية الهندسية T بالانتقال من نظرية E إلى O. وفوق ذلك هناك مثوية ثابت الربط القوي-الضعيف التي تسمح بالانتقال من نظرية I إلى O حيث يمكننا الانتقال من وصف نظرية O في حالتها اللاضطرابية، عندما يكون ثابت الربط



الشكل 3: تعيش الجسيمات المادية والقوى غير الثقالية ضمن غشائية بأبعاد مكانية ثلاثة، بينما تستطيع غرافيتونات الثقالة الولوج إلى الأبعاد الإضافية.

المادية محتجزة ضمن "غشائية" بثلاثة أبعاد مكانية.

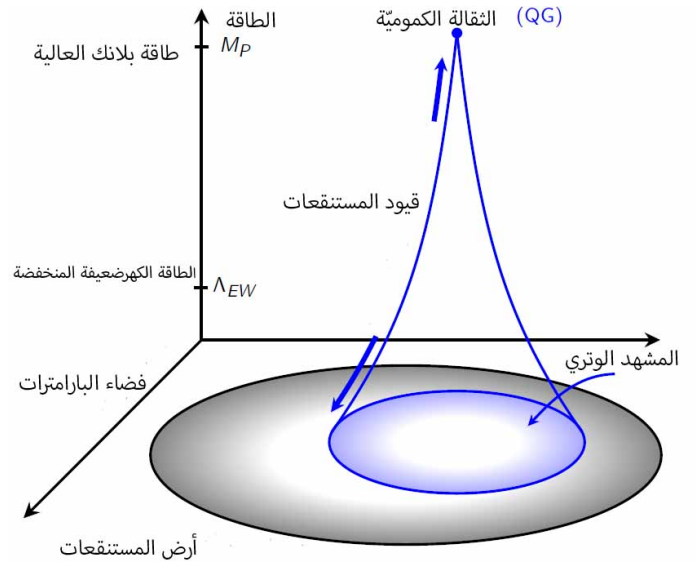
بين هؤلاء النظريون أنه لو كان ذلك صحيحاً لأدى ذلك إلى نتيجة مذهلة وهي إمكانية وجود أبعاد إضافية من مرتبة أكبر بكثير من طول بلانك. ينجم ذلك عن أن قانون نيوتن في التجاذب الكوني القائل بتناسب قوة الجذب بين كتلتين مع مربع مقلوب المسافة الفاصلة بينهما، سيتغير عند وجود الأبعاد الإضافية، ولكن حيث أن الجسيمات الرسل حاملة القوى غير الثقالية محتجزة ضمن الغشائية فأى تجربة تتضمنها لوحدها لن تختبر وجود الأبعاد الإضافية. يعني ذلك أن المعطيات التجريبية المتراكمة لدينا في المسرعات والتي تختبر مسافات من مرتبة 10^{-5} mm موافقة للقوى الكهرومغناطيسية والنووية لا تنفي وجود أبعاد إضافية تتحسس لها القوى الثقالية وحدها. تبلغ المسافة التي نستطيع سبورها عبر قوى الثقالة من مرتبة الملمتر، وبالتالي يمكن اختبار هذه الفرضيات في المسرعات، حيث يأمل العلماء إمكانية اختبار شكل قانون نيوتن في التجاذب ضمن مسافات أصغر من هذه المرتبة. قد يسمح ذلك بحل مسألة

الأساسية الوحيدة في الكون، بل هو حالة خاصة في عالم الغشائيات حيث يمثل الوتر الغشائية الأحادية فيه وهناك غشائيات ثنائية وثلاثية و..... تساعية.

ما بينته الأبحاث كذلك هو وجود علاقة وثيقة بين نظرية الأم المجهولة ونظريات تكميم الثقالة النقطية التي ابتدأت في الثمانينات قائمة على أساس الجسيمات النقطية، ووجدنا منها أربع نظريات كمومية في عشرة أبعاد ونظرية واحدة بأحد عشر بعداً. إذا ما نظرنا للوتر من بعيد فإنه سيبدو كنقطة، وتبين أن النظريات الخمس المختلفة للأوتار يمكن تقريبها ضمن هذه الرؤية بالنظريات الأربع للثقالة الكمومية ذوات الأبعاد العشرة، بينما بقيت نظرية الثقالة الكمومية في أحد عشر بعداً أمراً مقبولاً رياضياً ولكن بدا أن لا علاقة لها بالفيزياء. بين ويتن عبر الثورة الثانية أن نظرية الـ M عندما ننظر لها من بعيد يمكن تقريبها بهذه النظرية ذات الأبعاد الأحد عشر للثقالة الكمومية، وتكون قد اكتملت بذلك الحلقة.

تطورات حديثة

عانت نظرية الأوتار قبل بزوغ ثورتها الثانية طويلاً من استحالة اختبارها تجريبياً. كما ذكرنا، الطول النموذجي للوتر هو من مرتبة طول بلانك، وبالتالي يلزمنا من أجل سبره طاقة كبيرة من مرتبة طاقة بلانك: 1.2×10^{19} GeV. يعني ذلك من ناحية عملية أن جميع الجسيمات الأولية يمكن إهمال كتلتها مقارنة مع كتلة الوتر النموذجية التي تفوق بـ 10^{16} مرة الطاقات التي يمكن بلوغها في المسرعات الحالية، وبالتالي لا يمكن في المستقبل المنظور اختبار هذه الفرضيات عن الأوتار. طرح أركاني-حامد Arkani Hamed وديموبولوس Dimopoulos ودفالي Dvali عام 1998 تساؤلاً عن إمكانية أن تكون قوى الثقالة وحدها تشعر بوجود الأبعاد الإضافية، بينما جميع القوى الأخرى بالإضافة إلى الجسيمات



الشكل 4: المشهد الوترى وأرض المستنقعات. كلما ارتفعت الطاقة نقص عدد النظريات الفعالة مع فقدانها لقدرتها التنبؤية في مجال فوق البنفسجي، بحيث يؤول المشهد الوترى بمجمله إلى نقطة توافق نظرية الثقالة الكمومية.

"التراتبية" (Hierarchy) في القوى أي سبب ضعف قوة الثقالة مقارنة مع القوى الأخرى، إذ يسبب انتشارها لوحدها ضمن الأبعاد الإضافية شعورنا بضعفها على الغشائية التي نعيش عليها.

علاوة على ذلك، وعند بناء نموذج لفيزياء الجسيمات انطلاقاً من الأوتار يبدأ الفيزيائيون بتحديد شكل التفاف الأبعاد الإضافية في هيئة فضاء لكالابي-ياو يختلف عن قرانته بقيم البارامترات التي تحدده وبطريقة تراصه أو التزازه عند الانتقال من الوتر إلى الجسيم النقطي، وكل من هذه الأشكال المختلفة يوافق كوناً محتملاً أو "حالة خلاء". يكمن الانتقاد الرئيس للنظرية في وجود عدد كبير من رتبة 10^{500} من حالات الخلاء هذه، تُشكّل ما يُدعى بـ "المشهد الوترى" (String Landscape) يكفي لاستيعاب أي ظاهرة تقريباً عند الطاقات المنخفضة. يعتقد البعض بأن هذا العدد الكبير من الحلول أمرٌ إيجابي لأنه قد يسمح بتفسير للقيم المرصودة للثوابت الفيزيائية ولا سيما القيمة الصغيرة للثابت الكوني بحيث أن هذه القيمة لا يُحددها مبدأً أساسياً بل توافها مع

تطور حياة ذكية، وهذا ما يُدعى بـ "مبدأ الوجود الإنساني" Anthropic principle، بحيث يُنظر لحالات الخلاء المختلفة على أنها أكوان مختلفة ضمن "متعدد الأكوان" multiverse. حياتنا لقيمة صغيرة لثابته الكوني.

دفع الكم الهائل من حالات المشهد الوترى إلى تطوير برنامج "أرض المستنقعات" Swampland من قبل كومرون وفا Cumrun Vafa منذ 2005 بهدف إيجاد طريقة أنيقة للتمييز بين نظريات الحقل الفعالة المتسقة مع معطيات الطاقات المنخفضة ولكن اللامتوافقة مع تضمين الثقالة الكمومية فيها، عن تلك الخاصة بالمشهد الوترى الموافق لإمكانية تضمين الثقالة الكمومية، حيث يُعتقد أن النظريات السابقة تشغل في فضاء البارامترات حيزاً -يُدعى بأرض المستنقعات- أكبر بكثير من حيز نظريات المشهد الوترى اللاحقة. يبحث العلماء اليوم عن الحجج الرياضياتية والمفهوماتية التي يمكن بها تمييز النظريات ضمن المستنقعات.

خاتمة نخلص من هذا كله إلى القول إن نظرية الأوتار جميلة رياضياتياً، وقد تحقّق هدف الفيزيائيين في إيجاد نظرية كل شيء، فعلى سبيل المثال هناك علاقة بين عدد الثقوب في فضاء كالابي-ياو وعدد العائلات، وبالتالي تحوّل السؤال عن سبب وجود عائلات ثلاث إلى السؤال عن خواص فضاء كالابي-ياو الهندسية التي تقتضي احتواءه على ثلاثة ثقوب. فضاء البارامترات الموافق لهذه الفضاءات كبير جداً والتساؤل مطروح عن سبب وجود كوننا في النقطة الموافقة له في هذا الفضاء.

المراجع
1. Greene, Brian (2003). *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*. New York: W.W. Norton & Company. ISBN 978-0-393-05858-1

2. N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos and G. Dvali, "Large Extra Dimensions: A new arena for particle physics", Physics Today, 2002

3. Vafa, Cumrun (2005). "The String Landscape and the Swampland". [arXiv:hep-th/0509212](https://arxiv.org/abs/hep-th/0509212)