

Electron

Proton

Quark



حلم نظرية الأوتار: الطريق لعزف سمفونية

النظرية الموحدة

علي عبد اللطيف كريم الزبيدي

أستاذ الفيزياء النظرية والنوعية - قسم

الفيزياء - كلية العلوم - جامعة بغداد

تُعدّ نظرية الأوتار من أعظم الأهداف العلمية على الإطلاق. ولا يهدف هذا المسعى إلى شيء سوى تقديم وصف كامل للواقع المادي على الأقل على مستوى الجسيمات الأساسية، والتفاعلات، وربما الزمكان نفسه. ومن حيث المبدأ، وبمجرد معرفة النظرية الأساسية بالكامل، يمكن للمرء أن يستنتج النظرية النسبية والنظرية الكمية باعتبارهما حدوداً للطاقة المنخفضة للأوتار. وتهدف النظرية إلى القيام بما لم تتمكن أي نظرية أخرى من القيام به منذ أوائل القرن العشرين وهو الجمع بين النظرية النسبية العامة والنظرية الكمية في إطار موحد واحد. وهو برنامج طموح شغل أفضل العقول في الرياضيات والفيزياء لعقود من الزمان، بما فيهم ألبرت

آينشتاين، الذي كرس سنواته الأخيرة في محاولة لبناء نظرية موحدة. لكنه، رغم عبقريته، فشل في تحقيق هذا الهدف، ليس بسبب نقص في الرؤية، بل لأن الأدوات الرياضية والمفاهيم الفيزيائية اللازمة لم تكن متوفرة في زمنه. فمفاهيم الميكانيك الكمي لم تكن قد نضجت بعد، ولم تُكتشف حينها القوى النووية أو مفهوم التناظر الفائق، ولا الأبعاد الإضافية التي تُعد من الركائز في نظرية الأوتار. كما أن النظريات الحديثة مثل الديناميكا الكمية (الحراكيات الكمومية Quantum Dynamics) للحقل أو النموذج القياسي للجسيمات لم تكن قد ظهرت بعد. وهكذا، فإن ما نحوزه اليوم من أدوات رياضية وفيزيائية متقدمة هو ما يُتيح لنا متابعة هذا الحلم الذي بدأه آينشتاين، لكن لم تسنح له الفرصة لإتمامه.

نبذة تاريخية

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

التي تدور حول بعضها البعض- إنما تتدرج ضمن إطار نظري واحد.

حلم فيزيائي ممكن تحقيقه

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

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

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

إن نظرية الأوتار الفائقة (Superstring Theory) والتي تعتبر نظرية ناشئة حديثة العهد مقارنة بالصرحين العظمين الميكانيك الكمي والنسبية العامة تستند نظرياً على المبادئ الأساسية لكليهما. وتبعاً لهذا فإن التزاوج بين قوانين الأنظمة الكبيرة والصغيرة لم يعد شيئاً مرضياً فحسب، بل أصبح حتمياً. إن نظرية الأوتار الفائقة وتسمى اختصاراً بـ نظرية الأوتار (String Theory) تذهب بهذا الاتحاد إلى خطوة عملاقة نحو الأمام. فعلى مدى ثلاثة عقود من الزمان، سعى أينشتاين إلى التوصل إلى نظرية موحدة للفيزياء، نظرية من شأنها أن تنسج بين كل قوى الطبيعة الأساسية الأربعة ومكوناتها المادية في نسيج نظري واحد، ولكنه فشل. يدّعي أنصار نظرية الأوتار أن خيوط هذا النسيج الموحد الغامض قد كُشِفَتْ أخيراً. إن هذه النظرية لديها القدرة على إثبات أن كل الأحداث العجيبة في الكون. من التذبذب المحموم للكواركات دون الذرية إلى الحركة العظيمة للنجوم الثنائية

تبدو وكأنها جسيمات نقطية، وبالتالي يمكن أن تكون متوافقة مع القياسات التجريبي.

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

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

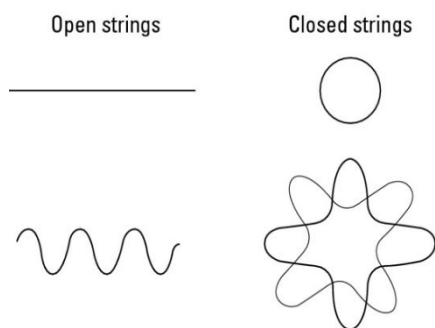
سويسرا، CERN, The European Organization for Nuclear Research in Geneva, witzerland

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

التي واجهتهم في السابق. وسوف تختبر الصعوبات التي تنتظرنا بشدة القوة التقنية لعلماء نظرية الأوتار الفائقة في العالم، ولكن الضوء في نهاية النفق، وإن كان لا يزال بعيداً، ربما أصبح أخيراً مرئياً.

المفاهيم الأساسية لنظرية الاوتار

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



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

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

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

عُقد عام 1995 في جامعة جنوب كاليفورنيا مؤتمر خاص عن نظرية الأوتار. أعلن في هذا المؤتمر العالم إدوارد ويتن (Edward Witten)، وهو عالم فيزياء نظرية أمريكي معروف بمساهماته في نظرية الأوتار ونظرية المجال الكمي، عن خطة لاتخاذ الخطوة التالية. وبالتالي تم إشعال فتيل "ثورة الأوتار الفائقة الثانية"، حيث عمل علماء نظرية الأوتار بقوة على شحذ مجموعة من الأساليب الجديدة التي تعد بالتغلب على العقبات النظرية

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

$$A \longrightarrow B+C$$

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

أنواع نظريات الأوتار

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

1. نظرية الأوتار البوزونية (Bosonic String Theory)

تُعد نظرية الأوتار البوزونية أول نموذج

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

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

3. نظرية الأوتار من النوع الثاني-أ (Type II-A String Theory):

تُعد هذه النسخة من نظرية الأوتار واحدة من النماذج التي تتضمن التناظر الفائق (Supersymmetry)، وتشمل كلاً من الأوتار المفتوحة والمغلقة. ما يميز هذا النوع هو أن نهايات الأوتار المفتوحة تكون مرتبطة بأجسام ذات أبعاد أعلى تُعرف باسم "أغشية-د" (D-branes)، وهي كيانات أساسية في نظرية الأوتار تلعب دوراً محورياً في تفسير التفاعلات بين الجسيمات. وتتميز هذه النظرية أيضاً بأن الفرميونات فيها ليست كيرالية (لا انطباقية)، أي أنها لا تفرق بين الاتجاهين (اليسار واليمين) في خواص الدوران والزخم.

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

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

2. نظرية الأوتار من النوع الأول (Type I String Theory):

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

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

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

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

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

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

5. نظرية الأوتار المتغايرة (Heterotic String Theory): تتضمن هذه النظرية التناظر الفائق ولا تسمح إلا بالأوتار المغلقة. تتطلب أوضاع الحركة إلى اليسار واليمين على الوتر في الواقع عددًا مختلفًا من أبعاد الزمكان (10 و 26).

الأبعاد الأعلى في نظرية الأوتار

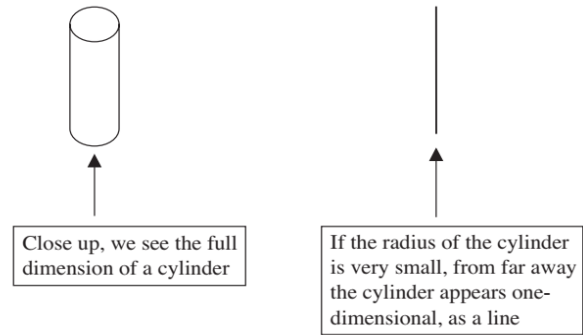
نحن نعيش في عالم بثلاثة أبعاد مكانية. وباختصار، يعني هذا أن هناك ثلاث اتجاهات مميزة يمكن من خلالها الحركة: للأعلى وللأسفل، وللإسار ولليمين، وللأمام وللخلف. بالإضافة إلى ذلك، لدينا تدفق الزمن (للأمام فقط بقدر ما نعلم). من الناحية الرياضية، يمنحنا هذا الأمر الوصف النسبي للإحداثيات (x, y, z, t).

أكثر من طريقة صحيحة لوصف الظواهر نفسها، خاصة عند التعامل مع الأنظمة ذات الطاقات العالية جدًا أو في الأبعاد مجهرية شديدة الصغر، حيث تنهار الحدود التقليدية بين النماذج المختلفة وتتكشف وحدتها العميقة.

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

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

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



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

الازدواجية (الثنوية) في نظرية الأوتار

الأصل والنشأة الفكرية للازدواجية في نظرية الأوتار

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

تُعد الازدواجية في نظرية الأوتار من أعمق المفاهيم التي غيّرت النظرة التقليدية للكون في الفيزياء النظرية المعاصرة، فهي لم تُعد مجرد أداة رياضية لتبسيط الحسابات، بل أصبحت مبدأً أساسياً يشير إلى أن هناك

ومتعارضة في البداية ما هي إلا أوجه متعددة لنفس النظرية الأساسية، وهو ما مهّد لفكرة التوحيد الأعمق.

3. التمهيد لنظرية الغشاء (M-Theory) وفّرت

الازدواجية الأساس المفاهيمي والرياضي لنشوء نظرية الغشاء، التي تُوحّد كل نظريات الأوتار في إطار ذي أحد عشر بُعدًا، وتُعد اليوم المرشح الأبرز لما قد يكون "نظرية كل شيء".

المفاهيم الأساسية الازدواجيات في نظرية الأوتار

1. ازدواجية T (T-Duality)

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

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

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

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

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

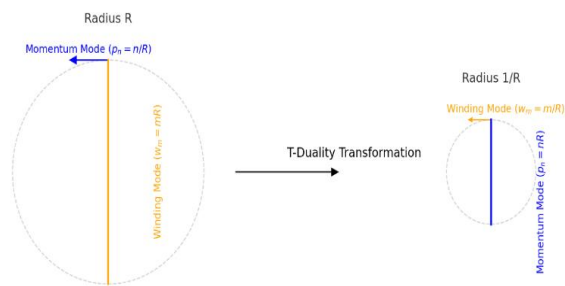
الدور الحاسم للازدواجية في نجاح وتطور نظرية الأوتار شكّلت الازدواجية نقطة تحول جوهرية في مسيرة نظرية الأوتار، وأسهمت بشكل حاسم في إنقاذها من الانهيار وتوسيع آفاقها النظرية. ويمكن تلخيص أهم أدوارها فيما يلي:

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

2. كشف وحدة النماذج الخمسة: أظهرت الازدواجيات أن النماذج الخمسة لنظرية الأوتار التي بدت مختلفة

حيث أن M تمثل كتلة الحالة المهتزة.

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



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

2. الازدواجية S-(S-Duality)

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

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

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

$$R \cdot m \propto E_w$$

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

هذا ما يُعرف بـ ازدواجية T ، وهي تعني أن النظام

الفيزيائي يبقى كما هو تماماً إذا استبدلنا:

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

ويظهر هذا بوضوح في صيغة الكتلة الكلية للحالة المهتزة للوتر:

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

مساهمات من الاهتزازات الداخلية

ازدواجية S- قد نقلت الفهم الفيزيائي من النظر إلى التفاعل كقيمة مطلقة، إلى فهمه كخاصية نسبية تعتمد على زاوية الرصد وطبيعة التمثيل الرياضي، مما يدعم الرؤية الوحيدة التي تسعى إليها نظرية الأوتار في وصف الكون.

3. الازدواجية (Anti-de Sitter/CFT

(Sitter/Conformal Field Theory Duality

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

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

وحدوية أشمل. تختلف هذه الازدواجية عن ازدواجية T في أنها لا تتعلق ببنية الفضاء، بل بشدة التفاعل نفسه. عندما يكون $g_s \ll 1$ ، يكون النظام في حالة اقتران ضعيف، ويمكن تحليل سلوكه باستخدام التقريبات الاضطرابية (perturbation theory). أما إذا كان $g_s \gg 1$ ، فإن النظام يدخل في نطاق التفاعل القوي، وتصبح الحسابات غير ممكنة تقريباً بسبب الطبيعة غير الخطية للتفاعلات. هنا تبرز قوة ازدواجية S-، إذ تُظهر أن النظام الفيزيائي في حالة اقتران قوي يمكن أن يكون مكافئاً تماماً لنظام آخر في حالة اقتران ضعيف. بعبارة أخرى، يتم استبدال ثابت الاقتران كما يلي:

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

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

لقد أسهمت ازدواجية S في كشف علاقات جوهرية بين النظريات الخمسة المختلفة للأوتار، وربطت بينها كوجوه لنظرية موحدة. كما مهدت الطريق لفهم ديناميكا الأغشية (branes) في نظرية الأوتار، ولعبت دوراً أساسياً في تطوير نظرية الأوتار الفائقة (Superstring Theory)، والتي كانت بدورها نقطة الانطلاق نحو نظرية الغشاء (M-Theory) في 11 بُعداً. وباختصار، فإن

بعد إلى إثبات تجريبي قاطع، فإن قوتها التفسيرية وشمولها الرياضي يجعلها واحدة من أكثر النظريات إثارة في الفيزياء المعاصرة.

References

- [1] B. Zwiebach, *A First Course in String Theory*, 2nd ed., Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009.
- [2] J. Polchinski, *String Theory Vol. 1: An Introduction to the Bosonic String*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998.
- [3] K. Becker, M. Becker, and J. H. Schwarz, *String Theory and M-Theory: A Modern Introduction*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [4] B. Greene, *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*, New York, NY, USA: W. W. Norton & Company, 1999.
- [5] D. McMahon, *String Theory DeMYSTiFieD*, New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2009.
- [6] E. Kiritsis, *String Theory in a Nutshell*, 2nd Ed., Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2019.

الصيغة الرياضية العامة للازدواجية

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

حيث:

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

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

خاتمة

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

تَمَنَّى أسرة تحرير مسارات

ابنتها الدكتورة إيمان

على إنجازها العلمي

ألفه مبارك

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

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

مصادر باللغة العربية

[9] الدكتور نضال شمعون، "نظرية الأوتار

وما وراءها" مسارات في الفيزياء العدد الاول.

[10] الدكتور عادل عوض، "ثنوية فراغ دي

سيتر المضاد ونظرية الحقل الامتثالي، العدد

الراهن.

تَهْنِئَةً

جائزة الاستاذ الدكتور / محمد امين لطفي

في العلوم الفيزيائية لعام ٢٠٢٤

الدكتورة

أيمان عمر عبد الرحيم

باحث بمعهد بحوث البترول