معادلة الإله

البحث عن نظرية كل شيء

ميتشيو كاكو

- المؤلف: ميتشيو كاكو
- العنوان: معادلة الإله - البحث عن نظرية كل شيء
- ترجمة: مصطفى العدوي
- الطبعة: الأولى 2023
- تصميم الغلاف: عمرو الكفراوي
- مستشار النشر: سوسن بشير
- المدير العام: مصطفى الشيخ

رقم الإيداع:
٢٠٢٢ / ١٤٣٧٦
الترقيم الدولي : ISBN
978 - 977-765 - 343 - 5

جميع الحقوق محفوظة. لا يسمح بإعادة إصدار هذا الكتاب أو أي جزء منه، أو تخزينه في نطاق استعادة المعلومات، أو نقله بأي شكل من الأشكال دون إذن مسبق من الناشر.

All rights are reserved. No part of this book may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form, or by any means without prior permission in writing from the publisher.

Afaq Bookshop & Publishing House

1 Kareem El Dawla st. - From Mahmoud Basiuny st. Talaat Harb
CAIRO – EGYPT - Tel: 00202 25778743 - 00202 25779803 Mobile: +202-01111602787
E-mail:afaqbooks@yahoo.com – www.afaqbooks.com

١ شارع كريم الدولة- من شارع محمود بسيوني - ميدان طلعت حرب- القاهرة - جمهورية مصر العربية
ت: ٢٥٧٧٨٧٤٣ ٠٠٢٠٢ - ٢٥٧٧٩٨٠٣ ٠٠٢٠٢ - موبايل: ٠١١١١٦٠٢٧٨٧

ميتشيو كاكو

معادلة الإله

البحث عن نظرية كل شيء

الكتاب الأعلى مبيعًا في نيويورك

أفضل كتاب غير أدبي على منصة أمازون

ترجمة

مصطفى العدوي

آفاق للنشر والتوزيع

بطاقة الفهرسة

كاكو، ميتشيو

معادلة الإله.. البحث عن نظرية كل شيء

ميتشيو كاكو

ترجمة: مصطفى العدوي

ط1 القاهرة - دار آفاق للنشر والتوزيع - 2023

312 ص، 21 سم.

رقم الإيداع 14376 / 2022

الترقيم الدولي 5 - 343 - 765 - 977 - 978

1 - روايات

2 - العنوان

هذه ترجمة كتاب:

The God Equation

By: Michio Kaku

All Rights Reserved

جميع الحقوق محفوظة

© آفاق للنشر والتوزيع

All rights reserved

© **Afaq** *Publishing House* **2023**

المحتويات

مقدمة المترجم	٩
إهداء المؤلف	١١
مقدمة إلى النظرية النهائية	١٣
حلم أينشتاين العظيم	١٥
جيش من النقاد	٢١
الفصل الأول: التوحيد – الحلم القديم	٢٥
ميلاد جديد في عصر النهضة	٢٩
نظرية نيوتن عن القوى	٣١
ما هو التناظر؟	٣٦
تأكيد قوانين نيوتن	٣٩
لغز الكهرباء والمغناطيسية	٤٣
معادلات ماكسويل	٤٧
نهاية العلم	٥٨
الفصل الثاني: بحث أينشتاين عن التوحيد	٥٩
التناظر والجمال	٦٤
الجاذبية كفضاء منحنٍ	٦٨
الكسوف الشمسي والجاذبية	٧٥
نيوتن وأينشتاين: القطبان المتضادان	٨١

البحث عن نظرية موحدة ٨٣
الفصل الثالث: بزوغ الكوانتم ٨٥
الثورة الكمومية ٩٠
موجات الإلكترون ٩٤
شرح الجدول الدوري ٩٧
نظرية ديراك للإلكترون ١٠١
ما هو التموج؟ ١٠٥
صراع الجبابرة ١٠٩
قطة شرودنجر ١١٢
الطاقة القادمة من الشمس ١١٦
الميكانيكا الكمومية والحرب ١٢١
الفصل الرابع: نظرية كل شيء (تقريبًا) ١٢٧
الديناميكا الكهربائية الكمومية ١٣١
تطبيقات الثورة الكمومية ١٣٥
ما هي الحياة؟ ١٣٧
القوة النووية ١٤٢
القطبان المتعاكسان ١٤٨
قوة ضعيفة وجسيمات شبحية ١٥٠
نظرية يانج-ميلس ١٥٣
بوزون هيجز - جسيم الإله ١٥٦
نظرية كل شيء تقريبًا ١٦١
مصادم الهدرونات الكبير ١٦٤

الفصل الخامس: الكون المظلم ١٦٩
ما هو الثقب الأسود؟ ١٧٢
عبر الثقب الدودي ١٨٢
السفر عبر الزمن ١٨٩
كيف خُلِقَ الكون؟ ١٩٥
لماذا سماء الليل مظلمة؟ ١٩٩
النسبية العامة والكون ٢٠١
الشفق الكمومي للانفجار العظيم ٢٠٤
التضخم ٢٠٧
كون جامح ٢١٠
الجرافيتون: مطلوب حيًّا أو ميتًا! ٢١٤
الفصل السادس
بزوغ نظرية الأوتار: الوعود والمشكلات ٢١٧
نظرية الأوتار ٢١٨
عشرة أبعاد ٢٢٢
الجرافيتون ٢٢٥
التناظر الفائق ٢٢٧
نوعان من الجسيمات دون الذرية ٢٣١
نظرية-إم M-Theory ٢٣٦
كون ذو تصوير مجسم Holographic Universe ٢٣٨
اختبار النظرية ٢٤٤
انتقادات نظرية الأوتار ٢٤٦

هل يمكن اختبارها؟ ٢٤٩
البحث عن المادة المظلمة ٢٥١
ما بعد مصادم الهدرونات الكبير ٢٥٤
الانفجار الأعظم كمحطم للذرات ٢٥٦
هوائي مقياس التداخل الليزري الفضائي LISA ٢٥٨
اختبار قانون التربيع العكسي ٢٦٠
مشكلة المشهد في نظرية الأوتار
Landscape Problem ٢٦٢
وجهة نظري الشخصية في نظرية الأوتار ٢٦٦
الكشف عن الهرم ٢٦٧
الفصل السابع: البحث عن المعنى في الكون ٢٧٣
إثبات وجود الإله ٢٧٧
وجهة نظري الشخصية ٢٨١
هل للكون بداية أم لا؟ ٢٨٦
المعنى في كون محدود ٢٨٨
خاتمة ٢٩١
شكر وتقدير ٢٩٣
ملاحظات ٢٩٥
قراءات مختارة ٣٠٧
التعريف بالمؤلف ٣١٠
التعريف بالمترجم ٣١١

مقدمة المترجم

كانت إحدى أمنياتي منذ مراهقتي أن تحظى المكتبة العربية بأحدث الكتب العلمية التي يستحقها القارئ العربي، للاطلاع على أحدث ما توصل له العلم في العلوم كافة.

ولقد وفقني الله لاختيار هذا الكتاب الذي أحدث رواجًا كبيرًا في عام ٢٠٢١ في الولايات المتحدة الأمريكية.

لذا فالشكر والامتنان واجبان لدار آفاق، وعلى رأسها الأستاذ مصطفى الشيخ، لجعل هذا الحلم ممكنًا.

كما أتوجه بعظيم شكري وامتناني للدكتور ميتشيو كاكو، والذي أبدى مرونة كبيرة في الموافقة على تقديم هذا الكتاب مترجمًا للقارئ العربي.

ثم لجهد العالم الكبير في سبر أغوار تاريخ علم الفيزياء منذ عصر الإغريق، مبحرًا بنا في محيط العلم وبين أمواجه العظيمة كربان ماهر، وبأسلوب رشيق وأنيق للغاية ليضعنا على مشارف المستقبل.

إن هذا الكتاب بحق هو قصة الفيزياء من قبل الألف وإلى ما بعد الياء.

وإني لأرجو أن يُحفز هذا الكتاب الأجيال الجديدة من الباحثين في وطننا العربي في مجال الفيزياء، لاستشراف المستقبل، فما زال العلم لم يَقُل كلمته الأخيرة، وما زال بانتظارهم الكثير من العمل.

والله من وراء القصد

مصطفى العدوي

٢٣/ ٣/ ٢٠٢٢

إهداء المؤلف

إلى زوجتي الحبيبة شيزو، وإلى ابنتَي: د.ميشيل كاكو،
وأليسون كاكو.

مقدمة إلى النظرية النهائية

النظرية النهائية إطار واحد من شأنه أن يُوحِّد كل قوى الكون، وأن يُصمِّم كل شيء، من أضخم الأشياء مثل حركة الكون المتوسع، إلى رقصة الجسيمات دون الذرية الأكثر دقة.

التحدي هو كتابة معادلة ستشمل أناقتها وروعتها الرياضية كل الفيزياء.

حاول بعض أبرز الفيزيائيين في العالم السير في هذا السبيل، حتى إن ستيفن هوكينج تحدث في هذا الأمر تحت عنوان: «هل نهاية الفيزياء النظرية على مرمى البصر؟».

إذا نجحت مثل هذه النظرية، فسيكون ذلك بمثابة تتويج للعلم. ستكون الكأس المقدسة للفيزياء، صيغة واحدة يمكن من خلالها -من حيث المبدأ- استخلاص جميع المعادلات الأخرى، ابتداءً من الانفجار الأعظم، وانتهاء إلى نهاية الكون.

سيكون المنتج النهائي لألفَي عام من البحث العلمي منذ أن طرح القدماء السؤال: «مم يتكون العالم؟»، إنها رؤية تخطف الأنفاس.

حلم أينشتاين العظيم

واجهت التحدي الأول الذي طرحه هذا الحلم عندما كنت طفلًا في الثامنة من عمري.

ذات يوم، أعلنت الصحف أن عالِمًا عظيمًا قد مات للتو. كانت هناك صورة لا تُنسى في الصحيفة. كانت صورة لمكتبه وقد وُضع فوقه دفتر ملاحظات مفتوح. كان التعليق المصاحب للصورة أن أعظم العلماء في عصرنا لم يتمكن من إنهاء العمل الذي بدأه. كنت مسحورًا. ما الذي يمكن أن يكون صعبًا لدرجة أن أينشتاين العظيم لا يستطيع حله؟

احتوى هذا الكتاب على نظريته غير المكتملة عن كل شيء، والتي أطلق عليها أينشتاين «نظرية المجال الموحد»[1]. لقد أراد معادلة ربما لا يزيد طولها على بوصة واحدة، من شأنها أن تسمح له، حسب كلماته، بـ«قراءة عقل الله».

---

(١) نظرية المجال الموحد **Unified Field Theory**: هي أحد أشكال نظرية المجال التي تسمح لكل القوى الأساسية، بما في ذلك الجسيمات الأولية، بأن تكتب بدلالة مجال وحيد. لقد صيغ المصطلح الأساسي للنظرية من قبل ألبرت أينشتاين في محاولة لتوحيد نظرية النسبية العامة مع الكهرومغناطيسية. لاحظ أينشتاين تشابهًا رياضيًّا بين قوانين الجاذبية عند نيوتن والقوانين الأساسية للكهرومغناطيسية عند كولوم. ترتبط هذه النظرية بشكل وثيق مع نظرية كل شيء **The Theory of everything**، مع اختلاف أنها تحاول أن تشرح كل ثوابت الطبيعة.

غير مُدرِك تمامًا لخطورة هذه المشكلة، قررتُ أن أسير على خطى هذا الرجل العظيم، وتمنيت أن ألعب دورًا صغيرًا في إنهاء سعيه.

لكن كثيرين آخرين حاولوا وفشلوا. كما قال عالم الفيزياء في جامعة برينستون (فريمان دايسون)[٢] ذات مرة: «إن الطريق إلى نظرية المجال الموحد مليء بجثث المحاولات الفاشلة».

يعتقد اليوم العديد من علماء الفيزياء البارزين أننا نقترب أخيرًا من حل هذه المعضلة.

يُطلق على المرشح الرئيسي لحل هذه المعضلة «نظرية الأوتار» (وهذا في رأيي فقط)، والتي تفترض أن الكون لم يتكون من نقاط جسيمية، ولكن من أوتار متذبذبة صغيرة، والتي يمكن ملاحظة كل منها متوافقة مع كل جسيم دون ذري[٣].

---

(٢) جون فريمان دايسون **Freeman Dyson** (١٥ ديسمبر ١٩٢٣ – ٢٨ فبراير ٢٠٢٠): رياضي وفيزيائي نظري أمريكي من أصل بريطاني. اشتهر بعمله في مجال نظرية الكم وفيزياء الحالة الصلبة وعلم الفلك والهندسة النووية. هو عضو في مجلس الرعاة من نشرة علماء الذرة. عاش دايسون في جامعة برينستون من ولاية نيو جيرسي لأكثر من خمسين عامًا.

(٣) الجسيمات دون الذرية **subatomic particle**: الجسيمات دون الذرية هي التي تكون ذات أحجام أصغر من الذرة، من هذه الجسيمات البروتونات والإلكترونات والنيترونات التي منها تتكون الذرة، كما أن منها جسيمات أخرى تنتج من التفاعلات النووية لكنها غير مستقرة، إذ سرعان ما تتلاشى على هيئة جسيمات أخرى أو طاقة إشعاعية، وقسَّم العلماء الجسيمات دون الذرية إلى ثلاثة أقسام رئيسية؛ اللبتونات والكواركات والبوزونات، هذه الأنواع تمثل الجسيمات الأولية؛ أي التي لم يثبت حتى الآن أنها تتكون من جسيمات أصغر منها، ولكنها قد تدخل في تكوين جسيمات أخرى، فالكواركات مثلًا هي الجسيمات التي يتكون منها كل من البروتون والنيترون، أما الإلكترون فهو من اللبتونات. إن حجم الجسيمات الأولية أصغر بمقدار مائة مليون مرة من حجم الذرات، وبعضها عمره قصير جدًّا، يصل إلى أجزاء من الثانية.

إذا كان لدينا مجهر قوي بما فيه الكفاية، يمكننا أن نرى أن الإلكترونات والكواركات والنيوترينوات وما إلى ذلك، ليست سوى اهتزازات في حلقات صغيرة تشبه الأربطة المطاطية. إذا نتف الشريط المطاطي مرات كافية وبطرق مختلفة، فإننا في النهاية نخلق جميع الجسيمات دون الذرية المعروفة في الكون. هذا يعني أنه يمكن اختزال جميع قوانين الفيزياء في تناغم هذه الأوتار. الكيمياء هي الألحان التي يمكن للمرء أن يعزف عليها. الكون سيمفونية. وعقل الله، الذي كتب عنه أينشتاين ببلاغة، هو موسيقى كونية يتردد صداها في جميع أنحاء الزمكان[٤].

إن هذا ليس مجرد سؤال أكاديمي.

في كل مرة يكتشف العلماء قوة جديدة، فإنها تغير مجرى الحضارة وتغير مصير البشرية. على سبيل المثال، أدى اكتشاف نيوتن لقوانين الحركة والجاذبية إلى وضع الأساس لعصر الماكينة والثورة الصناعية. مهَّد تفسير مايكل فاراداي وجيمس كلارك ماكسويل للكهرباء والمغناطيسية الطريقَ لإضاءة مدننا، ومنحنا محركات ومولدات

(٤) الزمكان **Space-time** (الزمان–مكان): هو دمج لمفهومَي الزمان والمكان، هو الفضاء بأبعاده الأربعة، الأبعاد المكانية الثلاثة التي نعرفها؛ الطول والعرض والارتفاع، مضاف إليها الزمن كبعد رابع، هذا الفضاء الرباعي يشكل نسيجًا أو شبكة تحمل كل شيء في هذا الكون، كل جسم مهما كان حجمه وكل حدث يخضع لها، فلا وجود للأشياء ولا للأحداث خارج نطاقَي الزمان والمكان. يعد هذا مصطلحًا حديثًا نسبيًّا في الفيزياء، منحوتًا من كلمتَي الزمان والمكان، يُطلق على أي نموذج رياضي يدمج الأبعاد الثلاثة للمكان مع بعد واحد للزمن ليُكوِّن فضاءً رباعي الأبعاد. يمكن استخدام المخططات الزمكانية لتُصوِّر التأثيرات النسبية، مثل السبب وراء التباين الذي يراه مراقبون مختلفون في زمن ومكان وقوع حدث ما.

كهربائية قوية، بالإضافة إلى الاتصال الفوري عبر التلفزيون والراديو. شرح أينشتاين من خلال معادلته الشهيرة $E = mc^2$ قوة النجوم، وساعد في تفكيك القوة النووية. عندما كشف إرفين شرودنجر وفيرنير هايزنبرج وآخرون عن أسرار نظرية الكم، قدموا لنا ثورة التكنولوجيا العظيمة اليوم، نراها في أجهزة الكمبيوتر العملاقة والليزر والإنترنت وجميع الأدوات الرائعة في غرف المعيشة لدينا.

في النهاية، تدين جميع عجائب التكنولوجيا الحديثة بأصلها للعلماء الذين اكتشفوا تدريجيًّا القوى الأساسية للعالم. ربما يجتمع العلماء الآن حول النظرية التي توحد قوى الطبيعة الأربع -الجاذبية، والقوة الكهرومغناطيسية، والقوى النووية القوية والضعيفة- في نظرية واحدة. في النهاية، قد يجيب ذلك عن بعض أعمق الألغاز والأسئلة في كل العلوم، مثل:

- ماذا حدث قبل الانفجار الأعظم؟ لماذا حدث الانفجار من الأساس؟
- ما الذي يقع على الجانب الآخر من الثقب الأسود؟
- هل يمكن السفر عبر الزمن؟
- هل توجد ثقوب دودية في الأكوان الأخرى؟
- هل هناك أبعاد أعلى؟
- هل هناك أكوان متعددة منبثقة من الأكوان المتوازية؟

يدور هذا الكتاب حول السعي لإيجاد هذه النظرية النهائية، وكل

التقلبات والمنعطفات الغريبة لما هو بلا شك أحد أغرب الفصول في تاريخ الفيزياء. سنراجع جميع الثورات السابقة، التي أعطتنا أعاجيبنا التكنولوجية، بدءًا من الثورة النيوترونية، ووصولًا إلى التمكن من القوة الكهرومغناطيسية، وتطوير النسبية ونظرية الكم، ونظرية الأوتار الحالية. وسنشرح كيف يمكن لهذه النظرية أيضًا أن تكشف أعمق ألغاز المكان والزمن.

❊ ❊ ❊

جيش من النقاد

ومع ذلك، لا تزال هناك عقبات. على الرغم من كل الإثارة التي تُولِّدها نظرية الأوتار، حرص النقاد على توضيح عيوبها. وبعد كل هذه الضجة والجنون، توقف التقدم الحقيقي.

المشكلة الأكثر وضوحًا هي أنه على الرغم من كل الصحافة المطلقة التي تمجد جمال وتعقيد النظرية، ليس لدينا دليل قوي وقابل للاختبار. ذات مرة، كان من المأمول أن يجد مصادم الهدرونات الكبير (LHC)[٥] في أجوار جنيف بسويسرا، وهو أكبر معجل للجسيمات

(٥) المسارع النووي الكبير أو مصادم الهدرونات الكبير **Large Hadron Collider**: اختصارًا **LHC** هو أضخم مُعجِّل جسيمات وأعلاها طاقة وسرعة في العالم، حيث يصل قطره نحو ٢٧ كيلومترًا، وهو مبني تحت الأرض على عمق نحو ١٠٠ متر بين فرنسا وسويسرا بالقرب من جنيف، يستخدم هذا السينكروترون لمصادمة جسيمات دون ذرية وهي البروتونات بطاقة تصل إلى ٧ تيرا إلكترون فولت (١٢ , ١ ميكروجول). يُعجِّل فيض من البروتونات في دائرة المعجل إلى سرعة قريبة من سرعة الضوء تصل طاقة حركتها ٣ , ٥ تيرا (١ تيرا = ١٠١٢) إلكترون فولت **TeV**، وفي نفس الوقت يقوم المعجل بتسريع فيض آخر من البروتونات في الاتجاه العكسي (في أنبوب دائري آخر موازٍ للأول) إلى سرعة قريبة من سرعة الضوء أيضًا، بحيث تصل طاقة حركته ٣ , ٥ تيرا إلكترون فولت. تحافظ على بقاء البروتونات المعجلة في أنبوب كل فيض منها، وهو دائري يبلغ طوله ٢٧ كيلومتر مغناطيسات قوية جدًّا، تستهلك طاقة كهربائية عالية تستلزم التبريد بالهيليوم السائل ذي درجة حرارة نحو ٤ كلفن؛ أي نحو ٢٧٠ درجة تحت الصفر المئوي.

بعد تسريع فيضي البروتونات إلى طاقة ٣,٥ تيرا إلكترون فولت في اتجاهين متضادين، يسلط فيضي البروتونات عند نقاط معينة للالتقاء والتصادم رأسيًّا ببعضهما البعض، وتصبح =

في التاريخ، دليلًا ملموسًا على النظرية النهائية، لكن هذا ظل بعيد المنال. كان المصادم LHC قادرًا على العثور على بوزون هيجز (أو

= طاقة التصادم بين كل بروتونين ٧ تيرا إلكترون فولت. خصصت ٤ نقاط لتصادم البروتونات على دائرة المعجل الكبرى البالغ محيطها ٢٧ كيلومترًا. وأُنشئت عند تلك النقاط مكشافات (عدادات) لتسجيل نواتج التصادمات، ومن المتوقع أن تحتوي نواتج الاصطدام على جميع الجسيمات دون الذرية المعروفة لنا، منها إلكترونات ومضاد الإلكترون وبروتونات ونقائض البروتونات وكواركات وغيرها، ويأمل العلماء اكتشاف جسيمات أولية جديدة لا نعرفها ولا تعمر طويلًا؛ أي تتحلل بعد نشأتها بوقت قصير جدًّا وتتحول ثانية إلى طاقة.

مصطلح هادرون يشير إلى الجسيمات التي تحتوي على الكواركات، ومن تلك الجسيمات البروتون والنيوترون. بينما يمتلك البروتون شحنة كهربائية موجبة لا يمتلك النيوترون شحنة كهربائية. لهذا السبب يمكن تعجيل البروتونات في المعجل أو المصادم بواسطة تسليط مجال كهربائي عليها، ومتواصل عبر دائرة المعجل، ولا يمكن تعجيل النيوترونات. هذا يعني أن مصادم الهدرونات الكبير ما هو إلا معجل للبروتونات، ويسمى الكبير حيث إن دائرته يصل قطرها ٢٧ كيلومترًا على الحدود بين سويسرا وفرنسا بالقرب من مدينة جنيف، وهو مبني ١٠٠ متر تحت الأرض، بحيث لا تصل إليه أشعة كونية تشوش على قياساته، كما أنه يعجل الجسيمات بحيث تصطدم حاليًّا (٢٠١٦) بطاقة ١٤ تيرا إلكترون فولت.

أجريت تجارب بدأت في عام ٢٠١٠ حيث عمل المصادم في طاقات عالية لم نصل إليها من قبل. ومن أهم نتائجه التأكد من صحة نظرية النموذج العياري للجسيمات الأولية (مكونات المادة). فقد اكتشف المصادم هدرونات عديدة جديدة، وبلازما كوارك–غلوونية، كما شوهد في الميزون Bs0- ميزون. تحلله إلى كاون وبيون وكذلك تحلله النادر إلى ٢ من الميونات.

ويعتبر من أكبر نجاحات مصادم الهدرونات الكبير الاكتشاف المعملي لبوزون هيجز Higgs–Bosons وقد منحت جائزة نوبل في الفيزياء لعام ٢٠١٣ لفرانسوا إنغلرت وبيتر هيجز صاحبَي آلية هيجز.

من المخطط أن يعمل مصادم الهدرونات الكبير حتى عام ٢٠٣٠، وسوف تُعلَّى طاقته إلى نحو ٣٣ تيرا إلكترون فولت عن طريق استبدال مغناطيساته وأجهزة التوجيه فيه، كما سوف تُستبدل بالعدادات الداخلية في مكشافاته عدادات أكثر حساسية في المستقبل. ويأمل العلماء أن يعطي مصادم الهدرونات الكبير نتائج عن المادة المظلمة التي ينادي بوجودها علماء الفلك. بذلك يتكاتف علماء فيزياء الجسيمات وعلماء الفلك في حل المعضلة: هل توجد مادة مظلمة في الكون؟ والبحث يتواصل.

جسيم الله)[٦]، لكن هذا الجسيم كان مجرد قطعة صغيرة مفقودة من النظرية النهائية.

على الرغم من تقديم مقترحات طموحة لخليفة أقوى لمصادم الهدرونات الكبير، فإنه لا يوجد ما يضمن أن هذه الآلات المكلفة ستجد أي شيء على الإطلاق. لا أحد يعرف على وجه اليقين ما هو مستوى الطاقة المطلوبة التي سنجد عندها جسيمات دون ذرية جديدة يمكنها تأكيد أو إثبات النظرية.

لكن ربما يكون النقد الأكثر أهمية لنظرية الأوتار هو أنها تتنبأ بوجود أكوان متعددة. قال أينشتاين ذات مرة إن السؤال الرئيسي كان: هل كان لدى الله خيار في صنع الكون؟ هل الكون فريد من نوعه؟ تعتبر نظرية الأوتار في حد ذاتها فريدة من نوعها، ولكن من المحتمل أن

---

(٦) بوزون هيجز **Higgs boson**: جسيم أولي يُظن أنه المسؤول عن اكتساب المادة لكتلتها. وقد رصدت إشارات لجسيم هيجز عمليًّا في عام ٢٠١١ في ما يعرف بـ«مصادم الهدرونات الكبير»، وأعلن مختبر سيرن في ٤ يوليو ٢٠١٢ أنه متأكد بنسبة ٩٩٩ ,٩٩٪ من وجود بوزون هيجز فعليًّا. وكان قد تنبأ الفيزيائي الإسكتلندي «بيتر هيجز» عام ١٩٦٤ بوجوده في إطار النموذج الفيزيائي القياسي الذي يفترض أن القوى الأساسية قد انفصلت عند الانفجار الأعظم، وكانت قوة الجاذبية هي أول ما انفصل ثم تبعتها بقية القوى. ويُعتقد طبقًا لهذه النظرية أن البوزون –وهو جسيم أولي افتراضي ثقيل، تبلغ كتلته نحو ٢٠٠ مرة كتلة البروتون حسب نظرية هيجز– هو المسؤول عن طريق ما ينتجه من مجال هيجز على حصول الجسيمات الأولية لكتلتها، مثل الإلكترون والبروتون والنيوترون وغيرها. فالتصور هو أنه عندما يتحرك فهو يعاني مقاومة من مجال هيجز، تلك المقاومة تظهر على الإلكترون في هيئة كتلة. كل جسيم أولي يكتسب كتلته عندما يتحرك في مجال هيجز «الأساسي» ويتأثر بهذا المجال. فالبروتون مثلًا يعاني في مجال هيجز أكثر مما يعاني الإلكترون، وهذا هو تفسير هيجز بأن البروتون أكبر كتلة نحو ١٨٤٠ مرة من كتلة الإلكترون. وطبقًا لنظرية هيجز كل جسيم أولي يكتسب كتلته بقدر تأثره وتفاعله مع مجال هيجز. صاغ هيجز نظريته هذه خلال الستينيات من القرن الماضي.

يكون لها عدد لا حصر له من الحلول. يسمي الفيزيائيون هذه بـ«مشكلة المناظر الطبيعية» -حقيقة أن كوننا قد يكون مجرد حل واحد من بين محيط من الحلول الأخرى الصالحة. إذا كان كوننا واحدًا من العديد من الاحتمالات، فما هو كوننا إذن؟ لماذا نعيش في هذا الكون الخاص وليس في آخر؟ ما هي إذن القوة التنبؤية لنظرية الأوتار؟ هل هي نظرية كل شيء أم نظرية أي شيء؟

أعترف أن لي مصلحة في هذا البحث. لقد عملت على نظرية الأوتار بدءًا من عام ١٩٦٨، منذ ظهورها بشكل عرضي وغير معلن وغير متوقع على الإطلاق. لقد رأيت التطور الملحوظ للنظرية التي تطورت من صيغة واحدة إلى تخصص مع أوراق بحثية كاملة للمكتبة. اليوم، تُشكِّل نظرية الأوتار أساس الكثير من الأبحاث التي تجرى في المختبرات الرائدة في العالم. نأمل أن يمنحك هذا الكتاب تحليلًا متوازنًا وموضوعيًّا للاختراقات والقيود في نظرية الأوتار.

وسوف يشرح أيضًا سبب استحواذ هذا المسعى على خيال كبار العلماء في العالم، ولماذا وَلَّدَت هذه النظرية الكثير من الشغف والجدل.

* * *

الفصل الأول

التوحيد[٧] - الحلم القديم

عند التحديق في سماء الليل الرائعة المحاطة بكل هذه النجوم اللامعة في السماء، من السهل أن تثقل أذهاننا بجلالها المطلق وجمالها الأخاذ. يتحول إعجابنا وفضولنا إلى بعض أكثر الأسئلة غموضًا على الإطلاق.

هل هناك تصميم كبير للكون؟

كيف نفهم الكون الذي يبدو بلا معنى؟

هل هناك سبب وجيه لوجودنا أم أنه لا معنى له؟

أتذكر قصيدة ستيفن كرين[٨]:

قال رجل للكون:

---

(٧) التوحيد **UNIFICATION**: المقصود هو محاولة الفيزيائيين التوحيد بين القوى الأساسية في الطبيعة، وهي القوى الكهرومغناطيسية وقوى الجاذبية والقوى النووية القوية والقوى النووية الضعيفة، في نظرية موحدة عظمى.

(٨) ستيفن كرين **Stephen Crane** (١ نوفمبر ١٨٧١ - ٥ يونيو ١٩٠٠): روائي أمريكي وكاتب قصة قصيرة وشاعر وصحافي. ولد ستيفن كرين في مدينة نيويورك الأمريكية، كان يحب الأطفال ويدعو إلى احترامهم وعدم الكذب عليهم. بعد أن أتم دراسته الجامعية عمل كمراسل لصحيفة نيويورك تريبيون. أما الكتاب الأمريكيون فكان كرين على الإجمال يكرههم ويقول إنهم غير صادقين فيما يكتبون.

«سيدي، أنا موجود!».

أجاب الكون:

«وماذا يعني؟!».

«الحقيقة لم تخلق لديَّ شعورًا بالالتزام بأي شيء».

كان اليونانيون أول من قاموا بمحاولات جادة لتفسير فوضى العالم من حولنا. اعتقد الفلاسفة مثل أرسطو أنه يمكن اختزال كل شيء إلى مزيج من أربعة مكونات أساسية: التراب والهواء والنار والماء. ولكن كيف تؤدي هذه العناصر الأربعة إلى زيادة التعقيد الثري للعالم؟

اقترح الإغريق إجابتين على الأقل عن هذا السؤال. الأول قدمه الفيلسوف ديموقريطس[٩]، حتى قبل أرسطو. كان يعتقد أن كل شيء

(٩) ديموقريطس أو ديمقراط **Δημόκριτος**: اشتهر بـ«الفيلسوف الضاحك»، فيلسوف يوناني ولد في أبديرة، تراقيا (٤٦٠ ق.م – ٣٧٠ ق.م). كان أحد الفلاسفة المؤثرين في عصر ما قبل سقراط، وكان تلميذًا للفيلسوف ليوكيبوس الذي صاغ النظرية الذرية للكون. ورث من والده أموالًا طائلة وأنفقها في الرحلات التي كان مولعًا بها، وزار مصر وتعلم الرياضيات من العلماء المصريين، ثم ذهب إلى بلاد فارس ثم إلى الهند وحاور الفلاسفة العراة فيها، ثم عاد إلى أثينا وقابل سقراط وتعرف عليه. والذرة عند ديموقريطس وحدة متجانسة غير محسوسة، غير متناهية العدد، متناهية الصغر، وهي الجزء الذي لا يتجزأ من المادة، أزلية ومتحركة بذاتها. وتتشابه الذرات من حيث طبيعة المادة وعدم قبولها القسمة، لكنها تختلف من حيث الشكل والوضع والترتيب. وبوصف ديموقريطس أحد فلاسفة الطبيعة الأوائل الذين حاولوا إعادة الكون إلى جوهر واحد أو مبدأ واحد، فهو يفسر عملية الكون والفساد تبعًا لنظريته الذرية. وبرأيه أنه باتحاد الذرات ينشأ الكون، وبافتراقها يتم فساده وزواله، فالأشياء تتركب من ذرات متحركة تلقائيًّا، ويرجع اختلافها إلى اختلاف مقدار الذرات الداخلة فيها وشكلها وطريقة ترتيبها، ثم تكتسب كيفياتها من لونٍ ورائحةٍ وحرارةٍ، وهكذا تتخلق الأشياء بفعل تصادم الذرات المتحركة في خلاء الكون اللا نهائي، فتتنافر وتتباعد بفعل اختلافها، أو تتجاذب وتتآلف بفعل تماثلها.

يمكن اختزاله إلى جسيمات دقيقة وغير مرئية وغير قابلة للتدمير، سماها الذرات **atoms** (والتي تعني «غير قابلة للتجزئة» في اللغة اليونانية). ومع ذلك، أشار النقاد إلى أنه من المستحيل الحصول على دليل مباشر على الذرات، لأنها أصغر من أن يمكن ملاحظتها. لكن ديموقريطس أشار إلى أدلة مقنعة وغير مباشرة.

سنضرب مثالًا بخاتم ذهبي. على مر السنين يبدأ الخاتم في التآكل. إنه يفقد شيئًا ما. كل يوم تختفي أجزاء صغيرة من مادة الخاتم. وبالتالي، على الرغم من أن الذرات غير مرئية، يمكن قياس وجودها بشكل غير مباشر.

حتى اليوم، تجري معظم علومنا المتقدمة بشكل غير مباشر. نحن نعرف تركيب الشمس، والتركيب التفصيلي للحمض النووي، وعمر الكون، كل ذلك بسبب قياسات من هذا النوع. نحن نعلم كل هذا، على الرغم من أننا لم نَقُم بزيارة النجوم مطلقًا، ولم ندخل إلى جزيء الحمض النووي، ولم نشاهد الانفجار الأعظم. سيصبح هذا التمييز بين الدليل المباشر وغير المباشر ضروريًّا عندما نناقش محاولات إثبات نظرية مجال موحد.

كان النهج الثاني رائدًا من قبل عالم الرياضيات العظيم فيثاغورس.

كانت لدى فيثاغورس البصيرة لتطبيق وصف رياضي على ظواهر دنيوية مثل الموسيقى. وفقًا لهذا البطل الأسطوري في العلم القديم، لاحظ وجود أوجه تشابه بين صوت نتف خيط قيثارة، والرنين الناتج عن دق قضيب معدني. وجد أن كليهما صنع ترددات موسيقية تهتز بنسب

معينة. لذا فإن شيئًا ممتعًا من الناحية الجمالية مثل الموسيقى له أصله في رياضيات الرنين. كان يعتقد أن هذا قد يُظهر أن تنوع الأشياء التي نراها من حولنا يجب أن يتبع نفس القواعد الرياضية.

لقد ظهرت نظريتان عظيمتان على الأقل عن عالمنا من اليونان القديمة: فكرة أن كل شيء يتكون من ذرات غير مرئية وغير قابلة للتدمير، وأن تنوع الطبيعة يمكن وصفه بواسطة رياضيات الاهتزازات.

لسوء الحظ، مع انهيار الحضارات القديمة، ضاعت هذه المناقشات الفلسفية. توارى إلى النسيان مفهوم أن هناك نموذجًا يمكن أن يشرح الكون لما يقرب من ألف عام. انتشر الظلام في العالم الغربي، واستبدل بالبحث العلمي إلى حد كبير، الإيمان بالخرافات والسحر والشعوذة.

ميلاد جديد في عصر النهضة

في القرن السابع عشر، نهض عدد قليل من العلماء العظماء لتحدي النظام القائم والتحقق من طبيعة الكون، لكنهم واجهوا معارضة شديدة واضطهادًا. كان يوهانس كيبلر مستشارًا للإمبراطور رودولف الثاني، وهو من أوائل الذين طبقوا الرياضيات على حركة الكواكب، وربما نجا من الاضطهاد من خلال تضمين عناصر دينية في عمله العلمي.

أما الراهب السابق جيوردانو برونو[١٠] فلم يكن محظوظًا جدًّا.

---

(١٠) جيوردانو برونو **Giordano Bruno**: المعروف أيضًا بـ«نولانو أو برونو دي نولا» (١٥٤٨ في نولا – ١٧ فبراير ١٦٠٠ في روما) كان دارسًا دينيًّا وفيلسوفًا إيطاليًّا شهيرًا حُكم عليه بالهرطقة من الكنيسة الكاثوليكية. كان راهبًا في البداية ولكنه انتقل من الدراسات اللاهوتية إلى الفلسفة فيما بعد. وقد اعتنق نظرية كوبرنيكوس عن دوران الأرض على الرغم من أنها كانت محرمة من قبل رجال الدين آنذاك، وذهب إلى أبعد منها آنذاك بوضعه فرضية أن النظام الشمسي هو واحد من مجموعة نظم تغطي الكون في صورة نجوم لا نهائية، وأن ألوهية الكون لا نهائية. كما افترضت نظريته أن كلًّا من النظم النجمية الأخرى تشتمل على كواكب ومخلوقات عاقلة أخرى. ابتداءً من عام ١٥٩٣، حوكم برونو بالهرطقة من قبل محاكم التفتيش الرومانية بتهمة إنكاره للعقائد الكاثوليكية الأساسية (بما في ذلك عقيدة الجحيم، والثالوث، والكرستولوجيا، وعذرية مريم، والاستحالة الجوهرية). ووجدته محاكم التفتيش مذنبًا، وفي عام ١٦٠٠ عوقب حرقًا في روما في ساحة كامبو دي فيوري. بعد وفاته اكتسب شهرة كبيرة، واعتبره عدد من الباحثين بشكل خاص في القرن التاسع عشر وأوائل القرن العشرين شهيدًا للعلم، وذلك على الرغم من أن المؤرخين قد جادلوا أن محاكمته كانت بسبب آرائه الفلسفية والدينية واللاهوتية، وليست لآرائه الفلكية. ولا تزال تعتبر قضية برونو علامة بارزة في تاريخ الفكر الحر والعلوم الناشئة، وتعبيرًا من الكنيسة عن الندم قاموا بنحت تمثال له في ساحة كامبو دي فيوري.

في عام ١٦٠٠، حوكم ثم حكم عليه بالإعدام بتهمة البدعة. كُمم فوه وعُرض عاريًا في شوارع روما، وأخيرًا حُرق على وتد. وما هي جريمته الرئيسية؟ أنه أعلن أن الحياة قد تكون موجودة على كواكب تدور حول نجوم أخرى.

كاد جاليليو العظيم أبو العلوم التجريبية أن يلقى نفس المصير. لكن على عكس برونو، تراجع جاليليو عن نظرياته تحت وطأة الموت. ومع ذلك، فقد ترك إرثًا دائمًا مع تلسكوبه، الذي ربما يكون الاختراع الأكثر ثورية وإثارة للفتنة في كل العلوم. يمكنك باستخدام التلسكوب أن ترى بأم عينيك أن القمر كان مثقوبًا بالحفر؛ وأن كوكب الزهرة له أطوار تتفق مع دورانه حول الشمس؛ وأن كوكب المشتري لديه أقمار، وكلها أفكار يمكن وصفها بالهرطقات.

للأسف، وُضع قيد الإقامة الجبرية، وعُزل عن الزوار، وأصابه العمى في النهاية. (قيل لأنه ذات مرة نظر مباشرة إلى الشمس بتلسكوبه). مات جاليليو رجلًا محطمًا. ولكن في نفس العام الذي مات فيه، وُلد طفل في إنجلترا سيكبر ليكمل نظريات جاليليو وكبلر غير المكتملة، ليعطينا نظرية موحدة عن السماوات.

نظرية نيوتن عن القوى

ربما يكون إسحاق نيوتن أعظم عالم ظهر على الأرض على الإطلاق.

ففي عالم مهووس بالسحر والشعوذة، تجرأ على كتابة القوانين الكونية للسماء وتطبيق رياضيات جديدة اخترعها لدراسة القوى، تسمى حساب التفاضل والتكامل. كما كتب الفيزيائي ستيفن واينبرج[١١]: «إنه مع إسحاق نيوتن بدأ فعليًّا الحلم الحديث للنظرية النهائية». في ذلك الوقت، كانت نظرية نيوتن تعتبر نظرية كل شيء؛ أي النظرية التي تصف كل حركة.

---

(١١) ستيفن واينبرج **Steven Weinber** (٣ مايو ١٩٣٣ – ٢٣ يوليو ٢٠٢١): فيزيائي نظري أمريكي، حائز جائزة نوبل في الفيزياء لمساهماته في مجال توحيد القوة النووية الضعيفة والمجال الكهرومغناطيسي بين الجسيمات الأولية بالاشتراك مع محمد عبد السلام وشيلدون غلاشو. شغل واينبرج كرسي جوزي ريجينتال للعلوم في جامعة تكساس في أوستن، عندما كان عضوًا في قسمي الفيزياء والفلك هناك. نال العديد من الجوائز والتكريمات على أبحاثه حول الجسيمات الأولية وعلم الكونيات الفيزيائي، وأهمها جائزة نوبل في الفيزياء عام ١٩٧٩ والميدالية الوطنية للعلوم عام ١٩٩١، وفي عام ٢٠٠٤ حصل على وسام بنجامين فرانكلين من الجمعية الفلسفية الأمريكية، وأشيد به حينها باعتباره: «أعظم عالم فيزياء نظرية على قيد الحياة في العالم». انتُخب عضوًا في الأكاديمية الوطنية الأمريكية للعلوم والجمعية الملكية البريطانية، وعضوًا في الجمعية الفلسفية الأمريكية والأكاديمية الأمريكية للفنون والعلوم. عمل واينبرج مستشارًا في الوكالة الأمريكية للحد من التسلح ونزع السلاح، ورئيسًا للجمعية الفلسفية لتكساس، وعضوًا في مجلس محرري مجلة ديدالوس، ومجلس العلماء بمكتبة الكونجرس، ومجموعة جونسون لمستشاري الدفاع، والعديد من المجالس واللجان الأخرى.

بدأ كل شيء عندما كان نيوتن في الثالثة والعشرين من عمره. أُغلقت جامعة كامبريدج بسبب الطاعون الأسود، وذات يوم من عام ١٦٦٦، بينما كان يتجول في منزله الريفي، رأى تفاحة تسقط. ثم سأل نفسه سؤالًا من شأنه أن يغير مجرى تاريخ البشرية:

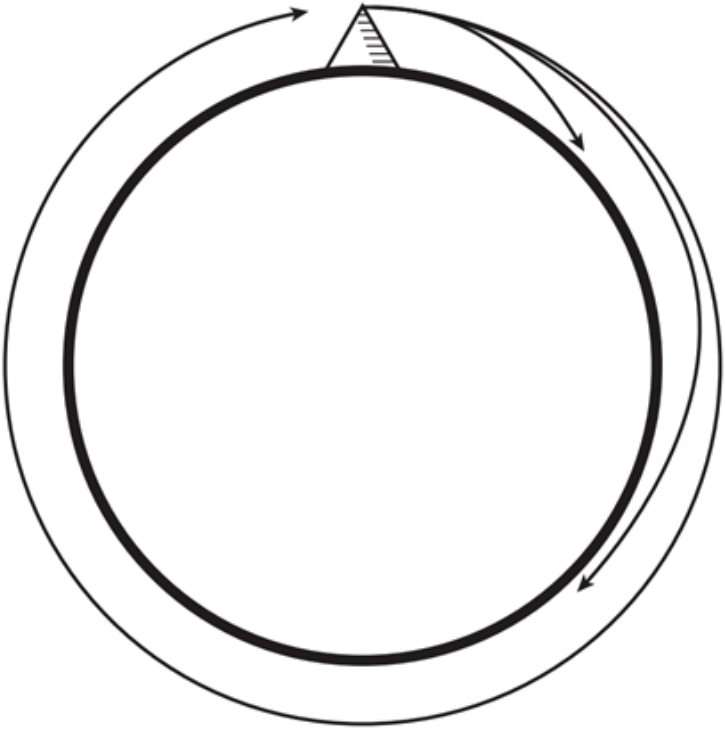
إذا سقطت تفاحة على الأرض، فلم لا يسقط القمر أيضًا؟

قبل نيوتن، كان لدى الكنيسة نوعان من القوانين. الأول كان القوانين الموجودة على الأرض، والتي أفسدتها خطيئة البشر. والثاني هو قوانين السماء النقية والكاملة والمتناغمة.

كان جوهر فكرة نيوتن هو اقتراح نظرية موحدة تشمل السماء والأرض.

في دفتر ملاحظاته، رسم صورة غيرت مصير العلم (انظر الشكل ١).

إذا تم إطلاق قذيفة مدفعية من قمة جبل، فإنها تقطع مسافة معينة قبل أن تصطدم بالأرض. ولكن إذا أطلقت قذيفة المدفع بسرعات متزايدة، فإنها تنتقل أبعد وأبعد قبل أن تعود إلى الأرض، حتى تدور في النهاية حول الأرض بالكامل وتعود إلى قمة الجبل. وخلص إلى أن القانون الطبيعي الذي يحكم التفاح وقذائف المدفع والجاذبية هو أيضًا الذي يمسك بالقمر في مداره حول الأرض. كانت الفيزياء الأرضية والسماوية هي نفسها.



شكل ١ : يمكن للمرء أن يطلق قذيفة مدفع بطاقة متزايدة، بحيث تدور في النهاية حول الأرض بالكامل وتعود إلى نقطة البداية. لقد قال نيوتن إن هذا يفسر مدار القمر، وبذلك وحد القوانين الفيزيائية الموجودة على الأرض مع قوانين الأجرام السماوية.

كانت الطريقة التي أنجز بها نيوتن تلك الفكرة هي تقديم مفهوم القوى. تحركت الأشياء لأنها سُحبت أو دُفعت بواسطة قوى كونية يمكن قياسها بدقة والتنبؤ بها باستخدام قوانين الرياضيات. (في السابق، اعتقد بعض اللاهوتيين أن الأشياء تتحرك بسبب الرغبات، لقد سقطت تلك الأشياء لأنها كانت ترغب في الاتحاد مع الأرض والعودة إليها).

هكذا قدم نيوتن المفهوم الرئيسي للتوحيد.

لكن نيوتن كان معروفًا بأنه شخص كتوم وأبقى جزءًا كبيرًا من عمله سرًّا. كان لديه عدد قليل من الأصدقاء، وكان غير قادر على تبادل حتى الأحاديث القصيرة، وغالبًا ما كان منغمسًا في معارك مريرة ذات أولوية مع علماء آخرين حول اكتشافاته.

في عام ١٦٨٢، حدث حدثٌ مثير غيَّر مجرى التاريخ. فقد أبحر مذنب مشتعل فوق لندن. سرت النميمة بين الجميع من ملوك وملكات إلى متسولين، والكل يتحدث عن أخباره. من أين أتى؟ أين كان ذاهبًا؟ بماذا ينذر؟

أحد الأشخاص الذين اهتموا بهذا المذنب هو عالم الفلك إدموند هالي[١٢]. قام برحلة إلى كامبريدج للقاء إسحاق نيوتن الشهير المعروف بالفعل بنظريته عن الضوء. (من خلال تسليط ضوء الشمس من خلال منشور زجاجي، أظهر نيوتن أن الضوء الأبيض ينفصل إلى جميع ألوان قوس قزح، مما يدل على أن الضوء الأبيض هو في الواقع لون مركب، كما اخترع نوعًا جديدًا من التلسكوب يستخدم المرايا العاكسة بدلًا من العدسات). عندما سأل هالي نيوتن عن المذنب الذي يتحدث عنه الجميع، صُدم عندما سمع أن نيوتن يعرف أن المذنبات تتحرك في قطع ناقص حول الشمس، وأن بإمكانه حتى التنبؤ بمساره باستخدام نظريته الخاصة في الجاذبية. في الواقع، كان يتتبعه بالتلسكوب الذي اخترعه، وقد تحرك تمامًا كما توقع.

---

(١٢) إدموند هالي Edmond Halley (٨ نوفمبر ١٦٥٦ – ١٤ يناير ١٧٤٢): عالم فلك ورياضيات وفيزياء وأرصاد جوية إنجليزي. وهو مَن ضبط وحدد مسار مذنب هالي، وهو ثاني فلكي ملكي بريطاني بعد جون فلامستيد.

ذهل هالي.

أدرك فورًا أنه كان يشهد قطعة فنية في العلوم، وتطوع لدفع تكاليف الطباعة لما سيصبح في النهاية إحدى أعظم التحف في كل العلوم، الأصول الرياضية للفلسفة الطبيعية، أو ببساطة **Principia**.

علاوة على ذلك، أدرك هالي أن نيوتن كان يتوقع عودة المذنب على فترات منتظمة، فحسب أن مذنب ١٦٨٢ سيعود في ١٧٥٨ . (أبحر مذنب هالي فوق أوروبا في يوم عيد الميلاد، ١٧٥٨، كما كان متوقعًا، مما ساعد على ارتفاع شأن وسمعة نيوتن وهالي بعد وفاتهما).

تقف نظرية نيوتن للحركة والجاذبية كواحدة من أعظم إنجازات العقل البشري، كمبدأ واحد يوحد قوانين الحركة المعروفة. كتب ألكسندر بوب[١٣]:

اختبأت الطبيعة وقوانينها في الليل:

قال الله: ليكن نيوتن!

فكان النور.

حتى اليوم، تسمح قوانين نيوتن لمهندسي ناسا بتوجيه كل مسبار فضائي عبر النظام الشمسي.

---

(١٣) ألكسندر بوب **Alexander Pope** (٢١ مايو ١٦٨٨ – ٣٠ مايو ١٧٤٤): شاعر إنجليزي شهير من القرن الثامن عشر، واشتهر بمقاطع شعرية ساخرة وبترجمته لأعمال هوميروس. وهو ثالث كاتب يتم الاقتباس منه في قاموس أكسفورد للاقتباسات، بعد شكسبير وألفريد تنيسون. واشتُهر بوب باستخدام مقطع الشعر البطولي.

ما هو التناظر[١٤]؟

قانون الجاذبية لنيوتن جدير بالملاحظة أيضًا لأن من سماته التناظر، بحيث تظل المعادلة كما هي إذا قمنا بعمل دورة كاملة. تخيل كرة تحيط بالأرض. قوة الجاذبية متطابقة على كل نقطة منها. لهذا السبب الأرض كروية، وليست شكلًا آخر، لأن الجاذبية ضغطت الأرض بشكل موحد. هذا هو السبب في أننا لا نرى نجومًا مكعبة أو كواكب هرمية أبدًا. (غالبًا تتشكل الكويكبات الصغيرة بشكل غير منتظم، لأن قوى الجاذبية على الكويكب أصغر من أن تضغطها بالتساوي).

---

(١٤) التناظر **Symmetry**: في الفيزياء أو التشابه الفيزيائي يشير إلى خواص تمتلكها بعض الأنظمة الفيزيائية تجعلها قادرة على العودة إلى حالتها الأصلية بعد إجراء عدة تحويلات في بُعدين أو ثلاثة، وهذا يفسر كيف أن تناظر النظام الفيزيائي يعتبر سمة رياضية أو فيزيائية لمعظم الأنظمة (المقيسة أو الضمنية) التي تبقى ثابتة محافظة تحت أي تغير؛ وبالتالي فإن النسبة بين أي كميتين متقابلتين تبقى ثابتة. التحويل الفيزيائي يمكن أن يكون مستمرًّا مثل دوران لشكل دائري أو متقطعًا مثل الانعكاس لشكل متناظر ثنائي الجوانب، أول من كتب عن التشابه العالم الإيطالي غاليلي الذي تحدث عن مقارنة نظامين لا يختلف أحدهما عن الآخر إلا بوحدات القياس، ولم ينجح في حساب قوى المقاومة على جسم سوى دراسة عامة لقوى المقاومة هي في الوقت ذاته معالجة نظرية ومعالجة تجريبية على نموذج، ثم نقل النتائج إلى الجسم الأصلي نفسه. وأنواع التشابه الفيزيائي هي: التشابه الهندسي، ويعني التشابه في الشكل حين يكون أحد الشكلين مكبرًا أو مصغرًا عن الشكل الآخر. والتشابه الكينماتي، ويقصد به التشابه في الحركة. وتكون نسبة السرعة في أي نقطة إلى السرعة في النقطة الثانية ثابتة. والتشابه الديناميكي، وينص مبدأ هذا التشابه على أنه يمكن التعبير عن أبعادِ الكميات الديناميكية، مثل السرعة والتسارع والقوة وغيرها، بأبعادٍ مُشتقَّةٍ من الأبعاد الأساسية للكتلة والطول والزمن.

مفهوم التناظر بسيط وأنيق وبديهي. وخلال هذا الكتاب سنرى أن التناظر ليس مجرد نافذة تافهة تلائم نظرية ما، بل هو في الواقع ميزة أساسية تشير إلى بعض المبادئ الفيزيائية الأساسية والعميقة حول الكون.

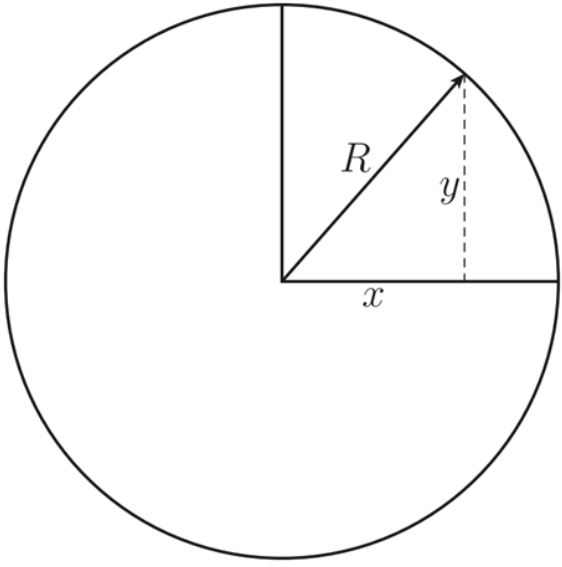
لكن ماذا نعني عندما نقول إن المعادلة متناظرة؟

يكون الكائن متناظرًا إذا تُرك كما هو، أو ثابتًا بعد إعادة ترتيب أجزائه. على سبيل المثال، تكون الكرة متناظرة لأنها تظل كما هي بعد تدويرها. لكن كيف يمكننا التعبير عن هذا رياضيًّا؟

فكِّر في الأرض التي تدور حول الشمس (انظر الشكل ٢). يحدد نصف قطر مدار الأرض بالرمز **R** والذي يظل هو نفسه كلما تحركت الأرض في مدارها. في الواقع، مدار الأرض بيضاوي الشكل، لذا **R** ليس ثابتًا تقريبًا، لكن هذا ليس مهمًّا في هذا المثال. تحدد إحداثيات مدار الأرض بواسطة الرمزين **X** و**Y** بينما تتحرك الأرض في مدارها، يتغير **X** و**Y** باستمرار، لكن **R** ثابت؛ أي لا يتغير.

لذا تحافظ معادلات نيوتن على هذا التناظر، مما يعني أن الجاذبية بين الأرض والشمس تظل كما هي كلما دارت الأرض حول الشمس. مع تغير إطارنا المرجعي، تظل القوانين ثابتة. بغض النظر عن الاتجاه الذي نتخذه عند النظر إلى مشكلة ما، فإن القواعد لا تتغير، والنتائج تظهر كما هي.

سنواجه مفهوم التناظر هذا مرارًا وتكرارًا عندما نناقش نظرية المجال الموحد. وسنرى أن التناظر هو إحدى أقوى أدواتنا في توحيد كل قوى الطبيعة.



الشكل ٢. إذا كانت الأرض تدور حول الشمس، فإن نصف قطرها R يظل كما هو. أما الإحداثيات X وY للأرض فإنها تتغير باستمرار في أثناء دورانها، لكن R ثابت. من خلال نظرية فيثاغورس، نعلم أن $R^2 = X^2 + y^2$. لذا فإن معادلة نيوتن لها تناظر عند التعبير عنها إما من حيث R (لأن R ثابت) أو x وy (عبر نظرية فيثاغورس).

تأكيد قوانين نيوتن

على مر القرون، تأكدت قوانين نيوتن بأشكال عديدة، وكان لها تأثير هائل على العلم والمجتمع أيضًا. في القرن التاسع عشر، لاحظ علماء الفلك شذوذًا غريبًا في السماء. ظهر انحراف في مدار كوكب أورانوس بما يخالف تنبؤات قوانين نيوتن. لم يتخذ مداره شكلًا بيضاويًّا مثاليًّا، ولكنه تذبذب قليلًا. ما وضع العلم في مواجهة احتمالين، إما أن قوانين نيوتن معيبة، وإما أن هناك كوكبًا لم يُكتشف بعد وأن جاذبيته تشوه مدار أورانوس. كان الإيمان بقوانين نيوتن عظيمًا لدرجة أن علماء الفيزياء مثل أوربان لوفيريي[١٥] حسبوا بشكل مضجر المكان الذي قد يكمن فيه هذا الكوكب الغامض. في عام ١٨٤٦، في المحاولة الأولى، وجد

(١٥) أوربان لوفيريي **Urbain Jean Joseph Le Verrier**: هو عالم فلك وعالم رياضيات فرنسي اختص أساسًا في ميكانيك الأجرام السماوية. ولد في ١١ مارس ١٨١١ وتوفي في ٢٣ سبتمبر ١٨٧٧. عمل في مرصد باريس معظم حياته. اشتهر أساسًا بفضل تمكنه من تحديد وجود الكوكب نبتون وتحديد موقعه باستعمال الرياضيات فقط. عندما لم يظهر أورانوس في المكان الذي توقعه العلماء قام العالم لوفيريي بتقديم مكان وكتلة كوكب آخر (غير معروف حينها)، والذي قد يكون هو المسبب للتغيرات الملاحظة في حركة أورانوس في مداره حول الشمس. وهو ما تجاهله الفلكيون الفرنسيون وعندها قام بإرسال توقعاته إلى الفلكي الألماني يوهان جدفريد جال في مرصد برلين، والذي وجد الكوكب المقترح من قبل لوفيريي خلال أول ليلة بحث عام ١٨٤٦.

علماء الفلك هذا الكوكب على بعد درجة واحدة من المكان الذي كان متوقعًا أن يكون فيه. أطلق على الكوكب الجديد اسم نبتون. كانت هذه قوة كبيرة لقوانين نيوتن، والمرة الأولى في التاريخ التي تُستخدم فيها الرياضيات البحتة لاكتشاف وجود جرم سماوي كبير.

كما ذكرنا آنفًا، في كل مرة يقوم فيها العلماء بفك شفرة إحدى القوى الأساسية الأربع للكون، فإنها لا تكشف فقط عن أسرار الطبيعة، بل إنها تحدث ثورة في المجتمع نفسه. لم تكشف قوانين نيوتن سر الكواكب والمذنبات فحسب، بل أرست أيضًا أسس قوانين الميكانيكا التي نستخدمها اليوم لتصميم ناطحات السحاب والمحركات والطائرات النفاثة والقطارات والجسور والغواصات والصواريخ. على سبيل المثال، في القرن التاسع عشر طبق الفيزيائيون قوانين نيوتن لشرح طبيعة الحرارة. تصور العلماء خطأ في ذلك الوقت أن الحرارة هي شكل من أشكال السوائل التي تنتشر من خلال مادة ما. لكن المزيد من التحقيق أظهر أن الحرارة في الواقع عبارة عن جزيئات متحركة، تشبه كرات فولاذية صغيرة تصطدم باستمرار مع بعضها البعض. سمحت لنا قوانين نيوتن بأن نحسب بدقة كيف ارتدت كرتان صلبتان مصنوعتان من الفولاذ من جراء اصطدامهما معًا. بعد ذلك، بإضافة تريليونات على تريليونات من الجزيئات، أمكن للمرء حساب الخصائص الدقيقة للحرارة. (مثلًا عندما يسخن غاز في غرفة، فإنه يتمدد وفقًا لقوانين نيوتن لأن الحرارة تزيد من سرعة الجزيئات داخل الغرفة).

أمكن للمهندسين لاحقًا استخدام هذه الحسابات لإتقان المحرك البخاري. يمكنهم حساب كمية الفحم اللازمة لتحويل الماء إلى بخار، والذي يمكن استخدامه بعد ذلك لدفع التروس والمكابس والعجلات والرافعات في آلات الطاقة. مع قدوم المحرك البخاري في القرن التاسع عشر، ارتفعت الطاقة المتاحة للعامل إلى مئات الأحصنة. فجأة، كانت القضبان الفولاذية تربط أجزاء بعيدة من العالم وتزيد بشكل كبير من تدفق السلع والمعرفة والأشخاص.

قبل الثورة الصناعية، كانت تصنع البضائع مجموعات صغيرة وحصرية من الحرفيين المهرة الذين عملوا على ابتكار أبسط الأدوات المنزلية. كما قاموا بحراسة أسرار حرفتهم اليدوية بغيرة. ومن ثَم، كانت البضائع في كثير من الأحيان نادرة ومكلفة. مع اختراع المحرك البخاري والآلات القوية أمكن إنتاج الكثير من البضائع بجزء بسيط من التكلفة الأصلية، مما أدى إلى زيادة الثروة الجماعية للدول بشكل كبير ورفع مستوى معيشتنا.

عندما أُدرِّس قوانين نيوتن لطلاب الهندسة الواعدين، أحاول تأكيد أن هذه القوانين ليست مجرد معادلات جافة ومملة، ولكنها غيرت مسار الحضارة الحديثة، وخلقت الثروة والازدهار الذي نراه من حولنا. نعرض أحيانًا لطلابنا الانهيار الكارثي لجسر تكوما ناروس[١٦]

(١٦) جسر تكوما ناروس هو جسر معلق، بني في ولاية واشنطن الأمريكية فوق نهر تكوما، وهو يربط تكوما بمرفأ جيغ في الغرب. في الموقع بنيت ٣ جسور، الأول في عام ١٩٤٠ والذي تحطم بعد مدة قصيرة من بنائه. أما الثاني، فبني في عام ١٩٥٠ على أساس دراسات تخص حركة الجسر تحت التأثيرات المختلفة من زلازل وشدة رياح وخلافه. تلك العوامل هي =

في ولاية واشنطن في عام ١٩٤٠، والذي سُجل في فيلم وثائقي كمثال مذهل لما يحدث عندما نسيء تطبيق قوانين نيوتن.

ساعدت قوانين نيوتن، التي تستند إلى توحيد فيزياء السماء مع فيزياء الأرض، على بدء أول ثورة عظيمة في التكنولوجيا.

= التي أدت إلى تحطم الجسر الذي بني في عام ١٩٤٠، قبل إجراء الدراسات الحركية. والثالث انتهى العمل عليه في عام ٢٠٠٧ والذي وجد لتخفيف حركة المرور المتزايدة، اعتمد في بنائه على جميع الدراسات الحركية التي تتعلق بالتصميم ودراسة ميكانيكا المواد الصلبة المستخدمة للبناء. ويُعتبر اليوم أحد أطول الجسور المُعلَّقة في العالم.

لغز الكهرباء والمغناطيسية

سيستغرق الأمر مائتي عام أخرى للقفزة المعرفية الهائلة التالية والتي جاءت من دراسة الكهرباء والمغناطيسية.

عرف القدماء أن المغناطيسية يمكن ترويضها. سخَّر اختراع البوصلة من قبل الصينيين قوة المغناطيسية وساعد في إطلاق عصر الاكتشاف. لكن القدماء كانوا يخشون من قوة الكهرباء. كان يُعتقد أن الصواعق تعبر عن غضب الآلهة.

الرجل الذي وضع الأساس لهذا المجال أخيرًا كان مايكل فاراداي، شاب فقير ولكنه مجتهد يفتقر إلى أي تعليم رسمي. عندما كان طفلًا، تمكن من الحصول على وظيفة كمساعد في المعهد الملكي في لندن. في العادة، أي شخص من مكانته الاجتماعية المنخفضة يمسح الأرض إلى الأبد ويغسل الزجاجات ويختبئ في الظل، لكن هذا الشاب كان بلا كلل وفضوليًّا لدرجة أن المشرفين عليه سمحوا له بإجراء التجارب.

سيواصل فاراداي العمل ليصل إلى بعض أعظم الاكتشافات في مجال الكهرباء والمغناطيسية. أظهر أنه إذا أخذت مغناطيسًا وحركته داخل طوق من الأسلاك، فستولد الكهرباء في السلك. كانت هذه ملاحظة مذهلة ومهمة، حيث كانت العلاقة بين الكهرباء والمغناطيسية غير معروفة تمامًا. يمكن للمرء أيضًا أن يُظهر العكس، حيث يمكن للمجال الكهربائي المتحرك أن يخلق مجالًا مغناطيسيًّا.

اتضح تدريجيًّا لفاراداي أن هاتين الظاهرتين كانتا في الواقع وجهين لعملة واحدة. ستساعد هذه الملاحظة البسيطة على فتح العصر الكهربائي، حيث تضيء السدود الكهرومائية العملاقة مدنًا بأكملها. (في السد الكهرومائي، يدفع النهر بعجلة تُدوِّر مغناطيسًا، وتدفع الإلكترونات داخل سلك، وترسل الكهرباء إلى منزلك. التأثير المعاكس، تحويل المجالات الكهربائية إلى مجالات مغناطيسية، هو السبب الذي تعمل المكنسة الكهربائية بسببه. تتسبب الكهرباء من مقبس الحائط في دوران المغناطيس، مما يؤدي إلى تشغيل مضخة، وإلى شفط الأتربة، وتسبب دوران بكرات المكنسة الكهربائية أيضًا).

ولكن نظرًا لعدم حصول فاراداي على تعليم رسمي، لم تكن لديه المعرفة بالرياضيات التي تسمح له بوصف اكتشافاته الرائعة. بدلًا من ذلك، ملأ دفاتر الملاحظات بمخططات غريبة توضح خطوط القوة التي تبدو مثل شبكة الخطوط التي تصنعها برادة الحديد عند إحاطة المغناطيس. كما اخترع مفهوم المجال، وهو أحد أهم المفاهيم في الفيزياء كلها. يتكون المجال من خطوط القوة المنتشرة في جميع أنحاء الفضاء. تحيط الخطوط المغناطيسية بكل مغناطيس، وينبثق المجال المغناطيسي للأرض من القطب الشمالي، وينتشر عبر الفضاء، ثم يعود إلى القطب الجنوبي. حتى نظرية الجاذبية لنيوتن يمكن التعبير عنها من حيث المجالات، حيث تتحرك الأرض حول الشمس «لأنها تتحرك» في المجال الذي تسببه جاذبية الشمس.

ساعد اكتشاف فاراداي في تفسير أصل المجال المغناطيسي المحيط بالأرض. فحيثما تدور الأرض، تدور الشحنات الكهربائية داخل الأرض أيضًا. هذه الحركة المستمرة التي تتحرك داخل الأرض مسؤولة عن المجال المغناطيسي. (لكن هذا لا يزال لغزًا قائمًا: من أين يأتي المجال المغناطيسي لقضيب مغناطيسي، حيث لا يوجد شيء يتحرك أو يدور داخله؟ سنعود إلى هذا اللغز لاحقًا). اليوم، جميع القوى المعروفة للكون يعبر عنها بلغة المجالات التي قدمها فاراداي لأول مرة.

بالنظر إلى مساهمة فاراداي الهائلة في بدء العصر الكهربائي، أعلنه الفيزيائي إرنست رذرفورد[١٧] «أعظم مكتشف علمي في كل العصور».

كان فاراداي مختلفًا -على الأقل بالنسبة لزمانه- لأنه أحب إشراك الجمهور، وحتى الأطفال، في اكتشافاته. اشتُهر بإلقاء محاضرات عيد الميلاد، حيث كان يدعو الجميع إلى المعهد الملكي في لندن ليشهدوا العروض المبهرة للسحر الكهربائي. كان يدخل غرفة كبيرة جدرانها مغطاة برقائق معدنية ثم يكهربها (والتي تسمى اليوم «قفص

(١٧) إرنست رذرفورد **Ernest Rutherford** (٣٠ أغسطس ١٨٧١ - ١٩ أكتوبر ١٩٣٧): هو عالم فيزياء بريطاني مولود في نيوزيلندا ويُعرف باسم «أبي الفيزياء النووية». تصنفه الموسوعة البريطانية كأفضل التجريبيين منذ مايكل فاراداي. اكتشف في أحد أعماله المبكرة العمر المنصف للعناصر المشعة، وأثبت أن النشاط الإشعاعي يشتمل على تحول العنصر الكيميائي إلى عنصر آخر، وفرق أيضًا وسمى أنواع الإشعاع بألفا وبيتا. كل هذه الأعمال تمت في جامعة ماك جيل بكندا، مؤدية إلى حصوله على جائزة نوبل للكيمياء عام ١٩٠٨، كما اكتشف نواة الذرة.

فاراداي»[١٨]). على الرغم من أن المعدن مكهرب بشكل واضح، فإنه آمن تمامًا لأن المجال الكهربائي انتشر على كامل سطح الغرفة، لذلك ظل المجال الكهربائي بداخله صفرًا. اليوم، يُستخدم هذا التأثير بشكل شائع لحماية أفران الميكروويف والمعدات الدقيقة من المجالات الكهربائية الشاردة، أو لحماية الطائرات النفاثة، والتي غالبًا ما تزود بمسامير الصواعق. (حسب برنامج قناة العلوم التي استضافته ذات مرة، دخل قفص فاراداي في متحف بوسطن للعلوم. زُودت المسامير الكهربائية الضخمة بنحو مليوني فولت، لقد ملأت القاعة بصوت طقطقة عالٍ. لكنني عندما فعلت ذلك لم أشعر بشيء).

(١٨) قفص فاراداي أو أسطوانة فاراداي هي عبارة عن هيكل فلزي مصنوع من مادة موصلة، تُستخدم لعزل ما بداخله عن المؤثرات الكهرومغناطيسية والمؤثرات الكهربية الخارجية. وقد سُمي قفص فاراداي نسبة إلى مكتشفه الكيميائي والفيزيائي الإنجليزي مايكل فاراداي، والذي اخترعه عام ١٨٣٦.

معادلات ماكسويل

أظهر نيوتن أن الأجسام تتحرك بسبب دفعها بالقوى، والتي يمكن وصفها بحساب التفاضل والتكامل. أظهر فاراداي أن الكهرباء تحركت بسبب دفعها بواسطة مجال. لكن دراسة المجالات تطلبت فرعًا جديدًا من الرياضيات، والذي تم تدوينه في النهاية من قبل عالم الرياضيات في جامعة كامبريدج جيمس كليرك ماكسويل، وأطلق عليه اسم حساب المتجهات باستخدام التفاضل والتكامل[١٩]. وبنفس الطريقة التي وضع بها كبلر وجاليليو الأساس للفيزياء النيوتونية، مهَّد فاراداي الطريق لمعادلات ماكسويل.

(١٩) حساب المتجهات **Vector calculus**: كما يطلق عليه أيضًا الحساب الشعاعي، هو فرع من علم الرياضيات يهتم بعمليات التحليل المختلفة للمتجهات ولفضاء الجداء الداخلي لبُعدين أو أكثر (بعض النتائج التي تنتج من الجداء الخارجي من الممكن أن تُطبق فقط في الفضاء ثلاثي الأبعاد). يتكون هذا الفرع من عدد من الصيغ الرياضية وطرق لحل المسائل، وهو فرع مهم جدًّا في الهندسة والفيزياء، خصوصًا بوصف مجال الجاذبية والمجال الكهرومغناطيسي وجريان الموائع. يهتم حساب المتجهات بالمجالات القياسية والتي تربط الكمية القياسية بكل نقطة في الفضاء، والمجال المتجهي الذي يربط كل متجه إلى كل نقطة في الفضاء. على سبيل المثال، إن حرارة قيمة ضغط الهواء على سطح الأرض تختلف من نقطة لأخرى، لذلك يعبر عنها بكمية قياسية، أما تدفق الهواء والتيارات الهوائية فهي عبارة عن قيمة متجهة في المجال الاتجاهي، ولذلك نربط متجه السرعة بكل نقطة من الفضاء المدروس.

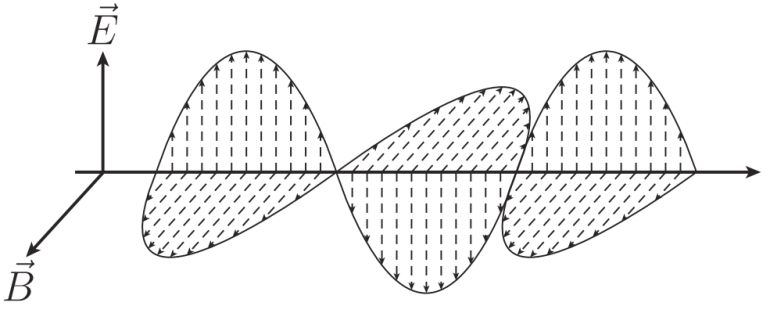
كان ماكسويل بارعًا في الرياضيات وحقق إنجازات مذهلة في الفيزياء. لقد أدرك أن سلوك الكهرباء والمغناطيسية، كما اكتشفه فاراداي وآخرون، يمكن تلخيصه بلغة رياضية دقيقة. نص أحد القوانين على أن المجال المغناطيسي المتحرك يمكن أن يخلق مجالًا كهربائيًّا. نص قانون آخر على العكس، وهو أن المجال الكهربائي المتحرك يمكن أن يخلق مجالًا مغناطيسيًّا.

ثم خطرت لماكسويل فكرة عابرة لعصره. ماذا لو خلق مجال كهربائي متغير مجالًا مغناطيسيًّا أدى بعد ذلك إلى إنشاء مجال كهربائي آخر أدى بعد ذلك إلى إنشاء مجال مغناطيسي آخر، وما إلى ذلك؟ كانت لديه فكرة رائعة؛ أن المنتج النهائي لهذه الحركة السريعة ذهابًا وإيابًا سيكون موجة متحركة، حيث يتحول المجالان الكهربائي والمغناطيسي باستمرار إلى بعضهما البعض. هذا التسلسل اللا متناهي للتحولات له طبيعة خاصة به، مما يخلق موجة متحركة من المجالات الكهربائية والمغناطيسية المهتزة.

باستخدام حساب المتجهات، حسب سرعة هذه الموجة المتحركة، ووجدها تساوي **310,740** كيلومترًا في الثانية. لقد أصيب بصدمة هائلة. ضمن الخطأ التجريبي، كانت هذه السرعة قريبة بشكل ملحوظ من سرعة الضوء (والتي تُعرف الآن بأنها **299,792** كيلومترًا في الثانية). ثم اتخذ الخطوة الجريئة التالية لادعاء أن هذا كان ضوءًا، الضوء عبارة عن موجة كهرومغناطيسية.

كتب ماكسويل بعد ذلك كما لو كان نبيًّا: «لا يمكننا تجنب الاستدلال على أن الضوء يتكون من التموجات العرضية للوسط نفسه الذي هو سبب الظواهر الكهربائية والمغناطيسية».

اليوم، يتعين على كل طالب فيزياء ومهندس كهربائي حفظ معادلات ماكسويل التي هي أساس أجهزة التلفاز والليزر والدينامو والمولدات الكهربائية، إلخ.



الشكل ٣. المجالات الكهربائية والمغناطيسية وجهان لعملة واحدة. تتأرجح المجالات الكهربائية والمغناطيسية وتتحول إلى بعضها البعض وتتحرك مثل الموجة. الضوء هو أحد مظاهر الموجات الكهرومغناطيسية.

لقد وحَّد فاراداي وماكسويل الكهرباء والمغناطيسية، ومفتاح هذا التوحيد هو التناظر. تحتوي معادلات ماكسويل على التناظر المسمى بالازدواجية[٢٠]. إذا مثلت الكهرباء داخل حزمة ضوئية بواسطة **E**

(٢٠) الازدواجية **(Duality (mathematics**: في الرياضيات، يُترجم مفهوم الازدواجية في النظريات أو المعادلات الرياضية، إلى مفاهيم أو نظريات أو هياكل أخرى، بطريقة فردية، غالبًا (ولكن ليس دائمًا) عن طريق عملية الانقلاب: إذا كانت ثنائية **A** هي **B**، عندئذٍ تكون ثنائية =

والمجال المغناطيسي بواسطة B، فإن معادلات الكهرباء والمغناطيسية تظل كما هي عندما نبدل E وB. تشير هذه الازدواجية إلى أن الكهرباء والمغناطيسية مظهران لنفس القوة. لذا فإن التناظر بين E وB يسمح لنا بتوحيد الكهرباء والمغناطيسية، وبالتالي خلق واحد من أعظم الاكتشافات في القرن التاسع عشر.

انبهر الفيزيائيون بهذا الاكتشاف. قدمت جائزة برلين لأي شخص يمكنه إعادة إنتاج موجات ماكسويل هذه في المختبر عمليًّا. في عام ١٨٨٦، أجرى الفيزيائي هاينريش هيرتز الاختبار التاريخي.

أولًا، أحدث هيرتز شرارة كهربائية في أحد أركان مختبره. على بُعد عدة أقدام كان لديه ملف من الأسلاك. أظهر هيرتز أنه من خلال تشغيل الشرارة يمكنه توليد تيار كهربائي في الملف، وبالتالي إثبات أن موجة جديدة غامضة تنتقل لا سلكيًّا من مكان إلى آخر. وقد بشَّر هذا بخلق نوع جديد من الظواهر تسمى الراديو. في عام ١٨٩٤، قدم جوليلمو ماركوني هذا الشكل الجديد من الاتصالات للجمهور. أظهر أنه يمكنك إرسال رسائل لا سلكية عبر المحيط الأطلسي بسرعة الضوء.

= B هي A. تحتوي هذه الارتدادات أحيانًا على نقاط ثابتة، بحيث تكون ثنائية A هي نفسها. على سبيل المثال مبرهنة ديزارج: في فضاء الإسقاط، يكون مثلثان منظوران محوريًّا إذا وفقط إذا كانا منظورين مركزيًّا. وهي ثنائية ذاتية بهذا المعنى في ظل الازدواجية القياسية في الهندسة الإسقاطية.

مع ظهور الراديو، أصبحت لدينا الآن طريقة فائقة السرعة ومريحة ولا سلكية للتواصل عبر مسافات طويلة. تاريخيًّا، كان الافتقار إلى نظام اتصال سريع وموثوق من أكبر العقبات التي تعترض مسيرة التاريخ. (في عام ٤٩٠ قبل الميلاد، بعد معركة ماراثون بين الإغريق والفرس، أُمر عدَّاء فقير بنشر أخبار انتصار اليونان بأسرع ما يمكن. وبشجاعة، ركض ٢٦ ميلًا إلى أثينا بعد أن ركض في السابق ١٤٧ ميلًا إلى أسبرطة، وبعد ذلك، وفقًا للأسطورة، سقط ميتًا من الإرهاق المطلق. نحتفل الآن ببطولته في عصر ما قبل الاتصالات السلكية واللا سلكية، في الماراثون الحديث).

اليوم، نعتبر أنه من المسلم به أنه يمكننا إرسال الرسائل والمعلومات بسهولة في جميع أنحاء العالم، وذلك باستخدام حقيقة أن الطاقة يمكن تحويلها بطرق عديدة. على سبيل المثال، عند التحدث على الهاتف الخلوي، تتحول طاقة صوتك إلى طاقة ميكانيكية في غشاء مهتز. يوصل الحجاب الحاجز بمغناطيس يعتمد على قابلية التبادل للكهرباء والمغناطيسية لإنشاء نبضة كهربائية، من النوع الذي يمكن نقله وقراءته بواسطة الكمبيوتر. ثم يترجم هذا الدافع الكهربائي إلى موجات كهرومغناطيسية يلتقطها برج ميكروويف قريب، حيث تُضخم الرسالة وتُرسل إلى جميع أنحاء العالم.

لكن معادلات ماكسويل لم تمنحنا فقط اتصالات فورية تقريبًا عبر الراديو والهاتف الخلوي وكابلات الألياف الضوئية، بل إنها فتحت أيضًا الطيف الكهرومغناطيسي بأكمله، والذي كان الضوء المرئي

والراديو مجرد عضوين فيه. في ستينيات القرن السادس عشر، أظهر نيوتن أن الضوء الأبيض، عند إرساله من خلال منشور، يمكن أن يتحول إلى ألوان قوس قزح. في عام ١٨٠٠، سأل ويليام هيرشل[٢١] نفسه سؤالًا بسيطًا: ماذا يكمن وراء ألوان قوس قزح، والتي تمتد من الأحمر إلى البنفسجي؟ أخذ المنشور الذي صنع قوس قزح في مختبره ووضع مقياس حرارة أسفل اللون الأحمر حيث لم يظهر هناك أي لون على الإطلاق. ولدهشته كثيرًا، بدأت درجة حرارة هذه المنطقة الفارغة في الارتفاع. بعبارة أخرى، كان هناك «لون» أسفل الأحمر غير مرئي للعين المجردة ولكنه يحتوي على طاقة. كان يسمى ضوء الأشعة تحت الحمراء.

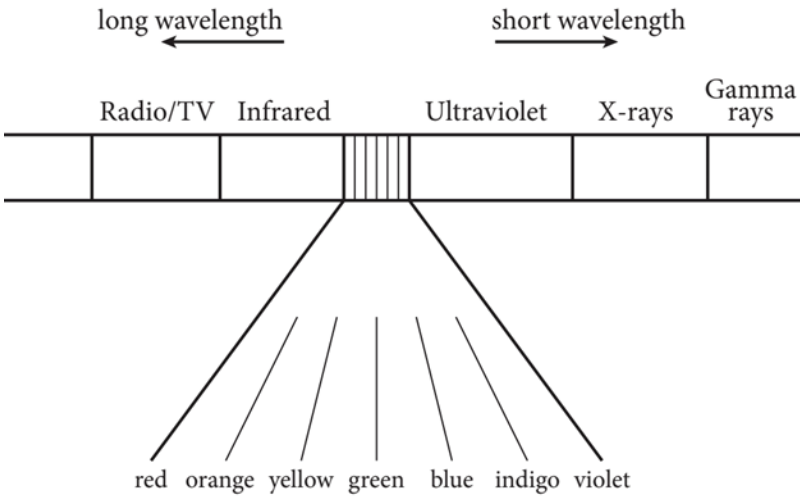
اليوم، ندرك أن هناك طيفًا كاملًا من الإشعاع الكهرومغناطيسي، معظمه غير مرئي، ولكل منه طول موجي مميز. الطول الموجي للراديو والتلفزيون على سبيل المثال أطول من الطول الموجي للضوء المرئي. الطول الموجي لألوان قوس قزح بدوره أطول من الطول الموجي للأشعة فوق البنفسجية والأشعة السينية.

هذا يعني أيضًا أن الحقيقة التي نراها في كل مكان من حولنا ليست

---

(٢١) فريدريك ويليام هيرشل **Friedrich Wilhelm Herschel** (١٥ نوفمبر ١٧٣٨ – ٢٥ أغسطس ١٨٢٢): عالم فلك وملحن بريطاني من أصل ألماني. اتبع هيرشل خطوات أبيه فانضم للفرقة الموسيقية العسكرية التابعة لهانوفر، قبل هجرته إلى بريطانيا العظمى عن عمر يُناهز التاسع عشر، وهو شقيق العالِمة كارولين هيرشل. أصبح مشهورًا لاكتشافه كوكب أورانوس، وقمريه الرئيسيين تيتانيا وأوبيرون، بالإضافة إلى قمري زحل. وقد كان أيضًا أول من اكتشف وجود الأشعة تحت الحمراء. وألَّف واشتُهر بسمفونياته الأربع والعشرين، وعدد من القطع الموسيقية التي لحنها.

سوى أصغر شريحة من الطيف الكهرومغناطيسي الكامل، وهو أصغر تقريب للكون الذي هو أكبر بكثير من ألوان الطيف الكهرومغناطيسي المرئية. يمكن لبعض الحيوانات أن ترى أكثر مما نستطيع، مثلًا، يمكن للنحل رؤية الأشعة فوق البنفسجية، وهو أمر غير مرئي بالنسبة لنا، ولكنه ضروري بالنسبة لها للعثور على الشمس حتى في يوم غائم. نظرًا لأن الزهور طورت ألوانها الرائعة من أجل جذب الحشرات مثل النحل لتلقيحها، فهذا يعني أن الزهور غالبًا ما تكون أكثر إثارة عند تعرضها للأشعة فوق البنفسجية.



الشكل ٤. معظم «ألوان» الطيف الكهرومغناطيسي، الممتد من الراديو إلى أشعة جاما، غير مرئية لأعيننا. يمكن لأعيننا أن ترى فقط أصغر شريحة من الطيف الكهرومغناطيسي بأكمله، نظرًا لحجم الخلايا في شبكية العين البشرية.

عندما كنت طفلًا وقرأت عن هذه القصة، تساءلت: لماذا لا نرى سوى هذا الجزء المحدود من الطيف الكهرومغناطيسي؟ ماذا أهدرنا من العالم؟ وهكذا فكرت في الأمر. لكن السبب كما أدركه الآن هو أن الطول الموجي للموجة الكهرومغناطيسية يساوي تقريبًا حجم الهوائي الذي ينتجها. وبالتالي فإن حجم هاتفك الخلوي لا يتجاوز بضع بوصات، لأن هذا هو حجم الهوائي، والذي يقارب الطول الموجي للموجات الكهرومغناطيسية التي تبث. وبالمثل، فإن حجم خلية في شبكية العين يقارب حجم الطول الموجي للألوان التي يمكنك رؤيتها. ما يعني أنه يمكننا أن نرى الألوان التي أطوالها الموجية هي حجم خلايانا فقط. جميع ألوان الطيف الكهرومغناطيسي الأخرى غير مرئية لأنها إما كبيرة جدًّا أو صغيرة جدًّا بحيث لا يمكن لخلايا شبكية العين اكتشافها. لذلك إذا كانت خلايا أعيننا بحجم منزل، فقد نتمكن من رؤية كل إشعاع الراديو والميكروويف يحوم حولنا.

وبالمثل، إذا كانت خلايا أعيننا بحجم الذرات، فقد نتمكن من رؤية الأشعة السينية (أشعة إكس). هناك تطبيق آخر لمعادلة ماكسويل، وهو الطريقة التي تزود بها الطاقة الكهرومغناطيسية الكوكب بأكمله بالطاقة. على الرغم من أنه يجب شحن النفط والفحم عن طريق القوارب والقطارات عبر مسافات شاسعة، فإنه يمكن إرسال الطاقة الكهربائية عبر الأسلاك بضغطة زر، مما يؤدي إلى إمداد مدن بأكملها بالكهرباء.

أدى هذا بدوره إلى جدل مشهور بين عملاقين من عمالقة عصر الكهرباء؛ توماس إديسون ونيكولا تيسلا. كان إديسون العبقري وراء

العديد من الاختراعات الكهربائية بما في ذلك المصباح الكهربائي والصور المتحركة والفونوغراف وشريط المبرقة الكاتبة (التكات)[٢٢]، ومئات من الأعاجيب الأخرى. كما أنه كان أول من ربط شارعًا بالكهرباء، وهو شارع بيرل في وسط مانهاتن.

أدى هذا إلى خلق الثورة الثانية العظيمة في التكنولوجيا؛ عصر الكهرباء.

افترض إديسون أن التيار المباشر، أو التيار المستمر (الذي يتحرك دائمًا في نفس الاتجاه ولا يغير من قيمة الجهد الكهربي)، سيكون أفضل طريقة لنقل الكهرباء. بدلًا من طاقة التيار المستمر، دافع تسلا، الذي كان يعمل في شركة إديسون وساعد في إرساء الأساس لشبكة الاتصالات السلكية واللا سلكية اليوم، عن طاقة التيار المتردد (التيار المتردد أي أن الكهرباء تغير اتجاهها وقيمتها قرابة ستين مرة في الثانية). نتجت عن ذلك معركة التيارات الشهيرة، حيث استثمرت الشركات العملاقة الملايين في التقنيات المنافسة، مع دعم جنرال إلكتريك لشركة إديسون وشركة ويستنجهاوس لتيسلا، سيتوقف مستقبل الثورة الكهربائية على من سيربح هذا الصراع، التيار المستمر لإديسون أم التيار المتردد لتيسلا.

---

(٢٢) شريط المبرقة الكاتبة (التكات) **Ticker tape**: هو أول وسيلة اتصالات مالية مخصصة للكهرباء، حيث كان ينقل معلومات أسعار الأسهم عبر خطوط التلغراف، مستخدمًا من نحو ١٨٧٠ حتى ١٩٧٠. ويتألف من شريط ورقي يمر عبر آلة تسمى شريط الأسهم، والتي تطبع أسماء الشركات المختصرة على أنها أبجدية رموز متبوعة بسعر تداول الأسهم الرقمي ومعلومات الحجم. جاء مصطلح «التكات» من الصوت الذي تصدره الآلة في أثناء طباعتها.

على الرغم من أن إديسون كان العقل المدبر للكهرباء وأحد مهندسي العالم الحديث، فإنه لم يفهم تمامًا معادلات ماكسويل. سيكون هذا خطأ مكلفًا للغاية. في الواقع، لقد تعامل بعناد بالغ مع العلماء الذين يعرفون الكثير من الرياضيات. (في قصة مشهورة، غالبًا ما كان يسأل العلماء الذين يبحثون عن وظيفة لحساب حجم المصباح الكهربائي. كان يبتسم عندما حاول هؤلاء العلماء استخدام الرياضيات المتقدمة لحساب شكل المصباح ثم حجمه بشكل محموم. بعد ذلك كان إديسون يسكب الماء ببساطة في مصباح كهربائي فارغ ثم يصبه في دورق متدرج).

عرف المهندسون أن الأسلاك المعلقة على مدى عدة أميال تفقد قدرًا كبيرًا من الطاقة إذا كانت تحمل جهدًا منخفضًا، كما دعا إديسون. لذلك كانت خطوط الطاقة عالية الجهد من تيسلا مفضلة اقتصاديًّا، لكن الكابلات ذات الفولتية العالية كانت خطرة جدًّا بحيث لا يمكن إدخالها في غرفة المعيشة الخاصة بك. كانت الحيلة هي استخدام كابلات عالية الجهد من محطة الطاقة إلى مدينتك، ثم تحويل الجهد العالي بطريقة ما إلى جهد منخفض قبل دخوله غرفة المعيشة الخاصة بك. كان المفتاح هو استخدام المحولات.

كما نتذكر، أظهر ماكسويل أن المجال المغناطيسي المتحرك يخلق تيارًا كهربائيًّا، والعكس صحيح. يتيح لك ذلك إنشاء محول يمكنه تغيير الجهد في السلك بسرعة. على سبيل المثال، قد يحمل جهد الكابلات الكهربائية من محطة طاقة آلاف الفولتات. لكن المحول الموجود خارج

منزلك يمكن أن يقلل الجهد الكهربائي إلى ١١٠ فولتات، والذي يسهل تشغيل فرن الميكروويف والثلاجة.

إذا كانت هذه المجالات ثابتة ولا تتغير، لا يمكن تحويل بعضها إلى بعض. نظرًا لأنها تتغير باستمرار، يمكن بسهولة تحويل الكهرباء المتناوبة إلى مجالات مغناطيسية تحول بعد ذلك مرة أخرى إلى مجالات كهربائية، ولكن بجهد أقل، مما يعني أن التيار المتناوب يمكنه بسهولة تغيير الجهد باستخدام المحولات، لكن التيار المستمر (لأنه ثابت في الجهد وليس بالتناوب) لا يمكنه ذلك.

في النهاية، خسر إديسون المعركة والأموال الكبيرة التي استثمرها في تكنولوجيا التيار المستمر. هذا هو ثمن تجاهل معادلات ماكسويل.

نهاية العلم

بالإضافة إلى شرح ألغاز الطبيعة وإدخال حقبة جديدة من الازدهار الاقتصادي، أعطانا مزيج من معادلات نيوتن وماكسويل نظرية مقنعة جدًّا لكل شيء. أو على الأقل كل شيء معروف حينها.

بحلول عام ١٩٠٠ كان العلماء البارزون يعلنون «نهاية العلم». وهكذا، كان مطلع القرن العشرين وقتًا قويًّا لبقاء العلم على قيد الحياة. كل ما يمكن اكتشافه قد تم اكتشافه بالفعل، أو هكذا بدا الأمر.

لم يدرك الفيزيائيون في ذلك الوقت أن الركيزتين الرئيسيتين للعلم، معادلات نيوتن وماكسويل، كانتا في الواقع غير متوافقتين. لقد ظهر تناقض بين بعضهم البعض.

كان لا بد من سقوط إحدى هاتين الركيزتين العظيمتين، بينما هناك صبي يبلغ من العمر ستة عشر عامًا يحمل المفتاح.

سيولد ذلك الصبي في نفس العام الذي مات فيه ماكسويل، العام ١٨٧٩.

* * *

الفصل الثاني

بحث أينشتاين عن التوحيد

سأل أينشتاين نفسه بينما لا يزال مراهقًا سؤالًا سيكون من شأنه أن يغير مجرى القرن العشرين:

هل يمكنك تجاوز سرعة شعاع الضوء؟

بعد سنوات، كتب أن هذا السؤال البسيط احتوى على مفتاح نظريته النسبية.

في وقت سابق، كان قد قرأ كتابًا للأطفال كُتب عن العلوم الطبيعية لآرون ديفيد بيرنشتاين[٢٣]، يطلب منك تخيل التسابق جنبًا إلى جنب مع سلك التلغراف. بدلًا من ذلك، تصور أينشتاين الركض بمحاذاة شعاع الضوء، والذي يجب أن يبدو متجمدًا. كان يعتقد أنه ليتسابق جنبًا إلى جنب مع الشعاع، يجب أن تكون موجات الضوء ثابتة، كما توقع نيوتن.

---

(٢٣) هارون بيرنستاين **Aaron David Bernstein**: هو ناشط اجتماعي ومترجم وصحفي وكاتب ألماني، ولد في ٦ أبريل ١٨١٢ في غدانسك في بولندا، وتوفي في ١٢ فبراير ١٨٨٤ في برلين في ألمانيا.

ولكن حتى عندما كان صبيًّا في السادسة عشرة من عمره، أدرك أينشتاين أنه لم يسبق لأحد أن رأى شعاعًا ضوئيًّا متجمدًا من قبل. كان هناك شيء مفقود. سوف يفكر في هذا السؤال على مدى السنوات العشر القادمة.

لسوء الحظ اعتبر الكثيرون أن أينشتاين كان فاشلًا. على الرغم من أنه كان طالبًا لامعًا، فإن أساتذته كرهوا أسلوب حياته البوهيمي الحر. نظرًا لأنه يعرف بالفعل معظم المواد، غالبًا ما كان يقاطع الفصول الدراسية، لذلك كتب أساتذته خطابات توصية غير مُرضِية؛ وفي كل مرة يتقدم فيها لوظيفة كان يُواجَه بالرفض. بينما هو عاطل عن العمل ويائس حصل على وظيفة كمدرس خصوصي (طُرد منها بسبب مجادلة مع صاحب العمل). فكر ذات مرة في أن يكون مندوبًا لبيع وثائق التأمين ليجد ما ينفق به على صديقته وطفله. (هل يمكنك أن تتخيل فتح بابك ذات يوم ورؤية أينشتاين يحاول بيع وثيقة تأمين لك؟) وكعاطل عن العمل اعتبر نفسه مصدر استنزاف لعائلته. في إحدى الرسائل، كتب بيأس: «أنا لست سوى عبء على أقاربي... كان من الأفضل بالتأكيد لو لم أعِش على الإطلاق».

تمكن أخيرًا من الحصول على وظيفة كاتب من الدرجة الثالثة في مكتب براءات الاختراع في برن. بدا الأمر مهينًا ولكنه في حقيقته كان نعمة مُقَنَّعة. في هدوء مكتب براءات الاختراع، أصبح بإمكان أينشتاين العودة إلى السؤال القديم الذي طارده منذ طفولته. من هناك، سيطلق ثورة قلبت الفيزياء والعالم رأسًا على عقب.

كطالب في مدرسة البوليتكنيك الشهيرة في سويسرا، صادف معادلات ماكسويل للضوء. سأل نفسه: ماذا يحدث لمعادلات ماكسويل إذا سافرت بسرعة الضوء؟ من اللافت للنظر أن أحدًا لم يطرح هذا السؤال من قبل. باستخدام نظرية ماكسويل، حسب أينشتاين سرعة شعاع الضوء في جسم متحرك، مثل قطار، وتوقع أن تكون سرعة شعاع الضوء، كما يراها مراقب خارجي ثابت، هي ببساطة سرعته المعتادة بالإضافة إلى سرعة القطار. وفقًا لميكانيكا نيوتن، يمكن أن تضيف السرعات ببساطة. على سبيل المثال، إذا رميت كرة بيسبول في أثناء الركوب في قطار، فسيقول مراقب ثابت إن سرعة الكرة هي فقط سرعة القطار بالإضافة إلى سرعة الكرة بالنسبة للقطار. وبالمثل، يمكن طرح السرعات أيضًا. لذلك، إذا سافرت جنبًا إلى جنب مع شعاع الضوء، يجب أن يبدو ثابتًا.

ما أصاب أينشتاين بالصدمة أنه وجد أن شعاع الضوء لم يتجمد على الإطلاق، بل انطلق بعيدًا بنفس السرعة. لكنه اعتقد أن هذا مستحيل. وفقًا لنيوتن، يمكنك دائمًا اللحاق بأي شيء إذا تحركت بسرعة كافية. كان هذا هو البديهي. لكن معادلات ماكسويل قالت إنه لا يمكنك أبدًا اللحاق بالضوء، الذي يتحرك دائمًا بنفس السرعة بغض النظر عن السرعة التي تقطعها للحاق به.

بالنسبة لأينشتاين، كانت هذه البصيرة هائلة. كان إما نيوتن وإما ماكسويل على حق. يجب أن يكون أحدهما مخطئًا. ولكن كيف يعقل أنك لا تستطيع اللحاق بالضوء؟ في مكتب براءات الاختراع، كان لديه

متسع من الوقت للتفكير في هذا السؤال. ذات يوم، في ربيع عام ١٩٠٥، صدمته فكرة في أثناء ركوب القطار في برن. يتذكر قائلًا: «انفجرت عاصفة في ذهني».

كانت رؤيته الرائعة هي: بما أن سرعة الضوء تقاس بالساعات وعصي القياس، وبما أن سرعة الضوء ثابتة بغض النظر عن السرعة التي تتحرك بها، فلا بد من تشويه المكان والزمن من أجل الحفاظ على سرعة الضوء ثابتة!

هذا يعني أنه إذا كنت على متن سفينة فضاء سريعة الحركة، فإن الساعات داخل السفينة تكون أبطأ من الساعات الموجودة على الأرض. يتباطأ الوقت كلما تحركت بشكل أسرع -هذه الظاهرة موصوفة في النسبية الخاصة لأينشتاين- إذن السؤال «كم الساعة الآن؟» يعتمد على مدى سرعة تحركك. إذا كانت المركبة الصاروخية تسير بسرعة قريبة من سرعة الضوء، ولاحظناها من الأرض باستخدام التلسكوب، يبدو أن كل فرد في سفينة الصواريخ يتحرك بحركة بطيئة. أيضًا، يبدو أن كل شيء في السفينة مضغوط. أخيرًا، كل شيء في سفينة الصواريخ أثقل. والمثير للدهشة، بالنسبة لشخص ما في سفينة الصواريخ، أن كل شيء يبدو طبيعيًّا.

سيتذكر أينشتاين لاحقًا: «أنا مدين لماكسويل أكثر من أي شخص آخر». اليوم، يمكن إجراء هذه التجربة بشكل روتيني. إذا وضعت ساعة ذرية على طائرة، وقارنتها بساعة على الأرض، يمكنك أن ترى أن الساعة على متن الطائرة قد تباطأت (بعامل صغير، جزء واحد في تريليون).

ولكن إذا اختلف المكان والزمن، يجب أن يختلف كل شيء يمكنك قياسه أيضًا، بما في ذلك المادة والطاقة. وكلما تحركت بشكل أسرع، أصبحت أثقل. ولكن من أين تأتي الكتلة الزائدة؟ إنها تأتي من طاقة الحركة. هذا يعني أن جزءًا من طاقة الحركة يتحول إلى كتلة.

كانت العلاقة الدقيقة بين المادة والطاقة هي $E = mc^2$. أجابت هذه المعادلة، كما سنرى، على أحد أعمق الأسئلة في كل العلوم: لماذا تشرق الشمس؟ تشرق الشمس لأنك عندما تضغط ذرات الهيدروجين في درجات حرارة عالية، فإن بعض كتلة الهيدروجين تتحول إلى طاقة.

مفتاح فهم الكون هو التوحيد. بالنسبة للنسبية، كان هذا التوحيد متمثلًا في المكان والزمن والمادة والطاقة. ولكن كيف يتم هذا التوحيد؟

التناظر والجمال

بالنسبة للشعراء والفنانين، يعتبر الجمال صفة جمالية أثيرية تثير عاطفة وشغفًا عظيمين.

بالنسبة للفيزيائي، الجمال هو التناظر. المعادلات جميلة لأنها تحتوي على تناظر؛ أي إذا قمت بإعادة ترتيب المكونات أو تعديلها، فإن المعادلة تظل كما هي. إنها ثابتة في ظل هذا التحول. فكر في المشكال[٢٤]. يتطلب الأمر مزيجًا عشوائيًّا من الأشكال الملونة، وباستخدام المرايا، يقوم بعمل نسخ عديدة ثم يقوم بترتيب هذه الصور بشكل متماثل في دائرة. لذا فإن الشيء الفوضوي يصبح فجأة منظمًا وجميلًا بسبب التناسق.

وبالمثل، فإن ندفة الثلج جميلة لأننا إذا قمنا بتدويرها بمقدار ٦٠ درجة، فإنها تظل كما هي. الكرة لديها المزيد من التناظر. يمكنك تدويرها بأي مقدار حول مركزها وستبدو متطابقة. بالنسبة للفيزيائي، تكون المعادلة جميلة إذا أعدنا ترتيب جسيماتها ومكوناتها المختلفة

---

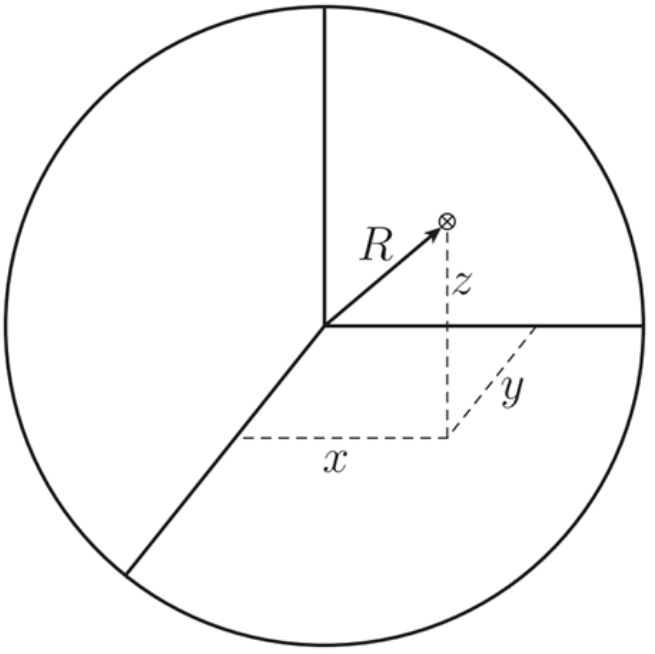
(٢٤) المشكال **kaleidoscope**: مشكال هو أنبوب مرايا يحتوي على خرز ملون، وحصى حر، وغيرها من الأشياء الملونة الصغيرة. المشاهد ينظر من أحد الأطراف ويدخل الضوء من الطرف الآخر، منعكسًا من على المرايا. عادة هناك اثنتان من المرايا وهما على شكل مستطيل. وضع المرايا بزاوية ٤٥ ° يخلق ثماني صور مكررة، وست صور عند ٦٠ درجة، وأربعًا عند ٩٠ درجة. كلما تم تحريك الأنبوب بشكل دائري، يستطيع المشاهد رؤية الأشكال بألوان وأنماط مختلفة. أي نمط عشوائي من الأشياء تستطيع رؤيته عبر المشكال كنمط متماثل، جميل بسبب الانعكاسات في المرايا. اثنتان من المرايا ستشكلان نمطًا أو أنماطًا معزولة ضد خلفية سوداء صلبة، في حين أن ثلاثًا من المرايا على شكل مثلث مغلق تُشكِّل نمطًا يملأ المجال بأكمله.

داخل المعادلة ووجدنا أن النتيجة لا تتغير، بمعنى آخر، إذا وجدنا أن ثمة تناظرًا بين أجزائها. كتب عالم الرياضيات جي إتش هاردي ذات مرة: «يجب أن تكون أنماط عالم الرياضيات، مثل الرسام أو الشاعر، جميلة؛ يجب أن تتوافق الأفكار، مثل الألوان أو الكلمات، معًا بطريقة متناغمة. الجمال هو الاختبار الأول. لا يوجد مكان دائم في العالم للرياضيات القبيحة». وهذا الجمال هو التناظر.

رأينا سابقًا أنه إذا أخذت قوة جاذبية نيوتن للأرض التي تدور حول الشمس، فإن نصف قطر مدار الأرض يكون ثابتًا. الإحداثيات X وY تتغير، لكن R لا تتغير. يمكن أيضًا تعميم هذا على ثلاثة أبعاد.

تخيل أنك جالس على سطح الأرض، حيث يتحدد موقعك بثلاثة أبعاد: X وY وZ هي إحداثياتك (انظر الشكل ٥). في أثناء سفرك في أي مكان على طول سطح الأرض، يظل نصف قطر الأرض، R، كما هو، حيث $R^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$. هذه نسخة ثلاثية الأبعاد من نظرية فيثاغورس(*).

(*) ملاحظة الكاتب: لتخيل هذا الأمر، افرض أن $Z = 0$. ستنخفض الكرة إلى دائرة في المستوى X وY، تمامًا كما كان من قبل. رأينا أنه في أثناء تحركك حول هذه الدائرة، لدينا $R^2 = X^2+Y^2$. الآن، سنفترض زيادة Z تدريجيًّا. تصبح الدائرة أصغر كلما ارتفعنا في اتجاه Z. (تتوافق الدائرة مع خطوط العرض المتساوية على الكرة الأرضية). تظل R كما هي، لكن معادلة الدائرة الصغيرة تصبح $R^2=X^2+Y^2+Z^2$، للحصول على قيمة ثابتة لـZ. الآن، إذا تركنا Z تتغير، نرى أن إحداثيات أي نقطة على الكرة هي X وY وZ، مثل نظرية فيثاغورس ثلاثية الأبعاد. باختصار، يمكن وصف جميع النقاط الموجودة على الكرة بواسطة نظرية فيثاغورس بثلاثة أبعاد، بحيث تظل R كما هي، لكن X وY وZ تختلف جميعها في أثناء تحركك حول الكرة. كانت رؤية أينشتاين العظيمة هي تعميم هذا على أربعة أبعاد، مع اعتبار أن البُعد الرابع هو الزمن.



الشكل ٥. في أثناء تجولك على سطح الأرض، يكون نصف القطر R للأرض ثابتًا، على الرغم من أن إحداثياتك X وY وZ تتغير باستمرار بالنسبة لبعضها البعض. إذن، نظرية فيثاغورس ثلاثية الأبعاد هي التعبير الرياضي لهذا التناظر.

الآن، إذا أخذنا معادلات أينشتاين ثم قمنا بتدوير المكان بدلًا من الزمن، والزمن بدلًا من المكان، فإن المعادلات تظل كما هي. هذا يعني أن الأبعاد الثلاثة للفضاء مرتبطة الآن ببُعد الزمن، T، الذي يصبح البُعد الرابع. أظهر أينشتاين أن الكمية $X^2 + Y^2 + Z^2 - T^2$ (مع التعبير

عن الزمن بوحدات معينة) تظل كما هي، وهي نسخة معدلة من نظرية فيثاغورس بأربعة أبعاد. (لاحِظ أن إحداثيات الوقت لها علامة ناقص إضافية. وهذا يعني أنه على الرغم من أن النسبية ثابتة في ظل التدوير في أربعة أبعاد، فإن البُعد الزمني يُعامَل بشكل مختلف قليلًا عن الأبعاد المكانية الثلاثة الأخرى). لذا فإن معادلات أينشتاين متماثلة في أربعة أبعاد.

كتبت معادلات ماكسويل لأول مرة عام ١٨٦١ تقريبًا، وهو العام الذي بدأت فيه الحرب الأهلية الأمريكية. لاحظنا سابقًا أن لديها تناظرًا يحول المجالات الكهربائية والمغناطيسية إلى بعضها البعض. لكن معادلات ماكسويل تمتلك تناظرًا خفيًّا إضافيًّا. إذا قمنا بتغيير معادلات ماكسويل في أربعة أبعاد عن طريق تبادل X وY وZ وT فيما بينها كما فعل أينشتاين في العقد الأول من القرن الماضي، فإنها تظل كما هي. هذا يعني أنه إذا لم يكن نجاح الفيزياء النيوتونية قد أعمى علماء الفيزياء، فربما اكتشفت النسبية خلال الحرب الأهلية!

الجاذبية كفضاء منحنٍ

على الرغم من أن أينشتاين أظهر أن المكان والزمن والمادة والطاقة كلها جزء من تناظر أكبر مكون من أربعة أبعاد، ظلت هناك فجوة واحدة صارخة في معادلته: لم يذكر شيئًا عن الجاذبية والتسارع. وهو ما لم يُرضِ أينشتاين. أراد أن يعمم نظريته السابقة، التي أطلق عليها النسبية الخاصة، بحيث تشمل الجاذبية والحركات المتسارعة، مما قد يخلق نظرية عامة للنسبية أكثر قوة.

لكن زميله الفيزيائي ماكس بلانك حذره من صعوبة خلق نظرية تجمع بين النسبية والجاذبية. قال: «بصفتي صديقًا أكبر سنًّا، أنصحك بألا تفعل ذلك. لأنك في المقام الأول لن تنجح، وحتى لو نجحت، فلن يصدقك أحد». لكنه أضاف بعد ذلك: «إذا نجحت في هذا الأمر فسيسميك العالم كوبرنيكوس الجديد».

كان من الواضح لأي فيزيائي أن نظرية نيوتن في الجاذبية ونظرية أينشتاين كانتا متعارضتين. ماذا إذا اختفت الشمس فجأة من دون أن تترك أثرًا؟ ادعى أينشتاين أن الأمر سيستغرق ثماني دقائق حتى تشعر الأرض بالغياب. معادلة نيوتن الشهيرة للجاذبية لا تذكر سرعة الضوء. ومن ثَم سنشعر بالجاذبية فورًا، وهذا ما سينتهك مفهوم النسبية؛ أي أن الأرض ستشعر على الفور بتأثير الشمس المفقودة.

فكر أينشتاين في مسألة الضوء لمدة عشر سنوات، منذ أن كان في السادسة عشرة حتى السادسة والعشرين. ثم سيقضي السنوات العشر التالية حتى يبلغ السادسة والثلاثين من عمره في التركيز على نظرية الجاذبية. تجلى له مفتاح اللغز بأكمله في أحد الأيام بينما كان متكئًا على كرسيه مما أدى إلى سقوطه تقريبًا. في تلك اللحظة القصيرة، أدرك أنه إذا سقط فسيكون عديم الوزن، ثم أدرك أن هذا قد يكون مفتاح نظرية الجاذبية. سيتذكر باعتزاز أنها «أسعد فكرة في حياته».

أدرك جاليليو أنك إذا سقطت من مبنى فستكون عديم الوزن للحظات، لكن أينشتاين فقط هو الذي أدرك كيفية استغلال هذه الحقيقة للكشف عن سر الجاذبية. تخيل للحظة أنك في مصعد وأن الكابل مقطوع. ستسقط، لكن افترض أن الأرض ستنخفض بنفس المعدل، لذا داخل المصعد تبدأ في الطفو، كما لو لم تكن هناك جاذبية (على الأقل حتى يصطدم المصعد بالأرض). داخل المصعد، حدث إلغاء للجاذبية بدقة من خلال تسارع هبوط المصعد. وهذا ما يسمى مبدأ التكافؤ[٢٥]، وهو أن التسارع في إطار واحد لا يمكن تمييزه عن الجاذبية في إطار آخر.

عندما يظهر رواد الفضاء في الفضاء عديمي الوزن على شاشة التلفزيون، فهذا ليس بسبب اختفاء الجاذبية من الفضاء. يوجد الكثير

---

(٢٥) مبدأ التكافؤ **Equivalence principle**: يعود مبدأ التكافؤ إلى فكرة كوبرنيك القائلة بوجوب تماثل قوانين الفيزياء في كل مكان ضمن الكون، ثم طورت هذه الفكرة من قبل أينشتاين الذي أكد أن قوة الجاذبية التي تؤثر بها الأجسام على بعضها محليًّا لا يمكن تمييزها عن قوى القصور.

من الجاذبية في جميع أنحاء النظام الشمسي بأكمله. والسبب هو أن صاروخهم يتحرك بعيدًا بنفس معدل سقوط أجسامهم بالضبط. مثل تسديدة نيوتن الخيالية لقذيفة المدفع من قمة جبل، كلاهما وكبسولتهما في حالة سقوط حر حول الأرض. وهكذا داخل السفينة من الوهم البصري أنها عديمة الوزن لأن كل شيء، بما في ذلك أجسام رواد الفضاء والسفينة نفسها، يسقطون بنفس المعدل.

ثم طبق أينشتاين هذا على لعبة الأطفال دوامة الخيل (المرجيحة الدوارة دوامة الخيل أو الكاروسيل إحدى ألعاب الملاهي، وتتألف من دولاب أفقي دوار ومقاعد على صورة خيل أو نحوها). وفقًا للنسبية، كلما تحركت بشكل أسرع أصبحت أكثر انبساطًا، لأن الفضاء ينضغط. في أثناء دورانها تتحرك الحافة الخارجية للركوب بشكل أسرع من الداخل. هذا يعني أنه بسبب تأثير النسبية على الزمكان، تتقلص الحافة أكثر من الداخل لأن الحافة تتحرك بشكل أسرع. ولكن مع اقتراب لعبة الدوامة من سرعة الضوء، تتشوه الأرضية. لم يعد مجرد قرص مسطح. تقلصت الحافة بينما ظل المركز كما هو، لذا فإن السطح منحنٍ مثل وعاء مقلوب.

الآن تخيل أنك تحاول المشي على الأرضية المنحنية للدوران -لا يمكنك المشي في خط مستقيم. في البداية قد تعتقد أن هناك قوة غير مرئية تحاول التخلص منك لأن السطح ملتوٍ أو منحنٍ. لذلك يقول أحدهم في الدوامة إن هناك قوة طرد مركزي تدفع كل شيء بعيدًا عنها. لكن بالنسبة لشخص في الخارج، لا توجد قوة خارجية على الإطلاق ولكن انحناء الأرضية فقط.

جمع أينشتاين كل ذلك معًا. إن القوة التي تسبب لك الوقوع في لعبة دوامة هي في الواقع ناتجة عن التواء في الدوامة. إن قوة الطرد المركزي التي تشعر بها تعادل الجاذبية؛ أي أنها قوة وهمية ناتجة عن وجودك على إطار متسارع. بعبارة أخرى، التسارع في أحد الإطارات مطابق لتأثير الجاذبية في إطار آخر، والذي يرجع إلى انحناء الفضاء.

الآن استبدل بلعبة الأطفال دوامة الخيل، النظام الشمسي. تدور الأرض حول الشمس، لذلك نتوهم، نحن أبناء الأرض، أن الشمس تمارس قوة جذب، تسمى الجاذبية على الأرض. لكن بالنسبة لشخص خارج المجموعة الشمسية، لن يرى أي قوة على الإطلاق؛ سيلاحظ أن الفضاء حول الأرض منحنٍ، بحيث يدفع الفضاء الفارغ الأرض بحيث تدور في دائرة حول الشمس.

كانت لدى أينشتاين الملاحظة الرائعة بأن الجاذبية في الواقع مجرد وهم. تتحرك الأجسام ليس بسبب سحبها بفعل الجاذبية أو قوة الطرد المركزي، ولكن لأنها مدفوعة بانحناءة الفضاء حولها. وهذا أمر يستحق التكرار: الجاذبية لا تسحب الأجسام، ولكن الفضاء هو من يدفعها.

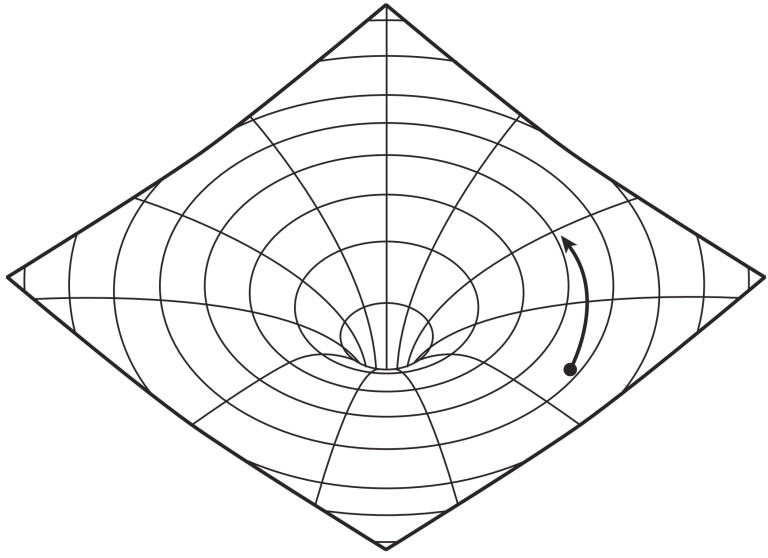
قال شكسبير ذات مرة إن العالم كله عبارة عن مسرح، ونحن ممثلون نصنع مداخلنا ومخارجنا. كانت هذه هي الصورة التي اعتمدها نيوتن. العالم ساكن، ونحن نتحرك على هذا السطح المسطح، ونطيع قوانين نيوتن.

لكن أينشتاين تخلى عن هذه الصورة، قال إن المسرح منحنٍ ومشوه. إذا سرت عليه لا يمكنك السير في خط مستقيم، بل ستُدفع

باستمرار لأن الأرض تحت قدميك منحنية وأنت تتأرجح مثل السكران.

الجاذبية وهم. على سبيل المثال، ربما تجلس على كرسيك الآن تقرأ هذا الكتاب، في العادة قد تقول إن الجاذبية تسحبك إلى مقعدك ولهذا السبب لا تطير في الفضاء، لكن أينشتاين سيقول إنك تجلس على كرسيك لأن كتلة الأرض تلوي الفضاء فوق رأسك وهذا الالتواء يدفعك إلى مقعدك.

تخيل وضع كرة لعبة رمي الجلة الثقيلة على مرتبة كبيرة، ستغوص في السرير مُسبِّبةً اعوجاجه. إذا قمت برمي كرة صغيرة على طول المرتبة، فإنها ستتحرك في خط منحنٍ. في الواقع سوف تدور حول كرة الجلة. من بعيد، يمكن للمراقب أن يقول إن هناك قوة غير مرئية تسحب الكرة الصغيرة وتجبرها على الدوران. لكن عن قرب سترى أنه لا توجد قوة غير مرئية على الإطلاق. لا تتحرك الكرة الصغيرة في خط مستقيم لأن المرتبة منحنية، مما سيجعل المسار المباشر له شكل يميل إلى الشكل البيضاوي.



الشكل ٦. كرة رمي الجلة الثقيلة موضوعة على مرتبة تغرق في القماش. ستصنع دوائر حول المنخفض الذي تخلقه. من بعيد، يبدو أن قوة من كرة الجلة تمسك بالكرة الصغيرة وتجبرها على الدخول في مدار. لكن ما يحدث أن الكرة الصغيرة تدور حول موضع الكرة الثقيلة لأن المرتبة ملتوية. بالطريقة نفسها، فإن جاذبية الشمس تشوه ضوء النجوم من النجوم البعيدة، والتي يمكن قياسها بواسطة التلسكوبات في أثناء كسوف الشمس.

الآن سنستبدل بالكرة الصغيرة الأرض، وبكرة الجلة الثقيلة الشمس، وبالمرتبة الزمكان. ثم نرى الأرض تدور حول الشمس لأن الشمس قد شوهت الفضاء المحيط بها، وأن الفضاء الذي تسافر فيه الأرض ليس مسطحًا.

أيضًا، فكر في نملة تتحرك على ورقة مجعدة، لا يمكنها التحرك في خط مستقيم. قد تشعر النملة كما لو أن هناك قوة تسحبها باستمرار. لكن بالنسبة لنا حين ننظر إلى النملة، نرى أنه لا توجد قوة على الإطلاق. هذه نظرة ثاقبة لما أسماه أينشتاين النسبية العامة: الزمكان تشوهه الكتل الثقيلة، مما يتسبب في وهم قوة الجاذبية.

هذا يعني أن النسبية العامة أقوى بكثير وأكثر تناظرًا من النسبية الخاصة، لأنها تصف الجاذبية، والتي تؤثر على كل الأشياء في الزمكان. من ناحية أخرى، تعمل النسبية الخاصة فقط مع الأشياء التي تتحرك بسلاسة في المكان والزمن في خط مستقيم. لكن في كوننا، كل شيء تقريبًا يتسارع[٢٦]. من سيارات السباق إلى طائرات الهليكوبتر إلى الصواريخ، نرى أنها تتسارع جميعًا. تعمل النسبية العامة للتسارع الذي يتغير باستمرار في كل نقطة في الزمكان.

(٢٦) التسارع أو العَجَلة **acceleration**: التسارع أو العَجَلة في الميكانيكا الكلاسيكية، هو معدل تغير السرعة المتجهة بالنسبة للزمن. التسارع هو كمية فيزيائية تعبر عن معدل تغير السرعة المتجهة في فترة زمنية محددة، من حيث الاتجاه والسرعة. التسارع كمية متجهة، بمعنى أن لها مقدارًا واتجاهًا. يتم تحديد اتجاه تسارع الجسم من خلال اتجاه القوة الكلية المؤثرة على هذا الجسم. كمية تسارع كائن ما، كما تم وصفها بقانون نيوتن الثاني، هي عبارة عن التأثير المشترك لسببين، هما: صافي التوازن لجميع القوى الخارجية المؤثرة على هذا الجسم -الكمية تتناسب طرديًّا مع صافي القوة الناتجة. كتلة هذا الجسم، اعتمادًا على المواد التي صنع منها -الكمية تتناسب عكسيًّا مع كتلة الجسم.

الكسوف الشمسي والجاذبية

أي نظرية مهما كانت جميلة يجب أن تواجه في النهاية التحقق التجريبي. لذلك استغل أينشتاين العديد من التجارب الممكنة. الأول كان مدار عطارد غير المنتظم. وجد علماء الفلك عند حساب مداره شذوذًا بسيطًا. فبدلًا من التحرك في شكل بيضاوي مثالي كما تنبأت معادلات نيوتن، وُجد أن المدار اهتز قليلًا مكونًا نمطًا يشبه الزهرة أو الوردة.

افترض علماء الفلك وجود كوكب جديد داخل مدار عطارد لحماية قوانين نيوتن، أطلقوا عليه اسم فولكانوس. من شأن جاذبية كوكب فولكانوس الافتراضي هذا أن تشد كوكب عطارد مسببة هذا الانحراف. سابقًا رأينا أن هذه الاستراتيجية سمحت لعلماء الفلك باكتشاف كوكب نبتون. لكن علماء الفلك فشلوا في العثور على أي دليل رصدي لفولكانوس.

لذلك عندما أعاد أينشتاين حساب الحضيض الشمسي[٢٧]

(٢٧) الأوج والحضيض الشمسي **Perihelion and aphelion**: يُعرف الحضيض بأنه أقرب نقطة يكون فيها الكوكب من الشمس، ويتسارع الكوكب في أثناء اقترابه من نقطة الحضيض، وبعدها يبدأ بالتباطؤ. أما الأوج فهو النقطة التي يكون فيها الجسم في المدار بحيث يكون الجسم السماوي أبعد من الشمس. وفقًا لقوانين كيبلر للحركة الكوكبية فإن جميع الكواكب والمذنبات والكويكبات في النظام الشمسي لديها مدارات إهليلجية حول الشمس. حيث تنص قوانين الجاذبية على أن المدارات ليست إلا بيضاوية الشكل تقريبًا بسبب الاضطرابات التي تسببها جاذبية الأجسام الأخرى. كل شكل بيضاوي له نقطتا تركيز، والشمس في واحدة من نقاط التركيز هذه للمدارات الإهليلجية. ومن ثَم فإن الجسم المداري له أقرب نقطة وأبعد نقطة من الكائن الرئيسي أي الحضيض والأوج.

لعطارد، البقعة الأقرب إلى الشمس، باستخدام نظريته في الجاذبية، وجد انحرافًا طفيفًا عن قوانين نيوتن. كان منتشيًا لإيجاد تطابق كامل مع حساباته الخاصة. وجد الفرق من القطع الناقص المثالي في مداره 42.9 ثانية من القوس[٢٨] لكل قرن ضمن النتيجة التجريبية. كان يتذكر باعتزاز: «لعدة أيام، كنت أتفوق على نفسي بالإثارة. لقد تحققت الآن أجرأ أحلامي».

كما أدرك أينشتاين أنه وفقًا لنظرياته، يجب أن ينحرف الضوء بسبب الشمس.

أدرك أينشتاين أن جاذبية الشمس ستكون قوية بما يكفي لثني الضوء القادم من النجوم القريبة. نظرًا لأن هذه النجوم لا يمكن رؤيتها -نهارًا- إلا في أثناء كسوف الشمس، اقترح أينشتاين إرسال رحلة استكشافية لمشاهدة كسوف الشمس عام ١٩١٩ لاختبار نظريته. (كان على علماء الفلك التقاط صورتين للسماء، الأولى ليلًا حيث تكون الشمس غائبة، والأخرى في أثناء كسوف الشمس. بمقارنة هاتين الصورتين، يجب أن يتحرك موقع النجوم في أثناء الكسوف بسبب جاذبية الشمس). كان أينشتاين على يقين من أن نظريته ستثبت صحتها. عندما سُئل عما

(٢٨) ثانية القوس أو قوس الثانية second of arc, arcsecond (arcsec), or arc second: هذه الوحدات نشأت في علم الفلك البابلي كتقسيمات بنظام العد الستيني للدرجة؛ فهي تستخدم في المجالات التي تنطوي على زوايا صغيرة جدًّا، مثل علم الفلك، البصريات، طب العيون، الملاحة، مسح الأراضي والرماية. يمكن للتعبير عن الزوايا الصغرى استعمال سوابق النظام الدولي للوحدات القياسية، على سبيل المثال: (مللي قوس الثانية) (mas) (ميكرو قوس الثانية) (μas) فهي وحدات شائعة الاستخدام في علم الفلك.

سيفكر فيه إذا دحضت التجربة نظريته، قال إن الله لا بد أن يكون قد أخطأ. لقد كان مقتنعًا بأنه على صواب، هكذا كتب إلى زملائه، لأن نظريته تتمتع بجمال رياضي رائع وتناظر فائق.

عندما أجرى عالم الفلك آرثر إدينجتون[٢٩] هذه التجربة الملحمية أخيرًا، كان هناك اتفاق ملحوظ بين تنبؤات أينشتاين والنتيجة الفعلية. (في يومنا هذا يُستخدم انحناء ضوء النجوم بسبب الجاذبية بشكل روتيني من قبل علماء الفلك. عندما يمر ضوء النجوم بالقرب من مجرة بعيدة ينحني الضوء، مما يعطي مظهر عدسة تحني الضوء. وتسمى هذه العدسات عدسات الجاذبية[٣٠] أو عدسات أينشتاين).

---

(٢٩) السير آرثر ستانلي إدنجتون **Sir Arthur Stanley Eddington**: ولد في ٢٨ ديسمبر ١٨٨٢ وتوفي في ٢٢ نوفمبر ١٩٤٤، هو عالم فلك وفيزياء ورياضيات بريطاني شهير، له إسهامات عظيمة في الفيزياء الفلكية منذ أوائل القرن العشرين، أطلق اسمه تكريمًا له على حد فيزيائي للمعان النجوم يسمى «حد إدنجتون»، كان عضوًا بالجمعية الملكية البريطانية، وكان مولعًا منذ وقت مبكر بنظام الكون وبحركة النجوم وتكوينها الداخلي، وفي عام ١٩١٦ م، انتهى إلى أن الضغط الإشعاعي عامل رئيسي من عوامل الحفاظ على توازن النجم، إلى جانب الجاذبية وضغط الغاز. بعد ذلك وضَّح العلاقة بين الكتلة وضوء النجم. وهذه العلاقة أساسية في البحث الفلكي، خصوصًا في دراسة حركة النجوم. وقاده هذا وعمله الآخر في طبيعة النجوم إلى البحث عن العلاقة بين كل المرتكزات الأساسية للطبيعة. تأتي شهرة إدنجتون من أنه أول من لاحظ انحراف الضوء القادم من النجوم البعيدة تحت تأثير مجال جاذبية الشمس. وكان أينشتاين قد تنبَّأ بهذا في نظريته النسبية العامة. كتب إدنجتون عدة كتب، وضَّحت طبيعة الكون في مصطلحات مألوفة لدى الجمهور. تشتمل كتبه على: ١-الحركات الكوكبية؛ بناء الكون عام (١٩١٤ م). ٢-البناء الداخلي للكواكب (١٩٢٦ م). ٣-فيزياء العالم الطبيعي (١٩٢٨ م).

(٣٠) عدسة الجاذبية **Gravitational lens**: عدسة الجاذبية في علم الفلك الفيزيائي هي تأثير جاذبية المادة، الموجودة والمتوزعة بين مصدر الضوء البعيد والمراقب، هذا التوزع المادي قادر على ثني ضوء المصدر في أثناء سفره نحو المراقب. ويعرف هذا التأثير بالمفعول العدسي التثاقلي (**gravitational lensing**)، ومقدار هذا الانحناء هو أحد تنبؤات نظرية النسبية =

واصل أينشتاين مسيرته الحافلة بفوزه بجائزة نوبل عام ١٩٢١.

سرعان ما أصبح إحدى أكثر الشخصيات شهرة على هذا الكوكب، حتى أكثر من معظم نجوم السينما والسياسيين. (في عام ١٩٣٣، ظهر مع تشارلي شابلن في العرض الأول لفيلمه. وعندما احتشد الباحثون عن التوقيعات، سأل أينشتاين شابلن: «ماذا يعني كل هذا؟». أجاب شابلن: «لا شيء، لا شيء على الإطلاق، الناس تحتفي بي لأن الجميع يفهمني. أما أنت فإنهم يحتفون بك لأنه لا أحد يفهمك»).

بطبيعة الحال فإن النظرية التي من شأنها أن تطيح بـ٢٥٠ عامًا من الفيزياء النيوتونية ستقابل أيضًا بنقد شرس. كان تشارلز لين بور، الأستاذ بجامعة كولومبيا، أحد المشككين الذين قادوا العملية. بعد أن قرأ عن النسبية، غضب بشدة: «أشعر كما لو كنت أتجول مع أليس في بلاد العجائب وأتناول الشاي مع صانع القبعات المجنون».

لطالما طمأن بلانك أينشتاين. كان يكاتبه: «الحقيقة العلمية الجديدة لا تنتصر بإقناع خصومها وتجعلهم يرون النور، بل لأن الخصوم يموتون في النهاية وينمو جيل جديد يستأنس أكثر بها».

= العامة لألبرت أينشتاين. إن بعض عناقيد النجوم والمجرات عبارة عن صور بصرية تولدت من تأثير جاذبية نجوم كبيرة أو ثقوب سوداء. توجد في الكون نجوم عظيمة الأحجام (حجم الشمس ١٠٠ مرة) وتعمل بفعل قوى جاذبيتها العالية التي تفوق شدة جاذبية الشمس ملايين المرات على انحناء الضوء المار بالقرب منها. فيكون تأثيرها على الضوء القادم من خلفها سواء من نجوم عظمى أو من مجرات سماوية أخرى. فينحني مسار الضوء حوله بطريقة انحنائه في عدسة، وبذلك يمكننا من الأرض رصد عدد من الأجرام السماوية الموجودة (المختبئة) خلف الجرم الكبير أو ثقب أسود، وعادة ما تكون تلك الصور مشوهة بعض الشيء.

كانت هناك العديد من التحديات للنسبية على مدى عقود من الزمن، ولكن في كل مرة تحققت نظرية أينشتاين. كما سنرى في فصول لاحقة، أعادت نظرية النسبية لأينشتاين تشكيل نظام الفيزياء بأكمله، وأحدثت ثورة في مفهومنا للكون وأصله وتطوره، وغيرت الطريقة التي نعيش بها.

تتمثل إحدى الطرق السهلة لتأكيد نظرية أينشتاين في استخدام نظام GPS [٣١] على هاتفك الخلوي. يتكون نظام GPS من ٣١ قمرًا صناعيًّا تدور حول الأرض. في أي وقت، يمكن لهاتفك الخلوي أن يستقبل إشارات من ثلاثة منها. يتحرك كل من هذه الأقمار الصناعية الثلاثة في مسار وزاوية مختلفة قليلًا. ثم يقوم الكمبيوتر في هاتفك

(٣١) نظام التموضع العالمي (Global Positioning System) ويرمز له (GPS): هو نظام ملاحة عبر الأقمار الصناعية يُوفِّر معلومات عن الموقع والوقت في جميع الأحوال الجوية في أي مكان على أو بالقرب من الأرض، حيث هناك خط بصر غير معاق لأربعة أو أكثر من أقمار الـGPS. يوفر النظام قدرات مهمة للمستخدمين العسكريين والمدنيين والتجاريين في جميع أنحاء العالم. أنشأت حكومة الولايات المتحدة النظام، وهي التي تحافظ عليه، وجعلت الوصول إليه مجانيًّا لأي شخص لديه جهاز استقبال GPS. بدأت الحكومة الأمريكية مشروع الـ GPS في ١٩٧٣ للتغلب على قيود نظام الملاحة السابق، حيث دمجت أفكارًا سابقة من ضمنها دراسات هندسية سرية من ستينيات القرن الماضي. وزارة الدفاع الأمريكية هي التي طورت النظام الذي استعمل في الأصل ٢٤ قمرًا صناعيًّا. أصبح النظام يعمل بشكل كامل في ١٩٩٥. وقد أدى التقدم في التكنولوجيا والمطالب الجديدة للنظام القائم إلى تحديث نظام الـ GPS وتنفيذ الجيل القادم وهو الـGPS III. إضافة إلى الـGPS، هناك أنظمة أخرى تُستخدم أو قيد التطوير. نظام الملاحة الروسي (غلوناس) أنشئ بالتزامن مع الـGPS، لكنه عانى من تغطية ناقصة للكرة الأرضية حتى منتصف عقد الـ٢٠٠٠. هناك أيضًا نظام غاليليو للتموضع التابع للاتحاد الأوروبي (مكون من ٣٠ قمرًا صناعيًّا، ٢٤ قمرًا في الخدمة و٦ احتياط) بدأ في تقديم خدماته في ٢٠١٥.

الخلوي بتحليل هذه البيانات من الأقمار الصناعية الثلاثة وبتثليث[٣٢] موقعك الدقيق.

نظام GPS دقيق للغاية لدرجة أنه يجب أخذ تصحيحات صغيرة من النسبية الخاصة والعامة في الاعتبار.

نظرًا لأن الأقمار الصناعية تتحرك بسرعة تقارب ١٧٠٠٠ ميل في الساعة، فإن الساعة في الأقمار الصناعية لنظام تحديد المواقع العالمي (GPS) تتحرك أبطأ قليلًا من تلك الموجودة على الأرض بسبب النسبية الخاصة، والتي تنص على أن السرعات الأعلى تؤدي إلى زمن أبطأ -الظاهرة التي وضحناها في تجربة أينشتاين الفكرية لتجاوز شعاع ضوء- ولكن نظرًا لأن الجاذبية تكون أضعف كلما ابتعدنا نحو الفضاء الخارجي، فإن الزمن في الواقع يتسارع قليلًا بسبب النسبية العامة، والتي تنص على أنه يمكن تشويه الزمكان عن طريق سحب الجاذبية -فكلما كانت الجاذبية أضعف تحرك الزمن بشكل أسرع. هذا يعني أن النسبية الخاصة والعامة تعمل في اتجاهين متعاكسين، مع النسبية الخاصة التي تتسبب في إبطاء الإشارات، بينما تؤدي النسبية العامة إلى تسريع الإشارات. ثم يقوم هاتفك الخلوي بحساب التأثيرات المتنافسة ويخبرك بالضبط بمكان وجودك. لذلك من دون عمل النسبية الخاصة والعامة جنبًا إلى جنب، سوف تضيع.

---

(٣٢) عملية التثليث **Triangulation**: في علم المثلثات والهندسة الرياضية هي عملية إيجاد إحداثيات، والمسافة إلى نقطة بحساب طول ضلع مثلث باستخدام القياسات المأخوذة لزوايا وأضلاع المثلث المشكل من تلك النقطة ونقطتين مرجعيتين باستخدام قانون الجيب. يستخدم التثليث في العديد من التطبيقات، منها علم المساحة والملاحة والفلك وتوجيه الصواريخ في العلوم العسكرية وغيرها.

نيوتن وأينشتاين: القطبان المتضادان

وُصف أينشتاين باعتباره نيوتن الجديد، لكن أينشتاين ونيوتن كانا قطبين متضادين في الشخصية. كان نيوتن منعزلًا ومتحفظًا لدرجة كونه معاديًا للمجتمع. كان بلا أصدقاء مدى حياته وكان غير قادر على المحادثة اليومية.

قال الفيزيائي جيريمي بيرنشتاين ذات مرة[٣٣]: «كل من كان له أي اتصال جوهري مع أينشتاين تعامل بإحساس عارم بنبل الرجل. المصطلح الوصفي الذي يتكرر مرارًا وتكرارًا هو «إنساني» – في إشارة إلى الصفة البسيطة والمحبوبة لشخصيته».

لكن كلًّا من نيوتن وأينشتاين يشتركان في خصائص رئيسية معينة. الأولى هي القدرة على إعمال العقل والتركيز بطاقة عقلية هائلة. قد ينسى نيوتن تناول الطعام أو النوم لأيام عند التركيز على مشكلة واحدة. كان يتوقف في منتصف المحادثة ويخربش على كل ما هو متاح، أحيانًا منديل أو حائط. وبالمثل، يمكن أن يركز أينشتاين على مشكلة ما لسنوات، بل حتى لعقود. حتى إنه عانى من انهيار شبه كامل في أثناء عمله على النظرية العامة.

---

(٣٣) جيريمي بيرنشتاين **Jeremy Bernstein**: هو فيزيائي ومؤرخ وكاتب أمريكي، ولد في ٣١ ديسمبر ١٩٢٩ في روتشستر في الولايات المتحدة.

السمة الأخرى التي تشاركا فيها هي القدرة على تصور مشكلة والتعبير عنها في هيئة صور. على الرغم من أن نيوتن كان بإمكانه كتابة الأصول الرياضية للفلسفة الطبيعية بالكامل باستخدام الرموز الجبرية، فقد ملأ تحفته الفنية بمخططات هندسية. من السهل نسبيًّا استخدام حساب التفاضل والتكامل مع الرموز المجردة؛ لكن اشتقاقها من المثلثات والمربعات لا يمكن أن يتم إلا بواسطة أستاذ قدير. وبالمثل، تمتلئ نظرية أينشتاين برسوم تخطيطية للقطارات وعصي القياس والساعات.

البحث عن نظرية موحدة

في النهاية، ابتكر أينشتاين نظريتين رئيسيتين. الأولى كانت النسبية الخاصة، التي تحكم خصائص أشعة الضوء والزمكان. قدمت تناظرًا على أساس الدوران في أربعة أبعاد. والثانية هي النسبية العامة، حيث كشفت عن أن الجاذبية عبارة عن انحناء للزمكان.

ولكن بعد هذين الإنجازين الهائلين حاول الوصول إلى إنجاز ثالث أكبر. لقد أراد نظرية من شأنها أن تُوحِّد كل قوى الكون في معادلة واحدة. أراد استخدام لغة نظرية المجال لإنشاء معادلة يمكن أن تجمع بين نظرية ماكسويل للكهرباء والمغناطيسية مع نظريته في الجاذبية. لقد حاول على مدى عقود توحيد هاتين المعادلتين وفشل. (كان مايكل فاراداي في الواقع أول من اقترح توحيد الجاذبية مع الكهرومغناطيسية. اعتاد فاراداي الذهاب إلى جسر لندن وإسقاط المغناطيس، على أمل العثور على بعض التأثير القابل للقياس للجاذبية على المغناطيس).

أحد أسباب فشل أينشتاين هو أنه في عشرينيات القرن الماضي كانت ثمة فجوة كبيرة في فهمنا للعالم. سوف يتطلب الأمر تقدمًا في نظرية جديدة، نظرية الكم، لكي يدرك الفيزيائيون أن هناك قطعة مفقودة من اللغز: القوى النووية.

لكن أينشتاين، على الرغم من أنه كان أحد مؤسسي نظرية الكم، فإنه من المفارقات أن يصبح أكبر خصم للكم. سيطلق وابلًا من الانتقادات ضد نظرية الكم. على مدى عقود، واجهت النظرية كل التحديات التجريبية ومنحتنا طوفانًا من الأجهزة الكهربائية الرائعة التي تملأ حياتنا وأماكن العمل. ومع ذلك، وكما سنرى، فإن اعتراضاته الفلسفية العميقة والبارعة عليها يتردد صداها حتى الآن.

* * *

الفصل الثالث

بزوغ الكوانتم

بينما أينشتاين يبتكر بمفرده هذه النظرية الجديدة الواسعة القائمة على المكان والزمن والمادة والطاقة، كان التطور الموازي في الفيزياء يكشف هذا السؤال القديم: مم تتكون المادة؟ سيؤدي هذا إلى النظرية العظيمة التالية للفيزياء، نظرية الكم أو الكوانتم.

بعد أن أنهى نيوتن نظريته في الجاذبية، أجرى العديد من التجارب في الكيمياء، محاولًا فهم طبيعة المادة. يُعتقد أن نوبات الاكتئاب التي تعرض لها كانت بسبب تجاربه مع الزئبق، وهو سُم معروف بتسببه في أعراض عصبية. ومع ذلك، لم يعرف الكثير عن الخصائص الأساسية للمادة ولم يتعلم الكثير من عمل هؤلاء الخيميائيين الأوائل الذين قضوا الكثير من وقتهم وطاقتهم في محاولة تحويل الرصاص إلى ذهب.

سوف يستغرق الأمر عدة قرون للكشف ببطء عن أسرار المادة. بحلول القرن التاسع عشر، بدأ الكيميائيون في العثور على العناصر الأساسية للطبيعة وعزلها -وهي عناصر لا يمكن بدورها أن تتحلل إلى أي شيء أبسط. بينما كانت الرياضيات هي رائدة التقدم المذهل في

الفيزياء، فإن القفزات العلمية المبهرة في الكيمياء جاءت أساسًا من ساعات شاقة في المختبر.

في عام ١٨٦٩، كان لديمتري مندليف[٣٤] حلم أن يجمع كل عناصر الطبيعة على طاولة. عند الاستيقاظ، سرعان ما بدأ في ترتيب العناصر المعروفة في جدول منتظم، مما يدل على وجود نمط للعناصر. خرج النظام والقدرة على التنبؤ فجأة من فوضى الكيمياء. يمكن ترتيب الستين عنصرًا أو ما يقرب من ذلك في هذا الجدول البسيط، ولكن كانت هناك فجوات، وكان مندليف قادرًا على التنبؤ بخصائص هذه العناصر المفقودة. عندما عُثر على هذه العناصر بالفعل في المختبر -كما هو متوقع- برزت سمعة مندليف العلمية.

لكن لماذا رُتبت العناصر بهذا النمط المنتظم؟

حدث التطور التالي في عام ١٨٩٨، عندما عزلت ماري وبيير كوري سلسلة جديدة من العناصر غير المستقرة التي لم يسبق لها مثيل من قبل. من دون أي مصدر للطاقة كان الراديوم يتوهج بشكل ساطع في المختبر، منتهكًا أحد مبادئ الفيزياء العزيزة؛ الحفاظ على الطاقة[٣٥]

---

(٣٤) ديميتري إيفانوفيتش مندليف **Дми́трий Ива́нович Менделе́ев**: يشتهر بـ«مندليف»، كيميائي روسي (٨ فبراير ١٨٣٤ - ٢ فبراير ١٩٠٧). اشتُهر بسبب مساهمته في تأليف النسخة الأولى من الجدول الدوري للعناصر. وعلى عكس الذين ساهموا في فكرة الجدول الدوري، استطاع مندليف توقع الخواص الكيميائية للعناصر التي لم تُكتشف في وقتها. وفي حالات عديدة غامر بالسؤال عن دقة الأوزان الذرية المقبولة في وقته، وكان يجادل بأنها لا تتطابق مع المتوقع لها بواسطة القانون الدوري، وقد أثبتت الأبحاث لاحقًا صحة كلامه.

(٣٥) حفظ الطاقة في الفيزياء **Conservation of energy**: ينص قانون حفظ الطاقة على أنه في أي نظام معزول، الطاقة لا تُستحدث من العدم ولا تنعدم ولكن يمكن تحويلها من شكل =

(لا يمكن أبدًا إنشاء هذه الطاقة أو تدميرها). يبدو أن طاقة أشعة الراديوم هذه تأتي من العدم. من الواضح أن نظرية جديدة ستكون ضرورية.

حتى ذلك الحين، اعتقد الكيميائيون أن المكونات الأساسية للمادة والعناصر أبدية أو سرمدية، وأن عناصر مثل الهيدروجين أو الأكسجين ستظل مستقرة طوال الوقت. لكن في مختبراتهم، يمكن للكيميائيين أن يروا أن عناصر مثل الراديوم تتحلل إلى عناصر أخرى، وتطلق الإشعاع في هذه العملية.

كان من الممكن أيضًا حساب مدى سرعة تحلل هذه العناصر غير المستقرة والتي يمكن قياسها بآلاف أو حتى بلايين السنين. ساعدت اكتشافات ماري وبيير كوري في حسم نقاش طويل الأمد. أدرك الجيولوجيون، الذين اندهشوا من الوتيرة الجليدية للتكوينات الصخرية، أن الأرض يجب أن يكون عمرها مليارات السنين. لكن لورد كلفن[٣٦]، أحد عمالقة الفيزياء الفيكتورية الكلاسيكية، قدَّر أن الأرض

= إلى آخر. يمكن تحويل الطاقة من شكل إلى آخر مثل طاقة الحركة، يمكن أن تتحول إلى طاقة حرارية، ولكن ليس ممكنًا في نظام مغلق معزول أن تخلق طاقة من نفسها أو تفنى. ونقول إن الطاقة تتبع قوانين الانحفاظ.

(٣٦) لورد كلفن **William Thomson, 1st Baron Kelvin** (٢٦ يونيو ١٨٢٤ – ١٧ ديسمبر ١٩٠٧): هو فيزيائي ومهندس إسكتلندي ولد في أيرلندا الشمالية باسم وليام طومسون، وهو مؤسس الفيزياء الحديثة. ولقد أطلق اسمه على وحدة قياس درجة الحرارة المعادلة لدرجة (١) مئوي وهي الكلفن. ولقد حسب كلفن أخفض درجة يمكن أن تصل إليها المادة، وسُميت هذه الدرجة بالصفر المطلق، وهي تعادل –١٥ ,٢٧٣ °C، وقد سُمي المقياس بالمقياس المطلق أو مقياس كلفن. تُعين اليوم درجات الحرارة المطلقة بوحدات كلفن تكريمًا له، فعلى الرغم من اكتشاف الحد الأدنى لدرجة الحرارة (الصفر المطلق) قبل عمله، اشتُهر كلفن بتحديد قيمته الصحيحة بنحو –١٥ ,٢٧٣ درجة مئوية أو –٦٧ ,٤٥٩ درجة فهرنهايت. سُمي تأثير جول–طومسون أيضًا على شرفه.

المنصهرة ستبرد في غضون بضعة ملايين من السنين. مَن كان على حق؟

كما اتضح، كان الجيولوجيون هم الذين على حق. لم يفهم اللورد كلفن أن قوة جديدة للطبيعة، تلك التي اكتشفها الزوج كوري والتي تسمى القوة النووية، يمكن أن تزيد من حرارة الأرض. نظرًا لأن التحلل الإشعاعي يمكن أن يحدث على مدى مليارات السنين، فهذا يعني أنه يمكن تسخين لب الأرض عن طريق اضمحلال اليورانيوم والثوريوم والعناصر المشعة الأخرى. لذا فإن القوة الهائلة للزلازل المدمرة، والبراكين المدوية، والانجراف القاري الطاحن البطيء، كلها تنبع من القوة النووية.

في عام ١٩١٠، وضع إرنست رذرفورد قطعة من الراديوم المتوهج في صندوق رصاص به ثقب صغير. خرج شعاع صغير من الإشعاع من هذا الثقب، موجهًا نحو صفيحة رقيقة من الذهب. كان من المتوقع أن تمتص ذرات الذهب الإشعاع. لصدمته، وجد أن شعاع الراديوم يمر عبر الصفيحة، كما لو لم يكن هناك أي شيء.

كانت النتيجة مذهلة: هذا يعني أن الذرات تتكون أساسًا من مساحة فارغة. في بعض الأحيان نبين هذا للطلاب، نضع في أيديهم قطعة من اليورانيوم غير المؤذي، وعداد جايجر[٣٧] تحت أيديهم يمكنه الكشف

(٣٧) عداد جايجر **Geiger counter**: والمسمى أيضًا عداد جايجر-مولر، هو إحدى أدوات اكتشاف الإشعاعات المؤيَّنة، مثل أشعة غاما والأشعة السينية وكذلك الإلكترونات السريعة ومنها أنواع لقياس أشعة ألفا. ويسهل استخدامه في كل مكان حيث إنه عبارة عن مكشاف حساس في صورة أسطوانة طولها نحو ١٥ سنتيمترًا متصلة بجهاز إلكتروني يشبه الراديو الصغير بواسطة سلك، ويسهل حملهما. عند القياس يُقرب المكشاف من العينة المراد قياس إشعاعها، فيبين مؤشر في الجهاز مقدار الأشعة المقيسة، ويكون ذلك عادة مصحوبًا بصوت متردد يصدره الجهاز. ومن تردد صوت الجهاز يمكن معرفة شدة الإشعاع التقريبية، إذ =

عن الإشعاع. يصاب الطلاب بالصدمة لسماع عداد جايجر ينقر لأن أجسامهم جوفاء.

في أوائل القرن العشرين، كانت الصورة القياسية للذرة هي نموذج فطيرة الزبيب؛ أي أن الذرة كانت تشبه فطيرة ذات شحنة موجبة، مع رش زبيب من الإلكترونات بداخلها. تدريجيًّا، بدأت صورة جديدة جذرية للذرة في الظهور. كانت الذرة في الأساس مجوفة، وتتكون من سرب من الإلكترونات يدور حول قلب صغير كثيف يسمى النواة. ساعدت تجربة رذرفورد في إثبات ذلك لأن شعاعه المشع ينحرف أحيانًا عن طريق الجسيمات المكدسة بإحكام في النواة. من خلال تحليل العدد والتردد وزوايا الانحراف تمكن من تقدير حجم نواة الذرة. كانت أصغر بمائة ألف مرة من الذرة نفسها.

في وقت لاحق اكتشف العلماء أن النواة بدورها مكونة من جسيمات دون ذرية أصغر: البروتونات (التي تحمل شحنة موجبة) والنيوترونات (التي لا تحمل شحنة). يبدو أن جدول مندليف بأكمله يمكن إنشاؤه باستخدام ثلاثة جسيمات دون ذرية فقط: الإلكترون والبروتون والنيوترون. لكن ما هي المعادلة التي تتبعها هذه الجسيمات؟

= يتناسب تردد الصوت مع شدة الإشعاع. أو قد يزود الجهاز بعداد رقمي للقياس الدقيق. يمكن أن يستعمله الجيولوجيون بصفة مبدئية في التنقيب عن الخامات النووية مثل اليورانيوم والثوريوم التي قد توجد في أحجار بعض المناطق. كما يوجد الجهاز في كل معمل نووي للتحذير من ارتفاع غير عادي في درجة الإشعاع في المكان بغرض تحذير العاملين من خطر الإشعاع، ليتخذوا حذرهم ويتعرفوا على سبب زيادة الإشعاع وإزالته. اخترع العالم الألماني جايجر هذا العداد ثم أدخل تلميذه مولر تعديلات قيمة عليه، ولذلك يسمى أحيانا عداد جايجر-مولر أو بالألمانية **Geiger-Müller-Zählrohr**.

الثورة الكمومية

في أثناء ذلك، وُلدت نظرية جديدة يمكنها تفسير كل هذه الاكتشافات الغامضة. ستُطلِق هذه النظرية في النهاية ثورة من شأنها أن تتحدى كل ما نعرفه عن الكون، هي ميكانيكا الكم (الميكانيكا الكمومي أو ميكانيكا الكوانتم). لكن ما هو الكم أو الكوانتم على أي حال، ولماذا هو مهم جدًّا؟

وُلد الكوانتم (الكم) في عام ١٩٠٠ عندما سأل الفيزيائي الألماني ماكس بلانك نفسه سؤالًا بسيطًا: لماذا تتوهج الأجسام عندما تكون ساخنة؟ عندما استخدم البشر النار لأول مرة منذ آلاف السنين، لاحظوا أن الأجسام الساخنة تتوهج بألوان معينة. عرف صانعو الفخار منذ قرون أن الأشياء عندما تصل إلى آلاف الدرجات فإنها تغير لونها وتتحول من الأحمر إلى الأصفر إلى الأزرق. (يمكنك أن ترى ذلك بنفسك عن طريق إشعال عود ثقاب أو شمعة. في الجزء السفلي، يكون اللهب أكثر سخونة، وقد يكون لونه مائلًا للزرقة. يكون لونه أصفر في الوسط وأبرد في الأعلى، حيث يكون اللهب مائلًا للحمرة).

ولكن عندما حاول الفيزيائيون حساب هذا التأثير (يسمى إشعاع الجسم الأسود) من خلال تطبيق عمل نيوتن وماكسويل على الذرات، اكتشفوا مشكلة. (الجسم الأسود هو جسم يمتص تمامًا كل الإشعاع

الذي يسقط عليه. يطلق عليه الأسود لأن اللون الأسود يمتص كل الضوء). وفقًا لنيوتن، كلما زادت سخونة الذرات، اهتزت بسرعة أكبر. ووفقًا لما قاله ماكسويل، فإن الشحنات المهتزة بدورها يمكن أن تبعث إشعاعًا كهرومغناطيسيًّا على شكل ضوء. لكن عندما قاموا بحساب الإشعاع المنبعث من الذرات الساخنة المهتزة، كانت النتيجة مخالفة للتوقعات. عند الترددات المنخفضة يناسب هذا النموذج البيانات جيدًا. ولكن عند التردد العالي، يجب أن تصبح طاقة الضوء في النهاية غير محدودة وهو أمر سخيف. بالنسبة للفيزيائي، اللا نهاية هي مجرد علامة على أن المعادلات لا تعمل وأنه لا يفهم ما يحدث.

ثم طرح ماكس بلانك[٣٨] فرضية بسيطة. لقد افترض أن الطاقة بدلًا من أن تكون مستمرة وسلسة كما في نظرية نيوتن، فإنها تحدث بالفعل في حزم منفصلة أطلق عليها «كوانتا» أو «كمات»[٣٩]. عندما عدَّل طاقة هذه الحزم، وجد أنه يمكنه إعادة إنتاج الطاقة التي تشع من الأجسام الساخنة بدقة. كلما زادت حرارة الجسم، زاد تردد الإشعاع بما يتوافق مع ألوان مختلفة من ضوء الطيف.

هذا هو سبب تغير اللهب من الأحمر إلى الأزرق مع زيادة درجة

---

(٣٨) ماكس بلانك **Max Planck** (من ٢٣ أبريل ١٨٥٨ – ٤ أكتوبر ١٩٤٧): عالم فيزياء ألماني، يعتبر مؤسس نظرية الكم، وأحد أهم فيزيائي القرن العشرين، حاصل على جائزة نوبل في الفيزياء عام ١٩١٨م. قدم بلانك العديد من المساهمات في مجال الفيزياء النظرية، ولكن يشتهر بأنه مؤسس نظرية الكم التي تعد ثورة في فهم الإنسان لطبيعة الذرة وجسيماتها.

(٣٩) الكم في الفيزياء أو الكوانتم (**quantum** وجمعها **quanta** كمات أو كوانتات): هو مصطلح فيزيائي يُستخدم لوصف أصغر كمية يمكن تقسيم بعض الصفات الطبيعية إليها، مثل الطاقة، فهي تنتقل في هيئة كم، أي وحدات صغيرة لا يوجد أصغر منها.

الحرارة. هذه أيضًا هي الطريقة التي نعرف بها درجة حرارة الشمس. عندما تسمع لأول مرة أن سطح الشمس يبلغ نحو ٥٠٠٠ درجة مئوية، قد تتساءل: كيف نعرف ذلك؟ لم يسبق أن ذهب أحد إلى الشمس وقاس حرارتها باستخدام مقياس حرارة. لكننا نعرف درجة حرارة الشمس بسبب الطول الموجي للضوء الذي ينبعث منها.

قام بلانك بعد ذلك بحساب حجم هذه الحزم من الطاقة الضوئية، أو الكمات، وقام بقياسها نسبة إلى ثابت صغير **h** وهو ثابت بلانك الذي تبلغ قيمته 6.6×10^{-34} جول-ثانية. (لقد تمكن بلانك من استنتاج هذا الرقم من خلال تعديل طاقة هذه الحزم يدويًّا حتى يتمكن من ملاءمة البيانات تمامًا).

إذا تركنا ثابت بلانك يؤول تدريجيًّا إلى الصفر، فإن كل معادلات نظرية الكوانتم تختزل إلى معادلات نيوتن. (وهذا يعني أن السلوك الغريب للجسيمات دون الذرية، والذي غالبًا ما ينتهك ما هو بديهي بالضرورة[٤٠]، يتقلص تدريجيًّا إلى قوانين الحركة المألوفة لنيوتن حيث نضبط ثابت بلانك يدويًّا على الصفر). لهذا السبب نادرًا ما نرى تأثيرات الكوانتم في الحياة اليومية. بالنسبة لحواسنا، يبدو العالم

(٤٠) البديهية أو الحس السليم باعتبارها ترجمة لكلمة **common sense** بالإنجليزية: هي حسن التقدير والحكمة التي تقوم على المفهوم البسيط للحالة أو الوقائع. إن «الفطرة السليمة» (في هذا المنظور) تعادل المعرفة والخبرة التي يمتلكها معظم الأفراد بالفطرة أو التي يستخدمها الشخص، وهو المصطلح الذي يُفترض وجوب فعله لذلك من عدمه. يُعرفها قاموس كامبريدج (**Cambridge Dictionary**) بأنها المستوى الأساسي للمعرفة العملية والحكم العملي الذي نكون جميعًا في حاجة إليه لمساعدتنا على المعيشة بطريقة معقولة وآمنة.

نيوتونيًّا جدًّا لأن ثابت بلانك هو رقم صغير جدًّا ويؤثر فقط في الكون على المستوى دون الذري.

تُسمى هذه التأثيرات الكمومية الصغيرة بالتصحيحات الكمومية، ويقضي الفيزيائيون عمرًا كاملًا في محاولة حسابها. في عام ١٩٠٥، وهو نفس العام الذي اكتشف فيه أينشتاين النسبية الخاصة، طبقت نظرية الكوانتم على الضوء وأظهرت أن الضوء ليس مجرد موجة بل كان يتصرف كحزمة من الطاقة، أو جسيم يسمى الفوتون. لذلك يبدو أن للضوء وجهين: موجة كما تنبأ ماكسويل، وجسيم أو فوتون كما تنبأ بلانك وأينشتاين. ظهرت الآن صورة جديدة للضوء. يتكون الضوء من الفوتونات، وهي كوانتات (كمات)، أو جسيمات، لكن كل فوتون خلق المجالات المحيطة به (المجالات الكهربائية والمغناطيسية). وتشكلت هذه المجالات بدورها على شكل موجات وامتثلت لمعادلات ماكسويل. إذن لدينا الآن علاقة جميلة بين الجسيمات والمجالات التي تحيط بها.

إذا كان للضوء وجهان، كجسيم وكموجة، فهل للإلكترون أيضًا هذه الازدواجية الغريبة؟ كانت هذه هي الخطوة المنطقية التالية، وسيكون لها التأثير الأعمق، حيث ستهز عالم الفيزياء الحديثة والحضارة نفسها.

موجات الإلكترون

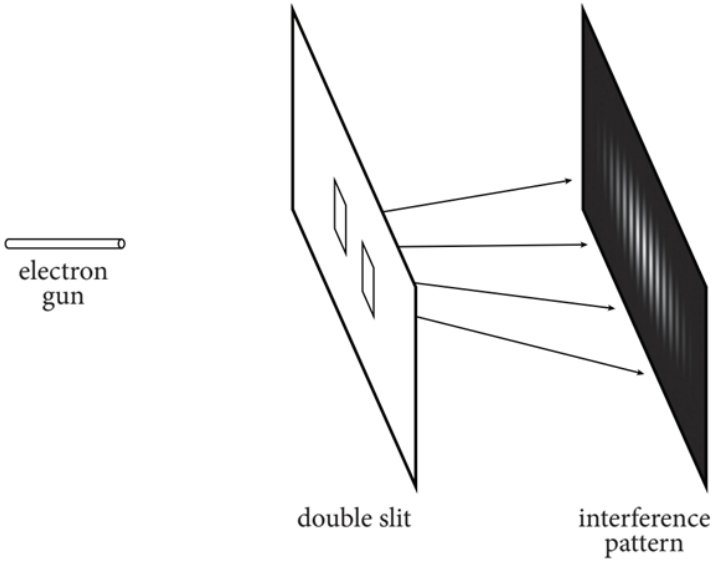
ما وجده الفيزيائيون سبَّب لهم صدمة، ذلك لأن الإلكترونات التي كانت تعتبر ذات يوم جسيمات شبيهة بالنقطة الصلبة يمكن أن تتصرف أيضًا مثل الموجات.

للتوضيح، سنحضر ورقتين متوازيتين، واحدة خلف الأخرى. سنحفر شقين في الورقة الأولى، ثم نطلق شعاعًا إلكترونيًّا عليها. نتوقع عادةً العثور على نقطتين على الورقة الثانية، حيث تصطدم أشعة الإلكترون بالورقة الثانية. فإما أن شعاع الإلكترون يمر عبر الشق الأول وإما أنه يمر عبر الشق الثاني. ولكن ليس عبر كليهما معًا. هذا أمر بديهي.

ولكن عند إجراء التجربة فعليًّا، سيظهر أن نمط النقاط على الورقة الثانية مرتب في شريط من الخطوط الرأسية، وهي ظاهرة تحدث عندما تتداخل الموجات مع بعضها البعض. (في المرة التالية التي تستحم فيها، ارشق سطح الماء برفق في مكانين متباعدين بشكل متزامن، وسترى ظهور نمط التداخل هذا والذي يشبه شبكة من شبكات العنكبوت).

لكن هذا يعني -إلى حد ما- أن الإلكترونات مرت عبر الشقين في وقت واحد. كان هذا هو التناقض: كيف يمكن لجسيم نقطي مثل الإلكترون أن يتداخل مع نفسه كما لو كان ينتقل عبر شقين منفصلين؟

بالإضافة إلى ذلك أظهرت تجارب أخرى على الإلكترونات أنها اختفت وعادت إلى الظهور في مكان آخر، وهو أمر مستحيل في عالم نيوتن. إذا كان ثابت بلانك أكبر كثيرًا ويؤثر في الأشياء على المستوى البشري، فسيكون العالم مكانًا غريبًا يتعذر التعرف عليه تمامًا. يمكن أن تختفي الأشياء وتعاود الظهور في مكان مختلف، ويمكن أن تكون في مكانين في نفس الوقت.



الشكل ٧. تعمل الإلكترونات التي تمر عبر شق مزدوج كما لو كانت موجة؛ أي أنها تتداخل مع بعضها البعض على الجانب الآخر، كما لو كانت تتحرك عبر الشقين في وقت واحد، وهو أمر مستحيل في الفيزياء النيوتونية ولكنه الأساس في ميكانيكا الكم.

على الرغم من أن نظرية الكم تبدو غير مرجحة وذات احتمالات ضعيفة، فإنها بدأت تحقق نجاحًا باهرًا. كتب الفيزيائي النمساوي إرفين شرودنجر[٤١] في عام ١٩٢٥ معادلته الشهيرة التي وصفت بدقة حركة موجات الجسيمات هذه. عند تطبيقها على ذرة هيدروجين ذات إلكترون واحد يدور حول بروتون ستعطي اتفاقًا رائعًا مع التجربة. مستويات الإلكترون الموجودة في ذرة شرودنجر تطابق تمامًا النتائج التجريبية. في الواقع، يمكن من حيث المبدأ شرح جدول مندليف بأكمله كحل لمعادلة شرودنجر.

(٤١) إرفين شرودنجرErwin Schrödinger: ولد في ١٢ أغسطس من عام ١٨٨٧ وتوفي في ٤ يناير ١٩٦١م، كان فيزيائيًا نمساويًا معروفًا بإسهاماته في الميكانيكا الكمومية، وخصوصًا معادلة شرودنجر والتي حاز بسببها جائزة نوبل في الفيزياء عام ١٩٣٣م. أشهر أعماله تتعلق بصياغة معادلات تستطيع وصف حالات الإلكترون الكمومية في ذرة هيدروجين، وتسمى الميكانيكا الكمومية. استطاع شرودنجر تفسير طيف الهيدروجين عند تطبيق نتائج معادلته الشهيرة المسماة معادلة شرودنجر على ذرة الهيدروجين، وذلك في عام ١٩٢٦.

شرح الجدول الدوري

من الإنجازات المذهلة لميكانيكا الكم قدرتها على تفسير سلوكيات اللبنات الأساسية للمادة والذرات والجزيئات.

وفقًا لشرودنجر، فإن الإلكترون عبارة عن موجة تحيط بالنواة الضئيلة جدًّا. في الشكل ٨، نرى كيف يمكن فقط للموجات ذات الأطوال الموجية المنفصلة[٤٢] أن تنتقل حول النواة. تكون الموجات التي تحتوي على عدد صحيح[٤٣] من الأطوال الموجية متناسبة بشكل جيد. لكن تلك التي لا تحتوي على رقم صحيح لا تلتف بشكل كامل حول النواة. فهي غير مستقرة ولا يمكنها تكوين ذرات مستقرة. هذا يعني أن الإلكترونات يمكن أن تتحرك فقط في أغلفة تكافؤ[٤٤] مميزة.

---

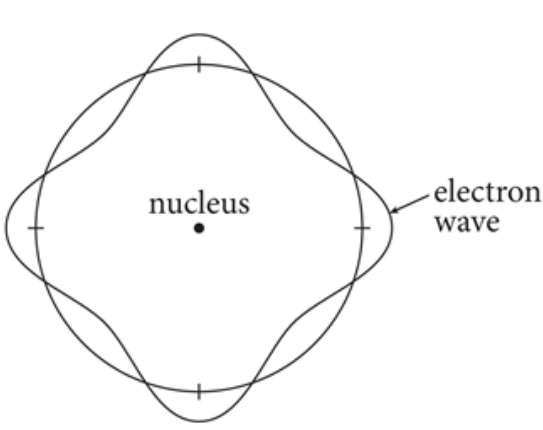
(٤٢) الأطوال الموجية المنفصلة **discrete wavelengths**: يُقال إن الكمية المادية لها طيف منفصل **Discrete spectrum** إذا كانت تأخذ قيمًا مميزة فقط، مع وجود فجوات بين قيمة وأخرى.

(٤٣) عدد صحيح **integral number**: العدد الصحيح هو الذي يُمكن كتابته من دون استخدام الكسور أو الفواصل العشرية، وتتكون مجموعة الأعداد الصحيحة، والتي تعتبر مجموعة جزئية من مجموعة الأعداد الحقيقية، من الأعداد الطبيعية (١، ٢، ٣) والصفر والأعداد السالبة المقابلة للأعداد الطبيعية (-١، -٢، -٣)، وعليه فمجموعة الأعداد الصحيحة تكون مجموعة غير منتهية شأنها في ذلك شأن مجموعة الأعداد الطبيعية، وعادة ما يرمز لها بالحرف اللاتيني **Z**.

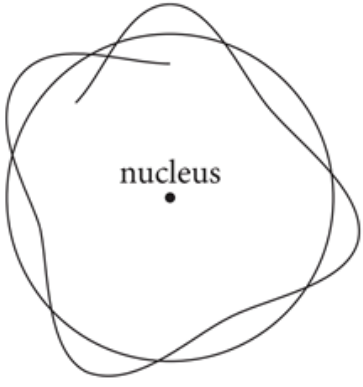
(٤٤) غلاف التكافؤ أو حزمة التكافؤ **Electron shell**: هو الغلاف الأخير في الذرة، والذي يحتوي على الإلكترونات التي تساهم في أي تفاعل تدخل فيه الذرة، والتفاعلات التي تحدث بين الروابط بين الذرات. تسمى الإلكترونات التي توجد في غلاف التكافؤ بإلكترونات التكافؤ.

كلما ابتعدنا عن النواة، فإن هذا النمط الأساسي يكرر نفسه؛ كلما زاد عدد الإلكترونات، تتحرك الحلقة الخارجية للذرة بعيدًا عن المركز. هناك المزيد من الإلكترونات كلما تحركت بعيدًا عن النواة أكثر. وهذا بدوره يفسر سبب احتواء جدول مندليف على مستويات منفصلة منتظمة تكرر نفسها، حيث يحاكي كل مستوى من مستويات جدول مندليف سلوك غلاف الذرات الموجود تحته.

يمكن ملاحظة هذا التأثير عندما تغني في أثناء الاستحمام، فقط بعض الترددات المنفصلة أو الأطوال الموجية هي التي ترتد عن الجدران وتتضخم، ولكن الترددات الأخرى غير الملائمة تختفي أو تُلغى، على غرار الطريقة التي تدور بها موجات الإلكترون حول نواة الذرة: تعمل بعض الترددات المنفصلة فقط.



Allowed orbit



Forbidden orbit

الشكل ٨. فقط الإلكترونات ذات الطول الموجي المعين يمكن أن تتلاءم داخل الذرة؛ أي أن المدار يجب أن يكون عددًا صحيحًا مضاعفًا لطول موجة الإلكترون. هذا يفرض على موجات الإلكترون تكوين أغلفة تكافؤ للإلكترون (مستويات الطاقة للإلكترون) منفصلة حول النواة. يمكن أن يساعد التحليل التفصيلي لكيفية ملء الإلكترونات لهذه الأغلفة في شرح الجدول الدوري لمنديليف.

أدت هذه القفزة المعرفية الكبيرة إلى تغيير جذري في مسار الفيزياء. في أحد الأعوام تملكت الحيرة علماء الفيزياء عند وصف الذرة. في العام التالي بعد استخدام معادلة شرودنجر أمكنهم حساب الخصائص داخل الذرة نفسها. أُدرِّس أحيانًا الميكانيكا الكمومية للطلاب المتخرجين، وأحاول إقناعهم بحقيقة أن كل شيء من حولهم بشكل ما يمكن التعبير عنه كحل لمعادلة شرودنجر. أذكر لهم: ليست فقط الذرات التي يمكن تفسيرها من خلال معادلة شرودنجر، ولكن أيضًا يمكن تفسير ارتباط الذرات لتشكيل الجزيئات وبالتالي المواد الكيميائية التي يتكون منها الكون بأكمله.

بغض النظر عن مدى قوة معادلة شرودنجر، فإنها لا تزال محدودة. لقد نجحت فقط في السرعات الصغيرة، أي أنها كانت غير نسبية. لم تذكر معادلة شرودنجر شيئًا عن سرعة الضوء والنسبية الخاصة وكيف تتفاعل الإلكترونات مع الضوء عبر معادلات ماكسويل. كما أنها تفتقر إلى التناظر الجميل لنظرية أينشتاين وكانت قبيحة نوعًا ما ويصعب التعامل معها رياضيًّا.

نظرية ديراك للإلكترون

ثم قرر عالم الفيزياء البالغ من العمر ٢٢ عامًا، بول ديراك[٤٥]، كتابة معادلة موجية تطيع النسبية الخاصة لأينشتاين من خلال دمج المكان والزمان. من الأشياء التي لم تكن دقيقة بشأن معادلة شرودنجر أنها تعاملت مع المكان والزمان بشكل منفصل، وبالتالي كانت الحسابات

---

(٤٥) بول أدريان موريس ديراك **Paul Adrien Maurice Dirac**: هو عالم فيزياء بريطاني وأحد مؤسسي الميكانيكا الكمومية. ولد في ٨ أغسطس من سنة ١٩٠٢ في بريستول، وتوفي في ٢٠ أكتوبر ١٩٨٤ في تلاهاسي، فلوريدا. طوَّر نظرية فيزيائية مهمة تشمل في صلبها نظريات هايزنبرج وشرودنجر كحالات خاصة. اعتمد على أعمال ولفجانج باولي لوضع اشتقاق معادلة ديراك. بدأت شهرة ديراك بعد استنباطه وصفًا رياضيًّا عام ١٩٢٨ سُمي بالوصف الرياضي الدقيق للجسيمات الأولية التي تداخلت مع كل من الميكانيكا الكمومية والنظرية النسبية الخاصة. كانت معادلات ديراك مدهشة في كونها استخدمت المصفوفات بدلًا من الكميات القياسية، وكانت لخواص معادلة ديراك أهمية عظيمة في الفيزياء النظرية. علاوةً على ذلك، كانت معادلته مدهشةً لأنها قدمت وصفًا دقيقًا جدًّا لدوران الجسيمات الأولية. وأغرب ما جاء فيها احتواؤها على عناصر سالبة لكتلة الجسيمات. ونتيجةً لذلك، استنتج ديراك أن كل جسيم لا بد أن يحتوي على جسيم مضاد، فلمع بنظريته الكمومية عن حركة الإلكترون التي قادته عام ١٩٢٨ لافتراض وجود جسيم مطابق للإلكترون في جميع مظاهره، إلا أنه يحمل شحنةً كهربائيةً موجبةً (معاكسةً بالإشارة لشحنة الإلكترون) يدعى البوزيترون أو البروتون. انتظرت نظرية ديراك حتى عام ١٩٣٢ عندما أثبت الفيزيائي الأمريكي كارل أندرسون وجود البوزيترون. نسبةً إلى ذلك، بات ديراك يُعَد مؤسس الديناميكا الكهربائية الكمية الحديثة. نال سنة ١٩٣٣ مع شرودنجر جائزة نوبل للفيزياء. أما في الرياضيات فقد كانت له أعمال كثيرة منها دالة ديراك أو ما يسمى بـ«دالة دلتا». عمل ديراك أستاذًا في مادة الرياضيات بجامعة كامبريدج في الفترة ما بين عام ١٩٣٢ وعام ١٩٦٩، وأستاذًا في مادة الفيزياء بجامعة ولاية فلوريدا في الفترة ما بين ١٩٧١ حتى ١٩٨٤.

غالبًا مملة وتستغرق وقتًا طويلًا. لكن نظرية ديراك جمعت بين الاثنين وكان لها تناظر رباعي الأبعاد، لذلك كانت أيضًا جميلة ومضغوطة وأنيقة. انهارت جميع المصطلحات القبيحة في معادلة شرودنجر الأصلية إلى معادلة بسيطة رباعية الأبعاد.

(أتذكر عندما كنت في المدرسة الثانوية، كنت أحاول يائسًا تعلم معادلة شرودنجر، وأواجه كل المصطلحات القبيحة التي تحتوي عليها. فكرت كيف يمكن أن تكون الطبيعة خبيثة جدًّا -كما اعتقدت- لتنتج معادلة موجية كانت خرقاء جدًّا؟ اليوم، عثرت على معادلة ديراك، التي كانت جميلة ومضغوطة. أتذكر بكائي عندما رأيتها).

حققت معادلة ديراك نجاحًا باهرًا. لقد رأينا سابقًا أن فاراداي أظهر أن مجالًا كهربائيًّا متغيرًا في ملف من الأسلاك ينتج مجالًا مغناطيسيًّا. ولكن من أين ينتج المجال المغناطيسي في قضيب مغناطيسي من دون أي شحنات متحركة؟ بدا هذا وكأنه لغز. ولكن وفقًا لمعادلات ديراك، كان من المتوقع أن يكون للإلكترون دوران (لف مغزلي)[٤٦] يؤدي إلى تكوين مجال مغناطيسي خاص به. خاصية الإلكترون هذه بنيت منذ البداية في الرياضيات. (ومع ذلك، فإن هذا اللف المغزلي ليس هو

(٤٦) الغزل أو اللف المغزلي **spin**: أو التدويم أو كمية التحرك الزاوي لجسيم، هي خاصية تعبر عن دوران الجسيم الأولي حول نفسه. يعتبر اللف المغزلي خاصية جوهرية في كل الجسيمات الأولية، وتمثل ظاهرة ميكانيكية كمومية أصيلة. يمكن تقريب اللف المغزلي للإلكترون للأذهان عن طريق تشبيهه بدوران الأرض حول نفسها إضافة إلى دورانها حول الشمس، فكذلك يلف الإلكترون حول نفسه ويدور في نفس الوقت في مدار حول النواة. ويقترن اللف المغزلي للإلكترون بعزم مغناطيسي له، هو الأصل في ظاهرة مغناطيسية المواد.

الدوران المألوف الذي نراه من حولنا -كما هي الحال في المدوار أو الجيروسكوب[٤٧]- ولكنه مصطلح رياضي في معادلة ديراك).

المجال المغناطيسي الناتج عن هذا اللف المغزلي يطابق بدقة المجال الذي وجد محيطًا بالإلكترونات. وهذا بدوره ساعد في تفسير أصل المغناطيسية. إذن من أين يأتي المجال المغناطيسي في المغناطيس؟ إنه يأتي من دوران الإلكترونات المحاصرة داخل المعدن. في وقت لاحق اكتشف أن جميع الجسيمات دون الذرية لها دوران. سنعود إلى هذا المفهوم المهم في فصل لاحق.

والأهم من ذلك أن معادلة ديراك تنبأت بشكل جديد غير متوقع من المادة، يسمى المادة المضادة[٤٨]. تخضع المادة المضادة لنفس قوانين

---

(٤٧) الدوارة أو المدوار أو الجَيْروسْكُوب **Gyroscope**: هو جهاز تتجلى خلاله ظاهرة المداورة، من خلال حفظ التوجه وفق مبدأ حفظ الزخم الزاوي. الجهاز أشبه بعجلة الغزل المدوار أو قرص ذي محور حر التوجيه. تغيير التوجيه يتأثر بدرجة أقل للمعطيات الخارجية للعزم عوضًا عن كمية الحركة الزاوية الكبيرة المرتبطة بمعدل الدوران العالي للدوار. بما أن العزم الخارجي قد قلل بواسطة وضع المدوار داخل وحدة ثنائية المحور، فيبقى الاتجاه شبه ثابت مهما تغيرت الأرضية المثبت عليها المدوار. كما أن هذا الجهاز (المدوار) يستخدم بشكل واضح وفعال من حيث حفظ (التوازن، الاتجاه) في الطائرات ومركبات الفضاء والسفن وغيرها من التطبيقات العلمية القائمة على تحقق هذه الظاهرة التي يحدثها عمل هذا الجهاز (المدوار).

(٤٨) المادة المضادة **Antimatter** في فيزياء الجسيمات: هي امتداد لمفهوم الجسيم المضاد للمادة، حيث تتكون المادة المضادة من جسيمات مضادة بنفس الطريقة التي تتكون منها المادة العادية من جسيمات أولية؛ جسيمات دون الذرية. على سبيل المثال، الإلكترون المضاد يسمى «بوزيترون»، والبوزيترون هو إلكترون ذو شحنة موجبة؛ والبروتون المضاد (بروتون ذو شحنة سالبة) يمكن أن يشكلوا معًا ذرة مضاد الهيدروجين بنفس الطريقة التي يشكل بها الإلكترون والبروتون ذرة هيدروجين عادية، فتكون نتيجة هذا الترابط هي «ذرة هيدروجين مضادة». وعلاوة على ذلك، فإن خلط المادة مع المادة المضادة يؤدي إلى فناء كل منهما، يتحولان =

المادة العادية، إلا أن لها شحنة معاكسة. لذلك فإن مضاد الإلكترون المسمى بالبوزيترون له شحنة موجبة وليست سالبة. من حيث المبدأ قد يكون من الممكن تكوين ذرات مضادة، مصنوعة من إلكترونات مضادة، تدور حول البروتونات المضادة والنيوترونات المضادة. ولكن عندما تتصادم المادة والمادة المضادة تنفجر في دفقة من الطاقة. (ستصبح المادة المضادة مكونًا حاسمًا في نظرية كل شيء، لأن كل الجسيمات في النظرية النهائية يجب أن يكون لها نظير من المادة المضادة).

في السابق كان الفيزيائيون يعتبرون التناظر أمرًا ممتعًا من الناحية الجمالية، ولكنه جانب غير أساسي لأي نظرية. الآن، ذهل الفيزيائيون من قوة مفهوم التناظر، حيث أمكن أن يتنبأوا بالفعل بظواهر فيزيائية جديدة تمامًا وغير متوقعة (مثل المادة المضادة واللف المغزلي للإلكترون). بدأ الفيزيائيون في فهم أن التناظر كان سمة أساسية لا مفر منها للكون على المستوى الأساسي.

= في الحال إلى طاقة. وبنفس الطريقة إذا اجتمع جسيم ونقيضه (الجسيم المضاد) فإن بعضهما يفني البعض ويتحولان على الفور إلى طاقة. الطاقة تكون كبيرة كي تتحول كتلتاهما إلى طاقة طبقًا لنظرية أينشتاين، بأن الكتلة والطاقة صورتان لشيء واحد ($E=mc^2$)، أي يمكن تحويل المادة إلى طاقة، كما يمكن تحويل الطاقة إلى مادة. هناك تكهنات كثيرة عن السبب في أن الكون المدرك يتكون بشكل كامل تقريبًا من المادة، وما إذا كان يوجد غيره من الأماكن التي تتكون بالكامل تقريبًا من المادة المضادة، وحتى الآن لم يعثر العلماء على أماكن في الكون كله من جسيمات مضادة. المادة المضادة نجدها في تفاعلات الأشعة الكونية، ومنها عرفنا أن المادة لها مادة مضادة. استطاع العلماء إنتاج جسيمات مضادة في معجلات الجسيمات. ولكن هذا التحضير في المختبرات يستهلك طاقة هائلة، بحيث لا نستطيع كسب مزيد من الطاقة منها. في هذا الوقت يشكل التضاد الكبير بين المادة والمادة المضادة في الكون المرئي إحدى المشكلات الكبرى في الفيزياء. العملية التي يتطور من خلالها التماثل بين الجسيمات والجسيمات المضادة تسمى التخليق الباريوني **baryogenesis**.

ما هو التموج[٤٩]؟

ولكن لا تزال هناك بعض الأسئلة المزعجة. إذا كانت للإلكترون خصائص تشبه الموجة، فما الذي يعكر الوسط الذي توجد فيه الموجة؟ ما الذي يتموج؟ وكيف يمكن للإلكترون أن يمر عبر فتحتين مختلفتين في وقت واحد؟ كيف بإمكان الإلكترون أن يُوجَد في مكانين في نفس الوقت؟

كانت الإجابة مذهلة وصادمة، وقسمت مجتمع الفيزياء إلى فريقين. وفقًا لورقة كتبها ماكس بورن[٥٠] في عام ١٩٢٦، فإن ما كان يلوح هو «احتمال» العثور على إلكترون عند نقطة معينة. بمعنى آخر، لا يمكنك أن تعرف على وجه التحديد مكان وجود الإلكترون. كل ما يمكنك معرفته هو احتمال العثور عليه. دونت هذه الفكرة في مبدأ عدم اليقين الشهير لفيرنر هايزنبرج[٥١]، والذي نص على أنه لا

---

(٤٩) التموج **waving**: المقصود هنا وصف الأجسام ما دون الذرية، وبخاصة الإلكترون، بكونها موجة.

(٥٠) ماكس بورن **Max Born** (١١ ديسمبر ١٨٨٢ – ٥ يناير ١٩٧٠): فيزيائي وعالم رياضيات يهودي ألماني، وله الدور الرئيسي في تطوير الميكانيكا الكمومية. قدم أيضًا إسهامات في فيزياء الجوامد والبصريات وأشرف على عمل عدد من الفيزيائيين البارزين في عشرينيات وثلاثينيات القرن العشرين. حصل بورن سنة ١٩٥٤ على جائزة نوبل في الفيزياء بفضل «بحثه الجوهري في الميكانيكا الكمومية، خصوصًا التفسير الإحصائي للدالة الموجية».

(٥١) فيرنر كارل هايزنبرج **Werner Heisenberg** (٥ ديسمبر ١٩٠١ في فورتسبورج =

يمكنك معرفة سرعة الإلكترون وموقعه أو تموضعه بدقة. بمعنى آخر، الإلكترونات هي جسيمات، لكن احتمال العثور على الجسيم في أي موقع معين يعبر عنه بواسطة دالة موجية.

كانت هذه الفكرة مفاجأة مذهلة. هذا يعني أنك لا تستطيع التنبؤ بدقة بالمستقبل. يمكنك فقط توقع احتمالات حدوث أشياء معينة. لكن نجاحات نظرية الكم لا يمكن إنكارها. كتب أينشتاين أنه «كلما زادت نجاحات نظرية الكم، أصبحت أكثر سخافة». حتى شرودنجر الذي كان أول من قدم مفهوم موجة الإلكترون، رفض هذا التفسير الاحتمالي لمعادلاته. حتى اليوم، هناك حجج بين علماء الفيزياء تناقش الآثار الفلسفية لنظرية الموجة. كيف يمكنك أن تكون مكانين في نفس الوقت؟ ذات مرة قال ريتشارد فاينمان[٥٢] الحائز جائزة نوبل: «أعتقد

= – ١ فبراير ١٩٧٦ في ميونخ): فيزيائي ألماني حائز جائزة نوبل عام ١٩٣٢. اكتشف أحد أهم مبادئ الفيزياء الحديثة وهو مبدأ عدم التأكد. من مؤلفاته الجزء والكل والفلسفة والفيزياء والطبيعة في الفيزياء. ولد فيرنر هايزنبرج في ألمانيا سنة ١٩٠١، وحصل على الدكتوراه في الفيزياء النظرية من جامعة ميونخ سنة ١٩٢٣. ومن سنة ١٩٢٤ حتى سنة ١٩٢٧ عمل مساعدًا للفيزيائي الدنماركي نيلز بور. ظهر أول أبحاثه عن نظرية الكم سنة ١٩٢٥ وظهرت صياغته لمبدأ عدم التأكد سنة ١٩٢٧. توفي هايزنبرج سنة ١٩٧٦ عن عمر يناهز ٧٤ عامًا. وعاشت من بعده زوجته وسبعة من الأبناء.

(٥٢) ريتشارد فيليبس فاينمان **Richard Phillips Feynman** (١١ مايو ١٩١٨ – ١٥ فبراير ١٩٨٨): فيزيائي نظري أمريكي، معروف بإسهاماته في الصياغة التكاملية للمسار الخاص بالميكانيكا الكمومية ونظرية الكهروديناميكا الكمية، وفيزياء الميوعة الفائقة والتبريد الفائق للهيليوم المسال، وكذلك بإسهاماته في فيزياء الجسيمات، حيث اقترح نموذج البارتون. حصل فاينمان، من جراء إسهاماته في تطوير الكهروديناميكا الكمية، على جائزة نوبل للفيزياء عام ١٩٦٥، بالمشاركة مع جوليان شفينجر وشينيتشيرو توموناجا. طوَّر فاينمان مخططات تصويرية للتعبيرات الرياضية التي تصف سلوك الجسيمات دون الذرية، والتي عُرفت فيما =

أنني أستطيع القول بأمانة إنه لا أحد يفهم الميكانيكا الكمومية».

آمن الفيزيائيون بشيء يُسمى الحتمية[٥٣] منذ حقبة نيوتن، وهي فلسفة أن كل الأحداث المستقبلية يمكن التنبؤ بها بدقة. تُحدِّد قوانين الطبيعة حركة كل الأشياء في الكون، مما يجعلها منظمة ويمكن التنبؤ بها. بالنسبة لنيوتن كان الكون بأكمله عبارة عن ساعة تنبض بطريقة دقيقة يمكن التنبؤ بها. إذا كنت تعرف موقع وسرعة جميع الجسيمات في الكون، يمكنك استنتاج كل الأحداث المستقبلية.

لطالما كان التنبؤ بالمستقبل هاجسًا للبشر. كتب شكسبير في ماكبث:

«إذا أمكنك النظر إلى بذور الزمن

= بعد باسم «مخططات فاينمان». أصبح فاينمان في أثناء حياته واحدًا من أشهر العلماء في العالم. ففي استطلاع أجرته المجلة البريطانية «عالم الفيزياء» عام ١٩٩٩ عن ١٣٠ من الفيزيائيين الرواد، صُنف فاينمان كواحد من أعظم ١٠ فيزيائيين في التاريخ. ساهم فاينمان في صنع القنبلة الذرية في أثناء الحرب العالمية الثانية واشتُهر في الثمانينيات بعضويته في لجنة روجر، وهو الفريق الذي حقق في كارثة المكوك الفضائي تشالنجر. إلى جانب إسهاماته في الفيزياء النظرية، يُنسب إليه الفضل كرائد للحوسبة الكمية وتقديم مفهوم تكنولوجيا النانو. كذلك فقد شغل كرسي أستاذية ريتشارد تولمان للفيزياء النظرية في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا.

(٥٣) الحتمية **determinism**: هي فرضية فلسفية تقول إن كل حدث في الكون، بما في ذلك إدراك الإنسان وتصرفاته، خاضع لتسلسل منطقي سببي محدد سلفًا ضمن سلسلة غير منقطعة من الحوادث التي يؤدي بعضها إلى بعض وفق قوانين محددة، في الحتمية، لا يمكن حدوث أشياء خارج منطق قوانين الطبيعة، وبالتالي لا مجال لحوادث عشوائية غير محددة سلفًا، ويعترف الحتميون بأنه ربما يصعب على الإنسان أحيانًا معرفة النتيجة سابقًا نتيجة عدم قدرته على تحديد الشروط البَدْئية للتجربة، أو عدم امتلاكه للصياغة الدقيقة للقانون الطبيعي، لكن هذا القانون موجود والنتيجة محددة سلفًا.

وأدركت أي حبة ستنمو وأي حبة ستموت،

إذن، تحدث إليَّ».

وفقًا لفيزياء نيوتن، من الممكن توقع أي الحبوب ستنمو وأيها سيموت. لعدة قرون، ساد هذا الرأي بين علماء الفيزياء. لذلك كان عدم اليقين بدعة، وهز الفيزياء الحديثة حتى النخاع.

صراع الجبابرة

احتدم النقاش بين فريقين، على الجانب الأول من هذا النقاش كان أينشتاين وشرودنجر، اللذان ساعدا في بدء ثورة الكم، في المقام الأول. على الجانب الآخر، كان نيلز بور وفيرنر هايزنبرج، مبتكرا نظرية الكم الجديدة.

بلغت ذروة هذا النقاش في مؤتمر سولفاي[٥٤] السادس التاريخي عام ١٩٣٠ في بروكسل. سيصبح نقاشًا لكل العصور، حيث يتنافس عمالقة الفيزياء وجهًا لوجه في المعركة من أجل تعريف معنى الواقع نفسه.

كتب بول إهرنفست[٥٥]: «لن أنسى أبدًا مشهد الخصمين يغادران

(٥٤) مؤتمرات سولفاي **Solvay Conference** (المعروفة أيضًا بمجالس سولفاي أو محاضرات سولفاي أو لجان سولفاي): هي مؤتمرات علمية في الفيزياء والكيمياء تُعقد منذ عام ١٩١١. في أوائل القرن العشرين، كانت هذه المجالس تجمع بين أبرز العلماء في ذلك الوقت، الشيء الذي سمح بتقدم مهم في الميكانيكا الكمومية. تم تنظيم هذه المؤتمرات تحت رعاية إرنست سولفاي، كيميائي وصناعي بلجيكي.

(٥٥) بول إهرنفست **Paul Ehrenfest** (ولد في ١٨ يناير ١٨٨٠ في فيينا – توفي في ٢٥ سبتمبر ١٩٣٣ في أمستردام): هو فيزيائي نظري نمساوي. قدَّم مساهمات كبيرة في مجال الميكانيكا الإحصائية وعلاقاتها بالميكانيكا الكمومية، بما في ذلك نظرية المرحلة الانتقالية ونظرية إهرنفست. أصبح صديقًا لألبرت أينشتاين في زيارة إلى براغ عام ١٩١٢ وأصبح أستاذًا في ليدن، حيث استضاف أينشتاين كثيرًا.

نادي الجامعة. أينشتاين، شخصية مهيبة، يمشي بهدوء بابتسامة ساخرة باهتة، وبور يهرول بجانبه، مستاء للغاية». كان من الممكن سماع بور وهو يتمتم باكتئاب لنفسه في الممرات وهو يقول كلمة واحدة فقط: «أينشتاين... أينشتاين... أينشتاين».

تولى أينشتاين المسؤولية ورفع مستوى الاعتراضات واحدًا تلو الآخر ضد نظرية الكم، محاولًا الكشف عن مدى سخفها. لكن بور نجح في مواجهة كل انتقادات أينشتاين واحدًا تلو الآخر. عندما ظل أينشتاين يكرر «إن الله لا يلعب النرد مع الكون»، ورد عليه بور «توقف عن إخبار الله بما يجب فعله».

قال جون ويلر[٥٦]، الفيزيائي من جامعة برينستون: «لقد كان أعظم نقاش عرفته في التاريخ الفكري. خلال ثلاثين عامًا لم أسمع قَط عن نقاش بين رجلين كبيرين حول قضية ممتدة على مر التاريخ بهذا العمق لها عواقب أعمق من أجل فهم عالمنا الغريب هذا».

---

(٥٦) جون أرتشيبالد ويلر **John Archibald Wheeler** (٩ يوليو ١٩١١ – ١٣ أبريل ٢٠٠٨): عالم أمريكي فيزيائي من الأواخر الذين انضموا لأينشتاين في أعماله، وهو مبتكر مصطلح الثقب الأسود. كان ويلر من الذين اشتركوا في مشروع مانهاتن لإنتاج القنبلة الذرية الأولى وقد كان يتمنى أن يبدأ المشروع باكرًا عن ذلك، وعمل أستاذًا في جامعة برينستون، وقد نال الدكتوراه وعمره ٢١ عامًا، وألَّف عددًا كبيرًا من الكتب عن الفيزياء النظرية وخصوصًا عن الانشطار النووي. وقد ابتكر معادلة هاريسون–ويلر التي تصف المادة النووية عالية الكثافة. أمضى ويلر أغلبية حياته الأكاديمية في جامعة برينستون، حيث التحق بها في عام ١٩٣٨ وتقاعد منها عام ١٩٧٦. أشرف ويلر على مناقشة ٤٦ شهادة دكتوراه سابقًا بذلك أي أستاذ آخر في قسم الفيزياء.

يتفق المؤرخون في الغالب على أن بور ومتمردي الكوانتم فازوا في النقاش.

ومع ذلك، نجح أينشتاين في كشف الشقوق في أسس الميكانيكا الكمومية. أظهر أينشتاين أنه كان عملاقًا شاهقًا يقف على أقدام فلسفية من الطين. تُسمَع هذه الانتقادات حتى اليوم، وكلها تركز على قطة معينة.

قطة شرودنجر

ابتكر شرودنجر تجربة فكرية بسيطة كشفت جوهر المشكلة. سنضع قطة في صندوق مغلق. مع القطة سنضع قطعة من اليورانيوم في نفس الصندوق. عندما يتحلل من اليورانيوم جسيم دون ذري فإنه يعطي إشارة إلى عداد جايجر الذي يطلق بدوره رصاصة على القطة. السؤال: هل القطة ميتة أم حية؟

نظرًا لأن تحلل ذرة اليورانيوم وإطلاق جسيمات دون ذرية منه هو حدث كمي بحت، فهذا يعني أنه يجب وصف القطة من حيث الميكانيكا الكمومية. من وجهة نظر هايزنبرج، قبل أن تفتح الصندوق، القطة موجودة كمزيج من حالات كمية مختلفة، أي أن القطة مجموع موجتين. موجة واحدة تصف قطة ميتة وتصف الموجة الأخرى قطة حية. القطة ليست ميتة ولا حية ولكنها مزيج من الاثنين. الطريقة الوحيدة لمعرفة ما إذا كانت القطة على قيد الحياة أو ميتة هي فتح الصندوق وإجراء ملاحظة؛ حينها ستنهار الدالة الموجية[٥٧] إلى قطة

(٥٧) تحتل الدالة الموجية **Wave function** أو دالة الموجة مكانة مهمة في الميكانيكا الكمومية، حيث ينص مبدأ عدم التأكد على عدم قدرتنا على تحديد موضع وسرعة جسيم ما بدقة، لكن نعمد إلى دالة موجية مرافقة لكل جسيم حسب التصور الموجي الذي قدمه شرودنجر، وتقوم هذه الدالة الموجية بتحديد احتمال وجود الجسيم في أي نقطة من الفراغ يمكن للجسيم الوجود فيها. دالة الموجة هي أداة لوصف الجسيمات وحركتها وتفاعلها مع جسيمات أخرى مثل الذرة أو نواة الذرة.

ميتة أو حية. بمعنى آخر، الملاحظة أو المراقبة (التي تتطلب الوعي) تحتم الوجود[٥٨].

بالنسبة لأينشتاين كل هذا كان غير معقول. إنها تشبه فلسفة المطران بيركلي[٥٩] الذي تساءل: إذا سقطت شجرة في الغابة ولم يكن هناك من يسمعها، فهل تصدر صوتًا؟ سيقول المتكلمون لا. لكن نظرية الكم قالت ما هو أسوأ من ذلك. قالت إنه إذا كانت هناك شجرة في الغابة لا يوجد أحد حولها، فإن الشجرة توجد كمجموع للعديد من الحالات المختلفة، على سبيل المثال: شجرة محترقة، وشتلة، وحطب، وخشب

---

(٥٨) الوجود **Existence**: هو القدرة على التفاعل مع الواقع (أو الكون) بشكل مباشر أو غير مباشر. يُعتبر التعريف المحدد للوجود إحدى أهم المسائل وأكثرها جوهرية في الأنطولوجيا؛ الدراسة الفلسفية للوجود والكينونة والواقع في العموم، بالإضافة إلى دراسة مقولات الوجود وعلاقاتها. تندرج تلك الدراسة تحت أحد الفروع الرئيسة للفلسفة ألا وهو الميتافيزيقا، تتعامل الأنطولوجيا مع الأسئلة المتعلقة بالوجود؛ ما هي الموجودات؟ وكيف تُصنَّف تلك الموجودات وترتبط فيما بينها بعلاقات في تراتبية وتنقسم تبعًا للتشابهات والاختلافات. تفترض الفلسفة المادية أن ما يوجد هو المادة والطاقة فقط، وأن الموجودات تتكون من مادة وطاقة فقط، وأن كل الأفعال تتطلب طاقة، وأن كل الظواهر (بما في ذلك الوعي) هي نتيجة لتفاعلات مادية تفترض الفلسفة العقلانية/ المثالية أن ما يوجد هو الأفكار فقط، وأن كل الأشياء تتكون من الفكر، وأن كل الأشياء تتطلب مجموعة من الأفكار المترابطة وكل الظواهر (بما في ذلك الوعي) تنتج من فهم تأثير العالم الاسمي الذي يقبع بمعزل عن الشيء في ذاته.

(٥٩) جورج باركلي **George Berkeley** (١٢ مارس ١٦٨٥ – ١٤ يناير ١٧٥٣): الشهير بلقب «الأسقف باركلي» (أسقف كلوين)، فيلسوف أيرلندي كان إنجازه الرئيسي تطوير نظرية أطلق عليها اسم «اللا مادية» (أشار إليها آخرون فيما بعد باسم «المثالية الذاتية»). تنكر هذه النظرية وجود الجوهر المادي، إذ تؤكد بدلًا من ذلك أن الموجودات المألوفة –مثل الطاولات والكراسي– ما هي إلا أفكار في عقول من يدركونها حسيًّا، وبالتالي فليس بإمكانها أن توجد من دون أن تُدرَك. يُعرف باركلي كذلك بنقده للتجريد، وكان يتخذ ذلك مقدمةً منطقيةً مهمةً في مناقشته لصالح اللا مادية.

رقائقي، وما إلى ذلك، ولكن فقط عندما تنظر إلى الشجرة تنهار موجتها بشكل سحري إلى شجرة عادية.

عندما كان أينشتاين يستقبل زواره في البيت، كان يسألهم: «هل القمر موجود لأن الفأر يراه؟».

ولكن بغض النظر عن مدى انتهاك نظرية الكم للبديهة، فقد كانت تملك ميزة واحدة؛ أنها صحيحة من الناحية التجريبية. لقد اختبرت تنبؤات نظرية الكم حتى أحد عشر كسرًا عشريًّا، مما يجعلها أكثر النظريات دقة على الإطلاق.

ومع ذلك، سيعترف أينشتاين بأن نظرية الكم تحتوي على الأقل على جزء من الحقيقة، حيث إنه في عام ١٩٢٩ سيوصي بجائزة نوبل في الفيزياء لشرودنجر وهايزنبرج.

حتى اليوم لا يوجد إجماع عالمي بين علماء الفيزياء على ما يتعلق بمشكلة القطة. (التفسير القديم لكوبنهاجن[٦٠] الذي يتزعمه نيلز بور، أن القطة الحقيقية تظهر فقط لأن الملاحظة تتسبب في انهيار موجة القطة، لقد أصبح هذا التفسير غير مرغوب فيه جزئيًّا لأنه مع تقنية النانو يمكننا الآن معالجة الذرات الفردية وإجراء هذه التجارب. ما

(٦٠) تفسير كوبنهاجن **Copenhagen interpretation**: هو أحد أهم التفسيرات شيوعًا في علم الميكانيكا الكمومية، ويفترض التفسير أن ميكانيكا الكم لا تسفر عن وصف الظواهر الطبيعية بشكل موضوعي ولكن تتعامل فقط مع احتمالات الرصد والقياس، ولعل أغرب فروض هذا التفسير أن عملية القياس تؤثر على سلوك النظام الكمي، بمعنى أن عملية القياس تسبب ما يعرف بـ«انهيار الدالة الموجية»، وقد وضعت المفاهيم الأساسية لهذا التفسير من قبل نيلز بور وفيرنر هايزنبرج وماكس بورن وغيرهم في السنوات ١٩٢٤-١٩٢٨م.

أصبح أكثر شيوعًا بعد ذلك هو تفسير الكون المتعدد[٦١]، أو العوالم المتعددة، حيث ينقسم الكون إلى نصفين، يحتوي نصفه على قطة ميتة والآخر يحتوي على قطة حية).

مع نجاح نظرية الكم، وجه الفيزيائيون في ثلاثينيات القرن الماضي أنظارهم إلى جائزة جديدة، مجيبين عن السؤال القديم: لماذا تشرق الشمس؟

(٦١) الأكوان المتعددة **Multiverse**: هي عبارة عن مجموعة افتراضية متكونة من عدة أكوان -بما فيها الكون الخاص بنا- وتشكل معًا الوجود بأكمله، وفكرة الوجود متعدد الأكوان هي نتيجة لبعض النظريات العلمية التي تستنتج في الختام وجوب وجود أكثر من كون واحد، وهو غالبًا يكون نتيجة لمحاولات تفسير الرياضيات الأساسية في نظرية الكم بعلم الكونيات. والأكوان العديدة داخل متعدد الأكوان تسمى أحيانًا بالأكوان المتوازية **Parallel Universes**. والبنية لمتعدد الأكوان، وطبيعة كل كون وما بداخله، والعلاقة بين هذه الأكوان، كل هذا يعتمد على النظرية المتبعة من بين عدة نظريات. ونظرية تعدد الأكوان هي فرضية في علم الكونيات والفيزياء والفلك والفلسفة والمسائل الرياضية والخيال العلمي واللاهوت. وقد تأخذ الأكوان المتوازية في هذا السياق أسماء أخرى كالأكوان البديلة أو الأكوان الكمية أو العوالم المتوازية.

الطاقة القادمة من الشمس

رفعت الأديان الكبرى في العالم من شأن الشمس منذ أقدم العصور، ووضعتها في صميم أساطيرها. كانت الشمس من أقوى الآلهة الذين حكموا السماوات. بالنسبة إلى الإغريق، كان هوليوس، الذي يركب ببراعة عربته المشتعلة عبر السماء كل يوم، ينير العالم ويمنحه الحياة. كانت لدى الأزتك والمصريين والهندوس نسختهم من إله الشمس.

لكن خلال عصر النهضة، حاول بعض العلماء فحص الشمس من خلال عدسة الفيزياء. لو صنعت الشمس من خشب أو زيت لكانت قد استنفدت وقودها منذ زمن بعيد. وإذا لم يكن هناك هواء في المساحات الشاسعة للفضاء الخارجي، لأُطفِئت ألسنة اللهب منذ زمن بعيد. لذلك كانت الطاقة الأبدية للشمس لغزًا.

في عام ١٨٤٢ صدر تحدٍّ كبير لعلماء العالم. أعلن الفيلسوف الفرنسي أوجست كونت[٦٢]، مؤسس فلسفة الوضعية[٦٣]، أن العلم

---

(٦٢) أوجست كونت **Auguste Comte** (١٩ يناير ١٧٩٨ – ٥ سبتمبر ١٨٥٧): عالم اجتماع وفيلسوف اجتماعي فرنسي، أعطى لعلم الاجتماع الاسم الذي يُعرف به الآن، أكد ضرورة بناء النظريات العلمية المبنية على الملاحظة، إلا أن كتاباته كانت على جانب عظيم من التأمل الفلسفي، ويعد هو نفسه الأب الشرعي والمؤسس للفلسفة الوضعية، وهو يعتبر تلميذًا لسان سايمون وهو فيلسوف فرنسي.

(٦٣) الفلسفة الوضعية **Positivism**: هي إحدى فلسفات العلوم التي تستند إلى رأي يقول إن في مجال العلوم الاجتماعية، كما في العلوم الطبيعية، المعرفة الحقيقية هي المعرفة =

قوي حقًّا، ويكشف عن العديد من أسرار الكون، ولكن سيكون هناك شيء واحد بعيدًا عن متناول العلم إلى الأبد. حتى أعظم العلماء لن يجيبوا عن هذا السؤال: مم تتكون الكواكب والشمس؟

كان هذا التحدي منطقيًّا، لأن أساس العلم هو قابليته للاختبار. يجب إعادة إنتاج جميع الاكتشافات العلمية واختبارها في المختبر، ولكن من الواضح أن من المستحيل التقاط مادة الشمس في زجاجة وإعادتها إلى الأرض. ومن ثَم، فإن هذه الإجابة ستكون إلى الأبد بعيدة عن متناول أيدينا.

ومن المفارقات، أنه بعد سنوات قليلة من ادعاء كونت هذا في كتابه الفلسفة الوضعية، واجه الفيزيائيون التحدي. الشمس في الأساس هيدروجين.

= والبيانات المستمدة من التجربة الحسية، والمعالجات المنطقية والرياضية لمثل هذه البيانات والتي تعتمد على الظواهر الطبيعية الحسية وخصائصها والعلاقات بينهم والتي يمكن التحقق منها من خلال الأبحاث والأدلة التجريبية. كما تعد قسمًا من أقسام «نظرية المعرفة» (إبستمولوجيا). وهي نشأت كنقيض لعلوم اللاهوت والميتافيزيقيا التي تعتمد المعرفة الاعتقادية غير المبرهنة. وضع الفيلسوف والعالم الاجتماعي الفرنسي الشهير أوجست كونت هذا المصطلح في القرن التاسع عشر وهو يعتقد بأن العالم سيصل إلى مرحلة من الفكر والثقافة التي سوف تنفي كل القضايا الدينية والفلسفية، وتُبقي القضايا العلمية التي أُثبتت بالحس والخبرة الحسية أو بالقطعية والوضعية (positive). وفي ذلك العصر سوف يُمحى الدين من ساحة المجتمعات البشرية. تهتم هذه المدرسة بإجراء الأبحاث الكمية، وتعتمد عادة في دراساتها للظواهر الاجتماعية على تصميم استبيانات بحثية بهدف إجراء البحث على عينة كبيرة من الناس واستخراج النتائج بصورة سريعة يمكن تعميمها على قطاعات أوسع من المجتمع. لاحقًا تعرضت هذه المدرسة الكلاسيكية لنقد كبير أدى إلى ظهور مدارس اجتماعية أخرى، مثل فلسفة ما بعد الوضعية، والفلسفة التأويلية، والظاهراتية، والحركة النقدية.

ارتكب كونت خطأ طفيفًا ولكنه حاسم. نعم، يجب أن يكون العلم قابلًا للاختبار دائمًا، ولكن كما أثبتنا، تتعامل معظم العلوم في الواقع بشكل غير مباشر.

استطاع العالم جوزيف فون فراونهوفر[٦٤] في القرن التاسع عشر أن يجيب عن كونت بتصميم أدق مخطط مطياف بصري[٦٥] في عصره. (في المطياف البصري تُسخَّن المواد حتى تبدأ في التوهج بإشعاع الجسم الأسود. ثم يرسل الضوء من خلال منشور يخلق قوس قزح. داخل نطاق الألوان توجد نطاقات داكنة. تنشأ هذه النطاقات بسبب الإلكترونات التي تصنع قفزات كمومية من مدار إلى مدار لتطلق وتمتص كميات معينة من الطاقة. نظرًا لأن كل عنصر يُنشئ نطاقاته المميزة الخاصة به، فإن كل نطاق طيفي يشبه بصمة الإصبع، مما يسمح لك بتحديد ما تتكون منه هذه المادة. وقد حل الطيف أيضًا العديد

---

(٦٤) جوزيف فون فراونهوفر **Joseph von Fraunhofer**: هو فيزيائي وعالم بصريات ألماني. مولود بتاريخ ٦ مارس ١٧٨٧ في ستراوبنج ومتوفى بتاريخ ٧ يونيو ١٨٢٦ في ميونيخ، منذ ١٨٢٣ عمل أستاذًا في ميونيخ، وقد عمل أساسًا في مجال الضوء، وحدد طول الموجة الضوئية بواسطة المحزوزات المفرقة، وقام ببعض التحاليل الطيفية، وبالنسبة للفلك فإن تحسينات فراونهوفر للمنظار ذات أهمية وكذلك دراساته عن خطوط الامتصاص في طيف الشمس عُرفت باسم «خطوط فراونهوفر».

(٦٥) مطياف بصري **Optical spectrometer**: المطياف البصري هو مطياف يُستخدم من أجل قياس خواص الضوء في مجال محدد من الطيف الكهرومغناطيسي من أجل دراسة وتحديد المواد. يمكن من خلال الجهاز تحديد طيف الانبعاث والامتصاص ومعرفة طول الموجة والشدة الضوئية للخطوط الطيفية. كان العالم جوزيف فون فراونهوفر أول من طوَّر جهاز المطياف البصري، ثم استفاد كل من جوستاف روبرت كيرشهوف وروبرت بنسن من المطياف البصري، والذي ساهم في اكتشاف عنصرَي السيزيوم والروبيديوم، بالإضافة إلى التمكن من إضافة شرح كيميائي لظاهرة الخطوط الطيفية الفلكية بما في ذلك خطوط فراونهوفر.

من الجرائم، من خلال القدرة على تحديد المكان الذي جاء منه طين البصمة المجهرية للمجرم أو طبيعة السموم الموجودة في السم أو أصل الألياف والشعر. تتيح لك أجهزة الطيف إعادة إنشاء مسرح الجريمة من خلال تحديد التركيب الكيميائي لـ«كل شيء موجود»).

من خلال تحليل حزم الضوء القادمة من الشمس، استطاع فراونهوفر وآخرون معرفة أن الشمس مكونة أساسًا من الهيدروجين. (الغريب أن الفيزيائيين وجدوا أيضًا مادة جديدة غير معروفة في الشمس، أطلقوا عليها اسم الهيليوم، أي «معدن الشمس». لذلك عُثر على الهيليوم لأول مرة في الشمس، وليس على الأرض. لاحقًا أدرك العلماء أن الهيليوم كان غازًا وليس معدنًا).

لكن فراونهوفر قام باكتشاف مهم آخر. من خلال تحليل ضوء النجوم، وجد أنها مصنوعة من نفس المواد الموجودة عادة على الأرض. كان هذا اكتشافًا عميقًا، لأنه أشار إلى أن قوانين الفيزياء هي نفسها، ليس فقط في النظام الشمسي، ولكن في جميع أنحاء الكون بأسره.

بمجرد أن اكتسبت نظريات أينشتاين الاعتراف العلمي، قام الفيزيائيون مثل هانز بيته[٦٦] بتجميعها معًا لتحديد ما يغذي الشمس

(٦٦) هانز ألبرخت بيته **Hans Albrecht Bethe**: هو عالم فيزيائي ألماني أمريكي حصل على جائزة نوبل للفيزياء عام ١٩٦٧ عن «نظرية توليد الجسيمات النووية في النجوم». ولد هانز بيته في ٢ يوليو ١٩٠٦ في ستراسبورغ في ألمانيا، وتوفي في ٦ مارس ٢٠٠٥. وهو من رواد الفيزياء النظرية وله بحوث في مجالات عديدة منها إلكتروديناميكا الكم **quantum electrodynamics** والفيزياء النووية وفيزياء الحالة الصلبة والجسيمات في علم الفلك. كان رئيسًا لقسم النظريين في معمل لوس ألاموس في أثناء الحرب العالمية الثانية، هذا=

بالوقود. إذا كانت الشمس مكونة من الهيدروجين، يمكن لمجال الجاذبية الهائل أن يضغط الهيدروجين حتى تندمج البروتونات مما ينتج الهيليوم والعناصر الأثقل. نظرًا لأن وزن الهيليوم أقل قليلًا من البروتونات والنيوترونات التي تتحد معًا لتشكله، فإن هذا يعني أن الكتلة المفقودة انتقلت إلى طاقة، عبر صيغة أينشتاين $E = mc^2$.

= المعمل هو الذي صُنعت فيه أول قنبلة ذرية. وقام آنذاك بحساب الكتلة الحرجة وهي أصغر كتلة من اليورانيوم لازمة لصناعة القنبلة الذرية. وله حسابات عن طريقة تفجيرها بواسطة التحام نصفي القنبلة .**emplusio** وقد أدت تلك الحسابات إلى صناعة قنبلتي هيروشيما ونجازاكي التي ألقيت على اليابان ١٩٤٥. وقدم معظم محاضراته بجامعة كورنيل. كما اشترك هانز بيته في الخمسينيات في تصميم القنبلة الأكبر، القنبلة الهيدروجينية. ويُقال إنه كان يأمل في ألا تنجح المجهودات للتوصل إليها، وكان إدوارد تلر أكبر المؤيدين لصناعتها، واشترك بعد ذلك مع ألبرت أينشتاين في مقاومة التجارب النووية وقاوما كذلك سباق التسليح النووي.

الميكانيكا الكمومية والحرب

بينما الفيزيائيون يناقشون المفارقات المحيرة للعقل في نظرية الكم، كانت غيوم الحرب تتجمع في الأفق. استولى أدولف هتلر على السلطة في ألمانيا عام ١٩٣٣، وأُجبرت موجات من علماء الفيزياء على الفرار من ألمانيا وإلا سيكون مصيرهم إلقاء القبض عليهم أو ما هو أسوأ.

ذات يوم، شاهد شرودنجر قمصانًا نازية بُنية تضايق المارة وأصحاب المتاجر اليهود الأبرياء. حاول منعهم لكنهم انقلبوا عليه وبدأوا في ضربه. توقفوا أخيرًا عندما أدرك أحد أصحاب القمصان البُنية أن الشخص الذي يضربونه قد فاز بجائزة نوبل في الفيزياء. وللصدمة سيغادر شرودنجر النمسا بعد ذلك قريبًا؛ انزعاجًا من التقارير اليومية عن القمع. غادر أفضل وأذكى عالم ألماني بلادهم.

أما ماكس بلانك، مؤسس نظرية الكم، فقد حاول أن يكون دبلوماسيًّا أكثر من أي وقت مضى، بل إنه ناشد هتلر شخصيًّا لوقف الهجرة الجماعية للعلماء الألمان، فقد كانت البلاد تنزف أفضل عقولها. لكن هتلر ببساطة صاح وصرخ في بلانك مستنكرًا اليهود. بعد ذلك، كتب بلانك: «من المستحيل التحدث مع رجل مثل هذا».

(للأسف، حاول ابن بلانك[٦٧] اغتيال هتلر، فعُذب بوحشية ثم أُعدم).

لعقود من الزمان سُئل أينشتاين عما إذا كانت معادلته يمكن أن تطلق كميات هائلة من الطاقة المحبوسة داخل الذرة. كان أينشتاين يقول دائمًا لا، إن الطاقة التي تطلقها ذرة واحدة أصغر من أن تكون ذات فائدة عملية.

ومع ذلك، أراد هتلر استخدام التفوق الألماني في العلوم لصنع أسلحة قوية لم تسبق للعالم رؤيتها من قبل، أسلحة رعب، مثل صواريخ V-1 و V-2[٦٨] والقنبلة الذرية. بعد كل شيء، إذا كانت الشمس تعمل

---

(٦٧) إرفين بلانك أروين بلانك Erwin Planck (١٨٩٣ – ١٩٤٥): هو سياسي ومقاوم عسكري وقانوني ألماني، ولد في تشارلوتنبرغ، وتوفي عن عمر يناهز ٥٢ عامًا بعد الحكم عليه بالإعدام. في عام ١٩٤٠، صاغ بلانك وبوبيتز وأولريش فون هاسل والجنرال لودفيج بيك «دستورًا مؤقتًا»، على افتراض أن الهجوم القادم على الجبهة الغربية سيُسقط نظام هتلر. حتى بعد ذلك، بقي بلانك في دوائر المقاومة المحافظة حول كارل فريدريش جورديلر، وشارك في الاستعدادات لمؤامرة ٢٠ يوليو. أدى ذلك إلى اعتقاله في ٢٣ يوليو ١٩٤٤، وبعد ذلك نُقل إلى مقر الجستابو في مكتب الأمن الرئيسي للرايخ. حُكم على إرفين بلانك بالإعدام في محاكمة صورية في «محكمة الشعب» في ٢٣ أكتوبر. أُعدم بلانك شنقًا في ٢٣ يناير ١٩٤٥ في سجن بلوتزينسي في برلين.

(٦٨) أسلحة -V المعروفة بالألمانية الأصلية باسم «الأسلحة الانتقامية» كانت مجموعة معينة من أسلحة المدفعية بعيدة المدى، مصممة للقصف الاستراتيجي في أثناء الحرب العالمية الثانية، وخاصة القصف الاستراتيجي والقصف الجوي للمدن. وهي تتألف من V-1، وهو صاروخ كروز يعمل بالطاقة النبضية؛ V-2 صاروخ باليستي يعمل بالوقود السائل، صُممت كل هذه الأسلحة للاستخدام في حملة عسكرية ضد بريطانيا، على الرغم من استخدامها فقط في حملة أجريت في الفترة ١٩٤٤–١٩٤٥. بعد غزو الحلفاء لأوروبا، استُخدمت هذه الأسلحة أيضًا ضد أهداف في البر الرئيسي لأوروبا، وخاصة فرنسا وبلجيكا. أسفر القصف الاستراتيجي باستخدام أسلحة V عن مقتل قرابة ١٨٠٠٠ شخص، معظمهم من المدنيين. وكانت مدن لندن وأنتويرب وليج الأهداف الرئيسية. لقد كانت جزءًا من مجموعة ما يسمى «الأسلحة الفائقة، أو أسلحة «العجائب»» لألمانيا النازية.

بالطاقة النووية، فقد يكون من الممكن إنشاء سلاح خارق باستخدام نفس مصدر الطاقة.

جاءت الفكرة الرئيسية حول كيفية استغلال معادلة أينشتاين من الفيزيائي ليو تسيلارد. أظهر الفيزيائيون الألمان أن ذرة اليورانيوم عندما تصطدم بالنيوترونات، يمكن أن تنقسم إلى نصفين، وتطلق المزيد من النيوترونات. كانت الطاقة المنبعثة من انقسام ذرة يورانيوم صغيرة للغاية، لكن تسيلارد أدرك أنه يمكنك تضخيم قوة ذرة اليورانيوم عبر تفاعل متسلسل: يؤدي تقسيم ذرة يورانيوم واحدة إلى إطلاق نيوترونين. يمكن لهذين النيوترونين بعد ذلك أن يشطرا ذرتين أخريين من اليورانيوم، وإطلاق أربعة نيوترونات. ثم سيكون لديك ثمانية، ثم ستة عشر، ثم اثنان وثلاثون، ثم أربعة وستون نيوترونًا (وهكذا)؛ أي تضاعف أُسي في عدد ذرات اليورانيوم المنقسمة، مما ينتج عنه في النهاية طاقة كافية لتسوية مدينة.

فجأة، تحولت المناقشات الغامضة التي قسمت الفيزيائيين في مؤتمر سولفاي إلى مسألة حياة أو موت مصيرية، وأصبح مصير شعوب وأمم بأكملها بل الحضارة نفسها على المحك.

شعر أينشتاين بالرعب عندما علم أن النازيين في بوهيميا (مقاطعة تشيكية) قد أغلقوا مناجم خام البتشبلند التي تحتوي على اليورانيوم. على الرغم من كونه من دعاة السلام، فإن أينشتاين شعر أنه مضطر لكتابة رسالة مصيرية إلى الرئيس فرانكلين روزفلت، يحث فيها الولايات المتحدة على صنع القنبلة الذرية. أذن روزفلت لاحقًا بأكبر

مشروع علمي في التاريخ؛ مشروع مانهاتن[٦٩].

(٦٩) مشروع مانهاتن **Manhattan Project**: هو مشروع بحث وتطوير جرى العمل عليه في أثناء الحرب العالمية الثانية، لإنتاج الأسلحة النووية لأول مرة. قادت الولايات المتحدة المشروع مدعومةً بالمملكة المتحدة وكندا. أشرف الجنرال ليزلي جروفز من فيلق القوات البرية الأمريكي الهندسي على المشروع من عام ١٩٤٢ حتى عام ١٩٤٦. صمم القنبلة الفعلية الفيزيائي المتخصص في الطاقة النووية روبرت أوبنهايمر مدير مختبر لوس ألاموس. اختيرت مقاطعة مانهاتن لتكون المُكوِّن العسكري للمشروع، ثم ذاع صيت المشروع بأكمله فيما بعد باسم مانهاتن بدلًا من تطوير المواد البديلة الذي كان الاسم الحركي الرسمي للمشروع. خلال سيره، ضم المشروع النووي الأمريكي نظيره البريطاني السابق له، سبائك الأنابيب. في عام ١٩٣٩، بدأ المشروع بداية متواضعة، ولكنه نما ليوظف أكثر من مائة وثلاثين ألف شخص وليتكلف نحو مليارَي دولار (ما يعادل ٢٣ مليار دولار تقريبًا في عام ٢٠١٨). ذهب أكثر من تسعين في المائة من التكلفة لبناء المصانع وإنتاج المواد الانشطارية، بينما خُصصت العشرة في المائة الأخرى لتطوير الأسلحة وإنتاجها. أُجري البحث والإنتاج في أكثر من ثلاثين موقعًا في كل أرجاء الولايات المتحدة، والمملكة المتحدة، وكندا. طُوِّرت قنبلتان ذريتان بالتزامن في أثناء الحرب: مدافع الانشطار النووي البسيط نسبيًّا، وقنبلة انشطارية نمط الانضغاط الداخلي الأكثر تعقيدًا. تبين أن تصميم قنبلة الرجل النحيف غير عملي مع البلوتونيوم، لذا طُور سلاح مدفعي آخر أُطلق عليه الولد الصغير يستخدم اليورانيوم-٢٣٥، وهو نظير موجود في اليورانيوم الخام المتوفر في الطبيعة بنسبة سبعة من عشرة في المائة. تبين صعوبة فصل اليورانيوم-٢٣٨، النظير المتطابق كيميائيًّا والأكثر شيوعًا ذي نفس الكتلة تقريبًا. استُخدمت ثلاث طرائق لتخصيب اليورانيوم: الكهرومغناطيسية والغازية والحرارية. أُنجز معظم هذا العمل في أشغال كلينتون الهندسية في أوك ريدج بولاية تينيسي. بالتوازي مع العمل على اليورانيوم، بُذلت مجهودات لإنتاج البلوتونيوم، الذي اكتُشِف في جامعة كاليفورنيا في عام ١٩٤٠. في عام ١٩٤٢، وبعد ثبات نجاح أول مفاعل نووي اصطناعي في العالم، شيكاغو بايل -١، في مختبر المعادن بجامعة شيكاغو، شُرع في إنشاء مفاعل جرافيت **X-10** في أوك ريدج ضمن المشروع، ومفاعلات الإنتاج في موقع هانفورد بولاية واشنطن، وهناك شُعَّ اليورانيوم وحُوِّل إلى بلوتونيوم. فُصل بعدها البلوتونيوم عن اليورانيوم كيميائيًّا باستخدام عملية الفوسفات بيزموث. طُوِّر سلاح الرجل البدين، وهو «قنبلة من النوع الانهياري»، باستخدام البلوتونيوم، في إطار مجهودات متضافرة قام بها مختبر لوس ألاموس للتصميم والتطوير. كُلِّف المشروع أيضًا بجمع معلومات استخبارية عن برنامج التسلح النووي الألماني. عمل موظفو مشروع مانهاتن في أوروبا وخلف خطوط العدو في بعض الأحيان، في مهمة أُطلق عليها =

بالعودة إلى ألمانيا، عُيِّن فيرنر هايزنبرج، الذي ذاع صيته باعتباره أبرز فيزيائي في مجال الكم على هذا الكوكب، ليكون رئيسًا لمشروع القنبلة الذرية النازية. وفقًا لبعض المؤرخين، كان الخوف من أن هايزنبرج قد يضرب الحلفاء بقنبلة ذرية كبيرة جدًّا، لدرجة أن مكتب الخدمات الاستراتيجية Office of Strategic Services ويُعرف اختصارًا بـ(OSS) [هي وكالة استخبارات أمريكية سابقة، تم إنشاؤها في أثناء الحرب العالمية الثانية، وتهدف إلى جمع المعلومات الاستخباراتية وتنفيذ بعض العمليات الخاصة والسرية، حيث قامت بتنفيذ العديد من العمليات خلف خطوط العدو في أثناء الحرب، وكانت تعمل الوكالة أيضًا لأغراض الدعاية والتأثير على الرأي العام والتخطيط للمعارك]، دبر خطة لاغتياله. في عام ١٩٤٤ كُلِّفَ مو بيرج بالمهمة -وهو لاعب سابق في فريق بروكلين دودجرز للكرة الأمريكية. حضر بيرج محاضرة ألقاها هايزنبرج في زيورخ، مع أوامر بقتل هايزنبرج إذا اعتقد بيرج أن

= عملية ألسوس، وهناك جمعوا المواد والوثائق النووية، واعتقلوا الجواسيس الألمان. على الرغم من الحراسة المشددة لمشروع مانهاتن، نجح الجواسيس الذريون السوفييت في اختراق البرنامج. أُجريت أول عملية تفجير لسلاح نووي لجهاز انشطار بلوتونيوم من نمط الانضغاط الداخلي في تجربة ترينتي، كان ذلك في ميدان رمي المدفعية والتفجير بنيومكسيكو في السادس عشر من يوليو عام ١٩٤٥. بعدها بشهرٍ واحد، استُخدمت قنبلتا الولد الصغير والرجل البدين في القصف الذري على هيروشيما وناجازاكي، على التوالي. في السنوات التي تلت الحرب مباشرة، أجرى مشروع مانهاتن تجارب على الأسلحة في حلقية بيكيني ضمن عملية تقاطع الطرق، وطور أسلحة جديدة، وعزز تطوير شبكة المختبرات الوطنية، ودعَّم الأبحاث الطبية في مجال علم الأشعة، ووضع حجر الأسس للبحرية النووية. ظلت للمشروع السلطة على أبحاث وإنتاج الأسلحة الذرية الأمريكية، إلى أن شُكِّلت هيئة الطاقة الذرية الأمريكية في يناير عام ١٩٤٧.

جهود القنبلة الألمانية أصبحت على وشك الانتهاء. (فُصلت هذه القصة في كتاب نيكولاس داويدوف «صائد الكرة الذي أصبح جاسوسًا The Catcher Was a Spy». كما أن القصة تحولت إلى فيلم سينمائي عام ٢٠١٨).

لحسن الحظ، كان مشروع القنبلة النازية متأخرًا عن جهود الحلفاء بشكل كبير. عانى المشروع النازي لامتلاك القنبلة النووية من نقص التمويل، وتأخر في الجدول الزمني للعمل ثم قصف الحلفاء قاعدتها. الأهم من ذلك أن هايزنبرج لم يصل إلى حل المشكلة الحاسمة لصنع القنبلة الذرية، وهي تحديد كمية اليورانيوم المخصب أو البلوتونيوم الضروري لإنشاء تفاعل متسلسل، وهو المقدار المعروف باسم الكتلة الحرجة. (الكمية الفعلية نحو عشرين رطلًا من اليورانيوم ٢٣٥ (نحو ٩ كيلو جرامات)، والتي يمكنك حملها في راحة يدك).

بعد الحرب أدرك العالم ببطء أن المعادلات الغامضة والمجهولة لنظرية الكم لم تحمل فقط مفتاح الفيزياء الذرية، ولكن ربما أيضًا مصير الجنس البشري نفسه.

ومع ذلك، بدأ الفيزيائيون بالعودة ببطء إلى السؤال الذي حيرهم قبل الحرب: كيفية إنشاء نظرية كمومية مكتملة للمادة.

* * *

الفصل الرابع

نظرية كل شيء (تقريبًا)

بعد الحرب، وجد أينشتاين نفسه وحيدًا ومعزولًا، وهو الشخصية العظيمة التي فتحت العلاقة الكونية بين المادة والطاقة واكتشفت سر النجوم.

كل التقدم الحديث في الفيزياء تقريبًا أحرزته نظرية الكم، وليست نظرية المجال الموحد. في الواقع، أعرب أينشتاين عن أسفه لأن علماء الفيزياء الآخرين أصبحوا ينظرون إليه على أنه أثر قديم. اعتبر معظم الفيزيائيين أن هدفه المتمثل في إيجاد نظرية مجال موحدة أمر صعب للغاية، خاصة أن القوى النووية ظلت لغزًا كاملًا.

علق أينشتاين قائلًا: «يُنظر إليَّ بشكل عام كنوع من الأشياء المتحجرة، وقد أصبحت أعمى وأصم بمرور السنين. لا أجد هذا الدور بغيضًا للغاية، لأنه يتوافق بشكل جيد مع مزاجي».

في الماضي، كان هناك مبدأ أساسي وجَّه عمل أينشتاين. في النسبية الخاصة يجب أن تظل نظريته كما هي عند التبادل بين الأبعاد الأربعة X وY وZ وT. في النسبية العامة مبدأ التكافؤ قائم على أن الجاذبية والتسارع يمكن أن يكونا متكافئين. لكن في بحثه عن نظرية كل شيء، فشل أينشتاين في إيجاد مبدأ استرشادي. حتى اليوم، عندما أراجع دفاتر أينشتاين والحسابات التي قام بها، أجد الكثير من الأفكار ولكن من دون مبدأ استرشادي. هو نفسه أدرك أن هذا سيقضي على سعيه النهائي. قال بحزن ذات مرة: «أعتقد أنه من أجل إحراز تقدم حقيقي، يجب على المرء مرة أخرى اكتشاف مبدأ عام ما من الطبيعة».

لم يتمكن أينشتاين من العثور عليه قَط. قال أينشتاين بشجاعة ذات مرة إن «الله بارع، لكنه ليس ماكرًا». في سنواته الأخيرة أصيب بالإحباط واستنتج: «لديَّ أفكار أخرى. ربما يكون الله ماكرًا».

حتى إرفين شرودنجر حاول. كتب بتواضع إلى أينشتاين: «أنت تحاول صيد الأسود، بينما أتحدث عن الأرانب». ومع ذلك، في عام ١٩٤٧ عقد شرودنجر مؤتمرًا صحفيًّا للإعلان عن نسخته من نظرية المجال الموحد. حتى رئيس وزراء أيرلندا إيمون دي فاليرا كان بصحبته. قال شرودنجر: «أعتقد أنني على حق. سأبدو مغفلًا سيئًا إذا كنت مخطئًا». أخبر أينشتاين لاحقًا شرودنجر أنه قد أخذ هذه النظرية بعين الاعتبار ووجدها غير صحيحة. بالإضافة إلى ذلك، لم تستطع نظريته تفسير طبيعة الإلكترونات والذرة.

اكتشف فيرنير هايزنبرج وفولفجانج باولي[٧٠] الخطأ أيضًا، واقترحا نسختهما من نظرية المجال الموحد. كان باولي أكبر ساخر في الفيزياء ومنتقدًا لبرنامج أينشتاين. اشتهر بقوله: «ما مزقه الله، لا يجمعه أحد»؛ أي إذا مزق الله القوى في الكون، فمن نحن لمحاولة إعادة تجميعها معًا؟

في عام ١٩٥٨ ألقى باولي محاضرة في جامعة كولومبيا، شرح فيها نظرية المجال الموحد لهايزبرج وباولي. كان نيلز بور من بين الحضور. بعد حديثه، وقف بور وقال: «نحن في الخلف مقتنعون بأن نظريتك مجنونة. لكن ما يفرقنا هو ما إذا كانت نظريتك مجنونة بدرجة كافية».

بدأ على أثر ذلك نقاشًا ساخنًا، حيث ادعى باولي أن نظريته كانت مجنونة بما يكفي لتكون صحيحة، بينما قال آخرون إن نظريته لم تكن مجنونة بدرجة كافية. كان الفيزيائي جيريمي بيرنستاين من بين الحضور، يتذكر هذا الموقف قائلًا: «لقد كان لقاءً غريبًا بين عملاقين في الفيزياء الحديثة. ظللت أتساءل ما الذي يمكن أن يفعله أي زائر غير فيزيائي في هذا العالم».

---

(٧٠) فولفجانج باولي **Wolfgang Ernst Pauli**: عالم فيزياء نظرية نمساوي، وواحد من العلماء الرواد في الميكانيكا الكمومية. في عام ١٩٤٥ استلم باولي جائزة نوبل في الفيزياء «لمساهمته في اكتشاف قانون جديد للطبيعة وهو مبدأ استبعاد باولي». ساهم كثيرًا في تطور نظريات الميكانيكا الكمومية. كان صديقًا حميمًا لنيلز بور وفيرنر هايزنبرج. حصل على شهادة الدكتوراه من جامعة لودفيج ماكسميليان في ميونخ. مبدأ استبعاد باولي ومصفوفات باولي وغيرها تعد من أهم ما قدمه باولي في مجال الميكانيكا الكمومية.

كان بور محقًّا. النظرية التي قدمها باولي تبين فيما بعد أنها غير صحيحة.

لكن بور قد أصاب بالفعل شيئًا مهمًّا. لقد جرب أينشتاين ورفاقه جميع النظريات السهلة والواضحة، لكنها فشلت جميعًا. لذلك يجب أن تكون نظرية المجال الموحد الحقيقية مختلفة جذريًّا عن جميع الأساليب السابقة. يجب أن يكون الأمر «مجنونًا بدرجة كافية» لتُصنَّف على أنها نظرية حقيقية لكل شيء.

الديناميكا الكهربائية الكمومية[٧١]

لقد أُحرز التقدم الحقيقي في حقبة ما بعد الحرب العالمية الثانية في تطوير نظرية كمومية كاملة للضوء والإلكترونات، تُسمَّى الديناميكا الكهربائية الكمومية **QED**. هدفها هو الجمع بين نظرية ديراك للإلكترون ونظرية ماكسويل للضوء، وبالتالي إنشاء نظرية الضوء والإلكترونات التي تخضع للميكانيكا الكمومية والنسبية الخاصة. (ومع ذلك، فإن الجمع بين إلكترونات ديراك والنسبية العامة في نظرية واحدة، يعتبر صعبًا للغاية).

في عام ١٩٣٠، أدرك روبرت أوبنهايمر (الذي قاد لاحقًا مشروع بناء القنبلة الذرية) شيئًا مزعجًا للغاية. إذا حاول المرء أن يصف نظرية الكم لإلكترون يتفاعل مع فوتون، فإن التصحيحات الكمومية تتباعد بالفعل، مما يسفر عن نتائج غير مجدية ولا نهائية. كان ينبغي أن تكون التصحيحات الكمومية صغيرة -لعقود كان هذا هو المبدأ الاسترشادي. لذلك كان هناك خلل جوهري في الجمع بين معادلة ديراك للإلكترونات

(٧١) نظرية الديناميكا الكهربائية الكمية **Quantum Electrodynamics**: اختصارًا **QED**، نظرية أرساها ريتشارد فاينمان للربط بين النظرية النسبية الخاصة والميكانيكا الكمومية، وتعد هذه النظرية الصورة الكمومية من الكهرومغناطيسية التقليدية، أو بتعبير علمي أدق فإنها تعد نظرية المجال الكمومي للقوة الكهرومغناطيسية. وتشرح النظرية التفاعل بين الضوء والمادة المشحونة كهربائيًّا.

ونظرية ماكسويل للفوتونات. ظل هذا الهاجس يطارد الفيزيائيين لما يقرب من عقدين من الزمن. عمل العديد من الفيزيائيين على حل هذه المشكلة، لكنهم لم يحرزوا أي تقدم يُذكَر.

أخيرًا، في عام ١٩٤٩، حل ثلاثة فيزيائيين شبان يعملون بشكل مستقل هذه المشكلة طويلة الأمد، وهم ريتشارد فاينمان وجوليان شفينجر[٧٢] من الولايات المتحدة، وشين إشيرو تومونا‌جا[٧٣] من اليابان.

لقد كانوا ناجحين بشكل مذهل، وكانوا قادرين على حساب أشياء مثل الخاصية المغناطيسية للإلكترون بدقة هائلة. لكن الطريقة التي فعلوا بها ذلك كانت مثيرة للجدل ولا تزال تسبب بعض القلق والشك لدى علماء الفيزياء حتى اليوم.

لقد بدأوا بمعادلة ديراك ومعادلة ماكسويل، حيث تُعطى لكتلة وشحنة الإلكترون قيم أولية معينة (تُسمى «الكتلة العارية والشحنة العارية»). ثم قاموا بحساب التصحيحات الكمومية للكتلة العارية والشحنة. كانت هذه التصحيحات الكمومية لا نهائية. وهذه هي

---

(٧٢) جوليان شفينجر **Julian Schwinger** (١٢ فبراير ١٩١٨– ١٦ يوليو ١٩٩٤): هو فيزيائي أمريكي حصل على جائزة نوبل للفيزياء عام ١٩٦٥، وشاركه في الجائزة العالم الياباني شين إشيرو تومونا‌جا، والعالم الأمريكي ريتشارد فاينمان. من أهم إنجازاته العلمية بحوثه في مجال الديناميكا الكهربائية الكمومية، وتطويره لنظرية الاختلال **relativistic perturbation theory** وتكملتها بالنظرية النسبية.

(٧٣) شين إشيرو تومونا‌جا **Shin'ichirō Tomonaga** (مارس ١٩٠٦– ٨ يوليو ١٩٧٩): هو عالم فيزيائي ياباني حصل على جائزة نوبل للفيزياء عام ١٩٦٥، وشاركه في الجائزة العالمان جوليان شفينجر، وريتشارد فينمان.

المشكلة التي وجدها أوبنهايمر في وقت سابق.

لكن السحر يحدث هنا. إذا افترضنا أن الكتلة والشحنة العارية الأصلية كانتا في الواقع لا نهائيتين في البداية، ثم قمنا بحساب التصحيحات الكمومية اللا نهائية، فسنجد أن هذين العددين اللا نهائيين يمكنهما إلغاء بعضهما البعض، تاركين نتيجة محدودة! بمعنى آخر، اللا نهاية ناقص اللا نهاية (طرح اللا نهاية من اللا نهاية) يساوي صفرًا!

كانت هذه الفكرة مجنونة لكنها نجحت. يمكن حساب قوة المجال المغناطيسي للإلكترون باستخدام **QED** بدقة مذهلة؛ أي جزء من مائة مليار.

أشار ستيفن واينبرج إلى أن «الاتفاق العددي بين النظرية والتجربة هنا ربما يكون الأكثر إثارة للإعجاب في كل العلوم». إنه مثل حساب المسافة من لوس أنجلوس إلى نيويورك في حدود قطر الشعرة. كان شفينجر فخورًا بعمله هذا لدرجة أنه حفر رمز هذه النتيجة على شاهد قبره.

هذه الطريقة تسمى نظرية الاستبدال غير المتناهي[٧٤]. ومع ذلك، فإن الإجراء شاق ومعقد ومخدر للعقل. فعليًّا، يجب حساب آلاف القيم بدقة، ثم يجب إلغاؤها جميعًا بدقة. يمكن لأصغر خطأ في هذا الكتاب الضخم من المعادلات إفساد العملية الحسابية بأكملها. (ليس

(٧٤) الاستبدال غير المتناهي **Renormalization**: استبدال المتغيرات غير المتناهية من الناحية النظرية (مثل الكتلة وشحنة الإلكترون) بما حصلنا عليه تجريبيًّا من القيم في حلول المعادلات في بعض النظريات الميكانيكية الكمومية (مثل الديناميكا الكهربائية الكمومية).

من المبالغة القول إن بعض الفيزيائيين يقضون حياتهم بأكملها في حساب التصحيحات الكمومية للخانة العشرية التالية باستخدام نظرية الاستبدال غير المتناهي).

لأن عملية الاستبدال غير المتناهي صعبة للغاية، حتى ديراك، الذي كان أول من ساهم في إنشاء QED، لم يعجبه ذلك. شعر ديراك أن هذا الحل يبدو مصطنعًا تمامًا، كأن تُخبِّئ التراب تحت السجادة. قال ذات مرة: «هذه ليست رياضيات منطقية. تنطوي الرياضيات المنطقية على إهمال كمية عندما يتضح أنها صغيرة، وليس إهمالها لمجرد أنها كبيرة جدًّا (لا نهائية) وتريد أن تتخلص منها!».

إن نظرية الاستبدال غير المتناهي التي يمكن أن تجمع بين النسبية الخاصة لأينشتاين والكهرومغناطيسية لماكسويل، هي بالفعل قبيحة للغاية. على المرء أن يتقن موسوعة من الحيل الرياضية لإلغاء آلاف القيم. لكن لا يمكنك أن تجادل مع دقة النتائج.

تطبيقات الثورة الكمومية

لقد مهَّدت الثورة الكمومية الطريق لمجموعة رائعة من الاكتشافات التي من شأنها أن تنتج الثورة العظيمة الثالثة في التاريخ؛ ثورة التكنولوجيا الفائقة، بما في ذلك الترانزستورات والليزر، وبالتالي ساعدت في خلق العالم الحديث.

خذ بعين الاعتبار الترانزستور، الذي ربما يكون الاختراع المحوري في المائة عام الماضية. أدى الترانزستور إلى ثورة المعلومات، بشبكة واسعة من أنظمة الاتصالات وأجهزة الكمبيوتر والإنترنت. الترانزستور هو في الأساس بوابة تتحكم في تدفق الإلكترونات. فكِّر في صنبور، مع فتح طفيف للصنبور يمكننا التحكم في تدفق الماء في أنبوب ماء. بالطريقة نفسها يشبه الترانزستور صنبورًا إلكترونيًّا صغيرًا يسمح لكمية صغيرة من الكهرباء بالتحكم في تدفق أكبر للإلكترونات إلى السلك. وبالتالي يمكن تضخيم إشارة صغيرة.

وبالمثل، فإن الليزر، أحد أكثر الأجهزة البصرية متعددة الأوجه في التاريخ، إنه منتج ثانوي آخر لنظرية الكم. لإنشاء ليزر الغاز، سنبدأ بأنبوب من الهيدروجين والهيليوم. ثم سنحقن الطاقة فيه (عن طريق توصيل تيار كهربائي). يتسبب هذا الحقن المفاجئ للطاقة في قفزة تريليونات من الإلكترونات في الغاز إلى مستوى طاقة أعلى. ومع ذلك، فإن هذه المجموعة من الذرات النشطة ستكون غير مستقرة. إذا

اضمحل إلكترون واحد إلى مستوى أدنى، فإنه يطلق فوتونًا من الضوء يصطدم بذرة مجاورة غير مستقرة فسيتسبب هذا في تحلل الذرة الثانية وإطلاق فوتون آخر. تتنبأ الميكانيكا الكمومية بأن الفوتون الثاني يهتز بانسجام مع الأول. يمكن وضع مرايا على طرفي الأنبوب مما يضخم تدفق الفوتونات. في نهاية المطاف، تتسبب هذه العملية فيما يشبه الانهيار الجليدي الهائل من الفوتونات، تهتز جميعها ذهابًا وإيابًا بين المرآتين في انسجام تام مما ينتج عنه شعاع الليزر.

اليوم، يمكن العثور على الليزر في كل مكان: عدادات الحساب في البقالة، والمستشفيات، وأجهزة الكمبيوتر، وحفلات موسيقى الروك، والأقمار الصناعية في الفضاء، وما إلى ذلك. لا يمكن فقط نقل كميات هائلة من المعلومات باستخدام أشعة الليزر، بل يمكنك أيضًا نقل كميات هائلة من الطاقة يمكنها حرق معظم المواد. (على ما يبدو، فإن القيد الوحيد على طاقة الليزر هو استقرار مادة الليزر والطاقة التي تحرك الليزر. لذلك، مع مادة الليزر ومصدر الطاقة المناسبين يمكن للمرء من حيث المبدأ إنشاء شعاع ليزر مشابه لذلك الموجود في أفلام الخيال العلمي).

ما هي الحياة؟

كان إرفين شرودنجر شخصية محورية في صياغة الميكانيكا الكمومية. لكن شرودنجر كان مهتمًّا أيضًا بمشكلة علمية أخرى أبهرت العلماء وأعاقتهم لقرون: ما هي الحياة؟ هل تستطيع الميكانيكا الكمومية الإجابة عن هذا اللغز القديم؟ كان يعتقد أن أحد النواتج الثانوية للثورة الكمومية سيكون المفتاح لفهم أصل الحياة.

اعتقد العلماء والفلاسفة طوال التاريخ أن هناك نوعًا من قوة الحياة التي تُحرك الكائنات الحية. عندما تدخل الروح الغامضة إلى الجسد يصبح فجأة حيًّا ويتصرف كإنسان. يؤمن الكثيرون بشيء يسمى الثنائية، حيث يتعايش الجسد المادي مع الروح.

على الرغم من ذلك فقد اعتقد شرودنجر أن رمز الحياة مخفي داخل جزيء رئيسي يطيع قوانين الميكانيكا الكمومية. على سبيل المثال؛ أينشتاين أبعد الأثير من الفيزياء، وبالمثل سيحاول شرودنجر إبعاد قوة الحياة عن علم الأحياء. في عام ١٩٤٤ كتب كتابًا رائدًا بعنوان «ما هي الحياة؟»، كان له تأثير عميق على جيل جديد من علماء ما بعد الحرب. اقترح شرودنجر استخدام الميكانيكا الكمومية للإجابة عن أقدم الأسئلة حول الحياة. رأى شرودنجر في ذلك الكتاب أن الشفرة الجينية تنتقل بطريقة ما من جيل من الكائنات الحية إلى الجيل التالي.

كان يعتقد أن هذا الرمز لم يخزن في الروح ولكن في ترتيب الجزيئات في خلايانا. باستخدام الميكانيكا الكمومية وضع نظرية حول ما يمكن أن يكون عليه هذا الجزيء الرئيسي الغامض. لسوء الحظ لم يُعرف الكثير عن البيولوجيا الجزيئية في الأربعينيات للإجابة عن هذا السؤال.

لكن اثنين من العلماء؛ جيمس د. واتسون وفرانسيس كريك[٧٥]، قرآ الكتاب وكانا مفتونين بالبحث عن هذا الجزيء الرئيسي. أدرك واتسون وكريك أن الجزيئات كانت صغيرة جدًّا بحيث كان من المستحيل رؤيتها أو معالجتها، وذلك لأن الطول الموجي للضوء المرئي أكبر بكثير من الجزيء. لكن كانت لديهما حيلة كمومية أخرى في جعبتهما:

---

(٧٥) جيمس ديوي واتسون **James Dewey Watson** (ولد في ٦ نيسان ١٩٢٨): هو عالم أحياء جزيئية، وعالم وراثة، وعالم حيوان، مشهور بأنه واحد من مكتشفي بنية الـ **DNA** عام ١٩٥٣ مع فرانسيس كريك وروزاليند فرانكلين. فاز كل من واتسون وكريك وموريس ويلكينز بجائزة نوبل في علم وظائف الأعضاء والطب في العام ١٩٦٢ «لاكتشافاتهم فيما يخص البنية الجزيئية للأحماض النووية وأهميتها في نقل المعلومات في المادة الحية». حصل واتسون على درجة بكالوريوس العلوم من جامعة شيكاغو عام ١٩٤٧ ودرجة الدكتوراه من جامعة إنديانا عام ١٩٥٠. وبعد ما بعد الدكتوراه في جامعة كوبنهاغن مع هيرمان كلاكر وأول مالو، عمل واتسون في مختبر كافينديش بجامعة كامبريدج في إنجلترا، حيث التقى صديقه ومعاونه المستقبلي فرانسيس كريك. من سنة ١٩٥٦ إلى ١٩٧٥، كان واتسون في قسم علم الأحياء في جامعة هارفارد يتقدم ببحث في علم الأحياء الجزيئي. من سنة ١٩٦٨ عمل كمدير لمختبر **Cold Spring Harbor Laboratory (CSHL)** رافعًا بذلك مستواه من التمويل والبحث. في مختبر **CSHL**، انتقل باهتمامه البحثي إلى دراسة السرطان، مع جعله مركزًا بحثيًّا رائدًا عالميًّا في علم الأحياء الجزيئي. في ١٩٩٤، بدأ بعمله كرئيس واستمر لعشر سنوات. ثم عُين مستشارًا إلى أن استقال في ٢٠٠٧ بعد إثارته الجدل حول مزاعمه بوجود رابط بين الذكاء والعرق. ما بين ١٩٨٨ و١٩٩٢، واتسون كان مساهمًا ومساعدًا بتأسيس مشروع الجينوم البشري. كتب واتسون العديد من الكتب العلمية، مثل الكتاب المدرسي؛ البيولوجيا الجزيئية للمورثة (١٩٦٥)، وكتابه الأكثر مبيعًا؛ الحلزون المضاعف (١٩٦٨).

علم البلورات بالأشعة السينية. يمكن مقارنة الطول الموجي للأشعة السينية بحجم الجزيئات، لذلك من خلال تسليط الأشعة السينية على بلورة من المواد العضوية تنتشر الأشعة السينية في اتجاهات عديدة. لكن نمط التبعثر يحتوي على معلومات حول التركيب الذري المفصل للبلورة. تنتج الجزيئات المختلفة أنماطًا مختلفة من الأشعة السينية. يمكن لعالم فيزياء كمومي ماهر، من خلال النظر إلى صور الانتثار، أن يخمن ما هي بنية الجزيء الأصلي. لذلك على الرغم من عدم قدرتك على رؤية الجزيء نفسه، يمكنك فك شفرة هيكله.

ولد فرانسيس هاري كومبتون كريك **Francis Crick** في الثامن من حزيران عام ١٩١٦، وتوفي في الثامن والعشرين من شهر تموز عام ٢٠٠٤، وكان عالمًا في البيولوجيا الجزيئية، اشتهر باكتشافه لبنية جزيء **DNA** (الحمض النووي) عام ١٩٥٣ مع جيمس واتسون. ارتكزت النتائج بشكل جزئي على دراسات أساسية منجزة من خلال روزاليند فرانكلين وريموند غوسلينك وويلكينز. كان كريك عالمًا نظريًّا في البيولوجيا الجزيئية وأدى دورًا حاسمًا في البحث المتعلق بكشف الهيكل الحلزوني للحمض النووي. عُرف كريك باستخدامه لمصطلح «المبدأ المركزي» لتلخيص الفكرة القائلة بأنه عندما تنقل المعلومات من الأحماض النووية (**DNA or RNA**) إلى البروتينات، فإنها لا تستطيع العودة إلى الأحماض النووية. وبكلمات أخرى، فإن الخطوة الأخيرة في تدفق المعلومات من الأحماض النووية إلى البروتينات تكون غير قابلة للعكس. خلال الفترة المتبقية من حياته، شغل

منصب أستاذ الأبحاث المتميز J.W. Kieckhefer في معهد سالك للدراسات البيولوجية Salk Institute for Biological Studies في لاجولا، كاليفورنيا. ركز في بحثه الأخير على علم الأعصاب النظري والمحاولات في تطوير الدراسة العلمية للوعي الإنساني. بقي كريك في منصبه حتى وفاته. قال كريستوف كوش عنه: «كان كريك يعدل مخطوطة على فراش موته، عالمًا حتى النهاية المرة».

كانت الميكانيكا الكمومية قوية جدًّا لدرجة أنه يمكن للمرء أن يحدد الزاوية التي ترتبط بها الذرات المختلفة معًا لتكوين الجزيئات. مثل طفل يلعب لعبة الميكانو أو المكعبات، يمكن للمرء أن يبني شكلًا ذريًّا للذرة، وسلاسل من هذه الذرات تلتصق ببعضها البعض لإعادة إنتاج البنية الفعلية لجزيء معقد. أدرك واتسون وكريك أن جزيء الحمض النووي كان أحد المكونات الرئيسية لنواة الخلية، لذلك كان هذا هدفًا محتملًا. من خلال تحليل صور الأشعة السينية الحاسمة التي التقطتها روزاليند فرانكلين[٧٦]، تمكنوا من استنتاج أن بنية جزيء الحمض النووي كانت عبارة عن حلزون مزدوج.

في واحدة من أهم الأوراق المنشورة في القرن العشرين، تمكن

(٧٦) روزاليند إلسي فرانكلين Rosalind Elsie Franklin (٢٥ يوليو ١٩٢٠ – ١٦ إبريل ١٩٥٨): عالمة فيزياء حيوية بريطانية المولد، وخبيرة بالتصوير الإشعاعي، حيث كان لها دور مهم في فهم تركيب وشكل DNA والفيروسات والفحم والجرافيت. انحدرت روزاليند من أسرة تنتمي إلى طبقة ميسورة الحال، وهي متعلمة ولها نشاط سياسي، التحقت بمدرسة سانت بول للبنات بلندن، وتلقت تعليمًا متميزًا في الكيمياء والفيزياء. والتحقت بجامعة كامبريدج عام ١٩٣٨، حيث بقيت لاستكمال أبحاثها في الكيمياء الفيزيائية للفحم عام ١٩٤٥، وجدت لنفسها عملًا في معمل لحيود أشعة X المطلوب لدراسة الـDNA.

واتسون وكريك من استخدام الميكانيكا الكمومية لفك شفرة التركيب الكامل لجزيء الحمض النووي. كانت تحفة فنية. لقد أثبتا بشكل قاطع أن العملية الأساسية للكائنات الحية -التكاثر- يمكن أن تتضاعف على المستوى الجزيئي. رُمزت الحياة على خيوط الحمض النووي الموجودة في كل خلية.

كانت تلك هي القفزة الهائلة التي جعلت من الممكن تحقيق الكأس المقدسة في علم الأحياء، مشروع الجينوم البشري الذي أعطانا وصفًا ذريًّا كاملًا للحمض النووي للإنسان.

كما تنبأ تشارلز داروين في القرن الماضي، أصبح من الممكن الآن بناء شجرة عائلة الحياة على الأرض، مع كل كائن حي أو أحفورة عضو في فرع واحد من هذه الشجرة. كل هذا كان نتاج الميكانيكا الكمومية.

لذا فإن توحيد قوانين فيزياء الكم لم يكشف فقط عن أسرار الكون، بل وحَّد أيضًا شجرة الحياة.

القوة النووية

نتذكر أن أينشتاين لم يكن قادرًا على إكمال نظرية المجال الموحد جزئيًّا، لأنه كان يفتقد جزءًا كبيرًا من اللغز؛ القوة النووية. بالعودة إلى عشرينيات وثلاثينيات القرن الماضي، لم يُعرف أي شيء عنها تقريبًا.

ولكن في حقبة ما بعد الحرب، وبدعم من النجاح المذهل للديناميكا الكهربائية الكمومية، حوَّل الفيزيائيون انتباههم إلى المشكلة الحارقة التالية؛ تطبيق نظرية الكم على القوة النووية. ستكون هذه مهمة صعبة وشاقة، لأنهم بدأوا من الصفر وكانوا بحاجة إلى أدوات قوية جديدة تمامًا ليجدوا طريقهم في هذه البقعة غير المعروفة.

هناك نوعان من القوى النووية؛ القوية والضعيفة. نظرًا لأن البروتون له شحنة موجبة، وبما أن الشحنات الموجبة تتنافر، فقد تتباعد أنوية الذرات عادةً. ما يربط الأنوية الذرية معًا ويتغلب على التنافر الكهروستاتيكي هو القوى النووية. من دونها، سيذوب عالمنا بأكمله في سحابة من الجسيمات دون الذرية.

القوة النووية القوية كافية للحفاظ على نواة العديد من العناصر الكيميائية مستقرة إلى أجل غير مسمى. كان العديد منها مستقرًّا منذ بداية الكون نفسه، خاصةً إذا كان عدد البروتونات والنيوترونات متوازنًا. ومع ذلك، فإن بعض الأنوية الذرية غير مستقرة لعدد من الأسباب، خاصةً إذا

كانت تحتوي على عدد كبير جدًّا من البروتونات أو النيوترونات. إذا كان لديها عدد كبير جدًّا من البروتونات، فإن التنافر الكهربائي سيؤدي إلى تباعد الأنوية عن بعضها. إذا كانت النواة تحتوي على عدد كبير جدًّا من النيوترونات، فإن عدم استقرارها يمكن أن يتسبب في تحللها. على وجه الخصوص، القوة النووية الضعيفة ليست قوية بما يكفي لتثبيت النيوترونات معًا بشكل دائم، وبالتالي تنهار في النهاية. على سبيل المثال، سوف يتحلل نصف أي مجموعة من النيوترونات الحرة في غضون أربع عشرة دقيقة. ما سيتبقى هو ثلاثة جسيمات: البروتونات، والإلكترونات، وجسيم جديد غامض آخر، وهو مضاد النيوترينو، والذي سنناقشه لاحقًا.

دراسة القوة النووية صعبة للغاية، لأن النواة أصغر بنحو مائة ألف مرة من الذرة. لفحص ما بداخل البروتون، احتاج الفيزيائيون إلى أداة جديدة، هي مسرع الجسيمات. رأينا كيف استخدم إرنست رذرفورد قبل سنوات الأشعة المنبعثة من الراديوم المغلف في صندوق رصاص لاكتشاف النواة. لاستكشاف أعمق داخل النواة، احتاج الفيزيائيون إلى مصادر إشعاع أقوى.

في عام ١٩٢٩، اخترع إرنست لورانس[٧٧] السيكلوترون،

(٧٧) إرنست أورلاندو لورانس **Ernest Orlando Lawrence** (٨ أغسطس ١٩٠١ – ٢٧ أغسطس ١٩٥٨): كان فيزيائيًّا أمريكيًّا قام ببناء أول سيكلوترون (مسارع بروتونات وجسيمات دون ذرية حلقي الشكل)، بالتعاون مع ملتون ستانلي لفنجستون عام ١٩٣١. عمل على فصل نظائر اليورانيوم ضمن ما عُرف باسم «مشروع مانهاتن»، وهو ما ساهم في جهود الولايات المتحدة لإنتاج السلاح النووي في الحرب العالمية الثانية. حصل عام ١٩٣٩ على جائزة =

رائدة مسرعات الجسيمات العملاقة اليوم. المبدأ الأساسي وراء السيكلوترون بسيط. يجبر المجال المغناطيسي البروتونات على التحرك في مسار دائري. في كل دورة، تدفع البروتونات دفعة صغيرة من الطاقة بواسطة مجال كهربائي. في النهاية، بعد العديد من اللفات، يمكن أن تصل حزمة البروتونات إلى ملايين بل مليارات الإلكترونات فولت. (المبادئ الأساسية لمسرع الجسيمات واضحة جدًّا، لدرجة أنني قمت حتى ببناء مسرع جسيمات إلكتروني، بيتاترون[٧٨]، عندما كنت في المدرسة الثانوية).

هذه الحزمة من البروتونات بدورها توجه في النهاية إلى هدف، حيث تصطدم ببروتونات أخرى. من خلال غربلة الحطام الهائل من هذا الاصطدام، تمكن العلماء من تحديد جزيئات جديدة غير مكتشفة من قبل. (عملية إطلاق حزم من الجسيمات لتحطيم البروتونات هي عملية خرقاء وغير دقيقة. وقد تمت مقارنتها بإلقاء بيانو خارج النافذة، ثم

= نوبل في الفيزياء عن اختراعه للسيكلوترون وما أتبع ذلك من تطبيقات. كما سُمي العنصر الكيميائي رقم ١٠٣ لورانسيوم (**lawrencium**) تكريمًا له.

أما المسرع الدوراني (السيكلترون) (**Cyclotron**)، فهو جهاز لتسريع الجسيمات المشحونة، وذلك بتسليط مجال كهربائي متردد عليها بمساعدة مجال مغناطيسي يعمل عموديًّا على مستوى دوران الإلكترونات. يعمل المجال الكهربائي على زيادة سرعة الإلكترونات، ويعمل المجال المغناطيسي على إجبار حركة الإلكترونات في دائرة.

(٧٨) بيتاترون **Betatron**: هو سيكلوترون طوَّره دونالد كيرست في جامعة إلينوي سنة ١٩٤٠ لتسريع الإلكترونات، وإن كانت تلك الفكرة نبعت من رالف ويدرو ونماها قبل ذلك ماكس ستينبك في الثلاثينيات. والبيتاترون أساسًا هو محول ذو أنبوب ناتئ مفرغ من الهواء على شكل لفائف ثانوية. فالتيار المتردد في الملفات الأساسية يسارع الإلكترونات في الفراغ حول مسار دائري. ويعتبر البيتاترون أول آلة مهمة لإنتاج إلكترونات ذات طاقة عالية.

محاولة تحديد جميع خصائص البيانو من خلال تحليل صوت الانهيار. لكن هذه العملية هي إحدى الطرق الممكنة التي يجب أن نفحص بها الجزء الداخلي من البروتون).

عندما حطم الفيزيائيون البروتونات لأول مرة بمسرع جسيمات في الخمسينيات من القرن الماضي، وجدوا الأمر الذي أثار فزعهم؛ حديقة حيوانات كاملة من الجسيمات غير المتوقعة.

كان هذا كرمًا زائدًا. كان يُعتقد أنه من المفترض أن تصبح الطبيعة أكثر بساطة كلما بحثت أعمق، وليست أكثر تعقيدًا. بالنسبة للفيزيائيين الكموميين، بدا أن الطبيعة خبيثة حقًّا بعد كل شيء.

قال روبرت أوبنهايمر[٧٩] -المحبط من هذا التدفق من الجسيمات الجديدة- إن جائزة نوبل في الفيزياء يجب أن تُمنح للفيزيائي الذي

(٧٩) روبرت أوبنهايمر **J. Robert Oppenheimer** (٢٢ أبريل ١٩٠٤ - ١٨ فبراير ١٩٦٧): فيزيائي أمريكي ومدرس الفيزياء النظرية بجامعة كاليفورنيا، بيركلي المدير العلمي على مشروع مانهاتن لتصنيع السلاح النووي الأول في الحرب العالمية الثانية، ويُعرف أوبنهايمر بـ«والد القنبلة النووية». وقد اشتُهر بمقولته: «الآن أصبحت الموت، مدمر العوالم» (الإنجليزية: **Now, I am become Death, the destroyer of worlds**). بعد الانتهاء من صنع القنبلة النووية، بعد الحرب، أصبح أوبنهايمر الرئيس المشرف على اللجنة الأمريكية للطاقة النووية واستخدم منصبه للضغط والتحكم في استخدامات الطاقة النووية وتجنب سباق التسليح النووي مع الاتحاد السوفييتي. حصل على جوائز من الرؤساء الأمريكيين جون كينيدي وليندون جونسون. كعالم، يشتهر أوبنهايمر بمؤسس المدرسة الأمريكية للفيزياء النظرية في أثناء عمله بجامعة كاليفورنيا، بيركلي. عمل كمدير معهد الدراسات المتقدمة خلفًا لأينشتاين، كما حقق أوبنهايمر إنجازات مهمة للفيزياء مثل: تقريب بورن - أوبنهايمر. وعمل على نظرية «البروتون - إلكترون»، وعملية أوبنهايمر - فيليبس والثقوب السوداء والميكانيكا الكمومية ونظرية مجال الكم والأشعة الكونية.

لم يكتشف جسيمًا جديدًا في ذلك العام. علق إنريكو فيرمي[٨٠]: «لو كنت أعرف أنه سيكون هذا الكم من الجسيمات ذات الأسماء اليونانية، لأصبحت عالم نبات لا فيزيائيًّا».

غرق الباحثون في بحر الجسيمات دون الذرية. دفعت الفوضى بعض علماء الفيزياء إلى الادعاء بأن العقل البشري ربما ليس ذكيًّا بما يكفي لفهم العالم دون الذري. بعد كل شيء، كما جادلوا، من

(٨٠) إنريكو فيرمي **Enrico Fermi** (٢٩ سبتمبر ١٩٠١ – ٢٨ نوفمبر ١٩٥٤): فيزيائي إيطالي أمريكي حصل على جائزة نوبل في الفيزياء عام ١٩٣٨، وكان ضمن الفريق الذي أنتج أول مفاعل نووي وأول قنبلة ذرية، وقام بإرساء نظرية الكم. هرب فيرمي من يد الفاشية واستبداد النازية إلى أمريكا، فتلقفته جامعة كولومبيا في نيويورك، إذ كانت سمعته قد سبقته بأنه مكتشف العنصر رقم (٩٣)، وكتبت صحيفة نيويورك تايمز قصة الإيطالي الذي حاول تحطيم ذرة اليورانيوم، فاكتشف عنصرًا جديدًا، وقتئذ لم يكن البحث العلمي قد عرف أن العنصر الواحد يمكن أن يكون له ثلاث صور متحدة في الخواص الظاهرية ولها خواص أخرى، وهو ما أطلقوا عليه النظائر **Isotopes**. وتبين أن العنصر (٩٣) ليس غير نظير من نظائر العنصر (٩٢) اليورانيوم، ولذلك فرقوا بينها بأوزانها الذرية، فكانت (يو ٢٣٤، يو ٢٣٥، يو ٢٣٨). ووجد أن أكثر هذه النظائر قابلية للانشطار عندما يقذف بالنيوترونات هو النظير (يو ٢٣٥)، لكن كانت العقبة أن نسبته ضئيلة في خام اليورانيوم ولا تتجاوز (٧, ٠٪)، الأمر الذي يعوق استخدامه بحالته الطبيعية، ويلزم رفع هذه النسبة إلى نحو ٤٪ أو ٥٪ فيما يعرف بعملية «التخصيب النووي أو التثرية»، (بالإنجليزية: **Enrichment**)، وذلك حتى يسهل توجيه النيوترونات إليه في الآلات التي تقوم بذلك، والتي كانت معروفة منذ عام ١٩٢٩ باسم معجل السيكلوترون، الذي صممه الأمريكي إرنست لورانس، لكي تكتسب الذرات عجلة تسارع بقوى طرد مركزية في مسارات المعجل الحلزونية. لكن مقتضيات الحرب لم تكن تناسب الولايات المتحدة الأمريكية لبناء معجل، ولا كان لديها قدر كافٍ من خام اليورانيوم. ولكن لأن الأمر أصبح مبشرًا بقرب تحقيق النجاح، بعدما اقترح فيرمي إمكان الاستغناء عن معجل السيكلوترون بما أسماه «الركام» **Pile**، فقد قام أسطول من الطائرات بنقل قدر كافٍ من خام اليورانيوم من كندا والكونغو البلجيكي (زائير حاليًّا)، ووضع تحت تصرف فيرمي الذي شرع مع زميله المهاجر المجري (الهنغاري) زيلارد **Szilard** في بناء ركام تجريبي ليكون بديلًا لمعجل السيكلوترون.

المستحيل تعليم الكلب حساب التفاضل والتكامل، لذلك ربما لا يكون العقل البشري قويًّا بما يكفي لفهم ما يحدث في نواة الذرة.

بدأ بعض الالتباس يتضح مع عمل موري جيلمان[٨١] وزملائه في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا (كالتك)، الذين ادعوا أنه بداخل البروتون والنيوترون توجد ثلاثة جسيمات أصغر تُسمى الكواركات.

لقد كان نموذجًا بسيطًا، لكنه نجح بشكل مذهل في ترتيب الجسيمات في مجموعات. مثل مندلييف كان بإمكان جيلمان التنبؤ بخصائص الجسيمات الجديدة شديدة التفاعل من خلال النظر إلى الفجوات في نظريته. في عام ١٩٦٤، عثر بالفعل على جسيم آخر تنبأ به نموذج الكوارك، يُسمى «سالب-أوميجا»، مما أدى إلى التحقق من الصحة الأساسية لهذه النظرية، والتي فاز جيلمان بسببها بجائزة نوبل.

السبب في أن نموذج الكوارك أصبح قادرًا على توحيد العديد من الجسيمات هو أنه كان قائمًا على التناظر. نتذكر أن أينشتاين قدَّم تناظرًا رباعي الأبعاد حول الفراغ والزمن والعكس صحيح. قدم جيلمان معادلات تحتوي على ثلاثة كواركات. إذا قمت بتبادلها داخل معادلة، فستظل المعادلة كما هي. وصف هذا التناظر الجديد إعادة خلط ثلاثة كواركات.

---

(٨١) موري جيلمان **Murray Gell-Mann**: هو فيزيائي أمريكي، ولد في ١٥ سبتمبر ١٩٢٩، حصل في عام ١٩٦٩ على جائزة نوبل للفيزياء عن إنجازاته الرائدة في تعريف نموذج الكواركات للجسيمات النووية واكتشافه تناظر النكهات **flavor symmetry** للكواركات الخفيفة، كما حصل على قلادة ألبرت أينشتاين عام ٢٠٠٥. واهتم بنظرية الجسيمات الأولية، ومن ضمنها الكواركات والنيوترينو ونظرية الأوتار.

القطبان المتعاكسان

الفيزيائي العظيم الآخر في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا، ريتشارد فاينمان، الذي أعاد تنظيم الديناميكا الكهربائية الكمومية، وموري جيلمان، الذي قدم الكوارك، كانا على طرفي نقيض في شخصيتيهما ومزاجيهما.

في وسائل الإعلام الشعبية، يُصوَّر الفيزيائيون عالميًّا إما على أنهم علماء مجانين، مثل د. براون في فيلم العودة إلى المستقبل، أو مهووسون غير أكفاء، كما هي الحال في مسلسل نظرية الانفجار العظيم، ومع ذلك، يقول الواقع إن الفيزيائيين يظهرون في جميع الأشكال والأحجام وأنواع الشخصيات.

كان فاينمان مثل الذبابة الملونة، دائمًا ما يكون رجل الاستعراض والمهرج، مليئًا بالقصص البذيئة عن أعماله المثيرة الفاحشة التي رواها بلهجة الطبقة العاملة القاسية. (خلال الحرب العالمية الثانية، اخترق ذات مرة الخزنة التي تحتوي على أسرار القنبلة الذرية في مختبر لوس ألاموس الوطني. داخل الخزنة، ترك ملاحظة غامضة. عندما عثر المسؤولون على هذه المذكرة في اليوم التالي، أُطلق تحذير كبير وذعر في أعلى المختبرات السرية في البلاد). لم يكن هناك شيء غير تقليدي أو شائن بالنسبة لفاينمان؛ بدافع الفضول، قام بإغلاق نفسه ذات مرة في

غرفة الضغط العالي ليرى ما إذا كان بإمكانه تجربة الخروج من الجسد.

ومع ذلك كان جيلمان عكس ذلك، فهو الرجل النبيل الدقيق في كلماته وأخلاقه. كانت مشاهدة الطيور، وجمع التحف، واللغويات، وعلم الآثار، هي هواياته المفضلة، وليس سرد القصص المضحكة. ولكن على الرغم من اختلافهما في طبيعتيهما، فإن كليهما كان لهما نفس الدافع والتصميم، مما ساعدهما على اختراق ألغاز نظرية الكم.

قوة ضعيفة وجسيمات شبحية

في غضون ذلك قُطعت أشواط كبيرة في فهم القوة النووية الضعيفة أيضًا، والتي تُعد أضعف بمليون مرة من القوة النووية القوية.

فالقوة النووية الضعيفة على سبيل المثال ليست قوية بما يكفي لتثبيت الأنوية الذرية لأنواع عديدة من الذرات معًا، لذا فإنها تتفكك وتتحلل إلى جسيمات دون ذرية أصغر. التحلل الإشعاعي كما رأينا سابقًا هو سبب سخونة لب الأرض. الطاقة الشرسة من البراكين المتفجرة العنيفة والزلازل الرهيبة تأتي من القوة النووية الضعيفة. يجب إدخال جسيم جديد لشرح القوة الضعيفة. فالنيوترون على سبيل المثال غير مستقر ويتحلل في النهاية إلى بروتون وإلكترون. وهذا ما يُسمى «تحلل بيتا». ولكن لكي تنجح الحسابات، احتاج الفيزيائيون إلى إدخال جسيم ثالث، وهو جسيم غامض يُسمى «النيوترينو».

يُطلق على النيوترينو أحيانًا اسم «الجسيم الشبح»، لأن بإمكانه اختراق الكواكب والنجوم بأكملها من دون أن يُمتص. في هذه اللحظة بالذات يشع جسمك بفيضان من النيوترينو القادم من الفضاء السحيق، والذي سافر بعضه عبر كوكب الأرض بأكمله. في الواقع، يمكن لبعض هذه النيوترينوات اختراق كتلة من الرصاص الصلب بحجم المسافة ما بين الأرض وأقرب نجم.

باولي الذي كان قد تنبأ بوجود النيوترينو في عام ١٩٣٠، أعرب عن أسفه ذات مرة: «لقد ارتكبت الخطيئة الكبرى. لقد اكتشفت جسيمًا لا يمكن ملاحظته أبدًا». على الرغم من أن هذا الجسيم بعيد المنال، فقد اكتشف أخيرًا تجريبيًّا عام ١٩٥٦ من خلال تحليل الإشعاع المكثف المنبعث من محطة للطاقة النووية. (على الرغم من أن النيوترينو نادرًا ما يتفاعل مع المادة العادية، فإن الفيزيائيين عوَّضوا ذلك من خلال استغلال العدد الهائل من النيوترينوات المنبعثة في مفاعل نووي).

لفهم القوة النووية الضعيفة، قدَّم الفيزيائيون مرة أخرى تناظرًا جديدًا. نظرًا لأن الإلكترون والنيوترينو كانا زوجًا من الجسيمات ضعيفة التفاعل، فقد اقتُرحت إمكانية مزاوجتهما، مما يمنحنا تناظرًا. ثم هذا التناظر الجديد بدوره يمكن أن يقترن بالتماثل الأقدم لنظرية ماكسويل. كانت النظرية الناتجة تُسمى «النظرية الكهروضعيفة»[٨٢]، والتي وحَّدت الكهرومغناطيسية مع القوة النووية الضعيفة.

فازت هذه النظرية الكهروضعيفة لستيفن واينبرج وشيلدون جلاشو وعبد السلام[٨٣] بجائزة نوبل في عام ١٩٧٩.

---

(٨٢) النظرية الكهروضعيفة **electroweak**: القوة الكهروضعيفة نظرية ضمن نظرية المجال الموحد، وركيزة من ركائز فيزياء الجسيمات والنموذج العياري، طُورت بين عامَي ١٩٦١ و١٩٦٧. تُوحِّد هذه النظرية اثنين من التفاعلات الأساسية ضمن تفاعل واحد، وهما التفاعل الكهرومغناطيسي والتفاعل الضعيف. يبدو التفاعلان كما لو كانا مختلفين في الطاقات الدُّنيا لكن النظرية تُنمذجهم كوجهين لقوة واحدة.

(٨٣) شيلدون جلاشو **Sheldon Lee Glashow**: هو عالم فيزيائي أمريكي حاز جائزة نوبل للفيزياء عام ١٩٧٩ عن «اكتشافه تأثير تيار متعادل قصير المدى **Z0** وأهميته في تأثير القوة الضعيفة». وقد شاركه في هذه الجائزة العالم الباكستاني محمد عبد السلام والعالم=

لذا فإن الضوء بدلًا من أن يتحد مع الجاذبية كما تمنى أينشتاين، فضَّل في الواقع أن يتحد مع القوى النووية الضعيفة.

وهكذا، استندت القوة النووية القوية إلى تناظر جيلمان، الذي ربط الكواركات الثلاثة معًا لتكوين البروتونات والنيوترونات، في حين أن القوة النووية الضعيفة كانت مبنية على تناظر أصغر؛ أي إعادة ترتيب الإلكترون مع النيوترينو، واللذين دُمجا معًا بعد ذلك مع الكهرومغناطيسية.

وعلى الرغم من قوة نموذجَي الكوارك والنظرية الكهروضعيفة في وصف حديقة حيوان الجسيمات دون الذرية، فإن هذا ترك فجوة كبيرة. أصبح السؤال المُلِح هو: ما الذي يجمع كل هذه الجسيمات معًا؟

= الأمريكي ستيفن واينبرج. ولد شيلدون جلاشو في ٥ ديسمبر ١٩٣٢، ويعمل أستاذًا للرياضيات والفيزياء بجامعة بوستن.

محمد عبد السلام **Abdus Salam** (٢٩ يناير ١٩٢٦ بنجاب – ٢١ نوفمبر ١٩٩٦ أكسفورد): عالم فيزياء باكستاني، حاصل على جائزة نوبل في الفيزياء عام ١٩٧٩.

نظرية يانج-ميلس

نظرًا لأن مجال ماكسويل حقق نجاحًا كبيرًا في التنبؤ بالخصائص الكهرومغناطيسية، بدأ الفيزيائيون في دراسة نسخة جديدة أكثر قوة من معادلة ماكسويل. اقترحها تشين يانج وروبرت ميلس[٨٤] في عام ١٩٥٤. بدلًا من مجال واحد فقط كتبه ماكسويل في عام ١٨٦١، قدمت عائلة من هذه المجالات في هذه النظرية باستخدام نفس التناظر الذي استخدمه جيلمان لإعادة ترتيب الكواركات، وذلك لإعادة ترتيب هذه المجموعة الجديدة من مجالات يانج-ميلس الواحدة داخل الأخرى.

كانت الفكرة بسيطة. ما يربط أجزاء الذرة معًا هو المجال الكهربائي الذي وصفته معادلات ماكسويل. ومن ثَم ربما يكون ما يربط الكواركات معًا هو تعميم معادلات ماكسويل؛ أي مجالات يانج-ميلس. يُطبق نفس التناظر الذي يصف الكواركات على مجال يانج-ميلس.

ومع ذلك لعدة عقود فترت هذه الفكرة البسيطة، لأنه عند حساب

---

(٨٤) تشين نينج يانج **Yang Chen-Ning**: ولد تشين يانج في ١ أكتوبر ١٩٢٢ في زيننج بالصين. وهو عالم فيزيائي أمريكي من أصل صيني حاز جائزة نوبل للفيزياء عام ١٩٥٧ بالاشتراك مع تسنج لي عن بحوثهما. تعلقت أبحاث يانج بالميكانيكا الإحصائية والجسيمات الأولية. حصل على الجنسية الأمريكية عام ١٩٦٤.

روبرت ميلس **Robert Mills** (١٩٢٧ - ١٩٩٩): هو فيزيائي نظري أمريكي، ولد في إنجلوود، وتوفي في تشارلستون، عن عمر يناهز ٧٢ عامًا.

خصائص جسيمات يانج-ميلس، تصبح النتيجة مرة أخرى لا نهائية، تمامًا كما رأينا في حالة الديناميكا الكهربائية الكمومية. لسوء الحظ، لم تكن مجموعة الحيل التي قدمها فاينمان كافية لإعادة صياغة نظرية يانج-ميلس. لسنوات، يئس الفيزيائيون من إيجاد نظرية محدودة للقوة النووية.

أخيرًا، كان طالب الدراسات العليا الهولندي المغامر، جيرارت هوفت[٨٥]، لديه الشجاعة والقدرة الأصيلة على التحمل لحرث هذه الغابة من الحدود اللا نهائية للمعادلة، ومن خلال براعته الشديدة أعاد تنظيم مجالات يانج-ميلس. في هذا الوقت، كانت أجهزة الكمبيوتر متطورة بما يكفي لتحليل هذه اللا نهائيات. قام برنامج الكمبيوتر الخاص به ببصق سلسلة من الأصفار التي تُمثل هذه التصحيحات الكمومية، كان يعلم أنه على حق.

جذبت أخبار هذا السبق العلمي انتباه علماء الفيزياء على الفور. كان الفيزيائي شيلدون جلاشو يهتف: «إما أن هذا الرجل أحمق تمامًا، أو أنه أكبر عبقري اخترق الفيزياء منذ سنوات!».

لقد كانت ضربة قوية من شأنها أن تجعل هوفت ومشرفه الرئيسي، مارتينوس فيلتمان، يفوزان بجائزة نوبل في عام ١٩٩٩. فجأة، أصبح

(٨٥) جيرارت هوفت **Gerardus't Hooft**: ولد جيرارت هوفت في ٥ يوليو ١٩٤٦ في مدينة دين هيلدر بهولندا، حصل على جائزة نوبل للفيزياء عام ١٩٩٩ بالاشتراك مع عالم الفيزياء الأمريكي مارتينوس فيلتمان. وقد جاء تقدير لجنة جائزة نوبل لهما عن قيامهما «بتوضيح التركيب الكمومي للقوى الضعيفة». وقد سُمي أحد النيازك باسمه ٩٤٩١ تكريمًا له.

هناك مجال جديد يمكن استخدامه لربط الجسيمات المعروفة في القوة النووية وتفسير الضعف. عند تطبيقه على الكواركات، سُمي مجال يانج-ميلس بـ«الغراء»، لأنه كان يعمل كالغراء لربط الكواركات معًا. (تُظهر المحاكاة الحاسوبية أن مجال يانج-ميلس يتكثف إلى مادة تشبه الحلوى، تقوم بعد ذلك بتثبيت الكواركات معًا، مثل الغراء). للقيام بذلك، يحتاج الكوارك الواحد من الأنواع الثلاثة، أو الألوان، إلى أن يتبع تناظر جيلمان للكواركات الثلاثة. لذلك بدأت نظرية جديدة عن القوة النووية القوية تحظى بقبول واسع. سُميت هذه النظرية الجديدة بـ«الديناميكا اللونية الكمومية» (QCD)، وهي تمثل اليوم أفضل تمثيل معروف للقوة النووية القوية.

بوزون هيجز[٨٦] - جسيم الإله

بالتدريج، ظهرت نظرية جديدة من كل هذه الفوضى، تُسمى «النموذج القياسي»[٨٧]. كان الارتباك المحيط بحديقة حيوان الجسيمات دون الذرية يزداد. قام مجال يانج-ميلس (الغراء) بتثبيت الكواركات معًا في النيوترون والبروتون، ووصف مجال آخر ليانج-ميلس (يُسمى جسيمات W وZ) التفاعل بين الإلكترونات والنيوترينوات.

ولكن ما منع القبول النهائي للنموذج القياسي هو عدم وجود القطعة

---

(٨٦) بيتر هيجز **Peter Higgs**: بروفيسور من المملكة المتحدة، مختص بفرع الفيزياء النظرية، ولد في ٢٩ مايو سنة ١٩٢٩. هو أيضًا بروفيسور سابق في جامعة إدنبرة لمجال الفيزياء النظري وعضو فخري بجمعية إدنبرة، اشتُهر أيضًا لاقتراحه في نظرية القوة الكهربائية الضعيفة وفي التناظر المنكسر. يُفسر هيجز أصل الكتلة للجسيمات الأولية عامة وبوزونات W وZ خاصة من خلال آلية هيجز التي ساهم فيها عدد من العلماء غيره، ويُعتبر اقتراحه بخصوص جسيمات هيجز من أهم الاقتراحات الخاصة بفيزياء الجسيمات الأولية.

(٨٧) نظرية النموذج القياسي **Standard model**: هي نظرية في فيزياء الجسيمات تقوم على وصف دقيق لثلاث قوى أساسية في الطبيعة، هي: القوى النووية الضعيفة والقوى النووية القوية والقوى الكهرومغناطيسية. كما تصف مجال هيجز الذي يعطي للجسيمات الأولية كتلتها وتصف الجسيمات الأولية التي تدخل في تركيب المادة. طُورت هذه النظرية كإحدى نظريات المجال الكمومي المتوافقة مع نظرية النسبية الخاصة والميكانيكا الكمومية، ولهذا تؤكد جميع التجارب المجراة صدق تنبؤات هذه النظرية، إلا أن النقص الأساسي فيها يكمن في عدم احتوائها على القوة الأساسية الرابعة، قوة الجاذبية.

الأخيرة من أحجية الصور للجسيمات، والتي تُسمى «بوزون هيجز»، أو أحيانًا «جسيم الإله». التناظر وحده لم يعد كافيًا. نحن بحاجة إلى طريقة لكسر هذا التناظر، لأن الكون الذي نراه من حولنا ليس متناظرًا بإتقان.

عندما ننظر إلى الكون اليوم، نرى القوى الأربع تعمل جميعها بشكل مستقل عن بعضها البعض. للوهلة الأولى، يبدو أن الجاذبية والضوء والقوى النووية ليس لديها أي شيء مشترك. لكن مع رجوعك بالزمن إلى الوراء، تبدأ هذه القوى في الالتقاء، ربما كانت قوة واحدة فقط في لحظة الخلق.

بدأت صورة جديدة في التطور تستخدم فيزياء الجسيمات لشرح أكبر لغز في علم الكونيات، وهو ولادة الكون. فجأة، بدأ مجالان مختلفان تمامًا؛ الميكانيكا الكمومية والنسبية العامة، بالتحول تدريجيًّا إلى مجال واحد.

في هذه الصورة الجديدة، عند لحظة الانفجار الأعظم اندمجت جميع القوى الأربع في قوة خارقة واحدة تطيع التناظر الرئيسي. يمكن لهذا التناظر الرئيسي أن يحول كل جسيمات الكون إلى بعضها البعض. كانت المعادلة التي تحكم هذه القوة العظمى هي معادلة الإله. كان تناسقه هو التناظر الذي استعصى على أينشتاين والفيزيائيين منذ ذلك الحين.

بعد الانفجار الأعظم، بدأ توسع الكون، وبالتالي بدأ يبرد، وبدأت القوى والتناظرات المختلفة في الانقسام، مُكوِّنة تناظرات القوة الضعيفة والقوية المجزأة للنموذج القياسي الحالي. تُسمى هذه العملية

«كسر التناظر». هذا يعني أننا بحاجة إلى آلية يمكنها كسر هذا التناظر الأصلي بدقة تاركة لنا النموذج القياسي. هذا هو المكان الذي أتى منه بوزون هيجز.

لتتخيل هذا، فكِّر في سد. الماء الموجود في الخزان له تناظر. إذا قمت بتدوير الماء، فإن الماء سيظل متشابهًا إلى حد كبير. نعلم جميعًا من التجربة أن المياه تتدفق إلى أسفل. هذا لأنه، وفقًا لقوانين نيوتن، يبحث الماء دائمًا عن حالة طاقة أقل. لذلك إذا انكسر السد، فسوف يندفع الماء فجأة في اتجاه مجرى النهر إلى حالة طاقة أقل. إذن الماء خلف السد في حالة طاقة أعلى. يُسمي الفيزيائيون حالة الماء خلف السد بـ«الفراغ الزائف» **false vacuum**، لأنه غير مستقر حتى يصل الماء خلف السد المكسور إلى الفراغ الحقيقي؛ أي أقل حالة طاقة في النهر أدناه. بعد كسر السد سيختفي التناظر الأصلي، لكن الماء وصل إلى حالته المستقرة الحقيقية.

يظهر هذا التأثير أيضًا عند تحليل الماء الذي بدأ في الغليان. قبل أن يغلي مباشرة، يكون الماء في فراغ كاذب. إنه غير مستقر ولكنه متناظر؛ أي يمكنك تدوير الماء وسيبدو الماء كما هو. لكن في النهاية، تتشكل فقاعات صغيرة، حيث توجد كل فقاعة في حالة طاقة أقل من المياه المحيطة بها. تبدأ كل فقاعة في التمدد، حتى تندمج فقاعات كافية ثم يغلي الماء.

وفقًا لهذا السيناريو، كان الكون في الأصل في حالة متناظرة تمامًا. كانت كل الجسيمات دون الذرية جزءًا من نفس التناظر، وكلها كانت

صفرية الكتلة. نظرًا لأن لديها كتلة صفرية يمكن إعادة ترتيبها ولكن ستبقى المعادلة كما هي. ومع ذلك، لسبب غير معروف، كانت غير مستقرة، كانت في حالة الفراغ الكاذب. المجال الضروري للتحول إلى الفراغ الحقيقي (لكن المكسور) هو مجال هيجز. مثل المجال الكهربائي لفاراداي الذي تغلغل في جميع أركان المكان، ملأ مجال هيجز أيضًا كل الزمكان.

لكن لسبب ما، انكسر تناظر مجال هيجز.

بدأت فقاعات صغيرة تتشكل داخل مجال هيجز. خارج الفقاعات، ظلت جميع الجسيمات عديمة الكتلة ومتماثلة. بينما داخل الفقاعة، كانت لبعض الجسيمات كتلة. مع تقدم الانفجار الأعظم، توسعت الفقاعة بسرعة، وبدأت الجسيمات في اكتساب كتل مختلفة، وانكسر التناظر الأصلي. في النهاية، وُجد الكون بأكمله في حالة فراغ جديدة داخل فقاعة عملاقة.

لذا بحلول سبعينيات القرن الماضي، بدأ العمل الشاق لعشرات الفيزيائيين يؤتي ثماره. بعد عقود من التجول في البرية، بدأوا أخيرًا في تركيب جميع قطع أحجية الصور معًا. لقد أدركوا أنه من خلال تجميع ثلاث نظريات (تُمثل القوى القوية والضعيفة والكهرومغناطيسية) يمكنهم كتابة مجموعة من المعادلات تتوافق حقًّا مع النتائج التي لُوحِظت في المختبر.

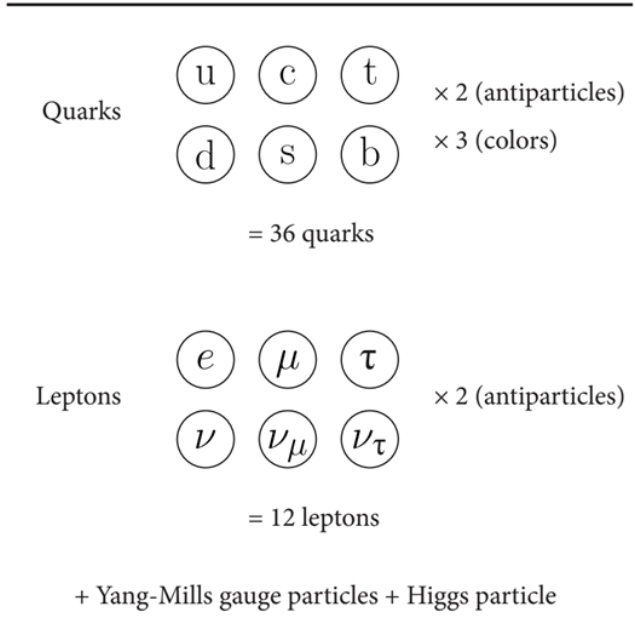
كان مفتاح حل الأحجية هو إنشاء تناظر رئيسي من خلال لصق ثلاثة تناظرات أصغر ومميزة معًا. وصف التناظر الأول القوة النووية

القوية التي خلطت ثلاثة كواركات معًا، ووصف التناظر الثاني القوة الضعيفة عن طريق خلط الإلكترونات والنيوترينوات، ووصف التماثل الثالث مجال ماكسويل الأصلي. كانت النظرية النهائية خرقاء، لكن كان من الصعب المجادلة بنجاحها.

نظرية كل شيء تقريبًا

بشكل ملحوظ، يمكن للنموذج القياسي أن يتنبأ بدقة بخصائص المادة على طول الطريق، حتى جزء من الثانية بعد الانفجار الأعظم.

على الرغم من أن النموذج القياسي يمثل أفضل فهم لدينا للعالم دون الذري، فقد كان هناك العديد من الفراغات الصارخة.



الشكل ٩ . النموذج القياسي عبارة عن مجموعة غريبة من الجسيمات دون الذرية، تصف بدقة كوننا الكمومي، وهو عبارة عن ستة وثلاثين كواركًا وكواركات مضادة، واثني عشر جسيمًا ضعيف التفاعل وجسيمات مضادة (تُسمى «اللبتونات»)، وتشكيلة كبيرة من مجالات يانج–ميلس وبوزونات هيجز، وهي جسيمات تنشأ عند إثارة مجال هيجز.

أولًا، لم يذكر النموذج القياسي الجاذبية. كانت هذه مشكلة كبيرة حيث إن الجاذبية هي القوة التي تتحكم في سلوك الكون بشكل واسع النطاق. وفي كل مرة حاول الفيزيائيون إضافتها إلى النموذج القياسي لم يتمكنوا من حل المعادلات. التصحيحات الكمومية الناتجة عنها، بدلًا من أن تكون صغيرة، تتحول إلى لا نهائية، تمامًا مثل جسيمات الديناميكا الكهربائية الكمومية ويانج-ميلس. لذا فإن النموذج القياسي غير قادر على تسليط الضوء على بعض أسرار الكون العنيدة، مثل: ما الذي حدث قبل الانفجار الأعظم؟ وماذا يكمن داخل الثقب الأسود؟ (سنعود إلى هذه الأسئلة المهمة لاحقًا).

ثانيًا، نشأ النموذج القياسي عن طريق الربط اليدوي للنظريات التي وصفت القوى المختلفة، وبالتالي كانت النظرية الناتجة خليطًا. (قارنها أحد علماء الفيزياء بلصق خنزير الأرض مع منقار البطة مع الحوت، ثم أعلن أنه أكثر الكائنات أناقة في الطبيعة. وقيل إن الحيوان الناتج لن يحبه إلا أمه فقط!).

ثالثًا، يحتوي النموذج القياسي على عدد من المتغيرات أو المعاملات غير المحددة (مثل: كتل الكواركات وقوة التفاعلات). في الواقع، هناك ما يقرب من عشرين ثابتًا لا بد من وضعها يدويًّا، من دون أي فهم على الإطلاق لمصدر هذه الثوابت أو ما تمثله.

رابعًا، احتوت، ليس على نسخة واحدة فقط، بل على ثلاث نسخ متطابقة أو أجيال من الكواركات والجلونات والإلكترونات والنيوترينوات في النموذج القياسي. (إجمالًا، هناك ستة وثلاثون

كواركًا، بثلاثة ألوان، وثلاثة أجيال، جنبًا إلى جنب مع الجسيمات المضادة المقابلة، وعشرين متغيرًا أو معاملًا حرًّا). وجد الفيزيائيون صعوبة في تصديق أن أي شيء أخرق وغير عملي يمكن أن يكون النظرية الأساسية للكون.

مصادم الهدرونات الكبير

نظرًا لوجود الكثير من الأحداث العلمية على المحك، فإن الدول مستعدة لإنفاق المليارات لإنشاء الجيل التالي من مسرعات الجسيمات. في الوقت الحالي، هيمن على العناوين الرئيسية مصادم الهدرونات الكبير خارج جنيف بسويسرا، وهو أكبر آلة علمية بُنيت على الإطلاق، وتكلف أكثر من ١٢ مليار دولار ويمتد على محيط سبعة عشر ميلًا تقريبًا.

يبدو مصادم الهدرونات الكبير (المعروف اختصارًا بالـLHC) مثل كعكة دونات ضخمة يمتد على الحدود بين سويسرا وفرنسا. داخل الأنبوب، تتسارع البروتونات حتى تصل إلى طاقة عالية للغاية. ثم تصطدم بحزمة بروتونات أخرى عالية الطاقة تتحرك في الاتجاه المعاكس، مُطلِقة ١٤ تريليون إلكترون فولت من الطاقة، وخالقة وابلًا هائلًا من الجسيمات دون الذرية. ثم تستخدم أجهزة الكمبيوتر الأكثر تقدمًا في العالم لفهم هذه السحابة من الجسيمات.

الهدف من مصادم الهدرونات الكبير هو تكرار الظروف التي وُجدت بعد فترة وجيزة من الانفجار الأعظم، وبالتالي تكوين هذه الجسيمات غير المستقرة. أخيرًا، في عام ٢٠١٢، عُثر على بوزون هيجز، آخر قطعة من أحجية النموذج القياسي.

على الرغم من كونه يومًا رائعًا لفيزياء الطاقة العالية، فإن الفيزيائيين أدركوا أنه لا يزال هناك طريق طويل لنقطعه. من ناحية، يصف النموذج القياسي جميع تفاعلات الجسيمات من أعماق البروتون إلى حواف الكون المرئي. المشكلة هي أن النظرية غير منطقية. في الماضي، في كل مرة يسبر فيها الفيزيائيون الطبيعة الأساسية للمادة تبدأ تناظرات جديدة وأنيقة في الظهور، لذلك وجد الفيزيائيون صعوبة في أن الطبيعة على المستوى الأساسي تبدو وكأنها تُفضل النظرية المتهورة.

على الرغم من نجاحاتها العملية فمن الواضح للجميع أن النموذج القياسي هو مجرد عملية إحماء للنظرية النهائية التي لم تأتِ بعد.

في هذه الأثناء، بدأ الفيزيائيون مدعومين بالنجاحات المذهلة لنظرية الكم عند تطبيقها على الجسيمات دون الذرية، بإعادة النظر في نظرية النسبية العامة، التي فتر الاهتمام بها لعقود. الآن يضع الفيزيائيون أعينهم على هدف أكثر طموحًا؛ دمج النموذج القياسي مع الجاذبية، مما يعني أن المرء سيحتاج إلى نظرية كمومية للجاذبية نفسها. ستكون هذه حقًّا نظرية لكل شيء، حيث يمكن حساب جميع التصحيحات الكمومية لكل من النموذج القياسي والنسبية العامة.

في السابق، كانت نظرية الاستبدال غير المتناهي خفيفة اليد وذكية، وقد ألغت جميع التصحيحات الكمومية للديناميكا الكهربائية الكمومية والنموذج القياسي. كان المفتاح هو تمثيل القوى الكهرومغناطيسية والنووية كجسيمات، تُسمى الفوتونات وجسيمات يانج-ميلس، ثم سنُلوِّح باليد بطريقة سحرية لجعل اللا نهائيات تختفي عن طريق إعادة

امتصاصها في مكان آخر. تم كنس كل اللا نهائيات غير المرغوب بها تحت السجادة.

بسذاجة، اتبع الفيزيائيون هذا التقليد العريق وأخذوا نظرية أينشتاين في الجاذبية وقدموا جسيمًا نقطيًّا جديدًا للجاذبية، يُسمى الجرافيتون[٨٨]. لذا فإن السطح الأملس الذي قدمه أينشتاين لتمثيل نسيج الزمكان أصبح الآن محاطًا بسحابة من تريليونات جسيمات الجرافيتون الصغيرة.

للأسف، فإن حقيبة الحيل التي تراكمت بشكل مؤلم بواسطة الفيزيائيين على مدى السبعين عامًا الماضية للقضاء على هذه اللا نهائيات فشلت بالنسبة للجرافيتون. كانت التصحيحات الكمومية التي أنشأتها الجرافيتونات لا نهائية ولا يمكن إعادة امتصاصها في مكان آخر. هنا، اصطدم الفيزيائيون بجدار من الطوب. وصلت سلسلة انتصاراتهم إلى نهاية مفاجئة.

بدأ الفيزيائيون المحبطون بعد ذلك في محاولة للوصول إلى هدف أكثر تواضعًا. غير قادرين على إنشاء نظرية كمومية كاملة عن الجاذبية، حاولوا حساب ما يحدث عندما نحاول تطبيق الكمومية على المادة

(٨٨) الجرافيتون **Graviton**: هو جسيم أولي افتراضي حامل لقوة الجاذبية في إطار نظرية المجال الكمومي. في حال وجوده، يجب أن يكون الجرافيتون عديم الكتلة (قوة الجاذبية ذات مدى لا نهائي)، وبوزون ذو عدد كم مغزلي مساوٍ لـ٢. في نظرية الجاذبية الكمومية، الجرافيتون هو الافتراض الكمومي للجاذبية، وهو جسيم أولي يتوسط قوة تفاعل الجاذبية. لا توجد نظرية كاملة للمجال الكمومي للجرافيتونات بسبب مشكلة رياضية بارزة تتعلق بالاستبدال غير المتناهي في النسبية العامة.

العادية، تاركين الجاذبية وشأنها. كان هذا يعني حساب التصحيحات الكمومية بسبب النجوم والمجرات مع الحفاظ على الجاذبية كما هي. من خلال كمومية الذرة فقط، كان من المأمول إنشاء نقطة انطلاق واكتساب نظرة ثاقبة للهدف الأكبر المتمثل في صياغة نظرية كمومية للجاذبية.

كان هذا هدفًا أكثر تواضعًا، لكنه فتح الباب على مصراعيه لمجموعة مذهلة من الظواهر الفيزيائية الرائعة الجديدة التي من شأنها أن تتحدى الطريقة التي ننظر بها إلى الكون. فجأة، واجه علماء الفيزياء الكمومية أكثر الظواهر غرابة في الكون: الثقوب السوداء، والثقوب الدودية، والمادة المظلمة والطاقة المظلمة، والسفر عبر الزمن، وحتى خلق الكون نفسه.

لكن اكتشاف هذه الظواهر الكونية الغريبة أصبح أيضًا تحديًا لنظرية كل شيء، والتي يجب أن تشرح الآن ليس فقط الجسيمات دون الذرية المألوفة للنموذج القياسي، ولكن كل هذه الظواهر الغريبة التي تُثري الخيال البشري.

* * *

الفصل الخامس

الكون المظلم

في عام ٢٠١٩، نشرت الصحف والمواقع عبر كوكب الأرض أخبارًا مثيرة على الصفحة الأولى: التقط علماء الفلك للتو أول صورة لثقب أسود. رأى المليارات من الناس الصورة الصارخة، كرة حمراء من الغاز الناري الساخن مع صورة ظل أسود مستدير في المنتصف. استحوذ هذا الكائن الغامض على خيال الجمهور وسيطر على الأخبار. لم تُثِر الثقوب السوداء اهتمام الفيزيائيين وفتنتهم فحسب، بل دخلت أيضًا في وعي الجمهور، وظهرت في العديد من العروض العلمية الخاصة وعدد كبير من الأفلام.

يقع الثقب الأسود الذي صوره تلسكوب أفق الحدث[٨٩] داخل المجرة M87، على بُعد ٥٣ مليون سنة ضوئية من الأرض. هذا الثقب

(٨٩) تلسكوب أفق الحدث Event Horizon Telescope: هو مشروع تعاون دولي يهدف إلى إنشاء منظومة كبيرة من التلسكوبات تتضمن شبكة عالمية من التلسكوبات الراديوية بالإضافة إلى جمع البيانات من العديد من محطات قياس التداخل طويلة المدى (VLBI) حول الأرض. الهدف هو مراقبة كل من الثقب الأسود الفائق المسمى الرامي A * والذي يقع في مركز درب التبانة، وكذلك الثقب الأسود الأكبر في وسط المجرة الإهليلجية العملاقة مسييه ٨٧، مع دقة زاوية قادرة على مراقبة أفق الحدث للثقب الأسود.

الأسود أشبه بوحش، إذ يبلغ وزنه خمسة مليارات ضعف كتلة الشمس. يمكن لنظامنا الشمسي بأكمله، حتى بعد بلوتو، أن يقع بسهولة داخل صورة الظل الأسود في الصورة.

لتحقيق هذا الإنجاز المذهل، ابتكر علماء الفلك تلسكوبًا فائقًا. عادة، لا يكون التلسكوب الراديوي كبيرًا بما يكفي لاستيعاب إشارات الراديو الخافتة الكافية لإنشاء صورة لجسم بعيد جدًّا. لكن علماء الفلك كانوا قادرين على تصوير هذا الثقب الأسود عن طريق تجميع الإشارات من خمس إشارات فردية منتشرة في جميع أنحاء العالم. باستخدام أجهزة الكمبيوتر العملاقة لدمج هذه الإشارات المتنوعة بعناية، قاموا بشكل فعال بإنشاء تلسكوب راديوي عملاق واحد بحجم كوكب الأرض نفسه. كان هذا المركب قويًّا جدًّا بحيث يمكنه من حيث المبدأ اكتشاف برتقالة على سطح القمر من الأرض.

لقد جددت مجموعة من الاكتشافات الفلكية الجديدة الرائعة مثل هذا الاهتمام بنظرية أينشتاين في الجاذبية. للأسف، على مدار الخمسين عامًا الماضية، كان البحث في النسبية العامة لأينشتاين راكدًا نسبيًّا. كانت المعادلات صعبة للغاية، وغالبًا ما تتضمن مئات المتغيرات؛ والتجارب على الجاذبية باهظة الثمن، حيث اشتملت على أجهزة كشف **detectors** يبلغ عرضها أميالًا.

المفارقة هي أنه على الرغم من أن أينشتاين كانت لديه تحفظات حول نظرية الكمومية، فإن النهضة الحالية في أبحاث النسبية قد غذَّاها اندماج النظريتين، من خلال تطبيق نظرية الكم على النسبية العامة. كما

ذكرنا، فإن الفهم الكامل للجرافيتون وكيفية التخلص من التصحيحات الكمومية يعتبر صعبًا للغاية، لكن التطبيق الأكثر تواضعًا للنظرية الكمومية على النجوم (تجاهل تصحيحات الجرافيتون) فتح السماء لموجة من الاكتشافات العلمية المذهلة.

ما هو الثقب الأسود؟

يمكن إرجاع الفكرة الأساسية للثقب الأسود إلى اكتشاف نيوتن لقوانين الجاذبية. أعطانا كتابه المبادئ صورة بسيطة: إذا أطلقت قذيفة مدفعية بطاقة كافية، فسوف تدور حول الأرض بالكامل، ثم تعود إلى نقطتها الأصلية.

ولكن ماذا يحدث إذا صوبت قذيفة المدفع بشكل مستقيم إلى الأعلى؟ أدرك نيوتن أن قذيفة المدفع ستصل في النهاية إلى أقصى ارتفاع ثم تعود إلى الأرض. ولكن مع وجود طاقة كافية، ستصل كرة المدفع إلى سرعة الهروب؛ أي السرعة اللازمة للهروب من جاذبية الأرض والارتفاع في الفضاء، وعدم العودة أبدًا.

إنه تمرين بسيط، فباستخدام قوانين نيوتن يمكن حساب سرعة الهروب من الأرض، والتي تبلغ ٢٥٠٠٠ ميل في الساعة. هذه هي السرعة التي كان على رواد الفضاء بلوغها للوصول إلى القمر في عام ١٩٦٩. إذا لم تصل إلى سرعة الهروب، فإنك إما ستدخل مدار الأرض وإما تعود إليها مرة أخرى.

في عام ١٧٨٣، طرح عالم فلك يُدعى جون ميشيل[٩٠] على نفسه

(٩٠) جون ميشيل **John Michell** (٢٥ ديسمبر ١٧٢٤ - ٢١ أبريل ١٧٩٣): هو فيلسوف ورجل دين طبيعي إنجليزي، قدم رؤى رائدة في مجموعة واسعة من المجالات العلمية، بما في =

سؤالًا بسيطًا ومخادعًا: ماذا يحدث إذا كانت سرعة الهروب هي سرعة الضوء؟ إذا انبعث شعاع ضوئي من نجم عملاق شديد الضخامة لدرجة أن سرعة هروبه هي سرعة الضوء، فربما لا يمكن حتى لضوئه الهروب. كل الضوء المنبعث من هذا النجم سوف يعود في النهاية إلى النجم. سماها ميشيل بالنجوم المظلمة، الأجرام السماوية التي ظهرت باللون الأسود لأن الضوء لم يتمكن من الإفلات من جاذبيتها الهائلة. بالعودة إلى القرن الثامن عشر الميلادي، لم يكن العلماء يعرفون الكثير عن فيزياء النجوم، ولم يعرفوا القيمة الصحيحة لسرعة الضوء، وبالتالي تلاشت هذه الفكرة لعدة قرون.

في عام ١٩١٦، خلال الحرب العالمية الأولى، كان الفيزيائي الألماني كارل شفارتسشيلد[٩١] متمركزًا على الجبهة الروسية كرجل

= ذلك علم الفلك والجيولوجيا والبصريات والجاذبية. يعتبر «أحد أعظم العلماء المجهولين في كل العصور»، هو أول شخص معروف اقترح وجود الثقوب السوداء، وأول من اقترح أن الزلازل تنتقل في موجات (زلزالية). نظرًا لإدراكه أن النجوم المزدوجة كانت نتاج الجاذبية المتبادلة، فقد كان أول من طبق الإحصاء على دراسة الكون. اخترع جهازًا لقياس كتلة الأرض وشرح كيفية تصنيع مغناطيس صناعي. وقد أُطلق عليه اسم «الأب» لكلٍّ من علم الزلازل والقياس المغناطيسي. وفقًا لأحد الصحفيين العلميين «يبدو أن بعض التفاصيل الخاصة بعمل ميشيل تبدو بالفعل كما لو كانت ممزقة من صفحات كتاب مدرسي لعلم الفلك في القرن العشرين». وصفت الجمعية الفيزيائية الأمريكية (APS) ميشيل بأنه «متقدم بفارق كبير عن معاصريه العلميين لدرجة أن أفكاره تلاشت بسبب غموضها، حتى أُعيد اختراعها بعد أكثر من قرن». صرحت الجمعية أنه على الرغم من أنه «أحد أكثر العلماء ذكاءً وأصالةً في عصره، فإن ميشيل لا يزال مجهولًا تقريبًا اليوم، ويرجع ذلك جزئيًا إلى أنه لم يفعل الكثير لتطوير وتعزيز أفكاره الرائدة».

(٩١) كارل شفارتسشيلد **Karl Schwarzschild** عالم فيزياء وفلك ألماني، (٩ أكتوبر ١٨٧٣م – ١١ مايو ١٩١٦م): وهو والد عالم الفيزياء الفلكية مارتن شفارتسشيلد. قدم=

مدفعية. في أثناء القتال في خضم حرب دموية، وجد وقتًا لقراءة وهضم ورقة أينشتاين الشهيرة عام ١٩١٥ التي تقدم النسبية العامة. في ضربة رائعة من البصيرة الرياضية، وجد شفارتسشيلد بطريقة ما حلًّا دقيقًا لمعادلات أينشتاين. بدلًا من حل معادلات المجرة أو الكون، وهو أمر صعب للغاية، بدأ بأبسط الأشياء الممكنة، وهو جسيم نقطي صغير. هذا الجسم، بدوره، سيقترب من مجال الجاذبية لنجم كروي كما يُرى من مسافة بعيدة. هنا يمكن مقارنة نظرية أينشتاين بالتجربة.

كان رد فعل أينشتاين على ورقة شفارتسشيلد مبتهجًا. أدرك أينشتاين أن حل معادلاته هذا سيسمح له بإجراء حسابات أكثر دقة باستخدام نظريته، مثل انحناء ضوء النجوم حول الشمس وتذبذب كوكب عطارد. لذلك بدلًا من عمل تقديرات تقريبية لمعادلاته، يمكنه حساب النتائج الدقيقة من نظريته. كان هذا سبقًا هائلًا من شأنه أن يثبت أهميته لفهم الثقوب السوداء. (توفي شفارتسشيلد بعد وقت قصير من اكتشافه الرائع. حزن أينشتاين، وكتب تأبينًا مؤثرًا له).

ولكن على الرغم من التأثير الهائل لحل شفارتسشيلد، فقد أثار أيضًا بعض الأسئلة المحيرة. منذ البداية كانت لحلِّه خصائص غريبة

= شفارتسشيلد أول حل دقيق لمعادلات أينشتاين للمجال في النظرية النسبية العامة، ذلك الحل كان خاصًّا بكتلة واحدة غير دوارة، ويعد حل شفارتسشيلد مؤديًا إلى اشتقاق نصف قطر شفارتسشيلد، وهو عبارة عن حجم أفق الحدث لثقب أسود غير دوار. نجح شفارتسشيلد في التوصل إلى هذا الحل عندما كان يخدم في الجيش الألماني في أثناء اندلاع الحرب العالمية الأولى، وقد توفي في عام ١٩١٦ أي بعد عام من تقديمه لهذا الحل الذي طوره خلال وجوده في الجبهة الروسية، بسبب تأثره بمرض فقاع المناعة الذاتية، وقد أطلق اسمه على أحد الكويكبات وسُمي ٨٣٧ Schwarzschilda تخليدًا لاسمه.

دفعت حدود فهمنا للمكان والزمن بعيدًا. كان محيط نجم فائق الكتلة عبارة عن كرة خيالية (أطلق عليها اسم المجال السحري واليوم نسميه أفق الحدث). بعيدًا عن هذه الكرة يشبه مجال الجاذبية جاذبية نيوتونية لنجم عادي، لذلك يمكن استخدام حل شفارتسشيلد لحساب جاذبيته بشكل تقريبي. ولكن إذا اقتربت بشكل مؤسف من النجم ومررت عبر أفق الحدث، فستظل محاصرًا إلى الأبد وستُسحق حتى الموت. أفق الحدث هو نقطة اللا عودة: أي شيء يقع فيه لا يخرج أبدًا.

لكن مع اقترابك من أفق الحدث، ستبدأ أشياء أغرب في الحدوث. على سبيل المثال، قد تصادف أشعة ضوئية محتجزة لمليارات السنين ولا تزال تدور حول النجم. ستكون الجاذبية التي تسحب قدمك أكبر من الجاذبية التي تسحب رأسك، لذلك ستتمدد مثل المكرونة الإسباجيتي. في الواقع، يصبح هذا التمدد (التحول للإسباجيتي) شديدًا لدرجة أنه حتى ذرات جسمك تتفكك في النهاية.

بالنسبة لشخص يشاهد هذا الحدث الرائع من مسافة بعيدة، سيبدو كما لو أن الزمن داخل سفينة فضائية على حافة أفق الحدث قد تباطأ تدريجيًّا. في الواقع، بالنسبة إلى شخص خارجي سيبدو كما لو أن الزمن قد توقف عندما تصل السفينة إلى أفق الحدث. اللافت للنظر هو أنه بالنسبة لرواد الفضاء في السفينة سيبدو كل شيء طبيعيًّا في أثناء مرورهم عبر أفق الحدث -طبيعي طبعًا أي حتى يتمزقوا.

كان هذا المفهوم غريبًا جدًّا لدرجة أنه لعقود عديدة سيعتبر خيالًا علميًّا، وهو منتج ثانوي غريب لمعادلات أينشتاين ليس موجودًا في العالم

الحقيقي. كتب عالم الفلك آرثر إدينجتون ذات مرة أنه «يجب أن يكون هناك قانون للطبيعة يمنع النجم من التصرف بهذه الطريقة السخيفة!».

حتى إن أينشتاين كتب ورقة بحثية يجادل فيها بأنه في ظل الظروف العادية لا يمكن أن تتشكل الثقوب السوداء أبدًا. في عام ١٩٣٩ وضح أنه لا يمكن أبدًا ضغط دوامة كرة غاز بفعل الجاذبية داخل أفق الحدث.

ومن المفارقات أنه في نفس العام وضح روبرت أوبنهايمر وتلميذه هارتلاند سنايدر أن الثقوب السوداء يمكن أن تتشكل بالفعل من عمليات طبيعية لم يتوقعها أينشتاين. إذا بدأت بكونها نجمًا عملاقًا أكبر بعشر إلى خمسين مرة من شمسنا، فعندما يستهلك وقوده النووي يمكن أن ينفجر في النهاية على شكل مستعر أعظم، إذا أصبحت بقايا الانفجار نجمًا مضغوطًا بفعل الجاذبية إلى أفق الحدث، إذن يمكن أن ينهار إلى ثقب أسود. (شمسنا ليست ضخمة بما يكفي للخضوع لانفجار مستعر أعظم، وأفق الحدث يبلغ عرضه نحو أربعة أميال. لا توجد عملية طبيعية معروفة يمكنها ضغط شمسنا إلى ميلين، وبالتالي لن تصبح شمسنا ثقبًا أسود).

اكتشف الفيزيائيون أن هناك نوعين على الأقل من الثقوب السوداء. النوع الأول هو بقايا نجم عملاق كما هو موصوف أعلاه، النوع الثاني من الثقوب السوداء يوجد في مركز المجرات. يمكن أن تكون هذه الثقوب السوداء المجرية أكبر بملايين أو حتى مليارات المرات من كتلة شمسنا. يعتقد العديد من علماء الفلك أن الثقوب السوداء تقع في مركز كل مجرة.

في العقود القليلة الماضية، حدد علماء الفلك المئات من الثقوب السوداء المحتملة في الفضاء. في مركز مجرتنا درب التبانة يوجد ثقب أسود وحش تبلغ كتلته ما بين مليونين وأربعة ملايين ضعف كتلة شمسنا. وهي تقع في كوكبة القوس. (لسوء الحظ، تحجب غيوم الغبار هذه المنطقة، لذلك لا يمكننا رؤيتها. ولكن إذا لم تكن هناك سحب الغبار هذه، فكل ليلة ستضيء سماء الليل كرة نارية رائعة من النجوم مع وجود ثقب أسود في مركزها، ربما ستتفوق في ضيائها على القمر. سيكون حقًّا مشهدًا رائعًا).

نشأت الإثارة الأخيرة بشأن الثقوب السوداء عندما طُبقت نظرية الكم على الجاذبية. أطلقت هذه الحسابات العنان لمنبع من الظواهر غير المتوقعة التي تختبر حدود خيالنا. كما اتضح، كان مرشدنا عبر هذه المنطقة المجهولة مشلولًا تمامًا.

كان ستيفن هوكينج شابًّا عاديًّا كطالب دراسات عليا في جامعة كامبريدج، بلا توجه أو هدف. لقد كان يتحرك من خلال كونه فيزيائيًّا، لكن قلبه لم يكن موجودًا. من الواضح أنه كان عبقريًّا، لكنه بدا غير مركز. ولكن في أحد الأيام، شُخصت حالته بأنه مصاب بالتصلب الجانبي الضموري (ALS) وقيل له إنه سيموت في غضون عامين. على الرغم من أن عقله سيكون سليمًا، فإن جسده سيضيع بسرعة، ويفقد كل قدرته على العمل حتى وفاته. مكتئبًا ومصدومًا حتى النخاع أدرك أن حياته حتى تلك اللحظة قد ضاعت.

قرر تكريس السنوات القليلة المتبقية من حياته لعمل شيء مفيد. بالنسبة له، كان هذا يعني حل واحدة من أكبر المشكلات في الفيزياء: تطبيق نظرية الكم على الجاذبية. لحسن الحظ، تطور مرضه بشكل أبطأ بكثير مما توقعه أطباؤه، لذلك كان قادرًا على مواصلة البحث الرائد في هذا المجال الجديد حتى وهو مقيد على كرسي متحرك وفاقد السيطرة على أطرافه وعلى حباله الصوتية. لقد دعاني هوكينج ذات مرة لإلقاء محاضرة في مؤتمر كان ينظمه. كان من دواعي سروري زيارة منزله، وفوجئت بالأدوات المختلفة التي سمحت له بمواصلة بحثه. كان أحد الأجهزة عبارة عن أداة تقليب الصفحات. يمكنك وضع دفتر يوميات في هذه الأداة الغريبة، وسوف تقلب الصفحات تلقائيًّا. لقد تأثرت بالدرجة التي كان مصممًا بها على عدم السماح لمرضه أن ينتقص من هدف حياته.

في ذلك الوقت، عمل معظم علماء الفيزياء النظرية على نظرية الكم، لكن حفنة صغيرة من المرتدين والمتطرفين حاولوا إيجاد المزيد من الحلول لمعادلة أينشتاين. سأل هوكينج نفسه سؤالًا مختلفًا ولكنه عميق: ماذا يحدث عندما تجمع بين هذين النظامين وتطبق الميكانيكا الكمومية على ثقب أسود؟

لقد أدرك أن حل مشكلة حساب التصحيحات الكمومية للجاذبية صعب للغاية. لذلك اختار مهمة أبسط: حساب التصحيحات الكمومية فقط للذرات داخل الثقب الأسود، وتجاهل التصحيحات الكمومية الأكثر تعقيدًا للجرافيتونات.

كلما قرأ عن الثقوب السوداء، أدرك أن هناك شيئًا ما خطأ. بدأ يشك في أن التفكير التقليدي -بأن لا شيء يمكن أن يفلت من الثقب الأسود- ينتهك نظرية الكم. في الميكانيكا الكمومية، كل شيء غير مؤكد. يبدو الثقب الأسود أسود تمامًا لأنه يمتص كل شيء تمامًا، لكن السواد التام انتهك مبدأ عدم التأكد، حتى السواد يجب أن يكون غير مؤكد.

لقد توصل إلى استنتاج ثوري مفاده أن الثقوب السوداء يجب أن تصدر وهجًا خافتًا للغاية من الإشعاع الكمومي.

أظهر هوكينج بعد ذلك أن الإشعاع المنبعث من الثقب الأسود هو في الواقع شكل من أشكال إشعاع الجسم الأسود. لقد حسب ذلك من خلال إدراك أن الفراغ لم يكن مجرد حالة من العدم، ولكنه في الواقع يغلي بالنشاط الكمومي. في نظرية الكم، حتى العدم الثابت يعج بحالة من عدم التأكد، حيث يمكن للإلكترونات والإلكترونات المضادة أن تقفز فجأة من الفراغ، ثم تصطدم وتختفي مرة أخرى في الفراغ. لذلك كان العدم في الواقع مزبدًا بالنشاط الكمومي. ثم أدرك بعد ذلك أنه إذا كان مجال الجاذبية شديدًا بدرجة كافية، يمكن إنشاء أزواج من الإلكترونات والإلكترونات المضادة من الفراغ، مما ينتج عنه ما يُسمى بالجسيمات الافتراضية[٩٢]، إذا سقط أحد أزواج الجسيمات

(٩٢) جسيم افتراضي **Virtual particle**: في الميكانيكا الكمومية هو جسيم ينشأ خلال فترة قصيرة جدًّا من الزمن في موقع ما، تتصف طبيعته بعدم التأكد من مقدار طاقته أو كمية حركته طبقًا لمبدأ عدم التأكد لهايزنبرج. حيث إن طاقة أو كمية حركة جسيم عبارة عن دالة للتموضع والزمن طبقًا للميكانيكا الكمومية.

في الثقب الأسود، بينما هربت الجسيمات الأخرى، فسيُخلق ما يُسمى الآن بإشعاع هوكينج. الطاقة اللازمة لتكوين هذا الزوج من الجسيمات تأتي من الطاقة الموجودة في مجال الجاذبية للثقب الأسود. نظرًا لأن الجسيم الثاني يترك الثقب الأسود إلى الأبد، فهذا يعني أن محتوى المادة الصافية والطاقة في الثقب الأسود ومجال الجاذبية الخاص به قد انخفض.

يُسمى هذا بتبخر الثقب الأسود ويصف المصير النهائي لجميع الثقوب السوداء: سوف تشع بلطف إشعاع هوكينج لتريليونات السنين، حتى تستنفد كل إشعاعاتها وتموت في انفجار ناري. لذلك حتى الثقوب السوداء لها عمر محدود.

تريليونات فوق تريليونات السنين من الآن، ستكون نجوم الكون قد استنفدت كل وقودها النووي وتصبح مظلمة. فقط الثقوب السوداء ستبقى على قيد الحياة في هذا العصر الكئيب. ولكن حتى الثقوب السوداء يجب أن تتبخر في النهاية، ولا تترك شيئًا سوى بحر من الجسيمات دون الذرية. سأل هوكينج نفسه سؤالًا آخر: ماذا يحدث إذا رميت كتابًا في ثقب أسود؟ هل فُقدت المعلومات في هذا الكتاب إلى الأبد؟

وفقًا للميكانيكا الكمومية، لا تُفقد المعلومات أبدًا. حتى إذا حرقت كتابًا، فمن خلال التحليل الدقيق لجزيئات الورق المحروق يمكنك إعادة بناء الكتاب بأكمله.

لكن هوكينج أثار عش الدبابير بقوله إن المعلومات التي أُلقيت

داخل الثقب الأسود ضاعت بالفعل إلى الأبد، وبالتالي فإن الميكانيكا الكمومية تنهار في ثقب أسود.

كما ذكرنا سابقًا، قال أينشتاين ذات مرة إن «الله لا يلعب النرد مع العالم»؛ أي أنه لا يمكنك اختزال كل شيء إلى الصدفة وعدم اليقين. وأضاف هوكينج: «أحيانًا يرمي الله النرد حيث لا يمكنك العثور عليه»، مما يعني أن النرد قد يسقط داخل ثقب أسود، حيث قد لا تصمد قوانين الكم. لذا فإن قوانين عدم التأكد تفشل عندما تتجاوز أفق الحدث.

منذ ذلك الحين، دافع فيزيائيون آخرون عن الميكانيكا الكمومية، موضحين أن النظريات المتقدمة مثل نظرية الأوتار، والتي سنناقشها في الفصل التالي، يمكن أن تحافظ على المعلومات حتى في وجود الثقوب السوداء. في النهاية أقر هوكينج بأنه ربما كان مخطئًا. لكنه اقترح الحل الجديد الخاص به. ربما عندما ترمي كتابًا في ثقب أسود فإن المعلومات لا تضيع إلى الأبد كما كان يُعتقد سابقًا، لكنها تعود للخارج على شكل إشعاع هوكينج. يُشفر إشعاع هوكينج الخافت كل المعلومات اللازمة لإعادة إنشاء الكتاب الأصلي. لذلك ربما كان هوكينج مخطئًا، لكن الحل الصحيح يكمن في الإشعاع الذي وجده سابقًا.

في الختام، إذا كانت المعلومات المفقودة في الثقب الأسود لا تزال مسألة مستمرة، ومناقشتها محتدمة بين علماء الفيزياء، فإننا في النهاية قد نضطر إلى الانتظار حتى نحصل على النظرية الكمومية النهائية للجاذبية التي تتضمن تصحيحات كمية الجرافيتون. في أثناء ذلك، تحول هوكينج إلى السؤال المحير التالي الذي يتضمن الجمع بين نظرية الكم والنسبية العامة.

عبر الثقب الدودي[٩٣]

إذا كانت الثقوب السوداء تلتهم كل شيء، فأين تذهب كل هذه الأشياء؟

الإجابة المختصرة هي أننا لا نعرف. قد نجد الإجابة في النهاية عن طريق توحيد نظرية الكم مع النسبية العامة.

فقط عندما نجد أخيرًا النظرية الكمومية للجاذبية (وليس فقط المادة) يمكننا الإجابة عن هذا السؤال: ماذا يوجد في الجانب الآخر من الثقب الأسود؟

لكن إذا قبلنا نظرية أينشتاين بشكل أعمى أو على علاتها، فإننا نقع في مشكلة، لأن معادلاته تتنبأ بأن قوة الجاذبية في مركز الثقب الأسود أو في بداية الزمن لا نهائية، وهو أمر لا معنى له.

---

(٩٣) الثقب الدودي **wormhole**: هو في الحقيقة ممرات دودية تخيلية موجودة داخل الثقوب السوداء، لكنها حتى الآن أسيرة النظرية الرياضية، فهي لم تُرصد بأي طريقة، وذلك لصعوبة الكشف عما يحتويه الثقب الأسود. وكما ذُكر في النظرية التي طرحتها فهي قد تسمح للمسافر في أحدها بأن يخرج إلى كون آخر أو زمن آخر، لأنها ممرات كون-زمنية، وربما تتصل بالثقوب البيضاء من الطرف الآخر منها. يُعرف الثقب الدودي أيضًا باسم جسر أينشتاين-روزين، وهو خاصية طوبوغرافية افتراضية من الزمكان، من شأنها أن تكون في الأساس طريقًا «مختصرًا» من خلال الزمكان. والثقب هو مثل الكثير من الأنفاق مع وجود طرفين كل في نقطة منفصلة في الزمكان.

ولكن في عام ١٩٦٣ وجد عالم الرياضيات روي كير[٩٤] حلًّا جديدًا تمامًا لمعادلات أينشتاين الخاصة بالثقب الأسود الدوار. في السابق، في عمل شفارتسشيلد، انهارت الثقوب السوداء في نقطة ثابتة صغيرة تُسمى المفردة[٩٥]، حيث أصبحت مجالات الجاذبية لا نهائية وسُحِقَ كل شيء في نقطة واحدة. ولكن إذا قمنا بحل معادلات أينشتاين لثقب أسود دوار، وجد كير أن أشياء غريبة تحدث.

أولًا، الثقب الأسود لا ينهار إلى نقطة. بدلًا من ذلك، ينهار إلى حلقة تدور بسرعة. (قوى الطرد المركزي للحلقة الدوارة قوية بما يكفي لمنع الحلقة من الانهيار تحت تأثير جاذبيتها).

---

(٩٤) روي باتريك كير **Roy Patrick Kerr**: هو عالم رياضيات نيوزيلندي اكتشف هندسة كير، وهي حل دقيق لمعادلة أينشتاين للنسبية العامة. يمثل حله نموذجًا لمجال الجاذبية خارج جسم هائل دوار غير مشحون، بما في ذلك ثقب أسود دوار. توقع حله لمعادلات أينشتاين دوران الثقوب السوداء قبل اكتشافها.

(٩٥) المفردة أو التفرد **Singularity**: في الرياضيات هو نقطة يكون عندها التابع الرياضي غير معرف، أي ليست له قيمة، وبالتالي يفشل التابع في إيجاد سلوك عند هذه النقطة، على سبيل المثال هذا التابع: $f(x)=1/x$ على خط الأعداد يملك هذا التابع نقطة تفرد عند $x = 0$ وعندها يكون التابع مساويًا لـ $\pm\infty$ وليس معرفًا.

يشير مصطلح مفردة الجاذبية **Gravitational Singularity** إلى موقع في الزمكان يصبح فيه مجال جاذبية الأجرام الفلكية لا نهائي بطريقة لا تعتمد على نظام الإحداثيات. والمقصود هو وزن لا نهائي لحجم معين في ظروف هذا المكان، عندما يكون الضغط على الذرات من جميع الجهات في جسم معين داخل ثقب أسود مثلًا لا نهائي، يؤدي إلى تفتت الذرات وانطوائها على نفسها، مختزلة المسافات الشاسعة بين سطح الذرة وأنويتها، وبالتالي تكسير لنوى الذرات وتحطمها مع مكوناتها الذرية (الكواركات)، تحت ضغط هائل لا نهائي في قلب ثقب أسود (نصف قطر شفارتسشيلد). والقيم المستخدمة لقياس شدة مجال الجاذبية هي القيم العددية للانحناءات الثابتة للزمكان، والذي يتضمن قياس كثافة المادة. وبما أن هذه القيم تصبح لا نهائية في إطار التفرد، فإن قوانين الزمكان الطبيعية لا يمكن أن تُوجَد حينذاك.

ثانيًا، إذا سقط المرء عبر هذه الحلقة، فمن الممكن ألا يُسحَق حتى الموت على الإطلاق، ولكن قد يمر عبر الحلقة. الجاذبية داخل الحلقة محدودة بالفعل.

ثالثًا، تشير الرياضيات إلى أنه في أثناء مرور المرء عبر الحلقة، يمكنه دخول عالم موازٍ. إنه يترك عالمنا حرفيًّا ويدخل إلى عالم شقيق آخر. فكِّر في ورقتين مرصوصتين فوق بعضهما البعض. إذا أدخلت ماصة في كل منهما. بالمرور عبر هذه الماصة، تترك كونًا واحدًا وتدخل إلى كون موازٍ. هذه الماصة تُسمى ثقبًا دوديًّا.

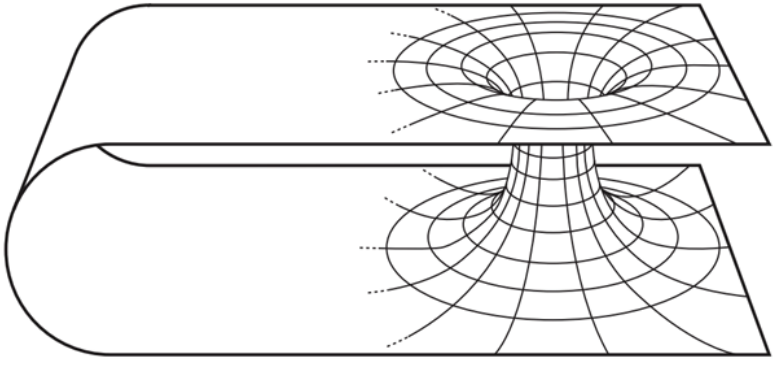
رابعًا، عندما يدخل المرء الحلقة مرة أخرى، يمكنه الانتقال إلى عالم آخر. مثل استخدام المصعد في مبنى سكني، فإنك تنتقل من طابق إلى آخر، من كون إلى آخر. في كل مرة يدخل فيها المرء إلى الثقب الدودي، يمكنه دخول عالم جديد تمامًا. لقد قدم هذا صورة جديدة مذهلة للثقب الأسود. في مركز الثقب الأسود الدوار، نجد شيئًا يشبه زجاجة (أليس في بلاد العجائب). من ناحية، لدينا ريف أكسفورد الهادئ بإنجلترا. ولكن إذا أدخلت يدك من خلال الزجاجة، فسوف ينتهي بك الأمر في مكان آخر تمامًا.

خامسًا، إذا نجح المرء في المرور عبر الحلقة، فهناك أيضًا احتمال أن ينتهي به الأمر في منطقة بعيدة من نفس الكون. لذلك يمكن أن يكون الثقب الدودي مثل نظام مترو أنفاق، يأخذ طريقًا مختصرًا غير مرئي عبر المكان والزمن. تُظهِر الحسابات أنه قد يكون قادرًا على التحرك بسرعة أكبر من سرعة الضوء، أو حتى السفر إلى الوراء في الزمن، ربما من دون

انتهاك القوانين الفيزيائية المعروفة.

هذه الاستنتاجات الغريبة مهما كانت مستحيلة لا يمكن رفضها بسهولة لأنها حلول لمعادلة أينشتاين، وهي تصف الثقوب السوداء الدوارة التي نعتقد الآن أنها النوع الأكثر شيوعًا.

قُدمت الثقوب الدودية لأول مرة من قبل أينشتاين نفسه في عام ١٩٣٥، في ورقة بالمشاركة مع ناثان روزين. لقد تخيلا وجود ثقبين أسودين مرتبطين معًا، وهما يشبهان أنبوبين في الزمكان. إذا وقع المرء في أنبوب واحد، فسوف يُدفَع إلى نهاية الأنبوب الآخر من دون أن يُسحَق حتى الموت.



الشكل ١٠. من حيث المبدأ، قد يتمكن المرء افتراضيًّا من الوصول إلى النجوم أو حتى الماضي من خلال المرور عبر الثقب الدودي.

هناك هذا السطر الشهير في رواية تي إتش وايت «ذات مرة وملك من المستقبل»: «كل شيء ليس ممنوعًا فهو إلزامي». يأخذ الفيزيائيون

هذه الجملة على محمل الجد. ما لم يكن هناك قانون فيزيائي ضد ظاهرة ما، فربما هي موجودة في مكان ما من الكون.

على سبيل المثال، على الرغم من صعوبة تكوين الثقوب الدودية، فقد توقع بعض الفيزيائيين أن الثقوب الدودية ربما كانت موجودة في بداية الزمن ثم توسعت بعد الانفجار الأعظم. ربما هي موجودة بشكل طبيعي. قد ترى تلسكوباتنا في الواقع في يوم من الأيام ثقبًا دوديًّا في الفضاء. على الرغم من أن الثقوب الدودية قد أشعلت مخيلة كُتَّاب الخيال العلمي، فإن إنشاء واحد منها في المختبر يطرح مشكلات رهيبة.

أولًا، تحتاج إلى تجميع كمية هائلة من الطاقة الإيجابية، يمكن مقارنتها بالثقب الأسود، لفتح بوابة عبر الزمكان. هذا وحده يتطلب تكنولوجيا حضارة متقدمة للغاية. لذلك لا نتوقع أن يتمكن المخترعون الهواة من إنشاء ثقب دودي في مختبرات الطابق السفلي في أي وقت قريب.

ثانيًا، سيكون هذا الثقب الدودي غير مستقر وسيُغلق من تلقاء نفسه، ما لم يُضِف المرء مكونًا جديدًا غريبًا يُسمى المادة السلبية أو الطاقة السلبية، وهو يختلف تمامًا عن المادة المضادة. المادة والطاقة السلبية مثيرة للاشمئزاز، وهي التي ستمنع الثقب الدودي من الانهيار.

لم يرَ الفيزيائيون قَط مادة سلبية. في الواقع، سوف تخضع للجاذبية المضادة، لذلك سوف تصعد إلى الأعلى، بدلًا من أن تسقط إلى الأسفل. إذا كانت المادة السلبية موجودة على الأرض منذ مليارات السنين لكان من الممكن طردها بفعل جاذبية الأرض وقذفها إلى الفضاء الخارجي.

لذلك لا نتوقع أن نجد مادة سلبية على الأرض.

الطاقة السلبية على عكس المادة السلبية، موجودة في الواقع، ولكن فقط بكميات ضئيلة أصغر من أن تكون ذات قيمة عملية. فقط حضارة متقدمة جدًّا، ربما تكون أكثر تقدمًا منا بآلاف السنين، ستكون قادرة على تسخير ما يكفي من الطاقة الإيجابية والسلبية لإنشاء ثقب دودي ومن ثَم منعه من الانهيار.

ثالثًا، قد يكون الإشعاع الناتج عن الجاذبية نفسها (يُسمى إشعاع الجرافيتون) كافيًا للتسبب في انفجار الثقب الدودي.

في النهاية، يجب أن تنتظر الإجابة النهائية عن السؤال عما يحدث عندما تسقط في ثقب أسود نظرية حقيقية لكل شيء، تخضع المادة والجاذبية فيها للكمومية.

اقترح بعض الفيزيائيين بجدية الفكرة المثيرة للجدل التي مفادها أنه عندما تسقط النجوم في ثقب أسود، لا تُسحق في المفردة، ولكن بدلًا من ذلك تنفجر في الجانب الآخر من ثقب دودي، مما يؤدي إلى إنشاء ثقب أبيض **white hole**. يخضع الثقب الأبيض بالضبط لنفس المعادلات التي يخضع لها الثقب الأسود، باستثناء أن سهم الزمن معكوس، لذلك فإن الثقب الأبيض يتقيأ المادة. لقد بحث الفيزيائيون عن ثقوب بيضاء في الفضاء، لكنهم عادوا خالي الوفاض. الهدف من ذكر الثقوب البيضاء هو أنه ربما كان الانفجار الأعظم في الأصل ثقبًا أبيض، وأن جميع النجوم والكواكب التي نراها في السماء انطلقت من ثقب أسود، منذ نحو أربعة عشر مليار سنة.

النقطة المهمة هي أن نظرية كل شيء فقط يمكنها أن تخبرنا بما يكمن في الجانب الآخر من الثقب الأسود. فقط من خلال حساب التصحيحات الكمومية للجاذبية يمكننا الإجابة عن أعمق الأسئلة التي تثيرها الثقوب الدودية.

ولكن إذا كانت الثقوب الدودية ستأخذنا يومًا ما عبر المجرة على الفور، فهل يمكنها أيضًا أن تأخذنا إلى الماضي؟

السفر عبر الزمن

يعد السفر عبر الزمن عنصرًا أساسيًّا في الخيال العلمي، منذ كتاب هـ. ج. ويلز[٩٦] «آلة الزمن». يمكننا التحرك بحرية في ثلاثة أبعاد (للأمام، والجانب، والأعلى)، لذلك ربما كانت هناك طريقة للتحرك في البُعد الرابع؛ الزمن. تصور ويلز دخول آلة الزمن وتدوير قرص ثم التقدم بعد ذلك مئات الآلاف من السنين في المستقبل إلى عام ٨٠٢٧٠١ م.

منذ ذلك الحين، درس العلماء إمكانية السفر عبر الزمن. عندما اقترح أينشتاين لأول مرة نظريته في الجاذبية عام ١٩١٥، كان قلقًا من أن تسمح معادلاته للمرء بلف الزمن حتى يتمكن من العودة إلى الماضي، وهو ما اعتقد أنه يشير إلى وجود خلل في نظريته. لكن هذه المشكلة المزعجة أصبحت احتمالًا حقيقيًّا في عام ١٩٤٩، عندما وجد جاره في معهد برينستون الشهير للدراسات المتقدمة، عالم الرياضيات

(٩٦) هربرت جورج ويلز H. G. Wells: (مواليد ٢١ سبتمبر ١٨٦٦ في كنت، إنجلترا – ١٣ أغسطس ١٩٤٦ في لندن، إنجلترا)، كان روائيًّا وكاتب قصص قصيرة بريطانيًّا. من أشهر أعماله «آلة الزمن»، «الرجل الخفي»، «جزيرة الدكتور مورو»، «حرب العوالم»، «أوائل الرجال على القمر». يعتبر من مؤسسي أدب الخيال العلمي، وقد اكتسب شهرته بفضل رواياته التي تنتمي إلى ذاك الصنف الأدبي. بعكس معاصره جول فيرن فقد حوت روايات ويلز انتقادات اجتماعية هادفة ولم يكتفِ بسرد المغامرات.

العظيم كورت جودل[٩٧]، أنه إذا دار الكون وأمكن للمرء السفر حول هذا الكون الدوار بسرعة كافية، عندها يمكنه أن يعود إلى الماضي؛ أي يمكنك العودة قبل مغادرتك. لقد ذُهل أينشتاين من هذا الحل غير التقليدي. خلص أينشتاين في مذكراته أخيرًا إلى أنه على الرغم من كون السفر عبر الزمن ممكنًا في عالم جودل، فإنه يمكن رفضه «لأسباب مادية»، ذلك أن الكون يتوسع ولا يدور.

الآن، على الرغم من أن الفيزيائيين ما زالوا غير مقتنعين بإمكانية السفر عبر الزمن، فإنهم يأخذون السؤال على محمل الجد. لقد اكتشفت مجموعة متنوعة من الحلول لمعادلات أينشتاين التي تسمح بالسفر عبر الزمن.

بالنسبة لنيوتن، كان الزمن مثل السهم، بمجرد إطلاقه فإنه سيستمر من دون خطأ بسرعة موحدة في جميع أنحاء الكون. ثانية واحدة على الأرض هي ثانية واحدة في كل مكان في الفضاء. يمكن مزامنة الساعات في أي مكان في الكون. لكن بالنسبة لأينشتاين الزمن أشبه بالنهر. يمكن أن يتسارع أو يتباطأ لأنه يتعرج في طريقه عبر النجوم والمجرات. يمكن

(٩٧) كورت جودل **Kurt Gödel** (٢٨ أبريل ١٩٠٦ - ١٤ يناير ١٩٧٨): منطقي ورياضياتي وفيلسوف. ولد في برون في مورافيا فيما كان يُعرف باسم نمسا-المجر. بعد تفكُّك تلك المملكة أصبح جودل تشيكيا في عمر ١٢، ثم أصبح نمساويًّا في عمر ٢٣ وبدخول هتلر إلى النمسا وضمها إلى ألمانيا أصبح جودل مواطِنًا ألمانيًّا في عمر ٣٢. بعد انتهاء الحرب العالمية الثانية، سافر جودل إلى الولايات المتحدة حيث أصبح مواطِنًا أمريكيًّا وعمره اثنان وأربعون عامًا. من أهم إنجازاته مبرهنات عدم الاكتمال. نشر جودل مبرهنتَي عدم الاكتمال عام ١٩٣١ عندما كان عمره ٢٥ عامًا، وذلك بعد سنة واحدة من حصوله على شهادة الدكتوراه من جامعة فيينا.

أن يمر الزمن بمعدلات مختلفة عبر الكون. ومع ذلك، تنص الصورة الجديدة على أن نهر الزمن يمكن أن يحتوي على دوامات قد تعيدك إلى الماضي (يطلق عليها الفيزيائيون CTCs، أو المنحنيات المغلقة التي تشبه الزمن closed timelike curves). وربما يتفرع نهر الزمن إلى نهرين، وبالتالي ينقسم الخط الزمني، مكونًا كونين متوازيين.

كان هوكينج مفتونًا جدًّا بالسفر عبر الزمن لدرجة أنه وجَّه تحديًا لعلماء فيزيائيين آخرين. كان يعتقد أنه يجب أن يكون هناك قانون خفي للفيزياء، لم يعثر عليه بعد، أطلق عليه حدسية حماية التسلسل الزمني[٩٨]، والذي استبعد السفر عبر الزمن بشكل نهائي. لكن بقدر ما حاول فإنه لم يستطع قَط إثبات هذه الفرضية. هذا يعني أن السفر عبر الزمن قد يظل متسقًا مع قوانين الفيزياء، مع عدم وجود ما يمنع ظهور آلات الزمن.

كما قال لسانه إن السفر عبر الزمن غير ممكن، لأن «أين السائحون من المستقبل؟» في كل حدث تاريخي كبير، يجب أن يكون هناك جحافل من السياح وكاميراتهم في محاولات محمومة للحصول على

(٩٨) حدسية حماية التسلسل الزمني The chronology protection conjecture: هي فرضية اقترحها لأول مرة ستيفن هوكينج، مفادها أن قوانين الفيزياء التي تتجاوز تلك الخاصة بالنسبية العامة القياسية تمنع السفر عبر الزمن على جميع المقاييس باستثناء المقاييس المجهرية، حتى عندما تنص النظرية الأخيرة على أنه يجب أن يكون ممكنًا. (مثلًا في السيناريوهات التي يكون السفر أسرع من الضوء مسموحًا به). يُسمح بالسفر عبر الزمن رياضيًّا من خلال وجود منحنيات زمنية مغلقة في بعض حلول معادلات المجال للنسبية العامة. يجب التمييز بين حدسية حماية التسلسل الزمني والرقابة الزمنية التي يمر بموجبها كل منحنى مغلق زمنيًّا عبر أفق الحدث، مما قد يمنع المراقب من اكتشاف الانتهاك السببي (المعروف أيضًا باسم انتهاك التسلسل الزمني).

أفضل صورة للحدث لعرضها على أصدقائهم في المستقبل.

فكِّر للحظة في الأذى الذي يمكن أن يُحدِثه المرء إذا كانت لديه آلة زمن. إذا عاد بالزمن إلى الوراء، يمكنه المراهنة على سوق الأسهم وسيصبح ملياردیرًا. يمكنه تغيير مسار الأحداث الماضية. لن يكون هناك أبدًا تدوين للتاريخ. سيكون المؤرخون عاطلين عن العمل.

السفر عبر الزمن، بالطبع، لديه مشكلات خطيرة. هناك مجموعة من المفارقات المنطقية المرتبطة بالسفر عبر الزمن، مثل:

• جعل الحاضر مستحيلًا: إذا عدت بالزمن إلى الوراء لمقابلة جدك عندما كان طفلًا وقتلته، فكيف يمكنك حتى أن تُولَد؟

• آلة الزمن من العدم: شخص من المستقبل يمنحك سر السفر عبر الزمن. بعد سنوات، تعود بالزمن إلى الوراء وتعطي سر السفر عبر الزمن لنفسك الأصغر سنًّا. إذن من أين أتى سر السفر عبر الزمن؟

• أن تصبح والدتك: كتب كاتب الخيال العلمي روبرت هاينلاين[٩٩] عن أن تصبح أنت نفسك شجرة عائلتك. افترض أن فتاة

(٩٩) روبرت أنسون هاينلاين **Robert A. Heinlein** (٧ يوليو ١٩٠٧ – ٨ مايو ١٩٨٨): هو كاتب أمريكي متخصص في الخيال العلمي. غالبًا ما يُطلق عليه لقب «عميد كُتَّاب الخيال العلمي»، وقد كان واحدًا من الكتاب الأكثر تأثيرًا وإثارةً للجدل لهذا النوع في وقته. وضع روبرت معيارًا للمعقول العلمي والهندسي، وساعد في رفع مستويات الجودة الأدبية لهذا النوع من الروايات. كما يُعد من أوائل كُتَّاب الخيال العلمي الذين اقتحموا صفحات المجلات الرئيسية في أواخر الأربعينيات. كما كان واحدًا من روائيي الخيال العلمي ذوي الروايات الأكثر مبيعًا لعدة عقود. كان روبرت، وإسحاق أسيموف، وآرثر تشارلز كلارك، معروفين بلقب «الثلاثة الكبار» في الخيال العلمي. كان هاينلاين كاتبًا بارزًا لقصص قصيرة عن الخيال العلمي، واحدًا من مجموعة من الكُتَّاب الذين ظهروا على الساحة تحت رئاسة تحرير جون دبليو =

يتيمة كبرت لكنها تحولت إلى رجل، ثم يعود هذا الرجل المتحول إلى الزمن المناسب، ويلتقي بنفسه الأنثى لينجب منها طفلة، ثم يأخذ الرجل الطفلة إلى الماضي في الزمن المناسب ويتركها في نفس دار الأيتام، ثم يكرر الدورة. بهذه الطريقة، تصبح الفتاة الأولى والدتها وابنتها وجدتها وحفيدتها، إلخ.

في النهاية، قد يأتي الحل النهائي لكل هذه المفارقات عندما تُصاغ النظرية الكاملة للجاذبية الكمومية. على سبيل المثال، ربما عندما تدخل آلة الزمن، قد ينقسم خطك الزمني، وتقوم بإنشاء كون كمومي موازٍ. لنفترض أنك عدت بالزمن إلى الوراء وأنقذت أبراهام لنكولن من الاغتيال في مسرح فورد. إذن ربما تكون قد أنقذت أبراهام لنكولن ولكن في عالم موازٍ. ومن ثَم، فإن أبراهام لنكولن في كونك الأصلي قد مات بالفعل، ولن يُغير ذلك شيئًا. لكن الكون انقسم إلى كونين،

= كامبل، الابن، في مجلة الخيال العلمي المذهلة. في إطار قصص الخيال العلمي التي كتبها، تناول مرارًا وتكرارًا مواضيع اجتماعية بعينها: أهمية حرية الفرد والاعتماد على النفس، والتزام الأفراد الذي يدينون به لمجتمعاتهم، وتأثير الدين المنظم على الثقافة والحكومة، وميل المجتمع لقمع الفكر الانشقاقي، كما تناول أيضًا العلاقة بين الحب الجسدي والعاطفي، وكشف النقاب عن التركيبات الأسرية المختلفة غير التقليدية، وتكهن بتأثير السفر في الفضاء على الممارسات الإنسانية الثقافية. أدى نهجه في هذه المواضيع إلى آراء متباينة بدرجة كبيرة حول وجهات النظر التي يطرحها من خلال رواياته. فازت أربع من روايات هاينلاين بجوائز هوجو، فضلًا عن ثلاث روايات نالت جوائز «ريترو هوجو» بعد خمسين عامًا من النشر، مُنحت الجوائز بأثر رجعي للسنوات التي لم يتم فيها منح جوائز هوجو. كما فاز بجائزة جراند ماستر (**Grand Master Award**) الأولى، التي قدمها كُتَّاب الخيال العلمي بأمريكا (**Science Fiction Writers of America**)، للإبداعات التي قدمها في حياته. صاغ هاينلاين في رواياته كلمات أصبحت جزءًا من اللغة الإنجليزية، بما في ذلك «جروك» (**grok**) و«والدو» (**waldo**)، والمصطلح الشائع بين الناس «تانستافل» (**TANSTAAFL**) (لا يوجد شيء مجانًا).

وأنقذت الرئيس لنكولن في عالم موازٍ.

لذلك، بافتراض أن الخط الزمني يمكن أن ينقسم إلى كون موازٍ، يمكن حل جميع مفارقات السفر عبر الزمن.

لا يمكن الإجابة عن سؤال السفر عبر الزمن بشكل قاطع إلا عندما نتمكن من حساب تصحيحات الجرافيتون الكمومية، والتي تجاهلناها حتى الآن. طبَّق الفيزيائيون النظرية الكمومية على النجوم والثقوب الدودية، لكن المفتاح هو تطبيق النظرية الكمومية على الجاذبية نفسها عبر الجرافيتونات، الأمر الذي يتطلب نظرية لكل شيء.

هذا النقاش يثير أسئلة مثيرة للاهتمام. هل تستطيع الميكانيكا الكمومية تفسير طبيعة الانفجار الأعظم بشكل كامل؟ هل يمكن للميكانيكا الكمومية المطبقة على الجاذبية أن تجيب عن أحد الأسئلة العلمية العظيمة: ماذا حدث قبل الانفجار الأعظم؟

كيف خُلِقَ الكون؟

من أين جاء الكون؟ ما الذي وهب الحركة للكون؟ ربما تكون هذه بعضًا من أعظم الأسئلة في كل من علم اللاهوت والعلوم، موضوع تكهنات لا نهاية لها.

اعتقد قدماء المصريين أن الكون بدأ كبيضة كونية تطفو في النيل. اعتقد بعض البولينيزيين[١٠٠] أن الكون بدأ بجوزة هند كونية. بينما يعتقد المسيحيون أن الكون قد بدأ عندما قال الله: «ليكن النور!».

---

(١٠٠) البولينيزيون **Polynesians**: يشكل البولينيزيون مجموعة إثنية لغوية من الأشخاص المرتبطين ارتباطًا وثيقًا، والذين ينتمون إلى بولنيزيا (جزر في المثلث البولينيزي)، وهي منطقة شاسعة من أوقيانوسيا في المحيط الهادئ. يتتبعون أصولهم المبكرة في عصور ما قبل التاريخ إلى جزيرة جنوب شرق آسيا البحري، ويشكلون جزءًا من الشعوب الأسترونيزية مع الموطن الأصلي في تايوان. يتحدثون اللغات البولينيزية، وهي فرع من عائلة أوقيانوسية، من عائلة اللغات الأسترونيزية. في ٢٠١٢، كان هناك ما يقدر بمليوني بولينيزي في جميع أنحاء العالم، والغالبية العظمى منهم إما يسكنون الدول القومية البولينيزية المستقلة: ساموا، ونييوي وجزر كوك، وتونغا وفيجي، وتوفالو، أو يشكلون أقليات في بلدان مثل: أستراليا، وتشيلي (جزيرة إيستر) ونيوزيلندا، وفرنسا، (بولينزيا الفرنسية، ووالیس وفوتونا)، وأقاليم المملكة المتحدة، فيما وراء البحار (جزر بيتكيرن)، والولايات المتحدة (هاواي، وساموا الأمريكية). اكتسب البولينيزيون سمعة كملاحين عظماء –وصلت زوارقهم إلى أبعد الزوايا في المحيط الهادئ، مما سمح بالاستيطان في جزر بعيدة مثل هاواي، (جزيرة إيستر)، وأوتياروا (نيوزيلندا). أنجز سكان بولينيزيا هذه الرحلة باستخدام مهارات الملاحة القديمة، لقراءة النجوم، والتيارات، والسحب، وحركات الطيور، وهي المهارات التي انتقلت إلى الأجيال المتعاقبة، حتى يومنا هذا.

لقد سحر أصل الكون علماء الفيزياء أيضًا، خاصةً عندما أعطانا نيوتن نظرية مقنعة عن الجاذبية. لكن عندما حاول نيوتن تطبيق نظريته على الكون الذي نراه من حولنا واجه مشكلات.

في عام ١٦٩٢، تلقى نيوتن رسالة مزعجة من رجل الدين ريتشارد بنتلي[١٠١]. طلب فيها بنتلي من نيوتن أن يشرح عيبًا خفيًّا قد يكون ضارًّا في نظريته. إذا كان الكون محدودًا، وإذا كانت الجاذبية دائمًا جاذبة، وليست طاردة، فإن كل النجوم في الكون ستنجذب في النهاية إلى بعضها البعض. في الواقع، مع مرور الزمن، سوف يتحد الكون كله في نجمة واحدة عملاقة. لذلك يجب أن يكون الكون المحدود غير مستقر، ويجب أن ينهار في نهاية المطاف. نظرًا لأن هذا لا يحدث فلا بد أن هناك خللًا في نظرية نيوتن.

بعد ذلك، قال إن قوانين نيوتن تنبأت بكون غير مستقر حتى لو كان الكون لا نهائيًّا. في عالم لا نهائي، مع عدد لا نهائي من النجوم، سيكون

(١٠١) ريتشارد بنتلي **Richard Bentley** (٢٧ يناير ١٦٦٢ – ١٤ يوليو ١٧٤٢): عالم دين وعالم كلاسيكي وناقد إنجليزي، كما كان مدرسًا في كلية الثالوث في كامبريدج. كان بنتلي أول إنجليزي يُصنف في المرتبة الأولى مع أبطال التعلم الكلاسيكي، وكان معروفًا بنقده الأدبي. ويُطلق على بنتلي «مؤسس علم فقه اللغة». ويعود له الفضل في إنشاء المدرسة الإنجليزية الهلينية، وكان أول من قدم امتحانات كتابية تنافسية في جامعة غربية. يشتهر بنتلي بوجود مراسلات بينه وبين إسحاق نيوتن حول قوانين الجذب الفيزيائية بين النجوم، وكان نيوتن يرسل التناقضات التي يجدها في أبحاثه إليه لينتقدها ويعطي رأيه بها. ومن أحد الأمثلة انجذاب النجوم لبعضها مما قد يُسبب نظريًّا حسب أبحاث نيوتن إلى أنها تهوي في نقطة واحدة، كان الرد أن ذلك غير ممكن في عالم ثابت وغير متغير ولعدم وجود نقطة مركزية تهوي إليها النجوم.

مجموع كل القوى التي تجذب نجمًا من اليسار واليمين أيضًا لا نهائيًّا. ومن ثَم، فإن هذه القوى اللا نهائية ستمزق النجوم في النهاية، وبالتالي تتفكك كل النجوم.

انزعج نيوتن من هذه الرسالة، لأنه لم يفكر في تطبيق نظريته على الكون بأسره. في النهاية، توصل نيوتن إلى إجابة ذكية ولكنها غير كاملة عن هذا السؤال.

نعم، اعترف بأن الجاذبية إذا كانت دائمًا جاذبة وليست طاردة، فقد تكون النجوم في الكون غير مستقرة. لكن كانت هناك ثغرة في هذه الحجة. افترض أن الكون في معظمه متجانس تمامًا ولا نهائي في كل الاتجاهات. في مثل هذا الكون الثابت تلغي كل قوى الجاذبية بعضها البعض، ويصبح الكون مستقرًّا مرة أخرى. بالنظر إلى أي نجم، فإن قوى الجاذبية المؤثرة عليه من جميع النجوم البعيدة في اتجاهات مختلفة تصل في النهاية إلى الصفر، وبالتالي لا ينهار الكون.

على الرغم من أن هذا كان حلًّا ذكيًّا لهذه المشكلة، فقد أدرك نيوتن أنه لا يزال هناك عيب محتمل في حله. قد يكون الكون متجانسًا في معظمه في المتوسط لكن لا يمكن أن يكون متجانسًا تمامًا في جميع النقاط، لذلك يجب أن تكون هناك انحرافات صغيرة. مثل منزل من الورق، يبدو مستقرًّا، لكن أصغر عيب سيؤدي إلى انهيار الهيكل بأكمله. لذلك كان نيوتن ذكيًّا بما يكفي لإدراك أن الكون المنتظم اللا

متناهي كان مستقرًّا بالفعل، ولكنه كان دائمًا يتأرجح على حافة الانهيار. بعبارة أخرى، يجب أن يكون إلغاء القوى اللا نهائية دقيقًا للغاية وإلا سينهار الكون أو يتمزق.

وهكذا استنتج نيوتن بشكل نهائي أن الكون لا نهائي وموحد في معظمه ، ولكن في بعض الأحيان كان على الله أن يُعدل النجوم في الكون، حتى لا تنهار تحت أثر الجاذبية.

لماذا سماء الليل مظلمة؟

لكن هذا أثار مشكلة أخرى. إذا بدأنا بكون غير محدود ومنظم، فعندئذٍ في كل مكان ننظر فيه إلى الفضاء ستصطدم نظرتنا في النهاية بنجم. ونظرًا لوجود عدد لا حصر له من النجوم، يجب أن تكون هناك كمية لا حصر لها من الضوء تصدم أعيننا من جميع الاتجاهات.

يجب أن تكون سماء الليل بيضاء وليست سوداء. وهذا ما يُسمى بمفارقة أولبرز[١٠٢].

لقد حاول بعض أعظم العقول في التاريخ معالجة هذا السؤال الصعب. كبلر على سبيل المثال، رفض هذه المفارقة من خلال الادعاء بأن الكون محدود، وبالتالي لا يوجد تناقض. افترض آخرون أن سحب

---

(١٠٢) مفارقة أولبرز وتُسمى أيضًا مفارقة السماء المظلمة **Olbers' paradox**: هي مفارقة «تناقض ظاهري» في الفيزياء الفلكية وعلم الكونيات المادي، سُميت على اسم الفلكي الألماني هاينريش فيلهلم أولبرز (١٧٥٨–١٨٤٠)، وهي الحجة أن ظلمة السماء ليلًا تتعارض مع الافتراض بوجود كون ثابت لا نهائي وأبدي. وتناقش هذه المفارقة سؤالًا قد يبدو بسيطًا للوهلة الأولى: لماذا تبدو السماء داكنة في الليل؟ وقد طرح هذا التساؤل العالم الألماني أولبرز في القرن التاسع عشر. والسؤال الذي تبدو إجابته بسيطة للوهلة الأولى هو أعقد من ذلك: فلو افترضنا أن الكون الذي نعيش فيه هو كون لا متناهٍ، فسيوجد نجم (أو مجرة) على امتداد خط بصرنا، لو نظرنا في أي اتجاه فسنرى أن النجوم والمجرات موزعة بالتساوي في الكون أينما نظرنا، وبالتالي ستكون السماء كلها مضيئة بالليل.

هاينريش فيلهلم أولبرز **Heinrich Wilhelm Olbers** (١٧٥٨ – ١٨٤٠ م): هو طبيب وعالم فلك ألماني، اكتشف طريقة جديدة لحسبان مدارات المذنبات عام ١٧٧٩ م. واكتشف ٦ مذنبات وقام بحساب مدارات كثير من المذنبات، كما قام بتطوير طريقة لذلك (ملخص عن أسهل طريقة لحساب مدار مذنب) في ١٧٩٧، وأولبرز هو مكتشف الكوكبين بالاس وفيستا.

الغبار حجبت ضوء النجوم. (لكن هذا لا يمكن أن يفسر المفارقة لأنه في فترة زمنية لا نهائية، ستسخن سحب الغبار ثم تنبعث منها إشعاعات الجسم الأسود، على غرار النجم. وهكذا يصبح الكون أبيض مرة أخرى).

الإجابة النهائية قدمها في الواقع إدجار آلان بو[١٠٣] عام ١٨٤٨. ولأنه عالم فلك هاوٍ، كان مفتونًا بالمفارقة وقال إن سماء الليل سوداء لأننا إذا سافرنا في الزمن إلى الماضي، فسنواجه في النهاية انقطاعًا -الذي هو بداية الكون. بمعنى آخر، سماء الليل سوداء لأن عمر الكون محدود. نحن لا نتلقى الضوء من الماضي اللا نهائي الذي سيجعل سماء الليل بيضاء، ذلك لأن الكون لم يكن له ماضٍ لا نهائي. هذا يعني أن التلسكوبات التي تُحدق في أبعد النجوم ستصل في النهاية إلى سواد الانفجار الأعظم نفسه.

لذلك من المدهش فعلًا أنه من خلال التفكير الخالص، ومن دون إجراء أي تجارب على الإطلاق، يمكن للمرء أن يستنتج أن الكون يجب أن تكون له بداية.

---

(١٠٣) إدجار آلان بو **Edgar Allan Poe**: ولد في ١٩ يناير ١٨٠٩ - ٧ أكتوبر ١٨٤٩، وهو ناقد أدبي أمريكي ومؤلف وشاعر،ومحرر، ويعتبر جزءًا من الحركة الرومانسية الأمريكية. اشتُهرت حكاياته بالغموض والرعب، كان بو واحدًا من أقدم الممارسين الأمريكيين لفن القصة القصيرة، ويعتبر عمومًا مخترع نوع خيال التحري. وله الفضل في المساهمة في هذا النوع من الخيال العلمي الناشئ. كان أول كاتب أمريكي معروف يحاول كسب لقمة العيش من خلال الكتابة وحدها، مما أدى به إلى حياة صعبة ماليًّا ومهنيًّا.

النسبية العامة والكون

كان على أينشتاين أن يواجه هذه المفارقات المحيرة عندما صاغ النسبية العامة في عام ١٩١٥.

بالعودة إلى عشرينيات القرن الماضي، عندما بدأ أينشتاين لأول مرة تطبيق نظريته على الكون، أخبره علماء الفلك أن الكون ثابت، لا يتمدد ولا يتقلص. لكن أينشتاين وجد شيئًا مزعجًا في معادلاته. عندما حاول حلها أخبرته المعادلات أن الكون ديناميكي، إما أنه يتمدد أو يتقلص. (لم يكن يدرك ذلك حينها، ولكن هذا كان هو الحل للسؤال الذي طرحه ريتشارد بنتلي. لم ينهَرِ الكون تحت تأثير الجاذبية لأن الكون يتمدد، متغلبًا على الميل للانهيار).

من أجل العثور على كون ثابت، اضطر أينشتاين لإضافة عامل تصحيح (يُسمى الثابت الكوني **cosmological constant**) إلى معادلاته. من خلال تعديل قيمته يدويًّا، يمكنه إلغاء تمدد أو تقلص الكون.

في وقت لاحق عام ١٩٢٩، تمكن الفلكي إدوين هابل[١٠٤]،

(١٠٤) إدوين بويل هابل **Edwin Hubble** (٢٠ نوفمبر ١٨٨٩ – ٢٨ سبتمبر ١٩٥٣): فلكي أمريكي له دور كبير في استكشاف الفضاء الخارجي، عاش في شيكاغو ودرس الثانوية فيها، وكان طالبًا عاديًّا ومحبًّا للرياضة ومتفوقًا في القفز العالي، بدأ دراسته الأكاديمية بدراسة =

باستخدام تلسكوب مرصد جبل ويلسون العملاق في كاليفورنيا من تحقيق اكتشاف مذهل. كان الكون يتوسع بعد كل شيء، تمامًا كما تنبأت معادلات أينشتاين في الأصل. لقد حقق هذا الاكتشاف التاريخي من خلال تحليل انزياح دوبلر للمجرات البعيدة. (عندما يتحرك نجم بعيدًا عنا، يتمدد الطول الموجي لضوئه، بحيث يتحول إلى لون ضارب إلى الحمرة قليلًا. أما عندما يتحرك النجم نحونا، ينضغط الطول الموجي، لذلك يتحول إلى اللون الأزرق قليلًا. من خلال تحليل المجرات بعناية، وجد هابل أنه في الغالب تنزاح المجرات نحو الأحمر، وبالتالي تبتعد عنا. إذن: الكون يتوسع).

في عام ١٩٣١، زار أينشتاين مرصد جبل ويلسون والتقى بهابل. لما أُخبر أينشتاين أن الثابت الكوني غير ضروري، وأن الكون يتوسع بعد كل شيء، اعترف بأن الثابت الكوني كان «خطأ فادحًا». (في الواقع، كما سنرى، عاد الثابت الكوني في السنوات الأخيرة على الطاولة، لذلك حتى أخطاء أينشتاين الفادحة تفتح مجالات جديدة تمامًا للبحث العلمي).

كان من الممكن أيضًا أخذ هذه النتيجة خطوة أخرى إلى الأمام

= القانون في جامعة أكسفورد في بريطانيا، إلا أنه ترك الدراسة هناك معتقدًا أن هذه الدراسة لا تُرضي طموحه، حيث كانت رغبته هي دراسة الفلك. ويعتبر واحدًا ممن ساهموا في تطوير علم الكون الفيزيائي في القرن العشرين. وأثبت أن المجرات ليست ثابتة في الكون، بل كلها تتحرك وتبتعد عنا. بذلك أثبت أن المجرات تتباعد عن بعضها البعض بسرعة متناسبة مع ابتعادها، وسُميت هذه العلاقة بقانون هابل سنة ١٩٢٩، والذي ساهم كثيرًا في اعتماد نظرية الانفجار الكبير.

وحساب عمر الكون. نظرًا لأن هابل كان بمقدوره أن يحسب المعدل الذي تتحرك به المجرات بعيدًا، فمن الممكن «تشغيل شريط الفيديو للخلف» وحساب المدة التي حدث فيها هذا التوسع. جاءت الإجابة الأصلية عن عمر الكون بـ **1.8** مليار سنة. (وهو أمر محرج، إذ كان معروفًا أن الأرض أقدم من ذلك –**4.6** مليار سنة. لكن لحسن الحظ أن أحدث بيانات من القمر الصناعي بلانك تُحدد عمر الكون عند **13.8** مليار سنة).

الشفق الكمومي للانفجار العظيم

حدثت الثورة التالية في علم الكونيات عندما بدأ الفيزيائيون في تطبيق النظرية الكمومية على الانفجار الأعظم. تساءل الفيزيائي الروسي جورج جاموف[١٠٥] إذا كان الكون قد بدأ بانفجار هائل فائق السرعة، فإن بعض هذه الحرارة ستبقى على قيد الحياة إلى اليوم. إذا طبقنا النظرية الكمومية على الانفجار الأعظم، فلا بد أن كرة النار الأصلية كانت راديتور أو مشعاعًا كموميًّا للجسم الأسود. نظرًا لأن خصائص مشعاع الجسم الأسود معروفة جيدًا، فمن الممكن حساب الإشعاع الذي يمثل الوهج اللاحق للانفجار العظيم.

باستخدام التجارب البدائية المتاحة عام ١٩٤٨، قدَّر جاموف وزملاؤه رالف ألفير وروبرت هيرمان أن درجة حرارة الشفق اللاحق للانفجار العظيم يجب أن تكون اليوم نحو خمس درجات فوق الصفر المطلق. (العدد الفعلي هو 2.73 درجة كلفن) هذه هي درجة حرارة

(١٠٥) جورج جاموف **Георгий Антонович Гамов George Gamow**: هو عالم فيزياء روسي، ولد ٤ مارس ١٩٠٤ وتوفي في ١٩ أغسطس عام ١٩٦٨. كان يقوم بالبحث العلمي في الفيزياء النظرية وفي علم الكون الفيزيائي. اكتشف جاموف تحلُّل ألفا بطريق الأنفاق الكمومية، وقام بأبحاث عديدة في مجال النشاط الإشعاعي لأنوية الذرات، وتطوُّر النجوم، وتخليق العناصر في النجوم، وتخليق النوكليدات، وله بحوث في الانفجار الأعظم وفي إشعاع الخلفية الميكروني الكوني.

الكون بعد أن برد لمليارات السنين.

تم التحقق من هذا التنبؤ في عام ١٩٦٤ عندما استخدم آرنو بينزياس وروبرت ويلسون[١٠٦] تلسكوب هولمدل الراديوي العملاق giant Holmdel radio telescope للكشف عن هذا الإشعاع المتبقي في الفضاء. (في البداية، اعتقدوا أن إشعاع الخلفية هذا ناتج عن خلل في أجهزتهم. وفقًا للأسطورة، أدركوا خطأهم عندما ألقوا محاضرة في برينستون، وقال أحد الحضور: «إما أنكم قد اكتشفتم فضلات للطيور، أو خلق الكون». ولاختبار ذلك، كان عليهم أن يتخلصوا بعناية من كل فضلات الحمام من التلسكوب الراديوي).

اليوم، ربما يكون إشعاع الخلفية الكونية الميكروي Cosmic microwave background هو الدليل الأكثر إقناعًا للانفجار العظيم.

---

(١٠٦) آرنو بينزياس **Arno Penzias**: ولد في ٢٦ أبريل ١٩٣٣ في ميونيخ بألمانيا، ثم رحل مع والديه إلى الولايات المتحدة الأمريكية، وهو عالم فيزياء أمريكي، حاز جائزة نوبل للفيزياء عام ١٩٧٨ عن «اكتشافه للأشعة الخلفية الكونية الميكرونية»، وشاركه في الجائزة زميله في هذا الاكتشاف روبرت ويلسون (روبرت ويلسون **Robert Woodrow Wilson**) (مواليد ١٠ يناير ١٩٣٦)، كما شاركهما في الجائزة بيوتر كابيتسا.

بيوتر كابيتسا **Пётр Леони́дович Капи́ца**: اسمه الكامل بيوتر ليونيدوفيتش كابيتسا، (٨ يوليو ١٨٩٤ في كرونشتادت – ٨ أبريل ١٩٨٤ في موسكو)، كان فيزيائيًّا روسيًّا، أبوه كان يعمل مهندسًا، عاش فترة المراهقة في مدينة سانت بطرسبرغ ودرس فيها الفيزياء وتخرج عام ١٩١٨. اشتغل ابتداءً من عام ١٩٢١ لدى إرنست رذرفورد في مختبر كافنديش كمدير، وكان مهتمًّا بدراسة موضوع علم الظواهر المغناطيسية، وأيضًا في مختبر القمر في جامعة كامبريدج بإنجلترا. بعد عودته من جديد إلى الاتحاد السوفييتي عام ١٩٣٤ أصبح مديرًا لمعهد الفيزياء في موسكو. تزوج من آنَّا، ابنة عالم الرياضيات التطبيقية الشهير ألكسي كريلوف. اكتشف عام ١٩٣٧ الميوعة الفائقة للهيليوم. تحصل على جائزة نوبل في الفيزياء على الاختراعات والاكتشافات الأساسية التي قام بها في فيزياء الحرارة المنخفضة.

كما هو متوقع، تُظهِر صور الأقمار الصناعية الحديثة لإشعاع الخلفية كرة نارية موحدة من الطاقة موزعة بالتساوي حول الكون. (عندما تسمع صوتًا ثابتًا في الراديو (الشوشرة الإذاعية)، فإن بعضًا منه هو في الواقع من نتاج الانفجار الأعظم).

لقد أصبحت صور الأقمار الصناعية الآن دقيقة للغاية لدرجة أنه من الممكن اكتشاف تموجات **ripples** صغيرة جدًّا في إشعاع الخلفية نتيجة مبدأ عدم التأكد الكمومي. في لحظة الخلق، كان من المفترض أن تكون هناك تقلبات **fluctuations** كمومية تسببت في هذه التموجات. لقد انتهك الانفجار الأعظم السلس تمامًا مبدأ عدم التأكد. توسعت هذه التموجات في النهاية مع الانفجار الأعظم لتكوين المجرات التي نراها في كل مكان حولنا. (في الحقيقة إذا لم تكتشف أقمارنا الصناعية هذه التموجات الكمومية في إشعاع الخلفية، فإن غيابها كان سيقضي على الأمل في تطبيق النظرية الكمومية على الكون).

هذا يعطينا صورة جديدة رائعة للنظرية الكمومية. إن حقيقة وجودنا في مجرة درب التبانة، في وجود بلايين من المجرات الأخرى، ترجع إلى هذه التقلبات الكمومية الصغيرة في الانفجار الأعظم الأصلي. منذ مليارات السنين كل ما تراه من حولك كان نقطة صغيرة في إشعاع الخلفية هذا.

كانت الخطوة التالية في تطبيق النظرية الكمومية على الجاذبية عندما طبقت دروس النظرية الكمومية والنموذج القياسي على النسبية العامة.

التضخم[١٠٧]

مدعومَين بنجاح النموذج القياسي في سبعينيات القرن الماضي، تساءل الفيزيائيان آلان جوث وأندريه ليندي[١٠٨]: هل يمكن تطبيق الدروس المستفادة من النموذج القياسي والنظرية الكمومية مباشرة على الانفجار الأعظم؟

كان هذا سؤالًا جديدًا، لأن تطبيق النموذج القياسي على علم الكونيات لم يُكتشف بعد. لاحظ جوث وجود جانبين محيرين للكون لا يمكن تفسيرهما بالانفجار الأعظم كما تصوروه.

أولًا، هناك مشكلة التسطيح. تنص نظرية أينشتاين على أن نسيج الزمكان يجب أن يكون له انحناء طفيف. ولكن عند تحليل انحناء الكون، يبدو أنه أكثر انبساطًا مما تنبأت به نظرية أينشتاين. في الحقيقة

---

(١٠٧) التضخم الكوني **cosmic inflation**: هو مرحلة زمنية قصيرة بعد الانفجار الأعظم اشتد خلالها انتفاخ الكون وتضخم تضخمًا كبيرًا جدًّا، ويقترح حدوثها العلماء لكي يتفادوا عدم انكفاء الكون الناشئ على نفسه ثانيةً وفنائه.

(١٠٨) آلان جوث **Alan Guth**: ولد في ٢٧ فبراير ١٩٤٧ في ولاية نيوجيرسي في الولايات المتحدة، فيزيائي وفلكي أمريكي اشتُهر بأعماله في نظريات الجسيمات الأولية، وبكونه مؤسس نظرية التضخم الكوني.

أندريه ليندي (أندريه ديميتريفيتش ليندي) **Андре́й Дми́триевич Ли́нде**: ولد في ٢ مارس ١٩٤٨ في موسكو، عندما كانت عاصمة الاتحاد السوفييتي، وهو فيزيائي وفلكي أمريكي من أصل سوفييتي، اشتُهر بأعماله في نظرية التضخم الكوني.

يبدو أن الكون مسطح تمامًا مع خطأ تجريبي.

ثانيًا، أنه أكثر اتساقًا مما ينبغي. في الانفجار الأعظم كان يجب أن تكون هناك مخالفات وعيوب في كرة النار الأصلية. بدلًا من ذلك، يبدو أن الكون متجانس تمامًا بغض النظر عن المكان الذي نحدق فيه في السماء.

يمكن حل كلٍّ من هذه المفارقات من خلال استدعاء النظرية الكمومية، مع ظاهرة تُسمى تضخم جوث. أولًا، وفقًا لهذه الصورة، خضع الكون لتمدد بشاحن توربيني **turbocharged**، أسرع بكثير مما كان متوقعًا في الأصل للانفجار العظيم. أدى هذا التوسع الرائع إلى تسطيح الكون بشكل أساسي وإزالة أي انحناء ممكن للكون الأصلي.

ثانيًا، ربما كان الكون الأصلي غير منتظم، لكن قطعة صغيرة من ذلك الكون الأصلي كانت موحدة وتضخمت إلى حجم هائل. ومن ثَم، فإن هذا من شأنه أن يفسر سبب انتظام الكون اليوم، لأننا منحدرون من قطعة صغيرة وموحدة من كرة النار الأكبر التي أعطتنا الانفجار الأعظم.

الآثار المترتبة على التضخم بعيدة المدى تعني أن الكون المرئي الذي نراه من حولنا هو في الواقع قطعة صغيرة متناهية الصغر من كون أكبر بكثير لن نراه أبدًا لأنه بعيد جدًّا.

لكن ما الذي سبَّب التضخم في المقام الأول؟ ما الذي سبَّب حركته؟ لماذا توسع الكون أصلًا؟ لقد أخذ جوث بعض الإلهام من النموذج القياسي. النظرية الكمومية تبدأ بالتناظر، ثم تكسره مع بوزون هيجز لنحصل على الكون الذي نراه من حولنا. وبالمثل، وضع جوث

نظرية مفادها أنه ربما كان هناك نوع جديد من بوزون هيجز (يُسمى الإنفلاتون[١٠٩]) الذي جعل التضخم ممكنًا. كما هي الحال مع بوزون هيجز الأصلي، بدأ الكون في الفراغ الزائف الذي أعطانا حقبة التضخم السريع. ولكن بعد ذلك حدثت فقاعات كمومية داخل مجال الإنفلاتون. داخل الفقاعة، ظهر الفراغ الحقيقي حيث توقف التضخم. ظهر كوننا كواحدة من هذه الفقاعات. تباطأ الكون داخل هذه الفقاعة مما أعطانا التوسع الحالي.

حتى الآن، يبدو أن التضخم يتناسب مع البيانات الفلكية، فهي حاليًّا النظرية الرائدة. لكن لها عواقب غير متوقعة. إذا استدعينا النظرية الكمومية، فهذا يعني أن الانفجار الأعظم يمكن أن يحدث مرارًا وتكرارًا، وقد تتولد أكوان جديدة من كوننا طوال الوقت.

هذا يعني أن كوننا هو في الواقع فقاعة واحدة في حمام فقاعات من الأكوان. هذا يخلق أكوانًا متعددة من الأكوان المتوازية. هذا لا يزال يترك سؤالًا مزعجًا مفتوحًا: ما الذي دفع التضخم في المقام الأول؟ وهذا، كما سنرى في الفصل التالي، يتطلب نظرية أكثر تقدمًا؛ نظرية لكل شيء.

---

(١٠٩) إن مجال الإنفلاتون **inflaton**: هو مجال قياسي افتراضي، يُفترض أنه قاد التضخم الكوني في الكون المبكر جدًّا. يوفر هذا المجال -الذي افترضه آلان جوث في الأصل- آلية يمكن بواسطتها توليد فترة من التوسع السريع خلال ١٠-٣٥ إلى ١٠-٣٤ ثانية بعد التمدد الأولي، مما يشكل كونًا متوافقًا مع الخواص المكانية والتجانس المرصودين.

كون جامح

لا تعطينا النسبية العامة نظرة ثاقبة غير مسبوقة لبداية الكون فحسب، بل تعطينا أيضًا صورة عن مصيره النهائي. الأديان القديمة أعطتنا صورًا صارخة عن نهاية الزمن. اعتقد الفايكنج القدماء أن العالم سينتهي خلال راكناروك **Ragnarök**، أو شفق الآلهة، عندما تبتلع عاصفة ثلجية عملاقة الكوكب بأكمله، وستخوض الآلهة المعركة النهائية ضد أعدائهم السماويين. بالنسبة للمسيحيين، ينبئ سفر الرؤيا عن كوارث، ونوازل، ومجيء الفرسان الأربعة في صراع الفناء، الذي يسبق المجيء الثاني للمسيح.

لكن بالنسبة للفيزيائي، هناك طريقتان تقليديتان سينتهي بهما كل شيء. إذا كانت كثافة الكون منخفضة، فلن تكون هناك جاذبية كافية للنجوم والمجرات لعكس التمدد الكوني، وسوف يتمدد الكون إلى الأبد ويموت ببطء في التجمد الكبير **Big Freeze**. ستستهلك النجوم في النهاية كل وقودها النووي، وستتحول السماء إلى اللون الأسود، وحتى الثقوب السوداء ستتبخر. سينتهي الكون ببحر فائق البرودة لا حياة فيه من الجسيمات دون الذرية المنجرفة.

إذا كان الكون كثيفًا بدرجة كافية، فقد تكون جاذبية النجوم والمجرات كافية لعكس التمدد الكوني. ثم ستنهار النجوم والمجرات

في النهاية إلى الانسحاق الكبير **Big Crunch**، عندما ترتفع درجات الحرارة وتلتهم كل أشكال الحياة في الكون. (حتى إن بعض علماء الفيزياء قد توقعوا أن الكون قد يرتد بعد ذلك في انفجار عظيم آخر، مكونًا كونًا متذبذبًا **oscillating universe** [١١٠]).

لكن في عام ١٩٩٨ أصدر علماء الفلك إعلانًا مذهلًا قلب الكثير من معتقداتنا العزيزة وأجبرنا على مراجعة كتبنا المدرسية. من خلال تحليل المستعرات الأعظمية **supernovae** البعيدة في جميع أنحاء الكون، وجدوا أن الكون لم يكن يتباطأ في تمدده، كما كان يُعتقد سابقًا، ولكنه في الحقيقة يتسارع. في الحقيقة الكون في وضع الهروب أو الجموح **Runaway**.

كان عليهم مراجعة السيناريوهين السابقين، ثم ظهرت نظرية جديدة. ربما يموت الكون في شيء يُسمى التمزق الكبير **Big Rip**، حيث يتسارع توسع الكون إلى سرعة مذهلة. سوف يتوسع الكون بسرعة كبيرة بحيث تصبح سماء الليل سوداء بالكامل (حيث لا يمكن للضوء أن يصل إلينا من النجوم المجاورة) ويقترب كل شيء من الصفر المطلق.

في هذه الدرجة، لا يمكن أن توجد الحياة. حتى الجزيئات

---

(١١٠) النموذج المتذبذب **oscillating model**: هو أي نموذج كوني يتبع فيه الفضاء الكوني دورات ذاتية متكررة ولا نهائية. باختصار تعتبر نظرية الكون المتذبذب أن الكون يتبع سلسلة أبدية من الدورات، كل منها يبدأ مع الانفجار العظيم وينتهي مع الانسحاق الشديد، وبينهما يتمدد الكون لفترة من الزمن قبل أن تتسبب جاذبية المادة في انسحاقه وفق نظرية الارتداد العظيم.

الموجودة في الفضاء الخارجي تفقد طاقتها.

ما قد يقود هذا التوسع الجامح هو الشيء الذي تجاهله أينشتاين في عشرينيات القرن الماضي، الثابت الكوني، أو طاقة الفراغ، التي تُسمى الآن الطاقة المظلمة. من المدهش أن كمية الطاقة المظلمة في الكون هائلة. أكثر من 68.3٪ من كل المادة والطاقة في الكون تأخذ هذا الشكل الغامض. (بشكل جماعي، تشكل الطاقة المظلمة والمادة المظلمة[١١١] معظم المادة/ الطاقة، لكنهما كيانان متميزان ولا ينبغي الخلط بينهما).

ومن المفارقات أن هذا لا يمكن تفسيره بأي نظرية معروفة. إذا

---

(١١١) المادة المظلمة أو المادة المعتمة أو المادة السوداء **Dark matter**: في علم الفلك وعلم الكون هي مادة افتُرضت لتفسير جزء كبير من مجموع كتلة الكون. لا يمكن رؤية المادة المظلمة بشكل مباشر باستخدام التلسكوبات، حيث من الواضح أنها لا تبعث ولا تمتص الضوء أو أي إشعاع كهرومغناطيسي آخر على أي مستوى مهم. عوضًا عن ذلك، يُستدل على وجود المادة المظلمة وعلى خصائصها من آثار الجاذبية التي تمارسها على المادة المرئية، والإشعاع، والبنية الكبيرة للكون. وفقًا لفريق بعثة بلانك، واستنادًا إلى النموذج القياسي لعلم الكونيات، فإن مجموع الطاقة-الكتلة في الكون المعروف يحتوي على المادة العادية بنسبة ٤,٩٪، والمادة المظلمة بنسبة ٢٦,٨٪، والطاقة المظلمة بنسبة ٦٨,٣٪. وهكذا، فإن المادة المظلمة تُشكِّل ٨٤,٥٪ من مُجمل الكتلة في الكون، بينما الطاقة المظلمة بالإضافة إلى المادة المظلمة تُشكِّل ٩٥,١٪ من المحتوى الكلي للكون.

الطاقة المظلمة **Dark energy** في علم الكون وفيزياء الجسيمات تعرف بأنها أحد الأشكال الافتراضية للطاقة التي تملأ الفضاء، والتي تملك ضغطًا سالبًا. وحسب مفهوم نظرية النسبية العامة لأينشتاين، إن تأثيرها مثل هذا الضغط السالب يكون مشابهًا لقوة معاكسة للجاذبية في المقاييس الكبيرة. وإن افتراض مثل هذا التأثير هو الأكثر شعبية حاليًا لتفسير تمدد الكون بمعدل متسارع، كما يُشكِّل تفسيرًا معقولًا لجزء كبير من المادة المفقودة **missing mass** في الفضاء الكوني.

حاول المرء أن يحسب بشكل أعمى كمية الطاقة المظلمة في الكون (باستخدام افتراضات النسبية والنظرية الكمومية)، فإننا نجد قيمة أكبر بـ 10^{120} مرة من القيمة الفعلية! (هذا الرقم هو ١ متبوعًا بـ١٢٠ صفرًا).

هذا هو أكبر عدم تطابق في تاريخ العلم بأكمله. لا يمكن أن تكون الرهانات أكبر: المصير النهائي للكون معلق في الميزان.

هذا يمكن أن يخبرنا كيف سيموت الكون نفسه.

الجرافيتون: مطلوب حيًّا أو ميتًا!

على الرغم من ركود البحث في النسبية العامة لعقود من الزمان، فإن التطبيق الأخير للنظرية الكمومية على النظرية النسبية قد فتح آفاقًا جديدة غير متوقعة، خاصةً عندما استغلت أدوات جديدة قوية على الإنترنت. كان هناك ازدهار للأبحاث الجديدة.

لكن حتى الآن، ناقشنا فقط تطبيق الميكانيكا الكمومية على المادة التي تتحرك داخل مجالات الجاذبية في نظرية أينشتاين. لم نناقش سؤالًا أكثر صعوبة: تطبيق الميكانيكا الكمومية على الجاذبية نفسها في شكل جرافيتونات.

وهذا هو المكان الذي نواجه فيه أكبر سؤال على الإطلاق: إيجاد النظرية الكمومية للجاذبية، والتي أحبطت علماء الفيزياء العظماء لعقود. لذا دعونا نراجع ما تعلمناه حتى الآن. نتذكر أنه عندما نطبق النظرية الكمومية على الضوء، فإننا نقدم الفوتون الذي هو جسيم من الضوء. في أثناء تحرك هذا الفوتون، يكون محاطًا بمجالات كهربائية ومغناطيسية تتأرجح وتتخلل الفضاء وتطيع معادلات ماكسويل. هذا هو السبب في أن للضوء خصائص تشبه الجسيمات وتشبه الموجة. تكمن قوة معادلات ماكسويل في تناظراتها؛ أي القدرة على تحويل

المجالات الكهربائية والمغناطيسية إلى بعضها البعض.

عندما تصطدم الفوتونات بالإلكترونات، تعطي المعادلة التي تصف هذا التفاعل نتائج لا نهائية. ومع ذلك، باستخدام حقيبة الحيل التي ابتكرها فاينمان وشفينجر وتوموناجا والعديد غيرهم، يمكننا إخفاء كل هذه اللا نهائيات. النظرية الناتجة تُسمى الديناميكا الكهربائية الكمومية. بعد ذلك، طبقنا هذه الطريقة على القوة النووية. استبدلنا بمجال ماكسويل الأصلي مجال يانج-ميلس، واستبدلنا بالإلكترون سلسلة من الكواركات والنيوترينوات وما إلى ذلك. ثم قدمنا حقيبة جديدة من الحيل ابتكرها هوفت وزملاؤه للقضاء على كل اللا نهائيات مرة أخرى.

لذلك أمكن الآن توحيد ثلاث قوى من أربع قوى للكون في نظرية واحدة وهي النموذج القياسي. لم تكن النظرية الناتجة جميلة جدًّا، حيث أنشئت عن طريق تجميع تناظرات القوى القوية والضعيفة والكهرومغناطيسية، لكنها نجحت. لكن عندما نطبق هذه الطريقة المجربة والصحيحة على الجاذبية، فإننا نواجه مشكلات.

من الناحية النظرية، يجب تسمية جسيم الجاذبية بالجرافيتون. على غرار الفوتون، إنه جسيم نقطي، وبينما يتحرك بسرعة الضوء، يحاط بموجات الجاذبية التي تخضع لمعادلات أينشتاين.

حتى الآن الأمور جيدة جدًّا، لكن تحدث المشكلة عندما يصطدم الجرافيتون بالجرافيتون والذرات الأخرى. الاصطدام الناتج يخلق إجابات لا نهائية. عندما يحاول المرء تطبيق حقيبة الحيل المصاغة

بشكل مؤلم على مدار السبعين عامًا الماضية، نجد أنها جميعًا تفشل. لقد حاولت أعظم عقول القرن حل هذه المشكلة، لكن لم ينجح أحد.

من الواضح أنه يجب استخدام نهج جديد تمامًا، حيث تم التحقق من كل الأفكار السهلة ومن ثَم تجاهلها. نحن بحاجة إلى شيء جديد وأصلي حقًّا. وهذا يقودنا إلى النظرية الأكثر إثارة للجدل في الفيزياء، نظرية الأوتار، والتي قد تكون مجنونة بما يكفي لتكون نظرية كل شيء.

* * *

الفصل السادس

بزوغ نظرية الأوتار: الوعود والمشكلات

لقد رأينا في وقت سابق أنه في نحو عام ١٩٠٠، كانت هناك ركيزتان كبيرتان للفيزياء: قانون نيوتن للجاذبية ومعادلات ماكسويل للضوء. أدرك أينشتاين أن هذين الركنين العظيمين يتعارض أحدهما مع الآخر. سيضطر أحدهما إلى الانهيار. أدى سقوط ميكانيكا نيوتن إلى اندلاع الثورات العلمية الكبرى في القرن العشرين.

اليوم، ربما يعيد التاريخ نفسه. مرة أخرى لدينا ركيزتان عظيمتان للفيزياء. من ناحية، لدينا نظرية الجاذبية الكبيرة جدًّا لأينشتاين، والتي أنتجت لنا الثقوب السوداء والانفجار العظيم والكون المتوسع. ومن ناحية أخرى، لدينا نظرية الأشياء الصغيرة جدًّا، النظرية الكمومية، والتي تشرح سلوك الجسيمات دون الذرية. المشكلة هي أن إحداهما تتبارز في صراع مع الأخرى. كلتاهما تستند إلى مبدأين مختلفين، ونوعين مختلفين من الرياضيات، وفلسفتين مختلفتين.

ونأمل أن تكون الثورة العظيمة القادمة هي توحيد هذين الركنين في ركن واحد.

نظرية الأوتار

بدأ كل شيء في عام ١٩٦٨، عندما كان عالمان فيزيائيان شابان، هما جابرييل فينيزيانو وماهيكو سوزوكي[١١٢]، يتصفحان كتب الرياضيات ثم عثرا على صيغة غريبة وجدها عالم الرياضيات ليونارد أويلر في القرن الثامن عشر. يبدو أن هذه الصيغة الغريبة تصف تشتت جسيمين دون ذريين! كيف يمكن لصيغة مجردة من القرن الثامن عشر أن تصف أحدث النتائج من مكونات حطام الذرة في عصرنا؟ لم يكن من المفترض أن تعمل الفيزياء بهذه الطريقة.

---

(١١٢) جابرييل فينيزيانو **Gabriele Veneziano**: من مواليد ٧ سبتمبر ١٩٤٢، هو فيزيائي نظري وأحد رواد نظرية الأوتار. قضى معظم نشاطاته العلمية في مركز سرن (اختصارًا لـ«المنظمة الأوروبية للأبحاث النووية») في جنيف، سويسرا. حصل عام ٢٠٠٦ على قلادة ألبرت أينشتاين من معهد ألبرت أينشتاين في برن بسويسرا.

ماهيكو سوزوكي **Mahiko Suzuki**: حاصل على الدكتوراه عام ١٩٦٥ من جامعة طوكيو، وزميل باحث معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا ١٩٦٥، وعضو معهد الدراسات المتقدمة، وباحث مشارك في جامعة طوكيو، ١٩٦٨-١٩٦٩، وأستاذ بجامعة كاليفورنيا منذ ١٩٧٤ حتى الآن، وعضو الجمعية اليابانية لتعزيز العلوم، وزميل الجمعية الفيزيائية الأمريكية. الاهتمامات البحثية: النموذج القياسي لتفاعلات الجسيمات وما بعدها، والتركيز على جوانب الفيزياء التي ترتبط ارتباطًا مباشرًا بالتجربة. وهي تشمل فينومينولوجيا الديناميكيات والتحليل الطيفي واضمحلال الهدرونات ذات النكهة الثقيلة. بالإضافة إلى ذلك، دراسة استكشافية لتركيب بوزونات هيجز والبوزونات الضخمة مثل **W** و**Z**.

في وقت لاحق، أدرك الفيزيائيون، بما في ذلك يويتشيرو نامبو وهولجير نيلسين وليونارد سسكيند[١١٣]، أن خصائص هذه الصيغة تمثل تفاعل اثنين من الأوتار. بسرعة كبيرة، عُممت هذه الصيغة على جيش كامل من المعادلات، والتي تمثل التشتت لعدة أوتار. (كانت هذه أطروحة الدكتوراه الخاصة بي، وهي حساب مجموعة كاملة من التفاعلات لعدد عشوائي من الأوتار)، ثم تمكن الباحثون من إدخال جسيمات تدور باللف المغزلي في نظرية الأوتار.

كانت نظرية الأوتار مثل بئر نفط تدفقت فجأة عبر سيل من المعادلات الجديدة. (شخصيًّا، لم أكن راضيًا عن هذا، لأنه منذ فاراداي، مثلت الفيزياء بمجالات تلخص بإيجاز كميات هائلة من

(١١٣) يويتشيرو نامبو **Yoichiro Nambu**: (مواليد ١٨ يناير ١٩٢١ – ٥ يوليو ٢٠١٥)، عالم أمريكي ياباني الأصل، ولد في طوكيو، يعمل في معهد إنريكو فيرمي في شيكاغو. حاصل على جائزة نوبل في الفيزياء ٢٠٠٨ لاكتشافه آلية لكسر تناسق الذرة في المجال الفيزيائي.
هولجير بيش نيلسن **Holger Bech Nielsen**: (من مواليد ٢٥ أغسطس ١٩٤١)، عالم فيزياء نظرية دنماركي، وأستاذ فخري في معهد نيلز بور بجامعة كوبنهاجن، حيث بدأ دراسة الفيزياء في عام ١٩٦١.
ليونارد سسكيند **Leonard Susskind**: (من مواليد ١٩٤٠)، هو عالم فيزياء نظرية في جامعة ستانفورد، وموجه في معهد ستانفورد للفيزياء النظرية. تشمل اهتمامات سسكيند نظرية الأوتار، ونظرية المجال الكمومي، والميكانيكا الكمومية الإحصائية، وعلم الكونيات الكمومية. تدرج سسكيند في مجال دراسة الفيزياء، وحصل على الدكتوراه، ولم يُعجبه كلام ستيفن هوكينج عن الثقوب السوداء، وبالتحديد عن ضياع المعلومات بداخل الثقوب السوداء، ووضَّح أن هذا اختراق لقانون مهم وهو قانون حفظ المعلومات. انتصر سسكيند في النهاية، وكنتيجة للجدال المحتدم، ظهرت نظرية المبدأ الهولوجرامي التي اقترحها جيرارد هوفت. يُعد سسكيند من أكبر المساهمين في نظرية الأوتار، التي أعطت مفهومًا جديدًا لفهم العلماء للكون والجزيئات والفيزياء الكمومية حتى الآن.

المعلومات. على النقيض من ذلك، كانت نظرية الأوتار عبارة عن مجموعة من المعادلات المفككة. نجحت أنا وزميلي كيجي كيكاوا Keiji Kikkawa في كتابة كل نظرية الأوتار باستخدام لغة المجالات، وخلق ما يُسمى بنظرية مجال الأوتار. ويمكن تلخيص كل نظرية الأوتار من خلال معادلاتنا في معادلة نظرية مجال الأوتار بطول بوصة واحدة فقط).

نتيجة لسيل المعادلات، بدأت صورة جديدة في التكون. لماذا يوجد الكثير من الجسيمات؟ مثل فيثاغورس منذ أكثر من ألفَي عام، قالت النظرية إن كل نغمة موسيقية -كل اهتزاز في الوتر- يُمثل جسيمًا. لم تكن الإلكترونات والكواركات وجسيمات يانج-ميلس سوى نغمات مختلفة على نفس الوتر المهتز.

ما هو قوي ومثير للاهتمام حول النظرية هو أن الجاذبية مضمنة بالضرورة. من دون أي افتراضات إضافية، يظهر الجرافيتون كواحد من أقل اهتزازات الوتر. في الحقيقة، حتى لو لم يُولَد أينشتاين مطلقًا، فربما عثرت على نظريته في الجاذبية بمجرد النظر إلى أدنى اهتزاز في الوتر.

كما قال الفيزيائي إدوارد ويتن[١١٤] ذات مرة: «نظرية الأوتار جذابة

(١١٤) إدوارد ويتن **Edward Witten**: (ولد في ٢٦ أغسطس ١٩٥١)، فيزيائي أمريكي متخصص في الفيزياء النظرية وبالأخص الفيزياء الرياضية، ويشغل حاليًّا منصب أستاذ الفيزياء الرياضية في معهد الدراسات المتقدمة الأمريكي. يعد ويتن من كبار الباحثين في نظرية الأوتار الفائقة ونظرية الجاذبية الكمومية، وغيرها من مجالات الفيزياء الرياضية. ويعتبره بعض أقرانه واحدًا من أعظم علماء الفيزياء، بل خليفة ألبرت أينشتاين. كما قدَّم مساهمات ساعدت في سد الثغرات بين الفيزياء الأساسية ومختلف مجالات الرياضيات. وفي عام ١٩٩٠، =

للغاية لأن الجاذبية مفروضة علينا. تتضمن جميع نظريات الأوتار المتسقة المعروفة الجاذبية، لذا في حين أن الجاذبية مستحيلة في نظرية المجال الكمومي كما عرفناها، فهي إلزامية في نظرية الأوتار».

= حصل على وسام فيلدز من قبل الاتحاد الدولي للرياضيات، وهو أعلى تكريم في الرياضيات، ويعتبر في كثير من الأحيان ما يعادل جائزة نوبل في الرياضيات، وهو الفيزيائي الوحيد الذي نال هذا الشرف.

عشرة أبعاد

ولكن عندما بدأت النظرية في التطور، ظهر المزيد والمزيد من الميزات الرائعة وغير المتوقعة. على سبيل المثال، وجد أن النظرية لا يمكن أن توجد إلا في عشرة أبعاد!

صدم هذا علماء الفيزياء، لأنه لا أحد رأى شيئًا مثل ذلك. عادة، يمكن التعبير عن أي نظرية في أي بُعد تريده. نحن ببساطة نتجاهل هذه النظريات الأخرى لأننا نعيش في عالم ثلاثي الأبعاد كما هو واضح. (يمكننا فقط التحرك للأمام، والجوانب، والأعلى، والأسفل. إذا أضفنا الزمن، فسيحتاج الأمر إلى أربعة أبعاد لتحديد موقع أي حدث في الكون. إذا أردنا مقابلة شخص ما في مانهاتن، على سبيل المثال، يمكننا أن نقول، هيا بنا نلتقي عند ناصية الجادة الخامسة والشارع ٤٢، في الطابق العاشر، ظهرًا. ومع ذلك، فإن التحرك في أبعاد تتجاوز الأربعة أمر مستحيل بالنسبة لنا، بغض النظر عن الطريقة التي نحاول بها. في الحقيقة، لا تستطيع أدمغتنا حتى تصوُّر كيفية التحرك في أبعاد أعلى. لذلك فإن جميع الأبحاث التي أُجريت في نظرية الأوتار عالية الأبعاد تتم باستخدام الرياضيات البحتة).

لكن في نظرية الأوتار، أبعاد الزمكان ثابتة عند عشرة أبعاد. تنقسم النظرية رياضيًّا في أبعاد أخرى.

ما زلت أتذكر الصدمة التي شعر بها الفيزيائيون عندما افترضت نظرية الأوتار أننا نعيش في كون من عشرة أبعاد. رأى معظم الفيزيائيين أن هذا دليل على أن النظرية خاطئة. ذات مرة كان جون شفارتز[١١٥]؛ مهندس ومصمم نظرية الأوتار، في المصعد في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا مع ريتشارد فاينمان، فلمزه الأخير متسائلًا: «حسنًا، جون، كم عدد الأبعاد لديك اليوم؟».

ومع ذلك، على مر السنين، بدأ الفيزيائيون تدريجيًّا في إظهار أن جميع النظريات المتنافسة تعاني من عيوب قاتلة. على سبيل المثال، يمكن استبعاد العديد منها لأن تصحيحاتهم الكمومية غير محدودة أو غير طبيعية (أي غير متسقة رياضيًّا).

وبمرور الوقت، بدأ الفيزيائيون الاستعداد لفكرة أن كوننا ربما يكون في عشرة أبعاد بعد كل شيء. أخيرًا، في عام ١٩٨٤، أظهر جون شفارتز ومايكل جرين[١١٦] أن نظرية الأوتار خالية من جميع المشكلات التي حُكم عليها بالفشل والتي رُشحت سابقًا في نظرية المجال الموحد.

إذا كانت نظرية الأوتار صحيحة، فربما كان الكون في الأصل عشرة أبعاد. لكن الكون كان غير مستقر، وستة من هذه الأبعاد تجعدت

---

(١١٥) جون هنري شفارتز **John Henry Schwarz**: هو فيزيائي وأستاذ جامعي أمريكي، ولد في ٢٢ نوفمبر ١٩٤١ في نورث آدمز في الولايات المتحدة.

(١١٦) مايكل بوريس جرين **Michael Boris Green**: (ولد في ٢٢ مايو ١٩٤٦)، وهو فيزيائي بريطاني وواحد من رواد نظرية الأوتار، وهو حاليًّا أستاذ في قسم الرياضيات التطبيقية والفيزياء النظرية وزميل في قاعة كلير كامبريدج في إنجلترا، وكان أستاذ لوكاسي للرياضيات من عام ٢٠٠٩ حتى عام ٢٠١٥.

بطريقة ما وأصبحت أصغر من أن تُلاحَظ. وبالتالي، قد يكون كوننا في الواقع ذا عشرة أبعاد، لكن ذراتنا أكبر من أن تدخل هذه الأبعاد الأعلى الصغيرة للغاية.

الجرافيتون

على الرغم من كل جنون نظرية الأوتار، فإن الشيء الوحيد الذي أبقاها على قيد الحياة هو أنها زاوجت بنجاح بين نظريتين كبيرتين في الفيزياء؛ النسبية العامة والنظرية الكمومية، مما أعطانا نظرية محدودة للجاذبية الكمومية. هذا هو كل ما يتعلق بالإثارة.

سابقًا، ذكرنا أنه إذا أضفت تصحيحات كمومية إلى الديناميكا الكهربائية الكمومية، أو جسيم يانج-ميلس، فستحصل على فيضان من اللا نهائيات التي يجب إزالتها بعناية وبشكل مضجر.

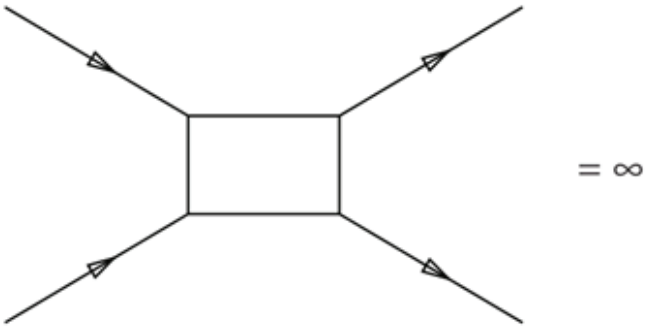
لكن كل هذا يفشل عندما نحاول أن نزاوج بين نظريتين عظيمتين عن الطبيعة بطلقة واحدة؛ النسبية والنظرية الكمومية. عندما نطبق مبدأ الكمومية على الجاذبية، علينا تقسيمها إلى حزم من الطاقة، أو الكوانتا، تُسمى الجرافيتون. ثم نحسب تصادم هذه الجرافيتونات مع الجرافيتونات الأخرى ومع المادة، مثل الإلكترون. ولكن عندما نفعل هذا، فإن مجموعة الحيل الكاملة التي وجدها فاينمان وهوفت تفشل فشلًا ذريعًا. إن التصحيحات الكمومية التي يُسببها تفاعل الجرافيتونات مع الجرافيتونات الأخرى لا حصر لها وتتحدى جميع الأساليب التي وجدتها الأجيال السابقة من علماء الفيزياء.

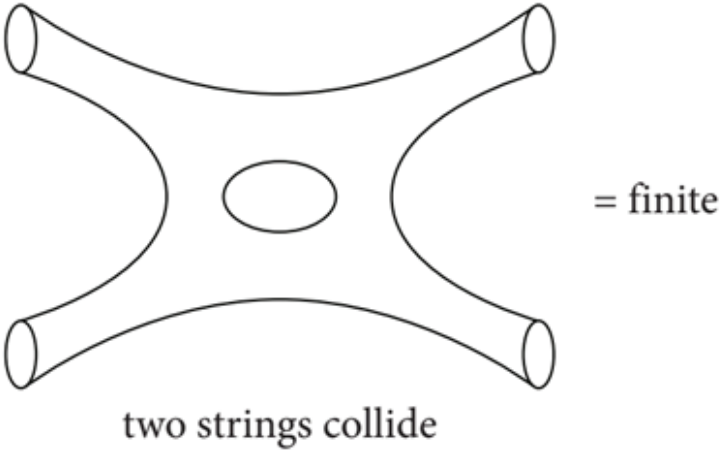
هذا هو المكان الذي يحدث فيه السحر التالي. يمكن لنظرية الأوتار أن تزيل هذه اللا نهائية المزعجة التي أعاقت علماء الفيزياء لما يقرب من قرن. وهذا السحر يحدث مرة أخرى من خلال التناظر.

التناظر الفائق

تاريخيًّا، كان من الجيد دائمًا أن تكون معادلاتنا متناظرة، لكنها كانت ترفًا لم يكن ضروريًّا تمامًا. لكن في النظرية الكمومية، يصبح التناظر أهم ميزة في الفيزياء.

كما أكدنا، عندما نحسب التصحيحات الكمومية لإحدى النظريات، غالبًا ما تكون هذه التصحيحات الكمومية متباينة (أي غير محدودة)، أو شاذة (بمعنى أنها تنتهك التناظر الأصلي للنظرية). لقد أدرك الفيزيائيون في العقود القليلة الماضية فقط أن التناظر، بدلًا من أن يكون مجرد ميزة مُرضِية للنظرية، هو في الواقع المكون المركزي. غالبًا ما تؤدي المطالبة بنظرية متناظرة إلى إبعاد الاختلافات والتباينات التي تصيب النظريات غير المتماثلة. التناظر هو السيف الذي يستخدمه علماء الفيزياء لقهر التنانين التي أطلقتها التصحيحات الكمومية.





الشكل ١١. عند حساب تصادم اثنين من الجرافيتون (أعلى)، تكون الإجابة لا نهائية، وبالتالي لا معنى لها. ولكن عندما يصطدم وتران (أسفل)، يكون لدينا حدان، أحدهما من البوزونات والآخر من الفرميونات. في نظرية الأوتار، يُلغى هذان المصطلحان تمامًا، مما يساعد على إنشاء نظرية محدودة للجاذبية الكمومية.

كما أسلفنا الذكر، وجد ديراك أن معادلته للإلكترون تنبأت بأن له دورانًا مغزليًّا (وهي خاصية رياضية للمعادلات تُماثِل الدوران المألوف الذي نراه حولنا). في وقت لاحق، وجد الفيزيائيون أن جميع الجسيمات دون الذرية لها دوران أو لف مغزلي. لكن هذا اللف المغزلي له نوعان.

هناك وحدات كمومية معينة، يمكن أن يكون الدوران إما كاملًا (رقم من دون كسور عشرية) (مثل ٠، ١، ٢)، أو نصف متكامل (مثل ½، 2/3). أولًا، الجسيمات التي لها رقم لف مغزلي كامل تصف قوى الكون. وهي تشمل جسيم الفوتون وجسيمات يانج-ميلس (لها رقم لف مغزلي 1) وجسيم الجاذبية، الجرافيتون (له رقم لف مغزلي 2). سُميت هذه الجسيمات بوزونات[١١٧] (على اسم الفيزيائي الهندي ساتيندرا ناث بوز[١١٨]). لذا فإن قوى الطبيعة تتوسطها البوزونات.

---

(١١٧) البوزونات **bosons**: هي المجالات التي تحمل الطاقة، وهي موجودة في كل مكان حتى في الفراغ، لذلك يمكن تسميتها عربيًّا بحاملات الطاقة، وهي التي تحمل الطاقات الكونية الأربع: القوة النووية القوية والقوة النووية الضعيفة والكهرومغناطيسية وقوة الجاذبية. يمكن للبوزونات أن تُشكِّل حالات كمومية مركبة مُتناظرة كليًّا، ونتيجة لذلك، فهي تخضع لإحصاء بوز-أينشتاين. تقول مُبرهنة إحصائيات العزم المغزلي للجسيمات الأولية: إن البوزونات يجب أن تملك عزمًا مغزليًّا صحيحًا، كما أن البوزونات هي الجسيمات الوحيدة القادرة على شغل نفس الحالة الكمومية لنظامٍ منها.

(١١٨) ساتيندرا ناث بوز **Satyendra Nath Bose**: هو فيزيائي وعالم رياضيات هندي، ولد في ١ - يناير من سنة ١٨٩٤ في مدينة كلكتا بالهند، وكان أكبر إخوته السبعة، عمل محاضرًا بجامعة كلكتا في قسم الفيزياء ما بين عامَي ١٩١٦ إلى عام ١٩٢١. وفي سنة ١٩٢١ التحق بجامعة دكا (في بنغلادش) التي تأسست حديثًا. قضى بوز في الفترة ما بين عامَي ١٩٢٤ إلى عام ١٩٢٦ في أوروبا حيث عمل مع لويس دي برولي وماري كوري وألبرت أينشتاين. وبعد عودته من أوروبا إلى الهند في سنة ١٩٢٦ بعدما أصبح بروفيسورًا في الفيزياء، رجع إلى مدينة دكا، حيث شغل منصب رئيس قسم الفيزياء والتعليم المستمر بجامعة دكا، وقد استمر في منصبه هذا إلى =

ثم هناك الجسيمات التي تُشكِّل المادة في الكون. والتي لها رقم لف مغزلي نصف كامل، مثل الإلكترونات والنيوترينوات والكواركات (رقم اللف المغزلي لها ½). تُسمى هذه الجسيمات الفرميونات[١١٩] (على اسم إنريكو فيرمي)، والتي من خلالها يمكننا بناء الجسيمات الأخرى للذرة: البروتونات والنيوترونات. لذا فإن ذرات أجسامنا عبارة عن مجموعات من الفرميونات.

= سنة ١٩٤٥ بالإضافة إلى شغله منصب عميد لكلية العلوم بجامعة دكا لفترة طويلة. وفي سنة ١٩٤٤ انتُخب بوز الرئيس العام لمؤتمر العلم الهندي. بعدها عاد إلى مدينة كلكتا عشية التقسيم الذي حصل بين الهند وباكستان، حيث عمل أستاذًا بجامعة كلكتا إلى أن تقاعد في سنة ١٩٥٦. وفي عام ١٩٥٨ انتُخب زميلًا في الجمعية الملكية. وتوفي في ٤ – فبراير من سنة ١٩٧٤ في مدينة كلكتا بالهند.

(١١٩) الفرميونات **fermions**: هي جسيمات يمكن أن تُشكِّل حالات كمومية مركبة غير مكتملة التناظر، نتيجة لذلك فهي تخضع لمبدأ باولي في الانتفاء وتخضع لإحصاء فيرمي–ديراك. حسب مبرهنة إحصائيات اللف المغزلي يجب أن يمتلك الفرميون لفًّا مغزليًّا أو (**spin**) نصف صحيح. تُصنف جميع الجسيمات الأولية كفرميونات أو بوزونات، أما الجسيمات المركبة المؤلفة من فرميونات فيمكن أن تكون إما بوزونات أو فرميونات حسب قيمة تدويمها الكلي. تؤلف الفرميونات الجسيمات الأولية التي تتشكل منها المادة، وتُصنف هذه الفرميونات المادية ضمن مجموعتين: كواركات (التي تضم البروتونات والنيترونات) وليبتونات (تضم الإلكترونات).

نوعان من الجسيمات دون الذرية

البوزونات (القوى)	الفرميونات (المادة)
الفوتونات – الجرافيتونات	الإلكترونات – الكواركات
يانج–ميلس	النيوترونات – البروتونات

ثم أوضح بانجي ساكيتا **Bunji Sakita** وجان لوب جيرفيه **Jean-Loup Gervais** أن نظرية الأوتار لها نوع جديد من التناظر، يُسمى التناظر الفائق. منذ ذلك الحين، توسع التناظر الفائق بحيث أصبح الآن أكبر تناظر موجود على الإطلاق في الفيزياء. كما أكدنا، الجمال بالنسبة للفيزيائي هو التناظر، والذي يسمح لنا بإيجاد الرابط بين الجسيمات المختلفة. يمكن بعد ذلك توحيد جميع جسيمات الكون عن طريق التناظر الفائق. كما أكدنا، فإن التناظر يعيد ترتيب مكونات الجسم، تاركًا الكائن الأصلي كما هو. هنا، يقوم المرء بإعادة ترتيب الجسيمات في معادلاتنا بحيث تتبادل الفرميونات مع البوزونات والعكس صحيح. يصبح هذا هو السمة المركزية لنظرية الأوتار، بحيث يمكن إعادة ترتيب جسيمات الكون بأكملها في بعضها البعض.

هذا يعني أن لكل جسيم قرينًا فائقًا يُسمى الجسيم أو الجسيم الفائق. على سبيل المثال، الشريك الخارق للإلكترون يُسمى إلكترونًا. الشريك الخارق للكوارك يُسمى سكوارك. يُطلق على الشريك الفائق لليبتون (مثل الإلكترون أو النيوترينو) اسم سليبتون.

لكن في نظرية الأوتار حدث شيء رائع. عند حساب التصحيحات الكمومية لنظرية الأوتار، تكون لديك مساهمتان منفصلتان. ولديك تصحيحات كمومية قادمة من الفرميونات والبوزونات أيضًا. بأعجوبة، هما متساويتان في الحجم، لكنهما تحدثان مع الإشارة المعاكسة. قد تكون لأحد الحدود إشارة موجبة، ولكن هناك حدًّا آخر بإشارة سالبة. في الحقيقة، عند جمعهما معًا، تلغي هذه الحدود بعضها البعض، تاركة نتيجة نهائية.

ظل التزاوج بين النسبية والنظرية الكمومية مستعصيًا على علماء الفيزياء لما يقرب من قرن من الزمان، لكن التناظر بين الفرميونات والبوزونات، المسمى التناظر الفائق، يسمح لنا بإلغاء العديد من هذه اللا نهائيات ضد بعضها البعض. سرعان ما اكتشف الفيزيائيون وسائل أخرى للقضاء على هذه اللا نهائيات، تاركين نتيجة نهائية. إذن هذا هو أصل كل الإثارة المحيطة بنظرية الأوتار: يمكنها توحيد الجاذبية مع النظرية الكمومية. لا يمكن لأي نظرية أخرى أن تحقق هذا الادعاء. قد يُرضي هذا اعتراض ديراك الأصلي. كان يكره نظرية الاستبدال غير المتناهي لأنها على الرغم من نجاحاتها الرائعة التي لا يمكن إنكارها، فإنها تضمنت إضافة وطرح كميات لا حصر لها في الحجم. هنا، نرى أن نظرية الأوتار محدودة في حد ذاتها، من دون الاستبدال غير المتناهي.

وهذا بدوره قد يُرضي الصورة التي اقترحها في الأصل أينشتاين نفسه. لقد قارن ذات مرة نظريته في الجاذبية بالرخام، فهو أملس وأنيق ومصقول. ومع ذلك، فإن المادة، على النقيض من ذلك، كانت أشبه

بالخشب. جذع الشجرة مليء بالعقد، وفوضوي، وخشن، ومن دون نمط هندسي منتظم. كان هدفه في النهاية هو إنشاء نظرية موحدة تجمع بين الرخام والخشب في شكل واحد؛ أي إنشاء نظرية مصنوعة بالكامل من الرخام. كان هذا حلم أينشتاين.

يمكن لنظرية الأوتار أن تكمل هذه الصورة. التناظر الفائق هو تناظر يمكنه تحويل الرخام إلى خشب والعكس صحيح. يصبحان وجهين لعملة واحدة. في هذه الصورة، يمثل الرخام البوزونات، ويمثل الخشب الفرميونات. على الرغم من عدم وجود دليل تجريبي على التناظر الفائق في الطبيعة، فإنه أنيق وجميل لدرجة أنه استحوذ على خيال مجتمع الفيزياء.

كما قال ستيفن واينبرج ذات مرة: «على الرغم من أن التناظرات خفية علينا، فإننا يمكن أن نشعر بأنها كامنة في الطبيعة، وتحكم كل شيء خاص بنا. هذه هي الفكرة الأكثر إثارة التي أعرفها؛ أن الطبيعة أبسط بكثير مما تبدو عليه. لا شيء يجعلني أكثر أملًا في أن جيلنا من البشر قد يحمل مفتاح الكون بيديه -ربما في حياتنا نكون قادرين على معرفة سبب كل ما نراه في هذا الكون الهائل، من المجرات والجسيمات، محتمًا منطقيًّا».

باختصار، نرى الآن أن التناظر قد يكون المفتاح لتوحيد جميع قوانين الكون، بسبب العديد من الإنجازات الرائعة:

• التناظر يخلق النظام من الفوضى: من فوضى العناصر الكيميائية والجسيمات دون الذرية، يمكن لجدول مندليف الدوري والنموذج

القياسي إعادة ترتيبها بطريقة مرتبة ومتناظرة.

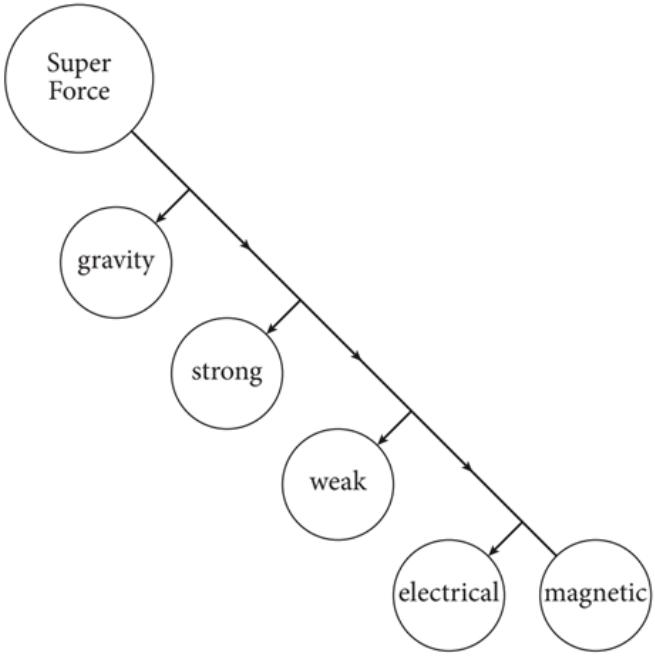
• التناظر يساعد في سد الفجوات: يسمح التناظر بعزل الفجوات في هذه النظريات، وبالتالي التنبؤ بوجود أنواع جديدة من العناصر والجسيمات دون الذرية.

• التناظر يوحد الأشياء غير المتوقعة تمامًا والتي تبدو غير ذات صلة: يجد التناظر الرابط بين المكان والزمن، والمادة والطاقة، والكهرباء والمغناطيسية، والفرميونات والبوزونات.

• التناظر يكشف عن ظواهر غير متوقعة: يتنبأ التناظر بوجود ظواهر جديدة مثل المادة المضادة واللف المغزلي والكواركات.

• يزيل التناظر العواقب غير المرغوب فيها التي يمكن أن تدمر النظرية: التصحيحات الكمومية غالبًا ما تكون لها اختلافات وشذوذات كارثية، يمكن القضاء عليها عن طريق التناظر.

• التناظر يغير النظرية الكلاسيكية الأصلية: إن التصحيحات الكمومية لنظرية الأوتار صارمة للغاية لدرجة أنها في الواقع تغير النظرية الأصلية، وتثبت أبعاد الزمكان.



الشكل ١٢. في بداية الزمن، يُعتقد أنه كانت هناك قوة خارقة واحدة شمل تناظرها جميع جسيمات الكون. لكن هذا التناظر كان غير مستقر ثم بدأ في الانهيار. كان أول من انفصل هو الجاذبية. ثم تبعتها القوة الشديدة والقوة الضعيفة، تاركة القوة الكهرومغناطيسية. لذا يبدو الكون اليوم محطمًا، حيث تختلف كل القوى تمامًا عن بعضها البعض. إن مهمة الفيزيائيين هي إعادة تجميع القطع معًا في قوة واحدة.

تستفيد نظرية الأوتار الفائقة من كل هذه الميزات. تناظرها هو التناظر الفائق (التناظر الذي يمكنه تبديل البوزونات والفرميونات). التناظر الفائق بدوره هو أكبر تناظر عُثر عليه في الفيزياء، وهو قادر على توحيد جميع الجسيمات المعروفة في الكون.

نظرية-إم M-Theory [١٢٠]

لا يزال يتعين علينا إكمال الخطوة الأخيرة في نظرية الأوتار، وإيجاد مبادئها الفيزيائية الأساسية؛ أي أننا ما زلنا لا نفهم كيفية اشتقاق النظرية بأكملها من معادلة واحدة. جاءت إحدى موجات الصدمة عام ١٩٩٥، عندما خضعت نظرية الأوتار لتحول آخر وظهرت نظرية جديدة تُسمى نظرية-إم. كانت مشكلة نظرية الأوتار الأصلية هي أن هناك خمسة إصدارات متميزة من الجاذبية الكمومية، كل منها محدودة ومحددة جيدًا. بدت نظريات الأوتار الخمس هذه متشابهة جدًّا، إلا في نقطة اللف المغزلي لكل منها، فهي تبدو مختلفة قليلًا عن بعضها البعض. بدأ الناس يتساءلون: لماذا يجب أن يكون هناك خمسة؟ يعتقد معظم الفيزيائيين أن الكون يجب أن يكون فريدًا من نوعه.

وجد الفيزيائي إدوارد ويتن أن هناك نظرية خفية ذات أحد عشر بُعدًا، تُسمى نظرية-إم، كانت مبنية على الأغشية (مثل أسطح الكرات والكعك) بدلًا من الأوتار فقط. لقد كان قادرًا على تفسير سبب وجود خمس نظريات أوتار مختلفة، لأنه توجد خمس طرق يمكن من خلالها

(١٢٠) نظرية – إم **M-theory**: واحدة من الحلول المقترحة لنظرية كل شيء التي يُفترض بها أن تدمج نظريات الأوتار الفائقة الخمس مع الأبعاد الأحد عشر للجاذبية الفائقة **Supergravity**. قُدمت النظرية من قبل الأستاذ إدوارد ويتن الذي يُصرح شخصيًّا بأن هذه النظرية لا تزال تحتاج إلى الكثير من العمل الرياضي وإيجاد أدوات رياضية جديدة لتطوير وإدراك مضامين هذه النظرية.

طي غشاء ذي أحد عشر بُعدًا إلى وتر ذي أبعاد عشرة.

بعبارة أخرى، كانت جميع الإصدارات الخمسة لنظرية الأوتار عبارة عن تمثيلات رياضية مختلفة لنظرية-إم. (لذا فإن نظرية الأوتار ونظرية-إم هما نفس النظرية فعلًا، باستثناء أن نظرية الأوتار هي اختزال لنظرية-إم ذات الأحد عشر بُعدًا إلى عشرة أبعاد). ولكن كيف يمكن لنظرية الأحد عشر بُعدًا أن تؤدي إلى خمس نظريات ذات عشرة أبعاد؟

كمثال، فكِّر في كرة الشاطئ. إذا تركنا الهواء يخرج من صمامها، تنهار الكرة بشكل تدريجي حتى تشبه السجق. إذا تركنا المزيد من الهواء يخرج منها، يصبح السجق وترًا. ومن ثَم، فإن الوتر هو في الواقع غشاء متنكر حتى خرج الهواء منه.

إذا بدأنا بكرة شاطئ ذات أحد عشر بُعدًا، يمكنك أن تُظهر رياضيًّا أن هناك خمس طرق يمكن من خلالها طيها إلى وتر من عشرة أبعاد.

أو فكِّر في قصة الرجال المكفوفين الذين تحسسوا فيلًا لأول مرة. يلمس أحد الحكماء أذن الفيل، ويعلن أن الفيل مسطح وثنائي الأبعاد مثل المروحة. يلمس رجل حكيم آخر الذيل، ويفترض أن الفيل يشبه الحبل أو خيطًا أحادي البعد. سيلمس الآخر الساق، ثم سيستنتج أن الفيل هو برميل أو أسطوانة ثلاثية الأبعاد. لكن في الحقيقة، إذا عدنا إلى الوراء وارتقينا إلى البُعد الثالث، يمكننا أن نرى الفيل كحيوان ثلاثي الأبعاد. بالطريقة نفسها، فإن نظريات الأوتار الخمس المختلفة مثل الأذن والذيل والساق، لكن ما زلنا بحاجة إلى الكشف عن الفيل الكامل، وهو نظرية-إم.

كون ذو تصوير مجسم[١٢١] Holographic Universe

كما ذكرنا، بمرور الوقت كُشفت طبقات جديدة في نظرية الأوتار. بعد فترة وجيزة من اقتراح نظرية-إم في عام ١٩٩٥، ظهر اكتشاف مذهل آخر بواسطة خوان مارتن مالداسينا[١٢٢] في عام ١٩٩٧.

لقد هز المجتمع الفيزيائي بأكمله من خلال إظهار شيء كان يعتبر في يوم من الأيام مستحيلًا: أن نظرية يانج-ميلس فائقة التناظر، وهي تصف سلوك الجسيمات دون الذرية في أربعة أبعاد مزدوجة، أو مكافئة

---

(١٢١) مبدأ التصوير المجسم **holographic principle**: هو أحد المبادئ الخاصة بنظرية الأوتار، ومبدأ محتمل أيضًا فيما يخص الجاذبية الكمومية التي تقوم بمحاولة لحل مفارقة معلومات الثقب الأسود من خلال نظرية الأوتار. ينص هذا المبدأ على إمكانية توصيف حجم معين من الفضاء عبر تكويد المعلومات الخاصة به على كامل حدوده (ويُفضل اختيار حد شبيه-بالضوء مثل حد أفق الحدث). وبالنسبة للثقب الأسود يذكر هذا المبدأ أن وصف جسم ما سقط في هذا الثقب يكمن في التقلبات السطحية لأفق حدث الثقب الأسود. أول من اقترح هذا المبدأ هو عالم الفيزياء النظرية جيرارد توفت، وحصل هذا المبدأ على تفسير دقيق باستخدام نظرية الأوتار قام به ليونارد سسكيند حيث دمج أفكاره عن هذا المبدأ مع ما توصل إليه كل من توفت وتشارلز ثورن. وقد أشار رافائيل بوسو إلى أن ثورن قد لاحظ منذ عام ١٩٧٨ أن نظرية الأوتار تُقدم وصفًا يعتمد على عدد أقل من الأبعاد وتظهر فيه الجاذبية بما يمكن تسميته بأسلوب التصوير المجسم.

(١٢٢) خوان مارتن مالداسينا **Juan Martín Maldacena** (١٠ سبتمبر ١٩٦٨): هو عالم فيزيائي نظري أرجنتيني، وأستاذ في كلية العلوم الطبيعية في معهد الدراسات المتقدمة. لقد قدم مساهمات كبيرة في أسس نظرية الأوتار والجاذبية الكمية. اكتشافه الأكثر شهرة هو مراسلة **AdS /CFT**، وهو تحقيق لمبدأ التصوير المجسم في نظرية الأوتار.

رياضيًّا لنظرية أوتار بعينها في عشرة أبعاد. وضع هذا عالم الفيزياء في حالة من الارتباك. بحلول عام ٢٠١٥، كان هناك عشرة آلاف ورقة تضع هذه الورقة كمرجع لها، مما يجعلها الورقة الأكثر تأثيرًا في فيزياء الطاقة العالية. (التناظر والازدواجية مرتبطان ولكنهما مختلفان. ينشأ التناظر عندما نعيد ترتيب مكونات معادلة واحدة وتبقى كما هي. تنشأ الازدواجية عندما نُظهِر أن نظريتين مختلفتين تمامًا متكافئتان رياضيًّا في الحقيقة. ومن اللافت للنظر أن نظرية الأوتار تحتوي على هاتين المادتين بدرجة عالية كميزات غير بديهية).

كما رأينا، تحتوي معادلات ماكسويل على ازدواجية بين المجالين الكهربائي والمغناطيسي؛ أي أن المعادلات تظل كما هي إذا عكسنا المجالين، وتحويل المجالات الكهربائية إلى مجالات مغناطيسية. (يمكننا أن نرى ذلك رياضيًّا، لأن المعادلات الكهرومغناطيسية غالبًا ما تحتوي على مصطلحات مثل **E2 + B2**، والتي تظل كما هي عندما ندير المجالين بين بعضهما البعض، كما في نظرية فيثاغورس). وبالمثل، هناك خمس نظريات أوتار متميزة في عشرة أبعاد، ويمكن إثبات أنها مزدوجة مع بعضها البعض، لذلك فهي في الحقيقة نظرية-إم واحدة ذات أحد عشر بُعدًا متنكرة. بشكل ملحوظ تُظهِر الازدواجية أن النظريتين المختلفتين هما في الواقع جانبان من نفس النظرية.

ومع ذلك، أظهر مالداسينا أن هناك ازدواجية أخرى بين الأوتار في عشرة أبعاد، ونظرية يانج-ميلس في أربعة أبعاد. كان هذا تطورًا غير متوقع تمامًا ولكن كانت له آثار عميقة. كان يعني أن هناك روابط عميقة

وغير متوقعة بين قوة الجاذبية والقوة النووية المحددة في أبعاد مختلفة تمامًا.

عادة يمكن العثور على الثنائيات بين الأوتار في نفس البُعد. من خلال إعادة ترتيب الحدود التي تصف تلك الأوتار، على سبيل المثال، يمكننا في كثير من الأحيان تغيير نظرية الأوتار إلى نظرية أخرى. هذا يخلق شبكة من الثنائيات بين نظريات الأوتار المختلفة، وكلها محددة في نفس البُعد. لكن الازدواجية بين كائنين محددين بأبعاد مختلفة لم يسمع بها أحد.

هذا ليس سؤالًا أكاديميًّا، لأن له تداعيات بعيدة المدى لفهم القوة النووية. على سبيل المثال، رأينا سابقًا كيف أن نظرية المقياس **gauge theory** [١٢٣] في أربعة أبعاد، كما يمثلها مجال يانج-ميلس، تعطينا أفضل وصف للقوة النووية، لكن لم يتمكن أحد من إيجاد حل دقيق لمجال يانج-ميلس. ولكن نظرًا لأن نظرية المقياس في أربعة أبعاد

(١٢٣) نظرية المقياس **gauge theory**: في الفيزياء النظرية تمثل نوعًا من نظريات المجال، بحيث يكون فيها اللاجرانجيان غير متباين تحت زمرة من التحويلات الموضعية. (لاجرانجيان **L** لأي نظام حركي فهو نظام يلخص ديناميكيات النظام. مفهوم لاجرانج في إعادة صياغة الميكانيكا الكلاسيكية قُدم أساسًا من قبل الأيرلندي الرياضي ويليام روان هاميلتون عندما أعاد صياغة معادلات الميكانيكا الكلاسيكية وأطلق عليها اسم ميكانيكا لاجرانج. يعرف اللاجرانجيان في الميكانيكا الكلاسيكية بأنه عبارة عن فرق الطاقة الحركية والطاقة الكامنة). يشير الاصطلاح «مقياس» إلى تعزيز في درجات حرية اللاجرانجيان. التحولات بين المقاييس الممكنة يُطلق عليها تحويلات، تُشكِّل زمرة لي ويُشار إليها بزمرة التناظر أو زمرة المقياس للنظرية. إن أي زمرة لي يصحبها جبر لي لمولدات الزمرة. ينبغي أن ينشأ في كل مولد للزمرة مجال متجه يُطلق عليه مجال المقياس.

يمكن أن تكون ثنائية مع نظرية الأوتار في عشرة أبعاد، فهذا يعني أن الجاذبية الكمومية قد تحمل مفتاح القوة النووية. كان هذا كشفًا مذهلًا، لأنه كان يعني أن أفضل وصف للسمات الأساسية للقوة النووية (مثل حساب كتلة البروتون) هو نظرية الأوتار.

أدى هذا إلى نوع من أزمة الهوية بين علماء الفيزياء. أولئك الذين يعملون حصريًّا على القوة النووية يقضون كل وقتهم في دراسة الأجسام ثلاثية الأبعاد، مثل البروتونات والنيوترونات، وغالبًا ما يسخرون من علماء الفيزياء الذين يقومون بالتنظير في أبعاد أعلى. ولكن مع هذه الازدواجية الجديدة بين نظرية الجاذبية والمقياس، وجد هؤلاء الفيزيائيون أنفسهم فجأة يحاولون تعلم كل شيء عن نظرية الأوتار ذات الأبعاد العشرة، والتي قد تحمل مفتاح فهم القوة النووية في أربعة أبعاد.

ظهر تطور آخر غير متوقع من هذه الثنائية الغريبة، يُسمى مبدأ التصوير المجسم **holographic principle**. الصور المجسمة عبارة عن صفائح بلاستيكية مسطحة ثنائية الأبعاد، تحتوي على صورة كائنات ثلاثية الأبعاد مشفرة بشكل خاص داخلها. من خلال تسليط شعاع ليزر على الشاشة المسطحة، تظهر الصورة ثلاثية الأبعاد فجأة. بمعنى آخر، تشفر جميع المعلومات اللازمة لإنشاء صورة ثلاثية الأبعاد على شاشة مسطحة ثنائية الأبعاد باستخدام أشعة الليزر، مثل صورة الأميرة ليا في فيلم حرب النجوم التي عرضها الروبوت الفضائي آر تو، أو لعبة القصر المسكون في مدينة ديزني لاند للملاهي حيث تبحر أشباح ثلاثية الأبعاد حولنا.

يعمل هذا المبدأ أيضًا مع الثقوب السوداء. كما رأينا سابقًا، إذا ألقينا بموسوعة في ثقب أسود، فإن المعلومات الموجودة داخل الكتب لا يمكن أن تختفي، وفقًا للميكانيكا الكمومية. فأين تذهب المعلومات؟ تفترض إحدى النظريات أنها موزعة على سطح أفق الحدث للثقب الأسود. لذا فإن السطح ثنائي الأبعاد للثقب الأسود يحتوي على جميع المعلومات الخاصة بكل الأجسام ثلاثية الأبعاد التي أُلقيت فيه.

هذا أيضًا له آثاره على مفهومنا للواقع. نحن مقتنعون بالطبع بأننا كائنات ثلاثية الأبعاد يمكن أن تتحرك في الفضاء، محددة بثلاثة أرقام، الطول والعرض والارتفاع. لكن ربما هذا مجرد وهم. ربما نعيش في صورة ثلاثية الأبعاد.

ربما يكون العالم ثلاثي الأبعاد الذي نختبره مجرد ظل للعالم الحقيقي، والذي هو في الواقع عشرة أو أحد عشر بُعدًا. عندما نتحرك في الأبعاد الثلاثة للفضاء، فإننا نختبر أنفسنا الحقيقية تتحرك فعليًّا في عشرة أو أحد عشر بُعدًا. عندما نسير في الشارع يتبعنا ظلنا ويتحرك مثلنا، إلا أن الظل موجود في بُعدين. وبالمثل، ربما نكون ظلالًا تتحرك في ثلاثة أبعاد، لكن ذواتنا الحقيقية تتحرك في عشرة أو أحد عشر بُعدًا.

باختصار، نرى أنه مع مرور الوقت، تكشف نظرية الأوتار عن نتائج جديدة غير متوقعة تمامًا. هذا يعني أننا ما زلنا لا نفهم حقًّا المبادئ الأساسية الأصلية الكامنة وراءها. في النهاية، قد يتضح أن نظرية الأوتار ليست في الحقيقة نظرية حول الأوتار بعد كل شيء، حيث يمكن التعبير عن الأوتار كأغشية عند صياغتها في أحد عشر بُعدًا.

هذا هو السبب في أنه من السابق لأوانه مقارنة نظرية الأوتار بالتجربة. بمجرد أن نكشف عن المبادئ الحقيقية وراء نظرية الأوتار، قد نجد طريقة لاختبارها، وربما بعد ذلك يمكننا القول مرة واحدة وإلى الأبد ما إذا كانت نظرية لكل شيء أو نظرية لا شيء.

اختبار النظرية

ولكن على الرغم من كل النجاحات النظرية التي حققتها نظرية الأوتار، لا تزال بها نقاط ضعف صارخة. من الطبيعي أن تجتذب أي نظرية ذات ادعاءات قوية مثل نظرية الأوتار جيشًا من المنتقدين. يجب تذكير المرء باستمرار بكلمات كارل ساجان: «الادعاءات القوية تتطلب أدلة قوية».

(أتذكر أيضًا الكلمات الساخرة لفولفجانج باولي، الذي كان خبيرًا في التقليل من شأن الآخرين، عند الاستماع إلى محادثة، قد يقول: «ما قلته كان مرتبكًا للغاية لدرجة أنه لا يمكن للمرء أن يقول ما إذا كان هذا هراءً أم لا». كان سيقول أيضًا: «لا أمانع إن كان تفكيرك بطيئًا، لكنني أعترض عندما تنشر أفكارك بأسرع مما تفكر بها». إذا كان على قيد الحياة، فقد يطبق هذه الكلمات على نظرية الأوتار).

كان الجدل محتدمًا لدرجة أن أفضل العقول في الفيزياء انقسمت حول هذا السؤال. لم يشهد العلم مثل هذا الانقسام الكبير منذ مؤتمر سولفاي السادس الكبير عام ١٩٣٠، عندما احتدم الخلاف بين أينشتاين وبور حول مسألة النظرية الكمومية.

اتخذ الحائزون جائزة نوبل مواقف معاكسة بشأن هذه المسألة. كتب شيلدون جلاشو: «سنوات من الجهد المكثف من قبل العشرات

الأفضل والأذكى لم تسفر عن تنبؤ واحد يمكن التحقق منه، ولا ينبغي توقعه قريبًا». ذهب جيرارد هوفت إلى حد القول إن الاهتمام المحيط بنظرية الأوتار يمكن مقارنته بـ«الإعلانات التجارية التلفزيونية الأمريكية»؛ أي الكثير من الضجيج، ولكن لا يوجد مضمون.

وأشاد آخرون بفضائل نظرية الأوتار. كتب ديفيد جروس: «أينشتاين كان سيصبح سعيدًا بهذا، على الأقل بالهدف، إن لم يكن بالإنجاز... كان سيحب حقيقة أن هناك مبدأ هندسيًّا ضمنيًّا -والذي للأسف لم نفهمه بعد».

قارن ستيفن واينبرج نظرية الأوتار بالجهد التاريخي للعثور على القطب الشمالي. تحتوي جميع الخرائط القديمة للأرض على فجوة ضخمة وواسعة، حيث يجب أن يكون القطب الشمالي، لكن لم يرَه أحد من قبل. في أي مكان على وجه الأرض، أشارت جميع إبر البوصلات إلى هذا المكان الأسطوري. لكن كل المحاولات للعثور على القطب الشمالي الأسطوري انتهت بالفشل. في قلوبهم، عرف البحارة القدامى أنه يجب أن يكون هناك قطب شمالي، لكن لم يستطع أحد إثبات ذلك. حتى إن البعض شكك في وجوده. ومع ذلك، بعد قرون من التكهنات، أخيرًا في عام ١٩٠٩، وَطِئ روبرت بيري القطب الشمالي.

اعترف ناقد نظرية الأوتار جلاشو بأن الناقدين أقل عددًا في هذا النقاش. لقد علق ذات مرة قائلًا: «أجد نفسي ديناصورًا في عالم من الثدييات الناشئة».

انتقادات نظرية الأوتار

هناك العديد من الانتقادات الرئيسية التي وُجِّهت إلى نظرية الأوتار. ادعى النقاد أن النظرية كلها دعاية. هذا الجمال بحد ذاته هو دليل غير موثوق به في الفيزياء؛ أنه يتنبأ بالعديد من الأكوان؛ والأهم أنه غير قابل للاختبار.

لقد ضللت قوة الجمال عالم الفلك العظيم كبلر. كان مفتونًا بحقيقة أن النظام الشمسي يشبه مجموعة من متعددات السطوح **polyhedrons** المنتظمة مكدسة داخل بعضها البعض. قبل قرون، كان اليونانيون قد عددوا خمسة من متعددات الوجوه هذه (على سبيل المثال: المكعب، الهرم، إلخ). لاحظ كبلر أنه من خلال وضع هذه الأشكال متعددة السطوح بالتتابع داخل بعضها البعض، مثل الدمى الروسية، يمكن للمرء إعادة إنتاج بعض تفاصيل النظام الشمسي. كانت فكرة جميلة، لكن تبين أنها خاطئة تمامًا.

في الآونة الأخيرة، انتقد بعض علماء الفيزياء نظرية الأوتار، مشيرين إلى أن الجمال معيار مضلل للفيزياء. فقط لأن نظرية الأوتار لها خصائص رياضية رائعة لا يعني أنها تمتلك نواة من الحقيقة. لقد أشاروا بحق إلى أن النظريات الجميلة كانت في بعض الأحيان طريقًا مسدودًا.

لكن الشعراء غالبًا ما يستشهدون بقصيدة «على جرة إغريقية» لجون كيتس:

الجمال هو الحقيقة، جمال الحقيقة -وكل شيء

أنتم تعرفون الأرض، والأرض هي كل ما تحتاجون إلى معرفته.

كان بول ديراك بالتأكيد من أتباع هذا المبدأ عندما كتب: «يجب على الباحث في جهوده للتعبير عن القوانين الأساسية للطبيعة في شكل رياضي، أن يسعى بشكل أساسي من أجل الجمال الرياضي». في الواقع، كان يكتب أنه اكتشف نظريته الشهيرة عن الإلكترون من خلال العبث بالصيغ الرياضية البحتة بدلًا من النظر إلى البيانات.

على الرغم من قوة الجمال في الفيزياء، فمن المؤكد أن الجمال يمكن أن يضللك في كثير من الأحيان. كما كتبت عالمة الفيزياء سابين هوسينفيلدر[١٢٤]: «استبعدت مئات النظريات الجميلة، النظريات حول القوى الموحدة والجسيمات الجديدة والتناظرات الإضافية والأكوان الأخرى. كل هذه النظريات كانت خاطئة، خاطئة، خاطئة. من الواضح أن الاعتماد على الجمال ليس استراتيجية ناجحة».

---

(١٢٤) سابين هوسينفيلدر **Sabine Hossenfelder** (من مواليد ١٨ سبتمبر ١٩٧٦): هي عالمة فيزياء نظرية ألمانية ومؤلفة وموسيقية، تبحث في الجاذبية الكمومية. وهي زميلة باحثة في معهد فرانكفورت للدراسات المتقدمة حيث تقود مجموعة الموائع الفائقة والمادة المظلمة. وهي مؤلفة كتاب في الرياضيات: «كيف يؤدي الجمال إلى ضلال الفيزياء؟» الذي يستكشف مفهوم الأناقة في الفيزياء الأساسية وعلم الكونيات.

يزعم النقاد أن نظرية الأوتار لها رياضيات جميلة، لكن هذا ربما لا علاقة له بالواقع المادي.

هناك بعض المصداقية في هذا النقد، ولكن على المرء أن يدرك أن جوانب نظرية الأوتار مثل التناظر الفائق ليست عديمة الفائدة وخالية من التطبيقات المادية. على الرغم من عدم وجود دليل على التناظر الفائق حتى الآن، فقد ثبت أنه ضروري في القضاء على العديد من العيوب داخل النظرية الكمومية. التناظر الفائق، بإلغاء البوزونات ضد الفرميونات، يمكننا من حل مشكلة طويلة الأمد، والقضاء على الاختلافات التي تصيب الجاذبية الكمومية.

ليست كل نظرية جميلة لها تطبيق مادي، ولكن كل النظريات الفيزيائية الأساسية التي عُثر عليها حتى الآن، من دون استثناء، لديها نوع من الجمال أو التناظر مدمج فيها.

هل يمكن اختبارها؟

النقد الأهم لنظرية الأوتار هو أنها غير قابلة للاختبار. تُسمى الطاقة التي تمتلكها الجرافيتونات طاقة بلانك، وهي أكبر بمقدار كوادريليون مرة من الطاقة التي ينتجها مصادم الهدرونات الكبير. تخيل أنك تحاول بناء مصادم هدرونات أكبر بمقدار كوادريليون مرة من المصادم الحالي! ربما يحتاج المرء إلى معجل جسيمات بحجم المجرة لإجراء اختبار مباشر للنظرية.

علاوة على ذلك، كل حل لنظرية الأوتار هو كون كامل. ويبدو أن هناك عددًا لا حصر له من الحلول. لإجراء اختبار مباشر للنظرية، سيحتاج المرء إلى إنشاء أكوان صغيرة في المختبر! بعبارة أخرى، يستطيع الإله وحده حقًّا اختبار النظرية بشكل مباشر، لأن النظرية تستند إلى الأكوان، وليس فقط الذرات أو الجزيئات.

لذلك في البداية، يبدو أن نظرية الأوتار تفشل في اختبار الحمض لأي نظرية، أي قابلية الاختبار. لكن مروجي نظرية الأوتار ليسوا منزعجين. كما أثبتنا، تُجرى معظم العلوم بشكل غير مباشر، من خلال فحص أصداء الشمس، والانفجار العظيم، وما إلى ذلك.

وبالمثل، فإننا نبحث عن أصداء من البُعدين العاشر والحادي عشر. ربما تكون الأدلة على نظرية الأوتار مخفية في كل مكان حولنا، لكن علينا أن نستمع لصداها، بدلًا من محاولة مراقبتها مباشرة.

على سبيل المثال، إحدى الإشارات المحتملة من الفضاء البعيد هي وجود المادة المظلمة. حتى وقت قريب، كان يُعتقد على نطاق واسع أن الكون يتكون أساسًا من الذرات. صُدم علماء الفلك عندما اكتشفوا أن **4.9** في المائة فقط من الكون يتكون من ذرات مثل الهيدروجين والهيليوم. في الواقع، معظم الكون مخفي عنا، في شكل مادة مظلمة وطاقة مظلمة. (نتذكر أن المادة المظلمة والطاقة المظلمة هما شيئان مختلفان. ستة وعشرون فاصل ثمانية في المائة من الكون مصنوع من المادة المظلمة، وهي مادة غير مرئية تحيط بالمجرات وتمنعها من الطيران بعيدًا. و **68.3** في المائة من الكون مصنوعة من الطاقة المظلمة، والتي هي أكثر غموضًا، طاقة الفضاء الفارغ التي تدفع المجرات بعيدًا). ربما يكمن دليل مخفي على نظرية كل شيء في هذا الكون غير المرئي.

البحث عن المادة المظلمة

المادة المظلمة غريبة، فهي غير مرئية، لكنها تحافظ على تماسك مجرة درب التبانة. ولكن نظرًا لأنها تحتوي على وزن بلا شحنة، إذا حاولت الاحتفاظ بالمادة المظلمة في يدك فستتغربل من أصابعك كما لو لم تكن موجودة. سوف تسقط مباشرة من خلال الأرض، ثم عبر قلب الأرض، ثم إلى الجانب الآخر من الأرض، حيث ستؤدي الجاذبية في النهاية إلى عكس مسارها والعودة إلى موقعك. ثم ستتأرجح بينك وبين الجانب الآخر من الكوكب، كما لو أن الأرض ليست موجودة.

مهما كانت المادة المظلمة غريبة، فنحن نعلم أنها يجب أن تكون موجودة. إذا قمنا بتحليل دوران مجرة درب التبانة واستخدمنا قوانين نيوتن، فسنجد أنه لا توجد كتلة كافية لمواجهة قوة الطرد المركزي. بالنظر إلى مقدار الكتلة التي نراها، يجب أن تكون المجرات في الكون غير مستقرة ويجب أن تتباعد، لكنها كانت مستقرة لبلايين السنين. لذلك لدينا خياران: إما أن تكون معادلات نيوتن غير صحيحة عند تطبيقها على المجرات، أو أن هناك جسمًا غير مرئي يحافظ على سلامة المجرات. (نتذكر أن كوكب نبتون عُثر عليه بالطريقة نفسها، من خلال افتراض وجود كوكب جديد يفسر انحرافات أورانوس عن القطع الناقص المثالي).

في الوقت الحاضر، يُطلق على أحد المرشحين الرئيسيين للمادة المظلمة الجسيمات الضخمة ضعيفة التفاعل[١٢٥] **weakly interacting massive particles (WIMPs)**. من بينها، أحد الاحتمالات هو الفوتينو **photino**، الشريك فائق التناظر للفوتون. إن الفوتينو مستقر، وله كتلة، وغير مرئي، وليست له شحنة، وهو ما يتناسب تمامًا مع خصائص المادة المظلمة. يعتقد الفيزيائيون أن الأرض تتحرك في رياح غير مرئية من المادة المظلمة التي ربما تمر عبر جسمك الآن. إذا اصطدم فوتينو ببروتون، فقد يتسبب ذلك في تحطم البروتون في وابل من الجسيمات دون الذرية التي يمكن اكتشافها بعد ذلك. في الحقيقة، هناك حتى اليوم كاشفات ضخمة بحجم حوض السباحة (بكميات هائلة من السوائل التي تحتوي على الزينون والأرجون)، والتي قد تلتقط يومًا ما الشرارة الناتجة عن اصطدام ضوئي. هناك نحو عشرين مجموعة نشطة تبحث عن المادة المظلمة، وغالبًا ما تكون في

---

(١٢٥) جسيمات التفاعل الضعيف الضخمة **(WIMPs) weakly interacting massive particles**: هي جسيمات أولية افتراضية لم يُعثر عليها للآن، مفترض أنها تُشكِّل المادة المظلمة الباردة في كوننا الذي نعرفه. لا توجد هذه الجسيمات ضمن نموذج الفيزياء القياسي للجسيمات، كما أنها تتميز بعدم إصدارها أو امتصاصها لأي صورة من صور الإشعاع الكهرومغناطيسي بصورة واضحة، لذا يصعب كشفها بهذه الطريقة. لكن يمكن للعلماء التأكد من صحة وجود هذه الجسيمات من عدمه بمحاولة رصد دليل على وجودها بعد توهج الانفجار الأعظم. يتفق العلماء حاليًّا على أن هذه الجسيمات الغريبة موجودة خارج نطاق فيزياء الجسيمات التي نعرفها، وهي تتفاعل بصورة ضئيلة جدًّا مع المادة المعروفة. يحتاج العلماء إلى فرض وجود ما يُسمى المادة المظلمة لتفسير مسارات المجرات وسرعة دورانها حول محورها، والتي لا يمكن تفسيرها بالمادة العادية (حديثًا توجد نظريات للجاذبية الكمومية يمكنها تفسير هذه الظاهرة الغريبة أيضًا).

أعماق هُوى المناجم تحت سطح الأرض، بعيدًا عن تفاعلات الأشعة الكونية المتداخلة. لذلك فمن المتصور أن تصادم المادة المظلمة قد يمكن التقاطه بواسطة أدواتنا. بمجرد اكتشاف اصطدامات المادة المظلمة، سيقوم الفيزيائيون بدراسة خصائص جسيمات المادة المظلمة ثم مقارنتها بالخصائص المتوقعة للفوتينوات. إذا كانت تنبؤات نظرية الأوتار تتطابق مع النتائج التجريبية على المادة المظلمة، فسيقطع هذا شوطًا طويلًا نحو إقناع الفيزيائيين بأن هذا هو المسار الصحيح.

الاحتمال الآخر هو أن الفوتينو قد ينتج عن الجيل التالي من مسرعات الجسيمات التي تتم مناقشتها.

ما بعد مصادم الهدرونات الكبير

يفكر اليابانيون في تمويل المصادم الخطي الدولي International Linear Collider، الذي سيطلق شعاعًا من الإلكترونات أسفل أنبوب مستقيم، حتى يصطدم بشعاع من الإلكترونات المضادة. إذا تمت الموافقة على الجهاز، فسيُصنع خلال اثني عشر عامًا. ميزة مصادم مثل هذا هي أنه يستخدم الإلكترونات بدلًا من البروتونات. نظرًا لأن البروتونات تتكون من ثلاثة كواركات مرتبطة ببعضها البعض بواسطة الجلونات، فإن الاصطدام بين البروتونات يكون شديد الفوضى، مع تكوين سيل من الجسيمات الخارجية. على النقيض من ذلك، فإن الإلكترون هو جسيم أولي واحد، وبالتالي فإن الاصطدام مع الإلكترون المضاد يكون أكثر نظافة ويتطلب طاقة أقل بكثير. نتيجة لذلك، عند ٢٥٠ مليار إلكترون فولت فقط يمكن أن تكون قادرة على تكوين بوزونات هيجز.

أعرب الصينيون أيضًا عن اهتمامهم ببناء مصادم الإلكترون البوزيتروني الدائري Circular Electron Positron Collider. سيبدأ العمل فيه في عام ٢٠٢٢ تقريبًا، وقد ينتهي العمل فيه قرابة عام ٢٠٣٠، بتكلفة تتراوح من ٥ إلى ٦ مليارات دولار. سيصل إلى طاقة ٢٤٠ مليار إلكترون فولت وسيكون على مساحة ١٠٠ كيلومتر.

حتى لا يتفوق عليهم أحد، يخطط الفيزيائيون في سيرن لجيل جديد من مصادم الهدرونات الكبير، المسمى المصادم الدائري المستقبلي Future Circular Collider (FCC). سيصل في النهاية إلى ١٠٠ تريليون إلكترون فولت. وسيكون أيضًا على مساحة نحو ١٠٠ كيلومتر.

ليس من الواضح ما إذا كانت هذه المسرعات ستُبنى فعلًا، ولكن هذا يعني أن هناك أملًا في العثور على المادة المظلمة في الجيل التالي من المسرعات ما بعد مصادم الهدرونات الكبير. إذا اكتشفنا جسيمات المادة المظلمة، يمكن مقارنتها بتنبؤات نظرية الأوتار.

ثمة تنبؤ آخر لنظرية الأوتار يمكن التحقق منه بواسطة هذه المسرعات، هو وجود ثقوب سوداء صغيرة. نظرًا لأن نظرية الأوتار هي نظرية لكل شيء، فهي تتضمن الجاذبية وكذلك الجسيمات دون الذرية، لذلك يتوقع الفيزيائيون العثور على ثقوب سوداء صغيرة في المسرع. (هذه الثقوب السوداء الصغيرة، على عكس الثقوب السوداء النجمية، غير ضارة ولديها طاقة جسيمات دون ذرية صغيرة وليس طاقة النجوم المحتضرة. في الحقيقة تتعرض الأرض لقصف بالأشعة الكونية أقوى بكثير من تلك التي يمكن أن تنتجها هذه الثقوب. مسرعات من دون أي آثار ضارة).

الانفجار الأعظم كمحطم للذرات

هناك أيضًا أمل في أن نتمكن من الاستفادة من أعظم محطم للذرة على الإطلاق، الانفجار الأعظم نفسه. قد يعطينا الإشعاع الصادر عن الانفجار العظيم فكرة عن المادة المظلمة والطاقة المظلمة. بادئ ذي بدء، من السهل اكتشاف صدى الانفجار العظيم أو ما بعده. تمكنت أقمارنا الصناعية من اكتشاف هذا الإشعاع بدقة هائلة.

تُظهِر الصور الفوتوغرافية لإشعاع الخلفية الميكروي هذا أنه ناعم بشكل ملحوظ، مع ظهور تموجات صغيرة على سطحه. تمثل هذه التموجات بدورها تقلبات كمومية صغيرة كانت موجودة في لحظة الانفجار العظيم وتضخمت بعد ذلك بسبب الانفجار.

لكن المثير للجدل هو أنه يبدو أن هناك مخالفات أو بقعًا في إشعاع الخلفية لا يمكننا تفسيرها. هناك بعض التكهنات بأن هذه اللطخات الغريبة هي بقايا اصطدام مع أكوان أخرى. على وجه الخصوص، تعد البقعة الباردة في إشعاع الخلفية الكونية الميكروية **CMB cold spot** علامة رائعة بشكل غير عادي على إشعاع الخلفية المنتظم، بخلاف ذلك الذي تكهن بعض الفيزيائيين بأنه قد يكون بقايا نوع من الاتصال أو التصادم بين كوننا وكون موازٍ في بداية الزمن. إذا كانت هذه العلامات

الغريبة تمثل تفاعل كوننا مع أكوان متوازية، فقد تصبح نظرية الأكوان المتعددة أكثر قبولًا للمتشككين.

بالفعل، هناك خطط لوضع كواشف في الفضاء يمكنها تحسين كل هذه الحسابات، باستخدام كاشفات الموجات الجاذبية الفضائية space-based gravity wave detectors.

هوائي مقياس التداخل الليزري الفضائي LISA

في عام ١٩١٦، أظهر أينشتاين أن الجاذبية يمكن أن تنتقل في موجات. مثل رمي حجر في بركة ومشاهدة الحلقات متحدة المركز التي يخلقها، توقع أينشتاين أن تنتقل موجات الجاذبية بسرعة الضوء. لسوء الحظ، ستكون هذه الأشياء باهتة في ذلك لدرجة أنه لم يعتقد أننا سنجدها في أي وقت قريب.

لكنه كان محقًّا. استغرق الأمر حتى عام ٢٠١٦، مائة عام بعد توقعه الأصلي، قبل أن تُرصد موجات الجاذبية. التُقطت إشارات من ثقبين أسودين اصطدما في الفضاء منذ نحو مليار سنة بواسطة أجهزة كشف ضخمة. هذه الكواشف التي بُنيت في لويزيانا وولاية واشنطن، تشغل عدة أميال مربعة من العقارات. إنها تشبه حرف L كبيرًا، حيث تنتقل أشعة الليزر إلى أسفل كل ساق من حرف L عندما يلتقي الشعاعان في المركز، فتخلق نمط تداخل حساسًا للغاية للاهتزازات بحيث يمكنها اكتشاف هذا الاصطدام.

عن عملهم الرائد، فاز ثلاثة فيزيائيين؛ راينر فايس، وكيب إس ثورن، وباري سي باريش، بجائزة نوبل في عام ٢٠١٧.

لمزيد من الحساسية، هناك خطط لإرسال أجهزة الكشف عن موجات الجاذبية إلى الفضاء الخارجي. قد يكون المشروع، المعروف

باسم هوائي قياس التداخل الليزري الفضائي (LISA)، قادرًا على التقاط الاهتزازات من لحظة الانفجار الأعظم نفسه. يتكون أحد إصدارات LISA من ثلاثة أقمار صناعية منفصلة في الفضاء، كل منها متصل بالآخرين عن طريق شبكة من أشعة الليزر. يبلغ طول المثلث نحو مليون ميل من كل جانب. عندما تصطدم موجة جاذبية من الانفجار الأعظم بالكاشف، فإنها تتسبب في اهتزاز أشعة الليزر قليلًا، والتي يمكن قياسها بعد ذلك بواسطة أدوات حساسة.

الهدف النهائي هو تسجيل موجات الصدمة من الانفجار الأعظم، ثم تشغيل شريط الفيديو للخلف للحصول على أفضل تخمين للإشعاع قبل الانفجار الأعظم. ستقارن موجات ما قبل الانفجار العظيم هذه بما توقعته العديد من إصدارات نظرية الأوتار. بهذه الطريقة، قد يتمكن المرء من الحصول على بيانات رقمية حول الأكوان المتعددة قبل الانفجار الأعظم.

باستخدام أجهزة أكثر تقدمًا من LISA، قد يتمكن المرء من الحصول على صور للكون الوليد. وربما نجد دليلًا على أن الحبل السري يربط كوننا الرضيع بالكون الأم.

اختبار قانون التربيع العكسي

اعتراض آخر متكرر على نظرية الأوتار هو أنها تفترض أننا نعيش في الواقع في عشرة أو أحد عشر بُعدًا، ولا يوجد دليل تجريبي عليها.

ولكن قد يكون هذا الجانب قابلًا للاختبار في الواقع باستخدام أدوات جاهزة. إذا كان كوننا ثلاثي الأبعاد، فإن قوة الجاذبية تتناسب عكسيًّا مع مربع المسافة التي تفصل جسمين عن بعضهما. هذا القانون الشهير لنيوتن هو ما يوجه مسابيرنا الفضائية التي تقطع ملايين الأميال في الفضاء بدقة مذهلة، لذلك يمكننا إطلاق مسابير فضائية من خلال حلقات زحل مباشرة إذا شعرنا بذلك. لكن قانون التربيع العكسي الشهير لنيوتن اختُبر فقط عبر مسافات فلكية، نادرًا ما نختبره في المختبر. إذا كانت قوة الجاذبية على مسافات صغيرة لا تمتثل لقانون التربيع العكسي، فإنها تشير إلى وجود بُعد أعلى. على سبيل المثال، إذا كان للكون أربعة أبعاد مكانية، يجب أن تتناسب الجاذبية عكسيًّا مع مكعب المسافة الفاصلة. وهكذا إذا كان للكون أبعاد مكانية N، يجب أن تتناسب قوة الجاذبية عكسيًّا مع $(N-1)$ من المسافة الفاصلة بين جسمين.

ولكن نادرًا ما قيست قوة الجاذبية بين جسمين في المختبر. يصعب إجراء هذه التجارب، نظرًا لأن قوى الجاذبية صغيرة جدًّا في المختبر، ولكن أُجريت القياسات الأولى في كولورادو، وكانت النتائج سلبية؛ أي أن قانون التربيع العكسي لنيوتن لا يزال ساريًا. (لكن هذا يعني فقط أنه لا توجد أبعاد إضافية في كولورادو).

مشكلة المشهد في نظرية الأوتار

Landscape Problem

بالنسبة للباحث النظري الضليع، كل هذه الانتقادات مزعجة، ولكنها ليست قاتلة. ولكن ما يسبب مشكلات للباحث هو أن النموذج يبدو أنه يتنبأ بوجود أكوان متعددة من الأكوان المتوازية، وكثير منها أكثر جنونًا من تلك الموجودة في خيال كاتب سيناريو من هوليوود. تحتوي نظرية الأوتار على عدد لا حصر له من الحلول، كل منها يصف نظرية محدودة للجاذبية تعمل جيدًا، ولا تشبه كوننا على الإطلاق. في العديد من هذه الأكوان المتوازية، يكون البروتون غير مستقر، لذلك يتحلل إلى سحابة واسعة من الإلكترونات والنيوترينوات. في هذه الأكوان، لا يمكن أن توجد المادة المعقدة كما نعرفها (الذرات والجزيئات). إنها تتكون فقط من غاز من الجسيمات دون الذرية. (قد يجادل البعض في أن هذه الأكوان البديلة ليست سوى احتمالات رياضية وليست حقيقية. لكن المشكلة هي أن النظرية تفتقر إلى القدرة التنبؤية، لأنها لا تستطيع إخبارك بأي من هذه الأكوان البديلة هو الحقيقي).

هذه المشكلة في الواقع ليست فريدة من نوعها في نظرية الأوتار. على سبيل المثال، كم عدد الحلول المتوفرة لمعادلات نيوتن أو ماكسويل؟ هناك عدد لا حصر له اعتمادًا على ما تدرسه. إذا بدأت

بمصباح كهربائي أو ليزر وقمت بحل معادلات ماكسويل، فستجد حلًّا فريدًا لكل أداة. لذا فإن نظريات ماكسويل أو نيوتن لها أيضًا عدد لا حصر له من الحلول اعتمادًا على الظروف الأولية؛ أي الموقف الذي تبدأ به.

من المحتمل أن توجد هذه المشكلة لأي نظرية عن كل شيء. أي نظرية لكل شيء سيكون لها عدد لا حصر له من الحلول اعتمادًا على الظروف الأولية. لكن كيف تحدد الشروط الأولية للكون بأسره؟ هذا يعني أنه يجب عليك إدخال شروط الانفجار الأعظم من الخارج يدويًّا.

بالنسبة للعديد من الفيزيائيين فإن هذا يبدو وكأنه غش. من الناحية المثالية، تريد أن تخبرك النظرية نفسها بالظروف التي أدت إلى الانفجار الأعظم. تريد أن تخبرك النظرية بكل شيء، بما في ذلك درجة الحرارة والكثافة وتكوين الانفجار الأعظم الأصلي. يجب أن تحتوي نظرية كل شيء بطريقة ما على شروطها الأولية، كل ذلك من تلقاء نفسه.

بمعنى آخر، تريد تنبؤًا فريدًا لبداية الكون. لذا فإن نظرية الأوتار كريمة بشكل زائد عن الحد. هل يمكن أن تتنبأ بكوننا؟ نعم. هذا ادعاء مثير، كان هدفًا لعلماء الفيزياء لما يقرب من قرن. ولكن هل يمكن أن تتنبأ بكون واحد فقط؟ على الأغلب لا. وهذا ما يُسمى مشكلة المشهد.

هناك العديد من الحلول الممكنة لهذه المشكلة، ولم يحظَ أيٌّ منها بالقبول على نطاق واسع. الأول هو المبدأ الإنساني **anthropic principle**، الذي يقول إن كوننا خاص لأننا هنا ككائنات واعية لمناقشة هذا السؤال في المقام الأول. بعبارة أخرى، قد يكون هناك

عدد لا حصر له من الأكوان، لكن كوننا هو الذي يحتوي على الشروط التي تجعل الحياة الذكية ممكنة. لقد عُدلت الشروط الأولية للانفجار الأعظم في بداية الزمن بحيث يمكن للحياة الذكية أن توجد اليوم. قد لا تحتوي الأكوان الأخرى على حياة واعية فيها.

أتذكر بوضوح مقدمتي الأولى لهذا المفهوم عندما كنت في الصف الثاني. أتذكر أن أستاذي قال إن الله أحب الأرض لأنه وضعها بدقة «تمامًا» في هذا الموضع من الشمس. ليست قريبة جدًّا، وإلا كانت المحيطات ستغلي وتتبخر. وليست بعيدة جدًّا، وإلا كانت المحيطات ستتجمد. حتى عندما كنت طفلًا، أذهلتني هذه الحجة، لأنها استخدمت منطقًا خالصًا لتحديد طبيعة الكون. لكن اليوم، كشفت الأقمار الصناعية عن أربعة آلاف كوكب تدور حول نجوم أخرى. للأسف، معظمها قريب جدًّا أو بعيد جدًّا عن نجومه، فهي غير صالحة لدعم الحياة. لذلك هناك طريقتان يمكن للمرء أن يحلل فيهما حجة مدرس الصف الثاني. ربما يوجد إله محب بعد كل شيء، أو ربما هناك الآلاف من الكواكب الميتة التي هي قريبة جدًّا أو بعيدة جدًّا، ونحن على كوكب مناسب تمامًا للحفاظ على الحياة الذكية التي يمكنها بالتالي مناقشة هذا السؤال. وبالمثل، قد نتعايش في محيط من الأكوان الميتة، وكوننا خاص فقط لأننا هنا لمناقشة هذا السؤال.

يسمح المبدأ الإنساني للفرد في الواقع بشرح حقيقة تجريبية غريبة عن كوننا؛ أن الثوابت الأساسية للطبيعة تبدو وكأنها مضبوطة للسماح بالحياة. كما كتب الفيزيائي فريمان دايسون: يبدو أن الكون

كان يعلم أننا قادمون. على سبيل المثال، إذا كانت القوة النووية أضعف قليلًا، فلن تشتعل الشمس أبدًا، وسيكون النظام الشمسي مظلمًا. إذا كانت القوة النووية القوية أقوى قليلًا، لكانت الشمس قد احترقت منذ مليارات السنين. لذا فإن القوة النووية مضبوطة بشكل صحيح.

وبالمثل، إذا كانت الجاذبية أضعف قليلًا، فربما كان الانفجار الأعظم سينتهي بالتجمد العظيم، وسيصبح الكون ميتًا وباردًا يتمدد. إذا كانت الجاذبية أقوى قليلًا، فربما نكون قد انتهينا من الانسحاق العظيم، ولربما حُرقت كل أشكال الحياة حتى الموت. ومع ذلك، فإن جاذبيتنا مناسبة تمامًا للسماح للنجوم والكواكب بالتشكُّل، وبأن تدوم طويلًا بما يكفي لنشوء الحياة.

يمكن للمرء أن يسرد عددًا من هذه الحوادث التي تجعل الحياة ممكنة، وفي كل مرة نكون في منتصف المنطقة المعتدلة **Goldilocks** لذا فإن الكون هو أحد المقامرين العمالقة، وقد فزنا بالرهان. ولكن وفقًا لنظرية الأكوان المتعددة، فهذا يعني أننا نتعايش مع عدد كبير من الأكوان الميتة.

لذلك ربما يمكن للمبدأ الإنساني أن يختار كوننا من بين ملايين الأكوان الموجودة في المشهد، لأن لدينا حياة واعية في كوننا.

وجهة نظري الشخصية في نظرية الأوتار

أنا أعمل على نظرية الأوتار منذ عام ١٩٦٨، لذلك لدي وجهة نظر محددة. مهما نظرت إليها، فإن الشكل النهائي للنظرية لم يُكشف عنه بعد. لذلك من السابق لأوانه مقارنة نظرية الأوتار بالكون الحالي.

تتمثل إحدى ميزات نظرية الأوتار في أنها تتطور بأثر رجعي، وتكشف عن رياضيات ومفاهيم جديدة على طول الطريق. كل عقد أو نحو ذلك، هناك إعلان جديد في نظرية الأوتار يغير وجهة نظرنا فيما يتعلق بطبيعتها. لقد شاهدت نحو ثلاث ثورات مذهلة من هذا القبيل، ومع ذلك التعبير عن نظرية الأوتار في شكلها الكامل لم يتحقق بعد. نحن لا نعرف بعد مبادئها الأساسية النهائية. ولكن عندما يحدث ذلك، عندها فقط يمكننا مقارنتها بالتجربة.

الكشف عن الهرم

أحب مقارنة نظرية الأوتار بالبحث عن كنز في الصحراء المصرية. لنفترض أنك ذات يوم تعثرت في صخرة صغيرة في الصحراء. بعد التخلص من الرمال، بدأت في إدراك أن هذه الحصاة هي في الواقع قمة هرم عملاق. بعد سنوات من التنقيب، وجدت كل أنواع الغرف والأعمال الفنية الغريبة. في كل طابق تجد مفاجآت جديدة. أخيرًا، بعد حفر العديد من الطوابق، تصل إلى الباب الأخير، وتوشك على فتحه لمعرفة من صنع الهرم.

أنا شخصيًّا أعتقد أننا لسنا في الطابق السفلي، لأننا نواصل اكتشاف طبقات رياضية جديدة في كل مرة نقوم فيها بتحليل النظرية. لا يزال هناك المزيد من الطبقات للكشف عنها قبل أن نجد نظرية الأوتار في شكلها النهائي. بمعنى آخر، النظرية أذكى منا.

من الممكن التعبير عن كل نظرية الأوتار في شكل نظرية مجال الأوتار من خلال معادلة يبلغ طولها نحو بوصة واحدة. لكننا نحتاج إلى خمس معادلات من هذا القبيل في عشرة أبعاد.

على الرغم من أنه يمكننا التعبير عن نظرية الأوتار في شكل نظرية المجال، فإن هذا لا يزال غير ممكن بالنسبة للنظرية-إم. الأمل هو أن يجد الفيزيائيون يومًا ما معادلة واحدة تلخص كل نظرية-إم. لسوء

الحظ، من الصعب التعبير عن الغشاء (الذي يمكن أن يهتز بعدة طرق) في شكل نظرية المجال. نتيجة لذلك، تتكون نظرية-إم من عشرات المعادلات المفككة التي تصف بأعجوبة نفس النظرية. إذا تمكنا من كتابة نظرية-إم في شكل نظرية المجال، يجب أن تنبثق النظرية بأكملها من معادلة واحدة.

لا أحد يستطيع توقع ما إذا كان هذا سيحدث أو متى. ولكن بعد مشاهدة الضجيج حول نظرية الأوتار، نفد صبر الجمهور.

ولكن حتى بين مُنظري الأوتار، هناك قدر معين من التشاؤم حول الآفاق المستقبلية للنظرية. كما ذكر ديفيد جروس الحائز جائزة نوبل، فإن نظرية الأوتار تشبه قمة الجبل. عندما يتسلق المتسلقون الجبل، يكون الجزء العلوي مرئيًّا بوضوح، ولكن يبدو أنه يتراجع كلما اقتربت منه. الهدف قريب جدًّا، لكن يبدو دائمًا بعيد المنال.

أنا شخصيًّا أعتقد أن هذا أمر مفهوم، حيث لا أحد يعرف متى، إذا حدث ذلك، سنجد تناظرًا فائقًا في المختبر، ولكن يجب وضع هذا في المنظور المناسب. يجب أن تستند صحة أو عدم صحة النظرية إلى نتائج ملموسة، وليس على الرغبات الذاتية للفيزيائيين. نأمل جميعًا أن تتأكد نظريتنا الأليفة في حياتنا. هذه رغبة إنسانية عميقة. لكن في بعض الأحيان يكون للطبيعة جدول زمني خاص بها.

استغرقت النظرية الذرية، على سبيل المثال، ألفي عام قبل أن تثبت صحتها أخيرًا، ولم يتمكن العلماء إلا مؤخرًا من التقاط صور حية للذرات الفردية. حتى نظريات نيوتن وأينشتاين العظيمة استغرقت

عقودًا حتى اختُبر العديد من تنبؤاتهما وتم التحقق منها بالكامل. تنبأ جون ميشيل بالثقوب السوداء لأول مرة في عام ١٧٨٣، لكن في عام ٢٠١٩ فقط أنتج علماء الفلك أول صور قاطعة لأفق الحدث.

أنا شخصيًّا أعتقد أن تشاؤم العديد من العلماء قد يكون مضللًا، لأن الدليل على النظرية قد لا يوجد في بعض مسرعات الجسيمات العملاقة، ولكن عندما يجد شخص ما الصيغة الرياضية النهائية للنظرية.

النقطة المهمة هنا هي أننا ربما لا نحتاج إلى إثبات تجريبي لنظرية الأوتار على الإطلاق. نظرية كل شيء هي أيضًا نظرية أشياء عادية. إذا تمكنا من اشتقاق كتلة الكواركات والجسيمات دون الذرية المعروفة الأخرى من المبادئ الأولى، فقد يكون هذا دليلًا مقنعًا على أن هذه هي النظرية النهائية.

المشكلة ليست تجريبية على الإطلاق. يحتوي النموذج القياسي على عشرين حدًّا حرًّا يتم وضعها يدويًّا (مثل كتلة الكواركات وقوة تفاعلاتها). لدينا الكثير من البيانات التجريبية المتعلقة بكتل ومقارنات الجسيمات دون الذرية. إذا تمكنت نظرية الأوتار من حساب هذه الثوابت الأساسية بدقة من المبادئ الأولى، من دون أي افتراضات، فإن هذا، في رأيي، سيثبت صحتها. سيكون حدثًا تاريخيًّا حقًّا إذا انبثقت الحدود الرياضية المعروفة للكون من معادلة واحدة.

لكن بمجرد أن نحصل على هذه المعادلة التي يبلغ طولها بوصة واحدة، ماذا سنفعل بها؟ كيف يمكننا الهروب من مشكلة المشهد؟

أحد الاحتمالات هو أن العديد من هذه الأكوان غير مستقرة

وتتحلل إلى كوننا المألوف. نتذكر أن الفراغ، بدلًا من أن يكون شيئًا مملًّا وعديم الملامح، هو في الواقع يعج بأكوان فقاعية تظهر وتختفي من الوجود، كما هي الحال في حمام الفقاعات. أطلق هوكينج على هذا اسم رغوة الزمكان. معظم هذه الأكوان الفقاعية الصغيرة غير مستقرة، تقفز فجأة من الفراغ ثم تقفز مرة أخرى لتختفي.

بالطريقة نفسها، بمجرد العثور على الصيغة النهائية للنظرية، قد يكون المرء قادرًا على إظهار أن معظم هذه الأكوان البديلة غير مستقرة وتتحلل إلى كوننا. على سبيل المثال، مقياس الوقت الطبيعي لهذه الأكوان الفقاعية هو زمن بلانك، وهو 10^{-43} ثانية، وهو مقدار زمني قصير للغاية. معظم الأكوان تعيش فقط لهذه اللحظة القصيرة. ومع ذلك، فإن عمر كوننا، بالمقارنة، هو 13.8 مليار سنة، وهو أطول من الناحية الفلكية من عمر معظم الأكوان في هذه الصيغة. بعبارة أخرى، ربما يكون كوننا مميزًا بين عدد لا نهائي من الأكوان في المشهد. لقد تفوقنا عليهم جميعًا، وهذا هو سبب وجودنا هنا اليوم لمناقشة هذا السؤال.

لكن ماذا سنفعل إذا تبين أن المعادلة النهائية معقدة للغاية بحيث لا يمكن حلها يدويًّا؟ ثم يبدو من المستحيل إظهار أن كوننا مميز بين الأكوان الموجودة في المشهد. في هذه المرحلة، أعتقد أننا يجب أن نضعه على جهاز كمبيوتر. هذا هو المسار المتبع لنظرية الكوارك. نتذكر أن جسيم يانج-ميلس يعمل مثل الغراء لربط الكواركات بالبروتون. لكن بعد خمسين عامًا، لم يتمكن أحد من إثبات ذلك بشكل صارم

رياضيًّا. في الواقع، تخلى العديد من الفيزيائيين عن الأمل في تحقيق ذلك. بدلًا من ذلك، تُحل معادلات يانج-ميلس باستخدام الكمبيوتر.

يتم ذلك عن طريق تقريب الزمكان كسلسلة من نقاط في شبكة. عادة، نفكر في الزمكان على أنه سطح أملس، مع عدد لا نهائي من النقاط. عندما تتحرك الأشياء، فإنها تمر عبر هذا التسلسل اللا متناهي. لكن يمكننا تقريب هذا السطح الأملس بشبكة. عندما نجعل المسافات بين نقاط الشبكة تصبح أصغر وأصغر، تتحول إلى الزمكان العادي، وتبدأ النظرية النهائية في الظهور. وبالمثل، بمجرد أن نحصل على المعادلة النهائية لنظرية-إم، يمكننا وضعها على شبكة والقيام بالحسابات على جهاز كمبيوتر.

في هذا السيناريو، ينبثق كوننا من ناتج حاسوب عملاق.

(ومع ذلك، أتذكر دليل هيتشهيكر[١٢٦] إلى المجرة، عندما بُني كمبيوتر عملاق لإيجاد معنى الحياة. بعد دهور من الحساب، استنتج الكمبيوتر أخيرًا أن معنى الكون كان «42»).

لذا فمن المتصور أن الجيل القادم من مسرعات الجسيمات، أو

(١٢٦) «دليل المسافر إلى المجرة»، سلسلة كوميديا خيال علمي أَلَّفها دوجلاس آدمز. بدأت كعرض كوميدي إذاعي بثَّته بي بي سي راديو ٤ في العام ١٩٧٨، وبعد ذلك تحولت إلى أعمال فنية أخرى، بما في ذلك الكتابة الروائية، والكتب المصورة، ومسلسل تلفزيوني، ولعبة فيديو، وفيلم سينمائي. تحول «دليل المسافر إلى المجرة» إلى ظاهرة وسائط متعددة عالمية؛ الروايات أكثر هذه الوسائط انتشارًا، بعد أن كانت قد تُرجمت إلى أكثر من ٣٠ لغة بحلول العام ٢٠٠٥. حازت الرواية الأولى «دليل المسافر إلى المجرة» (١٩٧٩)، المرتبة الرابعة في اقتراع القراءة الكبرى لمحطة بي بي سي.

كاشف الجسيمات في أعماق عمود المنجم، أو كاشف موجات الجاذبية في الفضاء السحيق، سيجد دليلًا تجريبيًّا على نظرية الأوتار. ولكن إذا لم يكن الأمر كذلك، فربما يكون لدى بعض الفيزيائيين المغامرين القدرة على التحمل والرؤية لإيجاد الصيغة الرياضية النهائية لنظرية كل شيء. عندها فقط يمكننا مقارنتها بالتجربة.

ربما يكون هناك المزيد من التقلبات والانعطافات التي تواجه علماء الفيزياء قبل انتهاء الرحلة. لكنني متأكد من أننا سنجد في النهاية نظرية كل شيء.

لكن السؤال التالي هو: من أين أتت نظرية الأوتار؟ إذا كانت نظرية كل شيء لها تصميم كبير، فهل لها مصمم؟ إذا كان الأمر كذلك، فهل للكون هدف ومعنى؟

* * *

الفصل السابع

البحث عن المعنى في الكون

لقد رأينا كيف أن إتقان القوى الأساسية الأربع لم يكشف فقط عن العديد من أسرار الطبيعة، ولكنه أيضًا أطلق العنان للثورات العلمية العظيمة التي غيرت مصير الحضارة نفسها. عندما كتب نيوتن قوانين الحركة والجاذبية، وضع الأساس للثورة الصناعية. عندما كشف فاراداي وماكسويل عن وحدة القوة الكهربائية والمغناطيسية، أطلق هذا الثورة الكهربائية. عندما كشف أينشتاين وعلماء الفيزياء الكمومية عن الطبيعة الاحتمالية والنسبية للواقع، أدى ذلك إلى ثورة التكنولوجيا الفائقة اليوم.

لكننا الآن ربما نتقارب بشأن نظرية كل شيء يوحد القوى الأساسية الأربع. لذا افترض في الوقت الحالي أننا توصلنا أخيرًا إلى هذه النظرية. افترض أنه قد اختُبر بدقة وقُبِل عالميًّا من قبل علماء العالم. ما هو تأثير ذلك على حياتنا وتفكيرنا ومفهومنا للكون؟

بقدر ما يكون له تأثير مباشر على حياتنا المباشرة، فمن المحتمل أن يكون ضئيلًا. كل حل لنظرية كل شيء هو كون كامل. لذلك، فإن

الطاقة التي تصبح النظرية ذات صلة بها هي طاقة بلانك، وهي أكبر بمقدار أربعة ملايين مرة من الطاقة التي ينتجها مصادم الهدرونات الكبير. مقياس الطاقة لنظرية كل شيء يتعلق بخلق الكون وألغاز الثقوب السوداء، وليس بشؤونك أنت وأنا.

قد يكون التأثير الحقيقي للنظرية على حياتنا فلسفيًّا، لأن النظرية قد تجيب أخيرًا عن أسئلة فلسفية عميقة طاردت المفكرين العظام لأجيال، مثل: هل السفر عبر الزمن ممكن؟ وماذا حدث قبل الخلق؟ ومن أين أتى الكون؟

كما قال عالم الأحياء العظيم توماس هـ. هكسلي[١٢٧] في عام ١٨٦٣: «إن جميع الأسئلة المتعلقة بالبشرية، والمشكلة التي تكمن وراء كل الأسئلة الأخرى الأكثر إثارة للاهتمام في أي منها، هي مسألة تحديد مكان الإنسان في الطبيعة وعلاقته بالكون».

لكن هذا لا يزال يترك السؤال مفتوحًا: ماذا تقول نظرية كل شيء عن المعنى في الكون؟

ذكرت سكرتيرة أينشتاين، هيلين دوكاس، ذات مرة أن أينشتاين كان غارقًا في البريد الذي تلقاه يتوسل إليه لشرح معنى الحياة، وسؤاله عما إذا كان يؤمن بالله. قال إنه عاجز عن الإجابة عن كل هذه الأسئلة حول الغرض من الكون.

---

(١٢٧) توماس هنري هكسلي **Thomas Henry Huxley** (٤ مايو ١٨٢٥–٢٩ يونيو ١٨٩٥): عضو المجلس الخاص للمملكة المتحدة، والحائز زمالة الجمعية الملكية وزمالة الجمعية الملكية لإدنبرة وعضو جمعية لينين في لندن، كان عالم أحياء إنجليزيًّا وعالم أنثروبولوجيا متخصصًا في علم التشريح المقارن. كان من أشد المدافعين عن نظرية التطور لتشارلز داروين.

اليوم، لا تزال الأسئلة حول المعنى في الكون ووجود الخالق تثير إعجاب عامة الناس. في عام ٢٠١٨، عُرضت رسالة خاصة كتبها أينشتاين قبل وفاته في مزاد علني. والمثير للدهشة أن العطاء الفائز بجائزة خطاب الله كان ٢,٩ مليون دولار، حتى تجاوز توقعات دار المزاد.

في هذه الرسالة وغيرها، يئس أينشتاين من الإجابة عن الأسئلة المتعلقة بمعنى الحياة، لكنه كان واضحًا بشأن تفكيره بشأن الله. وكتب أن إحدى المشكلات هي أن هناك نوعين من الآلهة، وغالبًا ما نخلط بين الاثنين. أولًا، هناك الإله الشخصي، الإله الذي تصلي من أجله، إله الكتاب المقدس الذي يضرب الفلستيون[١٢٨] ويكافئ المؤمنين. لم يؤمن بهذا الإله. لم يؤمن أن الله الذي خلق الكون يتدخل في شؤون البشر.

ومع ذلك، فقد آمن بإله سبينوزا[١٢٩]؛ أي إله النظام في عالم

(١٢٨) الفلستيون أو الفلستينيون **Philistines** (مفرده فلستي من أرض فلستة): هم أبناء شعب قديم استقروا في مدن كنعانية كغزة وعسقلان وأسدود، وشيدوا حضارة قديمة، مذكورون في الكتاب المقدس (پلشتيم) على أنهم من شعوب البحر التي هاجرت من كريت أو الأناضول (قد تكون جزيرة كريت الحالية حسب رأي مؤرخي الكتاب المقدس)، واستقرت في المنطقة الساحلية الجنوبية من أرض كنعان.

(١٢٩) باروخ سبينوزا **Baruch Spinoza**: هو فيلسوف هولندي من أهم فلاسفة القرن الـ١٧. ولد في ٢٤ نوفمبر ١٦٣٢ في أمستردام، وتوفي في ٢١ فبراير ١٦٧٧ في لاهاي. في مطلع شبابه كان موافقًا لفلسفة رينيه ديكارت عن ثنائية الجسد والعقل باعتبارهما شيئين منفصلين، ولكنه عاد وغير وجهة نظره في وقت لاحق وأكد أنهما غير منفصلين، لكونهما كيانًا واحدًا. امتاز سبينوزا باستقامة أخلاقه وخطَّ لنفسه نهجًا فلسفيًّا يعتبر أن الخير الأسمى يكون في «فرح المعرفة» أي في «اتحاد الروح بالطبيعة».

جميل وبسيط وأنيق. كان من الممكن أن يكون الكون قبيحًا وعشوائيًّا وفوضويًّا، ولكن بدلًا من ذلك له نظام خفي غامض ولكنه عميق.

على سبيل التشبيه، قال أينشتاين ذات مرة إنه شعر وكأنه طفل يدخل مكتبة شاسعة. في كل مكان حوله، كانت هناك أكوام من الكتب التي تحتوي على إجابات عن أسرار الكون. كان هدفه في الحياة، في الواقع، أن يكون قادرًا على قراءة بضعة فصول من هذه الكتب.

ومع ذلك، فقد ترك هذا السؤال مفتوحًا: إذا كان الكون مثل مكتبة ضخمة، فهل هناك أمين مكتبة؟ أم أن هناك من ألَّف هذه الكتب؟ بمعنى آخر، إذا كان من الممكن تفسير جميع القوانين الفيزيائية بنظرية كل شيء، فمن أين أتت هذه المعادلة؟

وكان أينشتاين مدفوعًا بسؤال آخر: هل كان لدى الله خيار في خلق الكون؟

إثبات وجود الإله

ومع ذلك، فإن هذه الأسئلة ليست واضحة جدًّا عند محاولة استخدام المنطق لإثبات أو دحض وجود الله. هوكينج، على سبيل المثال، لم يؤمن بالله. لقد كتب أن الانفجار العظيم حدث في لحظة وجيزة من الزمن، لذلك لم يكن هناك زمن كافٍ لله ببساطة ليخلق الكون كما نراه.

في نظرية أينشتاين الأصلية، توسع الكون على الفور تقريبًا. لكن في نظرية الأكوان المتعددة، كوننا ليس سوى فقاعة تتعايش مع أكوان فقاعية أخرى تنشأ طوال الوقت.

إذا كان الأمر كذلك، فربما لم ينشأ الزمن ببساطة مع الانفجار العظيم، ولكن بدلًا من ذلك كان هناك زمن قبل بداية كوننا. وُلِد كل كون في لحظة زمنية وجيزة، لكن كلية الأكوان في الكون المتعدد يمكن أن تكون أبدية. لذا فإن نظرية كل شيء تترك مسألة وجود الله مفتوحة.

لكن على مر القرون، حاول اللاهوتيون تبني وجهة النظر المعاكسة؛ أي استخدام المنطق لإثبات وجود الله. افترض القديس توما الأكويني[١٣٠]، اللاهوتي الكاثوليكي العظيم في القرن الثالث

(١٣٠) توما الأكويني THOMA E AQVINATIS: (ولد ١٢٢٥، وفي بعض المصادر ١٢٢٦، وتوفي في السابع من مارس ١٢٧٤)، كان راهبًا دومينيكانيًّا، وفيلسوفًا، وكاهنًا =

عشر، خمسة براهين شهيرة على وجود الله. إنها مثيرة للاهتمام لأنها حتى اليوم ما زالت تثير أسئلة عميقة حول نظرية كل شيء.

ثلاثة منها زائدة على الحاجة، لذلك هناك بالفعل ثلاثة أدلة مستقلة (إذا قمنا أيضًا بتضمين الدليل الأنطولوجي للقديس أنسيلم):

١. دليل الكونية: تتحرك الأشياء لأنها مدفوعة؛ أي أن شيئًا ما يجعلها تتحرك. ولكن ما هو المحرك الأول أو السبب الأول الذي حرك الكون؟ يجب أن يكون هذا هو الله.

٢-البرهان التخيلي: في كل مكان حولنا نرى أشياء بالغة التعقيد والتطور. لكن كل تصميم يتطلب في النهاية مصممًا. المصمم الأول هو الله.

٣-البراهين البديهية: الله، بالتعريف، هو أفضل كائن يمكن تخيله. لكن يمكن للمرء أن يتخيل إلهًا غير موجود. ولكن إذا لم يكن الله

= كاثوليكيًّا، ومَلفانًا في الكنيسة الكاثوليكية. وهو عالم لاهوت، وفقيه مؤثر للغاية في تقليد الفلسفة المدرسية (السكولاستية)، ويُعرف أيضًا بلقب العالِم الملائكي **Doctor Angelicus**، والعالم المشترك **Doctor Communis**، والعالم الكوني **Doctor Universalis**. يحدد الاسم الأكويني أصول أجداده في منطقة أكوينو في لاتسيو الحالية في إيطاليا. من بين الشؤون الأخرى أنه كان مؤيدًا بارزًا لعلم اللاهوت الطبيعي، وأبا مدرسةٍ فكريةٍ (تشمل كلًّا من اللاهوت والفلسفة) تُعرف باسم «التوماوية» **Thomism**. جادل بأن الله هو مصدر كلٍّ من نور العقل الطبيعي ونور الإيمان، وكان تأثيره على الفلسفة الغربية كبيرًا، فقد عملتِ الفلسفة الحديثة على الكثير من أفكاره تطويرًا وتنقيحًا، كما عارضتِ الكثيرَ منها لا سيما في مجالات الأخلاق، والحق الطبيعي، وما وراء الطبيعة، والنظرية السياسية. وعلى عكس العديد من التيارات في الكنيسة الكاثوليكية في ذاك الوقت، تبنى الأكويني العديد من الأفكار التي طرحها أرسطو -الذي دعاه «الفيلسوف»- محاولًا التوفيق بين الفلسفة الأرسطية والمبادئ المسيحية. يعد أشهر أعماله «أسئلة متنازَع عليها حول الحقيقة».

موجودًا، فلن يكون كاملًا. لذلك يجب أن يكون موجودًا.

استمرت هذه البراهين على وجود الله لعدة قرون. حتى القرن التاسع عشر، عندما وجد إيمانويل كانط عيبًا في الدليل الأنطولوجي، لأن الكمال والوجود فئتان منفصلتان. أن تكون مثاليًّا لا يعني بالضرورة أن شيئًا ما يجب أن يكون موجودًا.

ومع ذلك، يجب إعادة فحص البرهانين الآخرين في ضوء العلم الحديث ونظرية كل شيء. تحليل البرهان الغائي واضح ومباشر. في كل مكان ننظر حولنا، نرى أشياء شديدة التعقيد. لكن تطور أشكال الحياة المحيطة بنا يمكن تفسيره بالتطور. مع الزمن الكافي، يمكن أن تدفع الصدفة الخالصة التطور من خلال بقاء الأصلح، لذلك تنشأ التصميمات الأكثر تعقيدًا بشكل عشوائي من التصميمات الأقل تعقيدًا. المصمم الأول مدى الحياة ليس ضروريًّا.

على النقيض من ذلك، فإن تحليل البرهان الكوني ليس واضحًا تمامًا. يمكن للفيزيائيين اليوم تشغيل شريط الفيديو للخلف وإظهار أن الكون بدأ بانفجار كبير دفع الكون إلى الحركة. ومع ذلك، للعودة حتى قبل الانفجار الأعظم، علينا استخدام نظرية الأكوان المتعددة. ولكن حتى لو افترضنا أن نظرية الأكوان المتعددة تشرح من أين جاء الانفجار الأعظم، فعلى المرء أن يسأل: من أين أتت الأكوان المتعددة؟ أخيرًا، إذا ذكر المرء أن الأكوان المتعددة هي نتيجة منطقية لنظرية كل شيء، فعلينا أن نسأل: من أين أتت نظرية كل شيء؟

عند هذه النقطة، تتوقف الفيزياء، وتبدأ الميتافيزيقا. لا تقول الفيزياء شيئًا عن مصدر قوانين الفيزياء نفسها. لذا فإن الدليل الكوني للقديس توما الأكويني فيما يتعلق بالمحرك الأول أو السبب الأول لا يزال مناسبًا حتى اليوم.

من المرجح أن يكون التناظر هو السمة الرئيسية لأي نظرية عن كل شيء. لكن من أين يأتي هذا التناظر؟ سيكون هذا التناظر نتيجة ثانوية للحقائق الرياضية العميقة. لكن من أين تأتي الرياضيات؟ حول هذا السؤال، فإن نظرية كل شيء صامتة مرة أخرى.

الأسئلة التي طرحها عالم لاهوت كاثوليكي قبل ثمانمائة عام لا تزال ذات صلة حتى اليوم، على الرغم من التقدم الهائل الذي أحرزناه في فهم أصل الحياة والكون.

وجهة نظري الشخصية

الكون مكان جميل ومنظم وبسيط بشكل ملحوظ. أجد أنه من المذهل تمامًا أن كل القوانين المعروفة للكون المادي يمكن تلخيصها في ورقة واحدة.

تحتوي الورقة على نظرية النسبية لأينشتاين. يعتبر النموذج القياسي أكثر تعقيدًا، حيث يحتل معظم الصفحة بحديقة الحيوان الخاصة به من الجسيمات دون الذرية. يمكنهم وصف كل شيء في الكون المعروف، من أعماق البروتون إلى حدود الكون المرئي.

نظرًا للإيجاز التام لهذه الورقة، من الصعب تجنب استنتاج أن كل هذا خُطط له سابقًا، وأن تصميمه الأنيق يُظهِر يد مصمم كوني. بالنسبة لي، هذه أقوى حجة لوجود الله.

لكن حجر الأساس لفهمنا للعالم هو العلم، الذي يقوم في النهاية على أشياء قابلة للاختبار، وقابلة للتكرار، وقابلة للتزوير. ذلك خط القاع. في تخصصات مثل النقد الأدبي، تزداد الأمور تعقيدًا بمرور الوقت. يتساءل المحللون إلى الأبد عما يعنيه جيمس جويس حقًّا بهذا المقطع أو ذاك. لكن الفيزياء تتحرك في الاتجاه المعاكس، وتصبح أبسط وأكثر قوة بمرور الوقت، حتى يصبح كل شيء نتيجة حفنة

من المعادلات. أجد هذا رائعًا. لكن العلماء غالبًا ما يحجمون عن الاعتراف بأن هناك بعض الأشياء خارج نطاق العلم.

على سبيل المثال، من المستحيل إثبات النفي **Negative**.

لنفترض أننا نريد إثبات عدم وجود الحصان وحيد القرن. على الرغم من أننا مسحنا معظم سطح الأرض ولم نرَ قَط وحيد القرن، هناك دائمًا احتمال وجوده في بعض الجزر أو الكهوف غير المكتشفة. وبالتالي، من المستحيل إثبات عدم وجود وحيد القرن. هذا يعني أنه بعد مائة عام من الآن، سيظل الناس يناقشون وجود الله ومعنى الكون. هذا لأن هذه المفاهيم غير قابلة للاختبار، وبالتالي فهي غير قابلة للتقرير. هي خارج نطاق العلوم العادية.

وبالمثل، حتى لو لم نواجه الله مطلقًا في جميع رحلاتنا في الفضاء الخارجي، فهناك دائمًا فرصة لوجود الله في مناطق لم نستكشفها قَط.

ومن ثَم فأنا لا أدري. لقد خدشنا للتو سطح الكون، ومن الافتراض أن نعلن عن طبيعة الكون بأسره بعيدًا عن أدواتنا.

ولكن لا يزال يتعين على المرء أن يواجه دليل القديس توما الأكويني، بأنه يجب أن يكون هناك محرك أول. بمعنى آخر، من أين أتى كل شيء؟ حتى لو بدأ الكون وفقًا لنظرية كل شيء، فمن أين جاءت نظرية كل شيء؟

أعتقد أن نظرية كل شيء موجودة لأنها النظرية الوحيدة المتسقة رياضيًّا. جميع النظريات الأخرى معيبة بطبيعتها وغير متسقة. أعتقد

أنك إذا بدأت بنظرية بديلة، فبإمكانك في النهاية إثبات أن 5 = 2 + 2؛ أي أن هذه النظريات البديلة تناقض نفسها.

نتذكر أن هناك عاصفة من العقبات أمام نظرية كل شيء. عندما نضيف تصحيحات كمومية إلى النظرية، نجد أن النظرية عادة ما تنفجر، مع وجود اختلافات لا نهائية، أو أن التناظر الأصلي تدمره الانحرافات. أعتقد أنه ربما يكون هناك حل واحد فقط لهذه القيود التي تصلح النظرية، وتستبعد كل الاحتمالات الأخرى. لا يمكن للكون أن يوجد في خمسة عشر بُعدًا، لأن مثل هذا الكون سيعاني من هذه العيوب القاتلة. (في نظرية الأوتار ذات الأبعاد العشرة، عندما نحسب التصحيحات الكمومية، غالبًا ما تحتوي على المصطلح (10 - D)، حيث D هي أبعاد الزمكان. من الواضح، إذا حددنا D = 10، فإن هذه الحالات الشاذة المقلقة تختفي. ولكن إذا لم نُعين D = 10، فسنجد كونًا بديلًا مليئًا بالتناقضات، حيث يُنتهك المنطق الرياضي. وبالمثل، عند إضافة الأغشية والحساب باستخدام نظرية-إم، نجد المصطلحات غير المرغوب فيها التي تحتوي على العامل(11 - D). ومن ثَم، ضمن نظرية الأوتار، يوجد كون واحد فقط متسق ذاتيًّا حيث 4 = 2 + 2، وهذا في عشرة أو أحد عشر بُعدًا).

هذه إذن إجابة محتملة للسؤال الذي طرحه أينشتاين في بحثه عن نظرية كل شيء: هل كان لدى الله خيار في صنع الكون؟ هل الكون فريد من نوعه، أم أن هناك العديد من الطرق التي يمكن أن يوجد بها الكون؟

إذا كان تفكيري صحيحًا، فلن يكون هناك خيار. هناك معادلة واحدة فقط يمكن أن تصف الكون، لأن كل المعادلات الأخرى غير متسقة رياضيًّا.

لذا فإن المعادلة النهائية للكون فريدة من نوعها. قد يكون هناك عدد لا حصر له من الحلول لهذه المعادلة الرئيسية، مما يمنحنا مشهدًا من الحلول، لكن المعادلة نفسها فريدة من نوعها.

يلقي هذا بعض الضوء على سؤال آخر: لماذا يوجد شيء بدلًا من لا شيء؟

في النظرية الكمومية، لا يوجد شيء اسمه لا شيء مطلق. لقد رأينا أن السواد المطلق غير موجود، لذا فإن الثقوب السوداء رمادية حقًّا ويجب أن تتبخر. وبالمثل، عند حل النظرية الكمومية، نجد أن أقل طاقة ليست صفرًا. على سبيل المثال، لا يمكنك الوصول إلى الصفر المطلق، لأن الذرات، في أدنى حالة للطاقة الكمومية، لا تزال تهتز. (وبالمثل، وفقًا للميكانيكا الكمومية، لا يمكنك الوصول إلى صفر من طاقة الميكانيكا الكمومية، لأنه لا يزال هناك طاقة نقطة الصفر؛ أي أقل اهتزازات كمومية. حالة الاهتزاز الصفري تنتهك مبدأ عدم التأكد، لأن الطاقة الصفرية هي حالة عدم التأكد الصفري، وهو أمر غير مسموح به).

إذن من أين أتى الانفجار الأعظم؟ على الأرجح، كان تقلبًا كموميًّا في لا شيء. حتى اللا شيء، أو الفراغ النقي، يكون مزبدًا بجزيئات المادة والمادة المضادة التي تقفز باستمرار من الفراغ ثم تنهار مرة أخرى في الفراغ. هذه هي الطريقة التي جاء بها شيء ما من لا شيء.

هوكينج، كما رأينا، أطلق على هذا اسم «رغوة الزمكان»؛ أي رغوة من أكوان فقاعية صغيرة تظهر باستمرار وتختفي مرة أخرى في الفراغ. لا نرى أبدًا رغوة الزمكان هذه، لأن كل فقاعة أصغر بكثير من أي ذرة. لكن من حين لآخر، لا تختفي إحدى هذه الفقاعات مرة أخرى في الفراغ، ولكنها تستمر في التوسع، حتى تنتفخ وتخلق الكون بأكمله.

فلماذا يوجد شيء بدلًا من لا شيء؟ لأن كوننا جاء في الأصل من التقلبات الكمومية في لا شيء. على عكس عدد لا يُحصى من الفقاعات الأخرى، قفز كوننا من رغوة الزمكان واستمر في التوسع.

هل للكون بداية أم لا؟

هل ستعطينا نظرية كل شيء معنى الحياة؟ منذ سنوات رأيت ملصقًا غريبًا من مجتمع للتأمل **meditation society**. لقد أدركت أنه نشر بأمانة كل تفاصيل معادلات الجاذبية الفائقة، في مجدها الرياضي الكامل. ومع ذلك، ارتبطت بكل حد من المعادلة، كان هناك سهم يقول: «السلام»، «الهدوء»، «الوحدة»، «الحب»، إلخ.

بمعنى آخر، كان معنى الحياة جزءًا لا يتجزأ من معادلات نظرية كل شيء.

أنا شخصيًّا أعتقد أنه من غير المحتمل أن مصطلحًا رياضيًّا بحتًا في معادلة من الفيزياء يمكن أن يكون معادلًا للحب أو السعادة.

ومع ذلك، أعتقد أن نظرية كل شيء قد يكون لها ما تقوله عن المعنى في الكون. عندما كنت طفلًا، نشأت في الكنيسة المشيخية، لكن والدَيَّ كانا بوذيين. هاتان الديانتان العظيمتان، بدورهما، لهما وجهتا نظر متعارضتان تمامًا فيما يتعلق بالخالق. في الكنيسة المسيحية، كانت هناك لحظة من الزمن عندما خلق الله العالم. يعتقد العالم اللاهوتي والفيزيائي الكاثوليكي جورج لوميتر، أحد مهندسي نظرية الانفجار الأعظم، أن نظرية أينشتاين كانت متوافقة مع سفر التكوين.

ومع ذلك، في البوذية، لا يوجد إله. الكون ليس له بداية أو نهاية. لا يوجد سوى النيرفانا الخالدة.

فكيف يمكن للمرء أن يحل هاتين الوجهتين المتعارضتين تمامًا؟ الكون إما له بداية أو لا. ليست هناك أرضية مشتركة.

لكن في الواقع، تعطي نظرية الأكوان المتعددة طريقة جديدة جذريًّا لرؤية هذا التناقض.

ربما كان لكوننا بداية، كما هو مذكور في الكتاب المقدس. لكن ربما تحدث الانفجارات الكبيرة طوال الوقت، وفقًا لنظرية التضخم، مما يخلق حمامًا فقاعيًّا من الأكوان. ربما تتوسع هذه الأكوان في ساحة أكبر بكثير، نيرفانا من الفضاء الفائق. لذلك كوننا له بداية وهو عبارة عن فقاعة ثلاثية الأبعاد تطفو في مساحة أكبر بكثير من أحد عشر بُعدًا من النيرفانا حيث تظهر أكوان أخرى باستمرار.

وهكذا، تسمح فكرة الكون المتعدد للفرد بدمج كل من أساطير الخلق في المسيحية مع السكينة البوذية في نظرية واحدة تتوافق مع القوانين الفيزيائية المعروفة.

المعنى في كون محدود

في النهاية، أعتقد أننا نخلق المعنى الخاص بنا في هذا الكون.

من السهل جدًّا أن يكون هناك معلم ينزل من قمة الجبل يحمل معنى الكون. معنى الحياة هو شيء علينا أن نكافح لفهمه وتقديره. إن تقديمه لنا يقضي على الغرض الكامل من المعنى. إذا كان معنى الحياة متاحًا مجانًا، فهو بلا معنى. كل ما له معنى هو نتيجة الكفاح والتضحية، ويستحق القتال من أجله.

لكن من الصعب المجادلة بأن الكون له معنى إذا كان الكون نفسه سيموت في النهاية. الفيزياء، بمعنى ما، لديها مذكرة موت للكون.

على الرغم من كل النقاشات المكتسبة حول المعنى والغرض في الكون، فربما يكون كل هذا عبثًا، لأن الكون محكوم عليه بالموت في حالة تجمد كبير. وفقًا للقانون الثاني للديناميكا الحرارية، يجب أن يتحلل كل شيء في نظام مغلق أو يصدأ أو ينهار. الترتيب الطبيعي للأشياء هو أن يتدهور وينتهي في النهاية من الوجود. يبدو أنه لا مفر من أن كل الأشياء يجب أن تموت عندما يموت الكون نفسه. لذا فإن أي معنى قد ننسبه إلى الكون سوف يُمحَى في النهاية عندما يموت الكون نفسه.

ولكن مرة أخرى، ربما يوفر دمج النظرية الكمومية بالنسبية شرطًا للتهرب. قلنا إن القانون الثاني للديناميكا الحرارية يقضي في النهاية على الكون في نظام مغلق. الكلمة الرئيسية «مغلق». في عالم مفتوح، حيث يمكن أن تدخل الطاقة من الخارج، من الممكن عكس القانون الثاني.

على سبيل المثال، يبدو أن مكيف الهواء ينتهك القانون الثاني، لأنه يأخذ الهواء الساخن الفوضوي ويبرده. لكن مكيف الهواء يحصل على الطاقة من الخارج، من مضخة، وبالتالي فهو ليس نظامًا مغلقًا. وبالمثل، يبدو أن الحياة على الأرض تنتهك القانون الثاني، لأن تحويل الهامبرجر والبطاطس المقلية إلى طفل يستغرق تسعة أشهر فقط، وهي معجزة حقًّا.

فلماذا الحياة ممكنة على الأرض؟ لأن لدينا مصدرًا خارجيًّا للطاقة، وهو الشمس. الأرض ليست نظامًا مغلقًا، لذا تسمح لنا أشعة الشمس باستخراج الطاقة من الشمس لإنتاج الغذاء الضروري لإطعام الطفل. لذا فإن القانون الثاني للديناميكا الحرارية يحتوي على بند هروب. يجعل ضوء الشمس التطور إلى أشكال أعلى ممكنًا.

بنفس الطريقة، من الممكن استخدام الثقوب الدودية لفتح بوابة لكون آخر. يبدو أن كوننا مغلق. ولكن في يوم من الأيام، ربما في مواجهة موت الكون، قد يتمكن أحفادنا من استخدام خبرتهم العلمية الهائلة لتوجيه طاقة إيجابية كافية لفتح نفق عبر المكان والزمن، ثم استخدام الطاقة السلبية (من تأثير كازيمير الكمومي) لتثبيت البوابة.

في يوم من الأيام، سيُتقن أحفادنا طاقة بلانك، الطاقة التي يصبح فيها المكان والزمن غير مستقرين، ويستخدمون تقنيتهم القوية للهروب من كوننا المحتضر.

بهذه الطريقة، تصبح الجاذبية الكمومية، بدلًا من أن تكون تمرينًا في رياضيات الزمكان ذي الأبعاد الأحد عشر، قارب نجاة كونيًّا متعدد الأبعاد، يسمح للحياة الذكية بالتهرب من القانون الثاني للديناميكا الحرارية، والهروب إلى كون أكثر دفئًا.

لذا فإن نظرية كل شيء هي أكثر من مجرد نظرية رياضية جميلة. في النهاية، يمكن أن تكون خلاصنا الوحيد.

* * *

خاتمة

قادنا البحث عن نظرية كل شيء إلى السعي لإيجاد التناظر الموحد النهائي للكون. من دفء نسيم الصيف إلى مجد غروب الشمس الحارق، فإن التماثل الذي نراه في كل مكان حولنا هو جزء من التماثل الأصلي الموجود في بداية الزمن. كُسر هذا التماثل الأصلي للقوة الخارقة في لحظة الانفجار الأعظم، ونرى بقاياه حيثما أعجبنا بجمال الطبيعة.

أحب أن أعتقد أننا ربما نكون مثل شخص نشأ بعيدًا عن المدينة في أبعاد ثنائية، نعيش في مستوى أسطوري مسطح، غير قادرين على تصور البُعد الثالث، والذي يُعتبر مجرد خرافة. في بداية الزمن في الأرض المسطحة، كانت هناك بلورة ثلاثية الأبعاد جميلة، لسبب ما، كانت غير مستقرة، وتحطمت إلى مليون قطعة تمطر على الأرض المسطحة. لعدة قرون، حاول هذا الشخص إعادة تجميع هذه القطع مثل أحجية الصور المقطوعة. بمرور الوقت، تمكن من تجميعها في قطعتين عملاقتين. قطعة واحدة تُسمى الجاذبية، والقطعة الأخرى تُسمى النظرية الكمومية. حاول قدر الإمكان، لكنه لم يتمكن من أن يلائم هاتين القطعتين معًا. ثم في أحد الأيام، قدَّم هذا الشخص المغامر تخمينًا شنيعًا جعل الجميع يضحكون. قال: لماذا لا، باستخدام الرياضيات، تُرفع إحدى القطع إلى بُعد وهمي ثالث حتى تتمكنا من التوافق معًا، واحدة فوق الأخرى؟

عندما حدث ذلك، أصيب بالدهشة والذهول من الجوهرة المتلألئة اللامعة التي ظهرت فجأة أمامه، مع تناسقها المثالي المجيد.

أو كما كتب ستيفن هوكينج:

إذا اكتشفنا نظرية كاملة، يجب أن تكون في الوقت المناسب مفهومة، من حيث المبدأ الواسع، من قبل الجميع، وليس فقط من عدد قليل من العلماء. بعد ذلك، سنكون جميعًا؛ الفلاسفة والعلماء والأشخاص العاديون فقط، قادرين على المشاركة في مناقشة السؤال عن سبب وجودنا والكون. إذا وجدنا الإجابة عنه، فسيكون ذلك هو الانتصار النهائي للعقل البشري؛ إذن سنعرف كيف فكر الله.

* * *

شكر وتقدير

في تأليف هذا الكتاب، أنا مدين بعمق لوكيلي، ستيوارت كريشيفسكي، الذي كان بجانبي بإخلاص طوال هذه العقود، يقدم لي نصيحة سليمة وحكيمة. أنا دائمًا أثق بحكمه وفهمه العميق للأمور الأدبية والعلمية.

أود أيضًا أن أشكر محرري، إدوارد كاستنماير، الذي وجَّه العديد من كتبي بيده الحازمة وبصيرته الثاقبة. هو الذي اقترح أن أكتب هذا الكتاب، وأَشرف على الكتاب في جميع مراحله المختلفة. كان هذا الكتاب مستحيلًا لولا نصيحته المدروسة والصادقة.

كما أود أن أشكر زملائي وشركائي وأصدقائي في المجال العلمي. على وجه الخصوص، أود أن أشكر الحائزين جائزة نوبل، التالية أسماؤهم، لإعطائي بعضًا من وقتهم السخي ورؤى عميقة في الفيزياء والعلوم: موراي جيلمان، وديفيد جروس، وفرانك ويلكزيك، وستيف واينبرج، ويويتشيو نامبو، وليون ليدرمان، ووالتر جيلبرت، وهنري كيندال، وتي دي لي، وجيرالد إيدلمان، وجوزيف روتبلات، وهنري بولاك، وبيتر دوهرتي، وإريك تشيفيان. أخيرًا، أود أن أشكر أكثر من أربعمائة من الفيزيائيين والعلماء الذين كان من دواعي سروري أن أتفاعل معهم، كمتعاونين في أبحاث نظرية الأوتار، وكذلك من خلال

برامجي الإذاعية العلمية الأسبوعية، والبرامج التلفزيونية المختلفة التي استضافتني على تلفزيون بي بي سي وقنوات **Discovery and Science**، وعملي كمراسل علمي لـ **CBS-TV**.

للحصول على قائمة كاملة بالعلماء الذين كان من دواعي سروري إجراء مقابلات معهم، يرجى الاطلاع على كتابي **The Physics of the Future**. للحصول على قائمة كاملة بمُنظري الأوتار البارزين الذين أشرت إلى عملهم في هذا الكتاب، راجع كتابي على مستوى الدكتوراه «مقدمة إلى نظرية الأوتار ونظرية-إم».

ملاحظات

مقدمة إلى النظرية النهائية

* في الماضي، حاول العديد من عمالقة الفيزياء إنشاء نظرية المجال الموحد الخاصة بهم وفشلوا. في الماضي، نرى أن نظرية المجال الموحد يجب أن تفي بثلاثة معايير:

١. يجب أن تتضمن كل نظرية النسبية العامة لأينشتاين.

٢. يجب أن تشتمل على النموذج القياسي للجسيمات دون الذرية.

٣. أن تسفر عن نتائج محدودة.

كان لدى إرفين شرودنجر، أحد مؤسسي النظرية الكمومية، اقتراح لنظرية المجال الموحد الذي درسه أينشتاين بالفعل في وقت سابق. لقد فشلت لأنها لم تختزل نظرية أينشتاين بشكل صحيح ولم تستطع تفسير معادلات ماكسويل. (كما أنها تفتقر إلى أي وصف للإلكترونات أو الذرات).

اقترح كل من باولي وفيرنر هايزنبرج أيضًا نظرية مجال موحدة تتضمن مجالات مادة الفرميون، لكنها لم تكن قابلة لإعادة التنظيم، ولم تدمج نموذج الكوارك الذي سيأتي بعد عقود.

حقق أينشتاين بنفسه في سلسلة من النظريات التي فشلت في النهاية. في الأساس، حاول تعميم المُمتَد المتري **metric tensor** للجاذبية ورموز كرستوفيل **Christoffel symbols** لتشمل ممتدات غير متماثلة، في محاولة لتضمين نظرية ماكسويل في نظريته الخاصة، لكنه فشل في النهاية. لم يكن مجرد توسيع عدد المجالات في نظرية أينشتاين الأصلية كافيًا لشرح معادلات ماكسويل. هذا النهج أيضًا لم يذكر المادة.

على مر السنين، كان هناك عدد من المحاولات لإضافة مجالات المادة ببساطة إلى معادلات أينشتاين، ولكن ثبت أنها تتباعد على المستوى الكمومي ذي الحلقة الواحدة. في الواقع، تم استخدام أجهزة الكمبيوتر لحساب تشتت الجرافيتونات على المستوى الكمومي ذي الحلقة الواحدة، وقد ثبت أنها غير محدودة بشكل قاطع. حتى الآن، الطريقة الوحيدة المعروفة للتخلص من هذه اللا نهائيات عند أدنى مستوى من حلقة واحدة هي دمج التناظر الفائق.

اقتُرحت فكرة أكثر راديكالية في وقت مبكر من عام ١٩١٩ من قبل تيودور كالوزا، الذي عبر عن معادلات أينشتاين في خمسة أبعاد. من اللافت للنظر، أنه عندما يجعد المرء بُعدًا واحدًا إلى دائرة صغيرة، يجد نتيجة لذلك مجال ماكسويل مقترنًا بمجال جاذبية أينشتاين. تمت دراسة هذا النهج من قبل أينشتاين ولكن تم التخلي عنه في النهاية لأنه لم يفهم أحد كيفية انهيار بُعد واحد. في الآونة الأخيرة، دُمج هذا النهج في نظرية الأوتار، والتي تنهار من عشرة أبعاد إلى أربعة أبعاد، وهي

العملية التي تُولِّد مجال يانج-ميلس. لذلك من بين الطرق العديدة التي وُضعت لنظرية المجال الموحد، فإن المسار الوحيد الباقي اليوم هو نهج كالوزا عالي الأبعاد، ولكنه معمم ليشمل التناظر الفائق، والأوتار الفائقة، والأغشية الفائقة.

في الآونة الأخيرة، هناك نظرية تُسمى الجاذبية الكمومية الحلقية. إنها تحقق في نظرية أينشتاين الأصلية رباعية الأبعاد بطريقة جديدة. ومع ذلك، فهي نظرية الجاذبية النقية، من دون أي إلكترونات أو جسيمات دون ذرية، وبالتالي لا يمكن اعتبارها نظرية مجال موحد. لا يُذكَر النموذج القياسي، لأنه يفتقر إلى مجالات مهمة. أيضًا، ليس من الواضح ما إذا كان تشتت الحلقات المتعددة في هذه الشكلية محدودًا حقًّا. هناك تكهنات بأن الاصطدام بين حلقتين يؤدي إلى نتائج متباينة.

* * *

الفصل الأول

التوحيد - الحلم القديم

*** Steven Weinberg, Dreams of a Final Theory (New York: Pantheon, 1992), 11.**

*** نظرًا لأن كتاب المبادئ نيوتن قد كُتب بأسلوب هندسي بحت، فمن الواضح أن نيوتن كان مدركًا لقوة التناظر. من الواضح أيضًا أنه استغل قوة التناظر بشكل حدسي لحساب حركة الكواكب. ومع ذلك، نظرًا لأنه لم يستخدم الشكل التحليلي لحساب التفاضل والتكامل، والذي قد يتضمن رموزًا مثل $X^2 + Y^2$، فإن مخطوطته لا تمثل التناظر تحليليًّا من حيث الإحداثيات X و Y.**

*** Quotefancy.com, https://quotefancy.com/quote/1572216/James-Clerk-Maxwell-We-can-scarcely-avoid-the-inference-that-light-consists-in-the-transverse-undelations-of-the-same-medium-which-is-the-cause-of-electric-and-magnetic-phenomena.**

***من الناحية التقنية، معادلات ماكسويل ليست متناظرة تمامًا بين المجالات الكهربائية والمغناطيسية. على سبيل المثال، الإلكترونات هي مصادر المجالات الكهربائية، لكن معادلات ماكسويل تتنبأ بوجود مصادر للمجال المغناطيسي أيضًا، تُسمى الأقطاب الأحادية (أي القطب الشمالي والجنوبي المعزول للمغناطيسية)، والذي لم تسبق**

رؤيته من قبل. لذلك، خمن بعض الفيزيائيين أن هذه الأقطاب الأحادية قد تُكتشف في النهاية.

الفصل الثاني

بحث أينشتاين عن التوحيد

*Abraham Pais, Subtle Is the Lord (New York: Oxford University Press, 1982), 41.

*Quotation.io, https://quotation.io/page/quote/storm-broke-loose-mind.

*Albrecht Fölsing, Albert Einstein, trans. and abridged Ewald Osers (New York: Penguin Books, 1997), 152.

*Wikiquotes.com, https://en.wikiquote.org/wiki/G._H._Hardy.

*على الرغم من أن النسبية الخاصة لها تناظر رباعي الأبعاد، كما يتضح من نظرية فيثاغورس رباعية الأبعاد البسيطة X2 + Y2 + Z2 - T2 (في وحدات معينة)، يدخل الزمن بعلامة ناقص إضافية مقارنة بالأبعاد المكانية الأخرى. هذا يعني أن الزمن هو بالفعل البُعد الرابع، لكنه من نوع خاص. على وجه الخصوص، هذا يعني أنه لا يمكنك الذهاب بسهولة ذهابًا وإيابًا في الزمن المناسب (وإلا فسيكون السفر عبر الزمن أمرًا شائعًا). يذهب المرء بسهولة ذهابًا وإيابًا في الفضاء، ولكن ليس بسهولة في الزمن المناسب، بسبب علامة الطرح الإضافية هذه. (لاحظ أيضًا أننا حددنا سرعة الضوء لتكون ١، في وحدات معينة، لتوضيح أن الزمن يدخل في النسبية الخاصة باعتباره البُعد الرابع).

***Brandon R. Brown, »Max Planck: Einstein's Supportive Skeptic in 1915,« OUPblog, Nov. 15, 2015, https://blog.oup.com/2015/11/einstein-planck-general-relativity.**

***Fölsing, Albert Einstein, 374.**

***Denis Brian, Einstein (New York: Wiley, 1996), 102.**

***Johann Ambrosius and Barth Verlag (Leipzig, 1948), p. 22, in Scientific Autobiography and other papers.**

***Jeremy Bernstein, »Secrets of the Old One-II,« New Yorker, March 17, 1973, 60.**

الفصل الثالث

بزوغ الكوانتم

***https://en.wikiquote.org/wiki/Talk:Richard_Feynman.**

***quoted in Albrecht Fölsing, Albert Einstein, trans. and abridged Ewald Osers (New York: Penguin Books, 1997), 516.**

***quoted in Denis Brian, Einstein (New York: Wiley, 1996), 306.**

* حتى اليوم، لا يوجد حل مقبول عالميًّا لمشكلة قط شرودنجر. يستخدم معظم الفيزيائيين ببساطة الميكانيكا الكمومية ككتاب طبخ يقدم دائمًا الإجابة الصحيحة، ويتجاهل الآثار الفلسفية الدقيقة والعميقة.

تذكر معظم دوريات الدراسات العليا في الميكانيكا الكمومية (بما في ذلك تلك التي أدرسها) مشكلة القط ببساطة، ولكنها لا تقدم حلًّا نهائيًّا. اقترحت العديد من الحلول، والتي عادة ما تكون اختلافات في نهجين شائعين. الأول هو الاعتراف بأن وعي المراقب يجب أن يكون جزءًا من عملية القياس. هناك اختلافات في هذا النهج، اعتمادًا على كيفية تعريفك لـ«الوعي». هناك طريقة أخرى تكتسب شعبية بين الفيزيائيين، وهي نظرية الأكوان المتعددة، حيث ينقسم الكون إلى نصفين، حيث يحتوي كون واحد على قط حي، وآخر يحتوي على قط ميت. ومع ذلك، يكاد يكون من المستحيل التنقل بين هذين العالمين، لأنهما «مفككان» عن بعضهما البعض؛ أي أنهما لم يعودا يهتزان في انسجام تام، لذلك لم يعد بإمكانهما التواصل مع بعضهما البعض. وبنفس الطريقة التي لا تستطيع فيها محطتان إذاعيتان التفاعل مع بعضهما البعض، فقد قمنا بفك الارتباط عن جميع الأكوان الموازية الأخرى. لذلك قد تتعايش أكوان كمومية غريبة مع أكواننا، لكن التواصل معها يكاد يكون مستحيلًا. قد نضطر إلى الانتظار لفترة أطول من عمر الكون لننتقل إلى هذه الأكوان المتوازية.

الفصل الرابع

نظرية كل شيء (تقريبًا)

***Denis Brian, Einstein (New York: Wiley, 1996), 359.**

***quoted in Walter Moore, A Life of Erwin Schrödinger (Cambridge: Cambridge University Press, 1994), 308.**

***Nigel Calder, The Key to the Universe (New York: Viking, 1977), 15.**

***quoted in William H. Cropper, Great Physicists (Oxford: Oxford University Press, 2001), 252.**

***Steven Weinberg, Dreams of a Final Theory (New York: Pantheon, 1992; New York: Vintage, 1994), 115.**

***John Gribbin, In Search of Schrödinger's Cat (New York: Bantam Books, 1984), 259.**

***quoted in Dan Hooper, Dark Cosmos (New York: HarperCollins, 2006), 59.**

***Frank Wilczek and Betsy Devine, Longing for Harmonies (New York: Norton, 1988), 64.**

***Robert P. Crease and Charles C. Mann, The Second Creation (New York: Macmillan, 1986), 326.**

***التناظر الرياضي الذي يمزج بين ثلاثة كواركات يُسمى SU(3)، مجموعة وحدوية خاصة تقع في الدرجة 3. لذلك بإعادة ترتيب الكواركات الثلاثة وفقًا للتماثل SU(3)، يجب أن تظل المعادلة النهائية للقوة النووية القوية كما هي. يُسمى التناظر الذي يخلط بين الإلكترون والنيوترينو في القوة النووية الضعيفة SU(2)، وهي مجموعة تقع في الدرجة ٢. (بشكل عام، إذا بدأنا بـn فيرميونات، فمن السهل كتابة نظرية باستخدام التناظر SU(n). التناظر الذي يأتي من نظرية ماكسويل يُسمى U(1). لذلك، من خلال لصق هذه النظريات الثلاث معًا، نجد أن النموذج القياسي به تناظر SU(3) × SU(2) × U(1).**

على الرغم من أن النموذج القياسي يناسب جميع البيانات التجريبية في الفيزياء دون الذرية، فإن النظرية تبدو مفتعلة، لأنها تستند إلى الترقيع الميكانيكي لثلاث قوى معًا.

*لمقارنة بساطة معادلات أينشتاين بتعقيد نظرية النموذج القياسي، نلاحظ أن نظرية أينشتاين يمكن تلخيصها في معادلة قصيرة فقط:

$$G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

بينما تتطلب معادلات النموذج القياسي (بصيغة مختصرة للغاية) كتابة معظم الصفحة، بتفصيل الكواركات المختلفة، والإلكترونات، والنيوترينوات، والجلوونات، وجزيئات يانج-ميلس، وجسيمات هيجز.

$$\begin{aligned}
\mathcal{L} = & -\frac{1}{2}\mathrm{Tr}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu} - \frac{1}{2}\mathrm{Tr}W_{\mu\nu}W^{\mu\nu} - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \\
& + (D_\mu\phi)^\dagger D^\mu\phi + \mu^2\phi^\dagger\phi - \frac{1}{2}\lambda\left(\phi^\dagger\phi\right)^2 \\
& + \sum_{f=1}^{3}(\bar{\ell}_L^f i\not{D}\ell_L^f + \bar{\ell}_R^f i\not{D}\ell_R^f + \bar{q}_L^f i\not{D}q_L^f + \bar{d}_R^f i\not{D}d_R^f + \bar{u}_R^f i\not{D}u_R^f) \\
& - \sum_{f=1}^{3} y_\ell^f(\bar{\ell}_L^f\phi\ell_R^f + \bar{\ell}_R^f\phi^\dagger\ell_L^f) \\
& - \sum_{f,g=1}^{3}\left(y_d^{fg}\bar{q}_L^f\phi d_R^g + (y_d^{fg})^*\bar{d}_R^g\phi^\dagger q_L^f + y_u^{fg}\bar{q}_L^f\tilde{\phi}u_R^g + (y_u^{fg})^*\bar{u}_R^g\tilde{\phi}^\dagger q_L^f\right)
\end{aligned}$$

من اللافت للنظر، أننا نعلم أن جميع القوانين الفيزيائية للكون، من حيث المبدأ، يمكن اشتقاقها من هذه الصفحة الواحدة من المعادلات.

تكمن المشكلة في أن النظريتين -نظرية النسبية لأينشتاين والنموذج القياسي- تستندان إلى رياضيات مختلفة، وافتراضات مختلفة، ومجالات مختلفة. الهدف النهائي هو دمج هاتين المجموعتين من المعادلات في شكل واحد ومحدود وموحد. الملاحظة الرئيسية هي أن أي نظرية تدعي أنها نظرية كل شيء يجب أن تحتوي على مجموعتي المعادلات، ومع ذلك تظل محدودة. حتى الآن، من بين جميع النظريات المختلفة التي اقتُرحت، فإن النظرية الوحيدة التي يمكنها فعل ذلك هي نظرية الأوتار.

الفصل السادس

بزوغ نظرية الأوتار: الوعود والمشكلات

*أنا والدكتور كيكاوا مؤسسان مشاركان لفرع من نظرية الأوتار يُسمى «نظرية مجال الأوتار»، والذي يسمح لنا بالتعبير عن المجموع الكلي لنظرية الأوتار في لغة المجالات، مما ينتج عنه معادلة بسيطة يزيد طولها قليلًا على بوصة واحدة:

$$L = \Phi^{\dagger}\left(i\delta_{\tau} - H\right)\Phi + \Phi^{\dagger} * \Phi * \Phi$$

على الرغم من أن هذا يسمح لنا بالتعبير عن كل نظرية الأوتار في شكل مضغوط، فإنها ليست الصيغة النهائية للنظرية. كما سنرى، هناك خمسة أنواع مختلفة من نظرية الأوتار، كل منها يتطلب نظرية مجال الأوتار الخاصة به. لكن إذا ذهبنا إلى البُعد الحادي عشر، فإن النظريات الخمس تتقارب على ما يبدو في معادلة واحدة، موصوفة بشيء يُسمى نظرية-إم،

والتي تتضمن مجموعة متنوعة من الأغشية بالإضافة إلى الأوتار. في الوقت الحاضر، نظرًا لصعوبة التعامل مع الأغشية رياضيًّا، خاصةً في أحد عشر بُعدًا، لم يتمكن أحد من التعبير عن نظرية-إم في معادلة نظرية مجال واحد. هذا، في الواقع، هو أحد الأهداف الرئيسية لنظرية الأوتار: العثور على الصيغة النهائية للنظرية التي يمكننا من خلالها استخلاص النتائج الفيزيائية. بمعنى آخر، ربما نظرية الأوتار لم تتخذ شكلها النهائي بعد.

*** quoted in Nigel Calder, The Key to the Universe (New York: Viking, 1977), 185.**

* بتعبير أدق، كانت الازدواجية التي وجدها مالداسينا في N = 4 هي صيغة فائقة التناظر لنظرية يانج-ميلس في أربعة أبعاد ونظرية الأوتار من النوع IIB في عشرة أبعاد. هذه ازدواجية غير بديهية للغاية، لأنها تُظهر التكافؤ بين نظرية المقياس مع جسيمات يانج-ميلس في أربعة أبعاد ونظرية الأوتار في عشرة أبعاد، والتي يُعتقد عادةً أنها متميزة. أظهرت هذه الازدواجية العلاقة العميقة بين نظريات المقياس الموجودة في التفاعلات القوية في أربعة أبعاد، ونظرية الأوتار ذات الأبعاد العشرة، وهو أمر لافت للنظر.

*** quoted in William H. Cropper, Great Physicists (New York: Oxford University Press, 2001), 257.**

*** http://www.preposterousuniverse.com/blog/2011/10/18/column-welcome-to-the-multiverse/comment-page-2.**

*** Sheldon Glashow, with Ben Bova, Interactions (New York: Warner Books, 1988), 330.**

*** quoted in Howard A. Baer and Alexander Belyaev, Proceedings of the Dirac Centennial Symposium (Singapore: World Scientific Publishing, 2003), 71.**

*** Sabine Hossenfelder, »You Say Theoretical Physicists Are Doing Their Job All Wrong. Don't You Doubt Yourself?,« Back Reaction (blog), Oct. 4, 2018, http://backreaction.blogspot.com/2018/10/you-say-theoretical-physicists-are.html.**

الفصل السابع

البحث عن المعنى في الكون

*** Stephen Hawking, A Brief History of Time (New York: Bantam Books, 1988), 175.**

❊ ❊ ❊

قراءات مختارة

Bartusiak, Marcia. Einstein's Unfinished Symphony. Yale University Press, 2017.

Becker, Katrin, Melanie Becker, and John Schwarz. String Theory and M-Theory. Cambridge University Press, 2007.

Crease, Robert P., and Charles Mann. The Second Creation: Makers of the Revolution in Twentieth-Century Physics. New York: Macmillan, 1986.

Einstein, Albert. The Special and General Theory. Mineola, New York: Dover Books, 2001.

Feynman, Richard. Surely You're Joking, Mr. Feynman: Adventures of a Curious Character. New York: W. W. Norton, 2018.

———. The Feynman Lectures on Physics (with Robert Leighton and Matthew Sands). New York: Basic Books, 2010.

Green, Michael, John Schwarz, and Edward Witten. Superstring Theory, vols. 1 and 2. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.

Greene, Brian. The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory. New York: W. W. Norton, 2010.

Hawking, Stephen. A Brief History of Time. New York: Bantam, 1998.

———. The Grand Design (with Leonard Mlodinow). New York: Bantam, 2010.

Hossenfelder, Sabine. Lost in Math: How Beauty Leads Physics Astray. New York: Basic Books, 2010.

Isaacson, Walter. Einstein: His Life and Universe. New York: Simon and Schuster, 2008.

Kaku, Michio. Parallel Worlds: A Journey Through Creation, Higher Dimensions, and the Future of the Cosmos. New York: Random House. 2006.

———. Hyperspace: A Scientific Odyssey Through Parallel Universes, Time Warps, and the Tenth Dimension. New York: Oxford University Press, 1995.

———. Introduction to String Theory and M-Theory. New York: Springer-Verlag, 1999.

Kumar, Manhit. Quantum: Einstein, Bohr, and the Great Debate About the Nature of Reality. New York: W. W. Norton, 2010.

Lederman, Leon. The God Particle: If the Universe Is the Answer, What Is the Question? New York: Mariner Books, 2012.

Levin, Janna. Black Holes Blues and Other Songs from Outer Space. New York: Anchor Books, 2017.

Maxwell, Jordan. The History of Physics: The Story of Newton, Feynman, Schrodinger, Heisenberg, and Einstein. Independently published, 2020.

Misner, Charles W., Kip Thorne, and John A. Wheeler. Gravitation. Princeton: Princeton University Press. 2017.

Mlodinow, Leonard. Stephen Hawking: A Memoir of Friendship and Physics. New York: Pantheon Books, 2020.

Polchinski, Joseph. String Theory, vols. 1 and 2. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.

Smolin, Lee. The Trouble with Physics: The Rise of String Theory, the Fall of a Science, and What Comes Next. New York: Houghton Mifflin, 2006.

Thorne, Kip. Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy. New York: W. W. Norton, 1994.

Tyson, Neil de Grasse. Death by Black Hole and Other Cosmic Quandaries. New York: W. W. Norton, 2007.

Weinberg, Steven. Dreams of a Final Theory: The Scientific Search for the Ultimate Laws of Nature. New York: Vintage Books, 1992.

Wilczek, Frank. Fundamentals: Ten Keys to Reality. New York: Penguin Books, 2021.

Woit, Peter. Not Even Wrong: The Failure of String Theory and the Search for Unity in Physical Law. New York: Basic Books, 2006.

التعريف بالمؤلف

ميتشيو كاكو أستاذ الفيزياء النظرية في جامعة مدينة نيويورك، ومؤسس مشارك لنظرية مجال الأوتار، ومؤلف العديد من الكتب العلمية المشهود لها على نطاق واسع، والأكثر مبيعًا، بما في ذلك:

Beyond Einstein, The Future of Humanity, The Future of the Mind, Hyperspace, Physics of the Future, and Physics of the Impossible.

وهو مراسل العلوم لبرنامج **CBS This Morning**، ومضيف البرامج الإذاعية **Science Fantastic and Exploration**، ومضيف العديد من البرامج التلفزيونية العلمية الخاصة لقناة **BBC** وقنوات **Discovery and Science**.

التعريف بالمترجم

مصطفى أحمد علي العدوي، مهندس كهرباء (مدير إدارة الكهرباء والآلات الدقيقة) بشركة نفط مصرية، حاصل على درجة الماجستير في الهندسة الكهربائية ٢٠١٦، له عدد من الأبحاث في مجالات الهندسة والطاقة، المشرف السابق لفريق الفيزياء والفلك والهندسة بمبادرة «أنا أصدق العلم»، له ٢٠٠ مقال علمي مترجم في مبادرات: أنا أصدق العلم/ أخبار العلوم/ الباحثون السوريون/ في العلم.

صدر له ثلاثة مؤلفات أدبية: مجموعتان قصصيتان؛ الأولى تحت عنوان: «أل...»، صادرة عن الهيئة العامة المصرية للكتاب في عام ٢٠١٥، والثانية تحت عنوان: «مجتمع المتوحدين السري»، ٢٠١٧. ورواية «وهم كوتارد» الجزائر، ٢٠١٩.

كما صدرت ترجمته لكتاب نيلز بور «فيزياء الكم والمعرفة الإنسانية» عن دار آفاق، عام ٢٠٢٢.

حصل على المركز الأول للقصة القصيرة في مسابقة نقابة المهندسين المصرية ٢٠١٧، وهو عضو سابق بنادي أدب جامعة المنصورة، وعضو مؤسس لنادي أدب كلية الهندسة جامعة المنصورة.