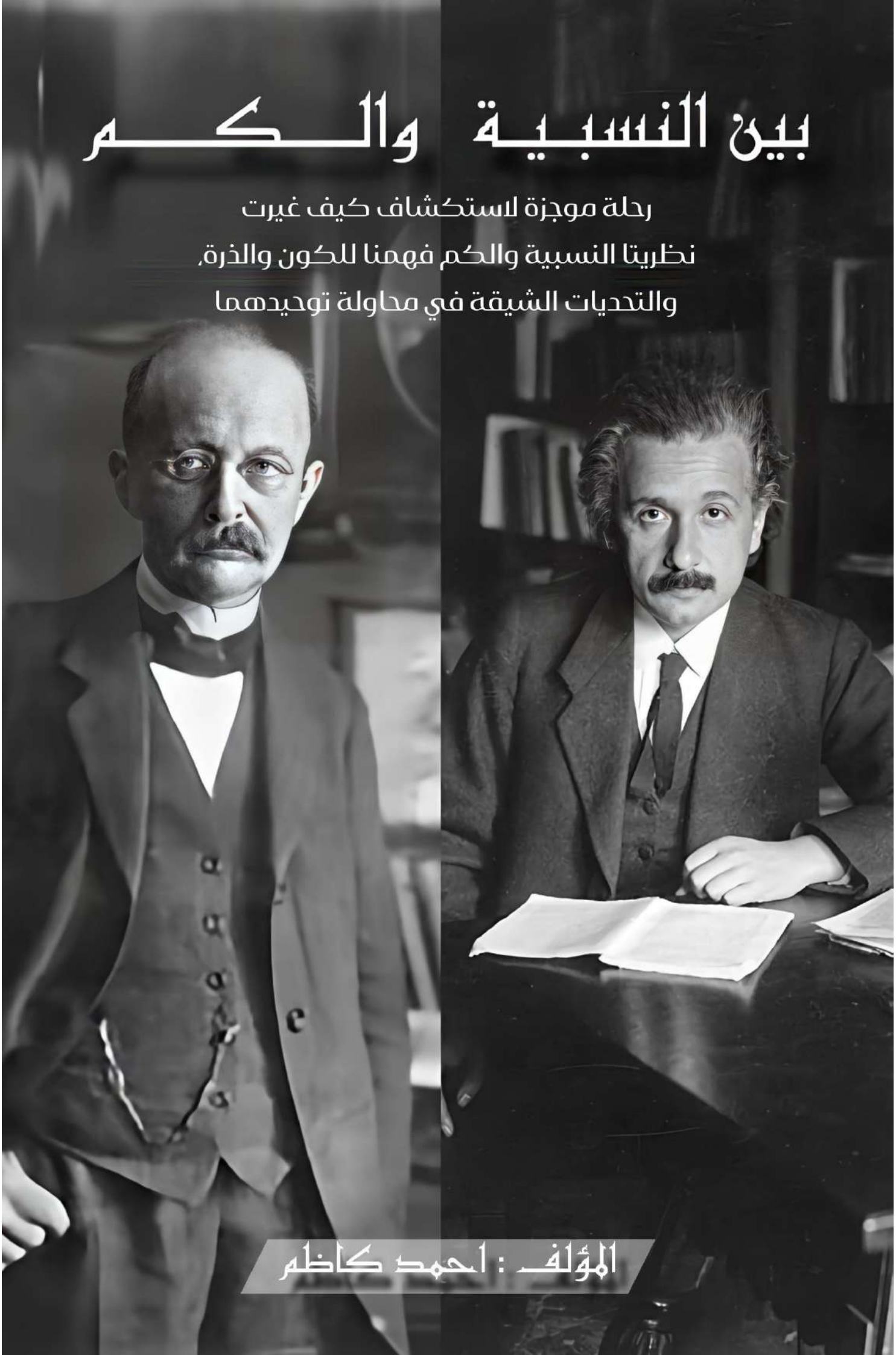
بين النسبية والكم

رحلة موجزة لاستكشاف كيف غيرت
نظريتا النسبية والكم فهمنا للكون والذرة،
والتحديات الشيقة في محاولة توحيدهما



المؤلف : أحمد كاظم

بين

النسبية

والكم

النسبية تحكم الكبير والثقيل، والكم
يحكم الصغير والخفيف. يبقى
توحدهما في نظرية واحدة تحدياً
أساسياً لفهم الكون.

المواد المنشورة في هذه السلسلة تعبر عن رأي
كاتبها ولا تعبر بالضرورة عن رأي المجلس.

المواد المنشورة في هذه السلسلة تعبر عن رأي كاتبها
ولا تعبر بالضرورة عن رأي المجلس.
جميع الحقوق محفوظة للمؤلف، ولا يجوز اقتباس
أو تقليد أو نشر أي جزء من الكتاب دون استئذان
من المؤلف.

الطبعة الثانية
2025م

"إذا كنت قد رأيت أبعد من غيري، فذلك
لأني أقف على أكتاف العمالقة"

الفهرس

رقم الصفحة: 1- المقدمة

الفصل الأول:

رقم الصفحة: 2 - أينشتاين

رقم الصفحة: 5 - النسبية

الفصل الثاني:

رقم الصفحة: 14 - مدخل علوم الكونيات النسبي

الفصل الثالث:

رقم الصفحة: 54 - ماكس بلانك

رقم الصفحة: 63 - الكم

الفصل الرابع:

رقم الصفحة: 66 - مدخل علوم الكونيات الكمي

الفصل الخامس:

رقم الصفحة: 110 - محاولة التوحيد

الفصل

الاول

اينشتاين

والنسبية

أهلاً بك في رحلة استكشافية تكتشف الإنغماس عبر عوالم الفيزياء الحديثة. حيث تتشابك عبقرية العقل البشري مع أعمق أسرار الكون. ننطلق سويًا في استكشاف ثورتين علميتين عظيمتين، ثورتين لم تهتز فقط أسس الفيزياء الكلاسيكية الراسخة، بل أعادتا صياغة فهمنا جذرياً لطبيعة الزمان والمكان، والمادة والطاقة، وكل ما يربط بينهما في هذا الكون الفسيح.

في هذه الصفحات، سنشهد ميلاد رؤى جديدة للكون بفضل عبقرية البرت أينشتاين ونظريته النسبية المذهلة، التي كشفت عن الترابط الوثيق بين الزمان والمكان. وقدمت لنا معادلة أيقونية تختزل قوة الكون الهائلة في علاقة بسيطة بين الطاقة والكتلة.

ثم سننتقل إلى عالم الكم الغامض والسام، حيث قادت أفكار ماكس بلانك الثورية إلى فهم جديد لعالم الذرات وما دونه. وكشفت عن الطبيعة المتقطعة للطاقة. فالتحدي بذلك آفاقاً غير مسبوقة في فهم سلوك الجسيمات الأولية وتفاعلاتها.

وأخيراً، سنحلق في سماء علم الكونيات الفسيحة، متأملين الكون في أبعاده الشاسعة وتطوره المذهل منذ لحظات نشأته الأولى.

سنستعرض كيف يسعى العلماء جاهدين لتوحيد هاتين النظريتين العظيمتين، النسبية والكم

في إطار نظري واحد شامل. طموحًا منهم لكشف النقاب عن "نظرية كل شيء"، التي قد تزيح الستار عن أعمق أسرار الوجود.

هذا الكتاب ليس مجرد استعراض لنظريات علمية معقدة، بل هو دعوة للتفكير والتساؤل، ورحلة استكشافية تهدف إلى إلهام فضولك وشغفك بفهم الكون الذي نعيش فيه. هيا بنا ننطلق في هذه المغامرة الشيقة!

في سياف ميفاجات التاريخ المضيئة، برز اسم ألبرت أينشتاين كمنارة للعقل البشري. وشخصية تجاوزت حدود الزمان والمكان، ليصبح رمزا للعبقرية المطلقة. لم تكن حياته مجرد سلسلة من الاكتشافات العلمية اللورية، بل كانت رحلة فكرية وتشخصية فريدة، نسجت خيوطها الأولى في مدينة أولم الألمانية الهادئة في الرابع عشر من مارس عام **1879.**

في سنوات طفولته المبكرة، لم يبد على أينشتاين ما يوحي بتلك العبقرية الكامنة. تأخر في الكلام حتى السن الثالثة، مما أثار بعض القلق لدى والديه، لكن سرعان ما انكشف شغفه العميق بالعالم من حوله، خاصة بعد أن قدم له والده بوصلة صغيرة، أثارت في نفسه دهشة لقوة خفية تحرك الإبرة. هذه اللحظة، كما ذكر هو نفسه لاحقا، كانت بمثابة الشرارة الأولى التي أشعلت فضوله العلمي.

انتقل مع عائلته إلى ميونيخ، حيث التحق بالمدرسة الابتدائية ثم الثانوية. لم يكن أينشتاين طالبا نموذجيًا؛ كان يمتلك عقلا متوقدًا يطرح أسئلة عميقة، لكنه كان يجد صعوبة في التأقلم مع النظام التعليمي الصارم الذي كان يركز على الحفظ والتلقين. تفضل القراءة المستقلة واستكشاف الكتب العلمية، وتعلم أسس الهندسة الإقليدية بنفسه، مما يدل على شغفه الذاتي بالمعرفة.

في عام **1895** واجهت عائلته صعوبات مالية، مما اضطرها للانتقال إلى ميلانو في إيطاليا. بقي أينشتاين في ميونيخ لفترة وجيزة، لكنه سرعان ما ترك المدرسة والتحق بعائلته. أظهر بالرغم بذلك استقلالية مبكرة في اتخاذ القرارات. لاحقاً، سعى للدراسة في المعهد الفدرالي السويسري للتكنولوجيا في زيورخ، وبعد محاولة أولى غير ناجحة تمكن من تحق حلمه عام **1896.**

خلال دراسته في زيورخ، لم يكن أينشتاين من الطلاب الملتزمين بحضور المحاضرات بشكل دائم، بل كان يفضل تخصيص وقته للقراءة والتفكير العميق في المسائل الفيزيائية الرياضية التي تثير اهتمامه. تخرج عام **1900**، وواجه صعوبة في العثور على وظيفة أكاديمية، ليجد نفسه في عام **1902** يعمل فنيًا في مكتب براءات الاختراع السويسري في برن.

قد تبدو هذه الوظيفة متواضعة، لكنها منحت أينشتاين ميزة ثمينة: الوقت، كان يستغل ساعات عمله في التفكير العميق في أفكاره الفيزيائية. وفي عام **1905**، الذي يعرف بـ **"العام المعجزة"**، نشر أربع أوراق بحثية غيرت مسار الفيزياء الحديثة. قدم تفسيراً للتأثير الكهروضوئي، وأثبت وجود الذرات من خلال تفسير الحركة البراونية، وطرح نظريته النسبية الخاصة التي قلبت مفاهيم الزمان والمكان. والأهم من ذلك، اكتشف العلاقة الشهيرة بين الكتلة والطاقة

$$E=mc^2$$

بعد سنوات من العمل المضني والتفكير العميق، نشر أينشتاين في عام **1915** نظريته النسبية العامة، التي أعادت تعريف الجاذبية كإنحناء في نسيج الزمكان ناتج عن وجود الكتلة والطاقة. هذه النظرية لم تقدم تفسيراً لقذف أدوار كوكب عطارد فحسب، بل تنبأت بظواهر جديدة مثل انحناء الضوء بفعل الجاذبية، والتي تم تأكدها لاحقاً بالتجارب، مما أكسب أينشتاين شهرة عالمية واسعة.

لم تقتصر حياة أينشتاين على الإنجازات العلمية فحسب، بل كانت له آراء واضحة في القضايا الاجتماعية والسياسية. كان مناصراً للسلام والعدالة الديمقراطية، وعارض بشدة استخدام الأسلحة النووية. كان أيضاً صهيونياً ملتزماً ودعم فكرة إنشاء دولة لليهود.

مع صعود النازية في ألمانيا، اضطر أينشتاين، بسبب أصوله اليهودية، إلى الهجرة إلى الولايات المتحدة عام **1933**، حيث استقر في معهد الدراسات المتقدمة في برينستون. وفي عام **1939**، كتب رسالة شهيرة إلى الرئيس الأمريكي فرانكلين روزفلت يحذره فيها من إمكانية تطوير ألمانيا لقنبلة ذرية، مما ساهم في إطلاق مشروع مانهاتن. لاحقاً، أعرب أينشتاين عن ندمه على دوره غير المباشر في هذا المشروع.

في سنواته الأخيرة، كرس أينشتاين جهوده

للبحث عن **"**نظرية المجال الموحد**"**،

وهي نظرية طموحة تهدف إلى توحيد جميع القوى الأساسية في الطبيعة في إطار نظري واحد، لكنه لم يتمكن من تحقيق هذا الهدف قبل وفاته في الثامن عشر من أبريل عام **1955.**

يبقى ألبرت أينشتاين في الذاكرة الجمعية ليس فقط كعالم عبقري، بل كرمز للإنسانية والتفكير العميق. لقد ترك إرثاً علمياً هائلاً أثر في فهمنا للكون، وإرثاً إنسانياً يدعو إلى السلام والتسامح والمجانية. حياته، بكل تفاصيلها وتقلباتها، هي قصة ملهمة عن قوة العقل البشري وقدرته على تجاوز حدود المألوف واستكشاف أسرار الوجود.

بعد أن تعرفنا على صديقنا ألبرت، دعنا نتعمق أكثر في رحلة أينشتاين الفكرية، ونستكشف التفاصيل الدقيقة التي قادته إلى ثورته النسبية، وكأننا نفتح خزائن عقل عبقري لنرى كيف تشكلت أفكاره خطوة بخطوة.

[الشرارة الأولى **-** التساؤل عن طبيعة الضوء**]**

لم يكتب اهتمام أينشتاين بالضوء مجرد فضول عابر، بل كان انتخاباً عميقا بجوهر هذه الظاهرة الأساسية. في أواخر القرن التاسع عشر، كانت الفيزياء الكلاسيكية قد حققت نجاحات باهرة في تفسير العديد من الظواهر الطبيعية، لكن طبيعة الضوء ظلت لغزاً محيراً. كانت النظرية الموجية للضوء، التي افترضت وجود وسط **"**الأثير**"** لانتشار الموجات الضوئية، هي السائدة. لكن أينشتاين وجد صعوبة في تقبل هذا الافتراض غير المباشر.

كان يتساءل: إذا كان الضوء موجة تنتشر في الأثير، فما هي خصائص هذا الأثير؟ كيف يمكن لشيء غير مرئي وغير محسوس أن يملأ الفضاء بأكمله ويكون بمثابة المرجع المطلق للحركة؟ هذه التساؤلات قادته إلى التفكير في التجارب التي أجريت للتحقق من وجود الأثير، وأبرزها تجربة مايكلسون ومورلي الشهيرة، التي لم تسفر عن أي دليل على وجوده. هذه النتيجة السلبية تركت أثراً

في تفكير اينشتاين

[مبدأ النسبية - نقطة انطلاق جديدة]

بدلاً من محاولة إنقاذ مفهوم الأثير، تبنى أينشتاين منظوراً جذرياً. استوحى من أعمال جاليليو ونيوتن حول مبدأ النسبية، الذي ينص على أن قوانين الفيزياء يجب أن تكون هي نفسها لجميع المراقبين الذين يتحركون بسرعة ثابتة بالنسبة لبعضهم البعض. لكن أينشتاين وسع هذا المبدأ ليتكامل كهرومغناطيسية والضوء.

تخيل تجربتين: الأولى داخل قطار يتحرك بسرعة ثابتة، والأخرى على رصيف ثابت. إذا قمت بإجراء نفس التجربة الفيزيائية في كلا المكانين **(**مثل إسقاط كرة**)**، يجب أن تكون النتائج هي نفسها. أينشتاين تساءل: هل ينطبق هذا المبدأ أيضاً على قوانين الضوء؟ إذا كانت سرعة الضوء ثابتة، بغض النظر عن حركة المصدر أو المراقب، فكيف يمكننا التوفيق بين ذلك وبين مفهوم

السرعات النسبية؟

[ثبات سرعة الضوء - حجر الزاوية]

هنا تكمن النقطة الحاسمة. افترض أينشتاين ببساطة أن سرعة الضوء في الفراغ هي قيمة ثابتة **300,000** كم/ث

لجميع المراقبين بالقصور الذاتي، بغض النظر عن حركتهم أو حركة مصدر الضوء. هذا الافتراض، الذي يبدو بسيطاً للوهلة الأولى، كان له عواقب ثورية على مفاهيمنا عن الزمان

والمكان.

فكر في مصباح يدوي يضيء في اتجاه حركة قطار سريع. وفقاً للميكانيكا الكلاسيكية، يجب أن تكون سرعة الضوء التي يقيسها مراقب ثابت على الأرض هي سرعة الضوء المنبعث من المصباح مضافاً إليها سرعة القطار. لكن أينشتاين أصر على أن المراقب على الأرض سيقيس نفس سرعة الضوء التي يقيسها شخص داخل القطار.

[مبدأ النسبية - نقطة انطلاق جديدة]

بدلاً من محاولة إنقاذ مفهوم الأثير، تبنى أينشتاين منظوراً جذرياً. استوحى من أعمال جاليليو ونيوتن حول مبدأ النسبية، الذي ينص على أن قوانين الفيزياء يجب أن تكون هي نفسها لجميع المراقبين الذين يتحركون بسرعة ثابتة بالنسبة لبعضهم البعض. لكن أينشتاين وسع هذا المبدأ ليتكامل كهرومغناطيسية والضوء.

تخيل تجربتين: الأولى داخل قطار يتحرك بسرعة ثابتة، والأخرى على رصيف ثابت. إذا قمت بإجراء نفس التجربة الفيزيائية في كلا المكانين **(**مثل إسقاط كرة**)**، يجب أن تكون النتائج هي نفسها. أينشتاين تساءل: هل ينطبق هذا المبدأ أيضاً على قوانين الضوء؟ إذا كانت سرعة الضوء ثابتة، بغض النظر عن حركة المصدر أو المراقب، فكيف يمكننا التوفيق بين ذلك وبين مفهوم السرعات النسبية؟

[ثبات سرعة الضوء - حجر الزاوية]

هنا تكمن النقطة الحاسمة. افترض أينشتاين ببساطة أن سرعة الضوء في الفراغ هي قيمة ثابتة **300,000** كم/ث لجميع المراقبين بالقصور الذاتي، بغض النظر عن حركتهم أو حركة مصدر الضوء. هذا الافتراض، الذي يبدو بسيطاً للوهلة الأولى، كان له عواقب ثورية على مفاهيمنا عن الزمان والمكان.

فكر في

مصباح يدوي يضيء في اتجاه حركة قطار سريع. وفقاً للميكانيكا الكلاسيكية، يجب أن تكون سرعة الضوء التي يقيسها مراقب ثابت على الأرض هي سرعة الضوء المنبعث من المصباح مضافاً إليها سرعة القطار. لكن أينشتاين أصر على أن المراقب على الأرض سيقيس نفس سرعة الضوء التي يقيسها شخص داخل القطار.

من خلال عمله على النسبية الخاصة، توصل أينشتاين إلى العلاقة العميقة بين الكتلة والطاقة. لقد أظهر أن الكتلة يمكن أن تتحول إلى طاقة، وأن الطاقة يمكن أن تتحول إلى كتلة، وأن كمية الطاقة **E** المكافئة لكمية من الكتلة **m** تعطى بالمعادلة الشهيرة **E = mc^2**

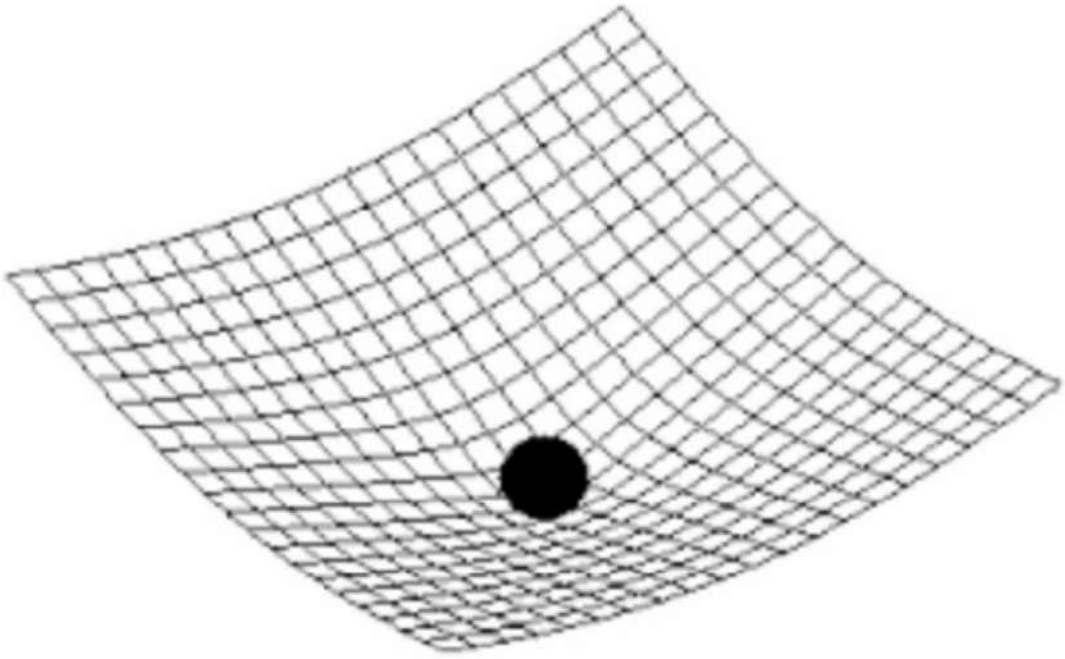
لقد أدرك أن الكتلة هي ببساطة شكل مكثف من الطاقة. هذه الفكرة كان لها تأثير هائل على فهمنا للتفاعلات النووية وإنتاج الطاقة من الشمس والنجوم.

بعد نجاحه في صياغة النسبية الخاصة، واجه أينشتاين تحدياً أكبر: كيف يمكن دمج الجاذبية في هذا الإطار النسبي الجديد؟ كانت نظرية نيوتن للجاذبية تصفها كقوة تحمل بشكل فوري عبر الفضاء، وهو ما يتعارض مع مبدأ النسبية الذي ينص على عدم وجود تأثير ينتقل بسرعة أكبر من سرعة الضوء.

المفتاح الذي فتح لأينشتاين الباب إلى النسبية العامة كان **"مبدأ التكافؤ".**

لقد أدرك أن التأثيرات الناتجة عن الجاذبية لا يمكن تمييزها عن التأثيرات الناتجة عن التسارع. تخيل نفسك في مصعد. إذا كان المصعد ثابتاً في مجال جاذبية، ستشعر بقوة تسحبك للأسفل. وإذا كان المصعد يتسارع إلى الأعلى في الفضاء الخالي من الجاذبية، ستشعر بنفس القوة تماماً.

هذا التكافؤ قاد أينشتاين إلى فكرة أن الجاذبية ليست قوة بالمعنى التقليدي، بل هي مظهر من مظاهر انحناء الزمكان الناتج عن وجود الكتلة والطاقة.



لتطوير هذه الفكرة رياضياً، احتاج أينشتاين إلى أدوات رياضية متقدمة، وتحديداً الهندسة الريمانية، التي تصف الفضاءات المنحنية. بمساعدة صديقه عالم الرياضيات مارسيل غروسمان، تعلم هذه الأدوات وبدأ في صياغة معادلات تصف كيف تؤثر الكتلة والطاقة على انحناء الزمكان، وكيف تتحرك الأجسام في هذا الزمكان المنحني.

تصور كرة بولينج موضوعة على قطعة قماش مشدودة. ستؤدي الكرة إلى انحناء القماش. إذا دحرجت كرة أصغر بالقرب من كرة البولينج، فإنها ستنحرف في مسارها بسبب انحناء القماش، كما لو كانت تنجذب إلى كرة البولينج. في النسبية العامة، تلعب الكتلة والطاقة دور كرة البولينج، بينما يمثل الزمكان قطعة القماش.

ولتوضيح الفكرة أكثر

تصور بأنك قد ألقيت حجر في بركة ماء ساكنة. ستحدث موجات مائية، يتوسع

حجمها مع مرور الزمن. إذا أردنا أن نرسم ذلك الحدث بيانياً، وندخل بعد الزمن فسوف نقوم برسم محورين أحدهما عمودي يمثل الزمن وآخرين أفقيين يمثلان.

عندما ترمي حجر في بركة ماء ساكنه، فسوف تصنع موجات يكبر قطرها بمرور الزمن. نستطيع توضيح وضح.
الزمن على المحور العمودي، والأبعاد المكانيه على المحور المكاني، وبذلك يكبر نصف قطر الموجه المائيه مع مرور الزمن. المكان،
كما هو موضح بالشكل نفسه على اليمين. و، طالما أن الزمن هو المحور العمودي، فسوف يكبر قطر دائرة الموجه معه. وبالتالي نستطيع تخيل تشكل الدوائر وهي تتوسع وكأنها مخروط يتجه الى الأعلى.
الآن، كل ما هو مطلوب منك أن تنسى الموجات المائيه وتحل محلها موجات ضوئيه. وال اشكال في ذلك، لأن كليهما موجات. لكن موجات الضوء، كما نعلم غريبه ببعض التقنين،
وذلك أن سرعتها ثابته تماماً بمجرد صدورها من منبعها. وال عائقه لها بسرعة المصدر أو وضحه. وهذا الأمر ال ينطبق على الموجات المائيه. لذلك ال بد أن نحصل على بعض الأفكار الجديده، لتوضيحي خاطر ثبات سرعة الضوء.
أنت تعلم بأن الضوء يغادر من جسمك باستمرار، سواء نتيجة انعكاس الضوء الساقط هذا الضوء مجرد أن يصدر من عليك أو نتيجه صدور ضوء حراري من جسمك جسمك، فأنه ينظر في كل جهه من حواليك. لذلك
سينوسح هذا الضوء مع مرور الزمن ككرة ضوئيه.
تتفيه موجات الماء السابقه الذكر. وبنفس الطريقه، نستطيع تصور موجات الضوء الخارجه من جسمك تنتشر بشكل مخروط يتجه نحوه المستقبل

[التنبوأت والتحقق - انتصارات الرؤية]

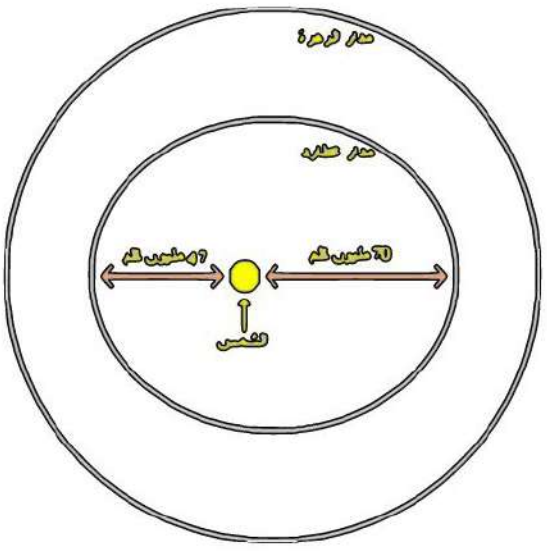
لم تكن النسبية العامة مجرد إطار نظري جميل، بل قدمت تنبؤات جديدة قابلة للاختبار.
من أبرز هذه التنبؤات:

انحراف مدار كوكب عطارد **(تقدم الحضيض)**

* التنبؤ: قبل نظرية النسبية العامة، كان علماء الفلك على دراية بوجود تشذذ طفيف في مدار كوكب عطارد حول الشمس. لم يكن مدار عطارد بيضاويا ثابتا تماما كما تنبأت به قوانين نيوتن للجاذبية، بل كان نقطة الحضيض **(**أقرب نقطة في المدار إلى الشمس**)** تتقدم ببطء حول الشمس بمقدار صغير جدا **(**حوالي ٤٣ ثانية قوسية لكل قرن**).** لم تستطع فيزياء نيوتن تفسير هذا المقدار بدقة.

ولكن قدمت نظرية النسبية العامة تفسيرا طبيعيا لهذا التشذذ. أوضحت أن الجاذبية القوية بالقرب من الشمس تؤدي إلى انحناء كبير في الزمكان، مما يؤثر على مدار عطارد. حسبت معادلات أينشتاين مقدار التقدم في الحضيض بدقة متناهية، متوافقة تماما مع المشاهدات الفلكية المعروفة.

انتصارات الرؤية: كانت هذا أول نجاح كمي لنظرية النسبية العامة في تفسير ظاهرة لم تستطع الفيزياء النيوتونية تفسيرها بشكل كامل. لقد أظهرت أن نظرية أينشتاين تقدم وصفا أكثر دقة للجاذبية في المجالات القوية



[نظرية الضوء والجاذبية**]**

نظرية الضوء والجاذبية النسبية العامة: **"**تنبأت نظرية الضوء والجاذبية النسبية العامة بأن الضوء، على الرغم من عدم امتلاكه كتلة، سيتأثر بالجاذبية وينحني مساره عند مروره بالقرب من جسم ضخم يقلل الجاذبية. يحدث هذا الانحناء للجاذبية، وفقاً لأينشتاين، هي انحناء في الزمكان، والضوء يسير في أقصر مسار ممكن في هذا الزمكان المنحني **(**الجيوديسيات**)."**

كانت هذه من أكثر التنبؤات إثارة للجدل في ذلك الوقت، لأنها تتعارض مع الفهم الكلاسيكي للضوء. اقترح أينشتاين أن أفضل طريقة لمراقبة هذا الانحناء هي أثناء كسوف الشمس الكلي. وعندما يحجب القمر ضوء الشمس الساطع، مما يسمح بمراقبة النجوم القريبة من حافة الشمس.

قام فلكيان فلكيان بريسبانبريان ويليانز بقيادة آرثر إدينجتون وجلينغز بتنظيم لمراقبة كسوف الشمس عام **1919** في جزيرة برينسيبي **(**قبالة ساحل أفريقيا**)** وفي سوبال **(**البرازيل**).** قاسوا مواقع النجوم القريبة من حافة الشمس أثناء الكسوف وقارنوها بمواقعها المعتادة في الليل

أظهرت النتائج انحناء واضحاً في ضوء النجوم، وكان مقدار الانحناء متوافقاً بشكل جيد مع تنبؤات أينشتاين.

الانحناء الرؤية: كان هذا التحقق التجريبي بمثابة انتصار مذهل لنظرية النسبية العامة. لقد أهل العالم وأكسب أينشتاين شهرة عالمية. أثبتت أن الجاذبية تؤثر على الضوء، وهو مفهوم جديد تماماً، ودعم بشكل قوي الانحناء التحدي الجديد لأينشتاين.

الساعات الذرية في الأقمار الصناعية

تعمل الأقمار الصناعية لنظام تحديد المواقع العالمي في مجال جاذبية أضعف من الساعات الذرية الموجودة على سطح الأرض. يجب أخذ تأثير تمدد الزمن الجذبي **(**بالإضافة إلى تأثير تمدد الزمن النسبي بسبب سرعة الأقمار الصناعية**)** في الحساب لضمان دقة النظام.

تجربة جاذبية **(**مسبار الجاذبية**) (**٢٠٠٤-٢٠٠٥**):** قامت وكالة ناسا بإطلاق قمر صناعي يحمل أربعة جيروسكوبات فائقة الدقة لقياس الانحناء في الزمكان بالقرب من الأرض. أكدت النتائج تأثير تمدد الزمن الجذبي وتأثيرات أخرى تنبأت بها النسبية العامة.

انحراف الزمان: لقد تم التحقق من تمدد الزمن الجذبي بدقة عالية من خلال العديد من التجارب، مما يؤكد صحة أحد التنبؤات الأساسية لنظرية النسبية العامة وله تطبيقات مهمة في

الزمكان بالقرب من الأرض. أكدت النتائج تأثير تمدد الزمن الجذبي وتأثيرات أخرى تنبأت بها النسبية العامة.

انحراف الزمان: لقد تم التحقق من تمدد الزمن الجذبي بدقة عالية من خلال العديد من التجارب، مما يؤكد صحة أحد التنبؤات الأساسية لنظرية النسبية العامة وله تطبيقات مهمة في التكنولوجيا الحديثة مثل نظام.

لقد ترك لنا أينشتاين إرثاً من التفكير الجريء والفضول العلمي الذي لا ينضب، وهو إرث سيظل يلهم الأجيال القادمة من العلماء والمفكرين. واليوم، بعد مرور أكثر من قرن على نشر أينشتاين لأفكاره الثورية، لا تزال نظرية النسبية العامة تقف شامخة كحجر الزاوية في فهمنا للكون على أوسع نطاقاته. من تفسير حركة الكواكب والنجوم بدقة متناهية، إلى فهم الظواهر الكونية العنيفة مثل الثقوب السوداء والموجات الثقالية. ووصولاً إلى وضع الأساس لعلم الكونيات الحديث الذي يدرس نشأة الكون وتطوره. تظل نسبية أينشتاين هي اللغة الأساسية التي نستخدمها لوصف رقصة الكون المهيبة، والذي سيتم ذكره لاحقاً بالتفصيل.

إن التحقق المستمر من تنبؤات النسبية العامة، باستخدام تلسكوبات وأجهزة قياس متطورة بشكل لم يكن ليخطر ببال أينشتاين نفسه، يؤكد قوتها ودقتها. ومع ذلك، فإن رحلة العلم لا تتوقف. لا يزال الفيزيائيون يسعون لتوحيد نظرية النسبية العامة مع ميكانيكا الكم، الإطار النظري الذي يصف العالم على أصغر المقاييس، في نظرية موحدة للجاذبية الكمية. ربما تحمل الأجيال القادمة من العلماء مستلهمة من عبقرية أينشتاين وشجاعته الفكرية، المفتاح لهذا الفصل التالي في فهمنا للكون.

في نهاية المطاف، فإن نظرية النسبية ليست مجرد مجموعة من المعادلات المعقدة، بل هي شهادة على قدرة العقل البشري على تجاوز حدود التجربة اليومية والتجريد للوصول إلى حقائق أعمق حول طبيعة الواقع. إنها تذكير دائم بأن الفضول والتفكير النقدي والرغبة في استكشاف المجهول هي المحركات الحقيقية للتقدم العلمي. وأن إرث أينشتاين سيظل منارة تضيء طريقنا نحو فهم أسرار الكون اللامتناهي.

الفصل

الثاني

مدخل
علوم

كونيات
النسبي

في رحاب الكون الشاسع، حيث تتراقص المجرات في سيمفونية كونية مهيبة، تقف نظرية علم الكونيات النسبي كإطار نظري منير، ينسج خيوط الزمان والمكان والمادة والطاقة في نسيج واحد متماسك. لم تتلف هذه النظرية من فراغ، بل استندت إلى أسس راسخة، قوامها عبقرية ألبرت أينشتاين ورؤيته الثورية للجاذبية. وسنستكشف معاً في صفحات هذا الكتاب، الأسس التي قامت عليها هذه النظرية الكونية العظيمة.

[الركيزة الأولى - مبادئ النسبية العامة]

كما أسلفنا في فصول سابقة، تشكلت نظرية النسبية العامة لأينشتاين **(**التي نشرت عام ١٩١٥**)** حجر الزاوية الذي بني عليه علم الكونيات النسبي. تقوم هذه النظرية على مبدأين أساسيين:

* مبدأ النسبية العامة: قوانين الفيزياء يجب أن تكون هي نفسها لجميع المراقبين، بغض النظر عن حالة حركتهم المتسارعة أو غير المتسارعة. هذا المبدأ يوسع نطاق مبدأ النسبية الخاصة ليتصل بالجاذبية.
* مبدأ التكافؤ: التأثيرات المحلية الناتجة عن الجاذبية لا يمكن تمييزها عن التأثيرات المحلية الناتجة عن التسارع. هذا المبدأ قاد أينشتاين إلى فهم الجاذبية ليس كقوة، بل كانحناء في نسيج الزمكان ناتج عن وجود الكتلة والطاقة.

من هذين المبدأين، اشتق أينشتاين معادلات المجال للجاذبية، وهي مجموعة من عشر معادلات تصف كيفية انحناء الزمكان بفعل توزيع المادة والطاقة، وكيف يؤثر هذا الانحناء على حركة الأجسام. هذه المعادلات هي القلب النابض لعلم الكونيات النسبي.

لتطبيق معادلات المجال المعقدة على الكون بأكمله، تبنى علماء الكونيات افتراضاً تبسيطياً بالغ الأهمية يُعرف باسم الافتراض الكوني. ينص هذا الافتراض على أن الكون، على أوسع المقاييس، متجانس وممتد.

* التجانس: يعني أن الكون يبدو هو نفسه في كل مكان. لا يوجد مكان مميز أو مركز للكون. إذا انتقلنا إلى أي نقطة أخرى في الكون على نطاق واسع بما فيه الكفاية، فسترى نفس متوسط كثافة المادة ونفس الخصائص العامة. تخيل قطعة قماش ذات نسيج منتظم؛ تبدو متشابهة في أي جزء منها.

* المماثل **(التماثل في جميع الاتجاهات):** يعني أن الكون يبدو هو نفسه في جميع الاتجاهات من أي نقطة معينة. لا يوجد اتجاه مفضل أو محور مميز في الكون على نطاق واسع. بالعودة إلى مثال قطعة القماش، إذا نظرنا إلى أي نقطة عليها، فإن النسيج يبدو هو نفسه في جميع الاتجاهات المحيطة بتلك النقطة.

تجدر الإشارة إلى أن هذا الافتراض ينطبق على الكون على المقاييس الكبيرة جداً **(مئات الملايين من السنوات الضوئية وما فوق).** على المقاييس الأصغر، نرى تجمعات من المجرات والعناقيد الفائقة التي تكسر هذا التجانس. لكن على النطاق

واسع بما فيه الكفاية، فسترى نفس متوسط كثافة المادة ونفس الخصائص العامة. تخيل قطعة قماش ذات نسيج منتظم؛ تبدو متشابهة في أي جزء منها.

* المماثل **(التماثل في جميع الاتجاهات):** يعني أن الكون يبدو هو نفسه في جميع الاتجاهات من أي نقطة معينة. لا يوجد اتجاه مفضل أو محور مميز في الكون على نطاق واسع. بالعودة إلى مثال قطعة القماش، إذا نظرنا إلى أي نقطة عليها، فإن النسيج يبدو هو نفسه في جميع الاتجاهات المحيطة بتلك النقطة.

تجدر الإشارة إلى أن هذا الافتراض ينطبق على الكون على المقاييس الكبيرة جداً **(مئات الملايين من السنوات الضوئية وما فوق).** على المقاييس الأصغر، نرى تجمعات من المجرات والعناقيد الفائقة التي تكسر هذا التجانس. لكن على النطاق الكوني، تشير الأدلة الرصدية إلى أن هذا الافتراض تقريبي جيد للواقع.

بتطبيق معادلات المجال لأينشتاين على كون متجانس، توصل علماء الكونيات إلى مجموعة من الحلول التي تصف ديناميكية الكون. أشهر هذه الحلول هي مقاييس فريدمان - لوميتر - روبرتسون - ووكر.
تصف هذه المقاييس زمكاناً متوسعاً أو منكمشاً بشكل موحد. تحدد هذه المقاييس هندسة الكون بثلاثة احتمالات رئيسية:

* كون مسطح: يكون فيه الزمكان مسطحاً على نطاق واسع، ويتبع الهندسة الإقليدية التي نعرفها. في هذا الكون، تتوازى الخطوط المستقيمة إلى الأبد ولا تتقارب أو تتباعد.

* كون كروي أو مغلق: يكون فيه الزمكان منحنياً بشكل إيجابي، مثل سطح كرة. في هذا الكون، ستتقارب الخطوط المتوازية في النهاية وتلتقي، والكون له حجم محدود ولكنه بلا حدود.

* كون زائدى أو مفتوح: يكون فيه الزمكان منحنياً بشكل سلبي، مثل سطح سرج الحصان. في هذا الكون، ستتباعد الخطوط المتوازية إلى الأبد، والكون لا نهائي الحجم.
تعتمد هندسة الكون الفعلية على الكثافة الكلية للمادة والطاقة فيه.

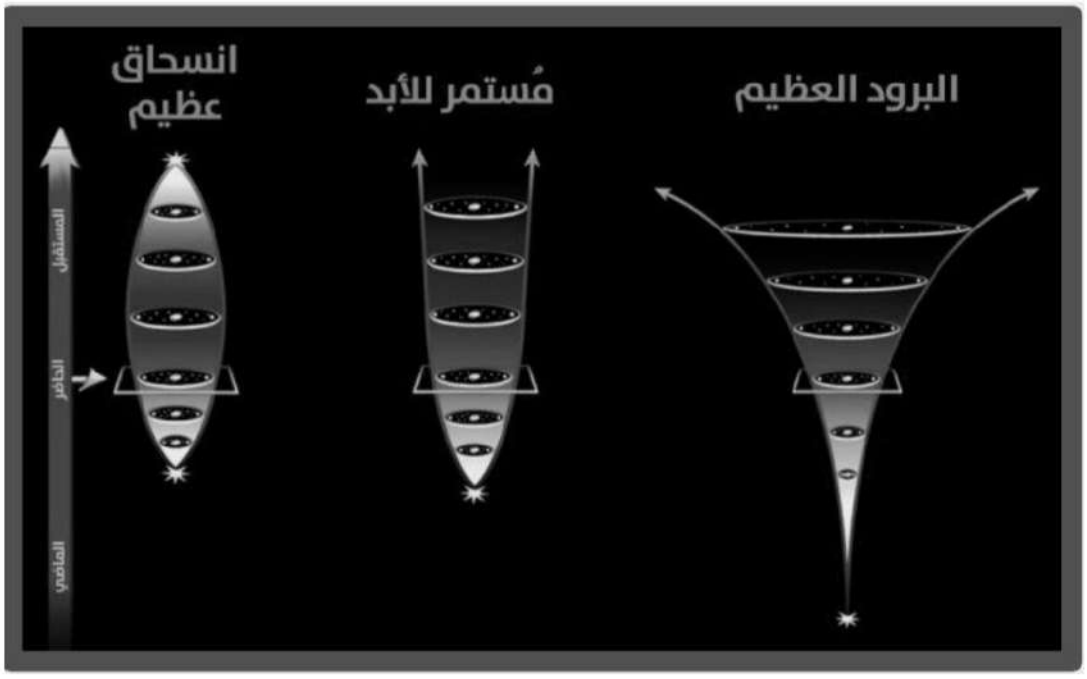
من خلال إدخال مقاييس في معادلات المجال لأينشتاين، توصل العالم الروسي ألكسندر فريدمان، بشكل مستقل، ولاحقاً جورج لوميتر، إلى مجموعة من المعادلات التي تصف كيف يتغير حجم الكون بمرور الوقت. تُعرف هذه المعادلات باسم معادلات فريدمان. تربط هذه المعادلات بين معدل توسع الكون **(**المعبر عنه بثابت هابل**)**، وكثافة المادة والطاقة في الكون **(**بما في ذلك المادة العادية، المادة المظلمة، والطاقة المظلمة**)**، وانحناء الزمكان. تحدد هذه المعادلات مصير الكون: هل سيستمر في التوسع إلى الأبد، أم سيتوقف وينتفاجع في النهاية في **"**انسحاق عظيم**"**؟

(توجد صورة توضيحية لثلاثة سيناريوهات لمصير الكون**):**

* انسحاق عظيم: **(**صورة لقمع معكوس يضيق نحو الأسفل، مع دوائر ملونة تتضاءل**)**

* فسيستمر للأبد: **(**صورة لاسطوانة مفتوحة من الأعلى، مع دوائر ملونة تتسع باستمرار**)**

* البرود العظيم: **(**صورة لقمع يتسع تدريجياً نحو الأسفل، مع دوائر ملونة تتسع وتتباعد**).**



تعتمد ديناميكية الكون بشكل حاسم على مكوناته الرئيسية:

* المادة الباريونية: هي المادة العادية التي نعرفها ونراها، مثل النجوم والكواكب والغاز والغبار. تشكل نسبة صغيرة فقط من إجمالي كثافة الكون.

* المادة المظلمة: هي مادة غير مرئية لا تتفاعل مع الضوء، ولكنها تمتلك جاذبية وتؤثر على حركة المجرات وتكوين العناقيد المجرية. تشكل جزءاً كبيراً من كثافة المادة في الكون.

* الطاقة المظلمة: هي شكل غامض من الطاقة يُعتقد أنه مسؤول عن التسارع الملحوظ في توسع الكون. تشكل الجزء الأكبر من إجمالي كثافة الطاقة في الكون.

* الإشعاع: يشمل الفوتونات **(**جسيمات الضوء**)** والنيوترينوات. كان للإشعاع دوراً مهماً في المراحل المبكرة جداً من الكون.

تساهم الكثافة النسبية لهذه المكونات في تحديد هندسة الكون ومعدل توسعه.

تتشكل هذه الأسس

— مبادئ النسبية العامة، والافتراض الكوني، وحلول ومعادلات فريدمان، وفهم المكونات الكونية — الإطار النظري لعلم الكونيات النسبي. لقد سمحت هذه الأسس للعلماء ببناء نموذج موحد يصف تطور الكون من لحظاته الأولى الساخنة والكثيفة **(الانفجار العظيم)** إلى حالته الحالية الموسعة والمتسارعة. على الرغم من أن هناك العديد من الأسئلة المفتوحة والتحديات المستمرة في هذا المجال المنير، إلا أن علم الكونيات النسبي يظل أحد أعظم الإنجازات الفكرية البشرية في سعيها لفهم مكانها في هذا الكون الواسع. في الفصول القادمة، سنتناول كيف تم استخدام هذه الأسس لتفسير المشاهدات الكونية وتقديم تنبؤات حول مصير الكون.

ستتعمق في صميم علم الكونيات النسبي، وسنستكشف المفهوم المذهل لتوسع الكون. لم يكن هذا الاكتشاف بديهياً، بل انبثق تدريجياً من التزاوج بين النظرية الرائدة لألبرت أينشتاين والملاحظات الفلكية الدقيقة، ليغير نظرتنا إلى الكون من ساحة ثابتة أبدية إلى كيان ديناميكي يتمدد باستمرار.

[الميلاد النظري للتوسع - حلول فريدمان]

كما ذكرنا في الفصل السابق، تشكلت معادلات المجال لأينشتاين، عند تطبيقها على كون متجانس، الأساس الرياضي لوصف ديناميكية الكون. في عام ١٩٢٢، قام الفيزيائي وعالم الرياضيات الروسي ألكسندر فريدمان باشتقاق مجموعة من الحلول لهذه المعادلات، عُرفت لاحقاً باسم معادلات فريدمان. المفتاح في هذه الحلول كان أنها لم تتطلب كوناً ثابتاً، بل على العكس، سمحت بوجود حلول تصف كوناً يتوسع أو ينكمش بمرور الوقت. في البداية، كان أينشتاين نفسه متردداً في قبول هذه الحلول، لأنه كان يؤمن بنموذج الكون الثابت السائد في ذلك الوقت. حتى أنه أدخل **"الثابت الكوني"** في معادلاته في محاولة لإجبارها على وصف كون غير متمدد أو منكمش.

لكن عمل فريدمان أظهر أن التوسع أو الانكماش هو نتيجة طبيعية لمعادلات أينشتاين في ظل وجود المادة والطاقة. تخيل بالونات صغيرة منتشرة على سطح بالون كبير. عندما تنفخ البالون الأكبر، فإن المسافة بين البالونات الصغيرة تزداد. وبالمثل، في نموذج فريدمان، فإن المجرات ليست تتحرك عبر الفضاء، بل الفضاء نفسه هو الذي يتمدد، حاملاً معه المجرات بعيداً عن بعضها البعض.

[الدليل الرصدي المذهل - قانون هابل]

بينما كانت النظرية تضع أسسها، كانت الملاحظات الفلكية تقدم أدلة دامغة على أن الكون ليس ثابتاً. في أواخر عشرينيات القرن الماضي، قام الفلكي الأمريكي إدوين هابل بعمل قياسات دقيقة لمسافات العديد من المجرات وسرعاتها. استخدم هابل انزياح دوبلر للضوء القادم من هذه المجرات لتحديد سرعتها بالنسبة للأرض.
انزياح دوبلر: تخيل صوت سيارة إسعاف تقترب منك: يصبح صوتها أكثر حدة **(ينزاح نحو الترددات الأعلى).** وعندما تبتعد، يصبح صوتها أكثر غلظة **(ينزاح نحو الترددات الأقل).** يحدث الشيء نفسه للضوء. إذا كان مصدر الضوء يبتعد عنا، فإن طول موجته يزداد وينزاح نحو الطرف الأحمر من الطيف **(انزياح أحمر).** وإذا كان يقترب، ينزاح نحو الطرف الأزرق

(انزياح أزرق).
وجد هابل أن معظم المجرات تظهر انزياحاً أحمر، مما يشير إلى أنها تبتعد عنا. ولكن الأكثر إثارة للدهشة أنه اكتشف وجود علاقة خطية بين سرعة ابتعاد المجرة ومسافتها: كلما كانت المجرة أبعد، كانت تبتعد عنا بسرعة أكبر. عُرفت هذه العلاقة باسم قانون هابل.

قانون هابل: **v=H_0d**

حيث:

- **v** هي سرعة ابتعاد المجرة.
- **d** هي المسافة إلى المجرة.
- **H_0** هو ثابت التناسب، ويُعرف باسم ثابت هابل.

كان اكتشاف هابل دليلاً رصديًا قويًا على أن الكون يتوسع بشكل موحد. لقد قدم تأييدًا مدهشًا للحلول التي توصل إليها فريدمان من معادلات أينشتاين.

[تفسير التوسع - ليس حركة في الفضاء، بل تمدد الفضاء نفسه]

من المهم أن نفهم أن توسع الكون ليس ببساطة حركة المجرات عبر فضاء ثابت، بل هو تمدد للفضاء نفسه الذي يحمل المجرات معه. تخيل قطعة من العجين عليها حبات من الزبيب. عندما تخبز العجين ويتمدد، فإن المسافة بين حبات الزبيب تزداد، على الرغم من أن حبات الزبيب نفسها لا تتحرك داخل العجين. وبالمثل، فإن المجرات ليست تتحرك مبتعدة عن مركز مشترك **(**لأنه لا يوجد مركز للكون المتجانس**)**، بل إن الفضاء بينها يتمدد، مما يجعلها تبتعد عن بعضها البعض. وكلما كانت المسافة بين مجرتين أكبر، زاد مقدار الفضاء الذي يتمدد بينهما، وبالتالي زادت سرعة ابتعادهما النسبية.

[ثابت هابل - معدل التوسع الحالي]

يمثل ثابت هابل **(H_0)** المعدل الحالي لتوسع الكون. وحدته هي كيلومتر لكل ثانية

لكل ميجا فرسخ فلكي **(km/s/Mpc).** الميجا فرسخ فلكي **(Mpc)** هو وحدة قياس للمسافات الكونية الكبيرة. **{ 1 Mpc} ** ٣.٢ مليون سنة ضوئية**{}).**

تحديد قيمة ثابت هابل بدقة كان وما يزال تحديًا كبيرًا في علم الكونيات. قدمت القياسات المبكرة لثابت هابل قيمة أعلى بكثير مما تُقدر اليوم. على مر السنين، استخدم العلماء تقنيات مختلفة لقياس المسافات إلى المجرات البعيدة وسرعاتها بدقة أكبر، مما أدى إلى تحسين تقديرات ثابت هابل.

المثير للاهتمام أن هناك حاليًا **"توتر هابل"**، حيث تعطي القياسات المحلية لثابت هابل **(**باستخدام النجوم المتغيرة القيفاوية والمستعرات العظمى**)** قيمة أعلى بشكل ملحوظ من القياسات المستمدة من الخلفية الكونية الميكروية، وهي إشعاع متبقي من المراحل المبكرة للكون. هذا التوتر يشير إلى احتمال وجود جوانب غير مكتشفة في فهمنا لتوسع الكون.

[تبعات التوسع - الماضي والمستقبل الكوني**]**

إن فكرة توسع الكون لها تبعات عميقة على فهمنا لماضي الكون ومستقبله:

- الماضي: إذا كان الكون يتوسع حاليًا، فهذا يعني أنه كان أصغر وأكثر كثافة في الماضي. بالرجوع بالزمن إلى الوراء، نصل لـ **"نقطة أولية فائقة الكثافة والحرارة"**، وهي الحالة التي انشئف منها الكون، وهو ما يُعرف بـ**"نظرية الانفجار العظيم".**
- المستقبل: يعتمد مصير الكون

على معدل توسعه الحالي وكثافة المادة والطاقة فيه.

إذا كانت الكثافة كافية، فإن جاذبية الكون ستتغلب على التوسع في النهاية، وسينهاك التوسع ويتوقف ثم ينعكس، مما يؤدي إلى **"الانسحاق العظيم".** أما إذا كانت الكثافة منخفضة جدًا، فسيستمر الكون في التوسع إلى الأبد، وسيزداد تمديدًا ويصبح أكثر خفوتًا في سيناريو يُعرف باسم **"الموت الحراري".** تشير الأدلة الحالية إلى أن الكون يتوسع بوتيرة متسارعة بسبب تأثير الطاقة المظلمة، مما يجعل سيناريو الموت الحراري هو الأكثر احتمالية.

إن اكتشاف توسع الكون، الذي بدأ بالحلول النظرية لمعادلات أينشتاين وتأكد بالرصدات الفلكية المذهلة لهابل، يمثل أحد أعظم التحولات في تاريخ علم الكونيات. لقد غير فهمنا للكون من كيان ثابت إلى كيان ديناميكي يتطور باستمرار. إن دراسة توسع الكون لا تزال في طليعة البحث الكوني، حيث يسعى العلماء لفهم طبيعة الطاقة المظلمة وحل لغز توتر هابل، ليكتشفوا المزيد عن ماضي الكون وحاضره ومستقبله البعيد.

[تخليق المواد البدائية]

الآن نغوص في واحدة من أعظم النجاحات التي حققها علم الكونيات النسبي: "تفسير نشأة العناصر الخفيفة في الكون المبكر"، وهي العملية المعروفة بـ"اسم تخليق النوى البدائي" أو "تخليق نووي الانفجار العظيم". لم تكن العناصر التي نراها اليوم دائمًا موجودة؛ بل تشكلت تدريجيًا عبر تاريخ الكون. هذا الجزئية تسلط الضوء على "الدقائق الأولى الحاسمة بعد الانفجار العظيم"، حيث وضعت اللبنات الأساسية للمادة التي نعرفها.

[اللحظات الأولى - حساء الجسيمات الساخن والكثيف]

في اللحظات الأولى بعد الانفجار العظيم، كان الكون حارًا وكثيفًا للغاية، عبارة عن بلازما من الجسيمات الأولية والإشعاع. مع توسع الكون وتبريده بسرعة، بدأت الظروف الفيزيائية تتغير بشكل كبير. خلال الثواني الأولى، كانت الطاقة عالية جدًا بحيث لا يمكن للبروتونات والنيوترونات أن تتلصق ببعضها البعض لتكوين نوى ذرية.

[توازن النيوترونات والبروتونات - مفتاح التخليق]

في المراحل المبكرة جدًا، كانت التفاعلات الضعيفة تحافظ على توازن بين عدد النيوترونات والبروتونات. ومع ذلك، مع استمرار الكون في التوسع والتبريد بدأت هذه التفاعلات تصبح أبطأ من معدل التوسع. حوالي ثانية واحدة بعد الانفجار العظيم، توقف "تجميد" نسبة النيوترونات إلى البروتونات عند قيمة تقريبية ٧ إلى ١. هذه النسبة الأولية كانت حاسمة لتحديد وفرة العناصر الخفيفة التي تتشكل لاحقًا.

[نافذة التخليق النووي - الدقائق الذهبية]

بدأ تخليق النوى البدائي بعد حوالي ١٠ إلى ٢٠ ثانية من الانفجار العظيم، عندما انخفضت درجة الحرارة إلى حوالي مليار درجة كلفن، وهي درجة حرارة كافية لكي تلتصق البروتونات والنيوترونات معًا دون أن تتفكك على الفور بسبب الفوتونات عالية الطاقة. استمرت هذه **"النافذة الذهبية للتخليق النووي"** لبضع دقائق فقط، حوالي ٢٠ دقيقة.

التفاعلات النووية الأولية:

خلال هذه الفترة القصيرة، حدثت سلسلة من التفاعلات النووية التي أدت إلى تكوين النوى الخفيفة:

* تكوين الديوتيريوم **(نظير الهيدروجين الثقيل):** باندماج بروتون ونيوترون لتكوين نواة الديوتيريوم **(^2{H}** أو **{D}).** هذا التفاعل كان حاسمًا لأنه يمثل الخطوة الأولى في بناء نوى أثقل.
* تكوين الهيليوم-٤**:** معظم الديوتيريوم المتكون اندمج بسرعة مع بروتونات ونيوترونات أخرى لتكوين نواة الهيليوم-٤ **(^4{He})** وهي النواة الأكثر استقرارًا بين العناصر الخفيفة. كان **^4{He}** هو المسار الرئيسي لتكوين الهيليوم-٤ عبر تفاعلات

ولكون هذا الكتاب موجه للعامة سنتفادى المعادلات الرياضية والتفاعلات لكي يصبح

سهلاً وواضح الفهم

[عنق الزجاجة - لماذا لم تتشكل عناصر أثقل؟]

على الرغم من توفر البروتونات والنيوترونات، لم يتم تخليق عناصر أثقل بكثير من الهيليوم بكميات كبيرة خلال تخليق النوى البدائي. هناك سببان رئيسيان لذلك:

* غياب نوى مستقرة ذات عدد كتلي ٨ أو ٨ **:** الخطوة التالية في بناء نوى أثقل تتطلب دمج الهيليوم-٤ مع البروتونات أو النيوترونات لتكوين نواة ذات ٥ نوكليونات، أو دمج نواتين من الهيليوم-٤ لتكوين نواة ذات ٨ نوكليونات. ومع ذلك، لا توجد نوى مستقرة بهذه الأعداد الكتلية. هذا **"الحائط"** أوقف عملية التخليق النووي بشكل فعال.

* التوسع والتبريد السريع للكون: مع استمرار الكون في التوسع، انخفضت درجة الحرارة والكثافة بسرعة كبيرة. بعد حوالي ٢٠ دقيقة، أصبحت درجة الحرارة منخفضة جدًا بحيث لا يمكن التغلب على قوة التنافر الكولومبية بين النوى الذرية، وتوقفت التفاعلات النووية.

أحد أعظم انتصارات نظرية الانفجار العظيم وعلم الكونيات النسبي هو التوافق المذهل بين الوفرة النسبية للعناصر الخفيفة المتنبأ بها من خلال تخليق النوى البدائي والوفرة المقاسة في الكون المبكر **(**قبل تشكل النجوم والمجرات التي يمكن أن تغير هذه الوفرة عبر التخليق النووي النجمي**).**

تتنبأ نظرية تخليق النوى البدائي بالوفرة الكتلية التقريبية للعناصر الخفيفة التالية:

* الهيدروجين **(^{H}1):** حوالي ٧٥**%** من الكتلة الكلية.
* الهيليوم-٤ **(^{He}4):** حوالي ٢٥**%** من الكتلة الكلية.
* الديوتيريوم **({D}** أو **^{H}2):** جزء صغير جدًا، حوالي ٠.٠١**%.**
* الليثيوم-٧ **(^{Li}7):** كمية ضئيلة للغاية.
* الهيليوم-٣ **(^{He}3):** كمية ضئيلة للغاية.

وقد تم تأكيد هذه التنبؤات بشكل كبير من خلال مراقبة التركيب الكيميائي للمادة البدائية في مناطق الكون التي لم تتأثر كثيرًا بالتطور النجمي، مثل السحب الغازية البدائية والكوازارات البعيدة.

التحديات المتبقية:

على الرغم من النجاح الكبير لنموذج تخليق النوى البدائي، لا تزال هناك بعض التناقضات الطفيفة

مثل **"**مشكلة ليثيوم-٧ الكونية**"**، حيث تبدو الوفرة المتوقعة لليثيوم-٧ أعلى قليلاً من الوفرة المرصودة. لا يزال العلماء يبحثون عن حلول محتملة لهذه المشكلة، والتي قد تشير إلى فيزياء جديدة أو فهم غير كامل للعمليات الفيزيائية المبكرة.

إن تخليق النوى البدائي يمثل نافذة فريدة على الكون في الدقائق الأولى من وجوده. إنه يوضح كيف أن الظروف الفيزيائية في تلك الحقبة المبكرة سمحت بتكوين اللبنات الأساسية للمادة التي تتشكل النجوم والمجرات وكل ما نراه اليوم. التوافق المذهل بين التنبؤات النظرية والوفرة المرصودة للعناصر الخفيفة هو شهادة قوية على صحة نموذج الانفجار العظيم وعلم الكونيات النسبي، ويؤكد فهمنا الأساسي لتطور الكون المبكر.

"تكوين البنى الكبيرة"

نروي قصة كيف انبثقت العظمة الهائلة للكون، المجرات المتجمعة في عناقيد هائلة والجدران الكونية الشاسعة، من بدايات متواضعة في الكون المبكر. لم يكن الكون دائمًا بهذه الفسيفساء المعقدة من "البنى الكبيرة"؛ بل تطور تدريجيًا تحت تأثير قوة واحدة مهيمنة: "الجاذبية".

[البدايات المتجانسة - تموجات طفيفة في بحر المادة]

في أعقاب الانفجار العظيم، كان الكون المبكر يمزج بتوزع شبه منتظم للمادة والطاقة. تخيل حساءً ساخنًا وكثيفًا من الجسيمات، متجانسًا تقريبًا في جميع الاتجاهات. ومع ذلك، لم يكن هذا التجانس مثاليًا تمامًا. كانت هناك "تقلبات طفيفة في الكثافة"، اختلافات صغيرة جدًا في كمية المادة من مكان إلى آخر. هذه "التقلبات الأولية"، التي يعتقد أنها نشأت من "تقلبات كمومية في اللحظات الأولى جدًا للكون" و"تضخمت خلال فترة التضخم الكوني"، كانت بمثابة البذور التي ستنمو لتصبح "البنى الكونية التي نراها اليوم".

[دور الجاذبية - المهندس المعماري الكوني]

على الرغم من صغر حجمها في البداية، لعبت هذه التقلبات الطفيفة في الكثافة دورًا حاسمًا بسبب قوة الجاذبية. حينما كانت الكثافة أعلى قليلًا من المتوسط، جذبت الجاذبية المزيد من المادة إلى تلك المنطقة. تخيل تلة صغيرة في منظر طبيعي مسطح؛ بمرور الوقت، ستجذب التلة المزيد من التربة والحجارة من المناطق المحيطة بها، وتنمو أكبر وأكبر. وبالمثل، بدأت المناطق الأكثر كثافة في الكون المبكر في جذب المزيد من المادة المحيطة بها.

[النمو التدريجي - من تجمعات صغيرة إلى هياكل عملاقة]

على مدى مليارات السنين، عملت الجاذبية بلا كلل على تضخيم هذه اللا انتظامات الطفيفة في الكثافة. بدأت التجمعات الصغيرة من المادة المظلمة **(**مادة غير مرئية تشكل الجزء الأكبر من مادة الكون ولها تأثير جاذبي**)** في التكتل معًا لتكوين ما يُعرف بـ **"**هالات المادة المظلمة**"**. هذه الهالات العملاقة من المادة المظلمة أصبحت بمثابة الحاضنات الجذبوية التي جذبت إليها الغاز العادي **(**الهيدروجين والهيليوم**)** من الفضاء المحيط.

داخل هذه الهالات، بدأ الغاز يبرد ويتكثف تحت تأثير جاذبيته الخاصة، مما أدى في النهاية إلى ولادة

النجوم الأولى وتشكيل المجرات البدائية. هذه المجرات الصغيرة بدأت تتفاعل مع بعضها البعض، وتتجاذب وتندمج لتكوين مجرات أكبر وأكثر ضخامة.

[الشبكة الكونية - خيوط وعناقيد وفراغات]

مع استمرار تطور الكون، لم تتجمع المجرات بشكل عشوائي، بل تجمعت على طول خيوط طويلة وكثيفة من المادة، تنتبه إلى حد كبير شبكة كونية عملاقة. تخيل خيوط عنكبوت تربط بين نقاط أكثر كثافة. هذه "النقاط" الأكثر كثافة هي حيث تتشكل عناقيد المجرات، وهي تجمعات ضخمة تحتوي على مئات أو حتى آلاف المجرات المرتبطة ببعضها البعض بالجاذبية.

بين هذه الخيوط والعناقيد، توجد مناطق شاسعة من الفضاء شبه خالية من المجرات، تُعرف باسم "الفراغات الكونية". هذه الفراغات نشأت لأن المادة قد انجذبت بفعل الجاذبية نحو الخيوط والعناقيد، تاركة وراءها مناطق ذات كثافة منخفضة.

[المادة المظلمة - اللاعب الخفي وراء التكوين]

من المهم التأكيد على الدور الحاسم الذي لعبته المادة المظلمة في تكوين البنى الكبيرة. نظراً لأنها لا تتفاعل مع الضوء، فقد بدأت المادة المظلمة في تشكيل الكون تحت تأثير الجاذبية في وقت مبكر جداً من تاريخ الكون، قبل أن يصبح الغاز العادي بارداً بما يكفي للتشكل. وفرت هالات المادة المظلمة الهياكل الجذبوية الأولية التي جذبت إليها الغاز العادي، مما سرّع عملية تكوين المجرات والعناقيد.

المجرات، وهي تجمعات ضخمة تحتوي على مئات أو حتى آلاف المجرات المرتبطة ببعضها البعض بالجاذبية.

بين هذه الخيوط والعناقيد، توجد مناطق شاسعة من الفضاء شبه خالية من المجرات، تُعرف باسم "الفراغات الكونية". هذه الفراغات نشأت لأن المادة قد انجذبت بفعل الجاذبية نحو الخيوط والعناقيد، تاركة وراءها مناطق ذات كثافة منخفضة.

المادة المظلمة - اللاعب الخفي وراء التكوين

من المهم التأكيد على الدور الحاسم الذي لعبته المادة المظلمة في تكوين البنى الكبيرة. نظراً لأنها لا تتفاعل مع الضوء، فقد بدأت المادة المظلمة في تشكيل الكون تحت تأثير الجاذبية في وقت مبكر جداً من تاريخ الكون، قبل أن يصبح الغاز العادي بارداً بما يكفي للتشكل. وفرت هالات المادة المظلمة الهياكل الجذبوية الأولية التي جذبت إليها الغاز العادي، مما سرّع عملية تكوين المجرات والعناقيد.

إنَّ تَكوين البنى الكبيرة في الكون هو قصة رائعة عن عمل الجاذبية على مدى مليارات السنين، بدءاً من تقلبات طفيفة في الكون المبكر وصولاً إلى الشبكة الكونية المعقدة التي نراها اليوم. إن فهم هذه العملية هو أحد النجاحات الكبرى لعلم الكونيات النسبي، حيث يربط بين الظروف الأولية للكون والتوزيع الحالي للمجرات والعناقيد. على الرغم من أن التفاصيل الدقيقة لا تزال قيد البحث والاستكشاف، إلا أن الصورة العامة لتكوين البنى الكبيرة تحت تأثير الجاذبية في كون موسع مدعومة بقوة بالملاحظات الفلكية.

[المادة والطاقة المظلمة]

نستكشف اثنين من أكثر المكونات غموضاً وإثارة للدهشة في الكون، واللذين يلعبان دوراً حاسماً في تشكيل مصيره وتطوره: الطاقة المظلمة والمادة المظلمة.على الرغم من أننا لا نستطيع **"رؤيتهما"** بشكل مباشر، إلا أن تأثيرهما الجذبي والكوني واضح، مما يجعلهما في قلب الأبحاث الحديثة في علم الكونيات النسبي.

[المادة المظلمة - اللاعب الخفي في البنية الكونية]

تخيل مجرة حلزونية تدور بذراعيها الأنيقة. عندما قاس علماء الفلك سرعة دوران النجوم في الأجزاء الخارجية من هذه المجرة، وجدوا شيئاً غير متوقع: كانت النجوم تدور بسرعة أكبر بكثير مما ينبغي لها بناءً على كمية المادة المرئية **(**النجوم، الغاز، الغبار**)** التي يمكنهم رؤيتها. وفقاً لقوانين الجاذبية المعروفة، كان من المفترض أن تدور هذه النجوم الخارجية ببطء أكبر، تماماً كما تدور الكواكب الخارجية في نظامنا الشمسي ببطء أكبر من الكواكب الداخلية.
هذا التناقض قاد إلى افتراض وجود مادة غير مرئية، لا تتفاعل مع الضوء أو أي شكل آخر من أشكال الإشعاع الكهرومغناطيسي، ولكنها تمتلك جاذبية وتؤثر على حركة الأجسام المرئية. أطلق على هذه المادة الغامضة اسم

المادة المظلمة.

تأثيراتها الجذبوية:

على الرغم من عدم رؤيتنا للمادة المظلمة، فإن تأثيرها الجذبي واضح في العديد من الظواهر الكونية:

على الرغم من عدم رؤيتنا للمادة المظلمة، فإن تأثيرها الجذبي واضح في العديد من الظواهر الكونية:

* منحنيات دوران المجرات: كما ذكرنا، تفسر المادة المظلمة السرعات العالية للنجوم في الأجزاء الخارجية من المجرات، مما يشير إلى وجود هالة ضخمة من المادة المظلمة تحيط بالمجرة بأكملها وتوفر جاذبية إضافية.

* حركة المجرات في العناقيد: تتحرك المجرات داخل العناقيد المجرية بسرعات عالية جداً بحيث لا يمكن للجاذبية الناتجة عن المادة المرئية وحدها أن تربط العنقود معاً. وجود كمية كبيرة من المادة المظلمة يوفر الجاذبية الإضافية اللازمة للحفاظ على تماسك العنقود.

* العدسات الجذبوية: عندما يمر ضوء قادم من مجرة بعيدة بالقرب من تجمع ضخم من المادة **(**بما في ذلك المادة المظلمة**)**، ينحني مسار الضوء بسبب جاذبية هذا التجمع، مما يشوه صورة المجرة الخلفية أو يخلق صوراً متعددة لها. يمكن للعلماء استخدام هذه الظاهرة لرسم خرائط لتوزيع المادة المظلمة في الكون.

* تكوين البنى الكبيرة: تلعب المادة المظلمة دوراً حاسماً في تكوين المجرات والعناقيد المجرية والجدران الكونية. نظراً لأنها لا تتفاعل مع الضوء، فقد بدأت المادة المظلمة في وقت مبكر جداً من تاريخ الكون، قبل أن يصبح الغاز العادي بارداً بما يكفي للتشكل. وفرت هالات المادة المظلمة الهياكل الجذبوية الأولية التي جذبت إليها الغاز العادي، مما سرّع عملية تكوين البنى الكونية.

ما هي المادة المظلمة؟

على الرغم من أننا نعرف الكثير عن تأثيرات المادة المظلمة، إلا أن طبيعتها الأساسية لا تزال لغزاً. هناك العديد من المرشحين المحتملين، بما في ذلك جسيمات أولية جديدة لم يتم اكتشافها بعد، مثل الجسيمات الضخمة ذات التفاعل الضعيف **(**الويمبز**)** والآكسيونات. يبحث العلماء بنشاط عن هذه الجسيمات باستخدام تجارب مباشرة تحت الأرض وفي مصادمات الجسيمات، بالإضافة إلى دراسة توزيع المادة المظلمة في الكون.

[الطاقة المظلمة - القوة الغامضة التي تمزق الكون]

بينما تعمل المادة المظلمة على تجميع المادة معاً تحت تأثير الجاذبية، هناك قوة أخرى ذات طبيعة مختلفة تماماً تعمل على نطاق كوني أكبر: الطاقة المظلمة.

كما ذكرنا سابقاً، اكتشفت مراقبات المستعرات العظمى البعيدة في أواخر التسعينيات أن توسع الكون لا يتباطأ بسبب الجاذبية، بل يتسارع. هذا الاكتشاف المذهل يشير إلى وجود شكل من أشكال الطاقة يمتلك "ضغطاً سلبياً" أو قوة تنافرية تدفع الكون إلى التوسع بوتيرة متزايدة. أُطلق على هذا المكون الغامض اسم الطاقة المظلمة.

تأثيرها الكوني:

على عكس المادة المظلمة التي تتكتل حول المجرات والعناقيد، تبدو الطاقة المظلمة موزعة بشكل موحد في جميع أنحاء الفضاء. تأثيرها يصبح أكثر أهمية على المقاييس الكونية الكبيرة، حيث تتغلب على جاذبية المادة وتدفع المجرات بعيداً عن بعضها البعض بشكل متسارع.

ما هي الطاقة المظلمة؟

طبيعة الطاقة المظلمة هي واحدة من أعظم الألغاز في الفيزياء وعلم الكونيات اليوم.

هناك بعض التفسيرات النظرية المحتملة:

* الثابت الكوني: اقترحه أينشتاين في الأصل كمصطلح في معادلاته لجعل الكون ثابتاً. بعد اكتشاف توسع الكون، تراجع أينشتاين عن هذا الاقتراح، لكنه عاد ليُظهر كمرشح محتمل للطاقة المظلمة. يمكن تفسيره على أنه كثافة طاقة كامنة للفضاء نفسه.

جوهر: تقترح بعض النظريات أن الطاقة المظلمة ليست ثابتة، بل هي مجال ديناميكي يتغير بمرور الوقت. يُطلق على هذا المجال الافتراضي اسم **"جوهر".**

* تعديل الجاذبية: هناك أفكار أخرى تقترح أن التسارع ليس ناتجاً عن شكل جديد من الطاقة، بل عن تعديل في قوانين الجاذبية على المقاييس الكونية الكبيرة.

[الثنائي الكوني - صراع بين التجميع والتفريق**]**

تلعب المادة المظلمة والطاقة المظلمة أدواراً متعارضة في تطور الكون. تجذب المادة المظلمة المادة وتساعد في تكوين البنى الكبيرة مثل المجرات والعناقيد. في المقابل، تدفع الطاقة المظلمة هذه البنى بعيداً عن بعضها البعض على نطاق واسع، وتتسبب في تسارع توسع الكون.

يبدو أن الكون الذي نعيش فيه حالياً يحكمه هذا التوازن الدقيق بين هاتين القوتين الغامضتين. تتشكل المادة المظلمة حوالي ٧٢**%** من محتوى الطاقة الكلي للكون، بينما تتشكل الطاقة المظلمة حوالي ٧٨**%.** أما المادة العادية التي نراها فتشكل حوالي ٥**%** فقط. هذا يعني أن معظم محتوى الكون يتكون من مكونات مظلمة وغير مرئية.

تظل الطاقة المظلمة والمادة المظلمة في طليعة الأبحاث في علم الكونيات. فهم طبيعتهما الأساسية وتفاعلاتهما سيفتح آفاقاً جديدة في فهمنا للكون وتطوره ومصيره النهائي. على الرغم من الغموض الذي يحيط بهما، فإن تأثيراتهما الكونية الواسعة لا يمكن إنكارها، مما يجعلهما من أكثر الألغاز إثارة في سعينا لفهم الكون الشاسع الذي نعيش فيه.

[التضخم الكوني]

على الرغم من نجاح النموذج القياسي للانفجار العظيم في تفسير العديد من الخصائص الأساسية للكون، إلا أن بعض الملاحظات الكونية، مثل التجانس الكبير للخلفية الكونية الميكروية والهندسة شبه المسطحة للكون، تستدعي آليات فيزيائية إضافية في الحقبة المبكرة. يقترح التضخم الكوني إطاراً نظرياً يتضمن مرحلة من التوسع الأسي السريع للفضاء لحل هذه التناقضات. في هذا الفصل، نقدم نظرة عامة على النماذج النظرية البارزة ضمن هذا الإطار.

[الحاجة إلى التضخم - حل ألغاز الكون المبكر]

لم تكن نظرية الانفجار العظيم القياسية تخلو من بعض الألغاز المحيرة التي استدعت وجود مرحلة سابقة من التوسع الدراماتيكي. من أبرز هذه الألغاز:

* مشكلة الأفق: يبدو الكون متجانساً في جميع الاتجاهات على أوسع المقاييس. على سبيل المثال، الخلفية الكونية الميكروية، وهي إشعاع متبقي من الكون المبكر، لها درجة حرارة موحدة بشكل مذهل في جميع أنحاء السماء. لكن في الكون المبكر كما وصفته نظرية الانفجار العظيم القياسية، لم تكن المناطق المتباعدة في السماء قد اتصلت ببعضها البعض بعد حتى بتبادل الضوء المعلومات

ويصل إلى حالة التوازن الحراري. كيف يمكن لمناطق لم تتفاعل أبداً أن تكون لها نفس الخصائص الفيزيائية؟

مشكلة التسطح: تشير الملاحظات إلى أن هندسة الكون اليوم قريبة جداً من أن تكون مسطحة. لكن نظرية الانفجار العظيم القياسية تتنبأ بأن أي انحناء أولي في الكون كان سينمو بسرعة مع مرور الوقت. لكي يكون الكون مسطحاً كما نراه اليوم، كان يجب أن يكون مسطحاً بشكل لا يصدق في بدايته، وهو ما يتطلب ضبطاً دقيقاً للغاية للظروف الأولية.

* مشكلة الآثار المغناطيسية الأحادية: تتنبأ بعض النظريات الموحدة للقوى الأساسية بوجود جسيمات مغناطيسية منفردة ثقيلة **(لها قطب شمالي أو جنوبي فقط، على عكس المغناطيسات العادية التي لها قطبين).** كان من المتوقع أن يتم إنتاج هذه الآثار المغناطيسية الأحادية بكثرة في الكون المبكر الحار، لكننا لم نرصد أياً منها حتى الآن.

[الفكرة الأساسية للتضخم - توسع أسي للفضاء]

اقترحت نظرية التضخم الكوني أن الكون مر بمرحلة من التوسع الأسي السريع جداً في جزء ضئيل من الثانية بعد الانفجار العظيم **(حوالي 10^{-36} إلى 10^{-32} ثانية).** خلال هذه الفترة القصيرة جداً، تضاعف حجم الكون عدة مرات، ربما بمقدار **10^{26}** مرة أو أكثر.

هذا التوسع الهائل يمكن أن يحل الألغاز المذكورة أعلاه:

* حل مشكلة الأفق: التوسع الأسي السريع جعل مناطق كانت منفصلة سببياً في وقت مبكر جداً تتباعد بسرعة كبيرة. المنطقة التي نراها اليوم ككوننا المرئي كانت في الأصل منطقة صغيرة جداً ومتصلة، مما يسمح لها بالوصول إلى حالة التوازن الحراري قبل التضخم. ثم قام التضخم بتمديد هذه المنطقة الصغيرة المتجانسة إلى الحجم الهائل الذي نراه اليوم.

[نماذج التضخم - محاولات لفهم المحرك]

على الرغم من أن الفكرة الأساسية للتضخم قوية في حل ألغاز الكون المبكر، إلا أن الآلية الفيزيائية التي أدت إلى هذا التوسع الأسي لا تزال قيد البحث والتطوير. ظهرت العديد من النماذج النظرية المختلفة لمحاولة شرح **"المحرك"** وراء التضخم:

* التضخم القياسي: يقترح هذا النموذج أن التضخم كان مدفوعاً بمجال كمومي افتراضي يسمى **"المجال القياسي"** أو **"الإنفلاتون".** كان هذا المجال يمتلك طاقة كامنة عالية في الكون المبكر. عندما **"تدحرج"** المجال القياسي ببطء نحو حالة ذات طاقة أقل، تسببت طاقته الكامنة في توسع أسي للفضاء. في نهاية فترة التضخم، تحلل المجال القياسي، وأطلق طاقته على شكل جسيمات، مما أدى إلى بداية الكون الساخن والكثيف الذي وصفته نظرية الانفجار العظيم القياسية. تختلف النماذج القياسية في طبيعة المجال القياسي وإمكانياته **(**تشكل الطاقة الكامنة**).**

* التضخم الفوضوي: يقترح هذا النموذج، الذي طوره أندريه ليندي، أن الكون المبكر ربما كان يحتوي على مناطق متعددة ذات مجالات قياسية ذات مجالات قياسية ذات قيم مختلفة. بعض هذه المناطق كانت يمكن أن تخضع لفترات طويلة من التضخم. يمكن أن يؤدي هذا إلى **"كون متعدد"** حيث تتوسع مناطق مختلفة بشكل مستقل وتتطور بخصائص مختلفة.

* التضخم الهجين: يجمع هذا النموذج بين فكرتين أو أكثر من المجالات القياسية التي تساهم في التضخم. يتضمن عادةً مجالاً قياسياً مسؤولاً بشكل أساسي عن التضخم ومجالاً آخر ينهي التضخم عندما يصل إلى قيمة حرجة.

* نماذج أخرى: هناك نماذج أخرى أقل شيوعاً للتضخم تعتمد على أفكار مختلفة، مثل تعديلات على نظرية الجاذبية لأينشتاين أو أدوار تلعبها جسيمات أخرى في الكون المبكر.

[نهاية التضخم - الولادة الجديدة للكون الساخن]

يجب أن تنتهي فترة التضخم في النهاية لكي يبدأ الكون الساخن والكثيف الذي نعرفه بالتطور. الآلية التي تنهي التضخم تسمى **"إعادة التسخين".** عندما ينحل المجال القياسي الذي قاد التضخم، فإنه يطلق طاقته على شكل فيض من الجسيمات الأولية **(**الكواركات، الليبتونات، البوزونات**).** هذه الجسيمات تتفاعل مع بعضها البعض، مما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الكون ويبدأ عصر الانفجار العظيم القياسي.

[الأدلة الداعمة والتحديات المستمرة**]**

هناك العديد من الأدلة الرصدية التي تدعم فكرة التضخم، بما في ذلك التسطح الملحوظ للكون والتقلبات الطفيفة في الخلفية

تظل نماذج التضخم الكوني في طليعة البحث في علم الكونيات. إنها تقدم إطارًا نظريًا واعدًا لحل بعض الألغاز العميقة حول الكون المبكر وتوفر صلة محتملة بين الفيزياء الكمومية وعلم الكونيات. على الرغم من أن التفاصيل الدقيقة لا تزال قيد الدراسة، إلا أن فكرة التوسع الأسي المفاجئ في المراحل الأولى من الكون قد أحدثت ثورة في فهمنا لأصول الكون وبنيته الحالية.

[الكون الشاسع - الثقوب]

السوداء في عالم النّسبية:

في نسيج الكون الشاسع، حيث تتراقص النّجوم في مجرّات حلزونيّة أو بيضاويّة، توجد مناطق غريبة ومخيفة تعرف بالثقوب السوداء. هذه ليست ثقوبا بالمعنى المادي، بل هي مناطق في الزمكان - النسيج الرباعي الأبعاد الذي يجمع بين المكان والزمان - حيث تكون الجاذبية قوية للغاية لدرجة أن لا شيء، ولا حتى الضوء نفسه، يمكنه الإفلات من قبضتها.

تخيل نسيجًا مطاطيًا متعددًا يمثل الزمكان. عندما نضع كرة ثقيلة في منتصف هذا النسيج، فإنها تخلق انحناءً عميقًا. النجوم والكواكب والأجرام السماوية الأخرى تخلق انحناءات مماثلة، ولكن الثقوب السوداء تمثل انحناءات لا نهائية، حفرًا عميقة في الزمكان لا قاع لها

[ميلاد الوحش]

تولد معظم الثقوب السوداء التي نعرفها من موت النّجوم الضّخمة. عندما ينفد وقود نجم هائل، يتوقف عن توليد الطاقة التي تدعم بنيته ضد جاذبيته الهائلة. تحت هذا الضغط الهائل، ينهار النجم على نفسه بشكل كارثي في عملية تعرف بالانهيار الثّقالي. إذا كانت كتلة النجم المنهار كبيرة بما يكفي، فإنها ستستمر في الانضغاط حتى تصل إلى نقطة متناهية الصغر تعرف باسم التفرد. في هذه النقطة، تصبح الكثافة والجاذبية لانهائيتين، وتتشكل الثقب الأسود.

أفق الحدث: نقطة اللاعودة:

يحيط بالتفرد منطقة تعرف باسم أفق الحدث. هذا ليس سطحًا ماديًا، بل هو حد وهمي. بمجرد أن يعبر أي شيء - سواء كان نجمًا أو كوكبًا أو حتى فوتونًا من الضوء - هذا الأفق، فإنه محكوم عليه بالانجراف نحو التفرد ولا يمكنه أبدًا الإفلات من جاذبية الثقب الأسود. إنه بمنزلة نقطة اللاعودة.

تخيل شلالاً جارفًا. أفق الحدث يشبه حافة الشلال. إذا اقتربت قاربًا بما يكفي وعبرت الحافة، فإن التيار الجارف سيأخذك حتمًا إلى الأسفل، ولا توجد قوة كافية لإعادتك إلى الأعلى.

أنواع الثقوب السوداء:

لا تأتي الثقوب السوداء بحجم واحد. هناك أنواع مختلفة، تختلف في كتلتها وحجمها:

* الثقوب السوداء النجمية: هذه هي الأكثر شيوعًا، وتتكون من انهيار النجوم الضخمة. تتراوح كتلتها عادة بين بضعة أضعاف كتلة شمسنا وعشرات المرات.

* الثقوب السوداء فائقة الضخامة: هذه الوحوش العملاقة تقع في مراكز معظم المجرات، بما في ذلك مجرتنا درب التبانة. يمكن أن تصل كتلتها إلى ملايين أو حتى مليارات المرات كتلة شمسنا. لا يزال العلماء يبحثون عن كيفية تشكلها، لكنهم يعتقدون أنها قد تنمو من خلال ابتلاع النجوم والغاز والغبار، أو ربما من خلال اندماج ثقوب سوداء أصغر.

* الثقوب السوداء متوسطة الكتلة: هذه فئة أقل شيوعًا، تقع كتلتها بين الثقوب السوداء النجمية والفائقة الضخامة. قد تكونت من تجمعات نجمية كثيفة أو أحداث كونية أخرى.

تأثير الثقوب السوداء على الكون:

على الرغم من طبيعتها الخفية، تلعب الثقوب السوداء دورًا مهمًا في الكون:

* تشكيل المجرات: يُعتقد أن الثقوب السوداء فائقة الضخامة في مراكز المجرات تؤثر على تطورها ونموها. يمكن أن تؤثر جاذبيتها القوية على حركة النجوم والغاز في المجرة.

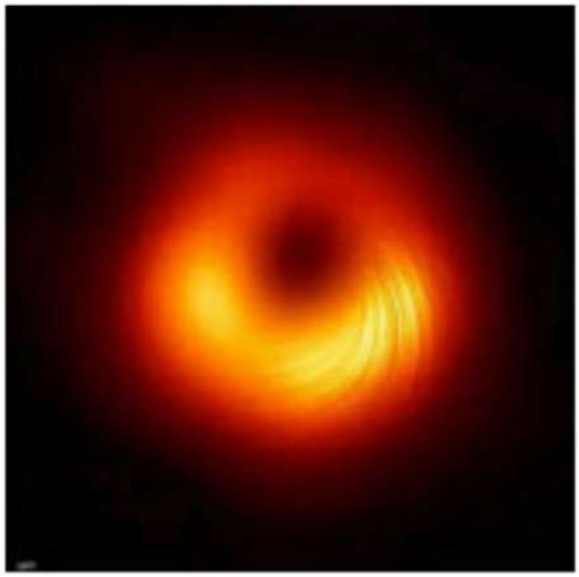
* إطلاق الطاقة: عندما تبتلع الثقوب السوداء المادة، فإنها لا تفعل ذلك بهدوء دائمًا. يمكن للمادة القريبة من أفق الحدث أن تدور بسرعة هائلة وتسخن إلى درجات حرارة عالية جدًا، مما يؤدي إلى إطلاق كميات هائلة من الإشعاع والطاقة التي تشكل نفاثات قوية تنطلق من قطبي الثقب الأسود. هذه النفاثات يمكن أن تؤثر على البيئة المحيطة بالثقب الأسود على نطاقات واسعة.

* موجات الجاذبية: عندما يدور ثقبان أسودان حول بعضهما البعض ثم يندمجان، فإنهما يرسلان تموجات في نسيج الزمكان تُعرف باسم موجات الجاذبية. اكتشاف هذه الموجات في السنوات الأخيرة فتح نافذة جديدة لفهم الكون ودراسة الأحداث الكونية العنيفة مثل اندماج الثقوب السوداء.

لغز لا يزال قيد الدراسة:

لا تزال الثقوب السوداء تمثل لغزًا كبيرًا في علم الفيزياء الفلكية وعلم الكونيات. على الرغم من أن نظرية النسبية العامة لألبرت آينشتاين تصفها بدقة على نطاق واسع، إلا أنها تفشل في وصف ما يحدث داخل التفرد. لفهم هذه المنطقة المتناهية الصغر ذات الجاذبية اللانهائية، نحتاج إلى نظرية أخرى تجمع بين الجاذبية وميكانيكا الكم، وهي نظرية لا تزال قيد التطوير. في الفصول القادمة، سنتعمق أكثر في بعض الجوانب الغامضة والمثيرة للاهتمام حول الثقوب السوداء، وسنستكشف كيف يحاول العلماء كشف أسرار هذه الوحوش الكونية.

أول صورة حقيقية لثقب أسود هي لثقب أسود هائل الكتلة في مركز مجرة **M87.** تم التقاطها بواسطة "تلسكوب أفق الحدث **(Event Horizon Telescope) 2019** في عام.



في الصفحات الختامية من استكشافنا لعلم الكونيات النسبي، نتوجه إلى السؤال الأعمق والأكثر جوهرية: ما هو المنتهى الذي ينتظر هذا الكون الشاسع الذي يحتضن وجودنا؟ هل سينمده إلى الأبد في عزلة متزايدة؟ أم أن قوى أخرى ستعيد عقارب الساعة الكونية إلى الوراء؟ يجيب علم الكونيات النسبي على هذه التساؤلات المعقدة من خلال تحليل دقيق لديناميكيات الكون الحالية ومكوناته الأساسية، ليقدم لنا مجموعة من السيناريوهات المحتملة لمستقبله البعيد.

[قوى متصارعة - التوسع الكوني والجاذبية الكابحة]

كما بتنا نعلم، يتمدد الكون منذ ولادته في الانفجار العظيم عملية توسع مستمرة. هذا الزخم الأولي الهائل يدفعه إلى الخارج، لكن في المقابل، تعمل قوة أخرى على مقاومة هذا التمدد: جاذبية المادة والطاقة المنتشرة في أرجائه. كل جسيم وكل تجمع للمادة يمارس جذبًا على الآخر، وتسعى هذه القوة الكونية إلى إبطاء وتيرة هذا التوسع المستمر.

تخيل كرة تُقذف عموديًا إلى الأعلى. سرعتها الأولية تدفعها بعيدًا عن الأرض، لكن جاذبية كوكبنا تعمل باستمرار على تقليل هذه السرعة. مصير الكرة يعتمد على قوتها الأولية مقارنة بقوة الجاذبية. إذا كانت قوية بما يكفي، ستفلت الكرة من جاذبية الأرض وتستمر في الابتعاد. أما إذا كانت أضعف، فستتوقف الكرة في النهاية عن الصعود وتبدأ رحلة العودة إلى سطح الأرض.

بالمثل، فإن مستقبل الكون يعتمد على التنافس بين **"سرعته الأولية" (**محدد توسعه الحالي**)** و **"**قوة الجاذبية**"** الكلية **(**الناجمة عن مجمل المادة والطاقة التي يحتويها**)**.

[ظهور اللاعب الخفي - الطاقة المظلمة وتسارع التوسع]

حتى وقت قريب، كان التصور العلمي السائد يشير إلى أن توسع الكون يجب أن يتباطأ تدريجيًا بفعل تأثير الجاذبية. لكن في أواخر القرن العشرين، قدمت مراقبات فلكية دقيقة للمستعرات العظمى البعيدة **(**نجوم تنفجر بضياء هائل**)** اكتشافًا مذهلاً قلب الموازين: الكون لا يتباطأ، بل يتسارع في توسعه! هذا الاكتشاف غير المتوقع قاد إلى افتراض وجود شكل غامض من الطاقة يملأ الفضاء وينسب في هذا التسارع المتزايد، أطلق عليه اسم الطاقة المظلمة. على الرغم من أن طبيعة هذه الطاقة لا تزال تشكل لغزًا كبيرًا للعلماء في النجف كما في جميع أنحاء العالم، إلا أن تأثيرها الكوني الواسع النطاق أصبح حقيقة راسخة في علم الكونيات النسبي. يبدو أن هذه الطاقة الغامضة تتغلب على قوة الجاذبية على أبعاد الكون الشاسعة.

[سيناريوهات محتملة لنهاية الكون]

بناءً على فهمنا الحالي لديناميكيات الكون ومكوناته الأساسية (المادة العادية، المادة المظلمة،والطاقة المظلمة)، يقدم علم الكونيات النسبي عدة سيناريوهات محتملة لمستقبله البعيد:

* الموت الحراري: يُعد هذا السيناريو الأكثر ترجيحًا في ضوء الأدلة الحالية التي تشير بقوة إلى وجود طاقة مظلمة تتسبب في تسارع التوسع. في هذا المشهد الكوني، سيستمر الكون في التوسع إلى الأبد بوتيرة متزايدة، وستتباعد المجرات عن بعضها البعض بسرعات متزايدة. بمرور الوقت، سيصبح الكون باردًا ومظلمًا بشكل متزايد. النجوم ستستهلك وقودها النووي وتتلاشى، والمادة ستتوزع على مسافات شاسعة لدرجة أن التفاعلات بين الجسيمات ستصبح نادرة للغاية. سيؤول الكون في نهاية المطاف إلى حالة من التجمد الحراري، حيث تكون الطاقة الحرة المتاحة لحدوث أي نشاط ذي مغزى ضئيلة للغاية.

* الانسحاق العظيم: كان هذا السيناريو يحظى باهتمام أكبر قبل اكتشاف الطاقة المظلمة. يفترض أن الكثافة الكلية للمادة والطاقة في الكون كافية للتغلب على قوة التوسع في النهاية المطاف. في هذه الحالة سيبدأ التوسع في التباطؤ ثم ينعكس، وينكمش الكون على

على نفسه. سيستمر الانكماش بوتيرة متسارعة، وستقترب المجرات من بعضها البعض بشكل متزايد، وسترتفع درجة الحرارة والكثافة بشكل هائل، لينتهي كل شيء في نقطة واحدة تشبه الانفجار العظيم ولكن في الاتجاه المعاكس. ومع ذلك، فإن التسارع الحالي لتوسع الكون يجعل هذا السيناريو أقل احتمالية بكثير.

النزف العظيم: يقدم هذا السيناريو رؤية أكثر تطرفاً لمستقبل الكون، ويعتمد بشكل حاسم على طبيعة الطاقة المظلمة. إذا كانت كثافة الطاقة المظلمة تزداد بمرور الوقت، فقد تصل قوتها التنافرية إلى درجة أنها تتغلب ليس فقط على الجاذبية بين المجرات، بل أيضاً على القوى التي تربط المجرات نفسها، ثم الأنظمة الشمسية، ثم الكواكب، وفي نهاية المطاف حتى الذرات والجسيمات الأولية، مما يؤدي إلى **"تمزق"** نسيج الزمكان نفسه في نهاية المطاف. يعتمد هذا السيناريو على خصائص محددة للطاقة المظلمة التي لم يتم تحديدها بعد، ولا يزال يعتبر أقل احتمالية من سيناريو الموت الحراري.

الكون الدوري: تقترح بعض النظريات الأكثر تكهناً أن الكون قد يمر بسلسلة لانهائية من الدورات من التوسع والانكماش. بعد **"انسحاق عظيم"** افتراضي، قد يبدأ كون جديد في التوسع مرة أخرى، ربما بظروف فيزيائية مختلفة. ومع ذلك، لا يوجد حالياً دليل رصدي قوي يدعم هذه النظريات، وهي لا تزال ضمن نطاق البحث النظري المتقدم.

المستقبل في طي المجهول...

من الأهمية بمكان أن نتذكر

أن فهمنا لمصير الكون لا يزال قيد التطور المستمر. طبيعة الطاقة المظلمة، على وجه الخصوص، تمثل أحد أعظم الألغاز في الفيزياء الحديثة وعلم الكونيات. الإجابة عن هذا السؤال ستكون حاسمة في تحديد السيناريو النهائي الذي سيشهده الكون. قد تظهر اكتشافات جديدة أو نظريات مبتكرة تغير بشكل جذري فهمنا الحالي وتقدم لنا رؤى جديدة لمستقبل الكون لم نكن نتخيلها بعد.

▪

إن التفكير في مصير الكون هو تأمل عميق يمزج بين علم الكونيات النسبي والفلسفة الوجودية. بناءً على المعرفة الحالية، يبدو أن سيناريو "الموت الحراري" هو الأكثر احتمالاً، حيث يستمر الكون في التوسع والتبريد إلى أجل غير مسمى. ومع ذلك، فإن الطبيعة الغامضة للطاقة المظلمة تترك الباب مفتوحاً أمام احتمالات أخرى، ربما تكون أكثر غرابة ودهشة. رحلة العلم هي رحلة استكشاف لا تتوقف، وفي المستقبل قد نكتشف المزيد عن القوى الخفية التي تحكم مصير هذا الكون العظيم الذي ننتمي إليه، من السماء الصافية التي فوقك إلى أبعد حدود الكون المرئي.

في الختام، يظل علم الكونيات النسبي رحلة استكشافية مستمرة، تسعى لفهم أصول الكون وتطوره ومصيره النهائي، انطلاقاً من نظريات آينشتاين ووصولاً إلى ألغاز الطاقة والمظلمة. من سمائك، كما من أي مكان على هذا الكوكب، ننظر إلى النجوم ونسعى لفهم قصتنا ضمن هذه اللوحة الكونية العظيمة.

الفصل

الثالث

ماكس
بلانك

والكم

في مدينة كيل الألمانية، بتاريخ ٢٣ أبريل عام ١٨٥٨، ولد ماكس كارل إرنست لودفيج بلانك. لم يكن أحد ليتخيل أن هذا الطفل، الذي نشأ في عائلة أكاديمية عريقة، سيحدث انقلابا جذريا في عالم الفيزياء. شغف بلانك المبكر بالموسيقى، حيث كان عازف بيانو موهوباً، لم يقلل من شغفه بالعلم، بل ربما غذى فيه حساً بالتناغم والنظام الذي سعى إليه لاحقاً في قوانين الطبيعة.

بعد دراسته في جامعات ميونيخ وبرلين، حصل بلانك على درجة الدكتوراه بامتياز في الفيزياء من جامعة ميونيخ وهو في سن الحادية والعشرين. بدأ مسيرته الأكاديمية محاضراً في ميونيخ ثم في كيل، قبل أن يستقر في جامعة برلين عام ١٨٨٩ كأستاذ.

لغز الجسم الأسود وولادة الكم

في أواخر القرن التاسع عشر، واجه الفيزيائيون تحدياً كبيراً: فهم الإشعاع الصادر عن الأجسام السوداء عند تسخينها. كان الجسم الأسود المثالي مفهوماً نظرياً يمتص جميع الإشعاعات الساقطة عليه ولا يعكس أي شيء، وعند تسخينه، يبدأ في إصدار إشعاع يعتمد على درجة حرارته.

في أواخر القرن التاسع عشر، واجه الفيزيائيون تحدياً كبيراً: فهم الإشعاع الصادر عن الأجسام السوداء عند تسخينها. كان الجسم الأسود المثالي مفهوماً نظرياً يمتص جميع الإشعاعات الساقطة عليه ولا يعكس أي شيء، وعند تسخينه، يبدأ في إصدار إشعاع يعتمد على درجة حرارته.

حاولت الفيزياء الكلاسيكية تفسير طيف هذا الإشعاع، أي توزيع شدة الإشعاع على مختلف الأطوال الموجية، لكنها فشلت فشلاً ذريعاً. تنبأت القوانين الكلاسيكية بما عرف بـ "كارثة الأشعة فوق البنفسجية" حيث توقعت أن شدة الإشعاع يجب أن تزداد بلا حدود مع تناقص الطول الموجي، وهو ما لم يلاحظ أبداً في التجارب. انخرط بلانك في هذا اللغز المحير. كان مؤمناً بوجود قوانين أساسية بسيطة تحكم الطبيعة، ولم يستسلم أمام هذا التناقض الصارخ بين النظرية والتجربة. بدأ بلانك رحلة فكرية مضنية، محاولاً إيجاد صيغة رياضية تصف طيف إشعاع الجسم الأسود بدقة.

في عام ١٩٠٠، وبعد سنوات من العمل الدؤوب، توصل بلانك إلى حل ثوري. لقد افترض أن الطاقة لا تنتج أو تمتص بشكل مستمر كما تنص الفيزياء الكلاسيكية، بل في وحدات منفصلة صغيرة سماها "كمّات". تخيل أن الطاقة تأتي في "حزم" صغيرة، وأن طاقة كل كم تتناسب مع تردد الإشعاع.

رياضياً، عبر بلانك عن هذه الفكرة بقانون بسيط:

E = h / un

حيث:

E هي طاقة الكم.

nu هو تردد الإشعاع.

h هو ثابت جديد أدخله بلانك، عرف لاحقاً بـ "ثابت بلانك".

كان هذا الافتراض جريئاً للغاية

ويعارض مع الأسس الراسخة للفيزياء الكلاسيكية. لقد كان أشبه بمن يقول إن الماء لا يتدفق باستمرار بل على شكل قطرات صغيرة جداً.

في البداية، نظر بلانك إلى فرضيته على أنها مجرد حيلة رياضية مؤقتة لحل مشكلة الجسم الأسود، ولم يدرك تماما الأبعاد الثورية لفكرته. لكن النتائج التي حصل عليها من خلال هذا الافتراض تطابقت تماماً مع البيانات التجريبية، مما أثار دهشة المجتمع العلمي. سرعان ما أدرك علماء آخرون، مثل ألبرت أينشتاين، الأهمية العميقة لمفهوم الكم. استخدم أينشتاين فكرة الكم لتفسير الظاهرة الكهروضوئية، حيث تنبعث الإلكترونات من سطح معدن عند سقوط ضوء عليه. أوضح أينشتاين أن الضوء نفسه يتكون من كميات من الطاقة **(**الفوتونات**)**، وأن طاقة هذه الكمات هي التي تحدد ما إذا كانت الإلكترونات ستتحرر من المعدن أم لا. هكذا، بدأت تتشكل تدريجيا نظرية الكم، التي أحدثت ثورة في فهمنا للعالم على المستوى الذري ودون الذري. لقد فتحت آفاقا جديدة في الفيزياء والكيمياء وعلوم المواد، وأدت إلى اختراعات تكنولوجية غيرت حياتنا، مثل الليزر والترانزستور.

في عام ١٩١٨، منح ماكس بلانك جائزة نوبل في الفيزياء تقديرا لخدماته في تقدم الفيزياء من خلال اكتشافه لكمات الطاقة.

حياة مليئة بالتحديات

لم تكن حياة بلانك سهلة. فقد واجه العديد من المآسي الشخصية، بما في ذلك

وفاة زوجته الأولى وثلاثة من أبنائه. كما عانى بشدة خلال الحربين العالميتين. وفقد منزله ودفاتره العلمية الثمينة في قصف عام ١٩٤٤. وفي عام ١٩٤٥، أعدم ابنه إروين بسبب تورطه في محاولة اغتيال هتلر.

بعد أن سطر نجمه في سماء الفيزياء بحصوله على جائزة نوبل عام ١٩١٨ ، لم تخل حياة ماكس بلانك من المصاعب والمآسي. فبالإضافة إلى التحديات العلمية التي واجهها في ترسيخ وتقبل نظرية الكم الجديدة، اختبر بلانك فواجع شخصية مؤلمة.

توفيت زوجته الأولى ماري ميرك عام ١٩١٧ بعد زواج دام ثلاثين عاما وأنجبا أربعة أطفال. فقد بلانك ابنه الأكبر كارل في الحرب العالمية الأولى، وقتل ابنه الثاني إروين في عام ١٩٤٥ بسبب تورطه في محاولة اغتيال أدولف هتلر. كما توفيت إحدى ابنتيه أثناء الولادة. هذه الفقدانات المتتالية تركت ندوبا عميقة في روحه، لكنها لم تضعف عزيمته أو إيمانه بقوة العلم والعقل.

شهد بلانك أيضاً فترة عصيبة على المستوى الوطني مع صعود النازية في ألمانيا. كان بلانك مدافعا قويا عن الحرية الأكاديمية واستقلالية البحث العلمي، ولم يتردد في التعبير عن قلقه إزاء تسييس العلم والتمييز العنصري الذي مارسه النظام النازي. على الرغم من الضغوط الهائلة، بقي بلانك في ألمانيا خلال الحرب العالمية الثانية، ربما لشعوره بالمسؤولية تجاه المؤسسات العلمية التي كان يرأسها وللحفاظ على ما تبقى من التقاليد الأكاديمية.

في عام ١٩٤٤ ، خلال

إحدى الغارات الجوية على برلين، دُمر منزل بلانك

بالكامل، وفقد معه مكتبته القيمة ومخطوطاته العلمية

التي لا تقدر بثمن. كانت هذه خسارة فادحة لرجل

كرس حياته للعلم والمعرفة.

إعادة البناء والإرث الخالد

بعد نهاية الحرب العالمية الثانية، وعلى الرغم من تقدمه في العمر والظروف الصعبة التي مر بها، أظهر ماكس بلانك روحاً قوية وإصرارا على إعادة بناء المجتمع العلمي الألماني، لعب دوراً محورياً في تأسيس جمعية ماكس بلانك للتقدم، التي حلت محل جمعية القيصر فيلهلم وأصبحت واحدة من أهم المؤسسات البحثية في ألمانيا والعالم. تولى بلانك رئاسة الجمعية الجديدة من عام ١٩٤٦ حتى وفاته عام ١٩٤٧. في هذه السنوات الأخيرة من حياته، شهد بلانك الاعتراف المتزايد بأهمية نظريته الكمية وتأثيرها العميق على مختلف فروع العلوم. لقد رأى كيف أن فكرته "الثورية" التي بدأت بحل مشكلة بسيطة في ظاهرها، أصبحت أساسا لفهم سلوك الذرات والجسيمات والضوء، وقادت إلى تطورات تكنولوجية هائلة.

توفي ماكس بلانك في مدينة جوتنجن عام ١٩٤٧ عن عمر يناهز ٨٩ عاما. رحل قامة علمية فذة تركت بصمة لا تُمحى في تاريخ الفيزياء. لم يكن بلانك مجرد عالم عبقري اكتشف أحد أهم مبادئ الكون، بل كان أيضاً إنساناً تجسدت فيه قيم النزاهة الفكرية والشجاعة الأخلاقية والإيمان الراسخ بأهمية العلم في تقدم البشرية.

إرثه العلمي يتجاوز بكثير معادلة بسيطة.لقد غير بلانك طريقة تفكيرنا في الطاقة والمادة، وفتح الباب أمام عصر جديد من الفيزياء، الفيزياء الكمية، التي لا تزال تلهم الاكتشافات والابتكارات حتى يومنا هذا. حياته، بكل ما فيها من إنجازات وتحديات، هي شهادة على قوة العقل البشري وقدرته على تجاوز الصعاب في سبيل المعرفة والحقيقة.

في مطلع القرن العشرين، وبينما كانت الفيزياء الكلاسيكية تحقق نجاحات باهرة في تفسير العديد من الظواهر الطبيعية، كان هناك لغز يؤرق الفيزيائيين: إشعاع الجسم الأسود. هذا الجسم المثالي، الذي يمتص كل الإشعاع الساقط عليه، كان يبعث ضوءا عند تسخينه، لكن الطيف اللوني لهذا الضوء لم يتفق مع تنبؤات الفيزياء الكلاسيكية. كان ماكس بلانك، الأستاذ الوقور في جامعة برلين، من بين العلماء الذين انكبوا على دراسة هذه الظاهرة المحيرة. كان بلانك مؤمنا إيمانا راسخا بوجود قوانين بسيطة وأنيقة تحكم الطبيعة، وكان يرى في هذا التناقض بين النظرية والتجربة تحديا حقيقيا لفهمنا للعالم. بدأ بلانك رحلته الفكرية المضنية بالتركيز على الجانب الديناميكي الحراري للإشعاع. لقد كان يعتقد أن مفتاح الحل يكمن في فهم كيفية تبادل الطاقة بين المادة والإشعاع. حاول تطبيق قوانين الديناميكا الحرارية على الإشعاع الصادر من الجسم الأسود، لكنه اصطدم بعقبة أساسية: الفيزياء الكلاسيكية كانت تفترض أن الطاقة يمكن أن تُمص أو تُفتح بكميات مستمرة وغير محددة بلا حدود لسنوات، عمل بلانك بجد وتفان، يجرب الحسابات ويختبر مختلف الفرضيات. كان يدرك أن الحل يجب أن يكون جذريا، لكنه في الوقت نفسه كان مترددا في التخلي عن الأسس الراسخة للفيزياء الكلاسيكية التي نشأ عليها.

في خريف عام ١٩٠٠ ، وبينما كان يحاول إيجاد صيغة رياضية تتفق مع البيانات التجريبية لطيف إشعاع الجسم الأسود التي جمعها الفيزيائيون التجريبيون بدقة متناهية، توصل بلانك إلى فكرة غريبة وغير مألوفة. لقد افترض، بشكل مؤقت وبدافع الحاجة الرياضية كما بدا له في البداية، أن الطاقة لا تنتج أو تُمتص بشكل مستمر، بل في وحدات منفصلة صغيرة ومحددة. تخيل أن الطاقة تأتي في "حزم صغيرة"، تماما مثل حبيبات الرمل أو قطرات المطر.

أطلق بلانك على هذه الوحدات الصغيرة من الطاقة اسم **"كمات"**، وهي كلمة لاتينية تعني **"كمية"** أو **"مقدار"**. ووجد أن طاقة كل كم تتناسب طرديا مع تردد الإشعاع. وأن ثابت التناسب هو ثابت جديد أدخله إلى الفيزياء، عُرف لاحقاً بـ:

"ثابت بلانك" (h)

رياضياً، عبر بلانك عن هذه العلاقة البسيطة لكن العميقة بالمعادلة التالية:

$$E = h \nu$$

حيث:

E: هي طاقة الكم الواحد.

nu: هو تردد الإشعاع (عدد الاهتزازات في الثانية).

h: هو ثابت بلانك، وهو قيمة صغيرة جداً

$$6.636\ 10^{-34}$$

عندما استخدم بلانك هذا الافتراض الجديد في حساباته، وجد أن الصيغة الرياضية التي حصل عليها تطابقت بشكل مذهل مع البيانات التجريبية لطيف إشعاع الجسم الأسود. لقد كان نجاحاً باهراً، لكن بلانك نفسه كان يشعر بشيء من عدم الارتياح تجاه هذا الافتراض الثوري. لقد كان يعتقد في البداية أن هذه **"الكمّات"** هي مجرد خاصية رياضية للحماية الإشعاعية، وليست سمة أساسية للطاقة نفسها.

في الرابع عشر من ديسمبر عام ١٩٠٠، قدم ماكس بلانك ورقته البحثية التي تضمنت هذا الاكتشاف المذهل إلى الجمعية الفيزيائية الألمانية. يُعتبر هذا التاريخ بمثابة الميلاد الرسمي لنظرية الكم، وبداية تحول جذري في فهمنا للعالم الفيزيائي.

لم يدرك بلانك في البداية الأبعاد الكاملة لثورة الكم التي أطلقها. لقد كان ينظر إلى فرضيته على أنها حل مؤقت لمشكلة محددة. لكن سرعان ما أدرك علماء آخرون، وعلى رأسهم ألبرت أينشتاين، الأهمية العميقة لهذه الفكرة. ففي عام ١٩٠٥ ، استخدم أينشتاين مفهوم الكم لتفسير الظاهرة الكهروضوئية، حيث أوضح أن الضوء نفسه يتكون من كَمّات منفصلة من الطاقة **(**الفوتونات**)**، وأن تفاعلات الضوء مع المادة تحدث على شكل تبادل لهذه الكمّات. هكذا، بدأت تتضح الصورة شيئاً فشيئاً. لم تكن الكمّات مجرد حيلة رياضية، بل كانت سمة أساسية للطاقة والإشعاع. هذا الاكتشاف فتح الباب أمام فهم جديد للعالم على المستوى الذري ودون الذري، وأسس لما عُرف لاحقاً بالميكانيكا الكمية، وهي النظرية التي تصف سلوك الجسيمات الدقيقة وتفاعلاتها بدقة مذهلة.

لقد كانت رحلة بلانك نحو الكم رحلة فكرية شاقة ومليئة بالتردد، لكنها كانت في

النهاية رحلة غيرت وجه الفيزياء إلى الأبد. لقد بدأ بحل لغز محدد، لكنه اكتشف كنزاً ثميناً فتح آفاقاً واسعة لفهم أعمق وأشمل لقوانين الطبيعة.

[ميكانيكا الكم: ثورة في فهم العالم الذري]

في مطلع القرن العشرين، وبينما كانت الفيزياء الكلاسيكية تحقق نجاحات باهرة في تفسير حركة الأجسام الكبيرة والظواهر اليومية، بدأت تظهر سقوف في هذا البناء الشامخ عند محاولة فهم العالم الصغير جداً - عالم الذرات والجزيئات وما دونهما. هنا، حيث تسود قوانين مختلفة وغريبة عن تجربتنا اليومية، بزغت الحاجة إلى نظرية جديدة: ميكانيكا الكم.

لم تكن ميكانيكا الكم اكتشافاً مفاجئاً، بل كانت تتويجاً لجهود العديد من العلماء الذين واجهوا ألغازاً محيرة مثل إشعاع الجسم الأسود، والظاهرة الكهروضوئية، واستقرار الذرات. كانت البداية مع فرضية ماكس بلانك الثورية في عام **1900** بأن الطاقة لا تفتح أو تمتص بشكل مستمر، بل في وحدات منفصلة صغيرة تعرف باسم **"كمات"**. هذا المفهوم الجذري فتح الباب أمام فهم جديد للطبيعة. فبدلاً من تصور الطاقة كتيار متصل، أصبحت تُرى كحزمة من **"جسيمات"** صغيرة. تبع ذلك عمل ألبرت أينشتاين الذي استخدم فكرة الكم لتفسير الظاهرة الكهروضوئية، مؤكداً أن الضوء نفسه يتكون من كمات من الطاقة تعرف بالفوتونات.

مع تطور الأبحاث، اتضح أن الجسيمات دون الذرية، مثل الإلكترونات، لا تسلك فقط سلوك الجسيمات، بل تُظهر أيضاً خصائص الموجات. هذه الازدواجية بين الموجة والجسيم أصبحت إحدى الركائز الأساسية لميكانيكا الكم. فجسيم صغير يمكن أن ينتشر كالموجة في الفضاء، ولكنه يتفاعل مع الأجهزة القياسية كجسيم له موقع محدد.

في عشرينيات القرن الماضي، تشيدت ميكانيكا الكم تطويراً هائلاً بفضل جهود علماء مثل نيلز بور، وفيرنر هايزنبرغ، وإرفين شرودنجر. قدم بور نموذجاً للذرة يفسر استقرار الإلكترونات في مدارات محددة حول النواة، وأن الإلكترونات يمكن أن تقفز بين هذه المدارات عن طريق امتصاص أو إطلاق كمات محددة من الطاقة. أما هايزنبرغ، فقد صاغ "مبدأ عدم اليقين - التشهير"، الذي ينص على أنه لا يمكن تحديد بعض الأزواج من الخصائص الفيزيائية لجسيم كمي بدقة متناهية في نفس الوقت. على سبيل المثال، كلما عرفنا موقع جسيم بدقة أكبر، قلت دقة معرفتنا لسرعته، والعكس صحيح. هذا المبدأ يمثل اختلافاً جوهرياً عن الفيزياء الكلاسيكية التي تفترض إمكانية معرفة جميع خصائص النظام بدقة تامة. من جانبه، طور شرودنجر معادلة رياضية أساسية في ميكانيكا الكم تُعرف بـ "معادلة شرودنجر". تصف هذه المعادلة كيف يتغير "الدالة الموجية" لجسيم كمي مع مرور الوقت. تحمل الدالة الموجية معلومات حول حالة الجسيم، بما في ذلك احتمالية وجوده في مكان معين أو امتلاكه سرعة معينة

أحد المفاهيم الأكثر غرابة في ميكانيكا الكم هو **"التراكب الكمي"**. يمكن للجسيم الكمي أن يوجد في عدة حالات مختلفة في نفس الوقت حتى يتم قياسه. عند القياس، **"ينهار"** التراكب الكمي ويستقر الجسيم في حالة واحدة محددة. تخيل عملة معدنية تدور في الهواء، فهي ليست صورة ولا كتابة حتى تهبط وتستقر على أحد الوجهين.

مفهوم آخر مثير للدهشة هو **"التشابك الكمي"**. عندما يتشابك جسيمان كميان، يصبح مصيرهما مرتبطاً بشكل غريب، حتى لو كانا بعيدين عن بعضهما البعض. فإذا قمنا بقياس خاصية لأحد الجسيمين، فإننا نعرف على الفور القيمة الخاصية المقابلة للجسيم الآخر، بغض النظر عن المسافة بينهما.

لم تظل ميكانيكا الكم مجرد نظرية مجردة، بل أثبتت فعاليتها الهائلة في تفسير الظواهر الطبيعية على المستوى الذري والجزيئي. كما أنها أدت إلى ثورة تكنولوجية هائلة، حيث تقف وراء العديد من التقنيات الحديثة مثل الليزر، والترانزستور **(**المكون الأساسي للحواسيب والأجهزة الإلكترونية**)**، والتصوير بالرنين المغناطيسي، والخلايا الشمسية، وغيرها الكثير.

لا تزال ميكانيكا الكم مجالاً نشطاً للبحث العلمي، حيث يسعى العلماء إلى فهم أعمق لمفاهيمها وتطبيقاتها المستقبل

المحتملة، مثل الحوسبة الكمية والتشفير الكمي.

باختصار، ميكانيكا الكم ليست مجرد نظرية فيزيائية، بل هي إطار مفاهيمي جديد لفهم طبيعة الواقع على أعمق مستوياته. إنها تكشف عن عالم غريب ورائع يتحدى حدسنا اليومي، لكنه في الوقت نفسه يفسر بدقة سلوك المادة والطاقة في أصغر المقاييس، ويفتح آفاقاً واعدة لتقنيات المستقبل. لقد كانت وستظل ثورة حقيقية في تاريخ العلوم.

الفصل

الرابع

مدخل علوم

الكونيات الكمي

في سعينا لفهم أصول الكون وتطوره، يصل بنا علم الكونيات النسبي إلى نقطة حرجة، حيث تتلاشى قدرة الفيزياء الكلاسيكية على تقديم وصف كامل للحقيقة المبكرة جداً. هنا، في فجر الوجود المتناهي الصغر والكثافة الهائلة، يبرز علم كونيات الكم كإطار نظري طموح يسعى لدمج مبادئ ميكانيكا الكم مع نظرية النسبية العامة.

علم كونيات الكم ليس مجرد تطبيق لقواعد الكم على الكون ككل؛ بل هو محاولة لفهم كيف نشأ الزمكان نفسه من حالة كمومية أولية. إنه استكشاف لكيفية ظهور الكون الذي نعرفه، بكل ما فيه من بنى واسعة النطاق، من تقلبات كمومية دقيقة في فجر الوجود. في هذا الإطار، يصبح الكون كياناً كمومياً يخضع لمبادئ الاحتمالية والتراكب، وتصبح مفاهيم مثل **"الزمان"** و **"المكان"** نفسها عرضة للكمكم.

في الصفحات التالية، سنلقي نظرة على هذا المجال النظري المثير، ونستعرض بعض المفاهيم الأساسية والتحديات التي تواجه الفيزيائيين في سعيهم لفك شفرة أصول الكون من منظور كمومي، آملين أن نلقي ضوءاً جديداً على **"لماذا"** و **"كيف"** لكل شيء من نقطة البداية الكونية في النجف كما في أي مكان آخر.

تتجسد في واحدة من أكثر الأفكار عمقاً وإثارة للدهشة في علم كونيات الكم ونظرية التضخم: كيف يمكن لتقلبات عفوية على أصغر المقاييس الكمومية أن تصبح البذور التي نمت لتشكل العظمة الهائلة لبنية الكون التي نراها اليوم، من مجرات بعيدة تتلألأ في سماء الليلية إلى العناقيد المجرية الشاسعة.

في عالم ميكانيكا الكم، لا يمكن للفراغ أن يكون فارغاً تماماً. حتى في غياب أي مادة أو إشعاع، يستمر الفضاء في الاهتزاز بتقلبات كمومية عفوية. هذه التقلبات هي نتيجة لمبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ، الذي ينص على وجود حدود أساسية لدقة معرفتنا ببعض الكميات الفيزيائية المترافقة، مثل الطاقة والزمن. ونتيجة لذلك، يمكن أن تظهر وتختفي أزواج من الجسيمات والجسيمات المضادة بشكل مؤقت من **"الفراغ الكمومي"**، حاملة معها طاقة عابرة قبل أن تفني بعضها البعض مرة أخرى. هذه الأحداث العابرة، على الرغم من قصر مدتها وصغر حجمها، تحمل في طياتها إمكانية إحداث تأثيرات كونية هائلة.

[التضخم الكوني - ساحة التمدد الهائل للتقلبات المجهرية]

عندما بدأ الكون يخضع لفترة التضخم الكوني، وهي مرحلة التوسع الأسي السريع للغاية في جزء ضئيل من الثانية بعد بدايته، أصبحت هذه التقلبات الكمومية المجهرية عالقة في هذا التمدد الكوني الهائل. تخيل تموجات صغيرة جداً على سطح بركة ماء. إذا تمددت البركة فجأة وبشكل كبير، فإن هذه التموجات الصغيرة ستتمدد هي الأخرى لتصبح موجات واسعة. وبالمثل، فإن التقلبات الكمومية الأولية في كثافة الطاقة في الكون المبكر، التي كانت تحدث على مقاييس كمومية صغيرة جداً، تم تمديدها بواسطة التضخم إلى أبعاد كونية.

أثناء فترة التضخم، تم تمديد هذه التقلبات الكمومية بسرعة أكبر من سرعة الضوء **(**وهذا لا يتعارض مع النسبية الخاصة لأن الفضاء نفسه هو الذي يتمدد، وليس حركة الجسيمات عبر الفضاء**).** هذا التمدد السريع **"جمد"** هذه التقلبات في الكون الموسوع. ما كان في الأصل احتمالاً كمومياً لتقلبات في الكثافة أصبح اختلافاً حقيقياً في توزيع المادة والطاقة على نطاقات واسعة. بمعنى آخر، حول التضخم أحداثاً كمومية عشوائية وعابرة إلى اختلافات فعلية ودائمة في نسيج الزمكان.

[بذور الجاذبية - نقطة الانطلاق لتكوين البنية الكونية]

هذه التقلبات الكمومية المتضخمة في كثافة الطاقة لم تكن موزعة بشكل منتظم. بعض المناطق كانت لديها كثافة أعلى قليلاً من المتوسط، بينما كانت مناطق أخرى أقل كثافة. هذه الاختلافات الطفيفة في الكثافة أصبحت بمثابة **"بذور الجاذبية"** التي بدأت في جذب المزيد من المادة إليها بعد انتهاء فترة التضخم وبدء الكون في التوسع والبرودة وفقاً لسيناريو الانفجار العظيم القياسي

تخيل بقعاً صغيرة أكثر كثافة في حساء كوني متجانس تقريباً. بمرور الوقت، ستجذب هذه البقع المزيد من **"الحساء"** إليها بسبب جاذبيتها الأقوى. وبالمثل، فإن المناطق ذات الكثافة الأعلى في الكون المبكر جذبت المزيد من المادة المظلمة والغاز، مما أدى تدريجياً إلى تكوين الهالات الضخمة من المادة المظلمة التي أصبحت بمثابة الهياكل الأساسية لتكوين المجرات والعناقيد المجرية.

[بصمات كمومية في السماء - دليل على الماضي البعيد]

أحد أقوى الأدلة على دور التقلبات الكمومية في تكوين البنية الكونية يأتي من دراسة الخلفية الميكروووية. هذا الإشعاع المتبقي من حوالي **380** ألف سنة بعد الانفجار .

فكرة أن أعظم الهياكل في الكون، من مجراتنا المحلية إلى الجدران الكونية الشاسعة، قد نشأت من تقلبات كمومية عفوية على أصغر المقاييس هي شهادة على قوة قوانين الفيزياء في ربط عوالم مختلفة تماماً. إنها قصة رائعة عن كيف يمكن لأحداث عابرة في عالم الكم أن تضخم لتشكل الكون الذي نعرفه، وتقدم لنا نظرة عميقة على الأصول الكمومية لبنيتنا الكونية .

[الحقول الكمومية **-** واقع أساسي للكون**]**

في الفيزياء الحديثة، ينظر إلى الجسيمات الأولية التي تشكل المادة والقوى الأساسية على أنها إثارات أو اهتزازات في حقول كمومية أساسية تملأ جميع أنحاء الفضاء. على سبيل المثال، الإلكترون هو إثارة في حقل الإلكترون، والفوتون هو إثارة في حقل الكهرومغناطيسية. هذه الحقول ليست مجرد مفاهيم رياضية، بل هي كيانات فيزيائية حقيقية لها خصائص كمومية.

إحدى الخصائص الأساسية للحقول الكمومية هي أنها تخضع لمبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ. هذا يعني أن بعض الكميات الفيزيائية المتعلقة بالحقل، مثل قيمته ومعدل تغيره في نقطة معينة من الفضاء، لا يمكن معرفتها بدقة مطلقة في نفس الوقت. ونتيجة لذلك، حتى في حالة **"**الفراغ**"** **(**حيث لا توجد جسيمات**)**، فإن الحقول الكمومية لا تزال تخضع لتقلبات كمومية عفوية وعشوائية **.**

[حقل التضخم كحقل كمومي]

تنظر نظرية التضخم إلى **"حقل التضخم" (أو الإنفلاتون)** بنفس الطريقة: كحقل كمومي أساسي يملأ الكون المبكر. تمامًا مثل أي حقل كمومي آخر، يخضع حقل التضخم لتقلبات كمومية عفوية في قيمته وكثافة طاقته في كل نقطة من الفضاء.

تكميم حقل التضخم يعني أننا نتعامل معه باستخدام أدوات ومفاهيم ميكانيكا الكم. بدلًا من أن تكون قيمة الحقل محددة بدقة في كل مكان، فإنها تصبح كمية احتمالية، تخضع لتوزيعات احتمالية. هذه الطبيعة الكمومية لحقل التضخم هي المفتاح لفهم أصل التقلبات التي أدت إلى ظهور البنية الكونية.

[تضخيم التقلبات الكمومية إلى أبعاد كونية]

الآن، تخيل الكون المبكر وهو يخضع لفترة التضخم، وهو التوسع الأسي الهائل للفضاء الذي دفعه حقل التضخم ذو الطاقة الكامنة العالية. خلال هذا التوسع السريع، تم تمديد أي تقلبات كمومية صغيرة كانت موجودة في حقل التضخم بشكل هائل.

ما كان في الأصل تغيرًا كموميًا مجهريًا في قيمة حقل التضخم في نقطة صغيرة من الفضاء، تم تمديده ليصبح اختلافًا واسع النطاق في قيمة الحقل عبر مناطق متناسقة من الكون الموسع. هذه الاختلافات في قيمة حقل التضخم هي التي أدت بدورها إلى اختلافات في كثافة الطاقة في تلك المناطق.

[تحويل تقلبات الحقل إلى تقلبات في الزمكان والمادة]

عندما انتهت فترة التضخم وتحلل حقل التضخم إلى جسيمات أخرى، فإن هذه الاختلافات في كثافة الطاقة التي نشأت من التقلبات الكمومية المتضخمة أصبحت بمثابة تقلبات في كثافة المادة والطاقة في الكون الوليد الساخن والكثيف.
الأهم من ذلك، أن هذه التقلبات في كثافة الطاقة أدت أيضًا إلى تقلبات في نسيج الزمكان نفسه من خلال معادلات آينشتاين للجاذبية. المناطق ذات الكثافة الأعلى جذبت المزيد من المادة بسبب جاذبيتها الأقوى، مما أدى في النهاية إلى تكوين البنية واسعة النطاق للكون.

[البصمة الكمومية في الخلفية الكونية]

أحد أقوى الأدلة على هذه العملية هو البصمات التي تركتها هذه التقلبات الكمومية المتضخمة في الخلفية الكونية الميكروية **(CMB).** الاختلافات الطفيفة في درجة حرارة **CMB** في السماء تتوافق بشكل مذهل مع التنبؤات الإحصائية للتقلبات الكمومية في حقل التضخم التي تم تمديدها إلى أبعاد كونية. هذه **"البقع"** الساخنة والباردة في هي في الأساس صور للتقلبات الكمومية في حقل التضخم في اللحظات الأولى **CMB** للكون، مكبرة بواسطة التوسع التضخمي.

إن تكميم حقل التضخم هو مفهوم أساسي لفهم كيف يمكن لأحداث كمومية عفوية على أصغر المقاييس أن تصبح البذور التي نمت لتشكل الكون الذي نراه. من خلال التعامل مع حقل التضخم ككيان كمومي يخضع للتقلبات، يمكننا أن نفهم كيف تم تضخيم هذه التقلبات المجهرية بواسطة التوسع الأسي للفضاء لتصبح الاختلافات الكبيرة في كثافة المادة والطاقة التي أدت في النهاية إلى ظهور المجرات والمناقيد المجرية. إن دراسة بصمات هذه التقلبات الكمومية في الخلفية الكونية الميكروية تقدم لنا نافذة فريدة على أصول الكون في أعمق مستوياته الكمومية.

الآن مع الجوهرية بين مفهومين أساسيين في علم كونيات الكم ونظرية التضخم: الطاقة الفراغية والتضخم الكوني.
فهم هذه العلاقة يمثل خطوة حاسمة نحو كشف اللغز وراء الدافع المحتمل للتوسع الأسي الهائل الذي شهده الكون في بداياته المتناهية الصغر.

[الفراغ ليس فارغًا - عالم الكم الكامن]

في الفيزياء الكلاسيكية، يُتصور الفراغ على أنه منطقة خالية تمامًا من أي مادة أو طاقة. لكن في عالم ميكانيكا الكم، تتغير هذه الصورة جذريًا. حتى في غياب الجسيمات الحقيقية، يظل الفراغ يعج بنشاط كمومي خفي. ينبثق هذا النشاط من مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ، الذي يسمح بتقلبات عفوية ومؤقتة في الطاقة. هذه التقلبات تؤدي إلى ظهور واختفاء أزواج من الجسيمات الافتراضية والجسيمات المضادة، حاملة معها طاقة كامنة عابرة قبل أن تفني بعضها البعض مرة أخرى. هذه الطاقة الكامنة المتأصلة في الفراغ الكمومي تُعرف باسم **"طاقة الفراغ"**.

[الطاقة الفراغية كثابت كوني - فكرة آينشتاين تعود للحياة]

في سياق نظرية النسبية العامة، أدخل ألبرت آينشتاين مفهوم **"الثابت الكوني"** في معادلاته في محاولة لجعل الكون ثابتًا **(غير متوسع أو منكمش)** وهو الاعتقاد السائد في ذلك الوقت. بعد اكتشاف توسع الكون، تراجع آينشتاين عن فكرة الثابت الكوني واعتبرها **"أكبر خطأ في حياته"** لكن مع ظهور علم كونيات الكم ونظرية التضخم، عاد مفهوم الثابت الكوني **(أو ما تشابهه)** ليحظى باهتمام جديد. يمكن تفسير طاقة الفراغ الكمومي على أنها

تساهم في قيمة الثابت الكوني. إذا كانت طاقة الفراغ ذات قيمة موجبة وثابتة، فإنها ستنتج قوة تنافرية منتشرة في جميع أنحاء الفضاء، مما يؤدي إلى تسارع توسع الكون.

[العلاقة بين الطاقة الفراغية والتضخم - نظريتان لنفس العملة؟]

العلاقة الدقيقة بين طاقة الفراغ الكمومي وحقل التضخم لا تزال موضوع بحث نشط وتكهنات نظرية. هناك عدة وجهات نظر محتملة:

* حقل التضخم كمظهر من مظاهر طاقة الفراغ: قد يكون حقل التضخم نفسه تجسيدًا أو مكونًا محددًا من طاقة الفراغ الكمومي الأكبر عمومية. في هذه الحالة، فإن الطاقة الكامنة لحقل التضخم هي شكل محدد من طاقة الفراغ التي كانت مهيمنة في الكون المبكر.

* طاقة الفراغ كمصدر للطاقة الكامنة لحقل التضخم: قد تكون العمليات الكمومية الأساسية التي تولد طاقة الفراغ هي أيضًا المسؤولة عن إثارة حقل التضخم ودفعه إلى حالة الطاقة الكامنة العالية التي قادت التضخم.

* كيانات منفصلة ولكن متفاعلة: قد يكون حقل التضخم وطاقة الفراغ كيانين فيزيائيين منفصلين ولكنهما يتفاعلان مع بعضهما البعض، حيث تؤثر طاقة الفراغ على تطور حقل التضخم أو العكس.

[الطاقة الفراغية اليوم - تفسير التسارع الحالي؟]

من المثير للاهتمام أن مفهوم الطاقة الفراغية قد يكون له صلة بتسارع توسع الكون الذي نرصده اليوم. يقترح بعض علماء الكونيات أن **"**الطاقة المظلمة**"** المسؤولة عن هذا

عن هذا التسارع قد تكون مرتبطة بشكل ما بطاقة الفراغ الكمومي. ومع ذلك، فإن قيمة طاقة الفراغ الكمومي المتوقعة نظريًا أكبر بكثير من قيمة الطاقة المظلمة المرصودة، مما يمثل أحد أكبر الألغاز في الفيزياء الحديثة **(**"مشكلة الثابت الكوني"**).**

إن العلاقة بين الطاقة الفراغية والتضخم الكوني تقع في قلب فهمنا للكون المبكر وتطوره اللاحق. بينما لا يزال الرابط الدقيق بينهما قيد الدراسة، فإن فكرة أن الطاقة الكامنة المتأصلة في الفراغ الكوني، سواء تجلت في شكل حقل التضخم أو كمكون أساسي للثابت الكوني، قد تكون هي المحرك وراء التوسع النسبي الأولي للكون وتمثل رؤية عميقة في أصول كل شيء. استكشاف هذه العلاقة المعقدة يقودنا إلى حدود معرفتنا بالفيزياء الأساسية وعلم الكونيات.

[الخلفية الكونية الميكروية - لقطة للكون الوليد]

تخيل الكون في مرحلة مبكرة، حارًا وكثيفًا ومليئًا بمزيج من البروتونات والإلكترونات والفوتونات المتفاعلة بقوة. مع استمرار الكون في التوسع والتبريد، وصل إلى نقطة حرجة حيث انخفضت درجة الحرارة بما يكفي لتكوين ذرات الهيدروجين المتعادلة. في هذه اللحظة، التي تعرف باسم **"إعادة التركيب"**، توقف الفوتونات عن التفاعل بشكل متكرر مع المادة وبدأت في التحرك بحرية عبر الفضاء. هذه الفوتونات الحرة هي ما نرصده اليوم على شكل الخلفية الكونية الميكروية، وهي بمثابة **"صدى"** للانفجار العظيم.

[التجانس المذهل مع اختلافات دقيقة]

أول ما يلفت النظر في **CMB** هو تجانسه المذهل في درجة الحرارة عبر السماء. ومع ذلك، عندما يقوم العلماء بقياس درجة حرارة هذا الإشعاع بدقة عالية جدًا، يكتشفون اختلافات طفيفة للغاية، لا تتجاوز بضعة أجزاء من مائة ألف من درجة الحرارة المتوسطة البالغة حوالي ٢.٧ درجة كلفن. هذه الاختلافات الصغيرة في درجة الحرارة هي ما نشير إليه بالتقلبات في **CMB.**

[التقلبات الكمومية المتضخمة - مصدر الاختلافات الحرارية]

وفقًا لنظرية التضخم الكوني، فإن هذه التقلبات الطفيفة في درجة حرارة هي في الواقع بصمات للتقلبات الكمومية الأولية التي حدثت في حقل **CMB** التضخم خلال فترة التوسع الأسي. كما شرحنا سابقًا، تم تمديد هذه التقلبات الكمومية المجهرية إلى أبعاد كونية بواسطة التضخم.

عندما انتهت فترة التضخم وتحلل حقل التضخم، فإن هذه التقلبات في كثافة الطاقة الأولية أدت إلى اختلافات طفيفة في كثافة المادة في الكون الوليد. المناطق التي كانت لديها كثافة أعلى قليلاً جذبت المزيد من المادة بسبب جاذبيتها، وعندما وصل الكون إلى مرحلة إعادة التركيب وإطلاق **CMB**، فإن هذه الاختلافات في كثافة المادة تركت آثارًا طفيفة على درجة حرارة الفوتونات.

[كيف تعكس التقلبات الحرارية اختلافات الكثافة]

المناطق الأكثر كثافة في الكون المبكر كانت لديها جاذبية أقوى. الفوتونات القادمة من هذه المناطق فقدت جزءًا صغيرًا من طاقتها أثناء محاولتها الهروب من هذا السحب الجذبي، مما أدى إلى انزياح طفيف في ترددها نحو الأحمر وبالتالي ظهورها أكثر برودة في **CMB.** على العكس من ذلك، الفوتونات القادمة من مناطق أقل

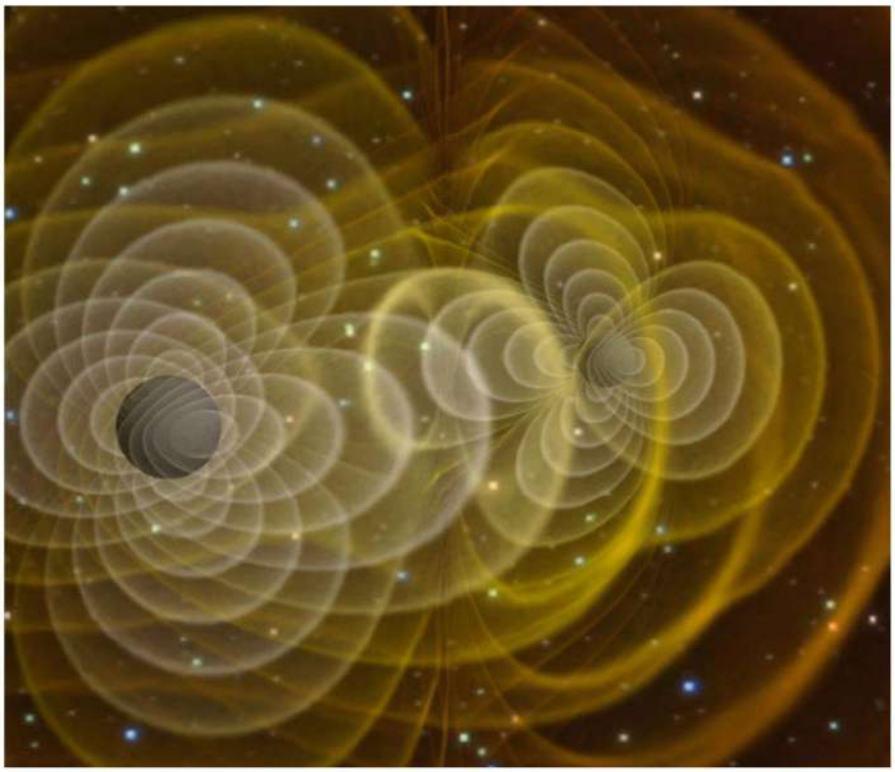
كثافة لم تفقد قدرًا كبيرًا من طاقتها وظهرت أكثر سخونة قليلاً.

الخريطة التفصيلية لتقلبات درجة حرارة **CMB** هي بمثابة **"**صورة**"** للكون في مرحلة مبكرة جدًا، وتحمل معلومات قيمة عن الخصائص الأولية للكون، بما في ذلك طبيعة التقلبات الكمومية التي أدت إليها. من خلال دراسة الأنماط الإحصائية لهذه التقلبات، يمكن لعلماء الكونيات استخلاص معلومات حول محتوى الكون **(**مثل كمية المادة المظلمة والطاقة المظلمة**)**، وهندسته، وحتى طبيعة التضخم الكوني نفسه.

نغامر في أعماق نظرية علم كونيات الكم، ونتناول مفهومًا بالغ الأهمية ولكنه لا يزال قيد التطور والاستكشاف:

تكميم الزمكان.

بينما تصف نظرية النسبية العامة الزمكان بأنه نسيج ناعم ومستمر يتأثر بالكتلة والطاقة، يقترح علم كونيات الكم أن هذا الوصف الكلاسيكي قد لا يكون كاملاً على أصغر المقاييس، وأن الزمكان نفسه قد يكون له طبيعة كمومية.



[الزمكان في الفيزياء الكلاسيكية - ساحة الأحداث الكونية]

في نظرية النسبية العامة لألبرت آينشتاين، يُنظر إلى الزمكان على أنه كيان ديناميكي رباعي الأبعاد، يجمع بين الأبعاد المكانية الثلاثة والزمن. الجاذبية ليست قوة منفصلة، بل هي انحناء هذا الزمكان بسبب وجود المادة والطاقة. الأجسام تتحرك على طول أقصر المسارات في هذا الزمكان المنحني، وهو ما نفسره على أنه تأثير الجاذبية. في هذا الوصف الكلاسيكي، يُعتبر الزمكان كيانًا مستمرًا وقابلًا للقسمة إلى ما لا نهاية.

[الحاجة إلى تكميم الزمكان - تجاوز حدود الكلاسيكية]

مع ذلك، عندما نحاول فهم الكون في مراحله الأولى المتناهية الصغر والكثافة الهائلة، أو في المناطق ذات الجاذبية الشديدة مثل الثقوب السوداء، يصبح من الواضح أن الفيزياء الكلاسيكية وحدها قد لا تكون كافية. في هذه الظروف المتطرفة، من المتوقع أن تلعب تأثيرات ميكانيكا الكم دورًا حاسمًا.
ميكانيكا الكم تصف العالم على أصغر المقاييس بأنه منفصل أو **"مكمم"**. الطاقة، والزخم، والكميات الفيزيائية الأخرى تأتي في وحدات منفصلة تسمى **"كمّات"**. يبدو من المنطقي أن نفترض أن الزمكان نفسه، الذي يتفاعل مع المادة
والطاقة، قد يخضع أيضًا لشكل من أشكال التكميم على مقياس صغير جدًا يُعرف باسم طول بلانك **(**حوالي **10^{-35}** متر**)**.

[تصورات الزمكان الكمومي - حبيبات أو شبكات؟]

ماذا يعني أن يكون الزمكان **"مكمماً"**؟ لا يوجد حتى الآن وصف واحد متفق عليه لكمومية الزمكان، لكن هناك العديد من الأفكار والنماذج النظرية التي تحاول تصوير طبيعته الكمومية:

* الزمكان الحبيبي: يقترح أحد التصورات أن الزمكان ليس مستمراً، بل يتكون من وحدات أساسية منفصلة أو **"حبيبات"** صغيرة جداً، ربما بحجم طول بلانك. هذه الوحدات الأساسية قد تكون مرتبطة ببعضها البعض بطرق معقدة لتكوين النسيج الذي نختبره كزمكان مستمر على المقاييس الأكبر.

* الزمكان غير التبادلي: تقترح بعض النظريات أن إحداثيات الزمكان نفسها قد لا تتبادل كما نفعل في الفيزياء الكلاسيكية **(X, Y, Z).** هذا يعني أن ترتيب قياسات الموقع والزمن قد يؤثر على النتيجة، وهو مفهوم أساسي في ميكانيكا الكم.

* الزمكان الشبكي: تصورات أخرى تقترح أن الزمكان قد يكون له بنية أساسية تشبه الشبكة أو الرسم البياني، حيث **"العقد"** تمثل نقاطاً في الزمكان و **"الروابط"** تمثل العلاقات بينها. تطور هذه الشبكة بمرور الوقت قد يفسر ديناميكيات الزمكان والجاذبية.

* الزمكان الناشئ: تقترح بعض الأفكار الأكثر جذرية أن الزمكان ليس كياناً أساسياً، بل هو خاصية ناشئة من نظام أكثر أساسية، ربما يكون نظاماً كمومياً متشابكاً. في هذا السيناريو، فإن تكميم الزمكان يعني فهم المكونات الأساسية التي ينبثق منها.

تكميم الزمكان هو أحد أصعب التحديات في الفيزياء النظرية الحديثة. لا يوجد حتى الآن نظرية متكاملة ومقبولة للجاذبية الكمومية يمكنها أن تقدم وصفاً كاملاً للزمكان الكمومي. بعض التحديات الرئيسية تشمل:

* غياب تجارب مباشرة: التأثيرات الكمومية للزمكان من المتوقع أن تكون مهمة فقط على مقياس طول بلانك، وهو مقياس صغير جداً بحيث لا يمكن الوصول إليه بالتجارب الحالية أو المستقبلية القريبة.

* التناقضات النظرية: محاولات تطبيق طرق التكميم القياسية المستخدمة في نظريات الحقول الكمومية على الجاذبية تؤدي إلى نتائج غير منطقية، مثل اللانهائيات التي لا يمكن التخلص منها.

* الفهم المفاهيمي: طبيعة الزمكان نفسها في ميكانيكا الكم لا تزال غير واضحة. هل هو خلفية ثابتة تتطور عليها الحقول الكمومية، أم أنه كيان ديناميكي مكمم بالكامل؟

إن تكميم الزمكان يمثل حدوداً مثيرة في علم كونيات الكم. على الرغم من أننا لا نزال بعيدين عن وجود صورة كاملة للزمكان على أصغر المقاييس، فإن الأفكار والنماذج النظرية التي يتم استكشافها تقدم وعوداً بإحداث ثورة في فهمنا لأعمق طبيعة الواقع. إن الإجابة عن سؤال ما إذا كان الزمكان مكمماً وكيف يبدو هذا الزمكان الكمومي قد يكشف أسراراً جديدة عن أصول الكون ومصيره.

(نظرية الأوتار)

[الجسيمات ليست نقاطاً - اهتزازات كونية صغيرة]

في الفيزياء التقليدية، يُنظر إلى الجسيمات الأولية مثل الإلكترونات والكواركات على أنها نقاط لا أبعاد لها. لكن نظرية الأوتار تقترح بديلاً ثورياً: أن هذه "الجسيمات" ليست في الحقيقة نقاطاً، بل هي حلقات أو خيوط صغيرة جداً تهتز باستمرار. تماماً مثل اهتزاز أوتار الآلات الموسيقية ينتج نغمات مختلفة، فإن أنماط اهتزاز هذه "الأوتار الكونية" المختلفة تنتج أنواعاً مختلفة من الجسيمات، بما في ذلك الجسيمات التي تحمل القوى الأساسية مثل الفوتونات والغلوونات، وحتى الغرافيتون، الجسيم المفترض الذي يحمل قوة الجاذبية.

[الجاذبية الكمومية تظهر من الاهتزازات]

أحد أكثر الجوانب إثارة في نظرية الأوتار هو أنها تتضمن بشكل طبيعي الجاذبية في وصفها الكمومي. فكرة الغرافيتون تتنبأ كأحد أنماط اهتزاز الأوتار. هذا يمثل خطوة هامة نحو تحقيق هدف طال انتظاره في الفيزياء: نظرية موحدة تصف جميع القوى الأساسية، بما في ذلك الجاذبية، ضمن إطار كمومي متسق.

[أبعاد إضافية - مسرح كوني أوسع]

تتطلب الصيغ الرياضية لنظرية الأوتار وجود أبعاد مكانية إضافية غير الأبعاد الثلاثة التي نختبرها في حياتنا اليومية. قد تكون هذه الأبعاد الإضافية ملفوفة على نفسها في حلقات صغيرة جداً بحيث لا يمكننا ملاحظتها بشكل مباشر. ومع ذلك، فإن وجود هذه الأبعاد الإضافية له آثار عميقة على طبيعة الجسيمات والقوى، ويمكن أن يلعب دوراً في فهم خصائص الكون المبكر.

[نظرية الأوتار والكون المبكر جداً]

في سياق علم كونيات الكم، تقدم نظرية الأوتار إمكانية وصف حالة الكون في أقصى بداياته، في عصور بلانك حيث كانت الكثافة والطاقة هائلتين وكانت تأثيرات الجاذبية الكمومية حاسمة. قد تقدم نظرية الأوتار إطاراً لفهم كيف نشأ الزمكان نفسه، وما هي الظروف التي أدت إلى فترة التضخم الكوني المفترضة. بعض النماذج الكونية المستندة إلى نظرية الأوتار تستكشف أفكاراً مثل "كون ما قبل الانفجار العظيم" وسيناريوهات أخرى تتجاوز النموذج القياسي للانفجار العظيم.

تحديات وآفاق مستقبلية

على الرغم من جاذبيتها النظرية، تواجه نظرية الأوتار تحديات كبيرة. لا يوجد حتى الآن دليل تجريبي مباشر يدعمها، والوصف الرياضي الكامل للنظرية معقد للغاية. بالإضافة إلى ذلك، هناك العديد من **"نسخ"** مختلفة من نظرية الأوتار، ولا يزال العلماء يعملون على فهم العلاقة بينها وتحديد ما إذا كانت تمثل جوانب مختلفة لنظرية واحدة أساسية **("نظرية-إم").** ومع ذلك، تظل نظرية الأوتار مجالاً نشطاً للبحث، حيث يأمل الفيزيائيون في أن تقدم في النهاية إطاراً موحداً وأساسياً لفهم الكون على جميع المقاييس، من أصغر الجسيمات إلى أكبر الهياكل الكونية، وحتى اللحظات الأولى من الوجود نفسه.

* الطاقة المظلمة والثابت الكوني

نتعمق في العلاقة المعقدة بين مفهومين محوريين في علم الكونيات الحديث، واللذين يكتسبان أهمية خاصة في سياق علم كونيات الكم: الطاقة المظلمة والثابت الكوني. بينما يمثل الثابت الكوني تفسيراً محتملاً للطاقة المظلمة ضمن إطار النسبية العامة، فإن علم كونيات الكم يقدم وجهات نظر أعمق حول طبيعتهما المحتملة وأصولهما.

كما ذكرنا سابقاً، أدخل ألبرت أينشتاين الثابت الكوني (يرمز له بالرمز ٨) في معادلاته للنسبية العامة في محاولة للحصول على حل لكون ثابت. بعد اكتشاف التوسع الكوني، تخلى عن هذه الفكرة. ومع ذلك، مع اكتشاف التسارع الحالي لتوسع الكون في أواخر التسعينيات، عاد الثابت الكوني إلى الواجهة كأحد أبسط التفسيرات المحتملة للقوة الغامضة التي تدفع هذا التسارع، والتي أُطلق عليها اسم الطاقة المظلمة.

في هذا السياق، يُنظر إلى الثابت الكوني على أنه كثافة طاقة كامنة متأصلة في الفضاء نفسه، وهي ثابتة في الزمان والمكان. وفقاً لمعادلة أينشتاين **E=mc^2**، فإن هذه الطاقة تمتلك تأثيراً جاذبياً، ولكن بشكل غريب، يكون تأثيرها تنافرياً، مما يؤدي إلى تسريع التوسع الكوني.

[الطاقة المظلمة - المصطلح الأوسع والاحتمالات المتعددة]

بينما يمثل الثابت الكوني أبسط شكل ممكن للطاقة المظلمة، فإن مصطلح **"الطاقة المظلمة"** أوسع ويشمل أي شكل من أشكال الطاقة ذات الضغط السلبي الذي يمكن أن يفسر التسارع المرصود. قد تتضمن النظريات الأخرى للطاقة المظلمة مجالات ديناميكية تتغير قيمتها بمرور الوقت **("الجوهر")** أو حتى تعديلات على نظرية الجاذبية نفسها.

[علم كونيات الكم - البحث عن الأصول الكمومية]

عندما ننتقل إلى إطار علم كونيات الكم، يصبح السؤال عن طبيعة الطاقة المظلمة والثابت الكوني أكثر عمقاً. يسعى علم كونيات الكم إلى فهم أصول الكون في مراحله الأولى المتطرفة، حيث من المتوقع أن تلعب تأثيرات الكم دوراً حاسماً.

في هذا السياق، يمكن أن تظهر الطاقة الفراغية الكمومية كمرشح محتمل للثابت الكوني أو كمكون مساهم فيه. تنبأ نظرية الحقول الكمومية بوجود طاقة مرتبطة بالفراغ نفسه، ناتجة عن التقلبات الكمومية للحقول الأساسية. ومع ذلك، فإن الحسابات النظرية لقيمة هذه الطاقة الفراغية الكمومية أكبر بكثير من قيمة الثابت الكوني المرصودة، مما يمثل أحد أكبر الألغاز في الفيزياء متكلة الثابت الكوني

* وجهات نظر كمومية محتملة

يقدم علم كونيات الكم بعض الأفكار حول طبيعة الثابت الكوني والطاقة المظلمة:

* خاصية ناشئة: قد لا تكون الطاقة المظلمة أو الثابت الكوني كياناً أساسياً، بل خاصية ناشئة من ديناميكيات الزمكان الكمومي نفسه على نطاق واسع.

* تأثيرات كمومية للجاذبية: قد تفسر نظرية جاذبية كمومية كاملة، مثل الجاذبية الكمومية الحلقية أو نظرية الأوتار، قيمة صغيرة ولكن غير صفرية للثابت الكوني كنتيجة لتأثيرات كمومية للجاذبية على نطاق كوني.

* مجالات كمومية إضافية: قد يكون هناك مجالات كمومية لم يتم اكتشافها بعد تساهم في الطاقة المظلمة ولها خصائص تجعل قيمتها صغيرة وغير صفرية.

[التحديات والآفاق المستقبلية]

يبقى فهم طبيعة الطاقة المظلمة والثابت الكوني أحد أكبر التحديات في علم الكونيات وعلم الفيزياء الأساسي. يتطلب حل "مشكلة الثابت الكوني" على وجه الخصوص فهماً أعمق للعلاقة بين ميكانيكا الكم والجاذبية. قد تقدم التطورات المستقبلية في علم كونيات الكم، بالإضافة إلى المزيد من الملاحظات الكونية الدقيقة، رؤى جديدة حول هذه المكونات الغامضة التي تهيمن على مصير الكون.

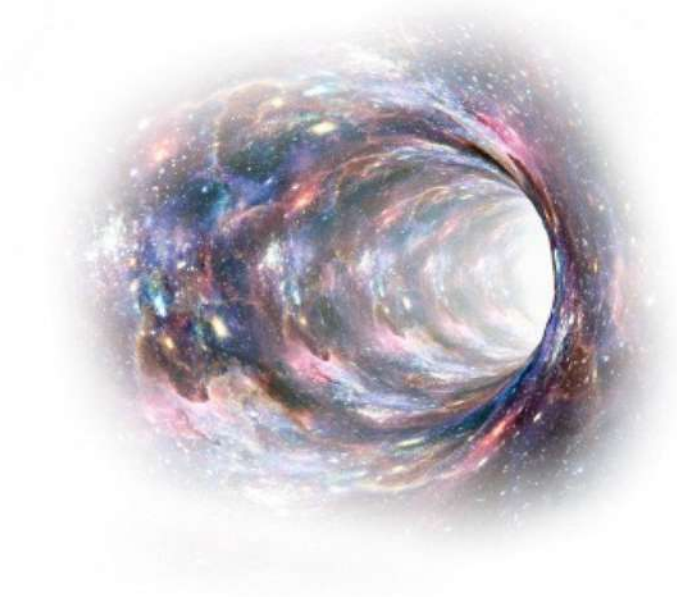
حسناً

في حين أن الثابت الكوني يمثل تفسيراً بسيطاً وجذاباً للطاقة المظلمة ضمن إطار النسبية العامة، فإن علم كونيات الكم يفتح آفاقاً أوسع لاستكشاف أصولهما وطبيعتهما الأساسية. إن فهم الطاقة المظلمة والثابت الكوني على مستوى كمومي هل قد يكون المفتاح لكشف أسرار الكون وتطوره؟

سأترك لك التفكير..

[كيف ترى نظرية الكم الثقوب السوداء]

نتناول لغزاً كونياً يكتسب بعداً جديداً ومثيراً عند النظر إليه من منظور ميكانيكا الكم:
الثقوب السوداء.
بينما تصف النسبية العامة الثقوب السوداء بأنها مناطق في الزمكان ذات جاذبية قوية للغاية لدرجة أن لا شيء، ولا حتى الضوء، يمكنه الهروب منها، فإن علم كونيات الكم يقدم رؤى أعمق وأكثر تعقيداً لطبيعتها وسلوكها على المستوى الكمومي.



[الثقب الأسود الكلاسيكي - وحش الجاذبية المطلق]

وفقاً لنظرية النسبية العامة، يتشكل الثقب الأسود عندما تنهار كمية كافية من المادة في حجم صغير جداً، مما يؤدي إلى انحناء الزمكان بشكل لا نهائي عند نقطة مركزية تُعرف باسم المفردة. يحيط بالمفردة حد وهمي يُعرف باسم أفق الحدث، وهو النقطة التي يصبح بعدها الهروب مستحيلاً. أي شيء يعبر أفق الحدث يُجذب حتماً نحو المفردة. في هذا الوصف الكلاسيكي، الثقوب السوداء هي مناطق مظلمة صامتة، لا تبعث أي شيء.

[ظهور التناقض - معلومات مفقودة في الهاوية؟]

لكن عندما نحاول دمج ميكانيكا الكم مع فهمنا للثقوب السوداء، تظهر بعض التناقضات العميقة. إحدى أبرز هذه التناقضات هي مفارقة معلومات الثقب الأسود. تنص ميكانيكا الكم على أن المعلومات لا يمكن أن تُفقد بشكل كامل. ومع ذلك، يبدو أن أي شيء يسقط في ثقب أسود يسحق عند المفردة، وتفقد جميع المعلومات المتعلقة بحالته الأصلية. هذا يتعارض مع مبدأ أساسي في ميكانيكا الكم.

[إشعاع هوكينج - همسات كمومية من الظلام]

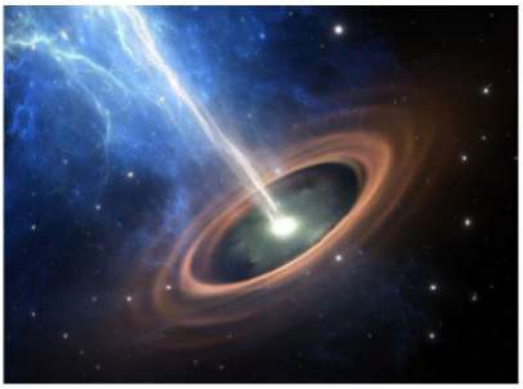
في سبعينيات القرن الماضي، قدم الفيزيائي ستيفن هوكينج رؤية جديدة: الثقوب السوداء ليست سوداء تمامًا، بل تبعث إشعاعًا حراريًا ضعيفًا بسبب تأثيرات كمومية بالقرب من أفق الحدث. يُعرف هذا الإشعاع باسم "إشعاع هوكينج". ينشأ هذا الإشعاع من أزواج الجسيمات الافتراضية التي تظهر وتختفي باستمرار بالقرب من أفق الحدث. في بعض الأحيان، يسقط أحد الجسيمين في الثقب الأسود بينما يهرب الجسيم الآخر إلى الفضاء على شكل إشعاع. تحليل: الثقب الأسود ليست حدًا قاطعًا تمامًا. هناك منطقة ضبابية حيث تتصارع قوانين الكم والجاذبية. أزواج من الجسيمات تنبثق من الفراغ، وقدرها يسحب أحدهما إلى الداخل بينما يدفع الآخر إلى الخارج، حاملاً معه جزءًا ضئيلاً من طاقة الثقب الأسود.

(صورة تظهر ما يبدو أنه ثقب أسود أو سديم نجمي**)**

الثقب الأسود ككيان ديناميكي - يفقد كتلته ببطء

نتيجة لإشعاع هوكينج، يفقد الثقب الأسود طاقته وكتلته ببطء بمرور الوقت. كلما كان الثقب الأسود أصغر، كان إشعاع هوكينج أقوى. وبالتالي، كان معدل فقدانه للكتلة أسرع. على مدى فترات زمنية طويلة جدًا **(**أطول بكثير من عمر الكون الحالي للثقوب السوداء الكبيرة**)**، يُعتقد أن:

الثقب الأسود سينفجر تمامًا في انفجار هائل من الإشعاع.



يقدم علم كونيات الكم بعض الأفكار حول طبيعة الثقوب السوداء على المستوى الكمومي:

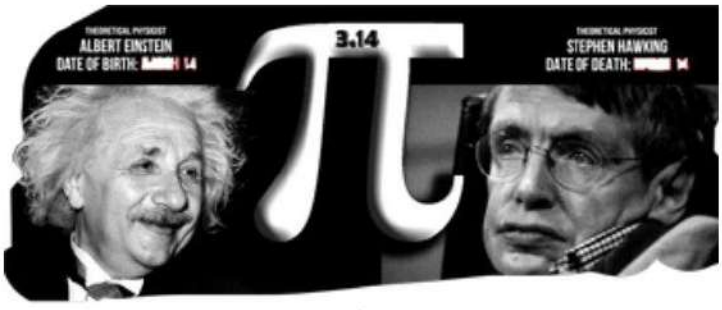
* أفق الحدث ليس حداً مطلقاً: على مقياس بلانك الصغير جداً، قد لا يكون أفق الحدث حداً واضحاً المعالم كما تصفه النسبية العامة. قد تكون هناك تقلبات كمومية تسمح بمرور بعض المعلومات أو الجسيمات بشكل احتمالي.

* المفردة الكمومية: بدلاً من المفردة الكلاسيكية ذات الكثافة اللانهائية، قد يكون هناك منطقة كمومية صغيرة ذات كثافة وطاقة محدودتين بسبب تأثيرات الكم. طبيعة هذه المفردة الكمومية لا تزال قيد البحث.

* الثقوب السوداء كحالات كمومية: قد يكون الثقب الأسود نفسه حالة كمومية معقدة، لها عدد هائل من الحالات الداخلية **(**مرتبطة بإنتروبيا الثقب الأسود**)**. فهم هذه الحالات الكمومية قد يكون مفتاح حل مفارقة المعلومات.

* الجاذبية الكمومية الحلقية والثقوب السوداء: تقدم الجاذبية الكمومية الحلقية نموذجاً للثقوب السوداء الكمومية حيث يتم استبدال المفردة بمنطقة ذات حجم أدنى، وقد يكون هناك احتمال **"**ارتداد**"** كمومي بدلاً من الانهيار الكامل.

إن الثقوب السوداء، التي تبدو في نظر الفيزياء الكلاسيكية وحوشاً صامتة، تصبح كيانات ديناميكية ومعقدة بشكل مذهل عند النظر إليها من منظور ميكانيكا الكم. إشعاع هوكينج ومفارقة المعلومات تغيرات إلى وجود فيزياء كمومية عميقة تعمل في هذه المناطق المتطرفة من الزمكان. يسعى علم كونيات الكم إلى تقديم وصف كامل ومنسق للثقوب السوداء على المستوى الكمومي، وهو ما قد يقودنا إلى فهم أعمق لطبيعة الجاذبية والزمكان والمعلومات نفسها.



* الانتقالات الطورية في الكون الطوري

ندخل إلى مسرح الكون المبكر جدًا، حيث لم يكن الزمان والمكان بالصورة المألوفة لنا، وحيث خضع الكون لسلسلة من التغيرات الجذرية أشبه بتحولات مفاجئة في حالة المادة، تُعرف باسم الانتقالات الطورية. هذه التحولات، التي يُعتقد أنها حدثت في جزء ضئيل من الثانية بعد الانفجار العظيم، لعبت دورًا حاسمًا في تحديد القوى الأساسية التي تحكم الكون والجسيمات الأولية التي تشكله. سنستكشف هذه الأحداث الكونية الدرامية بطريقة تفاعلية، متخيلين أنفسنا شهودًا على هذه اللحظات التكوينية.

[الكون كحساء بدائي - توحيد القوى في درجات حرارة لا تصدق]

تخيل الكون في أول جزء من الثانية بعد ولادته. كانت درجة الحرارة والكثافة هائلتين لدرجة أن القوى الأساسية الأربعة التي نعرفها اليوم - الجاذبية، والقوة الكهرومغناطيسية، والقوة النووية القوية، والقوة النووية الضعيفة - ربما كانت موحدة في قوة واحدة شاملة. الجسيمات الأولية لم تكن متميزة كما هي الآن؛ بل كانت خليطًا ساخنًا وكثيفًا يتفاعل باستمرار. تخيل: أنك تقف في هذا الكون البدائي. الطاقة المحيطة بك لا تصدق. لا يمكنك حتى تمييز الضوء أو المادة بالمعنى الذي نعرفه. كل شيء يتأرجح بين الوجود والعدم في بحر من الطاقة. هل يمكنك تخيل كيف يمكن لقوى مختلفة أن تبدو وكأنها قوة واحدة في مثل هذه الظروف المتطرفة؟

[الانفصال الأول - الجاذبية تنفصل عن البقية]

مع استمرار الكون في التوسع والتبريد بسرعة، بدأت درجة الحرارة تنخفض. عند نقطة حرجة معينة، حدث أول انتقال طوري كبير: انفصال قوة الجاذبية عن القوى الأخرى. لم تعد الجاذبية تتصرف بنفس الطريقة التي تتصرف بها القوى الأخرى؛ بل أصبحت قوة فريدة ومستقلة، تحكم تفاعلات الأجسام ذات الكتلة والطاقة على نطاقات

واسعة. تخيل: الآن، تشعر بتأثير مختلف قليلًا. هناك قوة بدأت تبرز، قوة تجذب كل شيء نحو شيء آخر، لكنها تبدو أضعف بكثير من القوى الأخرى التي لا تزال موحدة. هل يمكنك تصور كيف أن انفصال قوة أساسية يمكن أن يغير طبيعة الكون بشكل جذري؟

[حقبة التضخم - توسع هائل يغير كل شيء]

في مرحلة لاحقة، يُعتقد أن الكون خضع لانتقال طوري آخر أدى إلى فترة التضخم الكوني. خلال هذه الفترة القصيرة جدًا، توسع الكون بشكل أسي هائل، وربما بسبب تغيير في حالة حقل كمومي معين **(حقل التضخم).** هذا التوسع الهائل حل بعض المشكلات الأساسية في النموذج القياسي للانفجار العظيم، كما ناقشنا سابقاً. تخيل: فجأة، بدأ الكون من حولك في التوسع بسرعة لا تصدق. المسافات تتضاعف في جزء ضئيل من الثانية. تقلبات كمومية صغيرة تتمدد لتصبح اختلافات كبيرة. هل يمكنك تصور كيف يمكن لهذا التوسع الهائل أن يترك بصمات على الكون الذي سيأتي لاحقاً؟

[الانفصال الكبير الثاني - القوة الكهرومغناطيسية تنفصل]

مع استمرار التبريد، حدث انتقال طوري آخر بالغ الأهمية: انفصال القوة الكهروضعيفة إلى قوتين متميزتين - القوة الكهرومغناطيسية والقوة النووية الضعيفة. هذا الانفصال الطوري مرتبط بآلية هيغز التي أعطت الجسيمات الأولية كتلتها. تخيل: تشعر الآن بانقسام في القوة التي كانت موحدة من قبل. تظهر قوة جديدة تتحكم في الضوء والتفاعلات الكهربائية والمغناطيسية، بينما تظهر قوة أخرى مسؤولة عن بعض أنواع

الاضمحلال الإشعاعي. هل يمكنك تصور كيف أن هذا الانفصال أدى إلى ظهور جسيمات ذات كتل مختلفة، مما أثر على كيفية تفاعلها؟

أخيرًا، حدث انتقال طوري آخر أدى إلى انفصال القوة النووية القوية عن القوى الأخرى. أصبحت القوة النووية القوية قوة قصيرة المدى تربط الكواركات معًا لتكوين البروتونات والنيوترونات، وهي اللبنات الأساسية لنواة الذرات. تخيل: تشعر الآن بقوة جديدة تمامًا، قوة قوية جدًا تربط مكونات أصغر داخل الجسيمات التي تتشكل النواة الذرية. هل يمكنك تصور كيف أن هذا الانفصال سمح بتكوين العناصر الأولية في الكون؟

كانت الانتقالات الطورية في الكون المبكر لحظات حاسمة تشكلت القوى الأساسية والجسيمات الأولية التي نعرفها اليوم. من حالة موحدة في درجات حرارة لا تصدق، مر الكون بسلسلة من **"الانفصالات"** التي أدت إلى ظهور القوى الأربعة المتميزة والجسيمات التي تتفاعل من خلالها. هذه الأحداث الدرامية، التي يُعتقد أنها مدفوعة بتغيرات في حالة الحقول الكمومية مع تبرد الكون، وضعت الأساس لتطور الكون إلى ما هو عليه الآن. على الرغم من أننا لا نستطيع السفر عبر الزمن لمشاهدة هذه الأحداث مباشرة، فإن فهمنا لها من خلال علم كونيات الكم يقدم لنا لمحة رائعة عن اللحظات الأكثر تكوينية في تاريخ كوننا.

في ختام رحلتنا عبر علم كونيات الكم، نعود إلى السؤال الأزلي: ما هو مصير هذا الكون العجيب؟

عندما ننظر إلى المستقبل من منظور يدمج ميكانيكا الكم في علم الكونيات النسبي، تتشابك الاحتمالات وتتداخل الرؤى. بينما يرجح النموذج القياسي لعلم الكونيات، المدعوم بالأدلة الرصدية الحالية، سيناريو الموت الحراري أو ربما التمزق العظيم بسبب تأثير الطاقة المظلمة، فإن علم كونيات الكم يفتح آفاقًا جديدة للتكهن:

* الارتداد الكمومي الدوري: نقترح بعض نماذج علم الكونيات الكمي الحلقي فكرة أن الكون قد لا ينتهي بمفردة كما في **"الانسحاق العظيم"** الكلاسيكي، بل قد يرتد عند نقطة كثافة قصوى بسبب تأثيرات كمومية للجاذبية، ليبدأ دورة جديدة من التوسع. هذا يفتح الباب أمام سيناريوهات كونية دورية.

* تأثيرات كمومية غير متوقعة: على الرغم من أننا لا نزال في المراحل الأولى من فهم الجاذبية الكمومية، فمن الممكن أن تظهر تأثيرات كمومية غير متوقعة على نطاقات كونية شاسعة في المستقبل البعيد، مما يؤدي إلى سيناريوهات لم نتخيلها بعد.

* دور المعلومات الكمومية: مع تطور فهمنا لدور المعلومات الكمومية في الفيزياء، قد نكتشف أن مصير الكون مرتبط

بشكل جوهري بكيفية معالجة وتخزين وفقدان هذه المعلومات على نطاقات كونية.

في نهاية المطاف، يظل مصير الكون في نظر علم كونيات الكم لغزًا مفتوحًا، تتشابك فيه قوانين الفيزياء على أصغر وأكبر المقاييس. بينما يقدم لنا علم الكونيات النسبي إطارًا لفهم التطور الكوني على نطاق واسع، فإن ميكانيكا الكم قد تحمل المفاتيح لفهم اللحظات الأولى والمراحل النهائية

الفصل

الخامس

التوحيد

للوجود، وربما تقدم لنا رؤية مختلفة تمامًا للمنتهى الذي ينتظرنا في هذا الكون الشاسع الذي يحتضننا. رحلة البحث مستمرة، والكون لا يزال يحتفظ بالكثير من أسراره.

في رحلتنا لاستكشاف الكون، واجه الفيزيائيون تحديًا هائلًا: كيف يمكن التوفيق بين وصفين ناجحين للطبيعة، لكنهما يبدوان غير متوافقين على ما يبدو - ميكانيكا الكم التي تحكم عالم الجسيمات الدقيقة، ونظرية النسبية العامة التي تصف الجاذبية والكون على أوسع نطاقاته؟ لم يبدأ شخص واحد بمفرده هذا المسعى الطموح لتوحيد هذين الركنين الأساسيين للفيزياء، بل كان جهدًا جماعيًا استمر لعقود ويشارك فيه العديد من العقول اللامعة.

في أوائل القرن العشرين، شهدنا ولادة ثورتين في الفيزياء. في عام **1900**، وضع ماكس بلانك الأسس لميكانيكا الكم باقتراحه أن الطاقة تنتج وتمتص في وحدات منفصلة تعرف باسم **"كمات".** تبع ذلك عمل ألبرت أينشتاين الذي قدم تفسيرًا للتأثير الكهروضوئي بناءً على فكرة الكم في عام **1905.** وفي نفس العام نشر نظريته النسبية الخاصة التي غيرت مفاهيمنا عن الزمان والمكان. بعد عقد من الزمان، في عام **1915**، قدم أينشتاين نظريته النسبية العامة، التي وصفت الجاذبية ليس كقوة، بل كانحناء في نسيج الزمكان بسبب وجود المادة والطاقة. سرعان ما أدرك الفيزيائيون أن هاتين النظريتين، على الرغم من نجاحهما المذهل في مجاليهما الخاصة، كانتا تصفان جوانب مختلفة من الواقع بطرق مختلفة جذرياً. ميكانيكا الكم تتعامل مع عالم الاحتمالات والكميات المنفصلة، بينما تصور النسبية العامة عالمًا حتميًا ومستمراً للزمكان المنحني. محاولات مبكرة لدمجهما واجهت صعوبات كبيرة. على سبيل المثال، تطبيق مفاهيم الكم على الجاذبية أدى إلى نتائج غير منطقية مثل اللانهايات.

وفي هذه المرحلة، تشاركنا ستيفن هوكينج إلى الصورة، ليصبح أحد الشخصيات الرئيسية في محاولتنا لربط هذين النظريتين. تساءل هوكينج: ماذا يحدث عند حافة الثقب الأسود، ما يسمى بـ "أفق الحدث"؟ هل يمكن للميكانيكا الكمي أن يقدم لنا أي رؤى جديدة حول هذه الأجسام الغامضة؟ باستخدام أدوات فكرية جريئة، بدأ هوكينج في محاولة دمج أفكار من النسبية العامة والميكانيكا الكمي لفهم ما يحدث عند هذه الحدود المتطرفة. تخيل أنه يحاول تجميع قطعتين من أحجية مختلفة تمامًا. إحدى الأفكار الثورية التي توصل إليها هوكينج هي أن الثقوب السوداء ليست سوداء تمامًا من ذلك، توقع أنها يمكن أن تنبعث جسيمات. هذه الفكرة، التي أطلق عليها اسم "إشعاع هوكينج"، كانت مدهشة لأنها ربطت مفهوم الثقب الأسود، وهو جسم كلاسيكي تمامًا في النسبية العامة، بظاهرة كمية. تخيل أنك اكتشفت أن صندوقًا أسودًا تمامًا يمكن أن ينبعث منه ضوء خافت!

هذه المحاولة الأولية لدمج النسبية والميكانيكا الكمي من قبل هوكينج لم تقدم لنا نظرية كاملة وموحدة، لكنها كانت بمثابة شرارة أشعلت حماس الفيزيائيين. لقد أظهرت أن هناك اتصالًا عميقًا بين هذين العالمين اللذين بدا منفصلين. لقد

أظهرت أن هناك اتصالًا عميقًا بين هذين العالمين اللذين بدا منفصلين. لقد فتحت صفحة جديدة في كتاب الفيزياء، صفحة مليئة بالأسئلة المثيرة والتحديات الكبيرة، ولا تزال قيد الكتابة حتى يومنا هذا في سعينا لفهم أعمق للكون.

دعنا نفتح فصلًا جديدًا في كتابنا، بعنوان **"تداعيات اللقاء: عندما بدأت النظريات تتشابه"**. بعد محاولة هوكينج الجريئة لربط النسبية العامة بالميكانيك الكمي عند حدود الثقوب السوداء، بدأت تظهر نتائج مثيرة تشير إلى وجود تشابهات أعمق بين هاتين النظريتين، حتى في المناطق التي تبدو فيها مختلفة تمامًا. تخيل أننا ننظر إلى خريطتين مختلفتين لمنطقة غير مستكشفة. في البداية، تبدو الخريطتان مختلفتين تمامًا، لكن مع المزيد من الدراسة، نبدأ في ملاحظة بعض التضاريس المتشابهة، بعض الأنهار التي تتبع مسارات مماثلة. هذا ما بدأ الفيزيائيون في ملاحظته بين النسبية والميكانيك الكمي.

إحدى النتائج المهمة كانت فكرة إنتروبيا الثقب الأسود. تذكر أن الإنتروبيا في الديناميكا الحرارية هي مقياس للفوضى أو عدم الانتظام في النظام. بشكل مفاجئ، اكتشف الفيزيائيون أن الثقوب السوداء يمكن أن يكون لها إنتروبيا، وأن هذه الإنتروبيا تتناسب مع مساحة أفق الحدث الخاص بها. تخيل أن حجم الفوضى في الثقب الأسود ليس مرتبطًا بكمية المادة التي ابتلعها، بل بمساحة سطحه!

هذا الاكتشاف كان مذهلاً لأنه ربط مفهومًا ديناميكيًا حراريًا **(الإنتروبيا)** بخصائص هندسية **(مساحة أفق الحدث)** للزمكان، وهو مفهوم أساسي في النسبية العامة. بدأ الأمر وكأن لغة الديناميكا الحرارية بدأت تتسلل إلى وصف الجاذبية. نتيجة أخرى مثيرة للاهتمام ظهرت من دراسة المعلومات المفقودة في الثقوب السوداء. وفقًا للميكانيك الكمي، لا يمكن للمعلومات أن تختفي تمامًا. لكن، ماذا يحدث عندما يسقط شيء ما في ثقب أسود؟ هل تضيع المعلومات إلى الأبد؟

حاول هوكينج معالجة هذه المفارقة. واقترح في البداية أن المعلومات قد تضيع بالفعل. لكن هذا يتعارض مع مبادئ أساسية في الميكانيك الكمي. أدت هذه المحاولة إلى نقاشات حادة ومحاولات عديدة لحلها، مما دفع الفيزيائيين إلى التفكير بعمق في طبيعة المعلومات وعلاقتها بالزمكان والجاذبية. إحدى الأفكار التي ظهرت هي مبدأ هولوغرافيا.

تخيل صورة ثنائية الأبعاد مخزنة على سطح ثنائي الأبعاد، مثل الهولوغرام الموجود على بطاقة الائتمان. يقترح هذا المبدأ المعلن أن كل المعلومات الموجودة في حجم معين من الزمكان **(**مثل داخل الثقب الأسود**)** يمكن ترميزها على حدوده **(**مثل أفق الحدث**).** هذا يعني أن الكون ثلاثي الأبعاد الذي نراه قد يكون مجرد **"**صورة هولوغرافية**"** لمعلومات مخزنة على سطح ثنائي الأبعاد بعيد! هذه الفكرة الجذرية تشير إلى أن فهمنا للزمكان والجاذبية قد يكون سطحيًا، وأن الواقع قد يكون له طبيعة مختلفة تمامًا على المستوى الأساسي، ربما يكون أقرب إلى المفاهيم الموجودة في نظرية المعلومات والميكانيك الكمي.

بالإضافة إلى ذلك، بدأت تظهر محاولات لربط مفاهيم مثل التشابك الكمي، وهي ظاهرة غريبة حيث يمكن لجسيمين أن يكونا مرتبطين بحيث

يؤثر قياس أحدهما على الآخر بشكل فوري بغض النظر عن المسافة بينهما، ببنية الزمكان نفسه. تخيل أن: نسيج الزمكان ليس صلبًا كما يبدو، بل قد يكون متشابكًا على المستوى الكمي!

كل هذه النتائج، التي انبثقت من محاولة هوكينج الأولية، تشير إلى أن هناك لغة مشتركة أعمق بين النسبية العامة والميكانيك الكمي، لغة لم نفهمها بشكل كامل بعد. إنها تفتح لنا آفاقًا جديدة للتفكير في طبيعة الزمكان والجاذبية والمعلومات والكون نفسه. يبدو أن المحاولات، بعد لقائهم الأول، بدأوا في تبادل الأفكار، وكتشفوا عن أوجه تشابه مدهشة لم تكن متوقعة. ولا يزال كتابنا هذا يكتب، وكل صفحة جديدة تحمل وعودًا باكتشافات أكثر عمقًا.

والآن، دعنا ننتقل إلى جزء دراسي آخر مثير في كتابنا، بعنوان "حيت تتصادم العوالم: أوجه الاختلاف التي تولد الأسئلة". بينما نكشف في الفصل السابق عن بعض التشابهات المدهشة بين الكميات النسبية العامة والميكانيكية، فإن الحقيقة هي أن الاختلافات الأساسية بينهما لا تزال قائمة، وهي التي تدفع البحث العلمي إلى الأمام وتطرح علينا ألغازًا عميقة حول طبيعة الكون.

تخيل أننا نريد التحدث بلغة مختلفة تمامًا. كل لغة لها قواعدها الخاصة ومفرداتها الفريدة، وطريقة وصفها للعالم. هذا هو حال الكميات النسبية العامة والميكانيكية.

النسبية العامة، كما ذكرنا هي لغة الاستمرارية والحيوية. إنها تصف الزمكان بأنه نسيج أملس ونحن، وتتنبأ بالتطور بدقة تامة بمجرد معرفة الظروف الأولية. تخيل مسار كوكب يدور حول نجم - يمكننا حسابه بدقة أكبر قريبًا باستخدام معادلات أينشتاين. العالم في النسبية العامة يبدو منظمًا وقابلًا للتنبؤ به على نطاق واسع

على الجانب الآخر، يتحد الكم الميكانيكي لغة الكمية والاحتمالية للطاقة والجسيمات تأتي في "كمات" منفصلة، وليست مستمرة. وبدلا من التنبؤ الدقيق بموقع وسرعة جسيم، نتعامل مع الاحتمالات

تخيل إلكترونا يدور حول نواة - لا يمكننا تحديد مكانه بالضبط في أي لحظة، بل لدينا فقط دالة موجية تصف احتمالية وجوده في مناطق مختلفة. العالم على مستوى الكم يبدو عشوائيًا وغير مؤكد بطبيعته.

أحد أهم الاختلافات كمثال في طريقة التعامل مع كل نظرية مع الجاذبية. في النسبية العامة، الجاذبية ليست قوة بالمعنى التقليدي، بل هي انحناء في الزمكان ناتج عن وجود الطاقة، بينما تصف النظريات الكمية الأخرى (مثل الكهرومغناطيسية والقوى النووية) القوى بأنها ناتجة عن تبادل جسيمات حاملة للقوة.

المحاولات ل " تكميم الجاذبية " - أي وصفها باستخدام مبادئ الميكانيك الكمي عن طريق افتراض وجود جسيم حامل للجاذبية يسمى "غرافيتون" -واجهت صعوبات كبيرة. المعادلات التي تصف تفاعلات الغرافيتونات غالبًا ما تؤدي إلى نتائج غير منطقية أو لا نهائية. هذا يشير إلى أن الجاذبية قد لا تكون قوة أساسية بنفس الطريقة التي هي عليها القوى الأخرى، وأن وصفها الكمي قد يتطلب إطارًا نظريا جديدا تماما.

اختلاف جوهري آخر يظهر في مفهوم الزمكان نفسه في النسبية العامة الزمكان هو خلفية ديناميكية تتأثر بالمادة والطاقة. أما في الميكانيك الكمي القياسي، فيعتبر الزمكان خلفية ثابتة ومستمرة تحدت عليها العمليات الكمية.

فكرة أن الزمكان نفسه قد يكون كميًا أو له بنية حبيبية على مستوى صغير جدا هي فكرة جذرية تتحدى فهمنا الأساسي للواقع.

إضافة إلى ذلك، هناك مفارقة المعلومات في التقوب السوداء التي ذكرناها سابقا. هذا الاختلاف بين حتمية النسبية العامة **(** حيت كل شيء محدد بالظروف الأولية**)** وطبيعة الميكانيك الكمي التي تحافظ على المعلومات يمثل صراعًا عميقا. إذا اختفت المعلومات إلى الأبد في ثقب أسود يتبخر، فهذا ينتهك مبدأ أساسيا

في الميكانيك الكمي.

هذه الاختلافات ليست مجرد تفاصيل فنية، بل هي تشير إلى وجود فجوة عميقة في فهمنا الأساسي للكون. إنها تدفع الفيزيائيين إلى البحث عن نظرية موحدة يمكنها تجاوز هذه الانقسامات وتقديم وصف منسق للكون على جميع المقاييس، من أصغر الجسيمات إلى أكبر الهياكل الكونية.

في نهاية هذا الفصل، ندرك أن رحلة دمج النسبية والميكانيك الكمي لا تزال في بدايتها. الاختلافات بينهما ليست عقبات فحسب، بل هي أيضًا بوصلات توجهنا نحو مناطق جديدة في الفكر الفيزيائي. إنها تذكرنا بأن فهمنا للكون لا يزال غير مكتمل، وأن أعظم الاكتشافات غالبًا ما تأتي من محاولة التوفيق بين الأفكار التي تبدو متناقضة، ولا يزال كتابنا مفتوحا على الاحتمالات، ينتظر الفصل الذي سيحل فيه هذا الصراع بين العمالقة.

تعال ودعنا نفتح موضوعاً حاسما الذي قرأت هذا الكتاب من أجله وهو :

لماذا لا يمكننا توحيد النسبية والكم ؟

ولماذا يظل دمج العمالقة تحديًا ؟". حتى الآن، استكشفنا أوجه التشابه والتداعيات المثيرة لمحاولة دمج النسبية العامة والميكانيك الكمي. لكن الحقيقة الصارخة هي أننا لم ننجح بعد في تحقيق هذا الدمج بشكل كامل ومنسق. هذا الجزئية سيتناول الأسباب العميقة وراء هذا التحدي المستمر.

تخيل أنك تحاول بناء جسر بين قارتين باستخدام مواد وأساليب بناء مختلفة تماما. إحدى القارتين مبنية على أساس صلب من الخرسانة والفولاذ (النسبية العامة)، حيت كل شيء محدد ومنظم. القارة الأخرى مبنية من رغوة متغيرة باستمرار وجزيئات عشوائية (الميكانيك الكمي)، حيث يسود الاحتمال وعدم اليقين. محاولة ربط هذين العالمين تتطلب أكثر من مجرد وضع بعض الدعامات بينهما؛ إنها تتطلب فهمًا جديدًا لطبيعة البناء نفسه.

أحد الأسباب الرئيسية للصعوبة يكمن في التناقض الأساسي في كيفية وصف كل نظرية للواقع. النسبية العامة تتعامل مع الزمكان ككيان مستمر وديناميكي، يتفاعل مع المادة والطاقة بطريقة سلسة وقابلة للتفاضل. بينما الميكانيك الكمي يتعامل مع الكمي

يتعامل مع الكميات الفيزيائية (مثل الطاقة والزخم) على أنها منفصلة ("كمات ")، ويصف تطور الأنظمة باستخدام معادلات احتمالية محاولة فرض هذا "الكم" على نسيج الزمكان المستمر يثير مشاكل رياضية وفلسفية عميقة.

تخيل أنك تحاول تقسيم قطعة قماش مطاطية **(**الزمكان النسبي**)** إلى وحدات منفصلة غير قابلة للتجزئة **(** كمات كمية**)** - أين ستكون الحدود؟ وكيف ستتفاعل هذه الوحدات مع بعضها البعض بطريقة تحافظ على الخصائص الأساسية للقماش المطاطي ؟

سبب آخر يكمن في اختلاف المقاييس التي تعمل عليها كل نظرية بشكل أساسي. النسبية العامة هي نظرية ناجحة للغاية لوصف الكون على المقاييس الكبيرة - الكواكب النجوم، المجرات، والكون بأكمله، تأثيرات الكم تكون ضئيلة جدًا على هذه المقاييس. في المقابل، الميكانيك الكمي يصف بدقة العالم على المقاييس الصغيرة جدًا - الذرات الجزيئات

والجسيمات دون الذرية الجاذبية، التي تلعب دورا حاسما على المقاييس الكبيرة، تكون ضعيفة جدًا على هذه المقاييس بحيث يمكن إهمالها في معظم الحالات.

المشكلة تظهر عندما نحاول تطبيق كلتا النظريتين على نفس النظام في نفس الوقت، خاصة في الظروف المتطرفة مثل التقوب السوداء وبداية الكون الانفجار العظيم**)**. في هذه الحالات، تكون الجاذبية قوية جدا والمقاييس صغيرة جدًا، مما يجعل تأثيرات كلنا النظريتين مهمة. لكن محاولة وصف هذه الأنظمة باستخدام المعادلات الحالية لكلا النظريتين

غالبا ما تؤدي إلى نتائج غير منطقية أو لا نهائية، مما يشير إلى أن هناك شيئًا أساسيًا مفقودا في فهمنا.

علاوة على ذلك، هناك مشكلة إعادة التقنين في محاولة بناء نظرية حقل كمومي للجاذبية. في نظريات الحقول الكمومية الأخرى **(**مثل الكهرومغناطيسية والقوة النووية الضعيفة والقوية**)**، يمكن التعامل مع اللانهائيات التي تظهر في الحسابات عن طريق عملية تسمى إعادة التقنين. لكن عندما نحاول تطبيق نفس التقنيات على الجاذبية، فإنها تفشل، مما يشير إلى أن نظرية حقل كمومي بسيطة للجاذبية قد لا تكون ممكنة.

أخيرا، هناك غياب الأدلة التجريبية المباشرة على نطاق "الكم - جاذبية". معظم التجارب الفيزيائية إما تستكشف العالم الكمي حيت تكون الجاذبية ضعيفة جدا، أو تستكشف الكون على نطاق واسع حيث تكون التأثيرات الكمية غير مهمة. نحن نفتقر إلى التجارب التي يمكن أن تخبرنا مباشرة عن طبيعة الجاذبية على المستوى الكمي أو عن كيفية تفاعل الجاذبية مع الظواهر الكمية في ظروف قوية. هذا يجعل من الصعب توجيه وتأكيد النظريات المقترحة لدمج النسبية والميكانيك الكمي.

في ختام هذا الفصل، نرى أن دمج النسبية العامة والميكانيك الكمي ليس مجرد تحد رياضي، بل هو تحدٍ مفاهيمي عميق ينبع من الاختلافات الأساسية في كيفية تصور كل نظرية للواقع وطبيعة القوى والزمكان إن محاولة بناء جسر بين هاتين القارتين تتطلب منا غالبا التشكيك في أسس كلنا النظريتين واستكشاف أفكار جديدة جذرية حول طبيعة الكون على أعمق مستوى. ولا يزال هذا الجدار العنيد يقف شامخا، محفزًا أعظم العقول الفيزيائية على مواصلة البحث عن طريق جديد يوحد هذين العالمين.

خاتمة

في ختام رحلتنا لاستكشاف العلاقة المعقدة بين النسبية العامة والميكانيك الكمي، نجد أنفسنا أمام لوحة فنية كونية مذهلة، لكنها لا تزال قيد الإنشاء. النسبية العامة، بلوحاتها الكبيرة عن انحناء الزمكان والجاذبية الكونية، تقف شامخة كتحفة تصف الكون على أوسع نطاق. في المقابل، يقدم لنا الميكانيك الكمي، بفرشاته الدقيقة التي ترسم عالم الجسيمات والاحتمالات، صورة للعالم على أصغر المقاييس، عالم مليء بالعجائب والغموض.

محاولة دمج هذين العملين الفنيين العظيمين في لوحة واحدة متماسكة هي التحدي الأكبر في الفيزياء الحديثة. لقد رأينا كيف بدأت المحاولات الأولى، مثل تلك التي قام بها ستيفن هوكينغ عند حدود الثقوب السوداء، تكشف عن وجود روابط خفية وتشابهات غير متوقعة بين النظريتين. لكننا أيضًا واجهنا الجدار العنيد للاختلافات الأساسية في مفاهيم الواقع والزمكان والجاذبية، وهي اختلافات تجعل عملية الدمج صعبة للغاية.

ومع ذلك، فإن هذا التحدي هو ما يدفع فضولنا العلمي إلى الأمام. إن السعي لفهم الكون في جميع نطاقاته، من أصغر الجسيمات إلى أكبر المجرات، يتطلب منا تجاوز حدود نظرياتنا الحالية وتخيل مفاهيم جديدة جذرية. الرحلة مستمرة، وكل اكتشاف جديد يقربنا خطوة أخرى نحو فهم أعمق للكون، وربما، نحو اللحظة التي تتحد فيها لوحتا النسبية والكم في تحفة فنية واحدة متكاملة.

المصادر :

سير ذاتية عن ألبرت أينشتاين

سير ذاتية عن ألبرت أينشتاين: العديد من السير الذاتية الشاملة التي تتناول حياته وإنجازاته بالتفصيل

كتب عن نظرية النسبية: شروحات مبسطة ومفصلة لنظريتي النسبية الخاصة والعامة

كتب عن تاريخ الفيزياء الحديثة: التي تتناول السياق التاريخي لظهور نظرية النسبية وتجربة ميكلسون ومورلي

موسوعات علمية: مثل ويكيبيديا (بالاعتماد على المقالات المرجعية والموثقة) وموسوعة ستانفورد للفلسفة (**Stanford Encyclopedia of Philosophy**) التي تتضمن مقالات مفصلة حول النسبية والفلسفة العلمية

مواقع الجامعات والمؤسسات البحثية: غالبًا ما تنشر هذه المواقع مقالات وموارد تعليمية موثوقة حول تاريخ العلوم والفيزياء.

المصادر :

سير ذاتية عن ألبرت أينشتاين

سير ذاتية عن ألبرت أينشتاين: العديد من السير الذاتية الشاملة التي تتناول حياته وإنجازاته بالتفصيل

كتب عن نظرية النسبية: شروحات مبسطة ومفصلة لنظريتي النسبية الخاصة والعامة

كتب عن تاريخ الفيزياء الحديثة: التي تتناول السياق التاريخي لظهور نظرية النسبية وتجربة ميكلسون ومورلي

موسوعات علمية: مثل ويكيبيديا (بالاعتماد على المقالات المرجعية والموثقة) وموسوعة ستانفورد للفلسفة (**Stanford Encyclopedia of Philosophy**) التي تتضمن مقالات مفصلة حول النسبية والفلسفة العلمية

مواقع الجامعات والمؤسسات البحثية: غالبًا ما تنشر هذه المواقع مقالات وموارد تعليمية موثوقة حول تاريخ العلوم والفيزياء.

المصادر :

* كتب علم الكونيات:

* "**Introduction to Modern Cosmology**" لأندرو ليدل (**Andrew Liddle**).

* "**Cosmology**" لستيفن واينبرج (**Steven Weinberg**).

* "**Modern Cosmology**" لسكوت دوديلسون (**Scott Dodelson**).

* "**A Brief History of Time**" لستيفن هوكينج (**Stephen Hawking**).

* "**The First Three Minutes**" لستيفن واينبرج (**Steven Weinberg**)

(يركز
على الكون المبكر وتخلية النوى البدائي).

المصادر :

* كتب علم الكونيات:

* "**Introduction to Modern Cosmology**" لأندرو ليدل (**Andrew Liddle**).

* "**Cosmology**" لستيفن واينبرج (**Steven Weinberg**).

* "**Modern Cosmology**" لسكوت دوديلسون (**Scott Dodelson**).

* "**A Brief History of Time**" لستيفن هوكينج (**Stephen Hawking**).

* "**The First Three Minutes**" لستيفن واينبرج (**Steven Weinberg**)

(يركز
على الكون المبكر وتخليق النوى البدائي).

المصادر :

Cosmology by Barbara Ryden

* Modern Cosmology by Scott Dodelson and Fabian Schmidt

* An Introduction to Quantum Field Theory by Michael E. Peskin and Daniel V. Schroeder

* Quantum Field Theory in Curved Spacetime and Black Hole Thermodynamics by Robert M. Wald

* The Early Universe by Edward W. Kolb and Michael S. Turner

المصادر :

Cosmology by Barbara Ryden

* Modern Cosmology by Scott Dodelson and Fabian Schmidt

* An Introduction to Quantum Field Theory by Michael E. Peskin and Daniel V. Schroeder

* Quantum Field Theory in Curved Spacetime and Black Hole Thermodynamics by Robert M. Wald

* The Early Universe by Edward W. Kolb and Michael S. Turner

بين النسبية والكم

هذا ليس مجرد كتاب عن الكون؛ إنه تأمل في مكاننا فيه، وحدود معرفتنا، والأسئلة الكونية التي لا تزال تدعونا إلى التأمل. انضم إلينا في هذه المغامرة الفكرية المؤثرة، حيث يلتقي عظمة الكون بفضول العقل البشري.
احمد كاظم ، يدعوك للانغماس في كونية فيزيائية ستغير نظرتك إلى الوجود إلى الأبد."