

دراسة نظرية الانفجار العظيم

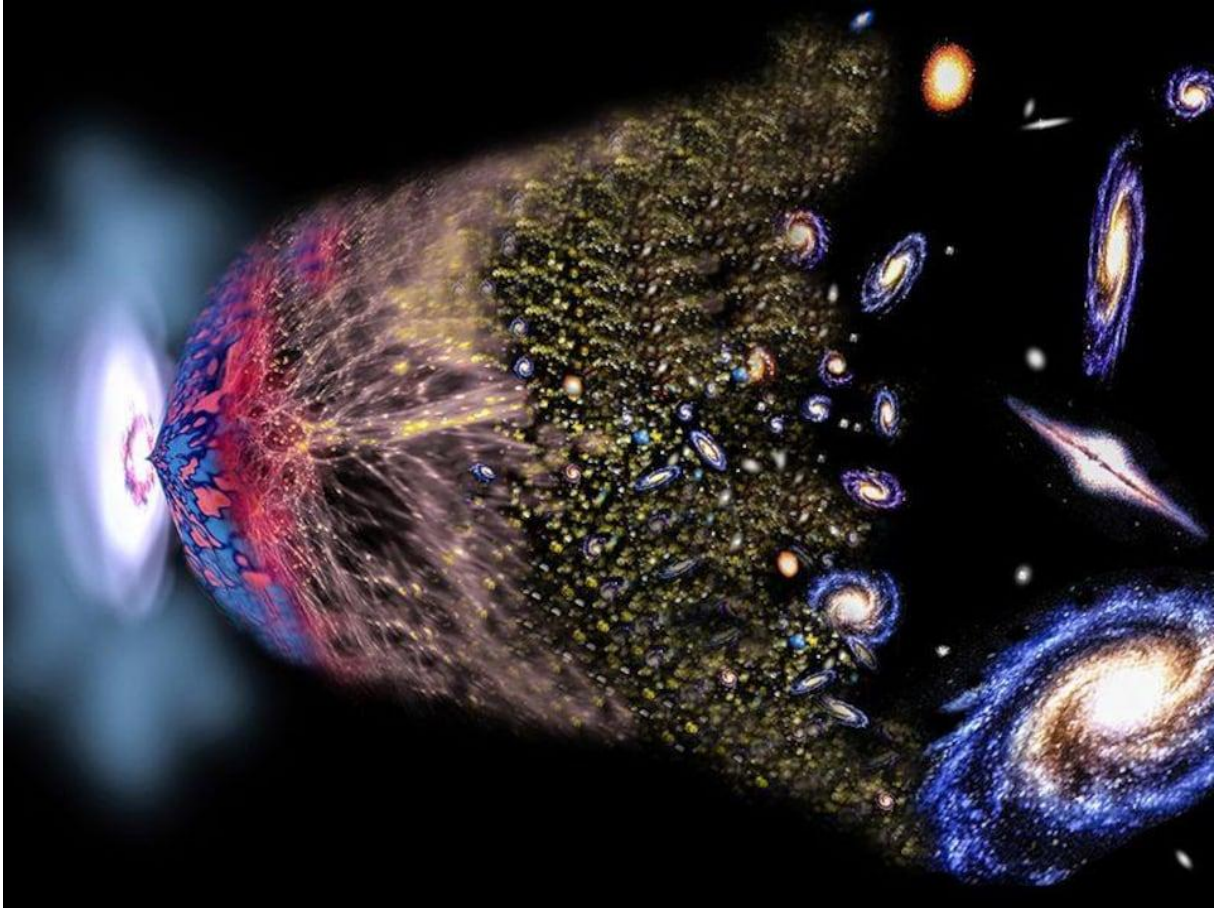
نظرية الانفجار العظيم 10-1

هل هي حدث فريد أم متكرر إلى مالانهاية؟ ماذا قبل وماذا بعد البغ بانغ؟

صراع النسبية العامة وميكانيكا الكموم الكوانتوم وما بعدهما، هل سنصل يوماً لنظرية كل شيء، وهل نعيش في كون متعدد؟ (النماذج المختلفة لأكون متعددة) وهل نعيش في محاكاة حاسوبية، كون "ماتريكس"؟

د. جواد بشارة

من أين أتينا نحن البشر؟ تكمن الإجابة على هذا السؤال الذي طرحه الجميع على أنفسهم ولو مرة واحدة على الأقل في حياتهم، في نظرية الانفجار العظيم الشهيرة. والذي يتطلب إلقاء الضوء على هذا النموذج الكوني وما نعتقد أننا نعرفه عن نشأة الكون.

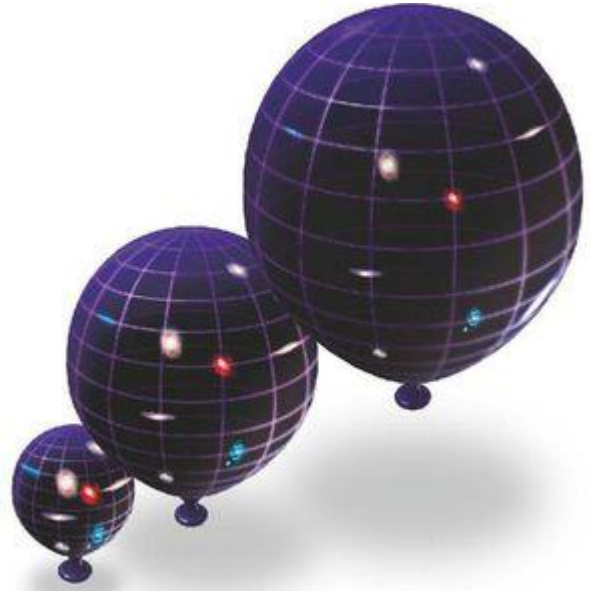


توسع الكون، من اليسار إلى اليمين للصورة على خلفية سوداء: قرص عمودي من اللون الأبيض، يبدأ منه مخروط أرجواني ثم وردي ثم أصفر، مفتوح إلى اليمين وينتهي على يمين صورة لعدة مجرات.

انطباع الفنان عن توسع الكون. الصورة من: ناسا

نادر هو الشخص الذي لم يتساءل مرة واحدة على الأقل في حياته عن أصل العالم. لماذا الأرض، لماذا المجرات، لماذا الكون؟ علاوة على ذلك، هل الكون فريد من نوعه؟ الأسئلة التي تلفت الأنظار، والتي قادت علماء الفيزياء الفلكية (على الأرض، من يعرف ما يجري في مكان آخر ...) إلى حسابات محمومة للعودة إلى أبعد من ذلك في الماضي، إلى اللحظات الأولى من كوننا.

النتيجة: نظرية مقبولة عالمياً من قبل المجتمع العلمي بأكمله، والتي تعطي معنى لتكوين الكون كما نراه من النظام الشمسي. ينص نموذج Big Bang الكوني على أن الكون كان أكثر كثافة ودفناً في الماضي وأنه يتمدد. ظهرت هذه النظرية لأول مرة في مكتب الفيزيائي وعالم الرياضيات الروسي ألكسندر فريدمان، في عام 1922. في الواقع، اكتشف أن معادلات النسبية العامة لأينشتاين تسمح بوصف الكون ... في التطور! قدم فريدمان لأول مرة فكرة التوسع، بينما أيد أينشتاين بشدة فرضية الكون الثابت.



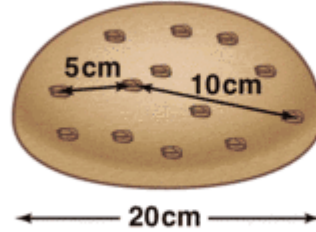
تمثيل الكون على شكل ثلاثة بالونات كبيرة بشكل متزايد، مع المجرات الموجودة على سطحها تتحرك بعيداً عن بعضها البعض ولكن دون تعديل.

تشبيه تمدد الكون مع تضخم بالون. الائتمان: أفلام نحيفة

تم وضع النموذج الكوني للانفجار العظيم بشكل مستقل في عام 1927 من قبل عالم الفيزياء الفلكية والكاهن البلجيكي جورج لوميتير ، في مقال بالفرنسية في Annales de la Société Scientifique de Bruxelles. حتى أن الباحث وضع تقديراً أولياً لثابت هابل (انظر أدناه).

في عام 1924، أظهر عالم الفلك الأمريكي إدوين هابل بدقة وجود مجرات أخرى خارج مجرتنا درب التبانة بفضل الملاحظات التي تم إجراؤها باستخدام تلسكوب هوك (لوس أنجلوس)، الأقوى في ذلك الوقت. تحدد أولاً المجرة الصغيرة NGC6822 الموجودة في كوكبة القوس، ثم مجرات المثلث (M33) وأندروميديا (M31). أثبت هابل بعد ذلك في عام 1929 أن المجرات تبتعد عن بعضها البعض بسرعة تتناسب مع المسافة (إلى النظام الشمسي). بعبارة أخرى، كلما كانت المجرة بعيدة عنا، زادت

سرعة ابتعادها. هذا المبدأ المسمى "قانون هابل" يدعم منطقياً نظرية الكون المتوسع. تم تقديم "قانون هابل" سابقاً من قبل جورج لوميتز ، وتم تغيير اسمه إلى "قانون هابل-لوميتز" في عام 2018 من قبل الاتحاد الفلكي الدولي.



رسم متحرك يظهر بريوش صغير ذو أساس بيضاوي بني فاتح مع عنب بني غامق. بعد الطهي نرى أن الشكل البيضاوي قد نما وأن الأسباب ابتعدت عن بعضها البعض مثل المجرات في الواقع.

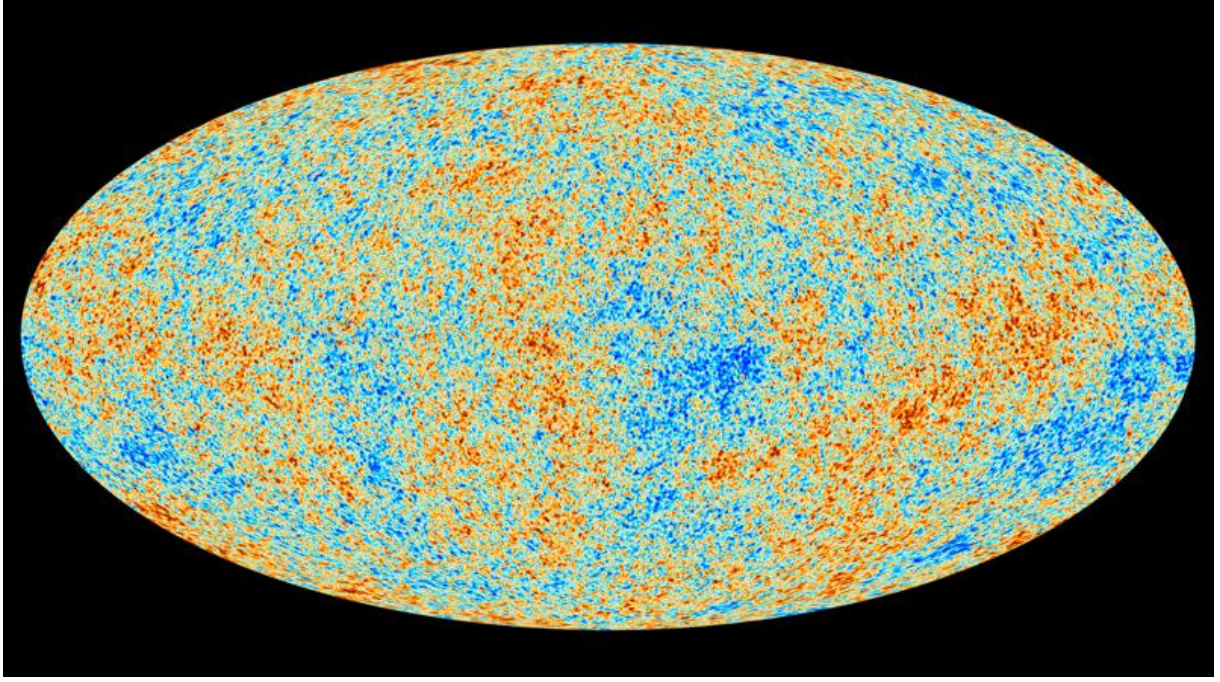
تشبيه توسع الكون بخبز بريوش الزبيب. الصورة من: ناسا / د. إدوارد / ج. وولاك / ب. غريسولد
يتضح توسع الكون جيداً من خلال خبز البريوش بالزبيب. تتضخم الكعكة - الكون - أثناء خبزها، مما يتسبب في ابتعاد العنب - المجرات - عن بعضها البعض، دون تغيير العنب نفسه.

أول ضوء في كل العصور:

علاوة على ذلك، تتنبأ نظرية الانفجار العظيم بانبعث الإشعاع الحراري في بداية تاريخ الكون. لذلك تم التحقق من صحة النموذج من قبل المجتمع العلمي عند اكتشاف الخلفية الأحفورية الكونية الميكروية (CMB) المنتشرة في عام 1964. وهو اكتشاف حصل بالصدفة بواسطة عالمين فلكيين أمريكيين، أرنو بينزياس وروبرت ويلسون، اللذين كانا يعملان على هوائي للشركة التي يعملان فيها..

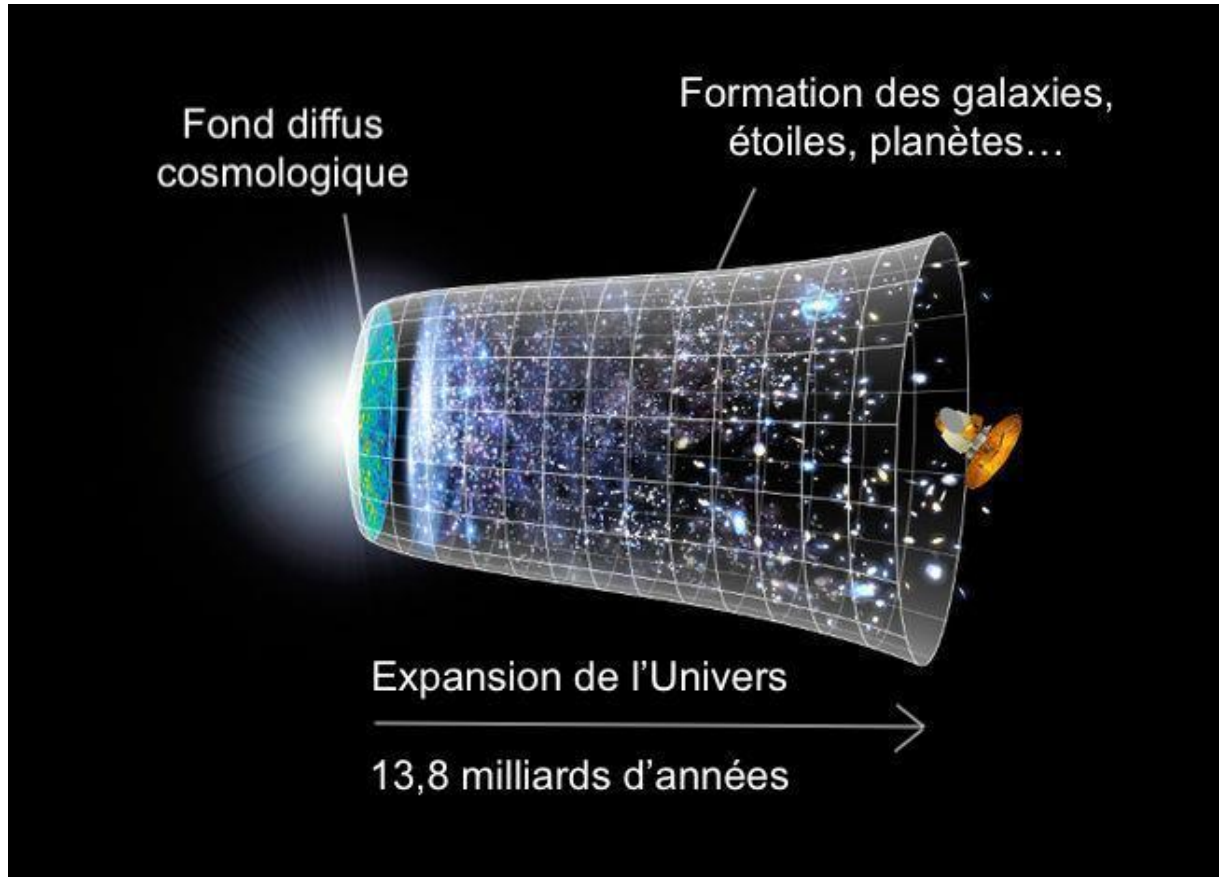
أدناه خريطة الخلفية الكونية المنتشرة: نرى شكلاً بيضاوياً مسطحاً، مع خصائص CMB في شكل بقع برتقالية وزرقاء. الخريطة الأكثر تفصيلاً التي تم الحصول عليها على الإطلاق للخلفية الكونية المنتشرة بواسطة تلسكوب بلانك الفضائي. الائتمان: تعاون Esa / Planck

يُعتقد أن إشعاع CMB هو إشعاع أحفوري كما يُعتقد أنه انبعث بعد حوالي 380 ألف سنة من الانفجار العظيم، عندما كان الكون أصغر وأكثر كثافة وأكثر سخونة ودفعاً. منذ ذلك الحين، توسع الكون و "خفف" - ومن هنا جاءت المسافة بين المجرات - وبرد.



توسع الكون منذ أيام CMB. الائتمان: ناسا

تتوافق الخلفية الكونية المنتشرة مع اللحظة الأولى عندما يصبح الكون رقيقاً بدرجة كافية بحيث يتمكن الضوء من الانتشار هناك. وبعبارة أكثر دقة كانت الفوتونات، الجسيمات المكونة للضوء "المحاصرة" سابقاً في البلازما البدئية، هي التي تمكنت من الهروب. لأول مرة، تم اكتشاف أن الضوء "حر" مما يسمح لنا اليوم "برؤية" الكون كما كان في ذلك الوقت، حيث انتقل هذا الضوء البدائي إلى التلسكوبات الخاصة بنا.



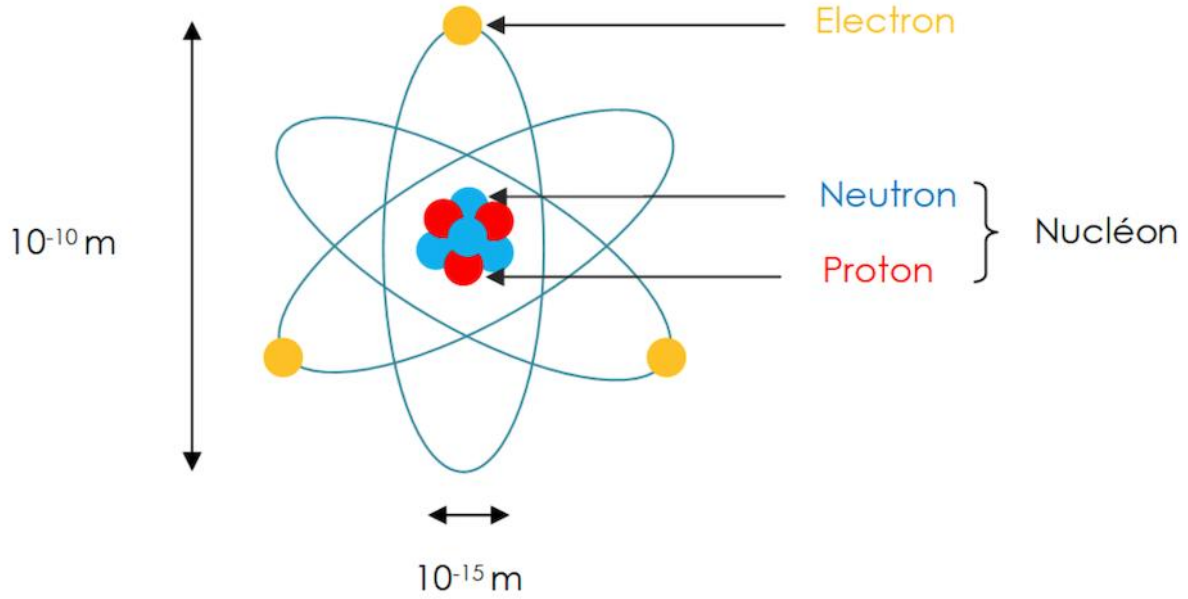
صورة فنية لتوسع الكون المرئي

وبالتالي، فإن الـ CMB هي أقدم صورة كهرومغناطيسية ممكنة للكون. منذ اكتشافه، لم يتوقف العلماء عن دراسة هذا "الجزء المفقود من تكوين العوالم" كما حدده جورج لوميتير، لأنه يحتوي على معلومات لا حصر لها حول بنية وتطور وعمر للكون حيث يقدر عمر الكون اليوم بـ 13.8 مليار سنة.

ولادة الكون:

يمثل انبعاث الخلفية الكونية المنتشرة بدايات الكون المرئي كما نعرفه، حيث بدأت جسيمات المادة تتجمع بعد إطلاق الفوتونات لتشكل النجوم الأولى، ثم الكواكب. ثم المجرات، والتي بدورها تتجمع في مجموعات وعناقيد عملاقة. قبل ذلك، خلال الدقائق القليلة الأولى من تاريخ الكون البدائي - ما بين 10 ثوانٍ و 20 دقيقة على وجه الدقة - توضح نظرية الانفجار العظيم أن اللبنات الأساسية الأولى للمادة التي نعرفها كانت ستظهر. يصف ما يسمى بمرحلة التخليق النووي تكوين البروتونات والنيوترونات وتجميعها في نوى ذرية، ثم تكوين الذرات مع الإلكترونات التي ولدت أيضًا خلال هذه المرحلة.

تمثيل تخطيطي للذرة: نواة ذات دوائر زرقاء وحمراء ملتصقة تمثل النيوترونات والبروتونات، وحول الدوائر الصفراء التي تجذب الإلكترونات.



تمثيل تخطيطي للذرة. الائتمان sciencesphysiques.e-monsite.com :

بالعودة إلى الوراء قليلاً في الوقت المناسب، في حوالي الثانية الأولى من الكون، تكون درجة الحرارة مرتفعة جداً لدرجة أن طاقة العناصر الموجودة تتجاوز تلك التي تم الحصول عليها في أقوى مسرعات الجسيمات لدينا. بدون إجراء التجارب الممكنة لدعمها، من الصعب جداً دراسة هذه الفترة ووصفها وفهمها، وهي اليوم مسألة نظرية بحتة.

تمكن علماء الفيزياء الفلكية من تقديم وصف للكون كما كان حتى 10^{-43} ثانية بعد الانفجار العظيم. لكن قبل ذلك، لم يكن هذا معروفاً. يتم التحقيق في العديد من النظريات لمحاولة فهم ما حدث خلال تلك الثواني العشر إلى 43 ثانية، مثل نظرية الأوتار، نظرية الجاذبية أو الثقالة الكمومية الحلقية، أو الإقترانات السببية.

لا يمكننا تصور أو تخيل الانفجار العظيم فهو ليس انفجاراً مديوياً بالمفهوم التقليدي كما يعتقد الكثير من الناس. ويعتقد أن هناك مالا نهاية من الانفجارات العظيمة حدثت وما زالت تحدث مولدة أكواناً أخرى.

أدناه انطباع الفنان عن الانفجار العظيم حيث نرى في المركز نقطة بيضاء مضيئة تنبثق منها أشعة من الأزرق والأرجواني والبرتقالي والأحمر في كل الاتجاهات.



انطباع الفنان عن الانفجار العظيم. الائتمان Geralt / Pixabay :

الانفجار العظيم ليس لحظة أولية للكون ولكنه يشير إلى المرحلة التي كان فيها كثيفاً وساخنًا. لم يحدث "في مكان ما"، ولا هو "انفجار" كما يسهل تخيله. كان من الممكن أن يحدث الانفجار العظيم في الواقع بشكل متجانس للغاية وعالمي في جميع مناطق الكون المرئي التي يمكننا مراقبتها.

أخيرًا، نظرًا لأننا لا نستطيع "رؤية" الماضي لما يزيد عن 380.000 سنة بعد الانفجار العظيم بسبب كثافة الكون وبالتالي غموضه قبل ذلك التاريخ، فإن مسألة "أصل العالم" لا يزال غامضاً تماماً ولغزياً. لدرجة أنه بالنسبة للسير روجر بنروز، الحائز على جائزة نوبل في الفيزياء لعام 2020، لن يكون هناك انفجار واحد، بل عدة انفجارات كبيرة! إذن الكون المرئي الحالي سيكون نتيجة دورة، لسلسلة من الانفجارات الكبيرة ... هل سنعرف من أين أتينا؟ من الناحية الواقعية، فإن الإجابة هي على الأرجح لا. على أي حال، ليس في حياتنا. في غضون ذلك، فإن النظريات حول أصل العالم تقتصر فقط على الخيال البشري، وبالتأكيد لم تنته بعد من التكاثر. يتعين علينا أن نمضي إلى ما هو أبعد من نظرية النسبية العامة والانفجار العظيم،

فشلت نظرية النسبية العامة لأينشتاين في إعطائنا وصفًا عميقًا للكون المبكر دون الأخذ في الاعتبار ميكانيكا الكموم. يتطلب فهم الانفجار العظيم حقًا تجاوز النسبية العامة بنظرية الجاذبية أو الثقالة الكمومية ، كما أوضح لنا عالم الفيزياء الفرنسي أورليان بارو.

هل نظريات الأكوان المتعددة علمية؟ ما هو مفهوم الكون المتعدد، بعد أن غذى الخيال العلمي والسينما، وما هو اليوم يتسلل إلى عالم الفيزياء النظرية. ماذا لو كانت هناك أكوان أخرى إلى جانب كوننا المرئي، مختلفة أم متطابقة؟ وإذا كان الأمر كذلك، فكيف نثبت ذلك علميًا؟ ينبغي الرجوع دومًا لنظرية النسبية العامة لأينشتاين ومراجعة الدروس والأبحاث والكتب والمحاضرات حول نظرية ألبرت أينشتاين للنسبية العامة (1915) ، وهي ثورة فكرية حقيقية في فهم المكان والزمان، والتي تناقش حولها الفيزيائيون

والفلاسفة والمؤرخون وتجادلوا حول أسس هذه النظرية ، ورؤية الكون التي تقدمها ، والتي لم يتم التفكير فيها ، وسوف يلقي الضوء على سبيل التفكير في التقدم لفهم أفضل لمسألة من أين أتينا، خاصة بعد الإعلان الرسمي عام 2016 عن أول اكتشاف على الأرض لموجات الجاذبية ، وهو أحد أكثر التنبؤات إثارة لنظرية أينشتاين النسبية للجاذبية ، والتي منها احتفلنا بالذكرى المئوية في عام 2015. من المعروف أن نظرية النسبية العامة لألبرت أينشتاين (1915) غير متوافقة مع فيزياء الكموم (التي تصف سلوك الذرات والجسيمات)، وهي الأساس العظيم الآخر للفيزياء المعاصرة. هل ينبغي إذن أن نذهب أبعد من ذلك، ونجد النظرية "التي توحد كل شيء"؟ من موجات الجاذبية إلى الجاذبية الكمومية والمحاولات الحديثة لتجاوز نظرية النسبية العامة لأينشتاين، وبشكل أكثر دقة على تلك التي تقترح إعطاء نسخة كمومية من نظرية أينشتاين، الأكثر من هذا إن المقاربة جاءت إما في شكل نظرية الجاذبية الكمومية الحلقية أو نظرية الأوتار الفائقة. من المحتمل أن تجدد هاتان النظريتان الصورة الكلاسيكية التي لدينا عن نظرية الانفجار العظيم من خلال إتاحة إمكانية تجاوز وحتى التفكير في وجود كون متعدد. فهل تكشف موجات الجاذبية عن فيزياء تتجاوز النسبية العامة؟ وأين نحن اليوم من تطورات الجاذبية أو الثقالة الكمومية والأوتار الفائقة؟

الصعود الفوري في رحلة إلى الكون لفهم أصله بشكل أفضل. في مقالته، التي تم تصورها على أنها مسيرة علمية وفلسفية، حل أورليان بارو Aurélien Barrau الأسئلة الرئيسية للكون، من الانفجار العظيم إلى الثقوب السوداء، بما في ذلك الجسيمات الأولية.

أحدث العلم الحديث ثورة عميقة في نظرتنا للكون. من خلال السرد وخط "الدهشة البدائية والنية" بالجدار والأهلية "التي تجلت في كتاب الانفجار العظيم وما بعده: نزهة في علم الكونيات تنير فهمنا للكون.

هل كوننا فريد من نوعه؟ من ماذا هو مصنوع؟ هل نظرية الانفجار العظيم هي الوحيدة التي تشرح أصله؟ تم تناول الكثير من الألغاز بلغة بسيطة وسهلة الفهم، من قبل الفيزيائي العالم والباحث Aurélien Barrau. هذا العمل، الذي لا يتطلب أي مستوى علمي وفقاً للمؤلف لفهمه واستيعابه، مخصص في المقام الأول لجمهور فضولي. إذا سمح كل فصل بدخول الشعر والفلسفة، فسيجد القارئ تفسيرات مادية موثوقة ونقطة في التطورات الأخيرة.

يسترجع هذا المقتطف من الكتاب ولادة الكون، من ظهور النجوم الأولى إلى تكوين الكواكب.

1. هل يمكننا فهم الكون؟
2. الوجوه المتعددة للكون
3. أسس المراقبة للانفجار العظيم
4. الأسس النظرية للانفجار العظيم
5. الثقوب السوداء: مختبرات دراسة للكون
6. حمام من الجسيمات الأولية
7. ما بعد الانفجار العظيم: نظرية الأوتار والجاذبية الكمية
8. الكون المتعدد

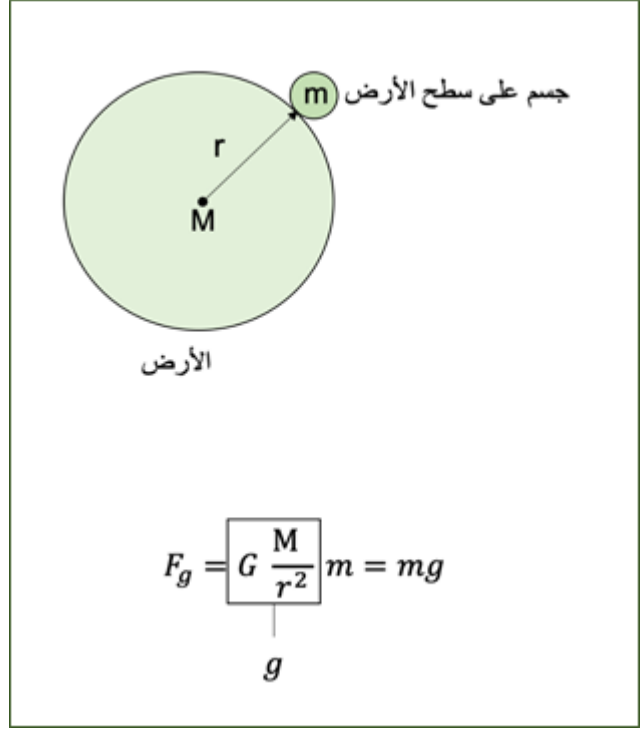
النسبية العامة تتحقق في الزمكان. يقدم هذا الملف لمحة عامة عن نشأتها (من خلال المواجهة بين الجاذبية ومبدأ النسبية)، وآثارها (علم الكونيات، الثقوب السوداء) ونسلها المحتمل، وكيف كيف أصبح الزمكان ديناميكيًا، بعد دحرت النسبية صيغة الجاذبية النيوتنية. من خلال نظرية النسبية الخاصة، أظهر أينشتاين الحاجة إلى تجاوز مفاهيم الزمان والمكان المطلقين، لكن الجوهر الأساسي للنظرية أصبح متاحًا فقط عندما اكتشف مينكوفسكي وجود المفهوم الأساسي لـ الزمكان. هذا الإطار الهندسي الجديد جعل من الممكن بالفعل التعبير بطريقة مكثفة للغاية وطبيعية عن القوانين الفيزيائية التي تتحقق من مبدأ النسبية، مع تبسيط البحث عن قوانين جديدة تفعل ذلك. ومع ذلك، فإن تعميم مبدأ النسبية على جميع المراقبين وكذلك اكتشاف قانون تكافؤ الكتلة والطاقة استلزم التعديل النسبي لنظرية الجاذبية المضي قدمًا في هذه الثورة المفاهيمية من خلال التخلي عن فكرة الزمكان الذي هو مجرد إطار سلبي. إن وجود الهندسة في الفيزياء ليس ظاهرة حديثة، حيث ربط أفلاطون بالفعل متعدد السطوح المنتظمة بالعناصر الأربعة، ومع ذلك، كانت نظرية أينشتاين أحد الأسباب الرئيسية لعودتها.

أصبحت الهندسة الآن أداة حاسمة لأي فيزيائي نظري، ومعظم النظريات الحديثة هندسية. لكن هذه النظرة العامة الموجزة لأحدث الأوصاف للزمكان ستكون فقط خاتمة لهذا الطرح الذي سيركز قبل كل شيء على النسبية العامة واختباراتها وتطبيقاتها. أحد العناصر الأساسية في ولادة هذه النظرية هو المواجهة بين الجاذبية ومبدأ النسبية وفقًا لأينشتاين، أولاً من خلال التذكير بأساسيات الجاذبية النيوتونية والمشكلات التي نشأت عند البحث عن نظرية نسبية الجاذبية. ومن ثم الوصول إلى الحل الذي اقترحه أينشتاين لهذه المشكلة، ونظريته في النسبية العامة، بالإضافة إلى الإطار الهندسي الذي تستخدمه (الهندسة الريمانية)، وينتهي بالاختبارات الكلاسيكية الثلاثة للنظرية. سيتم تفصيل المزيد من الاختبارات والتطبيقات الحديثة في الفقرات التالية، والتي سيتم تكريسها على التوالي لعلم الكونيات النسبي، وسراب الجاذبية، والديناميات المحلية للزمكان، والنجوم النسبية (بما في ذلك الثقوب السوداء الشهيرة) وأخيراً لموجات الجاذبية التي تم رصدها مؤخراً.

أ - الجاذبية النيوتونية

لقد بدأ تاريخ الجاذبية بالفعل مع نيوتن، حيث تم اعتبار الجاذبية بأنها السبب المحتمل لحركة الكواكب في السابق بشكل مستقل. وهكذا، فإن ميكانيكا نيوتن ونظريته في الجاذبية العالمية قد حققت توحيد العالمين تحت القمري والسمائي، لكن بالطبع لم يكن لدى نيوتن، على الرغم من عبقريته، إعلان مفاجئ، وكما يقول هو نفسه، يركز عمله "على أكتاف العمالقة" الذين سبقوه. ومع ذلك، هناك أسطورة تقول إنه كان لديه فكرة الطبيعة العالمية للجاذبية عندما رأى تفاحة تسقط. كان هذا سيجعله يفهم أن القمر كان يمكن أن يسقط، بطريقته الخاصة، نحو الأرض، لكن ما يمنعه من السقوط هو دورانه في خط مستقيم وبسبب حركته الأولية وقصوره الذاتي. ووفقًا لتفسير نيوتن، ففي كل لحظة يستمر القمر في مساره في خط مستقيم (بعد قصوره الذاتي) فإنه يسقط باتجاه مركز الأرض (بسبب قوة الجاذبية التي يمارسها)، بيد أن مزيج من حركتان تؤديان إلى مسار دائري.

رسم توضيحي للتكوين الفوري لحركة القمر الصناعي (القمر على سبيل المثال) في مدار دائري حول الأرض. في أي وقت، يواصل القمر مساره في خط مستقيم بطول "x" (بسبب قصوره الذاتي) ويسقط في نفس الوقت من ارتفاع "h" في خط مستقيم باتجاه مركز الكوكب (بسبب الجاذبية)، والحركة الناتجة دائرية. المصدر R.Muduit.



ومع ذلك، لم يكن نيوتن راضيًا عن تفسير نوعي مثل هذا، وباستخدام عمل كبلر (القوانين الثلاثة)، من بين أمور أخرى، نجح حتى في إعطاء تعبير دقيق عن قوة الجاذبية. تذكر، مع ذلك، أن نيوتن طور آلياته (حيث يتم تعريف مفهوم القوة)، والجاذبية والشكلية الرياضية للتعامل معها. بالنسبة لجاذبيتها، يمكن وصفها على النحو التالي: نظرًا لأن نقطتين من الأجسام ذات "كتل خطيرة" M_1 و $2M$ مفصولة بمسافة " r "، فإن القوة التي تمارسها الكتلة الأولى في الثانية هي

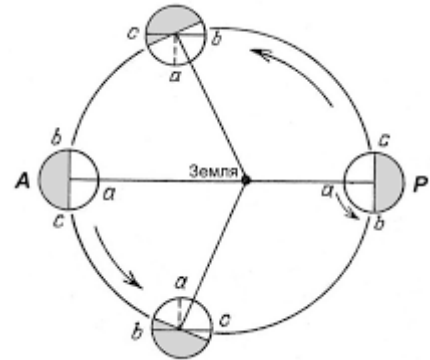
- جاذبة، موجهة على طول الخط الذي ينضم إلى الجماعتين؛

- متناسب مع ناتج الكتلتين الجديتين؛

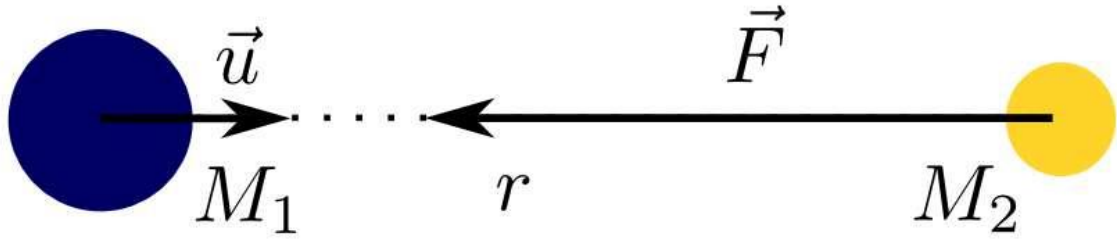
- يتناسب عكسيًا مع مربع المسافة بين الكتلتين.

مما يؤدي إلى كتابة معادلة $F = - G \frac{M_1 M_2}{r^2}$ ،

حيث G هو "ثابت نيوتن" (والذي يساوي 6.67×10^{-11} تقريبًا في وحدات النظام الدولي، أي $\text{kg} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$) و u "متجه الوحدة" (سهم بطول يساوي 1) موجهة من الكائن الأول إلى الثاني.



رسم توضيحي لقوة الجاذبية التي تمارسها الأرض على القمر وفقًا لنيوتن.



كما تم توضيحه بالفعل، سمح هذا القانون البسيط بفهم جميع الحركات السماوية، ومع ذلك لم يتم تطوير الميكانيكا السماوية بشكل كامل حتى القرنين الثامن عشر والتاسع عشر، بعد عمل السويسري ليونارد أويلر، وكذلك الفرنسيين. جوزيف لويس دي لاغرانج وبير سيمون لابلاس. اكتشفوا وطبقوا تقنيات رياضية (كحساب u المضطرب، وما إلى ذلك) مما يجعل من الممكن التعامل مع مشكلة الهيئات غير المحددة في المواعيد و / أو في عدد أكبر من اثنين، الحالات اللازمة للدراسة من أجل تجاوز الوصف الكبلري Keplerian. ومع ذلك، تم حجب نقطة مهمة للغاية في الوقت الحالي في قوة الجاذبية النيوتونية: معنى مصطلح "الكتلة الجادة". عندما أسس نيوتن آلياته، قدم كمية فيزيائية تسمى القصور الذاتي (أو الكتلة الخاملة)، والتي تعكس قدرة الجسم على البقاء في نفس حالة الحركة. بالنسبة لمادة معينة، فإن هذه "الكتلة الخاملة" تتناسب مع "كمية المادة" (مفهوم آخر قدمه نيوتن في كتابه "المبادئ")، والكثافة (الكتلة مقسومة على كمية المادة) هي ما يميز مادتين. لكن الكمية الفيزيائية "الكتلة الخاملة" يتم تعريفها حقاً فقط من خلال ظهورها في قانون نيوتن الثاني.

$$\begin{aligned}
 \langle \nabla V \rangle &= \langle \psi | \nabla V | \psi \rangle \\
 &= \int d^3 \mathbf{r} \psi^* \nabla V \psi & \vec{F} &= m \cdot \vec{a} \\
 &= \int d^3 \mathbf{r} |\psi|^2 \nabla V & \vec{a} &= \frac{1}{m} \sum \vec{F}_i \\
 &\simeq [\nabla V]_{\mathbf{r}=\langle \mathbf{r} \rangle} \int d^3 \mathbf{r} |\psi|^2 & \vec{a} &= \frac{d\vec{v}}{dt} \\
 &= [\nabla V]_{\mathbf{r}=\langle \mathbf{r} \rangle}
 \end{aligned}$$

علاوة على ذلك، كما كان نيوتن يدرك ذلك، فإن "الكتلة الثقيلة" (أو القبر)، التي تتدخل في الجاذبية، هي كمية فيزيائية ليس لها، بدهاءة، أي علاقة بالأولى، لأنها تميز القوة لجذب أو الانجذاب إلى كتلة خطيرة أخرى 1. ومع ذلك، كما يبدو أن الأجسام المتساقطة تشير إلى ذلك، وكما تحقق نيوتن من بندولات ذات تراكيب مختلفة، فإن النسبة بين هاتين الكتلتين تساوي ثابت "K" الذي لا يعتمد على التكوين. في الواقع، إذا سألنا

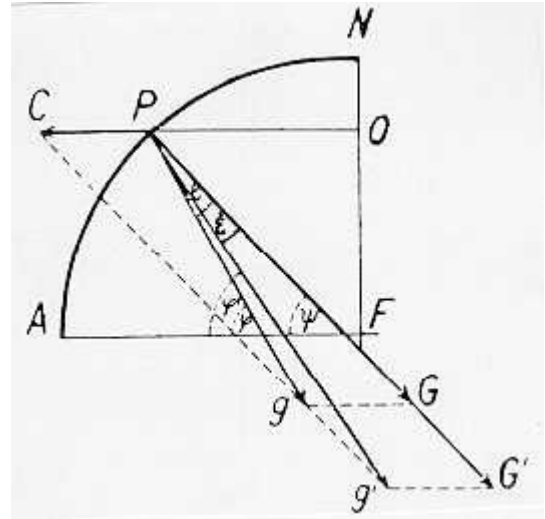
$$g = - G M u / r^2$$

فإن حقل الجاذبية الذي أنشأته الأرض (للكتلة الخطيرة M) في مكان معين يقع على مسافة "r" من مركزها، يعطي المبدأ الأساسي لديناميكيات نيوتن كائنًا في حالة سقوط حر

$$m l a = m G g$$

حيث قدمنا الكتل الخاملة والخطيرة للجسم النقطي.

والذي يصف جيدًا حقيقة أن التسارع (وبالتالي الحركة) هو نفسه لجميع الأجسام في حالة السقوط الحر إذا وفقط إذا كان $K = mG / ml$ ثابتًا. علاوة على ذلك، من خلال تحديد ثابت نيوتن كما ينبغي، يمكن تعيين الثابت "K" مساويًا لـ 1. ولكن من الأهمية بمكان أن نفهم أن هذه المساواة، بداهة، ليس لها سبب للوجود. وبالتالي، من الضروري اختبارها، والذي تم إجراؤه بدقة كبيرة في بداية القرن العشرين، بواسطة المجري لوراند إيتفوس بفضل "التواء البندول".



توضيح لمبدأ تجربة إيتفوس Eötvös. يجب أن يخضع جسمان لهما تركيبات مختلفة ولكن لهما نفس كتلة القصور الذاتي الموجودة عند النقطة P لنفس قوة الطرد المركزي (بسبب دوران الأرض)، مع اختلاف قوى الجاذبية، إذا لم تكن الكتل الخطيرة متساوية. يجب أن ينتج هذا عن وجود حقلي جاذبية فعالين مختلفين (g و g' على الرسم)، مما يعني عدم تناسق النظام الذي تشكله الكتلتان وبالتالي تأثير قابل للقياس عند عكسهما. ومع ذلك، وفقاً لمبدأ التكافؤ بين الكتل الجادة والخاملة، لم يتم الكشف عن أي تأثير.

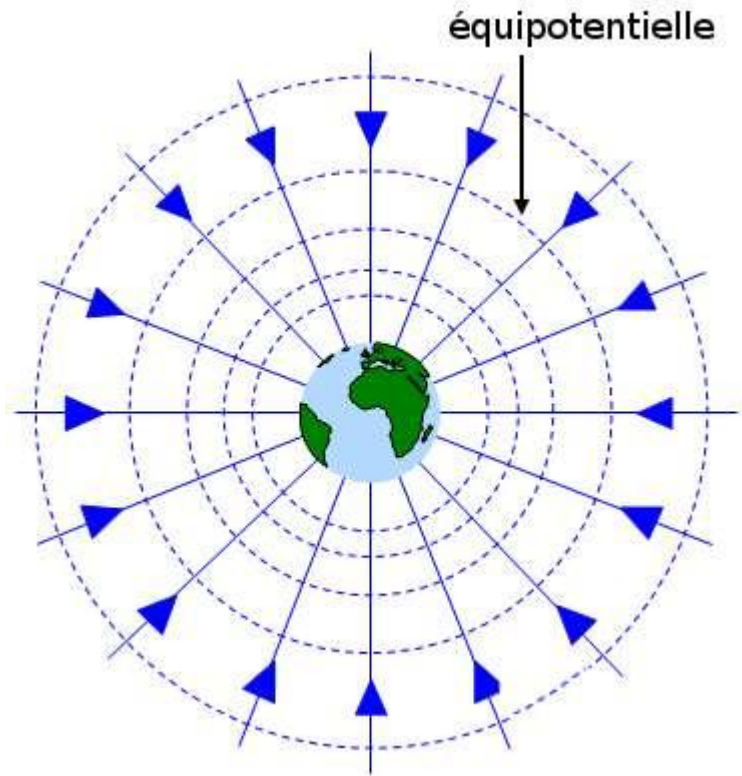
كانت الفكرة الأصلية لـ Eötvös هي استخدام نظام يتكون من كتلتين من تراكيب مختلفة ومقارنة تكوينين للتوازن الثابت حيث تم قلب هذه الكتل. بفضل إجرائه، حصل على اثنان موصوفين بمعادلتين متشابهتين جدًا، والفرق الوحيد بينهما هو تبديل نسب "K" لكل جسم. إن التقدم الكبير الذي تم إحرازه فيما يتعلق بالتجارب السابقة (السقوط الحر على سبيل المثال) هو أننا نقيس الانحرافات الصغيرة المحتملة عن اثنين من غير الحركات (= حجم الصفر)، ولم نعد الانحرافات بين اثنين حركة (= مكون كبير)، مما يتيح دقة أفضل بكثير.

تحقق إيتفوس Eötvös من أن نسبة K كانت هي نفسها لجميع المواد مع دقة ترتيب جزء واحد لكل 100 مليون (1/108)، وقد تم تحسين تجربته إلى دقة جزء واحد لكل 1000 مليار (1/1012) للفيزيائي الأمريكي روبرت هنري ديك، الذي نجح في ستينيات القرن الماضي في تبريد النظام بما يكفي لتقليل "التقلبات الحرارية" (الحركات العشوائية للجزيئات المرتبطة بالحرارة). ومع ذلك، ظلت هذه المساواة، في نظرية نيوتن، نوعاً من المبدأ الغامض، ولم يكتسب طابع الوضوح إلا مع أينشتاين، وذلك بفضل تغيير وجهة نظر الأخير. المقترحة. ولكن حتى لو كانت هذه المساواة بين الكتل الجادة والخاملة ضرورية لظهور النسبية العامة، فقد نتجت قبل كل شيء عن عدم التوافق بين الجاذبية النيوتونية والمبدأ النسبي لأينشتاين.

ب- الجاذبية في مواجهة النسبية الخاصة:

من الواضح أن نظرية الجاذبية النيوتونية، التي ولدت في نفس الوقت مع ميكانيكا نيوتن، تحترم مبدأ النسبية الغاليلي. ومع ذلك، كما سبق أن أشرنا، فإن استخدام مفهوم القوة اللحظية التي تعمل عن بعد يجعلها غير متوافقة مع مبدأ النسبية الذي أعاد النظر فيه آينشتاين. هذا الأخير يعني في الواقع التخلي عن فكرة التزامن المطلق واستحالة نقل المعلومات بسرعة أكبر من سرعة الضوء "C"، في حين أن القوة اللحظية على مسافة تقابل بالضبط سرعة لانهاية لـ نقل المعلومات. من الناحية الفنية، تؤدي هذه المشكلات إلى استحالة كتابة نظرية نيوتن في شكل لا يعتمد على مراقب لورنتز المختار: نقول إن معادلات نيوتن لا يمكن وضعها في صيغة متغايرة فيما يتعلق بتحويلات لورنتز. لاحظ مع ذلك أن صياغة الجاذبية النيوتونية المستخدمة لهذا البحث عن الجاذبية المتغيرة ليست بالضبط تلك المعروضة أعلاه، ولكنها قدمت في عام 1777 من قبل لاغرانج، الذي أظهر فائدة مفهوم الجاذبية المحتملة، وهي فكرة تشبه إلى حد بعيد المجال الذي قدمه فاراداي وماكسويل لاحقًا في الكهرومغناطيسية.

من وجهة نظر حديثة، فإن إمكانات الجاذبية النيوتونية هي مجال قياسي، أي كائن رياضيائي محدد في كل الفضاء والذي يربط رقمًا بكل نقطة في الفضاء. إذا رسم المرء منحنيات تربط جميع النقاط المرتبطة بنفس قيمة الإمكانات، يحصل المرء على منحنيات متساوية الجهد (في الخطوط المنقطة في الشكل التالي). والمثال المماثل رياضيًا هو منحنيات الأيزوبار المستخدمة في علم الأرصاد الجوية والتي هي ليست أكثر من المنحنيات التي يحافظ على طولها الضغط (مثال آخر للحقل القياسي) على قيمة ثابتة. تتمثل إحدى اهتمامات هذه الخطوط المتساوية في أنها تجعل من الممكن معرفة، عند نقطة معينة، قوة الجاذبية التي يمارسها الجسم المصدر للجهد على جسم موجود في هذه النقطة، حتى دون معرفة مكان المصدر. من المجال المدروس: هو وصف محلي بحت. للحصول على "السهم" (= المتجه) الذي يمثل هذه القوة، يكفي رسم عمودي على مساوي الجهد الذي يمر عبر النقطة، وتوجيهه نحو مساوي الجهد للقيمة الأقل (وبالتالي يجد المرء الاتجاه). تزداد شدة القوة (= طول السهم) من جانبها لأن توزيع الخطوط المتساوية كثيف عند النقطة المعتبرة (إذا كانت قيمة الحقل ثابتة في جميع أنحاء الفضاء، ولذلك لا توجد قوة، حيث لا توجد مساوية ذات قيمة أقل). في الشكل التالي، الذي يمثل مجال الجاذبية الذي تم إنشاؤه بواسطة الجسم المركزي، يتم تمثيل القوى بأسهم أطول (= القوة الشديدة) عندما تكون بالقرب من الجسم (= حيث نلاحظ المزيد من الخطوط على نفس السطح). إذا رغب المرء في الاستمرار في تشبيه الأرصاد الجوية الذي بدأ أعلاه، فيمكن للمرء أن يذكر القوة الناتجة عن عدم تجانس الضغط. لكي يكون هذا مفيدًا ومرتبطة بالخرائط التي يتم تقديمها عادةً، على سبيل المثال الرياح، يجب أيضًا أخذ دوران الأرض وتأثيرات درجة الحرارة ومختلف المضاعفات الأخرى في الاعتبار. وبالتالي، سنكتفي بالإشارة إلى أن القوة التي يمارسها الضغط هي أيضًا أكبر نظرًا لأن تبايناتها سريعة، ولكن عمليًا لا ترتبط عمليات النزوح الجوي بهذا فقط.



توضيح لمفهوم جهد الجاذبية الذي قدمه لاغرانج. في هذا الشكل، تظهر منحنيات متساوية الجهد، وهي عبارة عن كرات في حالة المصدر ذي التناظر الكروي، وكذلك بعض الأسهم التي تمثل قيمة قوة الجاذبية عند نقاط معينة. هذه القوى متعامدة مع متساوي الجهد، وكلها شعاعية وموجهة نحو مركز المصدر.

بالاعتماد على مفهوم إمكانات الجاذبية، أظهر بوانكاريه مرة أخرى المبادرة والأصالة، حيث ركز على البحث عن نظرية الجاذبية التي لا تتغير في ظل تحولات لورنتز حتى قبل عام 1905، بينما لم يفكر أينشتاين في السؤال حتى عام 1907. ومع ذلك، حتى لو كان لديه حدس مفاده أن سرعة انتشار الجاذبية ربما كانت تساوي سرعة الضوء "c" وأنه ربما كانت هناك "موجات" الجاذبية "2"، كان بوانكاريه متحفظاً جداً مرة أخرى في وجهات نظره، ولم ينجح، ولم يقرر التعامل مع الجاذبية بشكل مختلف عن الكهرومغناطيسية (كما فعل أينشتاين أخيراً). لكن في دفاعه، تجدر الإشارة إلى أن الكثيرين هم أولئك الذين فشلوا أيضاً في مواجهة هذه المشكلة، ولم يتم حلها حقاً حتى عام 1915 بواسطة أينشتاين ونسبيته العامة.

لإيجاد نظرية نسبية للجاذبية، كانت المشكلة مع ذلك واضحة: لقد كانت مسألة "بكل بساطة" تتعلق بالمرور من معادلة نيوتن التخطيطة تغير مجال الجاذبية = كثافة الكتلة، إلى المعادلة النسبية حيث الاختلاف النسبي في مجال الجاذبية النسبية = كثافة الكتلة والطاقة النسبية وحيث كان "مجال الجاذبية النسبية" و "كثافة الطاقة النسبية" مع ذلك متغيرين يجب تحديدهما، بينما كان "التباين النسبي" أيضاً عاملاً رياضياتياً جديداً يجب اكتشافه. ومع ذلك، لم يكن من الصعب تحديد "كثافة الكتلة والطاقة النسبية". في الواقع، تم تسليط الضوء بسرعة على كائن رياضي يعمم كثافة الكتلة بطريقة نسبية، موتر زخم الطاقة $T_{\mu\nu}$ ، في سياق النسبية الخاصة. يظهر هذا الموتر بشكل طبيعي، في إطار النسبية، بعد ظهور متجهين (رباعي) تم ذكرهما سابقاً: الذي يجمع طاقة الجسيم ودفعه (رباعي الطاقة النبضي)، وكذلك الذي يجمع معاً كثافة الشحنة الكهربائية وتدفقها (= متجه ثلاثي الأبعاد مرتبط بـ "تدفق" هذه الشحنة). بتعبير أدق، يُظهر وجود المربع الأول أنه لم يعد

بإمكان المرء فصل الطاقة والاندفاع (ويعني التكافؤ بين الكتلة والطاقة)، بينما يوضح الثاني أن أي كمية مادية موزعة بشكل مستمر (مثل الكثافة الحمل) مع المتجه ثلاثي الأبعاد الذي يصف نقله لتشكيل رباعي. وبالتالي، إذا أخذنا في الاعتبار الكمية المادية الموصوفة بواسطة رباعي زخم الطاقة، فإننا نفهم بشكل بديهي جيدًا أنه إذا كنا نرغب في الاهتمام بالتوزيع المستمر لهذه الكمية (تعميم مفهوم التوزيع المستمر للكتلة)، فإن وصفه الكامل يمر عبر "تدفق نسبي" لكل مكون من مكوناته، أي $4 \times 4 = 16$ رقمًا تشكل موتر زخم الطاقة 4.

من بين المحاولات المختلفة التي تم إجراؤها، من المثير للاهتمام أن نذكر نظرية الفيزيائي الفنلندي جونار نوردستروم، الذي ظل اسمه قبل كل شيء في تاريخ الفيزياء لاكتشافه، مع الألماني هانز ريسنر، لحل معادلات النسبية العامة التي تصف ثقبا أسود بشحنة كهربائية غير صفرية. في محاولة مثل محاولة بوانكاريه Poincaré أبسط حالة ممكنة، اقترح نوردستروم في عام 1912 نظرية الجاذبية النسبية التي يكون فيها النظير النسبي لإمكانات الجاذبية النيوتونية مجالًا قياسيًا يتحقق من معادلة متغيرة في ظل تحولات لورنتز. بتعبير أدق، كانت الفكرة هي وجود معادلة "مشتقة جزئية" متغيرة تربط بين هذا الكمون الثقالي وكمية "قياسية" أخرى تكونت من موتر زخم الطاقة. لكن كانت محاولة نوردستروم لمواصلة وصف الجاذبية من خلال حقل عددي أحد أخطاء نوردستروم الإستراتيجية. في الواقع، فإن نجاح أينشتاين، بعد بضع سنوات، يعتمد من بين أشياء أخرى على وصف الجاذبية حيث يكون مجال الجاذبية هو نفسه موترًا، ومصدر هذا الجاذبية هو موتر زخم الطاقة. ومع ذلك، من الواضح أن أينشتاين لم يكن الوحيد الذي تعامل مع المشكلة بهذه الطريقة، وإذا نجح فذلك بفضل حدس لامع آخر كان لديه: إعادة قراءته لعالمية السقوط الحر.

1 بالمعنى الدقيق للكلمة، سيكون من المستحسن أيضًا التمييز بين "الكتلة الجادة النشطة" (التي تخلق القوة) من "الكتلة الجادة السلبية" (التي تخضع للقوة). لكن سيتم تجاهل هذا التعقيد هنا لأن التجارب تشير، بدقة كبيرة جدًا، إلى المساواة بين هاتين الجماعتين.