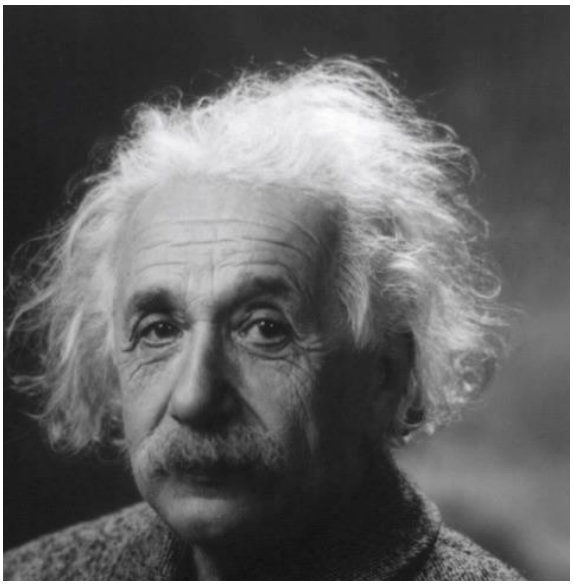
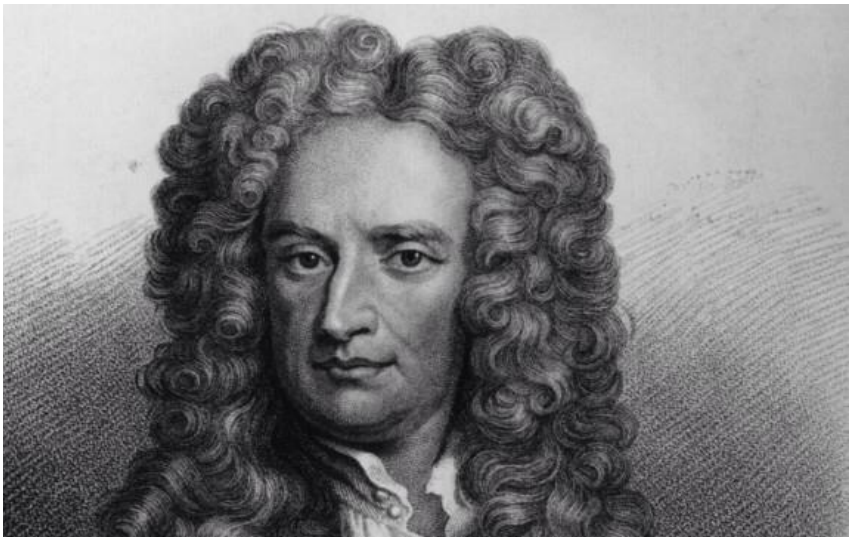
الجاذبية





موجز الجذب العام والنسبية

كتابة: حسين حمد الكريمي

مراجعة: محمد السنوسي عامر

جمعية رؤية لهواة الفلك

الجاذبية

موجز مبسط للجذب العام والنسبية

كتابة:

حسين حمد الكريمي

مراجعة لغوية:

محمد السنوسي عامر

يقول اينشتين: "الخيال ينقلك إلى أي مكان"

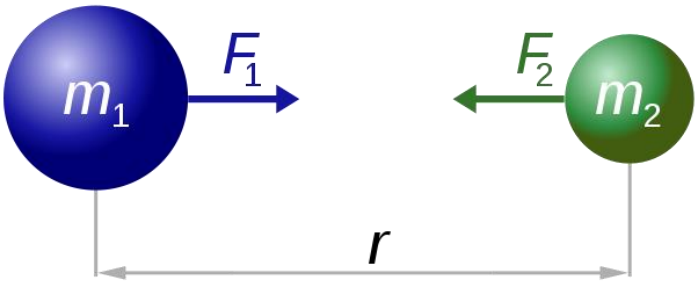
رافقونا بخيالكم في رحلتنا لسرد موجز أكبر ثورتين في الفيزياء ولتتعرفوا كيف استطاع اينشتاين ونيوتن برفقة الكثير من الدعم والخيال الواسع الوصول إلى الحقيقة.

قدم السير إسحاق نيوتن في عام 1687م نظريته التاريخية عن الجاذبية في كتابه المبادئ الرياضية للفلسفة الطبيعية، (باللاتينية: Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica) – حيث كتب أغلب كتبه باللاتينية – مفسراً الكثير من الظواهر العلميّة صعبة التفسير، تساءل نيوتن عنْ ماهيّة هذا المحرّك الطبيعي الخارق الذي يَجْعَل كل شيء يدور بانتظام تام، القوّة التي تجعل من القمر شقيقاً مُلازماً للأرض، تَرْبط الأجسام الكونيّة الهائلة ببعضها، وأيضاً تمنع الأجسام الضئيلة جداً من التحليق بعيداً عن الأرض.

الجاذبية (بالإنجليزية Gravity) أو كما اشتقها نيوتن من الكلمة اللاتينية Gravis – التي تعني "ثقيل" – هي تلك القوة التي يمكن التنبؤ بها كما وصفها فِي قانونه للجذب العام the universal gravitation، كما تؤثّر عَلى كل المواد الموجودة فِي الكون، خالقة وظيفة لكل من الكتلة والمسافة في معادلة رياضيّة دقيقة تُعتبر من الأهم عَلى الإطلاق، التي تنص بأن كل جُزَيْء مُكوّن من المادة يجذب كل الجزيئات الأخرى التي تُحيط به، على سبيل المثال: الجزيئات التي تتكون منها الأرض والجزيئات التي تتكون منها الشمس بقوة جاذبية تتناسب تناسباً مباشراً مع كتلة هذه الجزيئات – أي تزيد الجاذبية عندما تزيد كتلة الجزيئات – وتتناسب عكساً مع مربع المسافة بَيْنهمَا – أي تقل عندما تزيد المسافة بين الجزيئين.

تكون قوّة الجذب متساوية للطرفين، أي أن هذه الجزيئات ستتبادل نفس القوّة الجاذبة وعندما نقول إنّ جسمين يتبادلان قوة الجاذبية بنفس القيمة هذا لا يعني أنّهما يتحركان بنفس الحركة، فبحسب قانون نيوتن الثاني للحركة: قيمة التسارع التي تحدث لأحد الجسمين - عَلى سَبِيل المثال الأرض والشَّمس- تساوي قيمة قوة الجاذبية التي بينهما، قسمة كتلة الجسم، فالتسارع الذي يحدث للشمس حسب هذه المُعادلة ضئيل جداً مقارنة بالتسارع الذي يحدث للأرض، فلِذلك تدور الأرض حول الشمس وأيضاً تدور الشمس حول مركز المجرة درب التبانة the Galactic Centre – الذي كتلته تساوي 4.1 مليون كتلة شمسيّة – وليس العكس. ولتوضيح وتبسيط معادلته قال نيوتن: **"استنتجت من هذا أن القوة التي تُبقي الكواكب في مساراتها متعلقة بتربيع البعد بين مركزيهما.**

من هنا قارنت القوة التي تمسك القمر في مساره بالقوى على سطح الأرض ووصلت إلى نتيجة قريبة جدا". بذلك نجد أن الصيغة الرّياضيّة الأساسية للقانون جاءت كالتالي: (F=GxM1M2/R2) حيث m1 وm2 كُتلة الجسمين و r المسافة بينهما، و G ثابت الجاذبية ويساوي = 6.67408 × 10- 211 s-1 kg-1 m3 والذي غـالباً ما يتم الخلط بينه وبين عجلة الجـاذبية الأرضية التي تساوي 9.81 m/s²، تتمتع هذه الصيغة بمنطق بَدَهِيّ، فهي تُخبرنا أن الجاذبية تصبح أضعف عند المسافات الطويلة، أي كلما كان r أكبر كانت قيمة الجاذبية أصغر، وأنّ قوة الجاذبية بين الأجسام ذات الكتلة الأكبر تكون أقوى، أي كلما كانت m1 و m2 أكبر كانت الجاذبية أكبر.



$$F_1 = F_2 = G\frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

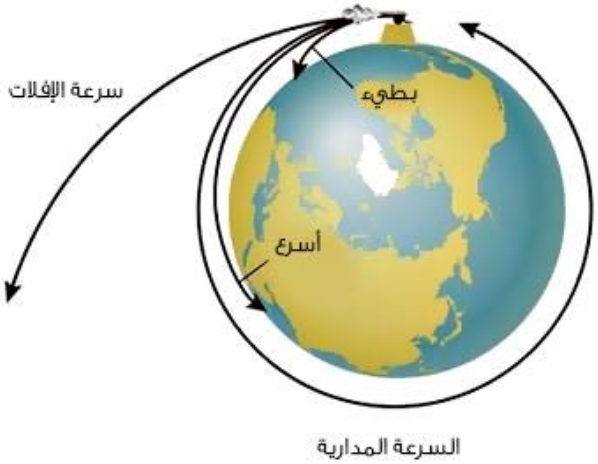
صورة توضيحية للمعادلة

بكلمات نيوتن وطبقاً لهذا القانون لِماذا لا تتم هذا العمليّة بين الجزيئات عَـلى الأرض؟ لِماذا لا تتجاذب الأشياء ببعضها البعض فِي الأرض كما تفعل الأرض والقمر، أو كما يفعل المشتري وقمره أوروبا مثلاً؟ بالطبع هـذا لا يحدث بسبب أنّ قوة التجاذب بين أي جسمين عَـلى سطح الأرض أصغر من قوّة تجاذب أي مِن الجسمين مع الأرض أي أن قوة الجاذبية الأرضية تمنع أي جسم مِـن الجسمين من التجاذب فيما بينهما لأنهما مشغولان

بالتجاذب معها، تماماً مثل انشغال تلك التفاحة بالتجاذب مـع الأرض عندما استنتج نيوتن قوانينه (أو هكذا كما تقول الأسطورة).

بالإضافة إلى تساؤله حول سقوط هذه التفاحة تساءل نيوتن أيضاً عن مدى قُدرة هذه الجاذبية التي تجعل التفاحة تعود للأرض في كل مرة يرميها لأعلى. تساءل عن تلك الرمية التي ستُمَكِّن التفاحة الهروب من الأرض وبالطبع تساؤلاته قادته لتجربة خيالية أخرى تخيل فيها قذف قذيفة بِواسطة مدفع بعدة سرعات مختلفة ملاحظاً وصول القذيفة بعد الدوران بسرعة معيّنة إلى نقطة البداية، ومن دوران القمر حول الأرض استنتج نيوتن انه لابد من هـذا القذيفة عند ارتفاع معين ان تستمر بالدوران بشكل لانهائي حول الأرض وبارتفاع وسرعة اخر ستتمكن التفاحة الهروب من الارض مستنتجا بهذه التجربة رياضياً ان هـذا الهروب يعتمد على سرعة الهروب Escape Speed حقـاً، فإذا قمنا بقذف هذا التفاحة رأسيًّا إلى أعلى سترتفع حتـى توقفها الجاذبية لتعود إلى الأرض مرة أخرى، وطبقاً لقوانين نيوتن ستقل قوّة الجاذبية كُلما ازدادت المسافة لهذا يجب للتفاحة ان تمتلك القوة لتتسارع بها بعيداً الى المنطقة التي لا تؤثر فيها الجاذبية الارضية، بحيث تحتاج التفاحة او أي جسم اخر الدفعة او القوة التي ستمكنها من التسارع بسرعة الهروب التي تُقدر بـ11.2 كيلومتر في الثانية للتغلب عَـلى الجاذبية الأرضية والوصول الى هذه المنطقة، ولأن الجاذبية تزيد كلما زادت الكتلة تعتمد سرعة الهروب على مقدار كتلة الكوكب فمثلاً لو خرجت التفاحة من الأرض واتجهت إلى الشمس فستحتاج إلى التسارع بسرعة 617.5 كيلومتر في الثانية للإفلات مِن جاذبية الشمس، أما إذا أرادت الدوران حول الشمس أو الأرض فيعتمد هـذا الأمر على السرعة المدارية Orbital Speed فـتزيد هذه السرعة كلمـا اقتربت التفاحة من الأرض، وتقل بابتعادها عنها.

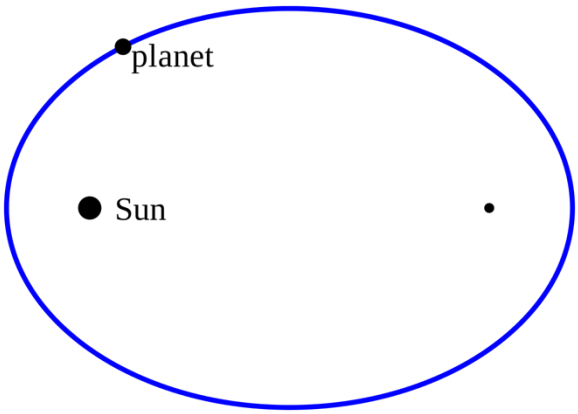
وبنفس طريقة التفاحة يستطيع العلمـاء إرسال المكـوكات الفضـائية لدراسة أعماق الفضاء، أو حتى لإرسال أقمار صناعية لتدور حول الأرض.



رسم توضيحي لتجربة نيوتن الخيالية

"إذا كَانتْ رؤيتي أبعد مِن الآخرين فذلك لأني أقف على أكتاف العُظماء"
هكذا قال نيوتن عَلى عمله الذي لم يكن لِيُوصلَنا إلى أعماق الفضاء لولا استعانته بمن قبله من العظماء، اعتمد نيوتن لإيجاد نظريته ومعادلاتها، على نظرية وقوانين العالم الفلكي الألماني يوهانز كبلر Johannes Kepler، التي صاغها في عام 1609م مُثبتا نظريّة العالم اليوناني كوبرنيكس عنْ مركزيّة الشمس في المجموعة الشمسيّة ومبيناً عن طريق العمليات الحِسابية أن مدارات الكواكب حول الشمس ليست دائرية تماماً وإنما إهليجية – شكل هندسي يَنتج عن دائرة مطالة – وموضحاً بأن الشمس لا تقع فِي المركز تماماً إنما تتواجد في الجانب في أحد نقطتين بجانب مركز الدوران.

ومِن الجدير بالذكر أن مدارات كواكب المجموعة الشمسيّة ليست كلها ذات مدارات إهليجية فعطارد والزهرة وبلوتو تدور حول الشمس بمدارات دائرية بينما بقيّة الكواكب تتبع مسارات إهليجية قريبة من المدار الدائري بحيث تكون نسبة التفلطح صغيرة. ووضح كبلر أيضاً في قانونه أنّ سُرعات الكواكب حول الشمس تختلف بالبُعد أو بالقرب عنها فتقل عندما يكون الكوكب بعيداً عنها وتزيد عندما يكون قريبا، تماماً مثل كوكب عُطارد يسير بسرعة أكبر من التي تسير بها الأرض وذلك لأنه الأقرب مِنْهَا.



توضيح لشكل المدار الإهليجي

دائماً ما يعتمد العُلماء على اكتشافات وخيال سابقيهم، وكَـاعْتماد نيوتن على نظرية كبلر لِتطوير واستنتاج نظرية مثلت أُسُسَ الفيزياء؛ لِتصبح نظرية غير قابلة للجدال لـقُرابة 300 عـام، جاء أينشتاين أيضاً معتمدا على نيوتن بتساؤلاته وخياله الواسع بنظرية هددت المفـاهيم الأساسية لأي منطق علمي، في عـام 1915م، وبعد العديد مِـن التـجارب الخيالية والأسئلة الكثيـرة التي طرحها وشكك بهـا أينشتاين، أخيراً أوصلته إلـى حقيقة ثورية هـزت أُسس العلم القـديم مُغيراً نظرتنا للعـالم للأبد، ذاهباً لأبعـد منـاطق الخيال البشـري وأكثرها غموضاً وتعقيداً، مُبتعداً عن إحدى النقطتين ومصارعاً الضوء، استطاع أينشتاين أخيراً الوصول.

النظرية النسبية (the theory of relativity) - (بالألمانية: Relativitätstheorie)

طرأ مبدأ النسبيّة لأوّل مرّة عَـلى خيال الفلكـي الإيطالي جاليليو جاليلي عـام 1632م، حينَما قام بتجربة خيالية تصوّر فيهـا وجود شخص فِي سَفِينَة مُغلقة من دون نوافذ تُبحر بسرعة ثابتة فِي وسَط البَحْر، مثّلتْ هذه التجربة اللمحة الأولى للنظريّة النسبيّة فـالراكب الذي في السفينة لن يستطيـع معرفـة ما إذا كانت السفينة تبحـر للأمام أم للخلف أم هـي

متوقفة تماماً إلا إذا استطاع النظر خارِج السفينة فسيستطيع مُقارنة نفسِه بالـنسبة إلى سَفِينَة أُخرى مثلاً.

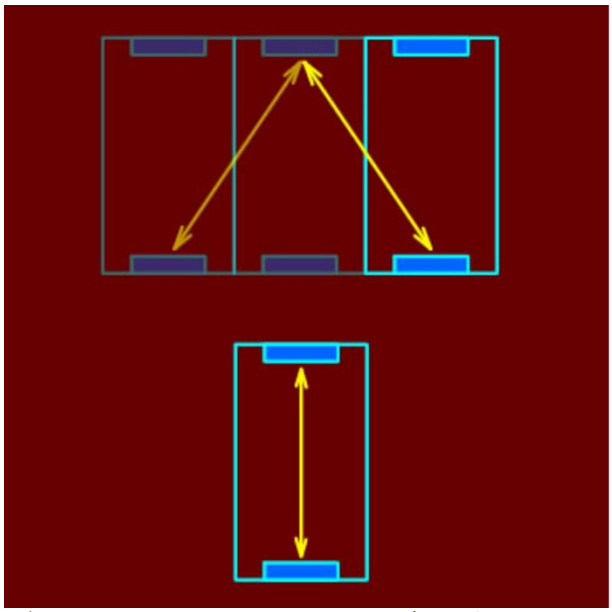
لنُعطي هذه التجربة لمسة أكثر تطـوراً أو لِنَـقُل، أبعد بـأربعة قرون من خيال جاليليو، ولنتخيّل مركبة فضائية منطلقة فِي فضاء خاوٍ بحيث لا توجد نجوم أو كواكب لِنَنْسُبَ إليها سُـرعة الصاروخ، النتيجة ستكون تماماً مثل السابقة، الراكب فِي تلك المركبة لن يستَطيع معرفة اتجاهه وسرعته لأن كل ما يراه هو المادة المظلمة Dark matter – أو لِنَقُل الفرَاغ لتفادي الكثير من الأسئلة – سيستطيع الراكب معرفة اتجـاهه وسُرعته فقط إذا – مثلاً- ظهرت الأرض فجأة، عِندَهَا ستكون تلكَ النُقطة الزرقاء الباهتة المركز الذي ننسب إليه حركتنا، فـالحركة للأمام ستكون نحوها وللخلف بالابتعاد عنها، تماماً مثل ابتعادنا بسيارة ما في الأرض من شَجَرَة مثلاً أو من سيارة أخرى واقفة، ستكون الشجرةُ والسيارةُ الواقفةُ وكلُّ شيء ثابت خلافَها المركزَ الذي ننسب إليه حركتنا، هـذه كَانتْ التجربة الخيالية الأولى أو الفرضية التي مثّلت القسم الأول من النظرية النسبية، الذي يُسمى بالنظرية النسبية الخاصّة **Special Theory of Relativity** أو نظرية اللاتغير **the invariant theory** كما يسميها أينشتاين، سُميت بالخـاصة نظراً لأنها تخُـص المعامل المرجعية أو الإطارات المَرجِعية وكيفيّة تأثرها بـبعضها الـبعض تمـاماً مثل التجربة الخيالية السابقة، فالشجرة وكل ما هو ثابت على الأرض هو المرجع للشخص الذي فِي السيارة عندما يُريد قياس سرعته بالنسبة لشيء ثابت، مثلاً عندما يتسارع بسيارته بسرعة 100 كيلومتر/ث فستكون هـذه السُرعة منسوبـة للأشياء الثابتة فقـطْ، فلا يستطيع القـول إن سرعته هذه ثابتة بالنسبة لجميع المراجع سواء كَانتْ ثابتة أو متحركة، فسرعته النسبيّة بالنسبة لسيارة أخرى تتسارع بنفس سرعته هي صفر.

الآن لندخلْ إلى الفرضيّة الثانية للنسبية الخاصة ولنتخيّلْ تلك المركبة الفضائية منطلقة بسرعة تقارب سُـرعة الضوّء ولنفترض أيضاً إطلاق شعاع ضوء من هذه المركبة، طبقاً لهذا التجربة ونسبيّة جاليليو فإن ملاحِظًا آخر يراقب المركبة مِن بعيد فسيرى أنّ شعاع الضوّء يتحرك بضعف سُرعة الضوّء – تماما مثل سيارتين إحداهما تتحرك بسرعة

ضِعْفَ الأخرى – لكن هذا ليس ما قاله أينشتاين، فتُخبرنا نظريته على أنّ الشُعَاع يتسارع بسرعة الضوء نفسِها بالنسبة للملاحظ البعيد وأيضاً للملاحظ الذي في المركبة، وهذا يعني أنّ سُرعة الضوء هي الثابت الوحيد في جَمِيع المراجع.

وبالطبع ثبوتية الضوّء حملت معها عدة عواقب أو عدة تجارب خيالية أخرى متعلقة بهذه المعامل والإطارات المرجعية السابقة ولسرد هذه العواقب دعونا نمضي في هذه التجارب الخيالية.

لنتخيل قطاراً يتسارع بسُرعة تقارب سرعة الضوّء وَلْنَقُلْ إنها تُساوي 280,000 كيلومتر فِي الساعة، ووضعنا في هذا القطار مصباحًا مُضيئًا على أرضية القطار بحيث شعاع الضوء يكون موجها عمودياً لأعلى وستكون هنالك مرآة تستقبل هذا الشُعَاع بحيث سينعكس إلى أسفل عمودياً ليرجع إلى المصباح، سيكون انطلاق شعاع الضوّء كما هو بالنسبة للراكبين في القطار، بحيث سينطلق عمودياً ولكن سيكون الوضع مختلفاً بطريقة غريبة بالنسبة للمراقب الذي يقف فِي المحطة خارج القطار فأثناء انطلاق شعاع الضوّء من المصباح سيشاهد المراقب خارج القطار أنّ المرآة المعلقة قد تحركت مع القطار قبل أن يصل الضوّء إليها، وذلك نتيجة لسُرعة القطار الهائلة، هذا يعني أن شعاع الضوّء بالنسبة للمراقب خارج القطار سيقطع مساراً أطول للوصول للمرآة من الذي يقطعه بالنسبة للمراقب داخل القطار، وهذا سيعني أيضاً أنّ زَمَن استغراق الضوّء للوصول للمرآة سيكون أطول بالنسبة للمشاهد خارج القطار، وبالرجوع إلى مبدأ النسبيّة لجاليليو وتجربته الخيالية نجد أن المراقبين في القطار سيلاحظون أنهم الثابتون والمحطة هي التي تتحرك وأنّ الزمن سيكون أطول أيضاً عند المُراقبين في المحطة بالنسبة للمشاهدين في القطار، مُستنتجين بذلك مُلاحظة بطء الزمن عِنْدَ تسارع الأجسام بِسرعات تُقارب سرعة الضوْء بالنسبة لبعضها البعض.



نلاحظ في الأعلى ما يشاهده مراقب المحطة

وفي الأسفل ما يشاهده مراقب القطار.

استطاع أينشتاين الوصول إلى هذه النتائج بفضل تحويلات ومعادلات الهولندي هندريك لورنتز Hendrik Lorentz ونستطيع باستخدام هذه الصيغ إيجاد مقدار بطء الزمن بدقة كَبِيرَة وأيضاً نستطيع استنباط الناتج الثاني لثبوت سرعة الضوء.

لنفترض أنّ طول المحطة كان 3,100,000 كيلو متر عند تطبيق هذه التحويلات سنجد أنّ زمن قطع القطار لهذه المسافة بالنسبة لراصد على المحطة سيكون أطول من الذي سيرصده الراصد الذي في القطار وذلك لبطء زمن القطار بالنسبة للمشاهد في المحطة كما وضحنا سابقا، ولنفترض أننا استخدمنا هذه التحويلات ووجدنا أنّ زمن قطع القطار لهذه المسافة 11 ثانية بالنسبة للمشاهد الذي في المحطة، و 7 ثوانٍ بالنسبة للمشاهد الذي في القطار، عندها سنستطيع بكل سهولة معرفة مقدار الناتج الثاني لثبوت الضوّء تقلص المسافات length contraction فبالنسبة للراصد الذي فِي المحطة فإن المسافة ستكون تماماً كما هي؛ لأنه ثابت، أما بالنسبة للراصد الذي فِي القطار سيجد أنّ مسافة المحطة قَد تقلَّصت ونستطيع إيجاد هذا التقلّص باستخدام معادلة بسيطة (المسافة = الزّمن

* السُرعة) وسنجد بافتراضنا هذا أنّ طولها بالنسبة لمشاهد القطار سيكون : 7 * 280,000 = 1,960,000 كيلومتر أي أنّ مسافة المحطة تقلَّصت قرابة المليون كيلومتر بالنسبة للمشاهد الذي في القطار.

للنسبية الخاصة فرضية أخرى، بل ليست مجرد فرضية فقط، إنها المعادلة الأشهر على الإطلاق ($E=mc^2$)، تكافؤ الكتلة والطاقة mass–energy equivalence لذلك يجب ان نمضي في تجاربنا الخيالية: لنقُلْ إني أعطيتك دَفعة قويّة أكسبتك 90% من سرعة الضوّء. ماذا إن لحقتُ بك وأعطيتك الدفعة نفسها، مرة أخرى؟ لنْ تصبح سرعتك 180% من سرعة الضوء، لأن هذا غير مسموح طبقاً لما قاله أينشتاين، ستقترب من سرعة الضوء، لكن لن تتخطاها مطلقًا إذاً السرعة التي تكتسبها جراء دفعتي لا تكافئ قوة دفعتي لك، يصبح الأمر أصعب كلما تقربنا من سرعة الضوّء، فإذا أعطيت نفس مقدار الدفعة الأولى ستصبح سرعتك 99% من سرعة الضوّء والدفعة الأخرى تصبح 99,9% و 99,99% في الدفعة الأخرى.

إذاً أين ذهبت كل الطاقة التي أعطيتها لك؟

نُلاحظ أنه في كل مرّة يصبح دفعك أصعب من المرة السابقة وفِي كل مرّة تنقُص الطاقة المعطاة، يبدو وكأن الطاقة تحولت إلى كُتلة، هذا تماماً ما يحدث، في كل زيَادة للطاقة والسرعة تَصحبها زيادة للكتلة، وبعد عدة استنتاجات رياضية استطاع أينشتاين الوصول إلى الصيغة الرياضية لوصف هذه الحالة، الكتلة تزداد بزيادة الطاقة فلِذلك نستطيع إيجاد الكتلة بالمعادلة السابقة عن طريق ($M=E/c^2$) بحيث M الكتلة ، E الطاقة المُعطاة، C^2 مربع سرعة الضوّء. لِنُجْرِ عمليةً حسابيةً صغيرةً: إذَا أعطينا جسماً ما طـَاقة هـائلة ولنقل $9*10^16$ جول فإنه حسب المعادلة السابق الناتج سيكون اكتسابه واحد كيلوجرام من المادَّة. إذاً هـذا يعني أنه عند استخدام ($E=mc^2$) سنستطيع إخراج من واحد كيلو جرام $9*10^16$ من الطاقة. لكن مهلاً لا يسري الأمر هكذا. في هذه الحالة ليست كُتلة

الجسم الأصلية التي تعطينا هذه الطاقة الهـائلة بل كُتلته النسبية Relative Mass التي اكتسبها جراء تسارعه بما يقرب سرعة الضوء مثل المثال السابق، فواحد كيلو جرام هي الكتلة المكتسبة جراء تسارع جسمٍ ما بواسطة 9*10^9 جول من الطاقة وليس كتلته الأصلية، نستنتج من هذا تحوّل 9*10^9 جول إلى 1 كيلو جرام وليس تحولها إلى ما يساوي الكتلة الأصلية.

وبهذه المعادلة نستطيع تحويل الكتل الصغيرة جداً إلى طـَاقة هـائلة جداً اعتماداً على سرعة الجسم، وبالفعل استطاع العلماء تسريع إلكترون لما يقارب 99,99% من سرعة الضّوْء بواسطة مسرعات الجسيمات particle accelerator مُتحصلين على طـَاقة هـائلة ومُستفيدين منها بدراسة الجُسيمات تحت تأثير هذه الطاقة الهـائلة. عن طريق المعادلة البَسيطة استنتج أينشتاين العلاقة الأكثر تأثيراً في الفيزياء، العلاقة التي تجعل من الكتلة مساوية للطاقة والطاقة مساوية للكتلة، وبالطبع استطاع العلماء الاستفادة من هذه المعادلة في جميع مجالات الطاقة، لكن ليس كلها ذات فائدة، فقد اسْتُغِلتْ هذه المعادلة لدوافع وغرائز بشرية فصُنعت بواسطتها القنابل النوويّة التي أحدثت تغيراً جذرياً لما يحدث في الحرب سابقاً.

تفاحة اينشتاين ؟

لطـالما كان الضوء "تفاحة" أينشتاين، الشيءَ الأكثرَ غموضاً بالنسبة لأينشتاين قبل النسبية، والعديد من تـجارِبِه الخيالية كانت عن الضوء. كان اينشتاين يحتاج إلى دعم فكري آخر عدا جاليليو لدعم نظريته ولابد من هذا الدعم أن يكون عن الضوّء.

جَـاء هـذا الدعم قبـل 50 عـاما من النسبيّة من عَالم إسكتلندي الجنسية جيمس كليرك ماكسويل James Clerk Maxwell العالم الأكثر تأثيرا فِي الفيزياء بعـدَ نيوتن وأينشتاين كما قال العديد من العُلَماء، جـَاء ماكسويل باشتقاق أربع معادلات تفاضلية تصف سلوك الموجات الكهرومغناطيسية، وتماماً كاعتماد نيوتن على عمل كبلر، اعتمد

ماكسويل على عمل ثلاثة علماء (غاوس، وفاردي، وأمبير) مُستعملا مُعادلاتهم لاشتقاقها بطريقة تفاضلية، موحِّداً المجالين الكهربائي والمغناطيسي، وموضحاً في النهاية أن خواص هذا المجال تماثل تماما الخواص التي في الضوء، وسرعتها تطابق سرعة الضوء، مستنتجاً في النهاية أن الضوء عبارة عن موجة كهرومغناطيسية Electromagnetic Wave، ولمعرِفة كيف سيستفيد أينشتاين من صياغة ماكسويل للكهرومغناطيسية لابُد من العودة إلى نيوتن أو تحديداً إلى التشوّه الذي وقعت فيه نظريته.

تعتمد نظريّة الجذب العام عَلى التأثيرات اللحظية لجميع الظواهر الفيزيائية، واستطاع نيوتن باستخدامها تحديدَ مقدار الجاذبية بدقةٍ كَبِيرَةٍ، ولكن – لكثرة اهتمامه بالتفاح – نيوتن لم يكنْ مهتماً بتأثير الضوّء – أو الموجة الكهرومغناطيسية – عَلى صيغته الدقيقة. فبالعودة إلى قانون نيوتن نلاحظ أنه سيعمل بشكل دقيق عند استخدامه لإيجاد قيمة الجاذبية بين الأرض والشمس، ولكن خيال نيوتن لم يُسعفه لتخيل المزيد.

ماذا يَحدُث إذَا اختفت الشمس فجأة؟

طبقاً لنيوتن فإن ضوءَ الشمس وتأثيرَ جاذبيتها سيختفي فور اختفائها مهما كَان بُعدها عن الأرض، لكن نيوتن لم يكنْ ملاحظاً للمسافات الهائلة فالشمس تبعد 1.496×108 كيلومتر أي ما يقطعه الضوّء في ثماني دقائقَ وعشرين ثانيةً، وبِما أن سرعة الضوّء هي الحد الأقصى لأي سرعةٍ، فعندَ اختفاء الشمس فجأة لن يختفي ضَوْؤها فجأة، بل ستظَل تُضيء الأرض لمدة ثماني دقائقَ وعشرين ثانية ثم تختفي، هذا ما حدث لبعض النجوم التي تظهر في السماء ليلاً فبعض منها تفجرت منذُ آلاف بل وحتى ملايين السنين ولكن نظراً للمسافة الهائلة بينها والأرض لازلنا نرى ضَوْءَها يُزين ليل نُقطتنا الزرقاء الباهتة إلى الآن.

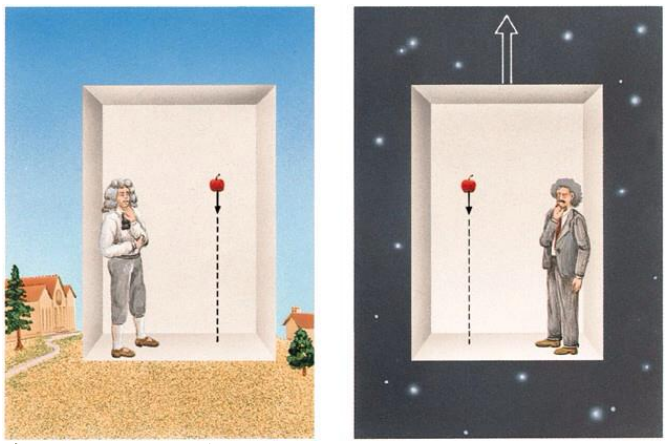
هذه كانت الضربة الأولى لفيزياء نيوتن وبها استطاع أينشتاين إنهاء صياغة المرحلة الأولى من نظريته (النسبية الخاصة) مستنتجاً في نهايتها أن نسبية جاليليو تمثل قاعدة

نظريته، وأيضاً ثبوت سرعة الضوْء مهما تغيّرت المعامل وملاحظاً فِي النهاية بطءَ الزمن وتقلُّصَ المسافات كنتيجة لثبوت سرعة الضوْء التي أصبحت الحدَّ الأَقْصَى لجميع السرعات في الكون. منْهَا يبدأ استعداد أينشتاين لإعداد القسم الثاني من ثورته الفيزيائية.

النظرية النسبيّة العامّة the General Theory of Relativity (GTR)

في طريقه بالمصعد لإلقاء إحدى محاضراته عن النسبية الخاصة، في هذا الوقت القصير أثناء صعوده، استطاع اينشتاين الوصول إلى التجربة الخيالية الأولى للقسم الثاني من النسبية. تخيل أينشتاين وجود هذا المصعد في الفضاء بحيث لا توجد جاذبية، وافترض أن المصعد بدأ بالتسارع لأعلى، أثناء سكون المصعد في الفضاء كان أينشتاين يطفو في المصعد، ولكن تغير الأمر عند تسارع المصعد لأعلى.

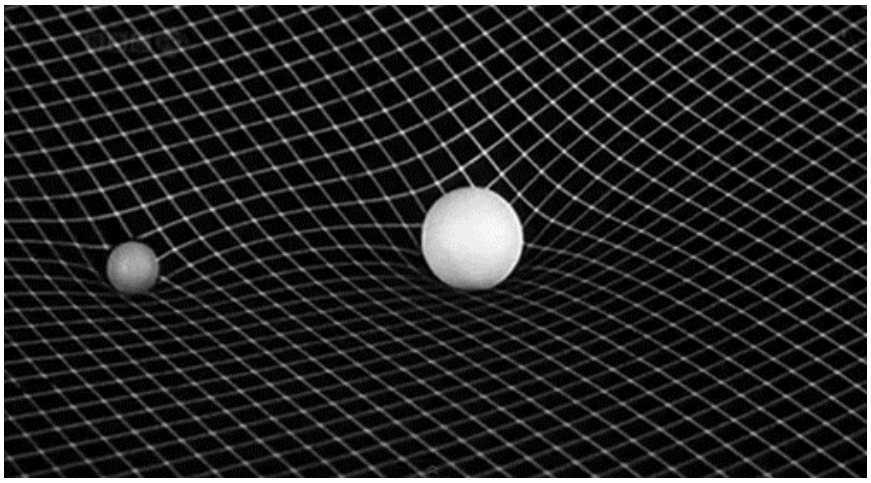
هذا ما يحدث حقاً إذا كنت في حقل الجاذبية الأرضية ستُسحب إلى أسفل كما الحال في المصعد المتسارع، استنتج أينشتاين من تجربته أثناء صعوده بالمصعد أنه لا فرق بين التسارع والجاذبية فكلاهما سيحملان نفس النتائج.



أينشتين متسارع الفضاء ونيوتن واقف في حقل الجاذبية الأرضية
وكلاهما يختبران نفس التأثير

تَسارُع الجسم بسرعات هـائلة يَتبعُه تشوهات في الزمان والمكان كما ذكرنا فِي ما سبق فِي النسبيّة الخاصة، وبِما أنه لا فرقَ بين التسارع والجاذبية طبقاً للتجربة الأخيرة؛ إذاً فالجاذبية أيضاً تستطيع إحداث تشوهات في الزمان والمكان – SpaceTime الزمكان – فمع زيادة السُرعة سيزيد التشوه، كذلك بالنسبة للجاذبية فمع زيادتها سيزيد تشوه الزمكان. وطبقاً لِصيغة نيوتن: تزداد الجـاذبيّة كلما زادت كُتلة الجسم؛ ولذلك الجسم الذي يملك الكتلة الأكبر يُحْدث تَشوُّهاً أكبر لنسيج الزمكان، لاحظ هنا تأثير الجسم عَـلى الزمان والمكان يَحدُث بنفس النسبة، بحيث لا يَحدُث تأثرٌ لأحدهما فقط، فالمكان (الطول والعرض والارتفاع أو العمق) مع الزمان يشكلان وجهين لعملة واحدة، فدمج أحرفهما ليس فقط لكثرة عدد الأحرف.

متسلحاً بالمبادئ الرّياضيّة لهندسة اللاإقليدية. Non-conventional geometryوبِتَشَوُّه نسيج الزمكان استطاع أينشتاين نسجَ وتفسيرَ طريقةٍ جديدة كلياً لعمل الجاذبية، فكلما كانت كُتلة الجسم كبيرة، زادت الجاذبية وزاد تَشوُّه الزمكان. ربط اينشتاين هذه الفكرة كما فعل مع الزمان والمكان، إذًا لابد من وجود شيء آخر يزيد كلما زادت الكتلة ليؤثر في زيادة الجاذبية؛ بذلك استنتج اينشتاين (انحناء الزمكان Curvature of space-time فكلما زادت الكتلة زاد الانحناء، ولتوضيح هذه الفكرة لابُد من الاستعانة بشيء ثنائي البُعد: لنفترض أنّ قطعةَ قماش كبيرةً مشدودةً مِن جميع الأطراف تُمثلُ نسيجَ الزمكان، فإذا وضعنا مثلاً كرة تنس فِي وسط هذه القطعة سيمثل هـذا ما يحدث في الزمكان بشكل ثنائي البُعد، ستنحني قطعة القماش نتيجة لكتلة الكرة ويزداد انحناء القماش كلما وضعنا كُتلة أكبر، فعند وضع كرة قدم كبيرة سيُصبِح الانحناء أعمق، وإذا وضعنا كرة التنس السابقة بجانبها سنشاهد سقوطها نحو كرة القدم، هـذا تماماً ما تحدثه الشمس للأرض ولجميع الكواكب الأخرى إلا أننا لسنا بالقرب كفاية لنسقط .

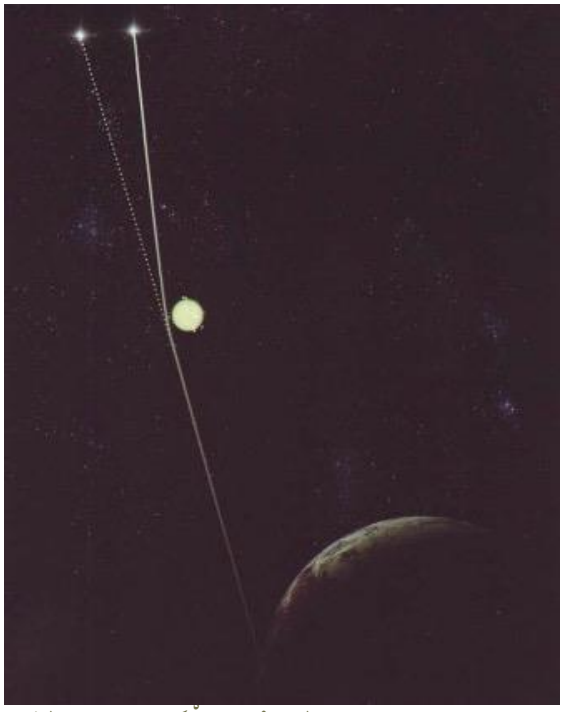


بالطبع المثال السابق يأتي بنسيجٍ ذي بُعديْن وغير مطابق تماما لما يحدث حقاً في الزمكان فنحن نتحدث عن ثلاثة أبعاد، بالإضافة إلى الزمن الرابع، فالأرض لا تَحني الزمكان من الأسفل فقط كما الحال مع قطعة القماش، فالتشوه أو الانحناء يَحدث في جميع جوانب الكرة. وكما تفيد صيغ أينشتاين أنّ هذه الانحناءات تستطيع جذب الكواكب فهي أيضاً تُخبرنا أنها ًقادرة على جذب حتى الضوء وهذا يقودنا الى طرح سؤال جديد.

كيف يُجذب الضوء وهو عبارة طاقة مُتمثلة في موجة كهرومغناطيسية؟

الضوْء المرئي هو طيف من الأطياف الكهرومغناطيسية Electromagnetic spectrum مثل الأشعة تحت الحمراء Infra-red وغيرها من الأطياف الأخرى المعروفة، تنتقل جميع هذه الأطياف بسرعة واحدة (سرعة الضوء)، وبالمصادفة أو (بالخطأ) يستطيع البشر رؤية إحدى هذه الأطياف فقط وتسمى بالضوّء المرئي. تنتقل جميع الأطياف الكهرومغناطيسية بواسطة جُسيمات أولية صغيرة تُسمى بالفوتونات Photon وبشرح مبسط تُخلق هذه الفوتونات بواسطة تغيّر يحدث في طاقة الإلكترونات. ولا تمتلك الفوتونات كُتلة ساكنة فهي مجرّد طاقة متنقلة، لكن تخبرنا معادلة أينشتاين السّابقة لتكافؤ الكتلة والطاقة أنّ الطاقة يمكن أن تتحول إلى كتلة نسبية أثناء تسارعها، وهذا تماماً ما يحدث للفوتونات فنجد امتلاكها للكتلة النسبيّة التي بواسطتها تستطيع أنْ تُجذَب للأجسام الأخرى.

بذلك تستطيع الاجسام أنْ تجذب الضوّء وبالتأكيد مقدار الجذب يعتمد على كتلتها. ولإثبات صحة نظريته اقترح أينشتاين مراقبة الضوْء القادم من نجم بعيد مروراً بالشمس، فبحسب نظريته لابد من أنْ يوجد انحناء لمصدر الضوء هذا، وبالفعل أول من استطاع إثبات وجود هذه الانحناءات الفلكيُّ البريطاني السير أرثر أدنجتون Arthur Eddington بالبعثة التي قام بها في جنوب أفريقيا أثناء كسوف الشمس واستطاع العودة بصورة توضح انحناء الضوء



صورة توضح انحناء الضوْء عِنْدَ مروره بالشمس

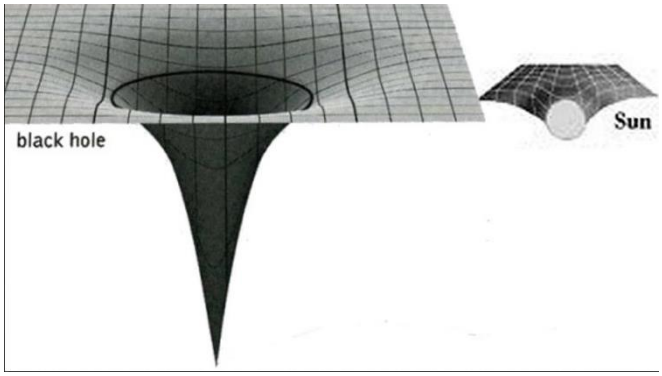
هذا الأمر يقودنا إلى إثبات صحة وجود النجوم الغامضة الثُقوب السوداء Black holes التي تُنُبِّئَ بوجودها من قبل، فما تحدثه الشمس من انحناء الضوْء بعيدٌ جداً عن الذي تحدثه هذه النجوم، فالضوء لا يستطيع الإفلات منها كأي شيء آخر لذلك لا نستطيع رؤيتها.

تُحدث الشّمس (قزم أصفر) مقدارا من الانحناء يكفي لجذب ثمانية كواكب وتستطيع أيضاً تغْييرَ مسارِ أيِّ إشعاعِ ضوءٍ قادمٍ. هنالك العديد من النجوم الأخرى التي تفوق كتلة الشّمس بمليارات المرّات والتي بالتأكيد تحدث انحناء يفوق مليارات المرات مِنَ الذي

تحدثه الشّمس، بذلك تُحدِث انحناءً هائلا، كافيا لجذب الضوْء بمقدارٍ كبير جداً، لكن مع انتهاء حياة مثل هذه النـجوم فإن الطاقة التي سُيحدثها ستكون هـائلة جداً بحيث تجعل الانحناء أكثر عمقاً، ما يجعل حتى الضوْءَ بسرعته الحدودية لا يستطيع الإفلات من جذبه.

مهلاً! كيف تُحدِث الطاقةُ انحناءً للزمكان؟

أوه، الطاقة هي الكتلة والكتلة هي الطاقة.



رسم توضيحي للانحناء الذي يسببه ثقب أسود مقارنة بالشمس

هذه الثقوب تقودنا أيضاً بجاذبيتها الهـائلة إلى نهـاية مقالنا ونهاية رحلتنا الخيالية، مُشاهِدينَ بها الكثير مِن التجارب الخيالية والكثير من الاستنتاجات الرياضية كانت العنصر الأساسَ لثَورتيْنِ، بدْءاً بثورة نيوتن وتفسيره الفريد للواقع، انتهاءً بخيال اينشتاين الواسع ذاهباً بِنَا أبعد من النقطتين بصحبة العديد من الإسهامات المذهلة التي جعلت من النظريتين حَجَرَيِ الأساسِ لفهم واقعنا، الفيزياء، وبالطبع لطالما سَننتظر المزيد من الأحجار الأخرى لنجعل فهمنا لواقعنا ليس مجرد خيال فحسب، بل وحقيقة تُسافر بِنَا إلى أعماق الفضاء وبين النـجوم.