47

النسبية وموجات الجاذبية

Relativity and gravitational waves

لقد أحدثت نظريتا آينشتاين التوأم: النسبية الخاصة والعامة ثورة في الفيزياء في أوائل القرن العشرين. فبالنسبة لعلماء الكونيات الأكاديميين، قدمت النظريتان أسسًا لفهم طبيعة الكون في حين أنهما بالنسبة لعلماء الفلك التطبيقيين يمكنهما أن تقدما أدوات جديدة لملاحظة تطرفات الكون.

كان «ألبرت آينشتاين» عاملًا أكاديميًّا فاشلًا في مكتب براءات الاختراع السويسري عندما نشر في عام 1905 سلسلة مكونة من أربع أوراق بحثية دفعت به إلى الشهرة العلمية، منهما اثنتان تعلقتا بالعالم الذري ودون الذري لكن الزوج الآخر بحث في سلوك الأجسام في حركة غير متسارعة بسرعة قريبة من سرعة الضوء ـ النظرية المعروفة بالنسبية الخاصة. وقد دفعت المشكلات التي تجلت في علم الفيزياء في العقد السابق ـ ولا سيما التساؤلات حول سرعة الضوء آينشتاين للبحث في نقيضي الحركة.

الخط الزمني

1865م	1887م	1905م	1907م
حسب «ماكسويل» السرعة الثابتة للضوء وإشعاع كهرومغناطيسي آخر في الفراغ.	وضع فشل تجربة ميكلسون - موري الفيزياء في أزمة.	وضع آينشتاين نظرية النسبية الخاصة وضمّن فيها تكافؤ الكتلة والطاقة.	أوضح «مينكوفسكي» كيف يمكن التعامل مع النسبية الخاصة كتأثير هندسي في الزمكان رباعي الأبعاد.

وكان عالم الفيزياء الأسكتلندي «جيمس كلارك ماكسويل» قد أثبت في عام 1865 أن الضوء له سرعة ثابتة في الفراغ (يرمز إليها بالرمز c) وتساوي حوالي 300000 كم/ ث (186000 ميل في الثانية). وقد افترض علماء الفيزياء في هذا الوقت أن هذه السرعة هي سرعة انتقاله عبر وسط واسع الانتشار بالكامل، وناقل للضوء، وأسموه الإثير المضيء. ومع أساليب القياس الحديثة ينبغي أن يكون من الممكن قياس الاختلافات الطفيفة في سرعة الضوء من اتجاهات مختلفة والتي تسببها حركة الأرض في الإثير.

ولذلك في عام 1887 استنبط «ألبرت ميكلسون»، و«إدوارد مورلي» تجربة جديدة بارعة وحساسة لاكتشاف هذا الفرق. وعندما فشلت تجربتهما وقعت الفيزياء في أزمة وقد طرحت نظريات مختلفة لتفسير النتيجة السلبية لكن لم يجرؤ أحد سوى «أينشتاين» على تقبل النتيجة والنظر في احتمالية ألا يكون الإثير موجودًا حقًّا. وبدلًا من ذلك، تساءل، ماذا لو كانت سرعة الضوء ببساطة ثابتة بغض النظر عن الحركة النسبية بين المصدر والمراقب؟

«يؤدي السعي نحو المطلق إلى العالم رباعي الأبعاد.»

آرثر إدينجوتن

النسبية الخاصة

أعادت الورقة البحثية الأولى لأينشتاين تخيل القوانين البسيطة للميكانيكا بناء على مسلمتين: سرعة الضوء الثابتة، و«مبدأ النسبية» (أي أن قوانين الفيزياء ينبغي دومًا أن تظهر

1915م	1919م	2016م
نشر آينشتاين نظريته النسبية العامة مبينًا كيف تؤدي الكتلة إلى انحناء الزمكان.	أثبت «إدينجوتن» تأثير العدسات الثقالية الناجم عن النسبية العامة.	أثبت فريق علماء (LIGO) وجود موجات الجاذبية، آخر تنبؤ غير مثبت من تنبؤات النسبية العامة.

كما هي للملاحظين في الإطارات المرجعية المختلفة لكن متكافئة). وبعد أن أرجأ حالات الجاذبية، أخذ في الاعتبار فقط الحالة الخاصة من الأطر المرجعية العطالية (غير المتسارعة). وفي معظم المواقف اليومية، أوضح أن قوانين الفيزياء ستكون هي نفسها كتلك التي حددها إسحق نيوتن في أواخر القرن السابع عشر. لكن عندما يكون الراصدون في إطارين مرجعيين مختلفين في حركة نسبية بسرعة قريبة من سرعة الضوء، فإنهما يبدآن في تفسير الأحداث بطريقتين مختلفتين اختلافًا جذريًّا. وتشمل هذه الآثار التي تسمى آثارًا «نسبية» انكماش الطول في اتجاه الحركة، وتباطؤ الزمن (تمدد الزمن). أما في الورقة البحثية

العدسات التثاقلية

يحدث تأثير العدسات التثاقلية عندما تمر أشعة الضوء القادمة من أجرام بعيدة بالقرب من كتلة كبيرة وتنحرف مساراتها بفعل الزمكان المشوه حولها. وبالنسبة لجسم كالشمس، لا يكاد التأثير يكون قابلًا للاكتشاف (الانحرافات في الموضع الظاهري للنجوم التي قاستها بعثة الكسوف لإدينجوتن تصل إلى أقل من واحد من الألف درجة) لكن النتائج لتركيزات أكبر من الكتلة يمكن أن تكون مذهلة أكثر من ذلك بكثير. وأول جسم متأثر بالعدسات التثاقلية اكتشف في عام 1979 هو التوأم الزائف- نجم زائف بعيد يصل ضوؤه إلى كوكب الأرض من اتجاهين بعد أن ينحرف حول المجرة المتوسطة ومنذ ذلك الحين وجد علماء الفلك العديد من الأمثلة على تأثير العدسات التثاقلية- ولا سيما حول تجمعات مجرّية كثيفة التي ينحرف فيها غالبًا الضوء من الجسم الخلفي العدسي إلى سلسلة من الأنماط الشبكية. ويقدم تأثير العدسات أداة قوية لرسم توزيع الكتلة داخل هذه التجمعات لتعلم المزيد عن وجود المادة المظلمة (انظر صفحة 244) لكن يمكن أن يكون لها أيضًا تطبيق أكثر مباشرة. تمامًا مثل عدسة التلسكوب الزجاجية، يستطيع تأثير العدسات التثاقلية أن يزيد من شدة ضوء الأجرام الأبعد مما يؤدي إلى جلب المجرات بالغة الخفوت إلى حدود الرؤية داخل مجموعة من التلسكوبات القوية. وفي الواقع، هذه هي الطريقة التي اكتشف بها علماء الفلك أبعد مجرة مكتشفة إلى الآن، والتي تبعد 13.2 مليار سنة ضوئية.

الثانية لآينشـــتاين فأوضح أن الأجسام التي تتحرك بسرعات نســـبية تزداد كتلتها أيضًا، ومن ذلك أثبت أن كتلة الجســـم وطاقته متكافئتان مما أدى إلى اســـتنتاج معادلته الشهيرة (الطاقة= الكتلة في مربع سرعة الضوء) وفي جميع الحالات، لا تظهر التشوهات إلا للراصد خارج الإطار المرجعي، أما لأي شخص داخله، فيبدو كل شيء طبيعيًا.

النســـبية الخاصة مهمة لعلماء الفلك لأنها تعني أنه ليس هنـــاك إطار مرجعي محدد لقياس الكـــون – أي أنه ليس هناك أي مكان ثابت أو الزمن يمر فيه بسرعة مطلقة. ولم تثبت التأثيرات التي تنبأت بها النسبية الخاصة في تجارب قائمة في كوكب الأرض فحسب بل أيضًا أثبتت فائدتها في تفســـير مجموعة متنوعة من الظواهر الفلكية، تتراوح من ســـلوك المنافث النسبية (المنبعثة من أقطاب النجوم النيوترونية والمجرات النشطة) إلى أصل مادة الانفجار العظيم نفسه.

إحدى الطرق المشهورة في التفكير في النسبية العامة هي تخيل الزمكان على أنه ورقة من المطاط تحدث الأجسام الضخمة تشوهًا داخلها. وهذا لا يؤثر فقط على مدارات الأجسام لكنه أيضًا يحرف مسار الضوء، مما يؤدي إلى الظاهرة المعروفة باسم العدسات التثاقلية.

من النسبية الخاصة إلى العامة

في عام 1915، نشر «آينشـــتاين» نظرية أكثر عمومية والتي حينئذ شملت الحالات التي فيها يكون التســـارع متضمنًا. وجاءت الانطلاقة الرئيســـية في عام 1907، عندما أدرك أنه نظرًا إلى أن الجاذبية تسبب تسارعًا فإن الشـــخص في حالة التسارع الثابت ينبغي أن يلاحظ

بالضبط قوانين الفيزياء نفسها تمامًا مثل الشخص الذي يقف على سطح كوكب في مجال جاذبية. بالنسبة لعلماء الفلك، فإن لهذا أثرًا مهمًا: تمامًا مثلما يرى الراصد الذي يتحرك في صاروخ بتسارع متزايد المسار الذي يتخذه شعاع ضوء منكسر لأسفل، ينبغي للشيء نفسه أن يحدث في مجال جاذبية قوي. وهذا هو السبب الجذري للظاهرة المذهلة المعروفة بالعدسات التثاقلية (انظر المربع صفحة 289).

وعلى مدى السنوات الثمانية التالية عمل آينشتاين على الآثار المترتبة على اكتشافه، متأثرًا بشدة بأفكار معلمه الجامعي السابق «هيرمان مينكوفسكي» حول النسبية الخاصة. وكان «مينكوفسكي» قد استطلع التشوهات النسبية عن طريق قواعد الهندسة، وتعامل مع الأبعاد المكانية الثلاثة، والبعد الزمني على أنها بنية موحدة أو تفرع زمكاني بداخله يمكن المفاضلة بين كل بعد على حدة وقد تخيل «آينشتاين» الجاذبية على أنها تشوه في الزمكان ووضع معادلات لوصفها.

وقد طبقت ورقته البحثية عام 1915 النظرية الجديدة لتفسير سمات مدار كوكب عطارد الذي لم يمكن تفسيره في ضوء الفيزياء الكلاسيكية، لكن، لأنها نشرت في ألمانيا في ذروة الحرب العالمية الأولى لم يلاحظها أحد. إلا أنه في عام 1919 قدم «آرثر إدينجوتن» إثباتًا رائعًا للنظرية الجديدة، عن طريق قياس تأثير العدسات التثاقلية على النجوم القريبة من الشمس أثناء كسوف الشمس.

موجات الجاذبية

في القرن العشرين، ثبتت صحة النسبية الخاصة والعامة مرارًا وتكرارًا لكن حتى وقت قريب جدًا بقي تنبؤ رئيسي واحد دون إثبات. موجات الجاذبية هي تموجات ضئيلة في الزمكان، تظهر كتغيرات على نطاق ذري في أبعاد المكان، وهي تنشأ بفعل الدوران السريع للكتل غير المتماثلة (مثل الثقوب السوداء أو النجوم النيوترونية التي تدور معًا في أنظمة ثنائية- انظر صفحة 200).

إلا أنه في فبراير عام 2016، أعلن علماء أمريكيون أخيرًا اكتشاف تموجات في الزمكان من زوج من ثقبين أسودين مندمجين باستخدام أدوات مرصد مقياس التداخل للأمواج الثقالية في ولايتي واشنطن ولويزيانا. وهذا الاكتشاف لم يثبت فقط نظرية آينشتاين (وفي الواقع يثبت وجود الثقوب السوداء بما لا يدع مجالًا للشك) بل أيضًا يفتح الباب لطريقة قوية جديدة لرصد الكون. ولما كانت موجات الجاذبية تنشأ بفعل الكتلة لا المادة المضيئة فإن مراصد موجات الجاذبية في المستقبل ينبغي أن تكون قادرة على دراسة المادة المظلمة وأن يدققوا حتى خارج حدود عصر فك الاقتران (انظر صفحة 253) لدراسة الأحوال في الانفجار العظيم نفسه.

الفكرة الرئيسة
المكان والزمان متشابكان