٧

نظرية النسبية

لقد لعبت نظرية النسبية دائما دورا غاية فى الأهمية فى الفيزياء الحديثة. فبهذه النظرية أدرك العلماء لأول مرة الحاجة إلى التغيير فى المبادىء الأساسية للفيزياء. وعلى هذا فإن مناقشة المشاكل التى أثارتها النظرية، وقامت بحل جزء منها، هذه المناقشة ترتبط ارتباطا وثيقاً بمعالجتنا للتضمينات الفلسفية للفيزياء الحديثة. وعلى عكس نظرية الكم، يمكننا هنا أن نقول - بمعنى ما - إن تطور نظرية النسبية لم يستغرق إلا وقتا قصيرا جدا، من الاعتراف النهائى بالصعاب وحتى حلها. ظهر أول دليل على استحالة كشف حركة انتقال الأرض بالطرق البصرية عندما كرر مورلى وميلر عام ١٩٠٤ تجربة مايكلسون. ثم كان أن ظهر بحث آينشتين الحاسم بعد أقل من سنتين. من ناحية أخرى فإن تجربة مورلى وميلر وبحث آينشتين لم يكونا إلا الخطوات الأخيرة فى تطوير كان قد ابتدأ قبل ذلك بوقت طويل، تطوير يمكن أن نضعه تحت عنوان "الديناميكا الكهربائية للأجسام المتحركة".

الواضح أن الديناميكا الكهربائية للأجسام المتحركة كانت مجالا هاما فى الفيزياء والهندسة منذ ابتُكر المحرك الكهربى. على أن مشكلة خطيرة برزت فى الموضوع عندما اكتشف ماكسويل الطبيعة الكهرومغنطيسية لموجات الضوء. تختلف هذه الموجات فى خصيصة هامة عن غيرها من الموجات - عن موجات الصوت مثلا: فهى تنتشر فيما يبدو أنه حيز فارغ. عندما يدق ناقوس فى وعاء مفرغ الهواء فإن الصوتَ لاينتقل إلى الخارج، لكن الضوء ينفذ بسهولة خلال الحيز المفرغ. وعلى هذا فقد افتُرض أنه من الممكن اعتبار موجات الضوء موجات مرنة من جوهر خفيف جدا يسمى الأثير لايمكن رؤيته أو الاحساس به برغم أنه يملأ المكان الفارغ كما يملأ الحيز الذى توجد به المواد الأخرى، كالهواء والزجاج. لم يطرأ على أذهان الفيزيائيين

آنئذ أن الموجات الكهرومغنطيسية فى ذاتها قد تكون واقعا مستقلا عن أى جسم. ولما كان هذا الجوهر المفترض على مايبدو يتخلل كل مادة أخرى، فقد بزغ السؤال: ماذا يحدث إذا مابدأت المادة تتحرك؟ هل يشترك الأخير فى هذه الحركة؟ وإذا كان الأمر كذلك، فكيف تنتشر موجة الضوء فى الأثير المتحرك؟

والتجارب المتعلقة بهذا السؤال تجارب صعبة للسبب التالى: سرعات الأجسام المتحركة عادة ماتكون صغيرة جدا مقارنة بسرعة الضوء. وعلى هذا فإن حركة هذه الأجسام لن تعطى سوى آثار ضئيلة جدا تتناسب مع نسبة سرعة الجسم إلى سرعة الضوء، أو إلى هذه النسبة مرفوعة إلى أس أعلى. ولقد سمحت أبحاث ويلسون ورولاند ورونتيجن وآيخينفالد وفيزو، سمحت بقياس هذه الآثار بدقة تناظر الأس الأول لهذه النسبة. وتمكنت نظرية الإلكترونات التى طورها لورنْتس عام ١٨٩٥ من وصف هذه الآثار بشكل مرضٍ للغاية. لكن تجربة مايكلسون ومورلى وميلر خلقت وضعا جديدا.

سنناقش هذه التجربة ببعض التفصيل. فلكى نحصل على آثار أكبر ومن ثَمَّ على نتائج أكثر دقة، يبدو من الأفضل أن تُجرى التجارب باستخدام أجسام ذات سرعة كبيرة جدا. تتحرك الأرض حول الشمس بسرعة نحو ٢٠ ميلا فى الثانية. فإذا كان الأثير ساكنا بالنسبة للشمس ولايتحرك مع الأرض، فإن هذه السرعة الكبيرة للأثير بالنسبة للأرض ستظهر كتغير فى سرعة الضوء، فهذه السرعة عندما يكون انتشار الضوء موازيا لاتجاه حركة الأثير لابد أن تختلف عنها اذا كان الانتشار متعامدا عليه. وحتى لو كان الأثير يتحرك جزئيا مع الأرض فلابد أن يُظْهر أثرا ماقد نسميه رياح الأثير، وهذا الأثر قد يتوقف إذن على ارتفاع الموقع الذى تجرى به التجربة عن سطح البحر. ولقد اتضح من حساب الأثر المتوقع أنه صغير للغاية لأنه يتناسب مع مربع نسبة سرعة الأرض إلى سرعة الضوء، وأن علينا إذن أن نجرى تجارب دقيقة للغاية على تداخل شعاعين من الضوء يتحركان فى موازاة حركة الأرض أو عموديا عليها. قام مايكلسون بأول تجربة من هذا القبيل عام ١٨٨١، لكنها لم تكن دقيقة بما فيه الكفاية. ثم كُررت هذه التجربة فلم تظهر أدنى إشارة إلى الأثر المتوقع. لكن تجارب مورلى وميلر التى أجرياها عام ١٩٠٤ وفرت الدليل القاطع على أنْ ليس ثمة وجود لأثر بهذا الحجم.

قابلت هذه النتيجة على غرابتها موضوعا آخر كان محل نقاش بين الفيزيائيين قبل ذلك بزمن. تحقق ميكانيكا نيوتن "مبدأ للنسبية" يمكن وصفه بما يلى: إذا أوفت الحركةُ الميكانيكية

فى نظام مرجعى معين قوانينَ ميكانيكا نيوتن، فسيكون هذا صحيحا أيضا بالنسبة لأى إطار مرجعى آخر طالما كان فى حركة غير دوارة منتظمة بالنسبة للنظام الأول. أو بمعنى آخر إن حركة الانتقال المنتظمة للنظام لا تسبب آثارا ميكانيكية على الاطلاق، ومن ثم فلا يمكن أن نلاحظها عن طريق مثل هذه الآثار.

بدا للفيزيقيين أن مبدأ النسبية هذا لايمكن أن يكون صحيحا فى البصريات أو الديناميكا الكهربائية. فإذا كان النظام الأول ساكنا بالنسبة للأثير، فإن النظم الأخرى لن تكون، وعلى هذا فلابد أن تُدْرَك حركتها بالنسبة للأثير عن طريق آثار من النمط الذى قرره مايكلسون. ثم كان أن أحيت النتيجة السلبية لتجربة مورلى وميلر عام ١٩٠٤، أحيت فكرة أن مبدأ النسبية هذا قد يكون صحيحا فى الديناميكا الكهربائية كما ميكانيكا نيوتن.

من ناحية أخرى، ثمة تجربة قديمة قام بها فيزو عام ١٨٥١ كانت تبدو بالتأكيد مناقضة لمبدأ النسبية. قاس فيزو سرعة الضوء فى سائل متحرك. فإذا كان مبدأ النسبية صحيحا فإن السرعة الكلية للضوء فى السائل المتحرك لابد أن تكون حاصل جمع سرعة السائل مضافا إليها سرعة الضوء فى السائل الساكن. لكن هذا لم يكن صحيحا، فقد بينت التجربة أن السرعة الكلية كانت أقل بعض الشىء.

ومع ذلك فإن النتائج السلبية للكثير غير هذه من التجارب الحديثة لإدراك الحركة "بالنسبة للأثير"، هذه النيتائج قد ألهمت المنظرين من الفيزيائين والرياضيين فى ذلك الوقت أن يبحثوا عن تفسيرات رياضية توفق مابين معادلة الموجة لانتشار الضوء ومبدأ النسبية. اقترح لورنتس عام ١٩٠٤ تحويلا رياضيا يحقق هذه المتطلبات. قدم فرضا بأن الأجسام المتحركة تنكمش فى اتجاه الحركة بمعامل يتوقف على سرعة الجسم، وأن هناك فى النظم المرجعية المختلفة أزمنة "ظاهرية" مختلفة تحلُّ بطرق شتى مَحَلَّ الزمن "الحقيقى". بهذه الطريقة توصل إلى شىء يشبه مبدأ النسبية: إن السرعة "الظاهرية" للضوء واحدة فى كل النظم المرجعية. ولقد ناقش بوانكاريه وفيتزجيرالد وغيرهما من الفيزيائيين آراء مشابهة.

وكانت الخطوة الحاسمة بحثا لآينشتين نُشر عام ١٩٠٥ برهن فيه أن الزمن "الظاهرى" لتحويل لورنتس هو الزمن "الحقيقى" وألغى ماكان لورنتس يسميه الزمن "الحقيقى". كان هذا تغيرا فى أسس الفيزياء ذاتها، تغيرا جذريا غير متوقع تَطَلَّب كلَّ شجاعة شاب عبقرى ثورى.

واتخاذ هذه الخطوة لايتطلب ـ للتمثيل الرياضى للطبيعة ـ أكثر من التطبيق المتماسك لتحويل لورنتس. لكن تفسيراتها الجديدة قد غيرت بنية المكان والزمان، وظهر الكثير من مشاكل الفيزيقا فى ضوء جديد. وعلى سبيل المثال فمن الممكن إلغاء جوهر الأثير تماما. فلما كانت كل نظم الإحالة الموجودة فى حركة انتقال منتظمة بالنسبة لبعضها بعضا، لما كانت متساوية بالنسبة لوصفها للطبيعة، فليس ثمة معنى للقول بوجود مادة (الأثير) ساكنة فى واحد فقط من هذه النظم. لا حاجة فى الواقع لمثل هذا الجوهر، والأسهل أن نقول إن موجات الضوء تنتشر فى الحيز الفارغ، وإن المجالات الكهرومغنطيسية واقع مستقل يمكن أن يوجد فى الحيز الفارغ.

لكن التغير الحاسم كان فى بنية المكان والزمان. يصعب جدا أن نصف هذا التغير بكلمات اللغة المألوفة، دون استخدام الرياضيات، لأن الكلمتين الشائعتين "المكان" و "الزمان" تشيران إلى بنية للمكان والزمان، هى فى واقع الأمر صياغة مثالية للبنية الحقيقية وتبسيط مفرط لها. ومع ذلك فعلينا أن نحاول وصف البنية الجديدة، وربما فعلنا ذلك بالطريقة الآتية:

عندما نستخدم المصطلح: "الماضى" فإنا نضم تحته تلك الوقائع التى يمكن أن نعرفها، على الأقل من ناحية المبدأ، التى يمكن أن نكون قد سمعنا عنها، على الأقل من ناحية المبدأ. وبنفس الشكل فإنّا نضم فى المصطلح "المستقبل" كل الوقائع التى يمكن أن نؤثر فيها، على الأقل من ناحية المبدأ، التى يمكن أن نحاول تغييرها أو منعها، على الأقل من ناحية المبدأ. وليس من السهل بالنسبة لغير الفيزيائى أن يعرف السبب فى أن يكون هذا التعريف لمصطلحى "الماضى" و "المستقبل"، هو الأكثر ملاءمة، لكن يمكننا أن نلحظ أنه يناظر بدقة بالغة استخدامنا الشائع للمصطلحين. فاذا استخدمنا المصطلحين بهذه الطريقة فسنجد أن ثمة نتائج لتجارب عديدة تبين أن محتوى "المستقبل" و "الماضى" لايعتمد على حالة المراقب من حيث حركته أو أية خصائص أخرى له. يمكننا أن نقول إن التعريف ثابت لايتغير مع حراكة المراقب، وهذا صحيح فى كل من ميكانيكا نيوتن ونظرية آينشتين للنسبية.

لكن الفارق هو الآتى: نحن نفترض فى النظرية الكلاسيكية أن ثمة فترة غاية فى القصر، نسميها اللحظة الحاضرة، تفصل مابين المستقبل والماضى. ولقد عرفنا أن الوضع يختلف فى نظرية النسبية. فالمستقبل والماضى تفصلهما فترة متناهية يتوقف طولها على بعد المراقب. إن كل فعل ينتشر بسرعة تقل عن سرعة الضوء أو تساويها. وعلى هذا فإن المراقب لا يمكنه فى

لحظة بذاتها أن يعرف، أو يؤثر على حدث فى موقع بعيد يقع بين زمنين مميزين: احدهما هو لحظة صدور إشارة ضوئية من مكان وقوع الحادثة لكى تصل إلى المراقب فى لحظة الملاحظة، أما الآخر فهو اللحظة التى عندها تصل إلى موقع الحدث إشارة ضوئية يطلقها المراقب لحظة الملاحظة. إن كل الفترة الزمنية المتناهية بين هاتين اللحظتين هى مانسميه "الزمن الحاضر" بالنسبة للمراقب لحظة الملاحظة. وكل واقعة تحدث بين هذين الزمنين المميَّزين قد نقول إنها "متزامنة" مع فعل الملاحظة.

واستعمالنا التعبير "قد نقول" إنما يشير إلى غموض كلمة "متزامنة" وهو غموض يرجع إلى حقيقة أن هذه الكلمة قد نشأت عن خبرتنا فى الحياة اليومية حيث تعتبر سرعة الضوء دائما سرعةً لا نهائية. والواقع أننا نستطيع أن نُعرّف الكلمة بشكل مختلف بعض الشيء، استعمله آينشتين فى أبحاثه. هذا هو التعريف الثانى: عندما تحدث واقعتان متزامنتان فى نفس الموقع فى الفضاء فإنا نقول إنهما "متزامكتان". وهذا تعبير لا غموض فيه على الاطلاق. دعنا الآن نتخيل ثلاث نقط فى الفضاء توجد جميعا على خط مستقيم بحيث تقع النقطة الوسطى منها بالضبط في منتصف المسافة بين النقطتين الطرفيتين. فإذا ماحدثت واقعتان بالنقطتين الطرفيتين بحيث يتزامك عند النقطة الوسطى وصولُ الإشارتين الضوئيتين المنبعثتين منهما، قلنا إن الواقعتين متزامنتان. وهذا التعريف أضيق من التعريف الأول. ومن أهم نتائجه أنه إذا ماكانت واقعتان متزامنتين بالنسبة لمراقب ما، فقد لا تكونان كذلك عند آخر، إذا ما كان هذا متحركا بالنسبة للأول. من الممكن أن نُقيم العلاقة بين التعريفين بالقول إنه متى كانت واقعتان متزامنتين بالمعنى الأول، فإنا نستطيع دائما أن نجد إطارا مرجعيا تكونان فيه كذلك بالمعنى الثانى أيضا.

يبدو أن التعريف الأول لمصطلح "التزامن" هو الأقرب إلى الاستخدام فى حياتنا اليومية، لأن قضية ماإذا كانت واقعتان متزامنتين لا تعتمد فى حياتنا اليومية على الإطار المرجعى. لكن المصطلح فى كلا التعريفين النسبويين قد اكتسب دقة تفتقر إليها لغة حياتنا اليومية. كان على الفيزيائيين فى نظرية الكم أن يعلموا مبكرا أن مصطلحات الفيزياء الكلاسيكية إنما تصف الطبيعة بشكل غير دقيق، وأن تطبيقها محكوم بقوانين الكم، وأن علينا أن نكون إذن حذرين فى استعمالها. ولقد حاول الفيزيائيون فى نظرية النسبية أن يغيروا معنى كلمات الفيزياء الكلاسيكية ليجعلوا المصطلحات أكثر دقة بحيث تلائم الوضع الجديد فى الطبيعة.

أما بنية المكان والزمان التى كشفتها نظرية النسبية فقد كانت لها نتائج عديدة فى أجزاء مختلفة من الفيزياء. فالديناميكا الكهربية للأجسام المتحركة يمكن أن تُشْتَق على الفور من مبدأ النسبية. وهذا المبدأ ذاته يمكن أن يصاغ فى صورة قانون للطبيعة عام جدا يناسب ليس فقط الديناميكا الكهربائية والميكانيكا وإنما أيضا أى مجموعة من القوانين: تتخذ القوانين نفس الصورة فى كل النظم المرجعية، التى تختلف عن بعضها بعضا فقط بسبب حركة انتقال منتظمة؛ كلها ثابتة أمام تحويل لورنتس.

ربما كانت أهم نتائج مبدأ النسبية هو القصور الذاتى للطاقة، أو تكافؤ الكتلة والطاقة. لما كانت سرعة الضوء هى السرعة القصوى التى لايمكن أبدا لأى جسم مادى أن يصلها، فمن السهل أن نرى أن تعجيل جسم يتحرك بالفعل بسرعة كبيرة سيكون أصعب من تعجيل جسم ساكن، لقد ازداد القصور الذاتى بزيادة طاقة الحركة. لكن أى نوع من الطاقة، على وجه العموم، سيسهم ـ تبعا لنظرية النسبية ـ فى القصور الذاتى، نعنى فى الكتلة. وكتلة أى مقدار من الطاقة ليست سوى هذه الطاقة مقسومة على مربع سرعة الضوء. وعلى هذا فإن كل طاقة تحمل معها كتلة، لكن حتى الطاقة الهائلة لا تحمل إلا قدرا ضئيلا جدا من الكتلة. وهذا هو السبب فى أن أحدا لم يكتشف العلاقة بين الطاقة والكتلة. يفقد قانونا حفظ الكتلة وحفظ الشحنة كلاهما صلاحيتهما وينضمان فى قانون واحد يمكن أن نسميه قانون حفظ الطاقة أو الكتلة. عندما صيغت نظرية النسبية منذ خمسين عاما كان فرض تكافؤ الكتلة يبدو ثورة كاملة فى الفيزياء، ولم يكن ثمة إلا قدرٌ ضئيل من الشواهد التجريبية لتعضيده، أما فى أيامنا هذه فسنرى فى الكثير من التجارب كيف يمكن تخليق الجسيمات الأولية من الطاقة الحركية، وكيف تفنى هذه الجسيمات لتشكل إشعاعا، وعلى هذا فإن التحول من الطاقة إلى الكتلة أو العكس لايقترح شيئا غير عادى. إن كمية الطاقة الضخمة التى تحرر فى أى انفجار ذرى ليست سوى إثبات علنى مذهل على صحة معادلة أينشتين. لكنا قد نضيف هنا ملحوظة نقدية تاريخية.

كثيرا مانسمع أن الطاقات الهائلة للانفجارات الذرية إنما ترجع إلى تحول الكتلة إلى طاقة تحولاً مباشرا، وأن التنبؤ بهذه الطاقات لم يكن ممكنا إلا من خلال نظرية النسبية. لكن هذا فى واقع الأمر سوء تفهم. إن القدر الهائل من الطاقة المتاحة فى نواة الذرة كان معروفا منذ تجارب بيكريل وكورى ورذرفورد على الاضمحلال الإشعاعى. فكل جسم يضمحل (كالراديوم مثلا) ينتج من الطاقة مايصل إلى نحو مليون ضعف الطاقة التى تتحرر فى عملية كيمياوية

على نفس المقدار من المادة. ومصدر الطاقة في عملية انشطار اليورانيوم هو بالضبط مصدرها في اضمحلال ألفا بعنصر الراديوم - نقصد التنافر الكهروستاتيكي للجزءين اللذين تنشطر إليهما الذرة. تأتي طاقة الانفجار الذري مباشرة عن هذا المصدر، لاعن تحول الكتلة الى طاقة. إن عدد الجسيمات الأولية ذات كتلة السكون المتناهية لاينقص خلال الانفجار. لكن من الصحيح أن الكتلة تفصح عن طاقات ربط هذه الجسيمات في نواة الذرة، ومن ثم فإن تحرر الطاقة يرتبط أيضا، في هذا الشكل غير المباشر، بالتغيرات في كتل النوايا. لقد أثار تكافؤ الكتلة والطاقة - بجانب أهميته في الفيزياء - مشاكل تختص بقضايا فلسفية قديمة جدا. ثمة قضية نجدها في نُظُم فلسفية عديدة قديمة، تقول بأن الجوهر أو المادة لايمكن أن تُحَطم. لكنا سنجد في الفيزياء الحديثة الكثيرَ من التجارب وقد أوضحت أنه من الممكن أن تفنى جسيمات أولية كالبوزيترونات والإلكترونات، وأن تتحول إلى إشعاع. فهل هذا يعني أن التجارب الحديثة قد أثبتت بطلان النظم الفلسفية القديمة وأن الحجج التي قدمتها هذه النظم كانت مضلّلة؟

سيكون هذا بالتأكيد قرارا متهوراً ليس له مايبرره، إذ لايمكن ببساطة أن نطابق مصطلحي "الجوهر" و "المادة" في الفلسفة القديمة أو القروسطية بمصطلح "الكتلة" في الفيزيقا الحديثة. فإذا أردنا أن نعبر عن خبرتنا الحديثة بلغة الفلسفات القديمة فلنا أن نعتبر الكتلة و الطاقة صورتين مختلفتين من صور نفس "الجوهر"، وبذا نحفظ فكرة الجوهر الذي لايتحطم.

يصعب في الحق أن نقول إننا نكسب كثيرا إذا عبرنا عن معرفتنا الحديثة بلغة قديمة. لقد تشكلت النظم الفلسفية في الماضي عن كم المعرفة الذي أُتيح آنذاك وعن أساليب الفكر التي أدت إليها مثل هذه المعرفة. والمؤكد أننا لانتوقع أن يتنبأ الفلاسفة منذ بضعة قرون مضت بتطور الفيزياء الحديثة أو نظرية النسبية. وعلى هذا فإنا لانتصور أنه من الممكن أن يتكيف أيٌّ من المفاهيم التي طرقها الفلاسفة في عملية التوضيح العقلي منذ زمن بعيد، بحيث يلائم الظواهر التي لايمكن ملاحظتها الا بالأدوات التقنية المعقدة التي ظهرت في زماننا هذا.

لكن، قبل أن نمضي الى مناقشة التضمينات الفلسفية لنظرية النسبية، علينا ن نَصِف أولاً ماجَدَّ عليها من تطورات.

لقد أجهزت نظرية النسبية كما ذكرنا على جوهر "الأثير" الافتراضي، الذي لعب دورا هاما في المناقشات الأولى عن نظريات ماكسويل بالقرن التاسع عشر. يُعَبَّر عن هذا أحيانا بالقول

إننا قد تخلينا عن فكرة الفضاء الخالص. لكن مثل هذه الجملة لابد ألاّ تقبل إلاّ بحذر بالغ. صحيح أن المرء لايستطيع أن يشير إلى إطار مرجعي خاص يكون فيه جوهر الأثير فى حالة استقرار ويستحق اسم "الفضاء الخالص"، لكن من الخطأ أن نقول إن الفضاء قد فقد الآن كل خصائصه الفيزيقية، فمازالت معادلات الحركة للأجسام المادية أو المجالات تتخذ صورة فى نظام "عادى" مرجعى تختلف عن أخرى فى نظام آخر يدور أو يتحرك حركة غير منتظمة بالنسبة للنظام "العادى". ووجود قوى الطرد المركزية فى النظم الدوارة يثبت ـ فيما يهم نظرية النسبية لعام ١٩٠٥ ولعام ١٩٠٦ ـ يثبت وجود خصائص فيزيقية للفضاء تسمح بالتمييز بين نظام دوار وآخر غير دوار.

قد لايبدو هذا مُرْضيا من احدى وجهات النظر الفلسفية، الوجهة التى يُفَضل فيها أن نمنح الخصائص الفيزيقية فقط للكيانات الفيزيائية مثل الأجسام المادية أو المجالات، وليس للفضاء الفارغ. لكنا سنجد، بالنسبة لنظرية العمليات الكهرومغنطيسية أو الحركات الميكانيكية، أن وجود الخصائص الفيزيقية هذه للفضاء الفارغ ليس إلا وصفا لحقائق لا نزاع فيها.

ولقد قاد تحليل دقيق لهذا الوضع تم بعد نحو عشرين عاما ـ عام ١٩١٦ ـ قاد آينشتين إلى توسيع هام جدا لنظرية النسبية يطلق عليه عادة اسم نظرية "النسبية العامة". وقبل أن نمضى إلى وصف الأفكار الرئيسية لهذه النظرية الجديدة قد يكون من المفيد أن نذكر بضع كلمات عن درجة اليقين فى صحة جزءى نظرية النسبية هذين. ترتكز نظرية عام ١٩٠٥ و ١٩٠٦ على عدد كبير جدا من الحقائق الموطدة: على تجارب مايكلسون ومورلى والكثير غيرها مما يشبهها، على تكافؤ الكتلة والطاقة فى العمليات الاشعاعية التى لاتعد ولا تحصى، على اعتماد عمر الأجسام المشعة على سرعتها... إلخ. وعلى هذا فإن هذه النظرية تنتمى إلى الأساس المتين للفيزيقا الحديثة، ولايمكن فى وضعنا الحالى أن نشك فيها.

والشواهد التجريبية بالنسبة لنظرية النسبية أقل اقناعا بكثير، لأن مادة البحث نادرة للغاية. فنحن لن نجد إلا عددا محدودا من الملاحظات الفلكية التى تسمح بالتحقق من صحة الفروض. وعلى هذا فإن هذه النظرية أكثر "فرضية" من الأولى.

أما حجر الزاوية فى نظرية النسبية العامة فهى العلاقة ما بين القصور الذاتى والجاذبية.

أوضحت القياسات الدقيقة جدا أن كتلة الجسم كمصدر للجاذبية تتناسب بالضبط مع الكتلة كمقياس للقصور الذاتي للجسم. وأبداً لم يُظْهر حتى أدق القياسات أيَّ انحراف من هذا القانون. فإذا كان القانون صحيحا على وجه العموم، فمن الممكن أن توضع قوى الجاذبية على نفس مستوى قوى الطرد المركزي أو غيرها من القوى الأخرى، التي تنتج كرد فعل للقصور الذاتي. ولما كان من اللازم أن تعتبر قوى الطرد المركزي ناشئةً عن الخصائص الفيزيائية للفضاء الفارغ، كما ذكرنا، فقد تحول آينشتين إلى الفرض بأن قوى الجاذبية أيضا تنشأ عن خصائص الفضاء الفارغ. وكانت هذه خطوة هامة تطلبت على الفور خطوة تالية لها نفس الأهمية. نحن نعرف أن قوى الجاذبية تنتج عن الكتلة، فإذا ما كانت الجاذبية مرتبطة بخصائص الفضاء، فإن خصائص الفضاء هذه لابد أن تنتج عن الكتل أو تتأثر بها. وقوى الطرد المركزي في أي نظام دوار لابد أن تنشأ عن دوران كتل (بالنسبة للنظام) قد تكون بعيدة جدا.

ولتنفيذ البرنامج الذي حددته هذه الجمل القليلة، كان على آينشتين أن يربط الأفكار الفيزيقية التحتية بالمخطط الرياضي للهندسة العامة التي طورها رايمان. فلما كانت خصائص الفضاء تتغير على مايبدو مع مجالات الجاذبية، فمن الضروري أن تقارن هندستها بالهندسة على الأسطح المنحنية حيث يستبدل بخط الهندسة الاقليدية المستقيم خطٌ جيوديسي (وهو خطٌ أقصر المسافات) وحيث يتغير الانحناء بصورة مستمرة. تمكن آينشتين في النهاية من تقديم صياغة رياضية للارتباط مابين توزيع الكتل والمعالم المُحَدِّدة بالهندسة. ولقد مَثَّلت هذه النظرية الحقائق الشائعة عن الجاذبية، فهي تقريب ممتاز جدا، يطابق النظرية التقليدية للجاذبية، بل ويتنبأ بعدد من الظواهر المشوقة التي كانت بالضبط على حدود المقياسية. كان هناك مثلا فعل الجاذبية على الضوء. عندما ينبعث ضوء أحادي اللون من نجم ثقيل، فإن كمات الضوء تفقد طاقة وهي تتحرك بعيدا خلال جاذبية النجم، ويتبع ذلك "إزاحة نحو الأحمر" لخط الطيف المنبعث. وليس ثمة حتى الآن من شواهد تجريبية لهذه الإزاحة نحو الأحمر، كما بينت بوضوح مناقشات تجارب فرويندليخ. لكن سيكون من السابق لأوانه أيضا أن نقول إن التجارب تناقض توقعات نظرية آينشتين. فشعاع الضوء الذي يمر قرب الشمس يجب أن ينحرف بسبب مجال جاذبيتها. ولقد رصد فرويندليخ تجريبيا هذا الانحراف وكان في النطاق الصحيح. أما موضوع موافقة الانحراف من الناحية الكمية للقيمة التي تنبأت بها نظرية آينشتين فهو أمر لم يتضح بعد. ويبدو أن أفضل الشواهد على صحة نظرية النسبية العامة هو تقدم الحركة المدارية لكوكب عطارد، إذ الواضح أنه يتفق جيدا مع القيمة التي تتنبأ بها النظرية.

وبالرغم من أن الأساس التجريبى للنسبية العامة لايزال ضيقا نوعا ما، فإن النظرية تحوى أفكارا ذات أهمية قصوى. فمنذ عصر الرياضيين الاغريق وحتى القرن التاسع عشر، كانت الهندسة الإقليدية تعتبر أمراً مُثْبَتا، كانت بديهيات إقليدس تعتبر الأساس بالنسبة لأى هندسة رياضية، الأساس الذى لايمكن الشك فيه. ثم، وفى القرن التاسع عشر، إذا بالرياضيين بولياى ولُباشفيسكى، وجاوس ورايمان يكتشفون أن ثمة هندسات أخرى يمكن ابتكارها وتطويرها لتكون لها نفس الدقة التى تميز هندسة اقليدس. وعلى هذا تحولت قضية أى الهندسات هو الصحيح لتصبح قضية تجريبية. ولم يأخذ الفيزيائيون القضية حقا كموضوع للدراسة إلا من خلال أعمال آينشتين. أما الهندسة موضوع النقاش فى نظرية النسبية العامة فلم تكن تختص بالفضاء ثلاثى الأبعاد وحده، وإنما أيضا بالمُعَقَّد رباعى الأبعاد الذى يتألف من الفضاء والزمن. وطدت النظرية علاقة بين الهندسة فى هذا المعقد وبين توزيع الكتل فى العالم. وعلى هذا، فقد أثارت هذه النظرية ـ فى صورة جديد ة تماما ـ أثارت القضايا القديمة لسلوك الفضاء والزمان فى الأبعاد الكبرى. كان فى مقدورها أن تقترح إجابات محتملة يمكن التحقق منها بالملاحظة.

وبناء على ذلك أُعيدت للدراسة مواضيعُ فلسفية قديمة جدا كانت تشغل ذهن الانسان منذ أقدم أطوار الفلسفة والعلم. هل الفضاء متناه أو لامتناهى؟ ماذا كان هناك قبل بدء الزمن؟ ما الذى سيحدث عند نهاية الزمن؟ أم ترى ليس ثمة بداية له ولا نهاية؟ وجدت هذه الأسئلة إجابات مختلفة فى الفلسفات والأديان المختلفة. ففى فلسفة أرسطو مثلا سنجد أن الفضاء الكلى للكون متناه (إن يكن قابلا للقسمة اللانهائية). كان الفضاء ناشئا عن امتداد الأجسام، كان مرتبطا بهذه الأجسام. فحيث لا توجد أجسام لايوجد فضاء. الكون يتألف من الأرض والشمس والنجوم: عدد متناه من الأجرام. وخلف نطاق النجوم ليس ثمة فضاء، وعلى هذا فإن حيز الكون متناه.

أما فى فلسفة كانط فقد كان هذا السؤال ينتمى إلى ما أسماه "النقائض" ـ الأسئلة التى لايمكن الاجابة عليها، إذ فيها تقود حجتان مختلفتان إلى نتائج متضادة. فالفضاء لا يمكن أن يكون متناهيا لأننا لا نستطيع أن نتخيل وجود نهاية للفضاء، فحيثما وصلنا يمكننا دائما أن نتصور أن فى مقدورنا أن نمضى أبعد. وفى نفس الوقت فإن الفضاء لا يمكن أن يكون لا نهائيا، لأن الفضاء شىء يمكننا تخيله (وإلا لما صيغت كلمة "فضاء") وليس فى مقدورنا أن

نتخيل فضاء لانهائيا. والواقع أن كانط لم يذكر هذه الحجة حرفيا هكذا، (بالنسبة للقضية الأخيرة). وجملة "الفضاء لامتناهى" تعنى بالنسبة لنا شيئا سلبيا، فنحن لا نستطيع أن نصل إلى نهاية للفضاء، أما بالنسبة لكانط فكانت تعنى أن لانهائية الفضاء هى بالفعل من المعطيات، أنها "توجد" بمعنى يصعب علينا أن نعبر عنه. وكانت النتيجة التى توصل إليها كانط: إن الاجابة العقلية للسؤال عن تناهى الفضاء أو لاتناهيه هى أمر مستحيل لأن الكون بأكمله لايمكن أن يكون موضوع تجربتنا.

وسنقابل موقفا مشابها بالنسبة لمشكلة لاتناهى الزمن. ففى "اعترافات" القديس أوغسطين مثلا، اتخذ هذا السؤال الصورة التالية: "ماذا كان الإله يفعل قبل أن يخلق العالم؟". لم يقتنع أوغسطين بالنكتة: "كان مشغولا بتجهيز جهنم كى تستقبل كُلَّ من يسأل مثل هذه الأسئلة السخيفة!". قال إن هذه اجابةٌ رخيصة جدا، ثم حاول أن يعطى تحليلا عقليا للمشكلة. فالزمن يمضى بالنسبة لنا وحدنا، إننا نتوقعه كمستقبل، وهو يمضى كلحظة حاضرة، ونتذكره كماض. لكن الإله ليس فى الزمن. إن ألف عام بالنسبة له يوم، واليوم عنده ألف عام. لقد خُلق الزمن مع العالم، انه ينتمى الى العالم، ومن ثم فالزمن لم يوجد قبل أن يوجد العالم. أما بالنسبة للإله فإن كل مجرى الكون قد أقيم فى الحال. لم يكن ثمة زمان قبل أن يَخْلِق الإلهُ العالم. والواضح أن كلمة "يخلق" فى مثل هذه الجمل تثير على الفور كُل الصعوبات الجوهرية. فهذه الكلمة كما تُفهم عادة تعنى أن شيئا قد بزغ فى الوجود لم يكن موجودا قبلا، وهى فى هذا المعنى تفترض مسبقا مفهوم الزمن. وعلى هذا فمن المستحيل أن نُعَرِّف بمصطلحات معقولة ماقد تعنيه جملة "لقد خلق الزمن". وهذه الحقيقة تذكرنا مرة أخرى بالدرس الذى طالما نوقش والذى علمتنا إياه الفيزياء الحديثة: إن كل لفظ أو مفهوم، مهما بدا واضحا، ليس له إلا مجال محدود من الاستعمالات.

يمكن فى نظرية النسبية العامة أن توضع هذه الأسئلة عن لانهائية الفضاء والزمان، وأن تُجاب جزئيا على أساس تجربى. فإذا ما كانت النظرية قد وفرت العلاقة الصحيحة بين الهندسة رباعية الأبعاد فى الفضاء والزمان، وبين توزيع الكتل فى الكون، عندئذ فإن الملاحظات الفلكية عن توزيع المجرات فى الفضاء ستقدم المعلومات عن هندسة الكون ككل. يستطيع المرء أن يبنى "نماذج" للكون، صورا كونية، ثم يمكنه أن يقارن نتائجها بالحقائق التجريبية.

لايستطيع المرء بالنظر الى المعرفة الفلكية الحالية أن يميز بوضوح بين نماذج ممكنة عديدة. فقد يكون الفضاء الممتلىء بالكون متناهيا، وهذا لايعنى أن ثمة نهاية للكون فى مكان ما، إنما سيعنى أننا إذا ماتقدمنا فى الكون أكثر وأكثر فى اتجاه واحد فسنصل فى النهاية إلى النقطة التى ابتدأنا منها. وهذا الوضع يشبه مايحدث فى الهندسة ثنائية الأبعاد على سطح الأرض: فإذا ابتدأنا من نقطة متجهين إلى الشرق، فسنصل فى النهاية إلى نفس النقطة من الغرب.

أما بالنسبة للزمن فثمة مايشبه بداية له. فالكثير من الملاحظات يشير إلى منشأ للكون منذ نحو أربعة بلايين عام، أو يبدو على الأقل أنها تشير إلى أن كل مادة الكون فى ذلك الوقت كانت مركزة فى فضاء أصغر بكثير وأنها انتشرت منه بسرعات مختلفة منذ ذلك التاريخ. وسنصل إلى نفس هذا الزمن (أربعة بلايين عام) فى الكثير من الملاحظات المختلفة (مثلا عمر النيازك، أو المعادن على الأرض... إلخ). وعلى هذا فسيغدو من الصعب أن نجد تفسيرا يختلف جذريا عن فكرة المنشأ هذه. فإذا كانت صحيحة فإنها ستعنى أن مفهوم الزمن فيما وراء هذا الزمن ستكتنفه تغيرات جوهرية. وسنجد فى الموقف الحالى للملاحظات الفلكية أن الأسئلة عن هندسة الزمكان الواسع لم تجد بعد اجابات لها أدنى حد من اليقين. وسيكون من المشوق جدا أن تجد هذه الأسئلة إجاباتها فى نهاية المطاف على أساس تجربى صلب. إن الأساس التجريبى الذى ترتكز عليه حتى نظرية النسبية العامة لايزال إلى الآن ضئيلا جدا، ولابد أن تؤخذ على أنها أقل يقينا مما يسمى نظرية النسبية الخاصة التى يعبر عنها تحويل لورنتس.

وحتى لو لم نذكر البحوث الاضافية فى هذه النظرية الأخيرة فليس من شك فى أن نظرية النسبية قد غيرت كثيرا من نظرتنا إلى بنية الفضاء والزمان. ربما لم تكن طبيعةُ هذه التغيرات هى أكثر مناحيها إثارة، وإنما حقيقة أنها كانت ممكنة. إن بنية الفضاء والزمان التى عَرَّفها نيوتن كأساس لوصفه الرياضى للطبيعة، كانت بنية بسيطة متماسكة وتناظر كثيرا استخدام مفهومى الفضاء والزمان فى الحياة اليومية. كان التناظر فى الحق وثيقا حتى ليمكننا أن نعتبر أن تعريفات نيوتن هى الصياغة الرياضية الدقيقة لهذين المفهومين الشائعين. إننا نستطيع أن نرتب الوقائع فى الزمن دون النظر إلى موقعها فى الفضاء. كان هذا هو الأمر الطبيعى تماما قبل نظرية النسبية. لكنا نعرف الآن أن هذا الانطباع إنما تخلقه فى حياتنا اليومية حقيقةُ أن

سرعة الضوء تفوق بكثير جدا أيَّ سرعة نقابلها فى الخبرة العملية. لكن أحدا لم يدرك بالطبع هذا القيد آنئذ. وحتى بعد أن عرفنا هذا القيد الآن، فما زال من الصعب أن نتخيل أن يعتمد ترتيب الوقائع على موقعها.

وجهت فلسفة كانط الانتباه فيما بعد إلى حقيقة أن مفهومى الفضاء والزمان ينتميان إلى علاقتنا بالطبيعة، لا إلى الطبيعة نفسها، أننا لا نستطيع وصف الطبيعة دون استخدام هذين المفهومين. ومن ثم فإن هذين المفهومين هما ـ بمعنى ما ـ من المفاهيم "القبلية". إنهما شرط وليسا نتيجة لخبرتنا. ولقد كان من المعتقد عموما أننا لا نستطيع أن نمسهما بخبرة جديدة. وعلى هذا بدت ضرورة التغيير مفاجأة عظمى. كانت هذه هى المرة الأولى التى اكتشف العلماء فيها الحاجة إلى الحذر البالغ عند تطبيق مفاهيم الحياة اليومية على الخبرة المصقولة للعلم التجريبى الحديث. إن الصياغة الدقيقة والمتماسكة لهذه المفاهيم فى اللغة الرياضية لميكانيكا نيوتن، أو تحليلها الدقيق فى فلسفة كانط، لم تقدم أدنى حماية ضد التحليل النقدى، التحليل الممكن من خلال قياسات غاية فى الدقة. أثبت هذا التحذير فيما بعد أهميته القصوى فى تطور الفيزياء الحديثة. والمؤكد أن تفهم نظرية الكم كان سيغدو أصعب لولا أن نجحت نظرية النسبية فى تحذير العلماء من الاستخدام غير المدقق لمفاهيم تؤخذ من الحياة اليومية أو من الفيزياء الكلاسيكية.