٩

نظرية الكم وبنية المادة

خضع مفهوم المادة فى تاريخ التفكير البشرى لعدد كبير من التغيرات. ثمة تفسيرات له مختلفة فى النظم المختلفة. ولا تزال كل هذه المعانى المختلفة موجودة بدرجةٍ صغرت أو كبرت، فيما نمنحه الآن من معنى لكلمة "المادة".

فى بحثهم عن مبدأ موحّد فى التحول الجامع للأشياء جميعا، شكّل الفلاسفة الاغريق القدامى - من طاليس وحتى الذريين - شكلوا مفهوم المادة الكونية، جوهر كلى يَخْبِر كل هذه التحولات، منه تنشأ كل الأشياء المفردة وإليه تَحُول ثانية. ولقد توحدت هذه المادة - جزئيا - بمواد معينة كالماء والهواء والنار، جزئيا فقط، فليس لها صفةُ جوهرٍ أخرى سوى أن تكون المادة التى تُصنع منها كل الأشياء.

وفيما بعد، وفى فلسفة أرسطو، فُكّر فى المادة من ناحية العلاقة بين الصورة والمادة. فكل مانحسه فى العالم من ظواهر حولنا هو مادة قد اتخذت صورة، والمادة ذاتها ليست واقعا، إنما هى إمكان، بوتنشيا. إنها توجد فقط عن طريق الصورة. "فالجوهر" فى العملية الطبيعية - وهكذا أسماه أرسطو - يتحول من مجرد إمكان، إلى صورة، فإلى واقع. والمادة عند أرسطو ليست بالتأكيد مادة بذاتها، كالماء أو الهواء، لا ولاهى مجرد فضاء فارغ، إنما هى نوع من القوام المادى الغامض غير المحدد، ينتظم إمكانيةَ التحولِ إلى واقع عن طريق الصورة. والأمثلة النموذجية لهذه العلاقة بين المادة والصورة فى فلسفة أرسطو، هى العمليات البيولوجية التى تتشكل فيها المادة لتصبح كائنات حية، ثم نشاط الانسان فى البناء والتشكيل.إن التمثال كامن فى الرخام قبيل أن ينحته المثّال.

وبعد ذلك بكثير، وبدءًا بفلسفة ديكارت، أُخذت المادة فى مقابلة الذهن. كان هناك الوجهان المتتامان للعالم: "المادة" و "الذهن"، أو كما سماهما ديكارت "الشىء الممتد" و "الشىء المفكر". ولما كانت القواعد المنهجية الجديدة للعلوم الطبيعية ـ لا سيما الميكانيكا ـ قد استبعدت رد أى من الظواهر المادية إلى القوى الروحية، فمن الممكن اعتبار المادة ذاتها واقعا مستقلا عن الذهن وعن أية قوى خارقة. كانت "المادة" فى هذه المرحلة "مادةً قد صُوِّرت"، وفُسرت عملية التصوير كسلسلة علِّيَّة من التفاعلات الميكانيكية، وفقدت كل علاقاتها بالروح الكاملة فى الفلسفة الأرسطية، ومن ثم أصبحت الثنائية بين المادة والصورة ولا علاقة لها بالموضوع، ومازال مفهوم المادة هذا هو الذى يشكل الأساس فى استخدامنا الحالى لكلمة "مادة".

وأخيرا، لعبت ثنائية أخرى دورا ما فى العلوم الطبيعية للقرن التاسع عشر، الثنائية بين المادة والقوة: المادة هى ماتعمل عليه القوى، أو، المادة يمكن أن تنتج القوى. فالمادة مثلا تنتج قوة الجاذبية، وهذه القوة تعمل على المادة. المادة والقوة وجهان للعالم المادى متميزان عن بعضهما. أما بالنسبة لاحتمال أن تكون القوى قوى تصويرية فإن هذا التمييز يقترب من التمييز الأرسطى بين المادة والصورة. من ناحية أخرى سنجد فى آخر التطورات فى الفيزياء الحديثة أن هذا التمييز قد انتهى، لأن كل مجال للقوى يحمل طاقة، وهو إلى هذا المدى يؤلف مادة، فلكل مجال من مجالات القوى نوع معين من الجسيمات الأولية لها أساسا نفس خصائص كل الوحدات الذرية الأخرى للمادة.

عندما تقوم العلوم الطبيعية بدراسة مشكلة المادة، فإنها تقوم بذلك فقط من خلال دراسة صُوَر المادة. والتحولية والتنوع اللانهائى لصور المادة لا بد أن يكونا الموضوع المباشر للاستقصاء، ولابد أن توجه الجهود نحو إيجاد بعض القوانين الطبيعية، بعض المبادىء المُوَحِّدة التى يمكن أن تخدم كدليل خلال هذا المجال الفسيح. وعلى هذا فإن العلوم الطبيعية ـ والفيزيقا بالذات ـ قد ركزت اهتمامها ولفترة طويلة على تحليل بنية المادة وتحليل القوى المسئولة عن هذه البنية.

أصبحت التجربة هى المنهج الأساسى للعلوم الطبيعية منذ عهد جاليليو. يُمكِّننا هذا المنهج من العبور من الخبرة العامة إلى الخبرة النوعية، من أن نفرد الوقائع المميزة فى الطبيعة التى يمكن منها دراسة "قوانين" هذه الطبيعة بشكل أكثر مباشرة من الخبرة العامة. فإذا أردنا أن ندرس بنية المادة فعلينا أن نقوم بالتجارب على المادة. علينا أن نعرِّض المادة لأقسى الظروف

حتى يمكن أن ندرس تحولاتها، على أمل أن نصل إلى الملامح الجوهرية للمادة، الملامح التى تدوم تحت كل التغيرات الظاهرة.

كان هذا هو موضوع الكيمياء فى العهود المبكرة للعلوم الطبيعية الحديثة. ولقد أدى هذا المسعى - مبكرا نسبيا - إلى مفهوم العنصر الكيماوى. سُمّى الجوهر الذى لايمكن أن يُفَكك أو يتحطم إلى مدى أبعد بأى وسيلة متاحة أمام الكيماوى - الغليان، الحرق، الإذابة، المزج بجواهر أخرى - سُمى عنصرا. كان تقديم هذا المفهوم خطوة أولى، بل وأهم خطوة، نحو تفهم بنية المادة. لقد اختُزل التنوعُ الهائل من الجواهر - على الأقل - إلى عدد أقل نسبيا من جواهر أكثر أولية، أو "عناصر"، وبذا أمكن إقامة نوع من النظام بين الظواهر المتباينة للكيمياء. واستخدمت كلمة "ذرة" بناء على ذلك لتعنى أصغر وحدة من المادة تنتمى إلى العنصر الكيماوى. أما أصغر جسيم من المركب الكيماوى يمكن اقتناصه فمن الممكن تَصَوره كمجموعة من ذرات مختلفة. فأصغر جسيم لعنصر الحديد، مثلا، هو ذرة الحديد، وأصغر جسيم للماء هو جزىء الماء، الذى يتركب من ذرة أكسجين واحدة وذرتين أيدروجين.

أما الخطوة الثانية، والتى تكاد توازى الأولى أهمية، فكانت اكتشاف حفظ الكتلة فى العمليات الكيماوية. فعلى سبيل المثال، عندما يحرق عنصر الكربون إلى ثانى أكسيد الكربون، فإن كتلة ثانى أكسيد الكربون تساوى حاصل جمع كتلتى الكربون والأكسجين قبل عملية الاحتراق. كان هذا هو الاكتشاف الذى أضفى المعنى الكمى على مفهوم المادة: من الممكن أن تقاس المادة عن طريق كتلتها، بعيدا عن خصائصها الكيماوية.

وفى خلال الفترة التالية - ومعظمها بالقرن التاسع عشر - اكتُشف عدد من العناصر الكيماوية الجديدة. ولقد وصل هذا العدد الآن إلى مائة عنصر. بَيّن هذا التطور بجلاء أن مفهوم العنصر الكيماوى لم يصل بعد إلى النقطة التى عندها يمكننا تفهم وحدة المادة. لم يكن يرضينا أن نعتقد بوجود عدد كبير جدا من أنواع المادة، تختلف وصفيا دون ماعلاقة بينها.

ظهرت فى بداية القرن التاسع عشر بعض الشواهد على وجود علاقة تربط مابين العناصر المختلفة، وذلك فى حقيقة أن الأوزان الذرية للعناصر المختلفة كثيرا ماتبدو مضاعفات كاملة لوحدة صغرى تقترب من الوزن الذرى للأيدروجين. وكان ثمة اشارة أخرى فى تشابه السلوك الكيماوى لبعض العناصر، تقود إلى نفس الاتجاه. لكن الأمر يتطلب اكتشاف قوى أكبر بكثير

من تلك الخاصة بالعمليات الكيماوية قبل أن يمكننا حقا أن نوطد علاقة بين العناصر المختلفة، ومن ثم إلى توحيد للمادة أكثر قربا.

ولقد عثر على هذه القوى بالفعل فى العملية الاشعاعية التى اكتشفها بيكريل سنة ١٨٩٦. قام رذرفورد وكورى وآخرون باستقصاءات متعاقبة أوضحت تحول العناصر فى العملية الاشعاعية. تُبعث جسيمات ألفا فى هذه العمليات كشظايا من الذرات لها طاقة تبلغ نحو مليون ضعف طاقة جسيم ذرى مفرد فى عملية كيماوية. وعلى هذا فمن الممكن أن تستخدم هذه الجسيمات كأدوات جديدة لتفحص البنية الداخلية للذرة. وكانت النتيجة هى النمط النووى للذرة الذى قدمه رذرفورد عام ١٩١١ بناء على تجاربه على استطارة أشعة ألفا. كان أهم ملامح هذا النمط الشهير هو فصل الذرة إلى جزءين متميزين تماما: نواة الذرة، والقشرة المحيطة من الإلكترونات. لاتحتل النواة بوسط الذرة الا جزءا غاية فى الصغر من الحيز الذى تشغله الذرة (فقطرها يبلغ نحو واحد من مائة ألف من قطر الذرة)، لكنها تحمل كل كتلة الذرة تقريبا، وتحدد شحنتُها الموجبة - وهى مضاعف كامل لما يسمى الشحنة الأولى - عددَ الإلكترونات المحيط (فالذرة ككل لابد أن تكون متعادلة كهربيا)، كما تحدد شكلَ مداراتها.

أما التمييز بين نواة الذرة وقشرتها الإلكترونية فقد أعطى على الفور تفسيرا صحيحا لحقيقة أن العناصر الكيماوية فى الكيمياء هى الوحدات الأخيرة للمادة، وأن تحول مادة إلى أخرى يتطلب قوى أكبر بكثير جدا. ترجع الروابط الكيماوية بين الذرات المتجاورة إلى تفاعل القشرات الإلكترونية، وطاقة هذه التفاعلات صغيرة نسبيا. فالإلكترون الذى يُعَجَّل فى أنبوبة تفريغ بجهد لايزيد عن بضع فولتات، له من الطاقة مايكفى لإثارة القشرة الإلكترونية لتبث الإشعاع، أو لتحطيم الرابطة الكيماوية فى جزىء. لكن السلوك الكيماوى للذرة، وإنْ تألَّف من سلوك القشرات الإلكترونية، فإنما تحدده شحنة النواة. إن علينا أن نغير النواة إذا أردنا أن نغير الخصائص الكيماوية، وهذا يتطلب طاقات أكبر بنحو مليون ضعف.

على أن النموذج النووى لايمكن أن يفسر ثبات الذرة - إذا ماأُخذ على أنه نظام يخضع لميكانيكا نيوتن. وكما ذكرنا فى فصل سابق، فإن تطبيق نظرية الكم على هذا النموذج من خلال عمل بوهر، هو وحده مايمكن أن يفسر حقيقة أن ذرة الكربون مثلا، بعد أن تتفاعل مع ذرات أخرى، أو بعد أن تُطلِق الاشعاع، فإنها فى النهاية تظل دائما ذرة كربون لها نفس

الأغلفة الإلكترونية التى كانت لها. يمكن أن نفسر هذا الثبات ببساطة عن طريق تلك الملامح من نظرية الكم التى تَحُول دون أن نصف بنية الذرة وصفا بسيطا موضوعيا فى المكان والزمان.

بذا أصبح لدينا فى النهاية أساسا أوليا لتفهم المادة. فمن الممكن أن نفسر الخصائص الكيماوية للذرة، وغيرها من الخصائص، بتطبيق البرنامج الرياضى لنظرية الكم على القشرة الإلكترونية. ومن هذا الأساس قد نحاول أن نمد تحليل بنية المادة فى اتجاهين متضادين. فقد ندرس تفاعل الذرات وعلاقتها بالوحدات الأكبر كالجزيئات والبلورات والأشياء الحيوية. وقد نحاول عن طريق البحوث فى نواة الذرة ومكوناتها أن ننفذ إلى الوحدة النهائية للمادة. ولقد مضت البحوث فى كلا الاتجاهين فى العقود الأخيرة. وسنحاول فى الصفحات التالية أن نلقى الضوء على دور نظرية الكم فى هذه المجالين.

والقوى بين الذرات هى أساسا قوى كهربية، انجذاب الشحنات المتضادة وتنافر الشحنات المتماثلة. تجذب النوايا الإلكترونات، وتتنافر عن بعضها. لكن هذه القوى لاتعمل وفقا لقوانين ميكانيكا نيوتن، وإنما وفقا لقوانين ميكانيكا الكم.

وهذا يقود إلى نمطين مختلفين لربط الذرات. فى النمط الأول يمر الكترون من ذرة إلى الذرة الأخرى، مثلا، ليسد النقص فى غلاف إلكترونى مقفل تقريبا. فى هذه الحالة تصبح الذرتان فى النهاية مشحونتين وتشكلان مايسميه الفيزيائى الأيونات ولما كانت شحنتاهما متضادتين، فإنهما تجذبان بعضهما بعضا.

أما فى النمط الثانى، فهناك إلكترون ينتمى لكلتا الذرتين بطريقة تميز نظرية الكم. فإذا استخدمنا صورة مدار الإلكترون، فقد نقول إن الإلكترون يدور حول النواتين ليقضى وقتا متساويا فى كل من الذرتين. وهذا النمط الثانى من الارتباط ينسجم مع مايسميه الكيماويون رابطة التكافؤ.

وهذان النمطان من القوى، وقد يحدثان بأى مزيج، يتسببان فى تشكيل تجمعات مختلفة من الذرات، ويبدو أنهما مسئولان فى نهاية المطاف عن كل البنى المعقدة من المادة التى هى مجال دراسات الفيزياء والكيمياء. يحدث تشكيل المركبات الكيماوية من خلال تشكيل مجاميع مقفلة صغيرة من الذرات المختلفة، كل مجموعة تمثل جزيئا من جزيئات المركب. أما تكوين البلورات فيرجع إلى ترتيب الذرات فى شبيكات منتظمة. وتتشكل المعادن عندما تعبأ الذرات فى إحكام

بحيث يمكن لإلكتروناتها الخارجية أن تترك قشرتها وأن تجول خلال البلورة بأكملها. وترجع المغنطيسية إلى حركة لف الإلكترونات، وهلم جرا.

يمكننا فى هذه الحالات أن نستبقى الثنائية بين المادة والقوة، إذ نستطيع أن نعتبر النوايا والإلكترونات شظايا من المادة حفظتها القوى الكهرومغنطيسية سويا.

بهذه الطريقة وصلت الفيزياء والكيمياء إلى وحدة تكاد تكون كاملة بالنسبة لعلاقتهما ببنية المادة. لكن البيولوجيا تتعامل مع بنى من نوع أكثر تعقيدا، ونمط يختلف بعض الشىء. فبالرغم من كمال الكائن الحى، فمن المؤكد أننا لا نستطيع أن نضع خطا فاصلا واضحا يفصل المادة الحية عن غير الحية. ولقد وفر لنا التقدم فى البيولوجيا عددا كبيرا من الأمثلة التى يمكن منها أن نرى وظائف بيولوجية معينة تتم عن طريق جزيئات خاصة كبيرة جدا، أو مجاميع أو سلاسل من هذه الجزيئات، وأن ثمة اتجاها متزايدا فى البيولوجيا الحديثة لتفسير العمليات البيولوجية كنتائج لقوانين الفيزياء والكيمياء. لكن طبيعة الثبات الذى تظهره الكائنات الحية تختلف بعض الشىء عن طريق ثبات الذرات أو البلورات. إنه ثباتُ العملية أو الوظيفة لاثبات الصورة. وليس ثمة من شك فى أن قوانين نظرية الكم تلعب دورا هاما للغاية فى الظواهر البيولوجية. وعلى سبيل المثال، فإن تلك القوى الخاصة الكماتية ـ النظرية التى لايمكن أن توصف إلا بصورة غير دقيقة عن طريق مفهوم التكافؤ الكيماوى، هذه القوى جوهريةٌ تماما لتفهم الجزيئات العضوية الضخمة وأنماطها الهندسية المختلفة. والتجارب التى أجريت على الطفرات البيولوجية الناتجة عن الإشعاع تبين ملاءمة القوانين الاحصائية الكماتية ـ النظرية كما تبين وجود آليات مُضَخَّمة. والتشابه القريب بين عمل جهازنا العصبى وأداء الحاسبات الإلكترونية الحديثة يؤكد مرة أخرى أهمية العمليات الأولية المفردة فى الكائنات الحية. لكن هذا كله لايثبت أن الفيزياء والكيمياء، ومعهما مفهوم التطور، ستقدم يوما ما وصفا كاملا للكائنات الحية. لابد أن تجرى بحوث العمليات البيولوجية بحذر شديد مقارنةً بمثيلاتها فى الفيزياء والكيمياء. ولقد يكون من الصحيح ـ كما يقول بوهر ـ أننا لانستطيع أن نقدم وصفا للكائنات الحية يعتبره الفيزيائى تاما، لأن ذلك يتطلب تجارب تدخل بشدة فى الوظائف البيولوجية. وصف بوهر هذا الوضع بقوله إننا فى البيولوجيا إنما نهتم بتجليات الإمكانات فى تلك الطبيعة التى تنتمى اليها، لابنتائج التجارب التى يمكن أن نجريها نحن. ووضع التتام هذا الذى تلمع إليه هذه الصياغة يتجلى فى اتجاهٍ بمناهج البحث البيولوجى الجديد يستغل كلَّ

مناهج ونتائج الفيزياء والكيمياء، كما يرتكز من ناحية أخرى على مفاهيم تشير إلى ملامح الطبيعة العضوية التى لاتتضمنها الفيزياء والكيمياء ـ كمفهوم الحياة نفسها.

تعقبنا حتى الآن تحليل بنية المادة فى اتجاه واحد: من الذرة إلى التراكيب الأعقد المؤلفة من عديد من الذرات، من الفيزياء الذرية إلى فيزياء الأجسام الجامدة. علينا الآن أن نلتفت إلى الاتجاه المضاد فنتبع خط البحث من الأجزاء الخارجية للذرة إلى أجزائها الداخلية، من النواه إلى الجسيمات الأولية. وهذا هو الخط الذى يُحتمل أن يقود إلى وحدة المادة. هنا لن نخشى أن تحطّم التجارب خصائص البنى. وعندما نحدد المهمة فى اختبار الوحدة النهائية للمادة، فقد نُعَرّض المادة إلى أقوى القوى الممكنة، إلى أقسى الظروف تطرفا، حتى نرى إن كان من الممكن أن تتحول أى مادة إلى مادة أخرى فى نهاية المطاف.

وأولى الخطوات فى هذا الاتجاه هو التحليل التجريبى لنواة الذرة. فى المرحلة الأولى لهذه الدراسات ـ والتى شغلت تقريبا العقود الثلاثة الأولى من هذا القرن ـ كانت الأدوات الوحيدة المتاحة للتجارب على النواة هى جسيمات ألفا التى تبثها الأجسام المشعة. ولقد نجح رذرفورد عام ١٩١٩ بمساعدة هذه الجسيمات فى تحويل نوايا العناصر الخفيفة، فتمكن مثلا من تحويل نواة نتروجين إلى نواة أكسجين باضافة جسيم ألفا إلى نواة النتروجين وطرد بروتون واحد فى نفس الوقت. كان هذا أول مثال لعمليات على مستوى النواة تذكرنا بالعمليات الكيماوية، إنما أدت الى التحول الاصطناعى للعناصر. وكان التقدم المهم التالى كما نعرف هو التعجيل الاصطناعى للبرتونات بجهاز عالى الجهد إلى طاقات تكفى لإتمام التحول النووى. وهذا يتطلب فُلّطية تبلغ نحو مليون فولت. ولقد نجح كوكروفت ووالطون فى أولى تجاربهما الحاسمة فى تحويل نوايا عنصر الليثيوم إلى نوايا هليوم. فتح هذا الكشف خطا جديدا تماما من البحوث، يمكن أن نسميه الفيزياء النووية بالمعنى الصحيح، ولقد قاد بسرعة إلى تفهم كيفى لبنية النواة الذرية.

كان تركيب النواة فى الحق بسيطا للغاية. تتركب نواة الذرة من نوعين فقط من الجسيمات الأولية، أحدهما هو البروتون الذى هو فى نفس الوقت نواة الأيدروجين، أم الآخر فيسمى النيوترون، وهذا جسيم متعادل كهربيا وله تقريبا نفس كتلة البروتون. يمكن تمييز كل نواة بعدد البروتونات والنيوترونات التى تكوّنها. فنواة الكربون العادية على سبيل المثال تتألف من ستة بروتونات وستة نيوترونات، وهناك نوايا كربون أخرى توجد بتكرار أقل (هى نظائر الأولى)

تتألف من ستة بروتونات وسبعة نيوترونات... إلخ. وعلى هذا فلقد وصلنا إلى وصفٍ للمادة ليس به سوى ثلاث وحدات جوهرية (بدلا من العديد من العناصر الكيماوية المختلفة) هي: البروتون والنيوترون والإلكترون. والمادة جميعا تتألف من ذرات، ومن ثم فهي تتكون من لبنات البناء الجوهرية هذه. لم يكن هذا بعد هو وحدة المادة، لكنه بالتأكيد كان خطوة هامة نحو التوحيد والتبسيط - ولعل هذه الميزة الأخيرة هي الأكثر أهمية. كان الطريق لايزال بالطبع طويلا من معرفة حَجَرَيْ البناء للنواة إلى التفهم الكامل لبنيتها. لكن المشكلة هنا كانت مختلفة بعض الشيء عن المشكلة المناظرة في القشرة الخارجية للذرة التي حلّت في أواسط العشرينات. ففي القشرة الإلكترونية كنا نعرف القوى بين الجسيمات بدرجة عالية من الدقة وكان علينا أن نجد قوانين الديناميكا، وقد وجدناها في ميكانيكا الكم. أما في النواة، فقد كنا نستطيع أن نفترض أن القوانين الديناميكية هي قوانين ميكانيكا الكم، لكن القوى بين الجسيمات لم تكن معروفة مقدما، وكان من الضروري أن تُستنبط من الخصائص التجريبية للنوايا. لم تحل هذه المشكلة حتى الآن. يبدو أنْ ليس للقوى تلك الصورة البسيطة للقوى الكهروستاتيكية بالقشرة الإلكترونية، ومن ثم فإن الصعوبة الرياضية لحساب الخصائص من القوى المعقدة، بجانب عدم دقة التجارب، قد جعلتا من التقدم أمرا عسيرا. لكن المؤكد أننا قد توصلنا إلى تفهم كيفي لبنية النواة.

ثم بقيت المشكلة الأخيرة: وحدة المادة. فهل لَبِنات البناء الجوهرية هذه - البروتون، النيوترون، الإلكترون - وحداتٌ نهائية للمادة لاتُحَطَّم، أي ذرات بالمعنى عند ديموقريطس، لا علاقة بينها سوى علاقة القوى التي تعمل بينها؟ أم هي مجرد صور مختلفة لنفس النوع من المادة؟ هل يمكن لها أيضا أن تتحول إلى بعضها بعضا، أو ربما أيضا إلى صور أخرى من المادة؟ إن المعالجة التجريبية لهذه المشكلة تتطلب قوى وطاقات تُرَكِّز على الجسيمات الذرية، تزيد كثيرا عن تلك التي تلزم لتفحص النواة الذرية. ولما كانت الطاقات المخزنة في النوايا الذرية ليست بالضخامة الكافية لتوفر لنا أداةً لمثل هذه التجارب، فقد كان على الفيزيائي إما أن يعتمد على قوى ذات أبعاد كونية أو على عبقرية المهندسين وحنكتهم.

والواقع أن ثمة تقدم قد حدث في كلا الخطين. ففي الحالة الأولى، استخدم الفيزيائيون مايسمى الأشعة الكونية. فالمجالات الكهرومغطيسية على أسطح النجوم الممتدة فوق مساحات هائلة، تستطيع تحت ظروف معينة أن تعجل إلكترونات ونوايا ذرية مشحونة. ويبدو أن للنوايا -

بسبب قصورها الذاتي الأعلى - فرصة أكبر للبقاء بالمجال المُعَجِّل لمسافة أطول. فإذا ماتركت في النهاية سطح النجم إلى الفضاء الفارغ فستكون وقد تحركت بالفعل خلال جهد يبلغ بضعة آلاف الملايين من الفولتات. ولقد يحدث ثمة تعجيل إضافي في المجالات المغنطيسية بين الأنجم. على أية حال يبدو أن النوايا تبقى داخل فضاء المجرة لفترة طويلة بسبب مجالات مغنطيسية متباينة، لتملأ في نهاية الأمر هذا الفراغ بما نسميه الأشعة الكونية. يصل هذا الاشعاع إلى الأرض من خارجها، وهو يتألف عمليا من نوايا من كل الأنواع - الأيدروجين والهليوم والكثير من العناصر الأثقل - نوايا لها طاقات تبلغ تقريبا من مائة أو ألف مليون إلكترون فولت، وحتى مليون ضعف هذه القيمة في بعض الحالات النادرة. وعندما تنفذ جسيمات هذه الأشعة إلى الغلاف الجوي للكرة الأرضية فإنها تصطدم بذرات النتروجين أو الأكسجين بهذا الغلاف، أو قد ترتطم بالذرات في أي جهاز تجريبي معرض للاشعاع.

أما الخط الثاني من البحوث فهو انشاء ماكينات التعجيل الضخمة، وكان نموذجها الأولىّ هو السيكلوترون الذي أقامه لورانس في كاليفورنيا في أوائل الثلاثينات. والفكرة الأساسية في هذه الماكينات هو أن نُبقي الجسيمات المشحونة - وعن طريق مجال مغنطيسي ضخم - تدور عددا كبيرا جدا من المرات لكي تدفعها مجالات كهربية، في طريقها، المرة بعد المرة. وتستخدم في بريطانيا العظمى الآن ماكينات تصل الطاقة فيها إلى بضع مئات الملايين من الإلكترون فولت. كما تقام الآن في جنيف ماكينة ضخمة جدا من هذا الطراز من خلال تعاون اثنتي عشرة دولة أوروبية ونأمل أن تصل الطاقة فيها إلى ٢٥٠٠٠ مليون إلكترون فولت. ولقد بينت التجارب التي استخدمت الأشعة الكونية أو المعجّلات الضخمة ملامح جديدة مثيرة للمادة - الإلكترون، البروتون، النيترون - إذ اكتشفت جسيمات أولية جديدة يمكن تخليقها في هذه العمليات ذات الطاقات الأعلى، لتختفي ثانية بعد فترة قصيرة. لهذه الجسيمات الجديدة خصائص تشبه خصائص الجسيمات القديمة سوى أنها غير ثابتة إذ يبلغ عمر أكثرها ثباتا نحو جزء من مليون جزء من الثانية، بل ويبلغ عمر البعض منها واحدا على ألف من هذا. ولقد عرف حتى الآن نحو ٢٥ جسيما مختلفا وكان آخرها هو البروتون السالب.

تبدو هذه النتائج للوهلة الأولى وكأنها تقود بعيدا عن فكرة وحدة المادة، إذ يبدو عدد الوحدات الأساسية وقد ازداد ثانية إلى رقم يقارب عدد العناصر الكيماوية المختلفة. لكن هذا التفسير ليس صحيحا، فلقد بينت التجارب في نفس الوقت أن الجسيمات يمكن أن تُخَلَّق من

جسيمات أخرى، أو ببساطة، من الطاقة الحركية لمثل هذه الجسيمات، كما أنها يمكن أن تضمحل ثانية إلى جسيمات أخرى. والواقع أن التجارب قد أوضحت التحولية الكاملة للمادة. فكل الجسيمات الأولية يمكن تحت مايكفي من طاقة عالية، أن تتحول إلى جسيمات أخرى، كما يمكن تخليقها بسهولة من الطاقة الحركية، ويمكن أيضا أن تندثر إلى طاقة، إلى اشعاع مثلا. وعلى هذا فقد وجدنا هنا الدليل النهائي على وحدة المادة. كل الجسيمات الأولية مصنوعة من نفس الجوهر، الذى قد نسميه الطاقة أو المادة الكونية. إنها مجرد صور مختلفة يمكن للمادة أن تظهر بها.

فإذا قارنا هذا الموضوع بالمفاهيم الأرسطية للمادة والصورة، ففى مقدورنا أن نقول إن مادة أرسطو، وهى مجرد بوتنشيا، هى الموازى لمفهوم الطاقة عندنا، تلك التى تصبح حقيقة واقعة عن طريق الصورة، عندما يُخْلق الجسيم الأولى.

طبيعى أن الفيزياء الحديثة لا تقنع بمجرد الوصف الكيفى للبنية الأساسية للمادة، إن عليها أن تحاول بالتفحص التجريبى أن تصل إلى صياغة رياضية للقوانين الطبيعية التى تحدد "صور" المادة، والجسيمات الأولية وقواها. لم يعد فى مقدورنا أن نضع خطا فاصلا بين المادة والقوة فى هذا الفرع من الفيزيقا، لأن كل جسيم أولى لايُنْتِج فقط بعض القوى ولا تؤثر فيه فقط بعض القوى، إنما هو يمثل فى نفس الوقت مجالا معينا من القوى. والثنائية الكماتية ـ النظرية للموجات والجسيمات تجعل الكيان نفسه يبدو مادة ويبدو قوة.

وكل المحاولات التى تمت حتى الآن للعثور على وصف رياضى للقوانين الخاصة بالجسيمات الأولية، كلها قد بدأت من نظرية الكم لمجالات الموجة. ولقد بدأت فى أوائل الثلاثينات البحوث النظرية فى مثل هذه النظريات. لكن أول الاستقصاءات على هذا الخط قد كشفت عن صعوبات قصوى ترجع إلى مزيج من نظرية الكم ونظرية النسبية الخاصة. قد يبدو من الوهلة الأولى أن النظريتين ـ الكم والنسبية الخاصة ـ تشيران إلى نواحى مختلفة للطبيعة، بحيث لا توجد ثمة علاقة بينهما، أنه من السهل أن نَفِى باحتياجات النظريتين فى نفس الصورية. على أن التفحص الدقيق سيبين أن النظريتين تتداخلان فعلا عند نقطة معينة، وأن المشاكل كلها تنبع من هذه النقطة.

كشف نظرية النسبية الخاصة عن بنية للمكان والزمان تختلف بعض الشىء عن البنية التى

كانت تُفترض عادة منذ ميكانيكا نيوتن. وكان أهم ملامح هذه البنية المكتشفة حديثا هو وجود سرعة قصوى لايمكن لأى جسم متحرك أو أية إشارة متحركة أن تتجاوزها ـ سرعة الضوء. ونتيجة لهذا فإن واقعتين تحدثان فى نقطتين متباعدتين لايمكن أن يكون بينهما ارتباط علّىّ مباشر إذا كان زمنا وقوعهما بحيث أن إشارة ضوئية تُطْلَق فور وقوع إحداهما عند نقطة، لاتصل إلى النقطة الأخرى إلا بعد أن تكون الواقعة الأخرى قد حدثت هناك، والعكس بالعكس. فى هذه الحالة يمكن أن نقول إن الواقعتين متزامنتان. ولما كان من غير الممكن أن يصل أى فعل بأى شكل، من واقعة عند إحدى نقطتى الزمن إلى الواقعة الأخرى عند النقطة الأخرى، فإن الواقعتين لايرتبطان بأى فعلى علّى.

لهذا السبب، فإن أى فعل عن بعد، كمثل قوى الجاذبية بميكانيكا نيوتن، لن يكون متوافقا مع نظرية النسبية الخاصة. كان على النظرية أن تستبدل بمثل هذا الفعل أفعالا من نقطة إلى نقطة ـ من نقطة معينة، فقط إلى نقاط فى الجوار المتناهى الصغر. والتعبيرات الرياضية الطبيعية جدا لمثل هذا الفعل هى المعادلات التفاضلية للموجات أو المجالات اللامتغيرة بالنسبة لتحويل لورنتس. فمثل هذه المعادلات التفاضلية تستبعد أى فعل مباشر بين الوقائع "المتزامنة".

وعلى هذا فإن بنية المكان والزمان بنظرية النسبية الخاصة تقتضى ضمنا حدا صارما للغاية بين منطقة التزامن، حيث لاينتقل أى فعل، وبين غيرها من المناطق حيث يمكن أن ينتقل فعل مباشر من واقعة إلى أخرى.

من ناحية أخرى، سنجد أن العلاقات اللامحققية بنظرية الكم تضع حدا واضحا على الدقة التى يمكن أن نقيس بها قياسات متزامنة: للمواقع وكميات الحركة، أو الزمن والطاقة. ولما كان الحد الصارم حقا إنما يعنى دقة لانهائية بالنسبة للموقع فى المكان والزمان، فلابد أن تبقى كميات الحركة والطاقات غير محددة على الاطلاق أو لابد فى الواقع لكميات الحركة والطاقات العالية التحكمية أن تحدث باحتمالات واسعة. وعلى هذا فإن أية نظرية تحاول أن تفى بمتطلبات كل من نظرية النسبية الخاصة ونظرية الكم، لابد أن تقود إلى متناقضات رياضية ذاتية، إلى انحرافات فى منطقة الطاقات وكميات الحركة العالية جداً. قد لايبدو تسلسل هذه الاستنباطات ملزما تماما، لأن أية صورية من النمط الذى يهمنا الآن هى صورية غاية فى التعقيد، وربما قدمت بعض الإمكانات الرياضية لتجنب التعارض بين نظرية الكم والنسبية. لكن

البرامج الرياضية التى جُرّبت حتى الآن قد قادت بالفعل الى انحرافات، نعنى إلى تناقضات رياضية، أو لم توف بكل متطلبات النظريتين. ولقد كان من السهل أن نرى أن الصعوبات تأتى بالفعل عن تلك النقطة التى ناقشناها.

كانت مثيرة حقا تلك الطريقة التى قَصُرت بها البرامج التقاربية عن الوفاء بمتطلبات النسبية أو نظرية الكم. وعلى سبيل المثال، ثمة برنامجٌ قاد عندما مافُسّر بلغة الوقائع الفعلية فى المكان والزمان، قاد إلى نوع من انقلاب الزمن. إنه يتنبأ بعمليات فيها تخلق فجأة جسيمات فى موقع معين من المكان، تُوفّر لها الطاقة فيما بعد عن طريق عملية اصطدام أخرى بين جسيمات أولية فى موقع آخر. يعرف الفيزيائيون من تجاربهم بأن العمليات من هذا القبيل لاتحدث فى الطبيعة، أو على الأقل لاتحدث إذا مافَصلَت بين العمليتين مسافات طويلة فى الفضاء والزمن. ثمة برنامج رياضى آخر حاول تجنب الاختلاف من خلال عملية رياضية يقال لها "إعادة التطبيع"، إذ يبدو من الممكن أن ندفع باللانهائيات إلى مكان فى الصورية لاتتمكن فيه من التدخل فى توطيد العلاقات المحددة تماما بين الكميات التى يمكن أن تلاحَظ مباشرة. والواقع أن هذا البرنامج قد قاد إلى تقدم محسوس فى الديناميكا الكهربية الكماتية، لأنه يبرر بعض تفاصيل مثيرة فى طيف الهيدروجين لم تكن مفهومة قبلا. على أن التحليل المتفحص لهذا البرنامج الرياضى قد جعل من المرجح أن تصبح تلك الكميات التى لابد أن تفسر فى نظرية الكم العادية على أنها احتمالات، أن تصبح تحت ظروف معينة سلبية فى صوريةٍ إعادة التطبيع.. وهذا سيحول دون الاستخدام المستقيم للصورية فى وصف المادة.

لم نتمكن بعد من الحل النهائى لهذه الصعوبات. سيبزغ الحل يوما ما بعد تجميع مادة تجريبية أدق وأدق عن الجسيمات الأولية المختلفة، عن خلقها ودثورها، عن القوى العاملة بينها. فى بحثنا عن الحلول الممكنة للصعوبات، ربما كان علينا أن نتذكر أننا لانستطيع تجريبيا أن نستبعد عمليات انقلاب الزمن التى أشرنا إليها قبلا، إذا ماكانت تتم فقط داخل مناطق صغيرة جدا من الفضاء والزمان خارج مجال أدواتنا التجريبية الحالية. طبيعى أننا سنرغب عن قبول عمليات انقلاب الزمن إذا ماكان ثمة امكانية فيما بعد أن نتعقبها تجريبيا بنفس المعنى الذى نتعقب به الوقائع الذرية العادية. لكن ربما ساعدنا هنا تحليل نظرية الكم وتحليل النسبية فى أن نرى المشكلة تحت ضوء جديد.

ترتبط نظرية النسبية بثابت كونى فى الطبيعة: سرعة الضوء. يحدد هذا الثابت العلاقة بين

الفضاء والزمان ومن ثم فهو مُضَمَّن فى أى قانون طبيعى يحقق متطلبات لاتغير لورنس. ولغتنا العادية ومفاهيم الفيزياء الكلاسيكية لا تنطبق إلاَّ على الظواهر التى تُعتبر سرعة الضوء بالنسبة لها لانهائية، من الناحية العملية.

وعندما نقترب فى تجاربنا من سرعة الضوء، بأن علينا أن نستعد لنتائج لايمكن تفسيرها بهذه المفاهيم.

ترتبط نظرية الكم بثابت كونى آخر فى الطبيعة: كم فعل بلانك. إن الوصف الموضوعى للوقائع فى الفضاء والزمان غير ممكن إلا إذا كنا نتعامل مع مواضيع أو عمليات فى مجال واسع نسبيا يُعتبر ثابت بلانك فيه صغيراً إلى أبعد الحدود. فإذا مااقتربت تجاربنا من المنطقة التى يصبح فيها كم الفعل جوهريا، ولجنا إلى تلك الصعوبات مع المفاهيم المعتادة، والتى سبق أن ناقشناها فى الفصول الأولى من هذا الكتاب.

لابد من وجود وجود ثابت كونى آخر فى الطبيعة، هذا أمر واضح لأسباب أبعادية بحتة. تحدد الثوابت الكونية مقياس الطبيعة، الكميات المميّزة التى لايمكن اختزالها إلى كميات أخرى. يلزمنا ثلاث وحدات جوهرية على الأقل لنشكل فئة كاملة من الوحدات. من السهل تفهم هذا من مواضعات كمثل استخدام الفيزيائيين لنظام س ـ ج ـ ث (سنتيمتر ـ جرام ـ ثانية). فوحدة للطول ووحدة للزمن ووحدة للكتلة تكفى لتشكيل فئة كاملة، لكن لابد أن تكون لدينا ثلاث وحدات على الأقل. قد نستبدل بها أيضا وحدات للطول والسرعة والكتلة، أو وحدات للطول والسرعة والطاقة... إلخ، لكن يلزم وجود ثلاث وحدات أساسية على الأقل. والآن، فإن سرعة الضوء وثابت بلانك للفعل لايوفران إلا وحدتين من هذه. لابد من وجود وحدة ثالثة. وبدون نظرية تتضمن هذه الوحدة الثالثة لايمكن بأية حال أن نحدد الكتل وغيرها من خصائص الجسيمات الأولية. فإذا حكمنا من معرفتنا الحالية عن هذه الجسيمات، فإن أفضل وسيلة لتقديم هذه الثابت الكونى الثالث ستكون هى افتراض طول كونى قيمته نحو $١٠^{-١٣}$ سم، أى أقل قليلا من أنصاف أقطار النوايا الذرية للضوء. فإذا ماشكلنا من مثل هذه الوحدات الثلاث تعبيرا يوازى الكتلة فى أبعاده، فستكون لقيمته نفس مرتبة كتل الجسيمات الأولية.

فإذا افترضنا أن قوانين الطبيعة تشمل فعلا ثابتا كونيا ثالثا له بعد الطول ورتبته $١٠^{-١٣}$ سم، فلنا أن نتوقع أن تطبَّق مفاهيمنا المعتادة فقط على المناطق من الفضاء والزمان

الكبيرة بالنسبة لهذا الثابت الكونى. وعلينا أن ننتظر ظواهر لها صفات كيفية جديدة عندما نقترب فى تجاربنا من مناطق فى الفضاء والزمان أصغر من أنصاف الأقطار النووية. أما ظاهرة انقلاب الزمن التى أشرنا اليها والتى نتجت فقط عن اعتبارات نظرية، كإمكان رياضى، فقد تنتمى إلى هذه المناطق البالغة الصغر. فإذا كان الأمر هكذا فقد لايمكن ملاحظتها بطريقة تسمح بوصفٍ لها بلغة المفاهيم الكلاسيكية. ولقد يتضح أن هذه العمليات تخضع للترتيب الزمنى المعتاد فى المدى الذى يمكن فيه ملاحظتها ووصفها باللغة الكلاسيكية.

لكن كل هذه المشاكل هى موضوع بحوث المستقبل فى الفيزياء الذرية. وقد نأمل أن يقود المجهود المشترك للتجارب فى مجال الطاقة العالية مع التحليل الرياضى، أن يقود يوما إلى تفهم كامل لوحدة المادة، ونعنى بالتفهم الكامل أن تظهر صور المادة، بالمعنى الأرسطى، كنتائج، كحلول لبرنامج رياضى مغلق يمثل القوانين الطبيعية للمادة.