٢

تاريخ نظرية الكم

ترتبط نظرية الكم بمظاهرة معروفة لا تنتمى إلى الأجزاء الرئيسية من الفيزياء الذرية. فإذا ماسخنت أى قطعة من المادة، فإنها تبتدىء فى التوهج، وبارتفاع الحرارة تلتهب ويحمر لونها ثم يزداد إتقادها فتبيضّ. ولايعتمد اللون كثيرا على سطح المادة، وهو فى الأجسام السوداء يتوقف تماما على درجات الحرارة. وعلى هذا فإن الاشعاع المنبعث من مثل هذه الأجسانم السوداء على درجات الحرارة المرتفعة يعتبر مادة ملائمة للبحث الفيزيائى. إنه ظاهرة بسيطة يجب أن تجد تفسيرها البسيط فى القوانين المعروفة للإشعاع والحرارة. على أن المحاولة التى قام بها اللورد رايلى وجينس فى نهاية القرن التاسع عشر قد فشلت وكشفت عن صعوبات خطيرة. لن يكون من السهل أن نَصِف هنا هذه الصعوبات فى عبارات بسيطة، ويكفى فقط أن نذكر أن تطبيق القوانين المعروفة لم يؤد إلى نتائج معقولة. وعندما دخل بلانك هذا المْجال من البحث عام ١٨٩٥ حاول أن يحول المشكلة من الإشعاع إلى الذرّة المشعة. بيد أن هذا لم يؤد إلى إزالة أى من الصعوبات الملازمة للمشكلة، لكنه بسّط تفسير الحقائق التجريبية. فى هذا الوقت بالذات ـ فى صيف عام ١٩٠٠ ـ قام كرلباوم وروبنس فى برلين بإجراء قياسات جديدة دقيقة جدا لطيف الإشعاع الحرارى. عندما سمع بلانك بهذه النتائج حاول أن يفسرها عن طريق صيغ رياضية بسيطة بدت مقبولة من بحثه عن العلاقة العامة بين الحرارة والإشعاع. ثم تقابل بلانك وروبنس يوما على فنجان شاى فى منزل بلانك، وقارنا نتائج روبنس الأخيرة بصيغة جديدة اقترحها بلانك، بينت المقارنة توافقا كاملا. وكان هذا هو اكتشاف قانون الاشعاع الحرارى لبلانك.

كان هذا فى الوقت ذاته بدايةً للعمل النظرى المكثف لبلانك. ماذا كان التفسير الفيزيائى

الصحيح للصيغة الجديدة؟ كان بلانك يستطيع، من أعماله السابقة، أن يترجم صيغته بسهولة إلى بيان عن الذرة المشعة (أو ماتسمى بالمتذبذبة)، ولابد أنه اكتشف سريعا أن صيغته تشير إلى أن المتذبذبة لايمكن أن تحوى إلا كمات متميزة من الطاقة ـ وهذه نتيجة تختلف تماما عن كل ماعرف قبلا فى الفيزياء الكلاسيكيه، حتى ليمكن القول إنه لابد وأن قد رفض تصديقها فى البداية. لكنه أقنع نفسه خلال فترة عمله المكثف صيف ١٩٠٠ بأن لا مفر من هذا الاستنباط. ذكر ابنُ بلانك أن والده قد حدثه عن أفكاره الجديدة أثناء نزهة طويلة على الأقدام فى جرونيفالد ـ تلك الغابة فى ضواحى برلين. شرح له فى هذه النزهة بأنه شعر كما لو كان قد توصل إلى كشف من الطراز الأول، ربما لايضارعه إلا اكتشافات نيوتن. لابد إذن أن بلانك كان يدرك آنئذ أن صيغته مست أسس وصفنا للطبيعة، وأن هذه الأسس ستبدأ يوما ما فى التحرك من وضعها التقليدى الحالى نحو وضع مستقر جديد لايزال مجهولا. لم يكن بلانك يحب هذه النتيجة على الاطلاق وهو المحافظ فى نظرته الكلية للمستقبل، لكنه نشر فرضه الكماتى فى ديسمبر عام ١٩٠٠.

أما فكرة أن الطاقة لايمكن أن تنبعث أو تُمتص إلاّ فى كمات طاقة متميزة فقد كانت فكرة جديدة تماما، حتى لم يكن من المستطاع تكييفها داخل الهيكل التقليدى للفيزياء. حاول بلانك مرة أن يصالح فرضه الجديد مع القوانين الأقدم للإشعاع، لكن محاولته فشلت فى القضايا الأساسية. وتطلب الأمر خمس سنين كى تخطو الخطوة التالية فى الاتجاه الجديد.

فى هذه المرة كان الشاب آينشتين ـ ذلك العبقرى الثورىّ بين الفيزيائيين ـ هو الشخص الجسور الذى لم يخش هجر المفاهيم القديمة. كان ثمة مشكلتان يمكنه فيهما أن يستخدم الأفكار الجديدة. فأما الأولى فهى مايسمى الظاهرة الضوكهربية، انبعاث الإلكترونات من المعادن تحت تأثير الضوء. بينت التجارب ـ لاسيما تجارب ليناردـ أن طاقة الإلكترونات المنبعثة لاتعتمد على شدة الضوء، وإنما فقط على قوته ـ أو إذا أردت الدقة، على تردده. ولا تستطيع النظرية التقليدية للإشعاع أن تفسر هذا. ولقد تمكن آينشتين من تفسير هذه الملاحظات بأن ترجم فرض بلانك على أنه يقول إن الضوء يتكون من كمات من الطاقة تتحرك خلال الفضاء. ويلزم أن يكون الكم الواحد للضوء ـ بناء على افتراضات بلانك ـ مساويا لتردد الضوء مضروبا فى ثابت بلانك.

وأما المشكلة الثانية فكانت هى الحرارة النوعية للأجسام الجامدة. تؤدى النظرية التقليدية

إلى قيم للحرارات النوعية تتوافق مع الملاحظات على درجات الحرارة المرتفعة، لكنها تخالفها على درجات الحرارة المنخفضة. ومرة أخرى تمكن آينشتين من أن يوضح أننا نستطيع تفهم هذا السلوك بتطبيق فرض الكم على اهتزازات المرونة للذرات فى الجسم الجامد. ولقد كانت هاتان النتيجتان علامة بارزة من علامات التقدم لأنهما كشفتا عن وجود كم الفعل لبلانك ـ وهكذا يسمى ثابت بلانك بين الفيزيائيين ـ عن وجوده فى ظواهر متعددة ليس لها علاقة مع الإشعاع الحرارى. ثم أنهما كشفتا فى نفس الوقت عن الصفة الثورية العميقة للفرض الجديد، فلقد قادت الأولى منهما إلى وصف للضوء يختلف عن الصورة الموجية التقليدية. من الممكن تفسير الضوء إما على أن يتكون ـ تبعا لنظرية ماكسويل ـ من موجات كهرومغنطيسية، أو أنه يتكون من كمات ضوء، أو رُزَم من الطاقة تتحرك خلال الفضاء بسرعة هائلة. لكن هل من الممكن أن يكون كليهما؟ عرف آينشتين بالطبع أنه لايمكن تفسير الظواهر المعروفة للحيود والتداخل إلا على أساس الصورة الموجية. ولم يكن فى استطاعته أن يناقش التعارض التام بين الصورة الموجية وفكرة كمات الضوء. ولاهو حاول حتى أن يزيل التناقض الذاتى لهذا التفسير. لقد أخذ التناقض ببساطة على أنه شيء يمكن فهمه فيما بعد.

فى غضون ذلك كان أبحاث بيكريل وكورى ورذرفورد قد أدت إلى بعض التوضيح بالنسبة لتركيب الذرة. فقد أثمرت ملاحظات رذرفورد على تفاعل أشعة ألفا التى تنفذ خلال المادة، أثمرت عام ١٩١١ النموذجَ الذريَّ الشهير، وفيه تُصور الذرة على أنها نواة موجبة الشحنة تحوى كل كتلة الذرة تقريبا، تدور حولها إلكترونات مثلما تدور الكواكب حول الشمس. وفسرت الرابطة بين ذرات العناصر المختلفة كتفاعل بين الإلكترونات الخارجية للذرات المتجاورة، فليس لها علاقة مباشرة بنواة الذرة. تحدد النواةُ السلوكَ الكيماوىَّ للذرة من خلال شحنتها، التى تحدد بدورها عددَ الإلكترونات فى الذرة المتعادلة. لم يكن هذا النموذج الذرى فى بداية الأمر قادرا على تفسير أهم الملامح المميزة للذرة: نقصد ثباتها الهائل. ليس ثمة نظام كوكبى يمكنه تبعا لميكانيكا نيوتن أن يعود إلى صورته الأصلية بعد تصادمه بنظام شبيه. لكن ذرة عنصر كالكربون ستظل ذرة كربون بعد أى تصادم أو تفاعل يحدث فى الترابطالكيماوى.

قدم بوهر عام ١٩١٣ تفسير هذا الثبات الفريد، وذلك بتطبيق فرض الكم لبلانك. فإذا كانت الذرة تستطيع أن تغير طاقتها فقط عن طريق كمات طاقة مميزة، فإن هذا يعنى بالضرورة أن

الذرة لايمكن أن توجد إلى فى حالات موقوفة مميزة، أدناها هى الحالة الطبيعية للذرة. وعلى هذا فإن الذرة بعد أى تفاعل ستعود فى نهاية المطاف إلى حالتها الطبيعية.

بتطبيق نظرية الكم على النموذج الذرى استطاع بوهر ليس فقط أن يفسر ثبات الذرة وانما أيضا أن يقدم فى بعض الحالات البسيطة تفسيرا نظريا للطيف الخطى الذى تطلقه الذرات بعد إثارتها بالتفريغ الكهربى أو الحرارة. ترتكز نظريته على تشكيلة من الميكانيكا الكلاسيكية لحركة الإلكترونات تحت شروط كمانية فرضت على الحركات الكلاسيكية لتحديد الحالات الموقوفة المميزة للنظام. ولقد قدم سومرفيلد فيما بعد صياغة رياضية متينة لهذه الشروط. كان بوهر يدرك حقيقة أن الشروط الكمانية تفسد بشكل ما استقامة ميكانيكا نيوتن. يمكن للمرء باستخدام نظرية بوهر أن يحسب ترددات الضوء المنبعث من ذرة بسيطة كذرة الأيدروجين.

ولقد اتضح وجود اتفاق تام مع الملاحظات. غير أن هذه الترددات كانت تختلف عن الترددات المدارية وعن توافقيات الإلكترونات الدائرة حول النواة، وقد بينت هذه الحقيقة على الفور أن النظرية تعج بالمتناقضات لاتزال. لكنها تحمل جزءا كبيرا من الحقيقة. فهى تفسر بالفعل ـ وصفيا ـ السلوك الكمانى للذرات وطيفها الخطى، ولقد تأكدت صحة وجود الحالات الموقوفة عن طريق تجارب فرانك وهيرتس، وشتيرن وجيرلاخ.

فتحت نظرية بوهر فرعا جديدا من البحوث. أتيح الآن كلُّ ذلك القدر الهائل من المادة التجريبية التى جُمعت بالمطياف خلال بضعة عقود، أتيح ليُستخدم كبيانات عن قوانين الكم الغريبة التى تحكم حركات الإلكترونات فى الذرة. كما أمكن أيضا استعمال الكثير من تجارب الكيمياء لنفس الغرض. ولقد تعلم الفيزيائيون من ذلك التاريخ أن يسألوا الأسئلة الصحيحة. وكثيرا مانقطع بوضع السؤال الصحيح أكثرَ من نصف الطريق نحو حل المشكلة.

وماذا كانت هذه الأسئلة؟ كانت كلها تقريبا تتعلق بالتناقضات الغريبة الواضحة بين نتائج التجارب المختلفة. فالاشعاع الذى يسبب نموذج التداخل، والذى لابد من ثَم أن يتألف من موجات، كيف يمكن أن يُتيح أيضا الظاهرةَ الضوكهربية وهى التى تحتاج بالضرورة أن يكون مؤلفا من جسيمات متحركة؟ وتردُّدُ الحركة المدارية للإلكترون فى الذرة، كيف يمكن ألاَّ يتبدى فى تردد الاشعاع المنبعث؟ هل يعنى هذا أنْ ليس ثمة حركة مدارية؟ لكن، إذا ماكانت فكرة

الحركة المدارية خاطئة، فماذا يحدث للإلكترونات داخل الذرة؟ يمكننا أن نرى الالكترونات وهى تتحرك خلال الغرفة السحابية، وهى تُطْرد أحيانا من الذرة، فلماذا إذن لاتتحرك خلال الذرة أيضا؟ من الصحيح أنها قد تكون فى وضع سكون فى الحالة الطبيعية للذرة ـ حالة أدنى طاقة. لكن ثمة حالات كثيرة لطاقة أعلى يكون فيها للقشرة الإلكترونية عزمٌ زاوٍ. ومثل هذه الالكترونات لايمكن أن تكون فى وضع سكون. يمكننا أن نضيف العديد من الأمثلة المشابهة، وسنجد المرة بعد المرة أن محاولة وصف الأحداث الذرية باستخدام المصطلحات التقليدية للفيزياء ستؤدى إلى تناقضات.

وبالتدريج، خلال أوائل العشرينات، تعوَّد الفيزيائيين على هذه الصعوبات، واكتسبوا معرفة معينة غامضة عن المواقع التى تحدث بها المشاكل، وتعلموا أن يتجنبوا التناقضات. عرفوا أىُّ وصفٍ للوقائع الذرية سيكون هو الصحيح بالنسبة لكل تجربة. لم يكن هذا كافيا لتشكيل صورة عامة متماسكة عما يحدث فى العملية الكمانية، لكنه غَيَّر فكر الفيزيائيين بطريقة ما أدخلتهم إلى روح نظرية الكم. وعلى هذا، فقد كان العلماء يعرفون بالتقريب ما ستكون عليه نتيجة أى تجربة حتى قبل ظهور صياغة متماسكة لنظرية الكم.

كثيرا ماتناقش مايسمى بالتجارب المثالية. تصمم مثل هذه التجارب لتجيب على سؤال حاسم بغض النظر عن إمكانية تنفيذها. من المهم بالطبع أن يكون إجراء التجربة ممكنا من ناحية المبدأ، لكن التقنية قد تكون فى غاية التعقيد. وقد تكون هذه التجارب المثالية نافعة جدا فى توضيح مشاكل بذاتها. فإذا لم يتفق الفيزيائيون حول نتيجة مثل هذه التجربة المثالية، فكثيرا مانتمكن من العثور على تجربة مشابهة أبسط يمكن اجراؤها، بحيث تسهم الإجابة التجريبية جوهريا فى تفسير نظرية الكم.

وكانت أغرب خبرات تلك السنين فى عدم اختفاء مفارقات نظرية الكم خلال عملية التوضيح هذه. على العكس من ذلك، لقد غدت أكثر بروزا وأكثر إثارة. كانت هناك على سبيل المثال تجربة كومبتون الخاصة باستطارة أشعة إكس. تقول التجارب المبكرة عن تداخل الضوء المستطار إنه ليس ثمة شك فى أن الاستطارة تحدث أساسا فى الشكل التالى: تتسبب موجة الضوء الساقط فى أن يهتز بالشعاع إلكترون بنفس تردد الموجة، ثم يبعث الإلكترون المتذبذب موجة كروية لها نفس التردد، وبذلك ينتج الضوء المستطار. على أن كومبتون قد وجد عام ١٩٢٣ أن تردد أشعة إكس المستطارة يختلف عن تردد أشعة إكس الساقطة. من الممكن أن

يفهم هذا التغير فى التردد منهجيا إذا افترضنا أن الاستطارة تنتج عن ارتطام كم ضوء بالإلكترون، إذ تتغير طاقة كم الضوء أثناء الارتطام. ولما كان حاصل ضرب التردد × ثابت بلانك يعطى طاقة كم الضوء، فلابد إذن أن يتغير التردد أيضا. لكن ماذا يحدث فى هذا التفسير لموجة الضوء؟ يبدو من التجربتين (الواحدة عن تداخل الضوء المستطار والأخرى عن التغير فى تردد الضوء المستطار) أن كلا منهما تناقض الأخرى، وليس ثمة احتمال لحل وسط.

فى ذاك الوقت كان الكثيرون من الفيزيائيين قد اقتنعوا بأن هذه التناقضات البادية إنما تنتمى إلى البنية الأصيلة للفيزياء الذرية. وعلى هذا حاول ده برولى فى فرنسا عام ١٩٢٤ أن يمد مابين وصف الموجة ووصف الجسيم من ثنائية، إلى الجسيمات الأولية للمادة، لاسيما إلى الالكترونات. إوضح أن موجةً ماديةً ماقد "تناظر" إلكترونا متحركا، تماما مثلما تناظر موجةُ الضوء كَمَّ ضوء متحركا. لم يكن مفهوما آنئذ ماذا تعنى كلمة "تناظر" فى هذا الخصوص. لكن ده برولى اقترح ضرورة أن يفسر الشرط الكماتى فى نظرية بوهر على أنه تعبير عن موجات المادة. إن موجة تدور حول نواة لايمكن أن تكون موجة موقوفة إلا لأسباب هندسية، إن محيط المدار لابد أن يكون عددا صحيحا تاما من أضعاف طول الموجة. بهذه الطريقة ربطت فكرة ده برولى الشرط الكماتى (والذى كان دائما عاملا دخيلا فى ميكانيكا الإلكترونات) بالثنائية بين الموجة والجسيم.

أما الاختلاف بين التردد المدارى المحسوب للإلكترونات، وتردد الإشعاع المنبعث فقد كانت نظرية بوهر تفسره كقصور فى مفهوم المدار الإلكترونى. كان هذا المفهوم مبهما إلى حدما منذ البداية. على أن الالكترونات فى المدارات العليا تتحرك على مسافات بعيدة جدا من النواة، تماما مثلما تفعل عندما نراها وهى تتحرك خلال الغرفة السحابية. هنا يمكننا أن نتحدث عن المدارات الإلكترونية. ومن ثم فلقد كان من المُرْضى حقا بالنسبة لهذه الترددات العليا أن تقترب ترددات الاشعاع المنبعث من الترددات المدارية وتوافقياتها العليا. كما أن بوهر قد اقترح بالفعل فى أبحاثه المبكرة المنشورة، أن شدة خطوط الطيف المنبعث تقترب من شدة التوافقات المناظرة. ولقد أثبت مبدأ التناظر هذا قيمته العظمى فى الحسابات التقريبية لشدة الخطوط الطيفية. ومن ثم سنصل إلى انطباع بأن نظرية بوهر تعطى تصويرا وصفيا لاكميا لما يحدث داخل الذرة، بأن ثمة ملمحا جديدا لسلوك المادة قد عُبِّر عنه كميا تحت الشروط الكماتية، التى ترتبط بدورها بالثنائية بين الموجات والجسيمات.

وأخيرا ظهرت الصيغة المضبوطة لنظرية الكم من خلال تطويرين مختلفين. أما الأول فقد نشأ عن مبدأ بوهر للتناظر. علينا أن نتخلى عن المدار الإلكتروني، لكن علينا أن نستبقيه في حدود أعداد الكم الكبيرة، نقصد للمدارات الكبيرة. في هذه الحالة الأخيرة يعطي الاشعاع المنبعث (عن طريق ترددات وشدته) صورة للمدار الالكتروني، إنه يمثل مايسميه الرياضيون مفكوك فوريه للمدار. اقترحت الفكرة نفسُها أن نكتب القوانين الميكانيكية، ليس كمعادلات لمواقع وسرعات الالكترونات، وإنما كمعادلات لترددات وسعات مفكوك فوريه الخاص بها. فإذا ابتدأنا بمثل هذه المعادلات وحورناها قليلا جدا فلنا أن نأمل في الوصول إلى علاقات لهذه المقادير تناظر ترددات وشدة الشعاع المنبعث، حتى بالنسبة للمدارات الصغيرة وللحالة الأرضية (العادية) للذرة. من الممكن تنفيذ هذه الخطة فعلا. ولقد قادت في صيف عام ١٩٢٥ إلى صورية رياضية أطلق عليها اسم ميكانيكا المصفوفات، أو - بشكل أكثر عمومية - ميكانيكا الكم. استُبدلت بمعادلات الحركة في ميكانيكا نيوتن معادلاتٌ شبيهة بين مصفوفات، ولقد كان من الغريب أن نجد أنه من الممكن أن نستنبط من النظام الجديد الكثيرَ من نتائج ميكانيكا نيوتن أيضا - مثل حفظ الطاقة.... الخ. ثم بينت أبحاث بورن وجوردان وديراك ألاَّ تبادل بين المصفوفات التي تمثل موقع وكمية حركة الالكترون. ولقد اوضحت هذه الحقيقة بجلاء الفارق الجوهري بين ميكانيكا الكم والميكانيكا الكلاسيكية.

أما التطوير الثاني فقد تبع فكرة ده برولي عن موجات المادة. حاول شرودنجر أن يضع معادلةً موجية لموجات ده برولي الموقوفة حول النواة. ونجح في أوائل عام ١٩٢٦ في استنباط قيم الطاقة بالنسبة للحالات الموقوفة لذرة الأيدروجين في صورة "جنور كامنة" لمعادلة الموجة، وتمكن من تقديم وصفة أكثر عمومية لتحويل مجموعة معطاة من المعادلات الكلاسيكية للحركة، إلى معادلة موجية مناظرة في فضاء متعدد الأبعاد. ثم تمكن فيما بعد من اثبات أن صوريته لميكانيكا الموجة تعادل رياضيا الصورية القديمة لميكانيكا الكم.

أخيرا توصلنا إذن إلى صورية رياضية متماسكة يمكن تحديدها بأسلوبين متكافئين: بأن نبدأ إما بالعلاقات بين المصفوفات أو بالمعادلات الموجية. تعطي هذه الصورية القيم الصحيحة للطاقة بالنسبة لذرة الأيدروجين. ولم يمض إلا أقل من عام حتى اتضح أنها ناجحة أيضا مع ذرة الهليوم، وكذا مع المشاكل الأكثر تعقيدا للذرات الأثقل. لكن، بأي معنى تصف الصوريةُ الجديدةُ الذرة؟ إن مفارقات الثنائية بين الصورة الموجية والصورة الجسيمية لم تُحَل. لقد كانت مختبئة بطريقة ما في النظام الرياضي.

قام بوهر وكرامرز وسلاتر عام ١٩٢٤ بأولى الخطوات - وأكثرها تشويقا - نحو تفهم حقيقى لنظرية الكم. حاول هؤلاء حل التناقض البادى بين صورة الموجة وصورة الجسيم باستخدام مفهوم موجة الاحتمال. فُسرت الموجات الكهرومغنطيسية على أنها ليست موجات "حقيقية" وإنما هى موجات احتمال، موجات تحدد شدتُها فى كل نقطة، احتمالَ أن تمتص ذرةٌ (أو تَبْعث بالحث) فى هذه النقطة كَمٌ ضوء. وقد أدت هذه الفكرة إلى الاستنباط بأنْ ليس من اللازم أن يكون قانونا حفظ الطاقة وكمية الحركة صحيحين بالنسبة للحدث الفردى، وأنهما قانونان احصائيان فقط، وأنهما صحيحان فقط فى المتوسط الاحصائى. على أن هذا الاستنباط لم يكن صحيحا، وظلت العلاقات بين الصورة الموجية للإشعاع والصورة الجسيمية أكثر تعقيدا.

لكن البحث الذى نشره بوهر وكرامرز وسلاتر قد أوضح ملمحا جوهريا للتفسير الصحيح لنظرية الكم. كان مفهوم موجة الاحتمال هذا شيئا جديدا تماما فى الفيزياء النظرية منذ زمن نيوتن. فالاحتمال فى الرياضة أو فى الميكانيكا الإحصائية هو تعبير عن درجة معرفتنا بالوضع الواقعى. فعندما نلقى بنرد الطاولة، فإننا لانعرف التفاصيل الدقيقة لحركة أيدينا التى تحدد سقوطه. وعلى هذا نقول إن احتمال ظهور أىّ من أرقامه الستة هو السدس. أما موجة الاحتمال عند بوهر وكرامرز وسلاتر فتعنى أكثر من ذلك، إنها تعنى نزعة إلى شىء ما. كانت صيغةً كميةً للمفهوم القديم عما يمكن أن يحدث وإن لم يوجد بالفعل (أو يطلق عليه مفهوم "البوتنشيا") الذى نجده فى الفلسفة الأرسطية. لقد قدمت شيئا جديدا يقف فيما بين فكرة الحدث والحدث الواقعى، هو نوع من الواقع الفيزيقى يقع وسطا مابين الامكان والواقع.

وعندما تحدد الاطار الرياضى لنظرية الكم فيما بعد، تبنّى بورن فكرة موجة الاحتمال هذه، وقدم تعريفا واضحا للكمية الرياضية فى الصورية، التى كان لها أن تُترجم كموجة احتمال. لم تكن موجة ذات أبعاد ثلاثة مثل الموجات المرنة أو الموجات الراديوية وإنما هى موجة فى تَشَكُّل الفضاء عديد الأبعاد، ومن ثم فهى كمية رياضية مجردة.

لم يكن واضحا فى كل حالة، وحتى ذلك الوقت (صيف ١٩٢٦)، كيف يمكن للصورية الرياضية أن تُستخدم فى وصف حالة تجريبية معينة. إننا نعرف كيف نصف الحالات الموقوفة لذرة، لكنا لانعرف كيف نصف حدثا أبسط بكثير - مثلا: إلكترونا يتحرك خلال غرفة سحابية.

وعندما بيَّن شرودنجر فى ذلك الصيف أن صوريته لميكانيكا الموجة تعادل ميكانيكا الكم رياضيا، حاول لفترة أن يهجر تماما فكرة الكمات و "القفزات الكماتية"، وأن يستبدل بالالكترونات فى الذرة موجات المادة ثلاثية الأبعاد. أما ماألهمه القيام بهذه المحاولة فكانت نتائجه، إذ بدا منها أن مستويات الطاقة لذرة الأيدروجين فى نظريته هى ببساطة الترددات الكامنة لموجات المادة الموقوفة. وعلى هذا فقد تصور أنه من الخطأ أن نسميها بالطاقات، فهى ليست سوى ترددات. لكن المناقشات التى تمت فى خريف عام ١٩٢٦ بكوبنهاجن بين بوهر وشرود نجر، ومجموعة فيزيائيى كوبنهاجن قد أظهرت أن مثل هذا التفسير لايكفى حتى لتفسير صيغة بلانك للإشعاع الحرارى.

وخلال الأشهر التى أعقبت هذه المناقشات، أدت دراسةٌ مكثفة لكل القضايا المتعلقة بتفسير نظرية الكم، فى كوبنهاجن، أدت فى النهاية إلى توضيح للموقف كامل ومُرض كما يعتقد الكثير من الفيزيائيين.، لكنه لم يكن حلا يمكن تقبُّله بسهولة. أتذكر مناقشاتى مع بوهر لساعات طويلة استمرت حتى وقت متأخر من الليل، وانتهت إلى مايقرب من اليأس، وعندما انطلقتُ وحدى بعد نهاية النقاش أتمشى فى حديقة مجاورة، أخذتُ أعيد على نفسى المرة بعد المرة السؤالَ: أمِن الممكن أن تكون الطبيعة بمثل هذا السخف الذى تتبدى به فى هذه التجارب الذرية؟

ولقد حدث الاقتراب من الحل النهائى عن طريقين مختلفين. كان واحد منهما التفافا حول السؤال. فبدلا من أن نسأل "كيف يمكن للشخص أن يعبر فى النظام الرياضى المعروف عن وضع تجريبى معين؟ " وُضِع السؤال " أمِن المحتمل أن يكون صحيحا أنَّ مايظهر فى الطبيعة من الأوضاع التجريبية، هو فقط ما يمكن التعبير عنه بالصورية الرياضية؟ ". ولقد أدى الاقتراح بأن هذا بالفعل صحيح، أدى إلى تقييد فى استعمال تلك المفاهيم التى كانت أساس الفيزياء الكلاسيكية منذ نيوتن. يمكننا أن نتحدث عن موقع إلكترون وعن سرعته كما فى الميكانيكا النيوتونية، كما نستطيع أن نلحظها ونقيسها، لكننا لانستطيع أن نحدد كليهما فى نفس الوقت بدقة على نحو حاسم. لكن اتضح أن حاصل ضرب اللادقة للمقدارين ليس سوى ثابت بلانك مقسوما على كتلة الجسيم. من الممكن صياغة علاقات مشابهة بالنسبة لأوضاع تجريبية أخرى. وتسمى هذه عادة علاقات لامحققية أو مبدأ اللاحتمية. لقد تعلمنا أن المفاهيم القديمة تلائم الطبيعة لكن بشكل غير دقيق.

أما الطريق الآخر فكان مفهوم التتام لبوهر. وَصَفَ شرودنجر الذرة نظاما لايتكون من نواة وإلكترونات، وإنما من نواة وموجات مادة. وصورة موجات المادة هذه تحمل بالتأكيد عنصرا من الحقيقة. اعتبر بوهر الصورتين ـ الجسيمية والموجية ـ وصفين متتامين لنفس الواقع. لايحمل أى من هذين الوصفين إلا جزءا من الحقيقة. لابد أن يكون ثمة حدود لاستخدام مفهوم الجسيم، كَمَا لاستخدام مفهوم الموجة، وإلا لما استطاع المرء تجنب التناقضات. فإذا وضعنا هذه الحدود فى الاعتبار (وهى حدود يمكن التعبير عنها بالعلاقات اللامحققية) اختفت التناقضات.

بهذه الطريقة أصبح لدينا منذ ربيع عام ١٩٢٧ تفسير متماسك لنظرية الكم يطلَق عليه عادة اسم "تفسير كوبنهاجن". عُرِض هذا التفسير للاختبار الحاسم فى خريف عام ١٩٢٧ بمؤتمر سولفاى فى بروكسل. أعيدت مناقشة التجارب التى كانت تؤدى دائما إلى أسوأ التناقضات، اعيدت بكل تفاصيلها مرارا وتكرارا، لاسيما بواسطة آينشتين. وابتكرت تجارب مثالية جديدة لاكتشاف أى تناقض ذاتى محتمل للنظرية. لكن اتضح أن النظرية متماسكة وأنها توافق التجارب فى حدود مانرى.

ستكون تفاصيل تفسير كوبنهاجن هو موضوع الفصل التالى. لكن علينا أن نؤكد هنا أن الأمر قد تطلَّب أكثر من ربع قرن منذ ظهرت الفكرة الأولى لوجود كم الطاقة حتى توصلنا إلى التفهم الحقيقى لقوانين الكم النظرية. وهذا يشير إلى التغير الكبير الذى كان لابد أن يحدث فى المفاهيم الأساسية المتعلقة بالواقع قبل أن يتمكن المرء من تفهم الوضع الجديد.