مقدمة بقلم
بول داڤيز (١٩٨٩)

ليست الثورات الحقيقية فى العلم مجرد اكتشافات مذهلة وتقدمات سريعة فى التفهم. إنها أيضا تُغير المفاهيم التى عليها يبنى الموضوع، ولقد حدث مثل هذا التحول الجذرى فى علم الفيزياء خلال السنين الثلاثين الأولى من هذا القرن، وبلغ أوجه فيما سُمّى "العصر الذهبى للفيزياء"، وكانت نتيجته أن تغيرت نظرة الفيزيائى للعالم تغيراً جذريا لايُعكَس.

تضمنت التطوراتُ التى أحدثت هذا الاضطراب الهائل صياغةَ نظريتين جديدتين تماما. كانت الأولى نظريةً عن الفضاء والزمن والحركة، اسمها النسبيه. أما الثانيه فكانت نظرية تختص بطبيعة المادة وطبيعة القوى التى تعمل عليها. ولقد نشأت هذه الأخيرة عن ملاحظة لماكس بلانك وجد فيها أن الاشعاع الكهرومغنطيسى ينبعث فى دفقات متميزة، أو كَمّات. طُورت "نظرية الكم هذه فى العشرينات إلى نظرية عامة هى "ميكانيكا الكم". ولقد لعب مؤلف هذا الكتاب دورا قائدا فى الصياغة الأولى لميكانيكا الكم، ثم فيما تلاها من تعريف بتضميناتها الثوريه. وكلُّ مَنْ درس شيئا عن ميكانيكا الكم يعرف مبدأ اللاحتمية أو مبدأ هايزنبرج ـ فهذا عنصر رئيسى فى فيزيقا الكم.

وبالرغم من أن الكثير قد كُتب مؤخرا عن الأسس العجيبة لمفاهيم ميكانيكا الكم، فإن علينا أن نولى اهتماما خاصا لتأملات هايزنبرج، أحد كبار مهندسى هذه النظرية. لقد ظل هايزنبرج ـ وحتى وفاته عام ١٩٧٦ ـ على اهتمامه العميق بعالم الكم، وبالتضمينات الفلسفية الهائله التى تنثال منه. والشرح الذى سيلى هو استعراض شامل لهذه الآراء، ومعه تقييم لنظرية النسبية ولبعض مناحى الفيزياء الذرية والجسيمية. إنه نموذج للوضوح. وهو واحد من أوضح التقارير عما يسمى "تفسير كوبنهاجن" لميكانيكا الكم الذى أصبح وجهة النظر القياسية.

إن المبحث المحورى لعرض هايزنبرج - الذى بُنى على محضرات جيلفورد التى ألقاها فى العام الدراسى ٥٥ - ١٩٥٦ بجامعة سانت أندروز - هو أن الكلمات والمفاهيم المألوفة فى الاستعمال اليومى قد تفقد معناها فى عالم النسبية وفيزياء الكم. فقد يصبح من المتعذر مثلا أن نجد إجابة ذات معنى لأسئلة تطرح عن الفضاء والزمن أو عن خصائص الأشياء الماديه، كمثل مواقعها، بالرغم من أنها أسئلة تبدو معقولة تماما فى أحاديثنا اليوميه. وهذا بدوره له تضميناته العميقة بالنسبة لطبيعة الواقع وبالنسبة لنظرتنا الكلية للعالم.

إن التكيف مع جيشان المفاهيم الذى تتطلبه النظرية النسبية لهو أسهل فى نواحى كثيرة مما تتطلبه ميكانيكا الكم. من الصحيح أن النسبية تتضمن بعض الأفكار الغريبة كمثل تمدد الزمن وتقلصه وانحناء الفضاء والثقوب السوداء، وصحيح أيضا أنها تؤكد أنْ ليس ثمة إجابات صريحة واضحة لأنماط معينة من الأسئلة تبدو معقولة تماما وذات معنى. فلقد نسأل مثلا عن الوقت الذى يقع فيه حدث، أو عما إذا كان حدثان فى مكانين مختلفين قد وقعا فى نفس اللحظه، لكن مثل هذه الأسئلة فى صورتها هذه قد تكون مما لايمكن الاجابة عليه، لأن النظرية تخبرنا أنْ ليس ثمة زمن كونى مطلق، كما ليس ثمة مفهوم كونى للتزامن. فمثل هذه الأشياء أشياء "نسبية"، ولابد أن تُنسب إلى إطار مرجعى محدد قبل أن يصبح للسؤال معنى. لكن هذه الأفكار، بالرغم من كونها غريبة غير مألوفة، فإنها لا تنافى العقل على نحوٍ بَيّن، لا ولا هى تثير أية مشاكل فى التفهم حقيقية. ولهذا السبب يلزم أن تُعتبر النظريةُ النسبية، فى صورتيها الخاصة والعامة، نظريةً لا خلافية.

ربما كانت أعقد المشاكل الفلسفية التى أبرزتها نظرية النسبية هى إمكانية أن يكون الكون قد نشأ فى لحظة محددة فى الماضى، عندما بزغت المادة والطاقة فجأة فى الوجود ومعهما الفضاء والزمن. والحق أن الدرس الرئيسى لنظرية النسبية هو أن الفضاء والزمان لا يشكلان فقط المساحة التى عليها تُمَثَّل الدراما الكونية، ولكنهما أيضا جزء من صميم العرض - نعنى أن الزمان هو جزء من العالم الفيزيقى تماما مثل المادة. بل الحق أنهما متناسجان فى حميمية. ولقد ذكر هايزنبرج أن القديس أوغسطين فى القرن الخامس قد سبقنا إلى فكرة أن الزمن لايمتد إلى الوراء حتى الأبد، وإنما هو قد خُلق مع الكون. هناك إذن نظير علمى للتعاليم المسيحية عن الخلق من العدم. لكن ماحدث من تحريف لمفهومنا عن السببية الفيزيقية

تحريف ضخم. ولقد ابتدأ، مؤخراً فقط، ظهور صورة مُرْضية عن أصل الزمكان من داخل سياق كوزمولوجيا الكم (وهذا علم تطور بعد وفاة هايزنبرج).

وميكانيكا الكم، على عكس نظرية النسبيه، تعرض لنا مشاكل فى المفاهيم والفلسفه أكبر بكثير. وعن هذه المشاكل بالتحديد يحدثنا هايزنبرج فى وضوح بالغ. ويلزم أن أؤكد من البداية أن معظم الطلبة يدرسون ميكانيكا الكم كمقَرّر، وليس أبدا ثمة ما يلزمهم بأن يتورطوا فى قضاياها الفلسفيه. والتطبيق العملى لميكانيكا الكم ناجح لحد بعيد، ولقد تغلغل فى ميادين عديدة من العلم والتكنولوجيا المعاصرة. ليس ثمة من يجادل فيما تتنبأ به النظرية، وإنما فقط فيما تعنيه.

فى قلب ثورة الكم يقع مبدأ هايزنبرج للأحتمية. وهذا المبدأ يقول - بشكل عريض - إن كل المقادير الفيزيقية التى يمكن ملاحظتها تخضع لتقلبات لايمكن التنبؤ بها، تجعل قيمها غير محددة تماما. خذ على سبيل المثال موقعَ (س) وكميةَ حركةِ (ح) جسيمٍ كَمّاتىّ مثل الإلكترون. للباحث أن يقيس أيا من هاتين القيمتين لأى درجة من الدقة يراها. لكن من المستحيل أن تكون لهما سويا قيم دقيقة فى نفس الوقت. ثمة لاحتمية أو انتشار فى قيمتيهما (Δ س، Δ ح على التوالى) بحيث أن حاصل الضرب Δ س × Δ ح لايمكن أن يقل عن رقم ثابت معين. ومن ثم فإن زيادة الدقة فى تعيين الموقع لابد أن تكون على حساب انخفاض الدقة فى تعيين السرعة، والعكس بالعكس. وهذا الثابت (ويسمى ثابت بلانك، عن اسم ماكس بلانك) رقم غاية فى الصغر، بحيث لاتصبح للآثار الكماتية أية أهمية عموما إلا فى المجال الذرى. ونحن لانلاحظها فى حياتنا اليومية.

من المهم هنا أن نعرف تماما أن هذه اللاحتمية تكمن فى صلب الطبيعة، وأنها ليست مجرد نتيجة لقصور فى تكنولوجيا القياس. ليس الأمر مجرد اهمال من المجرب فى أن يقيس الموقع وكمية الحركة فى نفس الوقت. إن الجسيم ببساطة لايمتلك قيمتين دقيقتين متزامنتين لهتين الخصيصتين. لقد تعودنا على اللاحتمية فى الكثير من العمليات المادية - فى البورصة مثلا أو فى الديناميكا الحرارية - لكن اللاحتمية فى هذه المجالات ترجع إلى قصور فى البيانات المتاحة وليس إلى عجز أساسى فى ماقد يعرف عن هذه النظم.

للأحتمية تضمينات عميقة. إنها تعنى مثلا أن الجسيم الكماتى لايتحرك عبر الفضاء فى

مسار واضح التحديد. فلقد يترك الالكترون الموقع أ ليصل إلى الموقع ب، لكن ليس فى الامكان أن نعين مسارا محددا يربط مابين الموقعين. وعلى هذا فإن النموذج المعروف للذرة، وبه الإلكترونات تدور حول النواة على طول مدارات مميزة هو نموذج مضلّل إلى حد بعيد. يخبرنا هايزنبرج أن مثل هذا النموذج قد يكون مفيدا فى تكوين صورة معينة بالذهن، ولكنها صورة لايربطها بالواقع غير رباطٍ واهٍ.

يؤدى تشابك الموقع وكمية الحركة إلى لاحتمية متأصلة فى سلوك النظم الكماتية، حتى لتصبح أكمل البيانات عن نظام ما (الذى قد يكون مجرد جسيم مفرد حر الحركة) غيرَ كافية على العموم للتمكن من تنبؤ محدد عن سلوكه، فلقد يمضى نظامان متطابقان عند البدء، ليفعلا شيئين مختلفين تماما. وعلى سبيل المثال فقد يطلق المجرب إلكترونا نحو هدف ليجد أنه يستطير إلى اليسار، فإذا ماكرر التجربة تحت نفس الظروف فقد يستطير الإلكترون التالى إلى اليمين.

على أن عدم إمكانية التنبؤ فى النظم الكماتية لايعنى الفوضى. فمازالت ميكانيكا الكم تمكننا من أن نحدد بدقة "الاحتمالات" النسبية للبدائل. ميكانيكا الكم إذن نظرية احصائية، فى مقدورها أن تعطى تنبؤات لالبس فيها بالنسبة لمجموعات من النظم المتطابقة، ولكنها لاتقدم عموما شيئا محددا عن نظام مفرد. أما ماتختلف فيه عن غيرها من النظريات الإحصائية (مثل الميكانيكا الاحصائية أو التنبؤ بالجو أو علم الاقتصاد) فهو أن عامل الصدفة متأصل فى طبيعة النظام الكماتى، ولايفرضه فقط قصور إدراكنا لكل المتغيرات التى تؤثر فى النظام.

ليس هذا مجرد مماحكة متحذلقة. خذ آينشتين مثلا، لقد راعته فكرة اللاتنبؤية المتأصلة فى العالم الفيزيقى ليرفضها فى غير تحفظ بقولته الشهيرة "إن الإله لايلعب النرد مع الكون". كان يرى أن ميكانيكا الكم قد تكون صحيحة فى حدودها، لكنها بالرغم من ذلك ناقصة ولابد من وجود ثمة مستوى أعمق من متغيرات دينامية مخبوءة تؤثر فى النظام وتضفى عليه لاحتمية ولاتنبوءية، فى الظاهر لاأكثر. لقد أمل آينشتين أن توجد تحت فوضى الكم صيغة غاية فى الدقة من عالم مألوف حسن السلوك من الديناميكا الحتمانية.

عارض هايزنبرج ونيلز بوهر، وبقوة، محاولة آينشتين للتشبث بهذه النظرة الكلاسيكيه للعالم. امتد الجدل الذى بدأ فى أوائل ثلاثينات هذا القرن لسنين طويلة، كان آينشتين أثناءها

يهذب من اعتراضاته ويعيد صياغتها. كان أكثر هذه الاعتراضات ثباتا هو مااقترحه مع بوريس بودولكسى وناثان روزين عام ١٩٣٥، وهو مايطلق عليه عادة اسم "مفارقة" آب ر " (والواقع أنه ليس ثمة مفارقه حقيقية). تتعلق هذه المفارقة بخصائص نظام من جسيمين يتفاعلان ثم يفترقان وينطلقان بعيدا عن بعضهما مسافة طويلة. تقول ميكانيكا الكم إن النظام يبقى كُلاً لا يتجزأ بالرغم من انفصال الجسيمين فى الفضاء، والمتوقع أن تبين القياسات المتزامنة التى تُجرى على الجسيمين تلازمات تدل على أن كل جسيم يحمل (بمعنى يمكن تحديده تحديدا رياضيا جيدا) أثراً لنشاطات الآخر. يحدث هذا التعاضد بالرغم من قيود نظرية النسبية الخاصة لأينشتين نفسه والتى ترفض أى اتصال فورى مادى بين الجسيمين.

كان أينشتين يرى أن نظام الجسيمين يوضح القصور فى ميكانيكا الكم، ذلك أن المجرب عندما يجرى القياسات على الجسيم الثانى وحده (وهو مايعنى فى الواقع استخدام هذا الجسيم بالإنابة كوسيلة للحصول على بيانات عن الجسيم الأول) فقد يستنبط حسب هواه موقع الجسيم الأول فى تلك اللحظة أو كمية حركته. يقول أينشتين إن هذا بالتأكيد يعنى ضرورة إضفاء قدر من الواقع فى تلك اللحظة على الجسيمين كليهما، لأن الباحث يستطيع أن يدنو من أى منهما (لا كلاهما!) مستخدما نظام قياس لايُمكن أن يقلق الجسيم موضع الاهتمام (بسبب قيد سرعة الضوء).

تمضى مفارقة آب ر إلى قلب الصورتين المختلفتين للعالم اللتين تفرضهما علينا الفيزياء الكلاسيكية وفيزياء الكم. فأما صورة العالم الكلاسيكى التى يعتنقها أينشتين فى حماس فهى صورة تنسجم جيدا مع العقل العام بتأكيدها الواقع الموضوعى للعالم ا لخارجى. هى تسلّم بأن ملاحظاتنا بالضرورة تقتحم ذلك العالم وتقلقه، لكن هذا الاقلاق ليس سوى اتفاق عَرَضى يمكن التحكم فيه وتقليله. ثم أن هذه النظرة تعتبر العالم الصغير مختلفا فى المدى، لافى مرتبة الوجود، عن عالم الشهادة الكبير. فالإلكترون صورة مصغرة من كرة بلياردو عادية، ويشترك مع هذه الأخيرة فى مجموعة كاملة من الخصائص الدينامية، مثل صفة الوجود فى مكان ما (نعنى أن لها موقعا) والحركة فى مسار معين (نعنى أن لها كمية حركة). فملاحظاتنا فى العالم الكلاسيكى لاتخلق الواقع وإنما تكشفه. وعلى هذا تظل الذرات والجسيمات موجودة تحمل صفات محددة تماما حتى لو لم نكن نلحظها.

فى مقابل ذلك نجد أن تفسير كوبنهاجن لميكانيكا الكم ـ الذى يناصره هايزنبرج بوضوح

تام فى هذا الكتاب - يرفض الواقع الموضوعى لعالم الكم الصغير. إنه يرفض مثلا أن يكون للإلكترون موقع محدد تماما وكمية حركة محددة تماما فى غياب ملاحظة فعلية لموقعه أو لحركته (ولا يمكن أن يكون لكليهما سويا فى نفس الوقت قيم قاطعة). وعلى هذا فلايمكن أن نعتبر الإلكترون أو الذرة شيئا صغيرا بالمعنى الذى تكون فيه كرة البلياردو شيئا. إن كلامنا يكون بلا معنى إذا نحن تحدثنا عما يفعله إلكترون بين ملاحظتين، لأن الملاحظة وحدها هى التى تخلق واقع الإلكترون. وعلى هذا فإن قياس موقع إلكترون ما يخلق "إلكترونا - له - موقع"، وقياس كمية حركته يخلق "إلكترونا - ذا - حركة" لكنا لانستطيع أن نعتبر هذا الكيان أو ذاك موجودا بالفعل قبل أن نجرى القياس.

ماهو الإلكترون إذن من وجهة النظر هذه؟ هو ليس شيئا ماديا بقدر ماهوتشفير تجريدى لمجموعة من الإمكانات أو النتائج المحتملة للقياسات. هو طريقة مختزلة للإشارة إلى وسيلة لربط ملاحظات مختلفة عن طريق الصورية الميكانيكية للكم. لكن الواقع يكمن فى الملاحظات، لافى الإلكترون.

أما إنكار الواقع الموضوعى للعالم الخارجى المضمر فى تفسير كوبنهاجن، فكثيرا مايصاغ فى عبارات أكثر حذرا. لكن هايزنبرج فى هذا الكتاب يقدم لنا بعضا من أصرح مارأيت من تأكيدات لهذا الموقف. هو يقول: "فى التجارب التى تجرى على الوقائع الذرية علينا أن نتعامل مع الأشياء والحقائق، مع ظواهر لها نفس واقعية الحياة اليومية. لكن الذرات أو الجسيمات الأولية ذاتها ليست واقعية مثلها، إنها تشكل عالما من الإمكانات أو الاحتمالات لا عالما من الأشياء والحقائق". تُوسَم آراء أينشتين بأنها "واقعية دوجماطية" وهى تمثل موقفا طبيعيا جدا فى رأى هايزنبرج. والحق أن الغالبية العظمى من العلماء يدينون به. هم يعتقدون أن أبحاثهم تشير فعلا إلى شىء واقعى "يوجد هناك" فى العالم المادى، وأن الكون المادى الشرعى ليس مجرد ابتكار من خيال العماء. إن النجاح غير المتوقع للقوانين الرياضية البسيطة فى الفيزياء يدعم الاعتقاد بأن العالم إنما يطرق واقعا خارجيا موجودا بالفعل. لكن هايزنبرج ينبهنا إلى أن ميكانيكا الكم قد بنيت أيضا على قوانين رياضية بسيطة ناجحة تماما فى تفسير العالم المادى، غير أنها لا تتطلب أن يكون لهذا العالم وجود مستقل، بالمعنى الذى تقول به "الواقعية الدوجماطية". وعلى هذا فإن العلم الطبيعى ممكن بالفعل دون أساس من الواقعية الدوجماطية.

هنا نصل إلى الموضوع الذى يشكل ذروة قضية هايزنبرج. تساءل: كيف يمكن التحدث عن الذرات وما أشبه إذا ماكان وجودها مبهما؟ أى معنى ننسبه للكلمات التى تشير إلى خصائصها؟ إنه يؤكد المرة بعد المرة أن كل الحقائق التى نبنى عليها عالم الخبرة تشير إلى أشياء عيانية ترى بالعين ـ دقات عداد جايجر، بقع على لوحة فوتوغرافية، وهلم جرا. وكل هذه أشياء نستطيع أن نربطها ببعضها بعضا بشكل معقول بكلام عادى بسيط (إذا استعرنا تعبير بوهر). ولايمكننا أن ندرك عالم الكم الصغير دون هذه الستارة الخلفية "للأشياء" الكلاسيكية المعقولة المألوفة (وواقعها على مايبدو أمر أكيد)، لأن كل قياساتنا وملاحظاتنا للعالم الدقيق تؤخذ عن طريق الأجهزة الكلاسيكية وتتضمن رصد سجلات دقيقة، كمثل موقع المؤشر على جهاز القياس، وهى سجلات لايختلف عليها اثنان ولايكتنفها أى ابهام أو غموض تصورى.

دعم هايزنبرج حجته بالاستناد إلى مبدأ بوهر المسمى "مبدأ التتام". هذا المبدأ يسلم بالغموض الأساسى المتأصل فى النظم الكماتية: أن يفصح النظام الواحد عن خصائص تبدو متناقضة. فالإلكترون على سبيل المثال قد يسلك سلوك موجة وقد يسلك سلوك جسيم. ويؤكد بوهر أن هاتين الخصيصتين هما وجهان للواقع متتامان، لامتناقضان. فلقد تفصح تجربة عن الطبيعة الموجبة للإلكترون بينما تفصح أخرى عن الطبيعة الجسيمية. ولايمكن للإلكترون أن يفصح عن الخصيصتين فى آن معا، والأمر يرجع للمجرب فى أن يقرر الوجه الذى يكشفه عندما يختار تجربته. وموقع الإلكترون وكمية حركته هما كذلك صفتان متتامتان. وعلى المجرب أن يقرر أية خصيصة سيرصد.

أما سؤالنا "هل الإلكترون موجة أم هو جسيم؟" فلايشبه إلا السؤال "هل تقع استراليا فوق بريطانيا أم تحتها؟". والإجابة: "كلاهما، ولاأيهما". للإلكترون كلا الوجهين، ويمكن لأيهما أن يتجلى، ولكن ليس لأيهما أى معنى فى غياب سياق تجريبى محدد. وبذا فإن ميكانيكا الكم تستخدم كلمات مألوفة (كمثل الموجة أو الجسيم أو الموقع) لكن معانيها فى غاية التعقيد وعادة ماتكون غامضة. يحذرنا هايزنبرج "إذا ماقادنا الاستعمال الغامض غير المنهجى للُّغة إلى مشاكل، فعلى الفيزيائى أن يتحول إلى البرنامج الرياضى وعلاقاته الواضحة مع الحقائق التجريبية".

وهذا فى الحق هو الخط الأساسى للحجة، لأن ميكانيكا الكم فى صميمها ـ برنامج رياضى يربط نتائج الملاحظات بطريقة احصائية. وهذا هو كل شىء. وكل حديث عما يجرى

"فعلا" ليس إلا محاولة كي نكسب في عالم الكم عينيةً غير شرعية تيسر التخيل. تفحّص هايزنبرج في هذا الخصوص أعمال ديكارت وكانط في ضوء الفيزيقا الحديثة، وتوصل إلى أن الكلمات والمفاهيم المرتبطة بها، ليس لها معان مطلقة محددة تماما. إنها تنشأ من خلال تجاربنا في العالم، ثم أننا لانعرف مسبقا مجال تطبيقاتها. إننا لانتوقع أن نكشف أية حقيقة جوهرية عن العالم عن طريق المعالجة المجردة للكلمات والمفاهيم. أما حقيقة أننا لانستطيع ببساطة أن ننقل إلى ميدان النسبية أو الكم كلماتٍ ومفاهيمَ معينة دارجة فلم تكن عند هايزنبرج أمرا يثير الاعتراض من الناحية الفلسفية.

وبالرغم من أن معظم الجدل الكماتي قد جرى على المستوى الفلسفي إلا أن ثمة عددا قد أجرى من التجارب الحاسمة ذات العلاقة المباشرة بالموضوع. وربما كان أهمها تلك التي اختصت بدفع التجربة التي تخيلها آب ر إلى حقل الفيزياء العملية في عام ١٩٦٥. وسّع جون بيل مناظرة آب ر، وأثبت بشكل عام أن أية نظرية ترتكز على "الواقع الموضوعي "وتُحرِّم فيها أيةُ إشارات أسرع من الضوء، لابد أن ترضى لاتساويات رياضية معينة، وأن تقصُر ميكانيكا الكم بالضرورة (تبعا للنظرية القياسية) عن إرضائها، ومن ثم نضطر إما إلى أن نتخلى عن الواقع الموضوعي (مع بوهر وهايزنبرج) أو أن نتخلى عن نظرية النسبية الخاصة. وليس بين الفيزيائيين غير القليل ممن يفضلون السبيل الأخير. ولاختبار لاتساويات بيل، قام آلين آسبكت وزملاؤه بمعهد البصريات قرب باريس بتجارب في أوائل الثمانينات مستخدمين أزواجا من الفوتونات من مصدر ذري شائع. وبعد العديد من المحاولات الدقيقة ظهرت النتائج واضحة جلية. لقد نُقضت لاتساويات بيل حقا وفقا لتنبؤات ميكانيكا الكم.

ظهرت هذه النتائج بعد وفاة هايزنبرج، غير أن الفرصة قد أتيحت لي كي أناقشها مع الكثيرين من زملائه القدامى، الذين ساهموا، ومعهم بوهر، في تشكيل تفسير كوبنهاجن في ثلاثينات هذا القرن. كانوا جميعا متحفظين بالنسبة لتجربة آسبكت التي عضدت في جمالٍ موقفهم، وقالوا إن النتائج لايمكن لها أن تكون غير ماكانت، وأنها لم تكن مفاجأة.

وبالرغم من ذلك فإن تفسير كوبنهاجن ليس خاليا من النقائض، فما يزال الكثيرون من الفيزيائيين يشعرون بالضيق بالنسبة للنظرية، التي يلزم قبل تطبيقها من توسيع الصورية بفروض إبستمولوجية (معرفية) معينة. أما حقيقة أن تفسير كوبنهاجن يرتكز على قبول الوجود المسبق للعالم الكلاسيكي الكبير، فإنها تبدو حقيقة دائرية ومتناقضة، لأن العالم الكبير

يتألف من عالم الكم الصغير. وبالرغم من أن الآثار الكماتية ضئيلة للغاية على مؤشرات الأجهزة وعلى الأسطح الفوتوغرافية، إلا أنها موجودة بالفعل من ناحية المبدأ. يأمل الفيزيائيين أن يستنبطوا العالم الكلاسيكى حداً أعلى لعالم الكم، لا أن يفترضوه مسبقا.

يظهر ضعف تفسير كوبنهاجن عندما نطرح السؤال: "ماالذى يحدث فعلا داخل جزء من جهاز القياس عند قياس جسيم كَمّاتي؟" إن افتراض كوبنهاجن يقول إننا نعامل الجهاز معاملة كلاسيكية، أما إذا عاملناه (بشكل أكثر واقعية) كمجموعةٍ (إن تكن كبيرة) من جسيمات كماتية، فستكون النتيجة مزعجة للغاية. إن نفس مايكتنف الجسيم من الغموض واللاحتمية سيجتاح الآن النظام بأكمله، وبدلا من أن يقوم الجهاز بإفراد حقيقة واقعة معينة من بين مجال من الاحتمالات الممكنة ويجعلها مما يُدْرَك بالحواس، فإن النظام المركب من (الجهاز زائدا الجسيم) سيتخذ وضعا يمثل لايزال مجالا من الاحتمالات الممكنة. لنأخذ مثالا محددا. إذا ماأُعد الجهاز ليقيس ما إذا كان إلكترونٌ ما موجودا بالنصف الأيمن أو بالنصف الأيسر من صندوق، وإذا ماكان الجهاز سيفصح عن النتيجة بأن ينحرف المؤشر إلى اليمين أو إلى اليسار حسب الحالة، فإن النتيجة النهائية لهذا الاجراء هى أن يتخذ النظام المركب وضعا لايمكن فيه اختيار أى من النتيجتين، إنما سيكون الوضع هو تراكبا من حالين، واحد يتألف من الإلكترون والمؤشر إلى اليمين، والآخر يتألف منهما إلى اليسار. وطالما كان هذان البديلان متنافيين فقد لاتكون ثمة مشكلة لاتُذلَّل، لكن قد يكون هناك أيضا فى التجارب الأكثر عمومية تداخل بين البديلين بحيث لاتتبدى ثنائية هذا/ أوذاك. باختصار، لن يمكن القول بأن ثمة قياسا فعليا قد تم.

لم يول هايزنبرج إلا أقل اهتمام للعمل الضخم عن "مشكلة القياس" الذى قام به جون فون نويمان وغيره. استند إلى أن الآثار الكماتية (وبالذات تداخل الحتمالات) تتشتت إن آجلا وإن عاجلا في محيط العالم الكبير. سيقتنع معظم الناس بهذا، إلا جماعة جديدة من الفيزيائيين يعرفون باسم "كوزمولوجيى الكم". يحاول هؤلاء المُنَظّرون تطبيق ميكانيكا الكم على الكون ككل لكشف سر منشئه. فإذا ما اعتبرنا الكون بأكمله هو نظام الكم المعنى، فلن يكون بالطبع ثمة محيط لعالم كبير أوسع، أو جهاز قياس خارجى، يمكن لتشوش الكم أن يتلاشى فيه. يرفض معظم كوزمولوجيى الكم تفسير كوبنهاجن بما يتطلبه من آلية إبستمولوجية إضافية. ويفضلون بديلا عنه أن يأخذوا الصورية الكماتية بقيمتها الظاهرية. وهذا يعنى ببساطة قبولهم المدى الكامل للبدائل الكماتية واقعا موجوداً فعلا. نعنى أنهم يقطعون فى

تجربة القياس آنفة الذكر بوجود عالمين، واحد بالإلكترون والموشر إلى اليسار، وآخر بهما إلى اليمين. يتضمن قياسُ الكم عموما التسليمَ بعدد لا نهائى من العوالم الموازية تتصاحب فى الوجود. ومرة أخرى سنجد أن الكثير من هذه التطورات لم يحدث إلا بعد وفاة هايزنبرج، وإن كنت أعتقد أنه لم يكن ليوليها كثيرا من اهتمامه.

يعالج هذا الكتاب موضوعات أخرى، لعل أجدرها بالذكر هو بعض التقدمات المبكرة فى الفيزياء الذرية والجسيمية. لايشير هايزنبرج كثيرا إلى محاولاته الشخصية فى توحيد الفيزياء الجسيمية، لكنه يلفت النظر إلى البعض من أعسر الصعوبات التى نقابلها فى تطبيق ميكانيكا الكم على الجسيمات النسبوية. مرة أخرى سنجد الحوادث تتجاوز الكتاب. إن التشعبات المفزعة، أو اللانهايات، التى ذكرها قد غدت اليوم وقد وُفّقت روتينيا فى معظم التطبيقات، دون ما إفساد لقدرة النظرية على التنبؤ. بل لقد أصبح من الممكن جدا تجنبها تماما فى بعض نظريات التوحيد الحديثة، لاسيما فيما يسمى بنظرية الخيط الفائق. كما أن نظريتنا عن الجسيمات الأولية قد أصبحت اليوم أفضل بكثير مما كانت عليه عندما وُضع هذا الكتاب. ولربما حظيت نظرية الكواركات واللّبتونات الحديثة بموافقة هايزنبرج لو أنها ظهرت فى حياته. أما مناقشته للإله والأخلاقيات فهى سطحية نوعا، وأعتقد أنها وضعت أساسا لمقابلة متطلبات محاضرات جيلفورد.

ولكن هذه ليست سوى اعتراضات ثانوية على كتاب يعرض على نحو مُرْض جوهر ثورة الإدراك الذهنى التى تسمى الفيزياء الحديثة. ولقد أنجز هايزنبرج هذا بلارياضيات وبأقل قدر من التفاصيل التقنية. لايلزم بالتأكيد أن تكون فيزيائيا كى تتابع حججه وتقدر الطبيعة الخطيرة لتحول الفكر الذى أعقب ثورتى النسبية والكم، أما ذلك السحر الذى لاينضب لهذا الكتاب فإنما يرجع إلى أنه يحمل القارىء، فى وضوح رائع، من عالم الفيزياء الذرية الخفى، إلى عالم الناس واللغة وإدراك واقعنا المشترك.