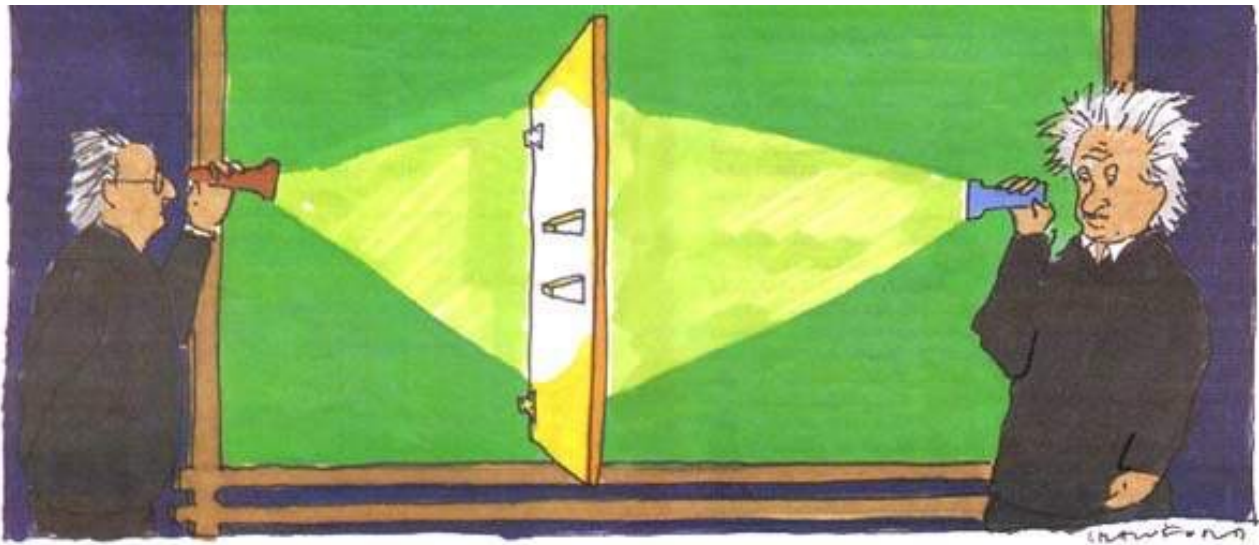


## المتنوية في المادة والضوء

في الميكانيك الكمومي يمكن للأشياء الصغيرة أن تسلك سلوك الأمواج أو سلوك الجسيمات. وتبين الدراسات الحديثة أن سمات التنامية أكثر أساسية مما كان يُعتقد.  
<G-B>. إنكترت<. <O.M>. سكولي<. <H>. ولثر<

يعج العالم المكروي (الصغري) microcosmos الذي يسود فيه الميكانيك الكمومي، بالظواهر التي تتحدى الحدس العادي. وتنتج كثير من هذه الظواهر من مبدأ التنامية complementarity principle الذي يتخذ في معظم الأحيان مظهر المتنوية: موجة/جسيم؛ إذ يمكن أن يظهر سلوك جسم مجهري كالفوتون أو الذرة أو الإلكترون، مشابها لسلوك موجة مائية أحيانا أو لسلوك جسيم أحيانا أخرى، حيث يتم المظهران أحدهما الآخر في الوصف الكامل للجسم. وبما أن فكرة التنامية قد طرحت للمرة الأولى منذ نحو سبعين عاما فقد كان الاعتقاد الشائع بين كثير من الفيزيائيين أن التنامية ناتجة من علاقة ارتياب uncertainty relation. ووفقا لهذه القاعدة لا يمكن قياس متحولين متتامين - مثل الموضع والاندفاع (كمية الحركة) - في الآن ذاته وبدقة أكبر من حد أساسي، أي إن علاقة الارتياب تمنعنا من معرفة كل شيء عن سلوك جسم كمومي. وبالنتيجة لا يمكننا رؤية المظهرين، الموجي والجسمي، معا في عملية رصد واحدة.

لقد عملنا مع زملائنا حديثا في تبيان أن الارتياب ليس المصدر الوحيد للتنامية. كما صممنا وحللنا تجارب حقيقية وذهنية (عقلية) تتجنب - فعلا - علاقة الارتياب، أي "يحتال" على الأجسام الكمومية المدروسة. وبالرغم من ذلك دلت التجارب دائما على أن الطبيعة تحمي نفسها من هذا الاقتحام، أي إن التنامية تظل قائمة حتى عندما لا تقوم علاقة الارتياب بأي دور. وقد استنتجنا من ذلك أن التنامية أكثر عمقا مما كان يُعتقد: أي إنها، في الميكانيك الكمومي، أكثر شمولية وأساسية من قاعدة الارتياب.



يحلل نيلز بور مع ألبرت آينشتاين تجربة الشقين.

يتجلى كل من السلوكين، الموجي والجسيمي، على حدة عند الاختبار. يظهر السلوك الموجي في أنماط التداخل؛ فإذا ألقينا حجرين في اللحظة نفسها على سطح بحيرة مستقرة نرى كيف تتداخل الأمواج الدائرية بعضها مع بعض فتتعرز بالتضايف حيث تتلاقى قمم الأمواج، كما تُحمد إحداها الأخرى حيث تتلاقى قمة موجة مع حضيض موجة أخرى. ويظهر المفعول نفسه عندما نسلط ضوءاً على شقين (سيعملان عمل الحجرين). تنتقل موجة الضوء عبر الشقين بحيث تنشأ موجات (أمواج أصغر) عن كل شق. وتتداخل هذه الموجات بعضها مع بعض لتعطي سلسلة من الأهداب المضيئة والمظلمة (نمط تداخل) عند عرضها على شاشة [انظر الشكل العلوي في الصفحتين 74 و 75]. أما السلوك الجسيمي للضوء فيظهر من خلال الفوتونات التي تُعدّ بشكل دائم كوحدات لا تقبل التجزئة، ولذلك بدلاً من تسجيل شدة مستمرة يمكن لمكشاف مناسب عدّ هذه الفوتونات المنفصلة.

يحدث برهان أكثر وضوحاً على وجود الصفتين، الجسيمية والموجية، إذا أرسلنا الفوتونات واحداً تلو الآخر عبر الشقين. وفي هذه الحال يعطي كل فوتون بقعة مضيئة على الشاشة؛ ولكن عندما نجمع النتائج بعد مرور عدد كبير من الفوتونات نلاحظ ظهور نمط التداخل على الشاشة (بشكل خاص يمثل نمط التداخل احتمال وصول الفوتون إلى نقطة معينة).

إن التمامية العجيبة في الطبيعة لا تقتصر على المثنوية. الموجية الجسيمية - في طبيعة الضوء، بل إن لمعظم الأجسام الكمومية (كذرة الفضة مثلاً) بنية داخلية تعطيها خواص مغنطيسية. ومن الممكن أن تدل القياسات على توجه مجموع "أقطاب" هذا "المغنطيس" نحو الأعلى أو نحو الأسفل أو ربما نحو اليمين أو نحو اليسار، ولكن لا يمكن أن نجد أبداً أقطاباً تتجه نحو "الأعلى واليسار"؛ أي إن خاصية الاتجاه نحو الأعلى أو نحو الأسفل تُتمم خاصية الاتجاه نحو اليسار أو نحو اليمين. كما يتم السلوك الموجي والسلوك الجسيمي أحدهما الآخر.

إن إمكان التنبؤ بمستقبل إحدى السمتين المتتامتين أمر يثير العجب بسبب ما فيه من غموض. لنفرض أن قياساً قد وجد أن اتجاه المغنطيس المكروي كان نحو الأعلى، ثم أجرينا تجربة ثانية لنعرف ما إذا كان المغنطيس يتجه نحو اليسار أو نحو اليمين، فسيُفاجئنا عدم وجود نتيجة متنبأً بها سلفاً: يبلغ احتمال اتجاه قطبي المغنطيس نحو اليمين أو اليسار 50% لكل منهما. فهل تعوزنا معرفة إضافية لكي نتمكن من التنبؤ؟ الجواب هو لا، لأن السبب أعمق من ذلك، فلا يمكننا معرفة نتيجة قياس يسار-يمين مسبقاً.

إن هذا الجهل ناتج من مبدأ التمامية الذي ينص على عدم إمكان معرفة قيم متحوّلين متتامين، كالاتجاه "نحو الأعلى أو نحو الأسفل" الذي يتم الاتجاه "نحو اليمين أو نحو اليسار" في تجربة المغنطيس. والواقع، إن معرفة أحد المتحوّلين بدقة فائقة تحول دون معرفة أي شيء عن المتحول الآخر المرتبط به. وغالباً ما تُصور الكتب هذا القانون باستعمال موضع واندفاع جسيم متحرك كخاصيتين متتامتين. فكلما زادت دقة قياس الموضع نقصت معرفتنا بالاندفاع والعكس بالعكس، حيث يشكل التعبير العددي الدقيق عن هذا القانون ما يعرف بعلاقة هايزنبرك في الارتياح.

إن مبدأ التتامية يعني عدم إمكان حصولنا على المعرفة التامة بالمستقبل (بمعنى الفيزياء التقليدية) في العالم المكروي (الصغرى)، فإذا عرفنا جيدا إحدى الخاصيتين المتتامتين لجسم كمومي، عندئذ تختفي عنا الخاصية المتممة.

ففي تجربة الشقين، إذا اكتشفنا (بأية طريقة كانت) الشق الذي عبر منه كل فوتون (وبالتالي عرفنا "المسار الذي سلكه" الفوتون) فإننا نفقد نمط التداخل الذي كان موجودا على الشاشة. فمعرفة مسار الفوتون تعني إذاً ظهور الطبيعة الجسيمية للفوتونات عند الشقين بدلا من ظهور الصفة الموجية الضرورية لحدوث التداخل. ويمكننا الاختيار بين معرفة المسار الذي سلكته الفوتونات وبين الحصول على نمط التداخل، ولكن لا يمكننا الحصول على المعلومات معا (بالرغم من قولنا السابق عن ظهور الطبيعة الجسيمية عندما تُكشف الجسيمات على الشاشة فلا تخبرنا هذه المعلومة أي شيء عما يحصل عند الشقين اللذين ينشأ نمط التداخل عندهما).

إن التتامية واقع من وقائع الحياة وعلينا التعايش معه. وقد أَلح عليها الفيزيائي الدنماركي <نيلز بور> أكثر من أي فيزيائي آخر. كما يعود إليه الفضل الأكبر في إظهار فكرة التتامية كحقيقة أساسية في الطبيعة. ولكن لم يتم تقبل ذلك بسهولة، فمناوئو هذه الفكرة كانوا فيزيائيين بارزين أيضا، وعلى رأسهم <ألبرت أينشتاين>. وقد تركز نقاشهما حول إمكان قياس الخاصيتين المتتامتين في آن واحد. وهاكم نص مناقشة نتخيل فيها واحدة من مناظراتهما التوضيحية العديدة:

بور: أرى أنك ترسم من جديد تجربة الشقين، فما هدفك في هذه المرة؟

أينشتاين: رويدك يا نيلز حتى أنهى حديثي. تفضل الآن [انظر ما هو مؤطر في هذه الصفحة]. لدينا موجة ضوئية مستوية تصل إلى صفيحة تحتوي على شقين يمكن أن يعبرهما الضوء كي يصل إلى شاشة. فإذا كانت التجربة مُصممة بشكل حسن وجب أن يظهر على الشاشة نمط للتداخل على شكل سلسلة من العصابات المضيئة والمظلمة على التناوب.

بور: هذا ما نعلمه لطلابنا، فما الجديد في ذلك؟

أينشتاين: مهلا يا عزيزي. قبل تقديم الفكرة الجديدة دعني أعرض الأفكار السابقة لكي أتأكد من كوننا على وفاق حولها. هل تتفق معي على أن ظهور نمط التداخل ينبئ بالطبيعة الموجية للضوء؟

بور: بالتأكيد.

أينشتاين: وستوافق أيضا على أن ما تدعوه تتامية يعني عدم وجود طريقة لمعرفة الشق الذي مر أحد الفوتونات عبره ليصل إلى الشاشة ويقدم إسهامه في نمط التداخل.

بور: هذا صحيح أيضا.

أينشتاين: حسنا، أنت تعلم أنه يصعب عليّ الاعتقاد بأن الإله يلعب بالنرد. دعني إذاً أتوصل إلى الفكرة الجديدة، فبعكس ما قلناه سابقا يمكنني معرفة الشق الذي عبّره الفوتون. لنفترض أننا رأينا وصول فوتون إلى شاشة الكشف عند أول منطقة للشدة العظمى (أي عند إحدى العصابتين المضيئتين الملاصقتين للعصابة المركزية)، فللوصول إلى هذه المنطقة يجب أن يحرف الشق الفوتون عن المسار المستقيم.

## التتامية والارتياب

معرفة ارتفاع الصفحة بدقة  $\delta p$  أصغر بكثير من هذا الفرق؛ أي يجب أن يكون  $\delta p \ll h/\Delta x$ . وبما أن قيمتي  $\delta p$  و  $\delta x$  يجب أن تكونا أصغر بكثير من  $\Delta x$  و  $h/\Delta x$  على الترتيب، فيجب أن يكون الجداء أصغر بكثير من ثابت بلانك  $h$ . (العلاقة  $\delta x \delta p \ll h$ ). وهكذا نصل إلى نتيجة لا يمكن الوصول إليها من خلال علاقة هايزنبرك في الارتياب  $\delta x \delta p \geq h/4\pi$  التي يجب أن تصدق في كل الأحوال.

وبالنتيجة: إما أن تكون قيمة  $\delta x$  كبيرة جدا للسماح لنمط التداخل بالتشكل، أو أن تكون قيمة  $\delta p$  كبيرة جدا لكي نميز مسارا عن الآخر. تكون هذه الحجة مقنعة تماما لعدم اعتماد العلاقة النهائية  $\delta x \delta p \ll h$  على تفاصيل نمط التداخل حتى ولو تدخلت الكمية  $\Delta x$  - المسافة بين الأهداب - في المحاكمة في المراحل الوسطى.

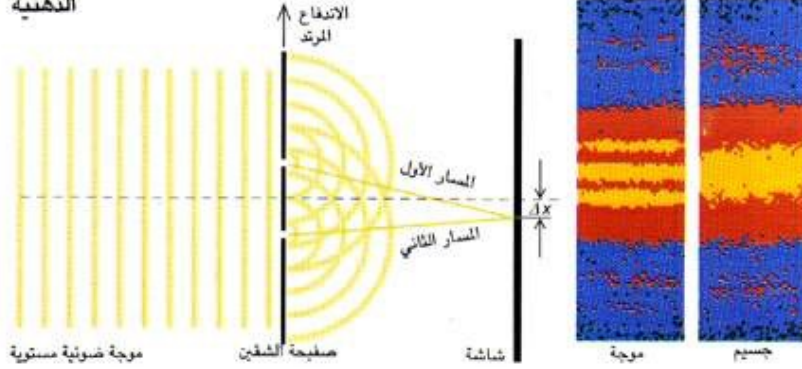
شرح «نيلز بور» لـ«ألبرت أينشتاين» في المحادثة التخيلية سبب عدم إمكان عمل مكشاف المسار المزعوم: فهو لن يتوافق مع علاقة الارتياب. وفي هذا الملحق نستنتج سبب ذلك كليا.

أولا، نرسم للمسافة الفاصلة بين العصاية المركزية المضيفة وأول عصاية مجاورة لها بـ  $\Delta x$ . نعين قيمة المسافة الفاصلة بين الصفحة (التي تحوي الشقين) والشاشة بدقة كبيرة، وليكن بارتياب قدره  $\delta x$ ، وهي قيمة أصغر بكثير من  $\Delta x$ ، وإلا فلن يظهر نمط الأهداب على الشاشة ولن يظهر عوضا عن ذلك إلا نمط الإنعراج scatter pattern عبر شق وحيد.

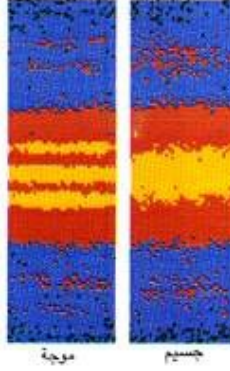
أراد أينشتاين رصد ارتداد الصفحة بهدف معرفة المسار. إن للفوتون اندفاعا يساوي  $h\nu/c$ ، حيث  $h$  هو ثابت بلانك و  $\nu$  تواتر الضوء و  $C$  سرعته. (لاحظ أن للاندفاع ثلاثة

مركبات مكانية (حيزية)؛ ولكننا لا نهتم هنا إلا بتغيير مركبته الموازية للصفحة). سيعتمد مقدار اندفاع الارتداد الذي يعطيه الفوتون للصفحة على الشق الذي عبره الفوتون (يتبني على الفوتون الانحراف بمقدار أكبر عن أحد الشقين من انحرافه عن الشق الآخر لكي يصل إلى العصاية المضيفة الأولى). وسيبين استعمال شيء من الجبر الرياضياتي اختلاف الاندفاعين المعطيين للشقين بفرق مقداره  $h/\Delta x$  لتعيين مسار الفوتون لا يد من

### تجربة أينشتاين الذهنية



### ما يظهر على الشاشة



غير أن إسحق نيوتن قد علمنا عدم وجود فعل من دون رد فعل. ولذلك عندما تكزِ jolt الصفحة الفوتون فسيكزِ الفوتون بدوره الصفحة. وتعتمد شدة الوكزة على الشق الذي مر الفوتون عبره. وعند تعليق الصفحة بشكل حساس جدا يمكنني - من حيث المبدأ - تسجيل ارتدادها، وسيدلني مقدار الارتداد على الشق الذي مر الفوتون عبره.

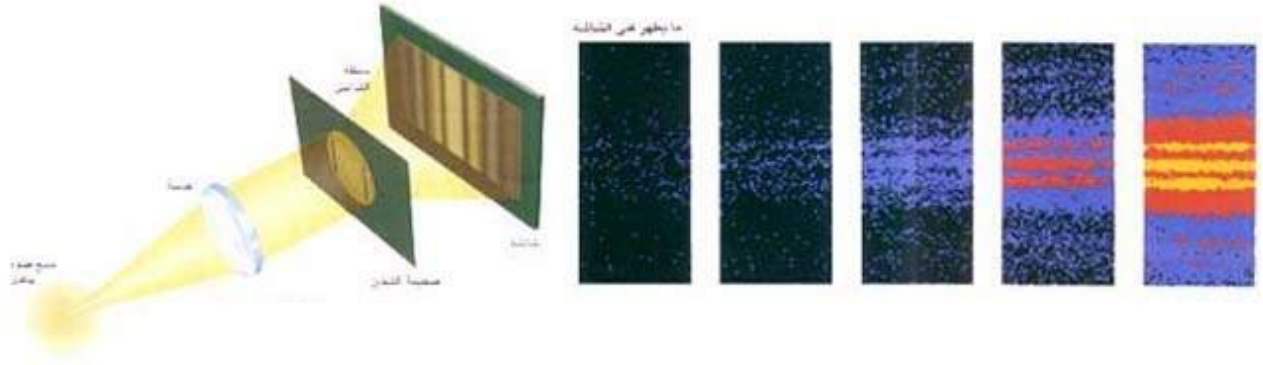
بور: أه، تقصد أنك تستطيع معرفة المسار الذي سلكه كل فوتون وتشاهد في التجربة نفسها نمط التداخل.

أينشتاين: نعم.

بور: مما يتعارض مع التتامية.

أينشتاين: نعم.

بور: حسنا، ولكنني أخشى أن تكون قد نسيت شيئا، أقصد أنك نسيت الخواص الكمومية للصفحة، وبوسعي شرح ذلك من خلال الرياضيات [انظر ما هو مؤطر في الصفحة المقابلة]. كما يمكنني تحليل الظاهرة على النحو التالي: من أجل مشاهدة نمط التداخل يجب أن يكون موضع الصفحة مضبوطا بدقة.



تستعمل تجربة الشقين الأمواج الضوئية - المسددة بواسطة عدسة - لإضاءة صفيحة تحوي شقين يعملان كمصدر لموجتين كرويتين **circular** تتداخلان معا لإعطاء أهداب مضيئة ومظلمة على التناوب. ترسل الفوتونات دفعة واحدة في هذه التجربة بحيث يُبنى نمط الأهداب مع ازدياد تسجيل هذه الفوتونات على الشاشة. تقابل الألوان الموجودة على الشاشة عدد الفوتونات التي وصلت إلى كل منطقة: من فوتون واحد إلى تسعة فوتونات (اللون الأزرق)، من عشرة فوتونات إلى تسعة وتسعين فوتون (اللون الأحمر) وأكثر من مئة فوتون (اللون الأصفر). أجرى هذه التجربة <G. بيركل> في معهد ماكس بلانك للضوئيات الكمومية بألمانيا.

آينشتاين: بالتأكيد، وإلا لا يمكن لأهداب الشقين أن تتولد، ولن نرى عندئذ سوى النمط الناتج من الانعراج عبر شق واحد.

بور: لكي نميز أحد المسارين عن الآخر علينا أن نعرف بكل دقة اندفاع الصفيحة التي تحمل الشقين. والواقع، إنني أستطيع البرهان على أن ظهور نمط التداخل يتطلب حصرا أن يكون الارتيابان، في موضع الصفيحة واندفاعها المرتد، صغيرين كليهما لدرجة ألا يتعارض مع علاقة الارتياب.

آينشتاين: حسنا، حسنا يا نيلز، أنت على حق في ذلك. وأنا أقر بعدم إمكان معرفة مسار الفوتون وحصول نمط التداخل في تجربة واحدة. وأنت محق تماما في تأكيد وجوب احترام الصفيحة لقوانين الميكانيك الكمومي أيضا. ينبغي عليّ تهنئتك على تبيان التمامية هذا. بور: مهلا، أتظن أن علاقة هايزنبرگ - كما رأينا في المثال السابق، أو في أي مثال آخر - هي دائما الآلية التي تعزز مبدأ التمامية؟

لئن كنا لا نملك سوى أن نتكهن بجواب آينشتاين عن السؤال الأخير، فإن جوابنا نحن هو "لا"، فالقيود التي تفرضها علاقة الارتياب ليست هي الآلية الوحيدة التي تعزز الطبيعة بها التمامية. وما يسوغ جوابنا السلبي هو اكتشافنا حديثا إمكان بناء مكاشيف (مكشافات) detectors تعرّفنا بمسار الفوتون ولا تؤثر بقدر محسوس في حركة الأجسام المرصودة. وهذا يعني إمكان الحصول على مكاشيف تتجنب علاقة الارتياب.

يُستمد مبدأ المكشاف الجديد للمسار من تجربة الشقين. وقد ناقش <R. فاينمان> أحد أشكال هذه التجربة في مقدمته الرائعة للميكانيك الكمومي المعروضة في الجزء الثالث من كتابه "محاضرات في الفيزياء". فقد لفت فاينمان النظر، في هذا الكتاب، إلى أننا إذا استعملنا الإلكترونات عوضا عن الفوتونات فإن طريقتنا في معالجة الجسيمات المتداخلة، ستكون مختلفة إذا أخذ في الحسبان الصفة الموجية للإلكترونات التي يمكنها أن تسلك سلوك الضوء. وهكذا ستُعطي الإلكترونات نمط تداخل في تجربة الشقين. وبما أن الإلكترونات هي جسيمات

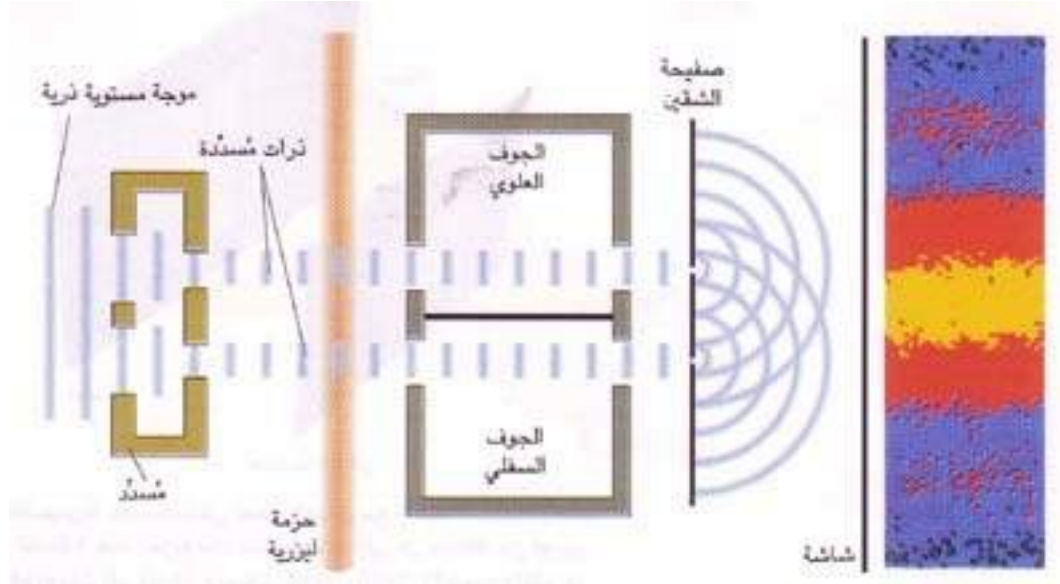
مشحونة فإنها تتفاعل مع الحقول الكهرومغناطيسية التي من ضمنها الضوء. وهذا يعني أننا إذا جعلنا الإلكترونات تتفاعل مع الضوء استطعنا معرفة مسار الإلكترون.

اقترح فاينمان طريقة خاصة للحصول على هذه المعرفة. تقضي هذه الطريقة بوضع منبع ضوئي بين الشقين وعلى مسافة واحدة منهما. فالفوتونات، بعد اصطدامها بالإلكترونات، ستنزوي باتجاه يبنى بما إذا كان الإلكترون قد أتى من الشق العلوي أم من الشق السفلي، مما يتيح معرفة مساره.

تركز تحليل فاينمان لعملية اصطدام الفوتون مع الإلكترون على متحولين اثنين: أحدهما الاندفاع الذي يكتسبه الإلكترون نتيجة التصادم، والآخر هو الارتياح في دقة تحديد موضع الإلكترون. وعلى غرار ما جاء في الحوار بين أينشتاين وبور حول الشق المرتد لا بد أن تكون الكميتان ضئيلتين إذا أردنا الحصول، دفعة واحدة، على معرفة المسار وعلى نمط التداخل، والأحسن من ذلك أن هاتين الكميتين ستكونان حتما ضئيلتين لدرجة تنتهك علاقة هايزنبرك الارتياحية.

إن مكشاف المسار الجديد هذا، يتفق مع اقتراح فاينمان؛ بيد أننا صممنا جهازنا بحيث نتفادى التصادم، وبالتالي تبادل الاندفاع. وتستعمل تجربتنا الذهنية (العقلية) الذرات عوضاً عن الإلكترونات كجسيمات تداخلية. وهكذا نضع جوفاً صغيراً (عبارة عن علبة) أمام كل شق بحيث ينبغي على كل ذرة المرور عبر أحد هذين الجوفين قبل عبور الشق الموافق [انظر الشكل العلوي في الصفحة التالية]. وقد أحرز باحثون من جامعة ميونخ ومن معهد ماكس بلانك في ألمانيا ومن جامعة ييل في الولايات المتحدة الأمريكية ومن دار المعلمين العليا في باريس، تقدماً هائلاً في تطوير الطرق التجريبية الضرورية لذلك في السنوات الأخيرة، وهم يستطيعون الآن إجراء تجارب تعبر فيها ذرات وحيدة (واحدة تلو الأخرى) هذه الأجواف.

ينبغي علينا توليف وتيرة حزمة الليزر بحيث تُثار كل ذرة تعبر الحزمة. وهذا يعني امتصاص الذرة لفوتون ليزري طول موجته صغير، ومن ثم انتقالها إلى مستوى طاقي أعلى. ومن شأن شكل الجوفين أن يجبر الذرات على إطلاق فوتون ذي طول موجة كبير (يعادل هذا الطول الموجي إشعاع فرن الأمواج المكروية). وعندئذ تكفي معرفة موضع الفوتون ذي طول الموجة الكبير لتبين الجوف (وبالتالي الشق) الذي عبرته ذرة بعينها. فهذه التجربة لا تمس علاقة هايزنبرك في الارتياح بأي ضرر، لأن إطلاق الفوتون لا يؤدي إلى إحداث اضطراب في حركة الذرة. وللتقليل من الإشارات المتطفلة يجب حفظ الجوفين (الحقيقيين) في حالة فائقة البرودة، ويجب أيضاً أن تكون جدرانهما فائقة التوصيلية لضمان بقاء الفوتونات مخزونة فيها مدة طويلة.



يستعمل مكشاف المسار حزمة ليزرية لإثارة ذرات مسددة (تظهر كالموج). تهبط الذرات إلى حالة طاقة أدنى معطية فوتونا في الجوف الذي تغيره. وبسبب عدم تأثير هذا الإصدار في حركة الذرة فلن تتأثر علاقة الارتياح. ومع ذلك يشير التحليل إلى أن الحصول على معلومات المسار سيؤدي إلى اختفاء أهداب التداخل.

ولعدم تأثير منظومة الكشف في حركة الذرات يمكننا التخمين بأن الذرة ستظل محتفظة بقدرتها على التداخل. وهكذا سنحصل على معرفة المسار (وهذا ينبئ بالطبيعة الجسيمية للذرة) وعلى نمط التداخل (وهذا ينبئ بطبيعتها الموجية).

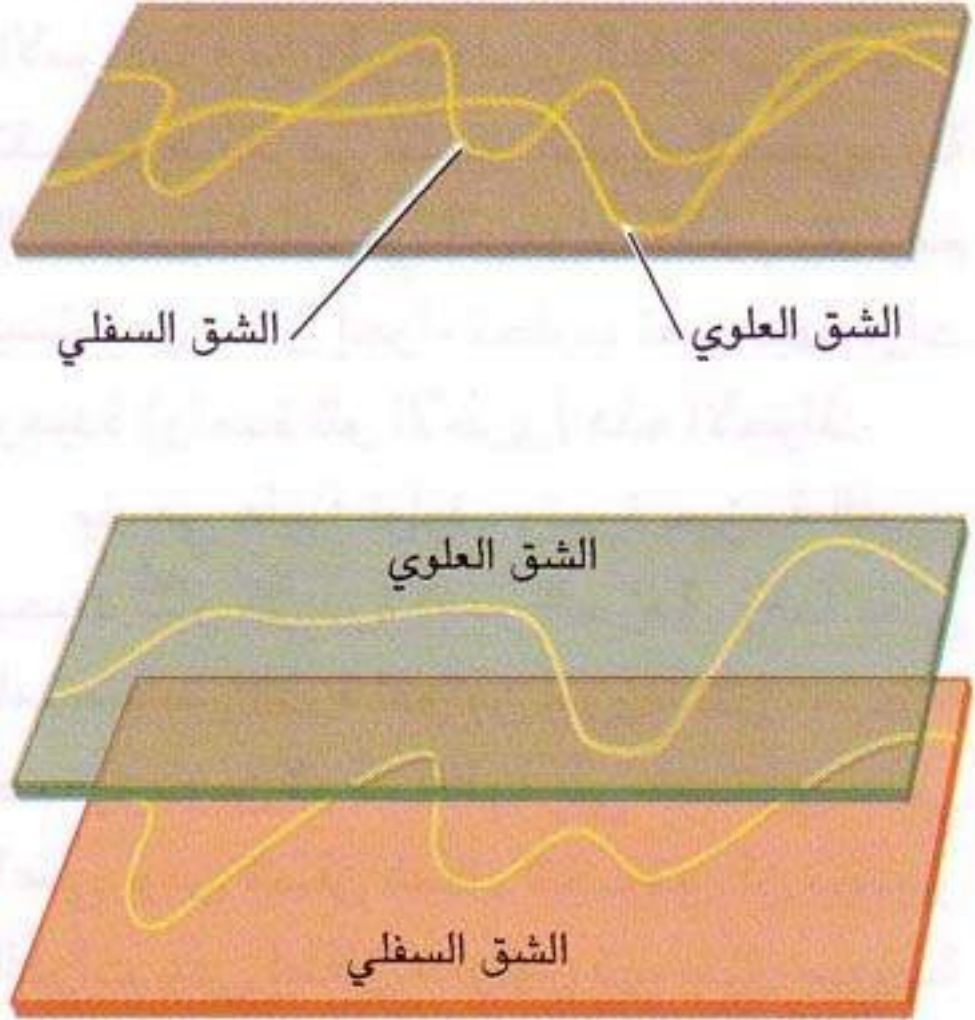
لكن هذا التخمين الساذج ليس صحيحا، لأن تحليلنا ينبئ باستحالة الحصول على معرفة المسار وعلى نموذج التداخل معا، فبمجرد الحصول على معرفة المسار تختفي أهداب التداخل من الشاشة، ونحصل على بقعة واسعة في وسط الشاشة بدلا من ظهور الأهداب. وهكذا نستطيع الالتفاف على علاقة هايزنبرك في الارتياح ولكن لا يمكننا تجنب مبدأ بور في التمامية.

إن بقاء التمامية ينبع من سر عميق. ومفتاح هذا السر يكمن في العلاقات المتبادلة بين حركة الذرة وبين فوتونات الجوف الذي اخترقته الذرة والتي تسبب اختفاء نمط التداخل؛ أي إن الأمور تحدث وكأن كل ذرة تحمل علامة (واسمة) تدل على الشق الذي مرت عبره، فالذرات التي تعبر الشق العلوي لا تتداخل مع تلك التي تعبر الشق السفلي. أما العلامة فهي ليست إلا الفوتون المنحرف الذي أطلقته الذرة، والذي يظل محتفظا بعلامته. يمكن أن تبعد الشاشة التي يحتمل ظهور الصفات التداخلية عليها بأي مسافة عن جوفي مكشاف المسار، وهذا يعني عدم وجود أي دور لهذا البعد في العلاقات المتبادلة المذكورة. وحالما تقوم هذه العلاقات بين الذرة المعلمة والجوف الذي تدخله فإنها تبقى قائمة بعد ذلك.

عند هذه المرحلة لم يعد بوسع النظري التقليدي<sup>(1)</sup> classical intuitionist CI ضييط نفسه، مما يحدو به إلى التحول إلى صديقه الميكانيكي الكمومي quantum mechanic.

النظري التقليدي: لقد أصغيت بما فيه الكفاية، ولكن صبري نفذ الآن. إنني مستعد للموافقة على الحجج السابقة القائمة على علاقة هايزنبرك في الارتياح، وأقبل بأن وجود معلومات عن

المسار يقصي ظهور نمط للتداخل. ولكن إذا كان الأمر كذلك فالسبب حتما هو أن المجرب يسبب اضطراب حركة الجسيم لدى سعيه للحصول على معرفة المسار، وهذا يعني بالتالي أن الجسيم فقد بعض قدرته على التداخل.



يمثل المنحنيان في المستوي احتمال مرور الذرة من الشق العلوي أو من الشق السفلي (في الأعلى). تقابل أهداب التداخل نقاط التقاطع، ولكن عند حصول علاقات متبادلة (في الأسفل) يكون المنحنيان في مستويين مختلفين، ولا يعودان متقاطعين، وبالنتيجة لا يكون هناك أي تداخل.

الميكانيكي الكمومي: عندما تقول "يسبب اضطرابا" هل يذهب ذهنك نحو شيء مثل وكزة غير متحكم فيها؟

النظري التقليدي: طبعاً.

الميكانيكي الكمومي: إذا أنت مخطئ، إذ يبين مثال الجوفين المكشافين إمكان الحصول على معرفة المسار من دون حدوث اضطراب ميكانيكي يذكر.

النظري التقليدي: يمكنني قبول محاكمتك، ولكن ساعدني من فضلك على فهم النتيجة. فلماذا لا يتداخل الجسيم إذا لم تكن حركته قد اضطربت؟  
الميكانيكي الكمومي: بسبب وجود علاقات متبادلة.



النظري التقليدي: عفواً، ولكن كلمة "علاقات" لا تساعدني على الفهم.  
الميكانيكي الكمومي: حسناً، لربما يفيدنا التشبيه التالي: دعنا نمثل حالتي مرور الذرة عبر الشق العلوي أو عبر الشق السفلي بمنحنيين ملتويين مرسومين في مستو أفقي [انظر الشكل السفلي في هذه الصفحة]. نقول إن المنحنيين يتداخلان في مواضع تقاطعهما. ونرسم الخطين بحيث يتقاطعان مرارا وهذا يحدث ست مرات في الشكل.

النظري التقليدي: حسناً، وماذا يحصل بعد ذلك؟

الميكانيكي الكمومي: لندخل الآن درجة حرية جديدة (وهي البعد الثالث في هذا التشبيه)، كما نمثل العلاقات بفصل أحد المنحنيين بعدة سنتيمترات فوق الآخر. وهكذا لم يعد تقاطع المنحنيين قائماً (بمعنى أنه لم يبق بينهما تداخل). نلاحظ، بغض النظر عن العلاقات ولكن بإهمال البعد الثالث وإسقاط كلا المنحنيين على مستو مشترك، أن التقاطع بين المنحنيين يبدو موجوداً على الرغم من أنهما يتقابلان من دون أن يتقاطعا.

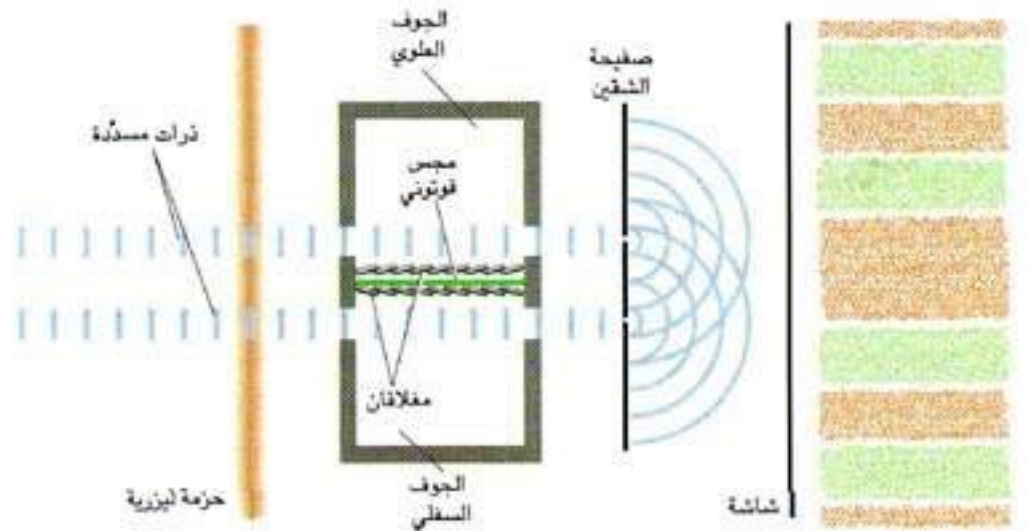
النظري التقليدي: هكذا إذاً، أظن أنه أصبح عندي الآن رؤية حدسية أوسع لما يجري. أي باختصار، إن نمط التداخل يضيع بسبب معرفتنا بالمسار وليس بسبب الارتياح في موضع الشقين أو بسبب الوكزات غير المتحكم فيها التي تتعرض لها الذرة.  
الميكانيكي الكمومي: تماماً، وليس هناك أي عامل عشوائي في ذلك.

بسبب التاريخ الحافل لهذا الموضوع (والكتب العديدة التي تتناول علاقة الارتياح) ظل تحليلنا موضع شك لدى العديد من الزملاء المهتمين بالموضوع. وقد قدم بعضهم اعتراضات حاذقة على النتيجة التي تنص على عدم اضطراب حركة الذرة. غير أن الحسابات الدقيقة والتجربة المجراة في مختبر <J.D. J. وَاينلاند> من المعهد الوطني الأمريكي للمقاييس والتقانة (NIST) بينت من دون شك عدم صحة هذه الاعتراضات. ومن المؤكد الآن أن مبدأ التتامة هو أكثر أساسية من علاقة الارتياح.

بما أن معرفة المسار تؤدي إلى اختفاء التداخل، يمكننا أن نطرح بالمقابل السؤال التالي: هل يعود التداخل إلى الظهور إذا محونا معرفة المسار بأن نمتص الفوتون الشاهد بطريقة ما؟

قد يكون للمحو الكمومي quantum erasure معنى معقول مع أنه قد لا يكفي لاستعادة نمط التداخل. صحيح إن مشاهدة نمط التداخل تنبئ بعدم الدقة في معرفة المسار، وإن معرفتنا بالمسار تعوق ظهور نمط التداخل، ولكن استنتاجنا أن سوء معرفة المسار يقتضي ظهور نمط التداخل هو استنتاج خطأ. فالجواب عن سؤالنا هو أن التداخل لا يعود إلى الظهور إلا إذا تولد من المحو علاقات متبادلة جديدة، أي إن المحو يجب أن يحدث ضمن شروط مضبوطة بدقة.

إن من الصعب جداً تنفيذ المحو الكمومي تجريبياً، وهو أمر لم يتم حتى الآن. وبدلاً من ذلك نعرض تجربة ذهنية (عقلية) تقتضي توافر عدد من الشروط المثالية ولكنها تفي تماماً بالغرض لأنها تشمل كل المظاهر المهمة للقضية.



يشكل الماحي الكمومي quantum eraser نوعاً من مكشاف المسار. يُفتح المغلاقان بعد أن تضرب الذرة الشاشة، فإذا امتص المجس فوتون الجوف سيكون لون البقعة على الشاشة أحمر، وإذا لم يمتصه المجس سيكون لون البقعة أخضر. تعطي البقع الحمراء أهداب التداخل، أما البقع الخضراء فتعطي نمطاً متمماً لهذه الأهداب.

وفي التجربة الذهنية نضع مجساً فوتونياً بين الجوفين ومغلاقين يفصلان بينهما [انظر الشكل في هذه الصفحة]، ومادام المغلاقان موصودين فإننا نكون في حالة مكشاف المسار التي عرضناها سابقاً.

نبدأ التجربة في حالة يكون فيها الجوفان فارغين والمغلاقان موصدين. ثم نرسل إلى داخل الجهاز ذرة مثارة تتخلص من فوتون في أحد الجوفين. وهكذا يكون احتمال احتواء أي من الجوفين على فوتون مساوياً 50%. يبقى الفوتون في أحد الجوفين وتصل الذرة التي أطلقتها إلى الشاشة وتسبب ظهور علامة عليها، وحال حدوث ذلك نفتح كلا المغلاقين في الوقت نفسه محولين الجوفين المنفصلين إلى جوف واحد أكبر حجماً.

يؤدي فتح المغلاقين إلى حدوث مفعول (تأثير) غير عادي على الفوتون؛ إذ يمكننا افتراض وجوده في أي مكان، ولذلك سيسجل المجس الإشارة دائماً. غير أن الفوتون هو جسم كمومي ذو خواص موجية. ولننتذكر أن احتمال وجود الفوتون في أحد الجوفين قبل فتح المغلاقين كان مساوياً 50%. يمكننا النظر إلى هذه المسألة من زاوية أخرى بقولنا إن الموجة المواكبة للفوتون تتألف من موجتين جزئيتين partial waves، كل واحدة منهما موجودة في كلا الجوفين. وعند فتح المغلاقين تتحول موجة الفوتون بحيث تتوافق مع الجوف الجديد الأكبر. ويمكن وصف التغير كأنه "اندماج" الموجتين الجزئيتين الأصليتين لتصبحا موجة نهائية واحدة.

يمكن أن يحدث الاندماج بصور مختلفة. فإذا عززت إحدى الموجتين الثانويتين الأخرى عند موضع المجس الفوتوني فسيلتقط المجس الفوتون. وبالمقابل، إذا تفانت الموجتان بالتداخل الهدام فلن يكشف المجس الفوتون. ويحدث الاحتمال - في كلتا الحالتين - بقدر متساو، ومن

المستحيل التحكم أو التنبؤ بالنتيجة. وبالتالي تبلغ نسبة احتمال كشف المجس للفوتون الصادر عن الذرة بعد فتح المغلاقين 50%.

إذا امتص المجس الفوتون نلون موقع البقعة التي تتركها الذرة على الشاشة باللون الأحمر للدلالة على أن فوتون الجوف قد انمحي. أما إذا فشل المجس في تسجيل أي شيء فنلون البقعة باللون الأخضر، ثم نبدأ من جديد مع الذرة التالية. وبالمحصلة سيسهم نصف عدد الذرات في مجموعة البقع الحمراء والنصف الآخر في البقع الخضراء.

ما شكل النمط الذي سيظهر على الشاشة؟ إن مجموعة البقع الحمراء ستعطي نمط التداخل الذي كنا نحصل عليه في حالة وجود الشقين وحدهما، ومن دون وجود الجوفين كاشفي المسار: أي إن انمحاء الفوتون الشاهد سيؤدي إلى ظهور نمط التداخل من جديد. أما مجموعة النقاط الخضراء فتشكل نمطاً متماثلاً: أي إن الذرات الخضراء تنطبق على مناطق الحضيض الحمراء، والعكس بالعكس. فلو أخذنا للشاشة صورة بالأبيض والأسود فلن يظهر عليها أي شيء ينبئ بحصول تداخل. وهذا كله يعني أن إظهار التداخل لا يمكن أن يحدث إلا بوجود علاقات متبادلة بين المجس الفوتوني والذرات.

وباستعمالنا المشابهة الميكانيكية الكمومية للمنحنيات الموجودة في مستوي يمكننا التسليم بأن المنحنيين العلوي والسفلي يقابلان قطعاً حمراء وأخرى خضراء خلال عملية المحو، وتزاح هذه القطع نحو مستويين موافقين بحيث تتداخل القطع الحمراء بعضها مع بعض، كما يحدث الشيء نفسه بالنسبة للقطع الخضراء. ولكن بسبب عدم تداخل القطع الحمراء مع الخضراء يجب علينا إبقاؤهما منفصلين إذا أردنا أن نشاهد نمط التداخل.

لا يؤثر المحو في حركة الذرة لأنه يحدث بعد وصول الذرة إلى الشاشة. فالخيار متروك إذاً للمجرب: هل نريد معرفة ما إذا كانت الذرة - التي سجلنا للتو وصولها - قادمة من "الشق العلوي" أم من "الشق السفلي"، أو نريد معرفة ما إذا كان المجس الفوتوني قد أثير (لون أحمر) أم لا (لون أخضر)؟ يقابل هذان التساؤلان خاصيتين متتامتين للمنظومة المرصودة، فمعرفة الجوابين أمر مستحيل؛ إذ لا يمكننا أبداً وسَمَّ ذرة بأنها "قادمة من الشق العلوي" أو لون "أحمر" مثلما كان الوصف "نحو الأعلى واليسار" غير ممكن عندما وصفنا الخواص المغنطيسية لذرة الفضة. وهكذا نرى ظهور التمامية من جديد.

تمتاز طريقة المحو الموصوفة آنفاً بسهولة وصفها وتحليلها، ولكن إجراء التجربة نفسها قضية أخرى، وهي مازالت في حاجة إلى سنوات من العمل الجاد. فالصعوبة الأولى فيها هي "هشاشة" الذرات الموجودة في الحالة المثارة ورغبتها في التخلص سريعاً من الفوتون الذي تحمله.

من المحتمل ألا تُستعمل الذرات كأجسام تداخلية في أوائل تجارب المحو. وفي الواقع لا يعتمد الكثير من هذه المقاييس التداخلية المتقدمة على وجود الشقين؛ إذ يستعمل الباحثون أزواجاً فوتونية كأجسام كمومية من أجل دراسة هذه الأفكار. كما تستعمل التجربة المجراة في المعهد NIST، التي ذكرناها سابقاً، مكاشيف للمسار من دون مفعول الارتداد لكشف الضوء المنعرج

عن الذرتين بدلا من انعرجه عبر الشقين. ولربما أمكن إجراء تعديل في هذه التجربة بحيث نحصل على تجربة محو كمومي.

إننا لا ننتظر نتائج داحضة للميكانيك الكمومي، فالعالم الكمومي حمى نفسه بعناية من كل تناقض داخلي، لذا فإن ظهور أي خلل غير متوقع سوف ينبئ في معظم الأحيان بقصور في الجهاز المستعمل وليس بقصور الميكانيك الكمومي نفسه. فعلى الرغم من براعة الإنسان في التجارب العلمية، تظل الطبيعة متقدمة علينا بأشواط.

## المؤلفون

B-G. Englert - M. O. Scully - H. Walther

يتفكرون في المظاهر الأساسية للفيزياء الكمومية. نال إنكلرت الدكتوراه من جامعة توبينغن وهو الآن أستاذ في جامعة ميونخ وباحث في معهد ماكس پلانك للضوئيات الكمومية في ألمانيا. وعمل باحثا زائرا في جامعة نيومكسيكو بالولايات المتحدة الأمريكية وفي بولندا وهنغاريا وفرنسا. حصل سكولي على الدكتوراه من جامعة ييل، ونال العديد من الجوائز في الضوئيات الكمومية، وهو الآن أستاذ في جامعة تكساس وباحث في مركز هيوستون للبحوث المتقدمة بالولايات المتحدة الأمريكية وفي معهد ماكس پلانك للضوئيات الكمومية بألمانيا. أما ولثر الذي حصل على الدكتوراه من جامعة هيدلبرگ في ألمانيا فهو نائب رئيس جمعية ماكس پلانك ومدير معهد ماكس پلانك للضوئيات الكمومية، ونال العديد من الجوائز والدرجات الشرفية. عمل ولثر في عضوية هيئات تحرير عدة مجلات وجمعيات علمية.

## مراجع للاستزادة

**QUANTUM ERASER: A PROPOSED PHOTON CORRELATION EXPERIMENT CONCERNING OBSERVATION AND "DELAYED CHOICE" IN QUANTUM MECHANICS.** M. O. Scully and K. Druhl in Physical Review A, Vol. 25, No. 4, pages 2208-2213; April 1982

**QUANTUM THEORY AND MEASUREMENT.** John A. Wheeler and Wojciech H. Zurek. Princeton University Press, 1983

**QUANTUM OPTICAL TESTS OF COMPLEMENTARITY.** M. O. Scully, B.-G. Englert and H. Walther in Nature, Vol. 351, No. 6322, pages 111-116; May 9, 1991

**YOUNG'S INTERFERENCE EXPERIMENT WITH LIGHT SCATTERED FROM TWO ATOMS.** U. Eichmann et al. in Physical Review Letters, Vol. 70, No. 16, pages 2359-2362; April 19, 1993

**THE MICROMASER: A PROVING GROUND FOR QUANTUM PHYSICS.** Georg Raithel, Christian Wagner, H. Walther, L. M. Narducci and M. O. Scully in Cavity Quantum Electrodynamics. Edited by Paul R. Berman. Academic Press, 1994  
Scientific American, December 1994

(1) عمد المؤلفون إلى التفريق بين الفيزيائيين؛ فالأول هو نظري تقليدي لم يدخل في دقائق الأمور، أما الآخر فهو ميكانيكي كمومي وصل بعمله الميكانيكي إلى معرفة دقائق مهنته. (التحرير)