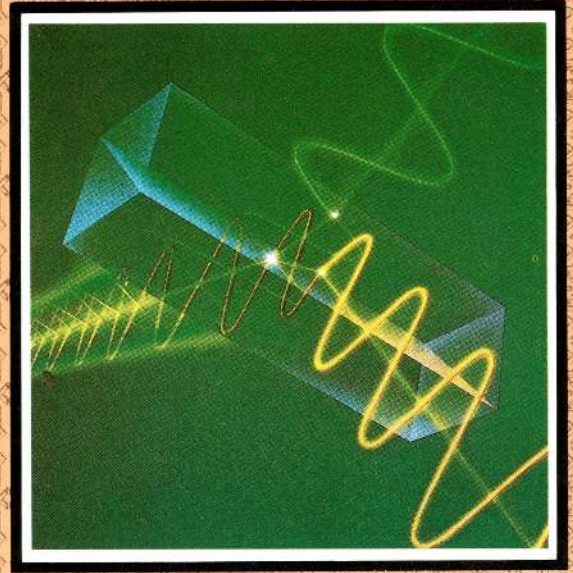
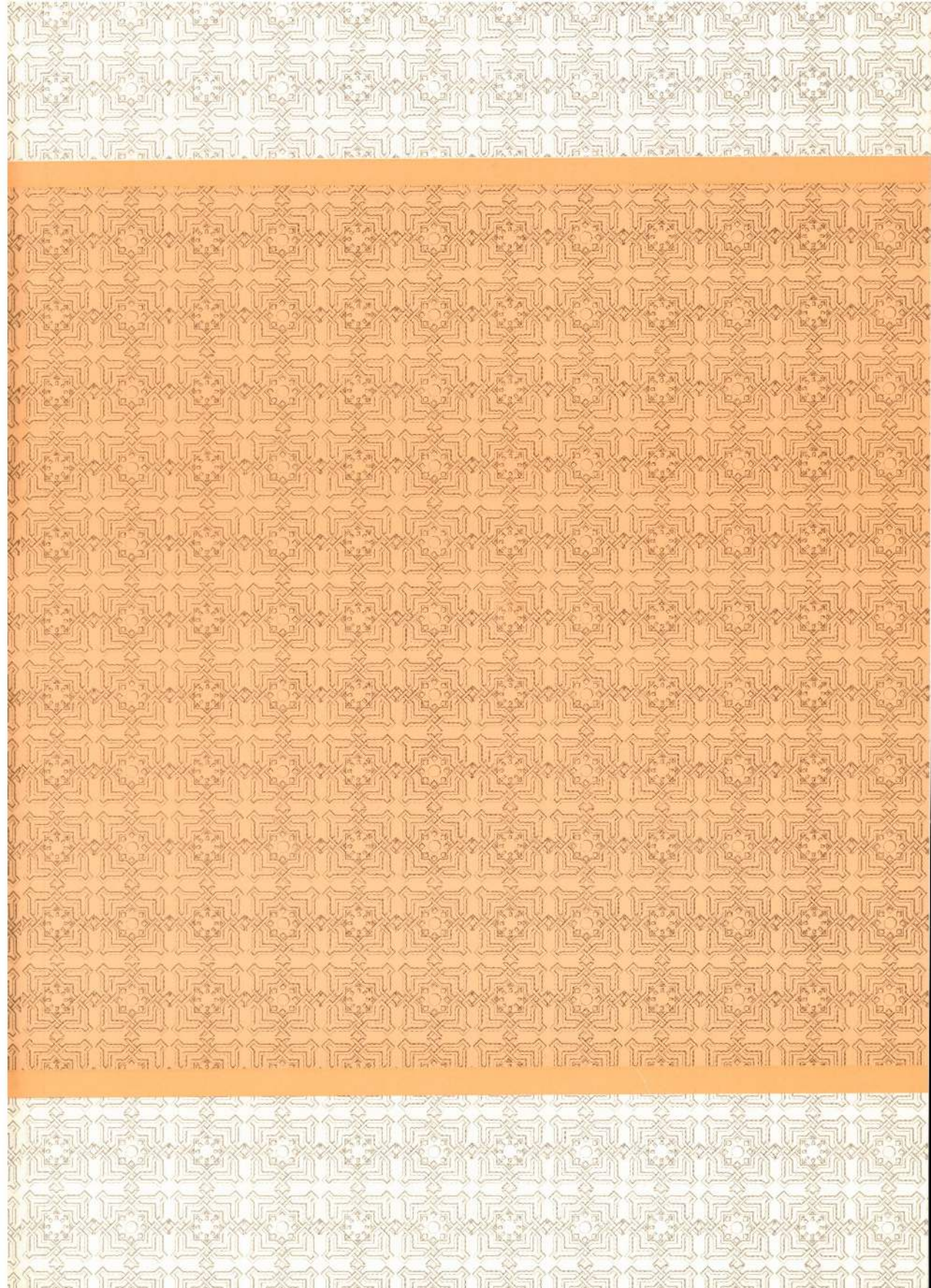


جوانب الضوء والمارّة تجريباً وتأميلاً

ترجمة
للدكتور الدكتور لاهم السقا



سلسلة الكتب المترجمة
الطبعة الأولى ١٩٩٧م



المحتويات

الصفحة

١١	قبل البداية
١٣	تقديم المؤلف والكتاب
١٥	الفصل الأول : مقدمة
٤٧	الفصل الثاني : الفوتونات جسيمات الضوء
٨٥	الفصل الثالث : الإلكترونات وتفاعلاتها
١٢٥	الفصل الرابع : مسائل معلقة
١٥١	فهرس المصطلحات العلمية

قبل البداية

إن «محاضرات أليكس ماوتنر Alix Mautner Conferences» مخصصة لذكرى زوجتي أليكس، المتوفاة عام ١٩٨٢. كانت أليكس مختصة بالأدب الإنكليزي. لكن ذلك لم يمنعها من الاهتمام الجدي والمستمر بشتى ميادين العلم. ولهذا السبب بدا لي أن من الملائم إقامة مؤسسة تحمل اسمها وتهدف إلى تنظيم سلسلة محاضرات سنوية تعرض لجمهور المثقفين روح العلم ونتائجه.

وإنني لجد سعيد بأن يكون رتشارد فاينمان Feynman قد وافق على إلقاء أولى هذه المحاضرات. فصادقتنا ترجع إلى أيام الصبا السعيدة، منذ خمسة وخمسين عاماً، في فار روكاوي بولاية نيويورك. كان رتشارد وأليكس يعرف أحدهما الآخر منذ اثنين وعشرين عاماً. وكانت أليكس قد حاولت إقناع رتشارد بعرض فيزياء عالم الصغائر على جمهور من غير المختصين.

أخيراً أود أن أشكر جميع أولئك الذين أسهموا في «مؤسسة أليكس ماوتنر» والذي أتاحوا، بإسهامهم هذا، قيام هذه المحاضرات.

ليونارد ماوتنر

تقديم المؤلف والكتاب

لقد اشتهر رتشارد فاينمان ، في عالم الفيزيائيين ، بنظرته الخاصة إلى العالم الذي نعيش فيه . فمن خلال إعراضه عن إتخاذ موقف نهائي من أي شيء وتفضيله الاعتماد على أفكاره الخاصة به في كل مناسبة ، لا يندر أن يتوصل إلى فهم جديد وعميق للطبيعة ، فهم يتميز بالأناقة والبساطة في توصيف ما ينتج عنه .

وقد اشتهر أيضاً بالحماس الذي يُبديه في شرح الفيزياء للطلاب . إنه ، وهو الذي يرفض الدعوات لإلقاء محاضرات على الجمهور وفي أكثر المنظمات شهرة ، لا يضمن بالوقت عندما يتعلق الأمر بمناقشات مع الطلاب الذين يقصدونه في مكتبه أو بالمبادرة إلى الحديث في نوادي الفيزياء في المدارس الثانوية .

إن هذا الكتاب يؤدي مهمة فريدة - فيما أعلم - مهمة أن يشرح بطريقة وافية شريفة ومباشرة واحدة من أصعب النظريات على الفهم لدى جمهور غير المختصين ، وهي نظرية الإلكتروديناميك الكمومي quantum electrodynamics . إنه يطمح إلى إعطاء القارئ المهتم فكرة عن نوعية الأسلوب الاستنتاجي الذي يعتمد عليه الفيزيائيون لتفسير سلوك الطبيعة من خلال تعاملهم معها .

فإذا كنتَ من طلاب الفيزياء (أو تُعدُّ نفسك لدراساتها) ، فلن تجد في هذا الكتاب شيئاً يحتاج إلى أن «تساه» فيما بعد ، بل إنك ستجد فيه وصفاً كاملاً ودقيقاً ، حتى في أصغر تفاصيله ، للإطار النظري الذي يمكن أن تُدخل فيه مستقبلاً ، وبدون تعديل ، أكثر المفاهيم تطوراً وعمقاً . أما أولئك الذين درسوا الفيزياء من قبل ، فسيجدون في هذا الكتاب «تصويراً» واضحاً لما كانوا بصده فعلوا عندما كانوا منهمكين في حسابات شديدة التعقيد .

كان فاينمان في صباه قد أعجب بعجالة قراءها في حاشية أحد كتب الحساب تقول : «إن ما يستطيع أن يفعله أبله واحد ، يمكن أيضاً أن يفعله أي أبله آخر» . وأنا على يقين من أن فاينمان لن يستاء إذا قلنا لقرائه في تقديم هذا الكتاب : «إن ما يستطيع أن يفهمه أبله واحد ، يمكن أيضاً أن يفهمه أي أبله آخر» .

رالف لايتون

الفصل الأول

مقدمة

مقدمة

كانت أليكس ماوتنر شديدة الفضول تجاه أمور الفيزياء ، كانت تطرح عليّ أسئلة كثيرة ، وكنت أجيب عنها ، على ما يبدو ، بالأسلوب الذي أتبعه للإجابة عن أسئلة طلاب كاليفورنيا عندما يأتون إليّ أيام الخميس . وأدركت في النهاية أنني لم أنجح في إفهامها ما كنت أعدّه أهم شيء في الفيزياء : الميكانيك الكمومي quantum mechanics . ففي كل مرة تناولنا فيها هذه النظرية ذات الأفكار الغريبة ، كان يحدث شيء من الاستعصاء . وانتهى بنا الأمر إلى أن اعترفت لها أن من المستحيل عليّ أن أشرح لها تلك الأفكار في ساعات معدودة ، ولو استغرقت سهرة كاملة ، وأن ذلك يتطلب مني وقتاً طويلاً ، ووعدتها أن أعدّ في يوم ما محاضرات حول هذا الموضوع .

وقد أعددت فعلاً سلسلة محاضرات وذهبت أجريّها على النيوزيلنديين ؛ فنيوزيلندا بعيدة ، والفشل هناك ليس ذا عواقب وخيمة . لكن النيوزيلنديين أكدوا لي أن كل شيء كان على ما يرام . فاستنتجت أن محاضراتي كانت حسنة الإعلال . بالنسبة للجمهور النيوزيلندي على الأقل . وهكذا أصبحت جاهزة المحاضرات التي أعددتها وأنا أفكر بأليكس والتي لن تحضرها مع الأسف .

إن موضوع حديثي اليوم معروف جيداً ، والواقع أن ما يُطلب مني عادة هو أن أتكلّم عن آخر التطورات في محاولات للعشور على نظرية توحّد قوى الطبيعة الأساسية الأربع ، ولم يعطني أحد فرصة الكلام عن الأشياء التي أعرفها جيداً . وهكذا يريد الناس أن يتعلموا مني أشياء لا أعرفها أنا نفسي ، وعلى هذا فلن أحاول أن أبهر نظركم بنظريات ما تزال قيد الدراسة ، ولم يمكن بعد تحليلها إلا بشكل جزئي . وأفضل أن أتكلّم اليوم في ميدان تمّ تحليله جيداً بشكل كامل ، إنه مجال من الفيزياء مازال يثير التعجب ، اسمه الإلكتروديناميك الكمومي .

وفي هذه المحاضرات أرى أن أشرح لكم بكل دقة ممكنة نظرية عجيبة ، نظرية تتعامل مع الضوء والمادة ، وخصوصاً مع التفاعل بين الضوء والمادة . وسأحتاج لوقت طويل كي أشرح لكم كل ما أنوي شرحه . ولما كان أمامنا أربع محاضرات ، فسوف أجد الوقت الكافي لأضع كل شيء في نصابه .

عُنيّت الفيزياء عبر تاريخها بمحاولة الربط بين ظواهر أكثر فأكثر عدداً كي تستنبط من ذلك نظريات أقل فأقل عدداً ، وعلى هذا فقد انطلقت العملية من ظواهر

تختلف فيما بينها اختلاف كل من الحرارة الصوت والثقالة gravity فيما بينها . ثم جاء نيوتن الذي شرح قوانين الحركة ، فتبين أن بعض تلك الظواهر ، التي كانت تبدو متخالفة ، ليست في الواقع سوى وجوه شتى لشيء واحد ، هو الحركة . فقد أمكن ، مثلاً ، تفسير الصوت تماماً بالاستناد إلى حركة ذرات الهواء ، فلم يعد بالإمكان اعتبار الصوت ظاهرة تختلف عن الحركة ، واتضح أيضاً أن الظواهر الحرارية يمكن تفسيرها بسهولة انطلاقاً من قوانين الحركة . وهكذا تم انضمام مجالات كبيرة من الفيزياء في نظرية بسيطة ، لكن نظرية التثاقل gravitation (*) قد استعصى تفسيرها استناداً إلى قوانين الحركة ، وماتزال حتى اليوم نظرية قائمة بذاتها . فالتثاقل سيظل ، ما لم يثبت عكس ذلك ، غير قابل للتفسير بالاعتماد على ظواهر سواء .

وبعد أن تم هذا الجمع بين الظواهر الحركية والصوتية والحرارية ، جاء اكتشاف عدد من الظواهر الأخرى ، هي الظواهر الكهربائية والمغناطيسية . وبصدها نجح جيمس كليرك ماكسويل J.C. Maxwell ، عام ١٨٧٢ ، في أن يربط ضمن نظرية واحدة بين كل الظواهر الكهربائية والمغناطيسية مع الظواهر الضوئية . فالضوء ، في رأي ماكسويل ، ليس سوى موجة كهرومغناطيسية electromagnetic . وهكذا أصبحت الفيزياء ، عند هذه المرحلة من تطورها ، تحوي ثلاثة فصول هي : قوانين الحركة ، وقوانين الكهرباء والمغناطيسية ، وقوانين الثقالة .

وفي حوالي عام ١٩٠٠ تم استنباط نظرية في بنية المادة اتخذت اسم النظرية الإلكترونية ، وتقول بأن الذرات تحوي جسيمات دقيقة جداً مشحونة بالكهرباء . ثم حدث تعديل تدريجي لهذه النظرية كي تأخذ بالحسبان وجود نواة ثقيلة في مركز الذرة تدور حولها إلكترونات خفيفة جداً .

وقد باءت بالفشل كل المحاولات التي جرت لتفسير حركة الإلكترونات حول النواة بالاعتماد على قوانين الميكانيك (وفق النموذج الذي اعتمده نيوتن في حركة الكواكب حول الشمس) . وقد اتفق ، في ذلك الوقت تقريباً ، أن جاءت نظرية النسبية التي مازال يقال بأنها أحدثت ثورة في الفيزياء . لكننا ، حين نقارنها باكتشاف عدم صلاحية قوانين نيوتن في تفسير الظواهر الذرية ، تبدو نظرية النسبية ذات مفعول متواضع . فالظواهر في السوية الذرية غريبة لدرجة أن استنباط منظومة نظرية تقوم مقام قوانين نيوتن استغرق وقتاً طويلاً وعملاً شاقاً . ولم يكن فهم ما

(*) إن الكلمتين ، ثقالة وتثاقل ، تعنيان في الواقع شيئاً واحداً هو تجاذب الأشياء فيما بينها بسبب محتوياتها من المادة ، كالتجاذب الأجسام نحو الأرض والتجاذب بين الشمس وكواكبها . (المترجم)

يحدث على مستوى الذرة إلا على حساب التخلي عن الأفكار المستمدة من الحس الشائع ، وقد وجب الإنتظار حتى عام ١٩٢٦ لتوطيد نظرية متكاملة غريبة جديدة على الفكر السائد ، تتيح تفسير السلوك العجيب للإلكترونات في أحشاء المادة . وعلى هذه النظرية المضطربة التي بدت ظاهرياً فقط غير راسخة الأساس ، أطلق اسم النظرية الكمومية ، وهو اسم مشتق من كلمة «كم quantum» التي تترجم تماماً عن ذلك الوجه من الطبيعة الذي يناقض الحس الشائع . ذلك هو الوجه الذي سأحدثكم عنه .

وبسبب أن هذه النظرية الكمومية قد فسرت أيضاً الوقائع الكيميائية ، كاتحاد ذرتين من الهيدروجين مع ذرة من الأكسجين لتشكيل جزيء من الماء ، فقد حلت محل كل النظريات التي كانت قبلها تحاول فهم الكيمياء . وبذلك أصبحت النظرية ، في هذه السوية العميقة ، فرعاً من فروع الفيزياء .

ومن نجاحها في تفسير الكيمياء تبوأَت النظرية الكمومية فوراً مكانة مرموقة . لكن مسألة التفاعل بين المادة والضوء ظلت على حالها . والواقع أن نظرية مكسويل في الكهرباء والمغناطيسية أصبحت بحاجة إلى تعديلات جذرية تهدف إلى التوفيق بينها وبين نظرية الكم ، وبذلك انبثقت ، في حوالي عام ١٩٢٩ ، النظرية الكمومية في التفاعل بين المادة والضوء ، تلك النظرية التي أعطيت الاسم المرعب : الإلكتروديناميك الكمومي .

لكن هذه النظرية لم تعدم صعوبات اعترضت طريقها . والواقع أننا لو حسبنا بوساطتها مقداراً ما بشكل إجمالي ، أي بتقريب أولي ، لحصلنا على نتيجة مقبولة تماماً . لكننا لو حاولنا ، انطلاقاً من ذلك ، إجراء حساب أدق لتبين لنا أن التصحيح الواجب إدخاله - الذي نتوقع منه أن يكون صغيراً جداً (كما هي الحال ، مثلاً ، عندما نضيف حداً آخر إلى سلسلة طويلة من الحدود متقاربة) - كبير جداً في الواقع ، بل لانهائي الكبر! وهذا معناه أن من المستحيل إجراء حسابات تتجاوز دقة معينة .

لنقل بهذه المناسبة إنني رويت لكم حتى الآن قصة ما أسمىه «قصة فيزياء الفيزيائيين» ، القصة التي يروونها فيما بينهم .. وهي مغلوطة على الدوام . إنها نوع من الأساطير اتفق عليه الفيزيائيون ، وراحوا يحكونه لطلابهم الذين يحكونه بدورهم لطلابهم ، وهكذا دواليك . وليس له بالضرورة علاقة وثيقة بتاريخ الفيزياء الحقيقي .. الذي أجهله طبعاً! .

وعلى كل حال ، وبالعودة إلى «قصتي» هذه ، استطاع ديراك Dirac أن يقيم ، انطلاقاً من نظرية النسبية ، نظرية نسبية relativistic للإلكترون لم تأخذ في الحسبان الكامل كل النتائج الناجمة عن التفاعل بين الإلكترون والضوء . كان الإلكترون في نظرية ديراك يملك عزماً moment مغنطيسياً - وهذا يجعله شبيهاً بمغنطيس صغير - قيمته ، كما تخرج من حسابات معقولة ، تساوي 1 . لكن نفرأ من التجريبيين أثبتوا ، عام ١٩٤٨ ، أن القيمة الحقيقية لذلك العزم المغنطيسي ، لا تساوي 1 ، بل 1,00118 (بارتياب قدره 3 على الرقم الأخير) . كان من المعروف والمؤكد أن الإلكترون والضوء يتفاعلا ، فألقى ذلك ظلاً من الشك بأن القيمة التي حسبها ديراك ليست صحيحة تماماً ، وكان يُعتقد أن بالإمكان تصحيحها بمساعدة الإلكتروديناميك الكمومي . وعلى هذا كانت المفاجأة كبيرة حين تبين بالحساب ، في هذه النظرية الكمومية ، أن العزم المغنطيسي للإلكترون لا يساوي 1,00118 بل قيمة لا نهائية الكبر! .

وفي عام ١٩٤٨ حللنا ، جوليان شوينغر J. Schwinger وسين إيتيرو توماناغا S. I. Tomanaga وأنا ، مسألة حساب الكميات الفيزيائية في الإلكتروديناميك الكمومي ، وكان شوينغر أول من حسب العزم المغنطيسي للإلكترون وفق هذه القواعد الجديدة . فوجد له القيمة 1,00116 القريبة من القيمة التجريبية قريباً أباح لنا الأمل في أننا كنا على الطريق الصحيح . وهكذا صار لدينا أخيراً نظرية كمومية في الكهرباء والمغنطيسية تتيح حساب المقادير الفيزيائية . وهي النظرية التي سأشرحها لكم .

إن لنظرية الإلكتروديناميك الكمومي اليوم من العمر أكثر من خمسين عاماً ، وقد تم التحقق منها تجريبياً على نحو متزايد الدقة ، في شتى الظروف التجريبية . وأستطيع الآن أن أؤكد لكم بكل فخر عدم وجود فرق معنوي بين النظرية والتجربة! .

ولإعطاءكم فكرة عن الدقة في هذه المطابقات التجريبية أكتفي بذكر بعض النتائج العددية الحديثة . لقد أعطت قياسات العزم المغنطيسي للإلكترون القيمة 1.001 159 65221 (بارتياب قيمته 4 على الرقم الأخير) ؛ أما النظرية فتتنبأ بالقيمة 1.001 159 65246 (بارتياب أكبر بخمس مرات تقريباً) . ولكي تشعروا بمدى الدقة التي ينطوي عليها هذا الوفاق ، أسوق لكم المقارنة التالية : إن هذه الدقة هي من رتبة الدقة في القيمة التي نحصل عليها لدى قياس المسافة بين لوس أنجلوس ونيويورك

بإرتياب لا يزيد عن ثخن شعرة واحدة ، وهذا يعطيكم فكرة عن درجة الدقة التي توصلنا إليها في خلال السنين الخمسين الماضية ، سواء على صعيد التجربة أو النظرية . ولنذكر في هذا السياق أنني لم أتعرض حتى الآن إلا لقيمة عددية واحدة ، لكن هناك مقادير فيزيائية أخرى يمكن حسابها بفضل الإلكتروديناميك الكمومي وقياسها بدقة . والشواهد التجريبية تتناول أبعاداً تذهب من مئة ضعف من حجم الأرض إلى عشير حجم نواة الذرة . وأنا لم أذكر هذه الأرقام إلا لكي أذهلكم وأجعلكم تشعرون بأن هذه النظرية قريبة من الهدف ؛ وسأشرح لكم ، في هذه المحاضرات ، كيف تجري هذه الحسابات .

لكنني أحب قبل ذلك أن أذهلكم أكثر قليلاً ، وذلك بأن أريكُم اتساع مجال الظواهر التي يتيح الإلكتروديناميك الكمومي تفسيرها . والواقع أن من الأسهل أن نبدأ من النهاية فنقول إن هذه النظرية تتيح توصيف كل ظواهر العالم الفيزيائي ، باستثناء المفعولات الثقالية (تلك التي تمسك بكم جالسين على كراسيكم - وبتعبير أصح : إن ما يمسك بكم جالسين على كراسيكم مزيج من الثقالة والمجاملة) وظواهر النشاط الإشعاعي (التي تخص مرور نواة الذرة من سوية طاقية إلى سوية أخرى ، وبتعبير أشمل : الفيزياء النووية) . فإذا استثنينا الثقالة والفيزياء النووية ، ماذا يبقى؟ يبقى أمامنا ظواهر كاحتراق البنزين في محركات السيارات وتشكل الفقاعات والزبد ، وقساوة الملح أو الفولاذ . . حتى أن البيولوجيين (علماء الحياة) يحاولون اليوم أن يفسروا ، ما أمكنهم ، الحياة بالاعتماد على الكيمياء ، وقد ذكرت سلفاً أن أساس الكيمياء هو الإلكتروديناميك الكمومي .

وعلي هنا أن أوضح النقطة التالية : عندما أقول إن الإلكتروديناميك الكمومي يفسر كل ظواهر دنيا الفيزياء ، فإن ذلك ليس صحيحاً تماماً . فمعظم الظواهر الشائعة حولنا تعتمد على عدد هائل من الإلكترونات ، وأذهاننا تجد صعوبة في استيعاب مثل هذا التعقيد . لكننا نستطيع ، في مواجهة مثل هذه الظروف ، استخدام النظرية لصنع فكرة عما لا بد أن يحدث إجمالياً وللتحقق من أنه قد حدث بالفعل إجمالياً . ومن جهة أخرى ، إذا نفذنا تجربة مخبرية تتناول عدداً صغيراً من الإلكترونات ، في ظروف تجريبية بسيطة ، وإذا حسبنا ، بدقة هذه المرة ، ما يجب أن يحدث ، ثم قسنا ، بدقة أيضاً ، ما حدث ، عندئذ يتضح لنا ، مهما كانت التجربة ، أن الإلكتروديناميك الكمومي يعمل على ما يرام .

ونحن ، الفيزيائيين ، نقف على الدوام بالمرصاد لكل ما يمكن أن يظهر من خلل في النظرية . إنها قاعدة اللعبة : إن الجانب المثير في النظرية هو ما يمكن أن يظهر فيها من خلل . أما فيما يخص الإلكتروديناميك الكمومي فلم نجد فيه أي خلل حتى الآن . إنه ، بمعنى ما ، لؤلؤة الفيزياء النظرية التي نتباهى بها أكثر من أي شيء آخر .

والإلكتروديناميك الكمومي يُتخذ أيضاً نموذجاً للنظريات الجديدة التي تسعى لتفسير الظواهر النووية ، أي تلك التي تحدث ضمن نواة الذرة . فإذا اعتبرنا العالم الفيزيائي مسرحاً للتمثيل نقول إن الممثلين هم الإلكترونات ، خارج النواة ، والكواركات quarks والغليونات gluons . الخ - عشرات الجسيمات الأخرى - ضمن النواة - على الرغم من أن هؤلاء الممثلين جميعاً ذوو مظاهر متخالفة جداً ، فإن بينهم في «لعبهم» قرابة في الأسلوب واضحة جداً ، مما يمكن تسميته بالأسلوب الكمومي ، وهو أسلوب عجيب ، بكل معنى الكلمة ، ومحدد السمات جداً . وسأذكر لكم في المحاضرة الأخيرة ، بضعة أمور عن الجسيمات النووية ، أما في الوقت الحاضر فاكثفي ، بغية المزيد من التبسيط ، بالكلام عن الفوتونات - وهي جسيمات الضوء - وعن الإلكترونات ، لأن المهم ، بهذا الصدد ، هو أسلوب سلوك هذه الجسيمات ، ذلك هو بيت القصيد .

ها أنتم إذن قد عرفتُم الآن ما سأحدث عنه . وهنا يخطر بالبال السؤال التالي : هل ستفهمون ما سأقوله لكم؟ ذلك أن من يأتي ليستمع إلى محاضرة علمية يعتريه الشك في إمكانية فهمه لما سيقال فيها ، لكنه يأمل أن يرى محاضراً ذا ربطة عنق جميلة مثلاً ، أو لطيف المنظر (فاينمان لا يضع بالطبع ربطة عنق) .

إن ما سأرويه لكم ليس سوى ما أعلمه للطلاب الذين يحضرون أطروحة في الفيزياء . فهل تعتقدون حقاً أنني أستطيع أن أشرح لكم كل ذلك بما يتيح لكم فهمه؟ الجواب ، بكلام الجد هو كلا : من المؤكد أنكم لن تفهموا . ولكنكم ستقولون لي : لماذا إذن كل هذا العناء الذي سنتجشمه؟ ولماذا تقضي كل هذا الوقت أمامنا ، إذا كنا لن نفهم شيئاً مما ستقوله؟ .

الحق أنني وضعت نصب عيني أن أستطيع استبقاءكم هنا للأصغاء إليّ . لأن الطلاب ، ولا أخفي عنكم شيئاً ، لا يفهمون ، هم أيضاً ، في هذا الأمر شيئاً . لماذا؟ الجواب ، بكل بساطة ، هو لأنني ، أنا بالذات ، لا أفهم من هذا الأمر شيئاً ولا أحد فوق ذلك يفهم منه شيئاً .

أحب ، بهذا الصدد ، أن أقول شيئاً عما أقصده بكلمة «فهم» . إن عدم فهم

محاضرة ما يعود إلى أسباب كثيرة منها، مثلاً، أن المحاضر قد لا يحسن التعبير - لا ينجح في التعبير عما يريد قوله، أو يقول عكس ما يريد، فيجد السامع صعوبة في الفهم، وهذا محذور شائع. أما أنا فسأبذل كل ما بوسعي كي لا تزعجكم لكنتي النيويوركية .

وهناك سبب شائع آخر: إن المحاضر، لا سيما إذا كان فيزيائياً، يستخدم كلمات من اللغة الدارجة في معان غير مألوفة . والواضح أن الفيزيائيين يستخدمون غالباً كلمات من اللغة الدارجة - «عمل Work» «فعل action» «طاقة energy»، وحتى كلمة «ضوء light» كما سنرى - في معنى تقني . فعندما أستعمل كلمة «عمل» في الفيزياء، لا أقصد بها معناها بالضبط في لغة الحياة اليومية . وقد يحدث لي، في هذه المحاضرات، أن استخدم كلمة من اللغة الدارجة دون أن أشعر أنني أقصد بها معنى خاصاً . ولئن كنت سأبذل كل جهدي لتحاشي هذه الأمور (وهذه، على أية حال مهنتي) إلا أن هذا النوع من الخطأ يصعب تحاشيه .

هذا وقد يحدث أن لا تفهموا ما سأقوله لكم عن طريقة عمل الطبيعة، وسبب ذلك أنكم لا تدركون لماذا تعمل بتلك الطريقة، ولكن يجب أن تعلموا أن ما من أحد يستطيع أن يعلل لماذا تصرف الطبيعة بذلك الشكل، لا بشكل آخر .

ومن الأسباب التي تعوق «الفهم» أذكر أخيراً أنني سأقول لكم شيئاً لن تستطيعوا، بكل بساطة، أن تصدّقوه، شيئاً سترفضونه ولن تحبّوه . عندئذ تتشكل غشاوة تجعلكم تتوقفون عن الإصغاء . سوف أصف لكم الطبيعة؛ وإذا لم يعجبكم ذلك فستجدون صعوبة في فهمه . إنها مسألة كثيراً ما صادفها الفيزيائيون . ولكثرة ورودها اقتنعوا في النهاية بأن قضية الإعجاب بها أو عدمه ليست بذات شأن . لكن المهم أن تتيح النظرية المطروحة نبوءات تتفق مع التجربة . فليس المطلوب من النظرية أن تكون مستساغة على صعيد الفلسفة، أو أن تكون سهلة على الفهم، أو أن تكون مقبولة لدى الحس الشائع . ونظرية الإلكتروديناميك الكمومي تقدم للطبيعة صورة غير معقولة على صعيد المفهوم السائد لكنها تتفق تماماً مع التجربة . وعلى هذا أمل أن تقبلوا الطبيعة كما هي: شيئاً غير معقول .

أما أنا فأمارس تسلية في الالتزام بأن أشرح لكم «لا معقولات» الطبيعة، لأنني أجد في ذلك متعة كبيرة . أما أنتم فأرجو منكم أن تصموا أسماعكم بحجة أنكم لا تستطيعون أن تصدقوا أن الطبيعة يمكن أن تنطوي على كل هذه الغرائب . اصغوا لي

إلى النهاية : وأملني كبير في أن تشعروا ، بعد انتهاء هذه المحاضرات ، بنفس المتعة التي أشعر بها .

كيف أتدبر أمري كي أشرح لكم ما لا أشرحه للطلاب إلا بعد أن يقضوا أربع سنوات في دراسة الفيزياء؟ سأجيب عن هذا السؤال مستعيناً بالتشبيه التالي . كان هنود المايا يولون اهتماماً كبيراً لشروق وغروب كوكب الزهرة الذي كانوا يسمونه «نجمة الصبح» تارة و«نجمة المساء» تارة أخرى ؛ كان ما يهمهم من الزهرة أن يعرفوا موعد ظهورها في السماء . وبعد رصدها عدة سنوات توصلوا إلى ملاحظة أن ست دورات زهرية تعادل تقريباً ثمانين «سنين اسمية» ذات ٣٦٥ يوماً (كان حكماء المايا يعرفون أن سنتهم الاسمية لا تساوي بالضبط السنة الحقيقية ذات الفصول ، حتى أنهم حسبوا الفرق بينهما) . ولإجراء الحسابات اخترعوا تركيباً من قضبان ونقاط تمثل الأعداد (بما فيها الصفر) ؛ كانوا قد وجدوا منظومة قواعد تتيح لهم التنبؤ بالحساب ، لا بمواعيد شروق الزهرة وغروبها فحسب ، بل وبظواهر سماوية أخرى ، كخسوفات القمر .

في ذلك العصر كان نفر قليل من كهان المايا قادرين على إجراء حسابات على تلك الدرجة من التعقيد . تخيلوا أننا طلبنا من أحد هؤلاء الكهان أن يشرح لنا كيف يجب أن نعمل كي نحسب الموعد القادم لظهور الزهرة كنجمة صبح . ولنفترض أيضاً أننا لم نذهب قط إلى المدرسة وأننا نجهل عملية الطرح . فكيف يتدبر الكاهن أمره ليشرح لنا كيف نقوم بهذه العملية؟ .

إنه يستطيع حتماً أن يُعلمنا كيف تتشكل الأعداد مستعيناً بالقضبان والنقاط ، ثم القواعد الخاصة بالطرح . لكنه يستطيع أيضاً أن يشرح لنا معناها فيقول : «إذا كنتم تريدون طرح ٢٣٦ من ٥٨٤ فخذوا ٥٨٤ حبة فاصولياء وضعوها في وعاء ؛ ثم أخرجوا من الوعاء ٢٣٦ حبة وضعوها جانباً . عُدوا بعدئذ الحبات التي بقيت في الوعاء . عندئذ تجدون نتيجة طرح ٢٣٦ من ٥٨٤ » .

عندئذ يمكن أن تعترضوا قائلين : يا لها من عملية! نعدّ حبات الفاصولياء ، ثم نعدّ حبات أخرى ونضعها جانباً ، ثم نعدّ ... ، يا ويلي من الضجر! .

ويجب الكاهن : «لهذا السبب بالضبط اخترعنا جملة قواعد تعمل بالقضبان والنقاط» . قد تبدو لكم هذه القواعد مصطنعة ؛ لكنها «حيل» تتيح الحصول على النتيجة بشكل أكثر فعالية من عد حبات الفاصولياء . فالمهم هو أننا نحصل على

النتيجة ذاتها بالطريقتين ؛ فنحن نستطيع ، كي نتنبأ بمواعيد الزهرة ، أن نعدّ الحبات (هي عملية طويلة ومملة ، لكنها سهلة على الفهم) أو أن نطبق القواعد ، «الحيل» (وهي عملية أسرع بكثير ، لكنها تستدعي أن نكون قد أمضينا عدة سنوات على مقاعد المدرسة) .

وبموجز القول ، مادمنّا غير مجبرين على أن نعمل فعلاً عملية الطرح ، يمكن أن نكتفي بفهم كيفية إجرائها ، وليس في هذا صعوبة تذكر . وأنا سأنسج على هذا المنوال : سأشرح لكم ما يعمل الفيزيائيون فعلاً كي يتنبؤوا بسلوك الطبيعة ؛ لكنني لن أعلمكم كل القواعد «الحيل» التي تتيح لكم أن تفعلوا مثل كل ما يفعلون . فلكي تتوصلوا إلى نبوءات معقولة في ميدان الإلكتروديناميك الكمومي يجب عليكم ، كما سترون ، أن ترسموا حشداً من الأسهم الصغيرة . ويحتاج الطلاب إلى سبع سنوات جامعية كي يتعلموا اللعب بهذه الأسهم الصغيرة بشكل مُجد .

أما نحن فسنقفز فوق هذه السنوات السبع الجامعية دفعة واحدة . وآمل أن أجعلكم قادرين ، بعد أن أشرح لكم مباشرة الإلكتروديناميك الكمومي وأن أفصل لكم ما نعمله فعلاً ، على فهم هذه النظرية بأحسن مما يفهم معظم الطلاب ! .

لنعد إلى مثال المايا . نستطيع أن نسأل الكاهن : لماذا تساوي خمس دورات زهرية قرابة ٢٩٢٠ يوماً ، أي ثماني سنوات؟ إنه يستطيع أن يسرد لنا كوم نظريات تشرح لنا لماذا كان ذلك ، كأن يقول : «إن ٢٠ عدد مهم في نظامنا العددي ؛ وإذا قسمنا ٢٩٢٠ على ٢٠ نجد ١٤٦ ، والعدد ١٤٦ يتلو مباشرة عدداً آخر يمكن أن نتمثله بطريقتين مختلفتين كمجموع مربعي عددين . .» . لكن الواقع أن هذه النظرية لا علاقة لها بالزهرة . ونحن نعلم اليوم أن نظريات من هذا القبيل لا تقود إلى أي شيء . ومرة أخرى لن نهتم بالنظريات التي تشرح لماذا تتصرف الطبيعة كما تتصرف ؛ ولا يوجد نظرية جيدة من هذا القبيل .

إن كل ما فعلته حتى الآن هو أنني وضعتكم في جو نفسياني يشجعكم على الإصغاء إلي ؛ وهذا ضروري جداً لنجاح مهمتي . حسناً ، والآن هيا بنا؟ .

سنبدأ بالضوء . إن أول شيء اكتشفه نيوتن ، عندما بدأ يهتم بالضوء ، هو أن الضوء الأبيض مزيج من عدة ألوان . وبوساطة موشور زجاجي حلل الضوء الأبيض إلى ألوان شتى ؛ ثم فصل حزمة من لون معين - ولنقل الأحمر ، مثلاً - أسقطها على موشور آخر ، فرأى أن هذا اللون لم يمكن تحليله إلى مجموعة ألوان أخرى ، بل بقي أحمر . فاستنتج أن الضوء الأبيض مزيج من ألوان مختلفة كل منها لون صاف ، أي غير قابل للتحليل .

(الواقع أن الضوء ذا اللون الصافي يمكن أيضاً تجزئته ، لكن بطريقة مختلفة ، إلى ضوئين من اللون نفسه ، يقال إنهما «مستقطبان Polarized» بشكلين مختلفين . لكن هذا الجانب من الضوء غير جوهري لفهم الإلكتروديناميك الكمومي ؛ ولن أهتم به ، ولو كان ذلك يجعل شرح النظرية ناقصاً بعض الشيء . ولن يؤثر هذا التبسيط على تفهم ما سأقوله لكم . لكنني حريص على أن أذكر ما أهمله في كل مرحلة) .

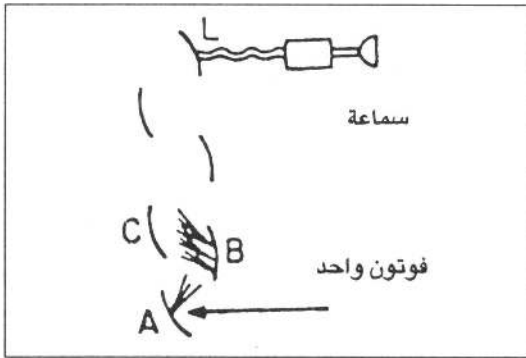
عندما أتكلم عن «الضوء» فإن كلامي لا يقتصر على الضوء المرئي فحسب ، المتدرج من الأحمر إلى الأزرق . ذلك أن الضوء الذي نراه ليس سوى جزء صغير من طيف واسع جداً ، على غرار ما نعلم من أن سُلَّم (طيف) الأصوات يمتد خارج السُلَّم الموسيقي من طرفيه كليهما . وكل «نغمة» من «سُلَّم الأنغام الضوئية» تتعين بعدد خاص بها اسمه التواتر Frequency (يسميه بعضهم تردداً ، والمذيعونذبذبة) . ومع تزايد التواتر يتغير لون الضوء المرئي من الأحمر إلى البرتقالي فالأصفر فالأخضر فالأزرق فالبنفسجي ، ثم إلى ما نسميه فوق البنفسجي وهو ضوء لا نراه ، لكنه يؤثر في بعض أفلام التصوير ؛ فهو أيضاً ضوء ذو تواتر أعلى من أن تتحسس به العين البشرية . (لنطأطأء إذاً من غلواتنا : فما نستطيع ان نكشفه بحواسنا ، بعيوننا ، ليس سوى جزء من هذا العالم!) وإذا تزايد التواتر إلى أكثر من ذلك ندخل في مجال الأشعة السينية X-rays ، ثم أشعة غاما gamma ، إلخ . وإذا تناقص التواتر ، بدءاً من الأحمر ، ندخل في مجال ما نسميه تحت الأحمر (أمواج الحرارة ، وهي ضوء لا نراه أيضاً ، لكنه يؤثر في الأفلام الحساسة) ، ثم أمواج التلفزيون والراديو . وهذا كله عندي «ضوء» . لكنني ، في معظم الأمثلة التي أسوقها ، سأستخدم ضوءاً أحمر صافياً ، ويجب أن لا تنسوا أن الإلكتروديناميك الكمومي نظرية تنطبق على الطيف الضوئي كله ، وتحكم كل ما يحدث في أعماق تلك الظواهر .

كان نيوتن يعتقد ان الضوء مصنوع من جسيمات ، وكان مصيباً (رغم أن المحاكمات الفكرية التي قادته إلى هذه النتيجة كانت خاطئة) . ونحن اليوم على يقين من أن الضوء مصنوع من جسيمات ، لأننا نملك أجهزة حساسة جداً تُصدر «تكة» كلما اخترقها شعاع ضوئي ، حتى ولو كانت شدته ضعيفة جداً : فالتكات هي هي ، لكن عددها يتناقص : فالضوء يشبه إذن قطرات المطر (وقطرات الضوء تسمى «فوتونات») ولقطرات كل لون معين من الضوء الصافي وحيد اللون «مقاسات» متساوية .

الواقع أن العين البشرية حساسة جداً : إذ تكفي خمسة فوتونات أو ستة لتهييج

خلية عصبية من شبكتيها كي ترسل إشارة كهربائية إلى الدماغ . ولو كانت عملية التطور الحيوي قد استمرت إلى أبعد من ذلك ، بحيث تجعل العين ذات حساسية أكبر بعشر مرات ، لما احتجنا لهذه المناقشة ، لأننا كنا سنشعر بالضوء الصافي الضعيف جداً ، وذلك بشكل سلسلة ومضات قصيرة متقطعة وذات شدة واحدة .

قد تتساءلون عن كيفية كشف فوتون واحد . إن أحد الأجهزة المستخدمة لهذا الغرض يسمى المضاعف الفوتوني photomultiplier ؛ وسأشرحه لكم باختصار . عندما يسقط فوتون على صفيحة معدنية A (القسم السفلي من الشكل ١) ، فإنه يكسر الرابطة (الضعيفة) التي تمسك بأحد الإلكترونات ذرة من المعدن : ينجذب بعدئذ هذا الإلكترون إلى الصفيحة B (وهي تحمل شحنة كهربائية موجبة) ، ويكون الاصطدام بها عنيفاً بما يكفي لاقتلاع ثلاثة إلكترونات منها أو أربعة . ثم ينجذب كل واحد من هذه الإلكترونات بالصفيحة الثالثة C (التي تحمل شحنة موجبة أيضاً) ويحرر إلكترونات أخرى ، وهكذا دواليك يتضاعف عدد الإلكترونات المتحررة من صفيحة إلى أخرى حتى يبلغ المليارات بعد عشر صفائح أو اثنتي عشرة ، فيسقط بهذه الصورة على الصفيحة الأخيرة تيار كهربائي يمكن كشفه بسهولة ؛ إذ يمكن تضخيمه وإرساله إلى سماعة فيحدث «تكة» مسموعة . وهكذا ، من أجل كل فوتون وارد على المضاعف الفوتوني تصدر «تكة» ذات شدة معينة .



شكل (١)

المضاعف الفوتوني . يتيح هذا الجهاز كشف الفوتونات فرداً فرداً ، الفوتون الوارد على الصفيحة A يقتلع إلكترونات تجذبها الصفيحة B ، التي تحمل شحنات كهربائية موجبة ، فيقتلع منها إلكترونات أخرى تجذبها الصفيحة C المشحونة إيجابياً أيضاً . وهكذا دواليك تتوالى هذه العمليات ، صفيحة بعد أخرى ، حتى يبلغ عدد الإلكترونات مليارات تضرب الصفيحة الأخيرة L فتولد تياراً كهربائياً يقوم بتضخيمه تركيب كهربائي معروف . وهذا المضخم موصول بسماعة عادية تُصدر «تكة» صوتية تنبئ عن الفوتون الأولي . لا تختلف شدة «التكة» من فوتون وارد لآخر .

فإذا أحطنا ، بعدة مضاعفات فوتونية ومن كل الجهات ، منبعاً ضوئياً ضعيفاً يرسل ضوءاً في كل الاتجاهات ، فيسقط الضوء على أي من هذه المضاعفات مسبباً في كل مرة «تكة» ذات شدة واحدة . إن هذا التركيب يتصرف بطريقة «شيء أو لا شيء» ؛ أو بتعبير آخر : إذا صدرت عن أحد المضاعفات الفوتونية «تكة» في لحظة ما ، فإن المضاعفات الأخرى تكون صامتة تماماً في تلك اللحظة بالذات (إلا إذا اتفق أن صدر عن المنبع فوتونان معاً ، لكن هذا نادر جداً) . فالضوء لا يمكن تقسيمه إلى «أنصاف جسيمات» يذهب كل منها في اتجاه .

ومهما ألححتُ على أن الضوء مصنوع من جسيمات ، فلن أفي هذا الواقع حقه . ومن المهم جداً - لا سيما لمن دخل منكم المدارس وقيل له هناك إن الضوء يتصرف كموجة - أن تعلموا أن الضوء يتصرف كجسيمات . صدقوني : إن الضوء يتصرف في الحقيقة كجسيمات .

قد يعترض بعضكم مدعياً أن المضاعف الفوتوني ، الذي يكشف الضوء ، هو الذي يشعر به بذلك الشكل الجسيمي . لكن الواقع أن كل الأجهزة المصممة لتستطيع كشف الشدات الضوئية الضعيفة تعطي النتيجة نفسها : إن الضوء مصنوع من جسيمات .

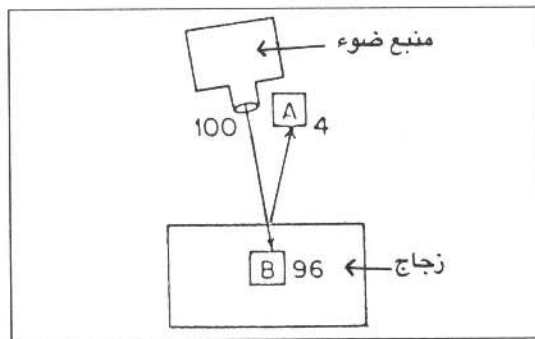
أعتقد أنكم تعرفون كل الخصائص التي يُبديها الضوء في الحياة اليومية ؛ تعرفون أنه يذهب في خط مستقيم ، وأنه ينكسر عند نقطة دخوله في الماء ، وأنه ينعكس «يرتد» عن المرآة بزاوية تساوي زاوية وروده عليها ، وأن بالإمكان تفكيك الضوء المزيج إلى ألوان شتى (لا بد أنكم قد رأيتم الألوان التي تظهر على سطح بقعة من الزيت طافية على سطح الماء) ، وأن أشعته تتقارب معا بعد إختراق عدسة زجاجية ، إلخ . إن هذه الظواهر ، المعروفة جيداً ، ستفيدني في إيضاح السلوك العجيب للضوء ؛ أي إنني سوف أفسر هذه الظواهر العادية بلغة الإلكتروديناميك الكمومي ، وذلك على غرار استخدام المضاعف الفوتوني لإبراز ظاهرة جوهرية لم تعتادوها ؛ إن الضوء مصنوع من جسيمات . وأمل الآن أن تكون هذه الظاهرة أيضاً قد أصبحت مألوفة لديكم .

أعتقد أنكم تعرفون جميعاً أن الضوء ينعكس جزئياً عن سطح مادة شفافة كالماء . تذكروا العديد من اللوحات الفنية الممتعة التي تصور بحيرة انعكس على سطحها ضوء القمر . فعندما نشاهد سطح الماء نرى في آن واحد (لا سيما في النهار) ما يوجد في أعماق الماء تحت سطحه ، وما ينعكس عن هذا السطح . وللزجاج سلوك مماثل : فإذا أشعلتم في وضح النهار مصباحاً في غرفة ونظرتم نحو الخارج ، ترون في آن

واحد الأشياء الموجودة في الخارج وخيال المصباح (خافتاً) في زجاج النافذة . وهذا يثبت أن الضوء ينعكس جزئياً بفعل سطح الزجاج .

قبل أن أستمّر في هذه المسيرة أحب أن ألفت انتباهكم إلى تبسيط أعمده الآن وسوف أصلحه فيما بعد . عندما أقول : إن الضوء ينعكس جزئياً بفعل الزجاج ، أفترض أن الضوء لا ينعكس إلا بفعل سطح هذا الزجاج . فالواقع أن قطعة الزجاج مخيفة التعقيد ؛ إنها تحوي عدداً هائلاً من الإلكترونات مضطربة في كل الاتجاهات ، ومن شأن الفوتون الذي يسقط عليها أن يتفاعل مع كل الإلكترونات الموجودة في قطعة الزجاج - وليس فقط مع تلك الموجودة عند السطح ؛ وهذا يجعل الفوتونات والإلكترونات تؤدي رقصة من نتائجها أن يجري كل شيء وكأن الفوتون لا يتعامل إلا مع سطح الزجاج . وعلى هذا الأساس ، وبغية التبسيط ، سأفترض أن هذا هو الذي يحدث ؛ وسأشرح لكم فيما بعد ما يحدث حقاً في الزجاج ، وستفهمون لماذا لا يغيّر هذا الافتراض شيئاً .

سأشرح لكم الآن تجربة تدهشكم بنتيجتها . تتلخص هذه التجربة بإرسال فوتونات من لون واحد - ولنقل الأحمر - على قطعة من الزجاج . الفوتونات صادرة عن المنبع S ، وأضع مضاعفاً فوتونياً في A (شكل ٢) ، بحيث يلتقط الفوتونات التي عانت انعكاساً عن سطح الدخول إلى الزجاج . ولكي أقيس عدد الفوتونات التي تتوغل في الزجاج اضع مضاعفاً فوتونياً آخر في B ضمن الزجاج . لا تبالوا بالصعوبات التي ندللها لوضع هذا المضاعف الفوتوني ضمن الزجاج ، ولكن اسألوا أنفسكم بالأحرى عن نتيجة هذه التجربة .

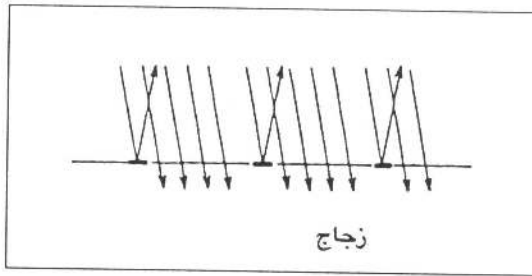


شكل (٢)

تجربة تتجلى فيها ظاهرة الانعكاس الجزئي عن سطح الزجاج ، إن 4 فوتونات فقط ، من أصل كل مئة فوتون تتجه من المنبع إلى الزجاج عمودية عليه ، ترتد عن سطح الزجاج إلى المضاعف الفوتوني A . أما الـ 96 فوتوناً الأخرى فتخترق السطح ذاهبة إلى المضاعف الفوتوني الآخر B .

الواقع أن من بين كل 100 فوتون تصل عمودياً إلى سطح الزجاج، لا ينعكس عنه نحو A سوى 4 فوتونات، ويذهب الباقي، 96 فوتوناً، إلى B. ففي هذه الحالة بالذات تكون نسبة «الانعكاس الجزئي»، عن سطح الدخول في الزجاج، مساوية 4٪؛ ويتوغل الباقي، أي 96٪، ضمن الزجاج. فنحن منذ الآن نصادف الصعوبة الأولى. كيف يتسنى للضوء أن لا ينعكس إلا جزئياً، في حين أنه يمكن لكل فوتون أن يذهب إما إلى A، وإما إلى B؟ فما هو المعيار الذي «يقرر» الفوتون بموجبه أن يذهب إما إلى A وإما إلى B؟ قد لا تبدو صيغة هذا السؤال ذات شأن، لكن هذا الواقع ذو شأن كبير. لأن من واجبتنا أن نجد تفسيراً له. إننا في هذه الظاهرة نقرأ تحير نيوتن قبلنا في أمره.

نستطيع، لتفسير ظاهرة الانعكاس الجزئي هذه، أن نتخيل عدة نظريات. يمكن أن نفكر مثلاً بأن سطح الزجاج يتألف، بنسبة 96٪ منه، من «ثقوب» يمر الضوء عبرها، ومن حواجز صغيرة مادية، بنسبة 4٪، تردّ الفوتون إلى حيث أتى (شكل ٣). كان نيوتن أول من فهم أن هذا ليس التفسير الحقيقي^(١). وستصادف بعد قليل خاصية للانعكاس الجزئي جد عجيبة، شيئاً يبعث على الجنون لدى كل من يحاول أن يتمسك بنظرية من قبيل «ثقوب وحواجز» (وكذلك بأية نظرية يبدو فيها شيء من «المعقولة» مهما صغّر).



شكل (٣)

لتفسير ظاهرة الانعكاس الجزئي يمكن أن نتصور نظرية تقول بأن سطح الزجاج يتألف أساسياً من «ثقوب» تسمح بمرور الضوء، ومن بضعة «حواجز» متفرقة تعكس الضوء.

(١) كيف توصل نيوتن لهذه النتيجة؟ لقد كتب: «السبب أنني أستطيع أن أصقل الزجاج». ربما تتساءلون كيف أن إمكانية صقل الزجاج تعني أن سطحه غير مؤلف من ثقوب وحواجز. كان نيوتن يوصل بنفسه عدساته ومراياه، ويعلم أن الصقل يعني خدش الزجاج بواسطة مسحوق أنعم فأنعم. ولدى الاستمرار في تنعيم هذه الخدوش يتحول سطح الزجاج من العتامة التي كان فيها «لأن الضوء يتناثر عن جدران وقيعان الخدوش الخشنة العميقة» إلى الشفافية التي يكتسبها (لأن الخدوش القليلة العمق تدع الضوء يمر). فاستنتج من ذلك أن الضوء لا يمكن أن يتأثر بوجود اختلالات صغيرة غير مرتبة، سواء كانت خدوشاً أم ثقوباً أم حواجز. بل إن العكس هو الصحيح: إن الخدوش الأنعم (وبالتالي الثقوب والحواجز ذات الأبعاد المتساوية في النعومة) لا تؤثر في الضوء بتاتا. وعمل هذا يكون تفسير الانعكاس الجزئي بثقوب وحواجز صغيرة، عند سطح الزجاج، غير صحيح.

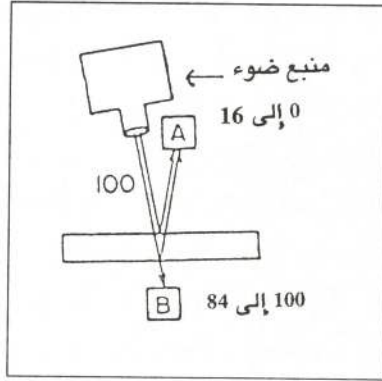
يمكن أيضاً أن نتخيل أن الفوتونات تمتلك آلية داخلية ، نوعاً من «المسندات» يمكن أن يعمل بهذا الاتجاه لا بذلك ، بحيث أن الفوتون يخترق السطح عندما يكون الفوتون «مدبراً» بشكل مناسب وينعكس عنه في غير ذلك . ولكي نمتحن هذه النظرية ، لنحاول أن «نُصْفِي» الفوتونات بمصفاة تمنع من اختراقها الفوتونات غير «المدبرة» بشكل مناسب .

ومن أجل ذلك نضع بين المنبع وسطح الزجاج سلسلة من صفائح زجاجية . عندئذ لن يصل إلى سطح الدخول في قطعة الزجاج ، سوى الفوتونات «المدبرة» بشكل مناسب ، لأن غير المدبرة تنحجب بمصافي سلسلة الصفائح التي تعترض طريقها ؛ وعندئذ يجب على كل هذه الفوتونات المدبرة أن تخترق سطح قطعة الزجاج ، وأن لا ينعكس عنه أي منها . لكن ، لسوء حظ هذه النظرية (نظرية الفوتونات المدبرة سلفاً) ، ليس هذا هو الذي يحدث : بل إن نسبة ما ينعكس منها ، عن سطح قطعة الزجاج ، تظل على قيمتها ، 4% ، رغم مصفاة الصفائح الزجاجية مهما كان عددها .

بالرغم من كل جهودنا ، في تخيل نظرية «معقولة» لفهم كيف «يقرر» الفوتون اختراق السطح أو الانعكاس عنه ، يتبين أن من المستحيل التنبؤ عما سيحدث للفوتون الواحد عندما يصل إلى سطح الزجاج . وإذا صدقنا الفلاسفة ، بأن الأسباب نفسها لا تقود إلى النتائج نفسها ، يصبح التنبؤ مستحيلًا والعلم ذا حدود . فنحن هنا أمام سبب واحد معين - واقع أن الفوتونات المتماثلة تسقط ، بزاوية ورود واحدة ، على وجه القطعة الزجاجية الوحيدة نفسها - يقود إلى مفعولين مختلفين - انعكاس أو نفاذ - ولا يمكن أن نتنبأ إذا كان الفوتون سيذهب إلى A أو سينفذ إلى B . وكل ما نستطيع أن نقوله هو أن 4 فوتونات ، وسطياً ، من أصل 100 فوتون واردة ، ستنعكس عن سطح الزجاج . فهل يجب أن نستنتج أن الفيزياء ، ذلك العلم الذي يمتاز بصحته ، قد نزلت إلى درك أن لا تحسب سوى احتمالات ، وأنها عاجزة عن التنبؤ بالضبط عما سيحدث؟ نعم ، إن الفيزياء مضطرة للتخفيف من غلوائها وطموحاتها . فالواقع هكذا ، ولا حيلة لنا فيه . ولا تبيح لنا الطبيعة أن نحسب سوى الاحتمالات . لكن العلم لم يجد بهذا الواقع حدوده! .

إذا كان الانعكاس الجزئي عن سطح ذا شأن يثير الدهشة ، فإن الانعكاس الجزئي عن سطحين متوالين يثير الجنون . وإليك السبب . لنتخيل إجراء تجربة أخرى تهدف إلى قياس نسبة الانعكاس الجزئي للضوء عن سطحين . وفي هذا

السبيل نستبدل بالقطعة الزجاجية السابقة صفيحة زجاجية رقيقة جداً ذات وجهين متوازيين تماماً. لنضع الآن المضاعف الفوتوني B بعد السطح الثاني باتجاه الحزمة الواردة. عندئذ تستطيع الفوتونات أن تنعكس إما عن وجه الدخول («الوجه الأمامي») وإما عن وجه الخروج («الوجه الخلفي»). نلتقط الفوتونات المنعكسة عن الوجهين في المضاعف A، أما الأخرى، النافذة من الصفيحة، فتذهب إلى المضاعف B. (شكل ٤) فلأول وهلة نتوقع بأن 4% فقط من الضوء ينعكس عند سطح الدخول، وأن وجه الخروج سيعكس بدوره 4% من الـ 96% الباقية، أي أن مجمل نسبة الانعكاس ستكون (تقريباً) 8%. وهكذا نتوقع أن ينعكس، نحو A، قرابة 8 فوتونات من أصل كل 100 فوتون تأتي من المنبع.



شكل (٤)

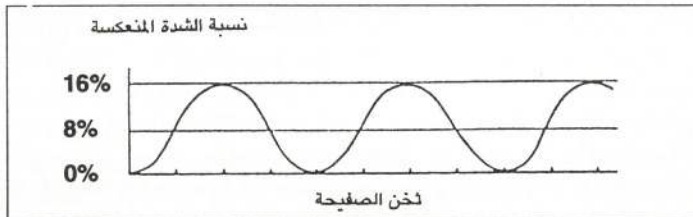
تجربة تُري الانعكاس الجزئي عن وجهي صفيحة متوازيين، الفوتونات الداخلة في المضاعف الفوتوني A كانت قد انعكست إما عن وجه الدخول في الصفيحة (بالوجه الأمامي) وإما عن وجه الخروج منها (الوجه الخلفي). يمكن للفوتون أيضاً أن يخترق السطحين (الصفيحة كلها) ويدخل في المضاعف الفوتوني B. بحسب ثخن الصفيحة تتغير نسبة الفوتونات المرتدة إلى A بين 0 و 16%، إن من الصعب تفسير هذه النتيجة بنظرية «معقولة»، كذلك المذكورة في الشكل ٣ (ثقوب وحواجز). الأمور كلها تجري كما لو أن الانعكاس عن سطح معين يمكن أن ينطفئ أو أن يتضخم بوجود سطح ثان.

لكننا إذا أجرينا التجربة فعلاً نتبين أن عدد الفوتونات التي تصل إلى A لا يساوي 8 إلا نادراً. فمع بعض الصفائح الزجاجية يمكن لهذا العدد أن يبلغ 15 أو 16 فوتوناً تصل بانتظام إلى A، أي ضعف العدد المتوقع. وفي مقابل ذلك، ومع صفائح أخرى، لا يصل إلى A عملياً سوى فوتون واحد أو اثنين. وهناك من الصفائح ما يعطي نسبة وصول إلى A تساوي 10%، وأخرى تعدل الانعكاس الجزئي تماماً! فكيف نفسر هذه الأمور الغريبة؟ إننا، إذا درسنا ظروف هذه التجربة بعناية، نتبين، بعد التأكد من جودة كل صفيحة نستخدمها ومن تجانس زجاجها، أن تلك الصفائح لا تختلف فيما بينها إلا بالثخن.

وللتأكد من هذا الدليل الأولى - من أن نسبة ما ينعكس عن الوجهين تتعلق بثخن الصفيحة المستعملة - نجري التجارب التالية . نبدأ باستعمال صفيحة رقيقة جداً بقدر الإمكان ؛ بعد أن نعدّ الفوتونات الواصلة إلى A ، من أصل كل 100 تأتي من المنبع ، نبذل هذه الصفيحة الأولى بصفيحة أخرى ، من الزجاج نفسه ولكن أكبر ثخناً بقليل ، ونعدّ من جديد الفوتونات الواصلة إلى A (من أصل 100 من المنبع) . وهكذا دواليك ، مع صفائح أكبر فأكثر ثخناً . فما الذي نحصل عليه ؟ .

نلاحظ ، من أجل الصفيحة الأولى الرقيقة جداً ، أن عدد الفوتونات التي تترد نحو A يكاد يكون معدوماً (واحداً على الأكثر بين الفينة والأخرى) . وأن من أجل صفيحة أثخن من الأولى بقليل نحصل على نسبة انعكاس أكبر ، وتتزايد هذه النسبة ، مقتربة من 8% المتوقعة ، بتزايد ثخن الصفيحة المستعملة شيئاً فشيئاً . لكننا نجد ، لدى ازدياد ثخن الصفيحة بأكثر من ذلك - عندما يصل إلى قرابة جزء من عشرة آلاف جزء من المليمتر - أن نسبة الانعكاس المقيسة تتجاوز 8% وتستمر في التزايد حتى تبلغ 16% ، ثم تتناقص مرة بـ 8% حتى تنعدم من جديد (إن نسبة الانعكاس تنعدم تماماً من أجل ثخن معين تماماً) . حاولوا الآن ، عبثاً ، أن تتخيلوا آلية من نوع «ثقوب وحواجز» لتفسير هذه العجائب ! .

إذا استمررنا في زيادة ثخن الصفيحة تعود نسبة الانعكاس إلى التزايد من جديد حتى تبلغ 16% ثم تتناقص إلى الصفر . وهكذا نحصل في خاتمة المطاف على ظاهرة دورية تتكرر قدر ما نشاء (شكل ٥) . كان نيوتن قد لحظ هذه الظاهرة الدورية (الاهتزازية) ، حتى أنه نفذ تجربة لم يمكن تفسيرها بالضبط إلا بافتراض أن الظاهرة تتكرر كما هي ٣٤٠٠ دورة . واليوم نستطيع باستعمال ضوء الليزر (وهو ضوء وحيد اللون صاف جداً) أن نلاحظ هذه الاهتزازات على مدى أكثر من مئة مليون دورة - وهذا العدد بثخن يصل إلى خمسين متراً! (ولئن كنا لا نلاحظ هذه الظاهرة في الحياة اليومية ، فما ذلك إلا لأن منابعنا الضوئية ليست وحيدة اللون عموماً) .



شكل (٥)

إن التجارب ، التي تقيس بعناية نسبة الانعكاس الجزئي بدلالة ثخن الصفيحة الزجاجية ، تدل على حدوث ظاهرة «تداخل» . كلما ازداد ثخن الصفيحة تغيرت نسبة الانعكاس ، بشكل دوري متناوب ، بين 0 و 16% دون أي اضمحلال .

يظهر في النهاية أن توقعنا للنسبة 8% صحيح وسطياً (لأن النسبة الملحوظة تتغير بين 0% و 16%)، لكنها لا تحدث بالضبط إلا مرتين فقط في الدورة الواحدة - وهذا يكاد يشبه ميقاتية معطلة تشير إلى الوقت الصحيح مرتين في اليوم. فكيف نفسر هذا الواقع الغريب، أي أن الانعكاس الجزئي يتعلق بثخن الصفيحة الزجاجية؟ وكيف نفسر أننا نحصل في حال سطح واحد على نسبة انعكاس تساوي 4% (كما رأينا في تجربتنا الأولى) وأنها، عندما نضع سطحاً ثانياً على مسافة مناسبة من الأول، «نُطفئ» الضوء المنعكس؟ وكيف نفسر أن «تضخم» نسبة الانعكاس بمجرد أن ننقل السطح العاكس الثاني ولو بمسافة قصيرة، وأن تبلغ 16% أحياناً؟ هل يجب أن نعتقد أن السطح الثاني يؤثر في الأول ويعدّل مقدّره على أن يعكس الضوء؟ وماذا يحدث لو وضعنا سطحاً ثالثاً؟

لو استخدمنا ثلاثة سطوح، أو حتى أي عدد من السطوح، فإن نسبة الانعكاس تتعدّل من جديد. والواقع أننا، مهما أضفنا من سطوح متوالية، لا نحصل على سطح يمكن أن نقول بأنه «الأخير». فهل يجب على الفوتون أن يخترق كل هذه السطوح قبل أن «يقرر» فيما إذا كان سينعكس عن أحدها أم لا؟.

لقد استنبط نيوتن نظرية قائمة بذاتها وذكية جداً كي يفسر هذه الظاهرة(*) . لكنه اضطر في النهاية إلى الاعتراف بأن نظريته لم تكن مُرضية .

لقد اقتضى تفسير ظاهرة الانعكاس الجزئي سنين طويلة من الانتظار قبل أن

(*) إن من حسن حظنا أن نيوتن كان مقتنعا بالطبيعة «الجسيمية» للضوء: لأن ذلك كشف لنا نوع المحاكمة التي يجب أن يلجأ إليها الذهن الذكي المتفتح عندما يسعى إلى تفسير ظاهرة انعكاس الضوء عن عدة سطوح متوالية. (إن أنصار النظرية الموجية في الضوء لم يصادفوا قط هذا النوع من المشاكل). كانت محاكمة نيوتن كما يلي. صحيح أن الضوء يبدو منعكساً عن السطح الأول، لكن الواقع غير ذلك بتاتا: أي أن الضوء لا يمكن أن ينعكس بهذا السطح. إذا لو انعكس الضوء به فلا نرى كيف يمكن أن «يأسره» السطح الثاني بعدئذ (عندما تكون المسافة بين السطحين ملائمة لانعدام الانعكاس). فالواقع إذن أن الضوء ينعكس بالسطح الثاني. يبقى أن نفسر لماذا تتحكم المسافة بين السطحين بنسبة الانعكاس. اقترح نيوتن الفكرة التالية: إن الضوء الساقط على السطح الأول يثير نوعاً من الموجة (أو من الحقل) تنتشر مع الضوء في آن واحد و «تُدبّره» بما يجعله ينعكس (أو لا ينعكس) بالسطح الثاني، والضوء يُبدي عندئذ «سورات» انعكاس (أو اختراق) متفاوتة تتغير شدتها بشكل دوري مع تغير ثخن الصفيحة الزجاجية.

لكن هذه الفكرة تنطوي على صعوبتين: أولاً، كيف نفسر المفعول الذي ذكرناه منذ قليل لسطح ثالث؟ ثانياً، الواقع أن الضوء ينعكس بسطح البحيرة، وهي ذات سطح واحد، فالضوء ينعكس حتماً إذن بالسطح الأول. لقد تصور نيوتن، لتفسير الانعكاس عن سطح واحد وحيد، أن الضوء «ميال إلى» الانعكاس. لكن قبول هذه الفكرة يقضي بافترض أن الضوء، عندما يصل إلى سطح ما، يعلم إذا كان هذا السطح وحيداً أم لا. لكن نيوتن لم يتوسع في هذه الصعوبات رغم أنه لم يجهلها. وفي عصره كان العلماء يرون مرور الكرام بالصعوبات التي تكتنف نظرية ما؛ كان الانزلاق سهلاً. أما اليوم فنحن، بعكس ذلك، نجهد في استخراج النقاط التي تطرح مشاكل في النظرية ولا تتفق مع النتائج التجريبية. وأنا بهذا القول لا أريد انتقاد نيوتن، بل أن امتدح الطريقة التي يتبعها الباحثون اليوم في تبادل المعلومات.

تأتي النظرية الموجية^(*) لتفسيرها بشكل مُرضٍ. وبعد ذلك بكثير أُجريت تجارب بضوء ضعيف جداً، فحان دور النظرية الموجية في ملاقات الصعوبات. ذلك أن المضاعفات الفوتونية ظلت تُصدر «تَكَات» كذي قبل، مهما أمعن المجرب في إضعاف الضوء، وكل ما حدث أن عددها يصبح أصغر فأصغر. وهكذا ظهر أن الضوء يتصرف كمجموعة جسيمات.

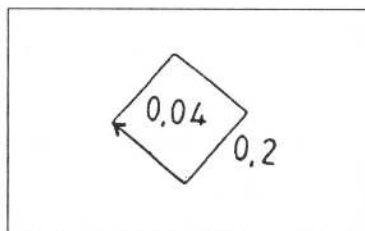
واليوم تتجلى الأمور على الشكل التالي: إننا لا نملك نموذجاً نظرياً يتيح تفسير ظاهرة الانعكاس الجزئي بسطحين؛ ولا نستطيع أن نحسب سوى احتمال أن يستقبل المضاعف الفوتوني فوتوناً منعكساً بفعل صفيحة زجاجية. وقد اخترت أن أبين لكم، في هذا المثال، كيف تعمل طريقة الحساب التي يقدمها لنا الإلكتروديناميك الكمومي. سأشرح لكم كيف «نَعُدُّ حبات الفاصولياء»، كيف يتدبر الفيزيائيون أمرهم للحصول على الجواب الصحيح. فأنا إذن لن أريكم كيف «يقرر» الفوتون أن ينعكس عن سطح الزجاج أو أن يخترقه. فهذا شيء لا نعلمه، وهو سؤال مطروح على الأرجح في غير موضعه. سأريكم فقط كيف نحسب، دون غلط، احتمال أن ينعكس الفوتون عن صفيحة زجاجية ذات ثخن معلوم؛ وهذا كل ما يقدر الفيزيائيون على حسابه! والطريقة التي يستخدمونها لحل هذه المسألة الخاصة جداً تشبه تلك التي تُستخدم في حل أية مسألة تنتمي إلى الإلكتروديناميك الكمومي.

والآن انتبهوا: أمسكوا بأنفسكم، اربطوا الأحزمة! وهذا ليس لأن ما سأشرحه لكم ذو صعوبة خاصة على الفهم، بل ببساطة، لأنه سيبدو لكم جد مثير للهِزء. احكموا بأنفسكم: كل ما في الأمر أننا نرسم أسهماً صغيرة على ورقة عادية! لا أكثر ولا أقل.

لا بد أنكم تتساءلون: أية علاقة يمكن أن توجد بين سهم نرسمه وبين احتمال أن يقع حادث ما؟ فإليك هي: إن من شأن قواعدها، التي تحكم طريقة «عدُّ حبات

(*) تقول هذه النظرية بأن الضوء أمواج يمكن أن تتضمن متراكبة، فإما أن تتميز بعضاً ببعض، وإما أن تتفانى. والحسابات في هذه النظرية تتفق تماماً مع نتائج تجارب نيوتن، وكذلك مع كل التجارب التي أُجريت خلال قرون بعده. ثم جاء عهد صنع أجهزة حساسة لكشف فوتون واحد. وكانت النظرية الموجية تنبأ أن «التَكَات» يجب أن تكون أضعف فأضعف. لكن الواقع أن لها كلها شدة واحد، لكن عددها يتناقص. ولم يكن يوجد نظرية قادرة على تفسير كل ذلك. ثم جاء وقت وُضِع فيه على المحك ذكاء الفيزيائيين: كان يقال إن الضوء يمكن أن يتصرف... حسب الظروف التجريبية، إما كموجة وإما كمجموعة جسيمات. وهذا ما دُعي باسم «المثنوية duality موجة/جسيم». ويمكن أن يقال عن ذلك العصر، بنوع من المزاح، إن الضوء موجة أيام الاثنين والأربعاء والجمعة، ومجموعة جسيمات أيام الثلاثاء والخميس والسبت. ويبقى الأحد للتفكير في الموضوع. وأنا أنوي هنا أن أبين لكم أن هذا السر قد انحلى اليوم نهائياً.

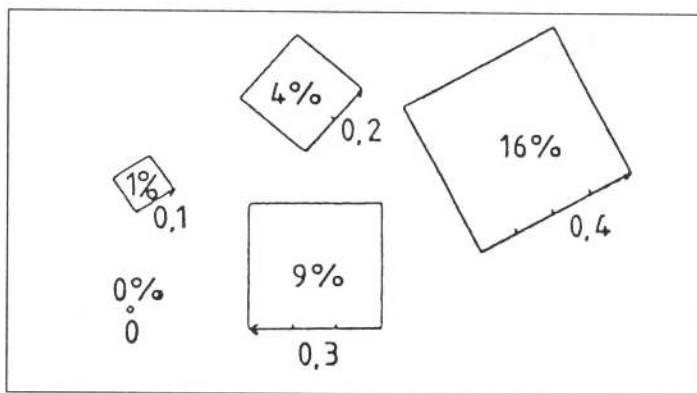
الفاصولياء» ، أن تجعل احتمال وقوع حادث ما مساوياً مُربع طول سهم ، لنضرب مثلاً على ذلك حالة تجربتنا الأولى (حين كنا نقيس نسبة الانعكاس الجزئي عن سطح وحيد، شكل (٢) . فقد وجدنا فيها أن احتمال وصول الفوتون إلى المضاعف الفوتوني A كان مساوياً 4% ؛ فيتعلق به سهم طوله 0.2 - لأن مربع 0.2 يساوي 0.04 (شكل ٦) .



شكل (٦)

الصفات المعجبة لظاهرة الانعكاس الجزئي أجبرت الفيزيائيين على التخلي عن الأمل في التنبؤ الدقيق وعلى الاكتفاء بحساب احتمال وقوع هذا الحادث أو ذاك . أما الطرائق المقترحة لهذا الغرض في الالكتروديناميك الكمومي فتقتضي برسم أسهم صغيرة على قطعة من الورق! واحتمال وقوع حادث معين يتمثل بمساحة المربع الذي طول ضلعه السهم المتعلق به . فالسهم الذي يمثل احتمالاً قيمته 0,04 (4%) ، مثلاً يكون طوله 0,2 .

في التجربة الثانية شكل (٤) ، حيث استعملنا صفيحة زجاجية رقيقة ذات ثخن متزايد ، كان المضاعف الفوتوني A يستقبل فوتونات انعكست إما عن وجه الصفيحة الأول وإما عن وجهها الثاني . فما نوع السهم الذي سنرسمه لتمثيل هذا الظرف؟ إننا نريد سهماً يتغير طوله بين الصفر و 0.4 كي يعطي ، عندما تُربَّعه ، احتمالاً يتغير بين الصفر و 16% حسب ثخن الزجاج (شكل ٧) .



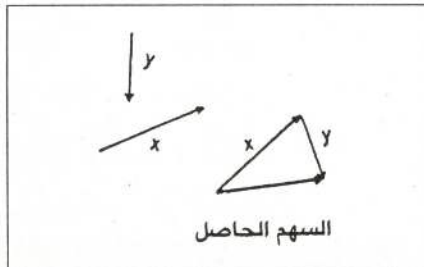
شكل (٧)

أسهم تمثل احتمالات تتغير من 0 إلى 16% ؛ أطوالها تتغير بالتوالي من 0 إلى 0,4

لنفحص شتى الخيارات المتاحة للفوتون في الذهاب من المنبع إلى المضاعف الفوتوني A . لما كنت قد افترضت ، بغية التبسيط ، أن الفوتون ينعكس إما عن سطح الدخول الأمامي وإما عن سطح الخروج الخلفي للزجاج ، كان عدد الخيارات المتاحة للذهاب إلى A اثنين . في هذه الحال نرسم سهمين اثنين - واحداً لكل خيار يمكن أن يحقق الحادث المقصود - ، ثم نركب هذين السهمين للعثور على ما نسميه السهم الحصيلة (أو الحاصل) الذي يمثل مربعه احتمال وقوع الحادث المقصود . إذا كان الحادث يمكن أن يقع بثلاثة خيارات ، يصبح علينا أن نرسم ثلاثة أسهم ثم نركبها للعثور على الحصيلة .

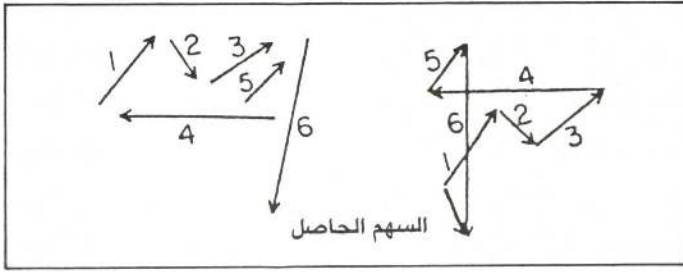
عليّ الآن أن أريكم كيف نركب الأسهم . لنفترض أننا نريد تركيب السهم المرموز له بـ x مع السهم المرموز له بـ y (شكل ٨) . لأجل ذلك يكفي أن نطبق ذيل السهم y على رأس السهم x (دون أن نغير اتجاه أي من السهمين) ، ثم أن نرسم سهماً يذهب من ذيل x إلى رأس y . هذه هي عملية التركيب كلها ، فهذا السهم الجديد هو الحصيلة . نستطيع بهذه الطريقة أن نركب أي عدد من الأسهم (نقول ، باللغة الفنية ، إننا «نجمع» الأسهم) ، ويمثل كل سهم اتجاهًا وطولاً جزءاً من خط متعرج (شكل ٩) ، ويشير السهم الحصيلة (ذلك الذي يذهب من ذيل السهم الأول إلى رأس السهم الأخير) إلى كيفية العمل للذهاب مباشرة إلى النقطة النهائية بخطوة واحدة .

ما هي القواعد التي تحكم طول واتجاه كل واحد من الأسهم التي يعطي جمعها السهم الحصيلة؟ ليس لدينا في الوقت الراهن سوى سهمين ، أولهما يمثل الانعكاس عن الوجه الأمامي ويمثل الآخر الانعكاس عن الوجه الخلفي .



شكل (٨)

الأسهم التي تمثل شتى أساليب وقوع الحادث المتاحة تُرسم ثم تُركب معاً وفق الطريقة التالية : نضع ذيل أحد الأسهم (هنا y) على رأس السهم الذي قبله (x) دون أي تغيير في اتجاه أي سهم ؛ نرسم السهم الحصيلة من ذيل السهم الأول x إلى رأس السهم الآخر y .



شكل (٩)

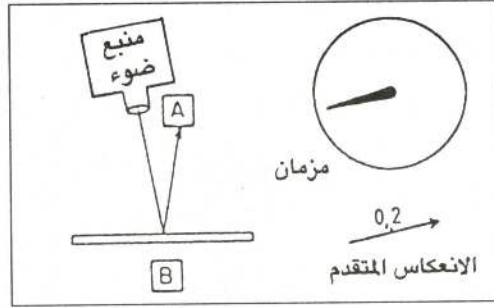
نستطيع ، بطريقة الشكل ٨ ، جمع أي عدد من الأسهم .

لنبدأ بالطول . لقد تبين لنا ، من التجربة الأولى (عندما وضعنا مضاعفاً فوتونياً في الزجاج) أن وجه الدخول يعكس 4% من الفوتونات التي يستقبلها . فنستنتج من ذلك أن أن طول السهم الأول ، الذي يمثل الانعكاس «الأمامي» ، يساوي 0.2 . كما أن الوجه الخلفي ، الذي يعكس أيضاً 4% من الضوء ، يمثل سهم طوله 0.2 أيضاً .

ولتعيين اتجاه كل سهم يجب أن نتخيل عملية قياس الزمن الذي يستغرقه كل فوتون في مساره . لتتخيل إذن مزامناً (كرونومتر chronometer) يدور عقربه بسرعة كبيرة . نحرر عقرب المزمان فور انطلاق الفوتون من المنبع ، فيدور عقربه عدة دورات في أثناء سير الفوتون (قراءة ١٥٠٠٠ دورة لكل سنتيمتر من المسار ، إذا كان الضوء أحمر) . نوقف عقرب المزمان فور وصول الفوتون إلى المضاعف الفوتوني . يكون العقرب عندئذ قد اتخذ اتجاهاً معيناً ؛ ذلك هو اتجاه السهم الذي يتعلق بهذا الفوتون .

عند هذه المرحلة يجب أن أضيف قاعدة أخرى كي يمكن حساب الجواب الصحيح . سنصطلح على أن نعكس اتجاه السهم كلما انعكس الفوتون عن وجه الدخول (أي الوجه الأمامي) . وبتعبير آخر : نعتمد أن السهم الممثل للفوتون المنعكس عن الوجه الخلفي يتخذ اتجاه العقرب ، ونعتمد الاتجاه المعاكس من أجل الفوتون الذي ينعكس عن الوجه الأمامي .

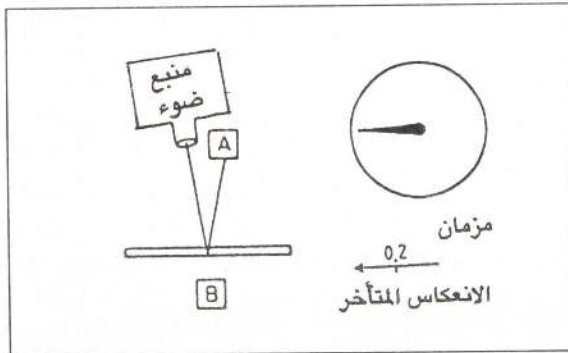
لنرسم الآن السهمين المتعلقين بالارتداد عن الصفيحة الزجاجية الرقيقة جداً . فلكي نرسم السهم المتعلق بالانعكاس عن وجه الدخول نتخيل فوتوناً يغادر المنبع (نطلق عقرب المزمان) فينعكس عن وجه الدخول ، ويصل أخيراً إلى A (نوقف العقرب) . نرسم بعدئذ سهماً صغيراً طوله 0.2 في الاتجاه المعاكس لاتجاه العقرب (شكل ١٠) .



شكل (١٠)

تحليل التجربة التي توضح الانعكاس بسطحين. إن الفوتون يستطيع الوصول إلى A بأسلوبين: مروراً بالوجه الأمامي أو مروراً بالوجه الخلفي. وبكل من هذين الطريقين نعلق سهماً طوله 0.2، أما اتجاه كل سهم فيتعين بالوضع الذي يقف وفقه عقرب «مزمان» يقيس الزمن الذي يستغرقه الفوتون على الطريق المسلك. لكن يجب علينا أن نعطي السهم المتعلق بالانعكاس عن الوجه الأمامي فقط اتجاهًا معاكسًا للاتجاه الذي يقف عنده العقرب لحظة وصول الفوتون إلى A.

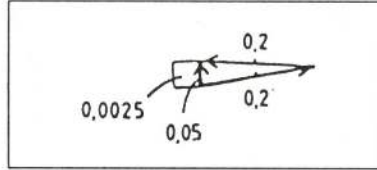
ولرسم السهم المتعلق بالانعكاس عن الوجه الخلفي نتخيل أن فوتوناً يغادر المنبع (نطلق العقرب) ثم يخترق وجه الدخول، ثم ينعكس عن الوجه الخلفي ليخرج بعدئذ من الصفيحة حتى يصل إلى A (توقف العقرب). في هذه الحال (صفيحة بالغة الرقة جداً) يكون اتجاه العقرب هو نفس الاتجاه تقريباً، الذي رسمناه منذ قليل. وسبب ذلك أن المسافة التي يقطعها هذا الفوتون، بين المنبع و A، تكاد تساوي (بسبب رقة الصفيحة) مسار الفوتون الذي ينعكس عن الوجه الأمامي: فهذان المساران لا يختلفان إلا بضعفي ثخن الصفيحة (وهو بالغ الصغر). وعلى ذلك نرسم سهماً ثانياً، طوله 0.2، في عكس اتجاه السهم الأول (شكل ١١).



شكل (١١)

الفوتون المنعكس بالسطح الخلفي الزجاج يستغرق، للذهاب من المنبع إلى A، زمناً أطول بقليل من زمن الفوتون الذي ينعكس عن الوجه الأمامي. وعقرب المزمان، عندما يقف، يشير إذن إلى اتجاه مختلف قليلاً عن الزمن المتعلق بالانعكاس الأمامي، والسهم المتعلق بالانعكاس الخلفي يُعطى نفس اتجاه توقف العقرب.

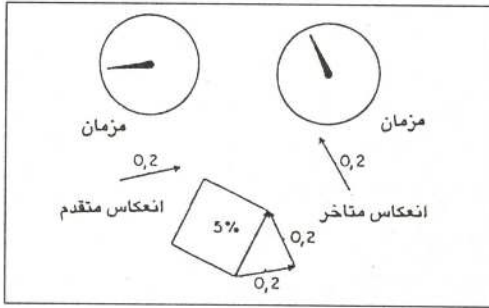
علينا الآن أن نجمع هذين السهمين (جمعاً «سهمياً»). ولما كان لهما طول واحد واتجاهان شبه متعاكسين ، يكون السهم الحاصيلة شبه معدوم ، ومربعه أقرب إلى الصفر منه . فاحتمال أن يرتد الضوء عن صفيحة زجاجية رقيقة جداً شبه معدوم إذن (شكل ١٢) .



شكل (١٢)

السهم الحاصيلة ، الذي يمثل مربعه احتمال الانعكاس عن وجهي صفيحة زجاج بالغة الرقّة جداً ، ينتج من جمع السهم المتعلق بالانعكاس الأمامي مع السهم المتعلق بالانعكاس الخلفي . طول السهم الحاصيلة هنا شبه معدوم .

إذا بدلنا الصفيحة الرقيقة جداً بأخرى أثخن بقليل ، فإن الفوتون الذي ينعكس عن الوجه الخلفي يقطع في الزجاج ، قبل أن يبلغ A ، مسافة أطول ؛ مما يتيح للعقرب أن يدور أكثر قليلاً قبل أن يتوقف ؛ فيصنع السهم المتعلق بهذا الفوتون زاوية محسوسة مع السهم المتعلق بالفوتون الذي ينعكس عن الوجه الأمامي ؛ فيكون السهم الحاصيلة إذن أطول مما كان في حالة الصفيحة البالغة الرقة ؛ وكذلك يكون مربعه (شكل ١٣) .

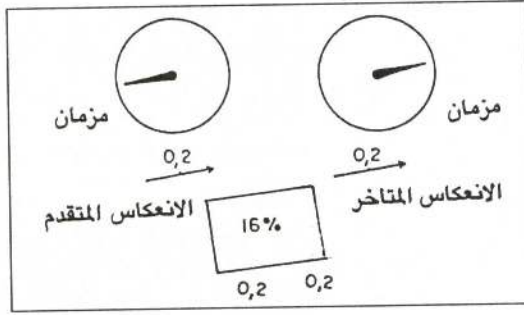


شكل (١٣)

السهم الحاصيلة المتعلق بثخن زجاجي أكبر بقليل يكون أطول قليلاً لأن الزاوية بين السهمين (سهم الانعكاس الأمامي وسهم الانعكاس الخلفي) أكبر . تزايد هذه الزاوية ناجم عن أن الفوتون المنعكس عن الوجه الخلفي يستغرق ، للذهاب إلى A ، زمناً يزداد بازدياد الثخن .

لنضرب مثلاً آخر ، صفيحة زجاجية ذات ثخن من شأنه أن يتيح لعقرب المزمان أن يدور نصف دورة بالضبط في أثناء الزمن الذي يستغرقه الفوتون ، الذي ينعكس عن الوجه الخلفي ، في الذهاب والإياب ضمن الصفيحة . في هذه الحالة

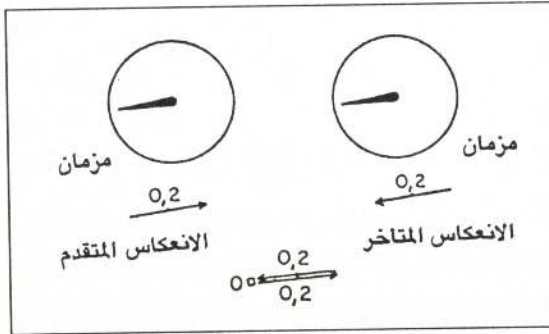
يكون اتجاه السهم المتعلق بالانعكاس عن الوجه الخلفي هو نفس اتجاه السهم المتعلق بالانعكاس عن الوجه الأمامي. فإذا جمعنا هذين السهمين (طول كل منهما 0.2) نجد أن طول السهم الحاصلة (شكل ١٤) يساوي 0.4 فيكون مُربعه، أي 0.16، الاحتمال المطلوب .



شكل (١٤)

عندما يكون للزجاج ثخن يجعل عقرب المزمان يقوم، من أجل الانعكاس الخلفي، بنصف دورة زيادة عن حال الانعكاس الأمامي، يصبح للسهمين اتجاه واحد؛ فيكون السهم الحاصلة مساوياً 0.4؛ أي أن احتمال وصول الفوتون إلى A يصبح 16%.

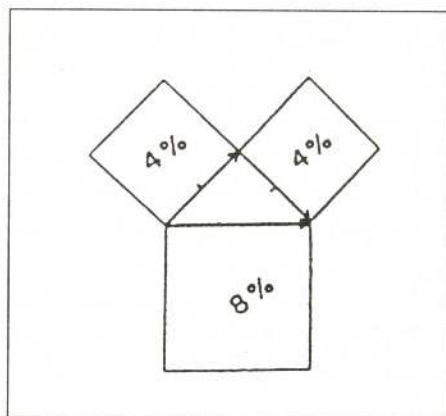
إذا زدنا في ثخن الصفيحة الزجاجية لنبلغ قيمة تجعل العقرب يدور دورة كاملة لدى اختراق الفوتون (الذي سينعكس عن الوجه الخلفي) للصفيحة في الذهاب والإياب، نحصل من جديد على سهمين باتجاهين متعاكسين، وبالتالي على سهم حاصل معدوم (شكل ١٥). لنستمر في زيادة ثخن الصفيحة. نجد عندئذ أن الظروف نفسها تتكرر كلما أصبح المسار الإضافي، لفوتون الوجه الخلفي، ذا قيمة تجعل العقرب يدور دورات إضافية كاملة على صفحة المزمان التخليفي .



شكل (١٥)

عندما يكون للزجاج ثخن يجعل العقرب يقوم، من أجل الانعكاس الخلفي، بدورة كاملة زيادة عن حال الانعكاس الأمامي، يصبح للسهمين اتجاهان متعاكسان؛ فيكون السهم الحاصلة معدوماً؛ أي أن الانعكاس نحو A يزول تماماً.

إذا كانت الزيادة في المسار تؤدي إلى ربع دورة ، أو ثلاثة أرباع إضافية ، فإن السهمين اللذين نجمعهما يشكلان زاوية قائمة ، فيكون السهم الحصيلة وتر مثلث قائم . ولما كان مربع الوتر يساوي ، بموجب نظرية فيثاغورس ، مجموع مربعي الضلعين القائمتين نجد ، في هذه الحالة ، احتمالاً يساوي فعلاً 8% ($4\% + 4\%$) (شكل ١٦) .

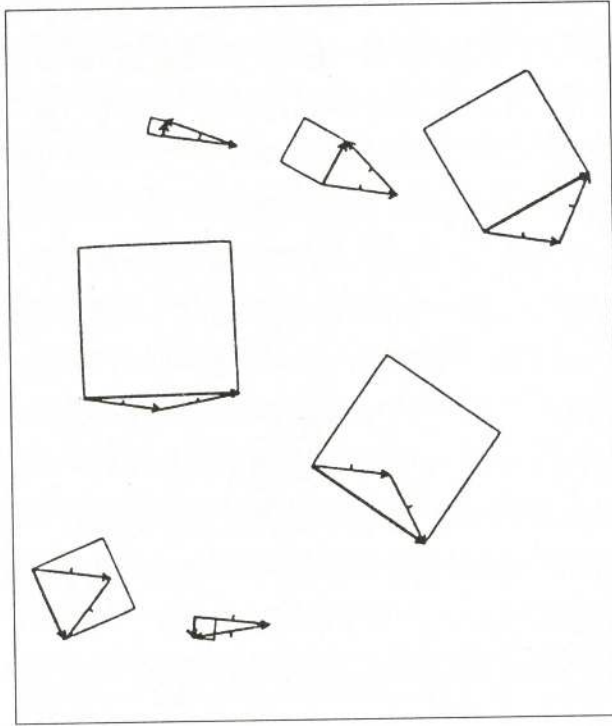


شكل (١٦)

عندما يتعامد سهم الانعكاسين ، الأمامي والخلفي ، يصبح السهم الحصيلة وترًا في مثلث قائم الزاوية ، ويكون مربعه مساوياً مجموع مربعي السهمين (نظرية فيثاغورس) .

لاحظوا أن السهم المتعلق بالانعكاس عن الوجه الأمامي لا يتغير اتجاهه من صفحية لأخرى (يفرض أن المسافة بين هذا الوجه ومنبع الفوتونات ثابتة) مهما كان ثخنها ؛ لكن الذي يتغير هو اتجاه السهم المتعلق بالانعكاس عن الوجه الخلفي ، فهو الذي يدور أكثر فأكثر بازدياد ثخن الصفحية . ومن ذلك ينتج تغير في الزاوية بين السهمين ، وبالتالي تغير في طول السهم الحصيلة ذو صفة دورية بين الصفر و 0.4 . فمربع هذا الطول يتغير ، هو الآخر ، بصورة دورية بين الصفر و 16% . وبيت القصيد هو أن هذا بالضبط ما وجدناه في شتى تجاربنا (شكل ١٧) .

وهكذا شرحت لكم كيف نحسب بدقة شتى خصائص الانعكاس الجزئي ، وذلك فقط برسم أسهم صغيرة على ورقة عادية . إن هذه الأسهم تمثل ، باللغة الفنية ، «سعات احتمال» . وفي هذه العبارة : «حساب سعة احتمال هذا الحادث أو ذاك» ، كثير من الأناقة والجدية ، لكنني أفضل أن أكون أكثر صدقاً معكم فأقول : إننا لم نفعل أكثر من تعيين السهم الذي مربع طوله يمثل احتمال وقوع الحادث المقصود .



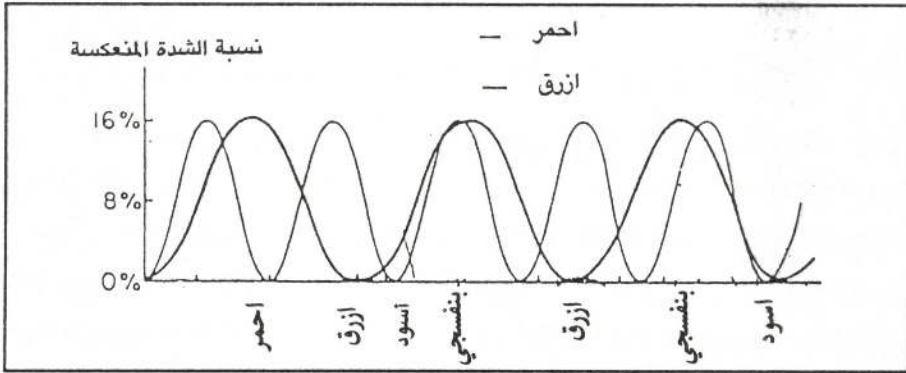
شكل (١٧)

لدى تزايد ثخن الزجاج تتزايد زوايا دوران المقرَّب الإضافية في حال الانعكاس الخلفي ، فتزداد الزاوية بين السهمين ويتغير طول السهم الحصيل ، ويتغير مربع طوله بشكل دوري بين 0 و 16 %.

أريد الآن أن أنهي هذه المحاضرة الأولى بالكلام عن ألوان فقاعة الصابون ، أو بالأحرى عن الألوان التي ترونها على سطح حومة ماء مُلوّث بزيت سيارة ، حيث من المفروض أن لا نرى سوى بقعة بُنية على خلفية موحلة ، في حين أننا نرى أشكالاً جميلة ملونة . والواقع أن الغشاء الزيتي الرقيق الممتد على وجه الماء يقوم مقام صفيحتنا الزجاجية الرقيقة . فهذا الغشاء يعكس نسبة معينة من كل ضوء يسقط عليه ؛ وهذه النسبة تتفاوت ، بحسب ثخن الغشاء ، بين الصفرة وقيمة عظمى . فإذا وجهنا ضوءاً أحمر صافياً على سطح الغشاء الزيتي نرى بقعاً حمراء تتشكل عليه مفصولة بعصابات سوداء ضيقة (تتعلق إذن بنسبة انعكاس معدومة) ؛ وهذا كله ناجم عن أن ثخن الغشاء ليس واحداً في كل مناطقه . وإذا أرسلنا ضوءاً أزرق صافياً على سطح الغشاء نرى بقعاً زرقاء مفصولة بعصابات ضيقة سوداء . فإذا أرسلنا

الآن مزيجاً من الأحمر والأزرق نرى مناطق تعكس بغزارة الضوء الأحمر ، وأخرى تعكس بغزارة الضوء الأزرق ، بحسب ثخن الغشاء عند نقطة الانعكاس ؛ لكننا نرى أيضاً مناطق تعكس الأحمر والأزرق معاً (فتعطي لوناً بنفسجياً) ، وأخرى ذات ثخن يطفىء انعكاس الأحمر والأزرق كليهما ، فتبدو سوداء إذن .

ولفهم هذه الظاهرة بشكل أحسن يجب أن نعلم أن دورة نسبة الانعكاس (بين الصفر و 16%) تتكرر في حال الأزرق بأكثر مما تتكرر في حال الأحمر . هذا لدرجة أن بعض الشحانات تعكس بغزارة إما الأحمر وإما الأزرق (ولما ، اتفاقاً ، الاثنين معاً) ؛ ومن أجل قيم أخرى للثخن معينة تماماً ينعلم انعكاس أحد اللونين (أو كليهما) (شكل ١٨) . ولئن كانت وتيرة تكرار دورة الأزرق أكبر من وتيرة تكرار دورة الأحمر ، فما ذلك إلا لأن عقرب الزمان المتعلق بالأزرق يدور بأسرع من عقرب الزمان المتعلق بالأحمر . والحق أن هذا هو الفرق الوحيد بين فوتون أزرق وفوتون أحمر (أو بين أي فوتونين من لونين مختلفين ، بما في ذلك الإشعاع السيني والراديوي) : إن عقريهما لا يدوران بسرعة واحدة .



شكل (١٨)

لدى تزايد ثخن الزجاج باستمرار تتغير دورياً نسبة الانعكاس الجزئي عن وجهيه بين 0 و 16% . هذا من أجل ضوء وحيد اللون . ولما كانت سرعة حركة عقرب الزمان التخيلي تختلف من لون لآخر (لكل لون مزمان خاص به) فإن الأدوار المتعلقة بشتى الألوان تتكرر بوتائر مختلفة . فلدي ورود ضوئين صافيين مختلفين في اللون (أحمر وأزرق مثلاً) على صفيحة زجاجية معاً ، نحصل ، بحسب ثخن الصفيحة في المنطقة المنظور إليها ، إما على انعكاس الأحمر وحده ، أو على انعكاس الأزرق ، أو على انعكاس اللونين معاً بنسبتين مختلفتين (معطين شتى ملامح البنفسجي) ، أو أخيراً انطفاء انعكاس اللونين كليهما (نرى منطقة سوداء) . وإذا كان ثخن الصفيحة من منطقة لأخرى (كحال بقعة زيت على وجه حومة ماء طيني) نرى كل مزائج هذين اللونين بنسب متفاوتة . وإذا كان الضوء الوارد أبيض (كضوء الشمس) يصبح عدد المزايج المتاحة لا نهائياً فنرى تشكيلة عديدة جداً من الألوان .

إننا نشاهد إذن ، باستخدام مزيج من الضوء الأحمر والضوء الأزرق ، مناطق حمراء وأخرى زرقاء وأخرى بنفسجية محفوفة بمناطق سوداء تفصل فيما بينها. وعندما يسقط ضوء الشمس ، وهو يحوي نوراً فيه الأحمر والأصفر والأخضر والأزرق ، على حومة الماء المكسو بغشاء من الزيت ، فإن المناطق التي تعكس بغزارة كلاً من هذه الألوان تتداخل بعضاً في بعض معطية بذلك تشكيلة غنية بمزائج الألوان التي تراها العين . ولو تفشّيت بقعة الزيت على سطح الماء لتغير تفاوت الشخانات بين شتى المناطق ، ولتغير معه توزع تشكيلة الألوان . ومن جهة أخرى لو نظرنا إلى هذه الحومة في الليل ، وهي مضاءة بأحد مصابيح الصوديوم (الصفراء) ، كتلك الموضوعه في أنفاق الطرق الكبرى ، لا نشاهد سوى مناطق صفراء مفصولة بعصابات سوداء (إن لهذه المصابيح خاصية إصدار ضوء من لون واحد) .

إن هذه الظاهرة (الألوان الناجمة عن انعكاس جزئي للون الأبيض عن سطحين متوالين) معروفة باسم التقرح (*) irisation ، ونصادفها في ظروف كثيرة . فلربما كنتم قد تساءلتم من أين تأتي ألوان أجنحة الطيور الطنانة والطواويس . وها انتم الآن تعرفون السبب . ومن جهة أخرى قد يكون من المفيد أن تعرفوا أن هذه الألوان الرائعة هي نتيجة عملية تطور . وعندما نستمتع اليوم بألوان الطواويس يجب أن نعترف بفضل كل تلك السلالات من الإناث ذات الريش الداكن التي برعت في اختيار أزواجها من الذكور . (إن الإنسان لم يفعل ، بعدئذ ، أكثر من تحسين الطرائق التي اختارتها الطواويس) .

وإنني أنوي ، في محاضرتي القادمة ، أن أشرح لكم كيف نستطيع ، بجمع تلك الأسهم الصغيرة ، أن نحسب بشكل صحيح ظواهر أخرى مألوفة لديكم ، كانتشار الضوء في خط مستقيم ، وقانون الانعكاس (زاوية الانعكاس تساوي زاوية الورود) ، وتجميع الضوء بوساطة العدسات ، الخ . وسترون أننا نستطيع بتلك الطريقة تفسير كل ما تعرفونه عن الضوء .

(*) من اسم «قوس قزح» ، وهو ظاهرة جوية معروفة ، ناجمة عن مثل هذه الأمور . (المترجم) .

الفصل الثاني

**الفوتونات
جسيمات الضوء**

الفوتونات: جسيمات الضوء

ها نحن الآن في ثاني محاضرات هذه السلسلة عن الإلكتروديناميك الكومومي . أظن أن أياً منكم لم يكن هنا في المرة السابقة . . نظراً لأنني جذّرت أن محاضرة اليوم ستكون عصيّة على الفهم . ولهذا السبب أبدأ بتذكير موجز لما قلته في محاضرتي الأولى .

لقد تكلمنا عن الضوء . وأول ما يهمني أن تعرفوه هو أن الضوء ينجلي عن مجموعة جسيمات : إذا اسقطنا على كاشف (مضاعف فوتوني) ضوءاً ضعيفاً جداً (وبالتدقيق من لون واحد) ، فإن هذا الكاشف يُصدر «تَكَات» ذات شدة متساوية ، وتكون أقل تكراراً كلما تناقصت شدة الضوء الوارد .

والشيء المهم الثاني ، والذي فصلتُ فيه الكلام في محاضرتي السابقة ، هو حدوث انعكاس جزئي ، بنسبة 4% وسطياً ، للفوتونات (وحيدة اللون) الواردة على سطح واحد زجاجي . وهذا بحد ذاته ظاهرة غامضة نوعاً ما ، لأن من المستحيل أن نتنبأ من هي الفوتونات التي ستنعكس عن ذلك السطح؟ وأيها التي ستتوغل في الزجاج؟ لكن اللغز يستفحل بمجرد أن نفحص ما سيحدث بوجود سطح ثانٍ على طريق الفوتونات : فبدلاً من النسبة 8% التي نتوقعها نلاحظ أن نسبة الانعكاس عن السطحين المتواليين تتفاوت ، حسب ثخن الزجاج ، بين الصفر و 16% .

لئن أمكن تفسير ظاهرة الانعكاس الجزئي العجيبة هذه ، عن سطحين متواليين وفي حال ضوء قوي ، في إطار نظرية موجية ، فإن هذه النظرية لا تقدم تفسيراً لصدور «تَكَات» من الكاشف تظل ذات شدة واحدة حتى لو خففنا تدريجياً من شدة الضوء . لكن الإلكتروديناميك الكومومي «يحلُّ» مفارقة هذه المثوية ، موجة / جسيم ، في طبيعة الضوء ، وذلك بفكرة أن الضوء (كما تنبأ نيوتن) مصنوع من جسيمات ، وينطوي هذا التفسير على عودة الفيزياء إلى تبني نظريات سبق لها أن تجاوزتها . وكل ما يمكن حسابه هو احتمال أن يصل الفوتون إلى الكاشف ؛ فالفيزياء لا تقدم أي نموذج مرضٍ لتفسير أسلوب حدوث الأشياء في عالم الواقع .

لقد شرحت أيضاً في محاضرتي الأولى كيف يحسب الفيزيائيون احتمال وقوع حادث ما . إنهم يقومون بعملية جمع فنية على أسهم صغيرة يرسمونها على قطعة من الورق . وقواعد هذه اللعبة هي :

- مبدأ أساسي مفاده أن احتمال وقوع الحادث يتعين بمربع طول سهم ، اسم هذا السهم هو : «سعة الاحتمال» . فالسهم الذي طوله 0.4 مثلاً ، يمثل احتمالاً قيمته 0.16 أو 16% .

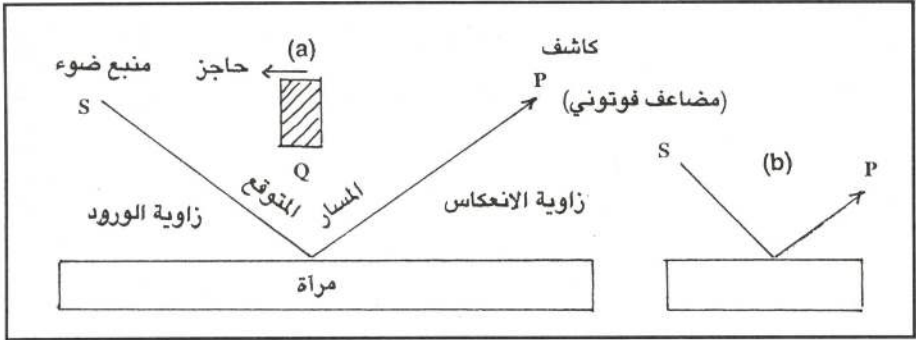
- قاعدة عامة تبين طريقة رسم الأسهم التي تمثل حادثاً يمكن أن يقع بعدة أساليب : يُرسم سهم من أجل كل واحد من هذه الأساليب المتاحة ، تُركب هذه الأسهم (يقال «تُجمع») بطريقة تقضي بـ «تعليق» ذيل كل رسمهم برأس السهم الذي سبقه ؛ و«السهم الحاصيلة» هو عندئذ السهم الذي يذهب من ذيل السهم الأول إلى رأس السهم الأخير ؛ ومربع طول هذا السهم يمثل احتمال الحادث المقصود .

وقد شرحت أيضاً ، في محاضرتي الأولى ، عدداً من القواعد تبين طريقة رسم الأسهم المتعلقة بالانعكاس الجزئي عن سطح زجاجي .
كل هذا موجز لما قلته في محاضرتي السابقة .

واليوم أنوي أن أبين لكم كيف تتيح رؤية العالم بهذه الصورة - المختلفة عن كل ما تعودتهم عليه ، للدرجة أنكم ربما تتمنون أن لا تعودوا إليها أبداً - تفسيراً لكل الخصائص المألوفة في سلوك الضوء : تساوي زاويتي الورود والانعكاس ، انعطاف (إنكسار refraction) مسار الضوء عند نقطة مروره من الهواء إلى الماء ، سير الضوء في خط مستقيم ، تجميع العدسة للضوء الذي يخترقها ، الخ . وتفسر هذه النظرية أيضاً ظواهر ضوئية أخرى قد لا تعرفونها . وبصراحة أقول لكم إنني ، حين تحضير هذه المحاضرات ، لقيت صعوبة كبيرة في مقاومة الرغبة في أن أشرح لكم كيفية العثور على كل خواص الضوء الأولية التي لقي أساتذتكم في التعليم الثانوي عناءً كبيراً في البرهان عليها ، كالانعراج diffraction مثلاً (أي سلوك الضوء في جوار حافة الظل) . ولما كان معظمكم لم تُتَح له فرصة ملاحظة هذه الأشياء بعناية ، فلن أتكلم عنها . لكنني أؤكد لكم (وبدون ذلك تصبح الأمثلة التي سأسوقها خادعة) أن كل الظواهر الضوئية التي نفحصها بالتفصيل يمكن أن تتفسر بمساعدة الإلكتروديناميك الكمومي . ومع ذلك لن أشرح لكم اليوم سوى أبسط الظواهر الضوئية وأكثرها شيوعاً .

لنتأمل إذن ، بادیء ذي بدء ، في مرآة مستوية ولنسأل أنفسنا كيف ينعكس الضوء عنها (شكل ١٩) . لدينا أولاً منبع ضوئي ، S ، يُصدر ضوءاً ذا لون واحد وضعيف الشدة (مانزال نستخدم ضوءاً أحمر) . تخرج الفوتونات فرادى . لدينا في P مضاعف فوتوني (كاشف) يبعد عن المرآة بمسافة بعد المنبع عنها (رسم الأسهم أسهل في هذه الحالة التناظرية) . سنحاول حساب احتمال صدور «تكة» من الكاشف تنبئ عن وصول فوتون إليه من المنبع . ولما كان بإمكان بعض الفوتونات أن تذهب مباشرة من S إلى P ، نضع حاجزاً Q ، يحول دون ذلك .

واضح أننا نتوقع عندئذ من الفوتون الذي يبلغ الكاشف أن يكون قد انعكس عن المرآة في منطقتها المركزية : فنحن لا نرى في الحق ما يمكن أن يُغري الفوتون ، الذي سينعكس عنها بين S و P ، بالذهاب إلى حافة المرآة .

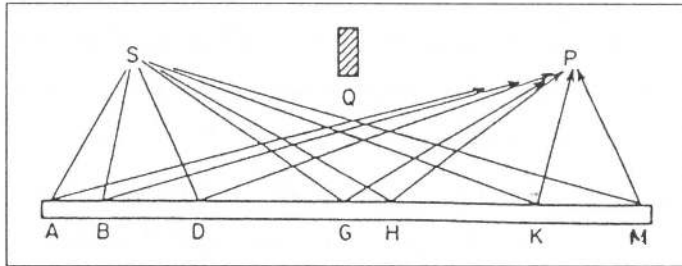


شكل (١٩)

تقول النظرية القديمة بأن المرآة تعكس الضوء بحيث تتساوى زاويتا الورد والانعكاس ، حتى ولو كان المنبع والكاشف ، كما في (b) ، غير موجودين في سوية واحدة .

ومع ذلك ، وبالرغم من انطباعنا بأن حافة المرآة لا دخل لها بالانعكاس بين S و P ، نسأل الإلكتروديناميك الكمومي رأيه في هذا الشأن . لنطبق قاعدة اللعبة : إن احتمال وقوع حادث معين يساوي مربع السهم المحصول عليه بجمع شتى الأسهم المتعلقة بكل الطرق المتاحة . ففي التجارب السابقة ، عندما كنا نقيس نسبة الانعكاس الجزئي عن سطحين ، لم يكن يوجد سوى طريقين متاحين للفوتون كي يذهب من المنبع إلى الكاشف . أما هنا فالطرق المتاحة للفوتون ذات عدد لا نهائي الكبير : لأنه يستطيع ، مثلاً ، أن يبدأ بالذهاب إلى A ، أو إلى B ، عند الحافة اليسرى للمرأة ، ثم ينطلق منها نحو الكاشف (شكل ٢٠) ، وبإمكانه أيضاً أن ينزو عن المرأة ، كما نتوقع ، عند G ؛ لكنه قادر أيضاً على أن يختار الانعكاس في K ، أو في M .

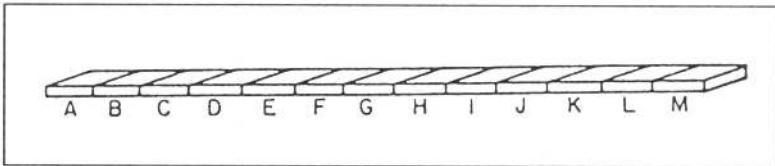
ستقولون لي حتماً إن كل هذا كلام فارغ ، إنني مخطئ ، لأن معظم الطرق التي ذكرتها لا تحقق تساوي زوايتي الانعكاس والورود . كلا ، إنني لست مخطئاً بل إن هذا هو سلوك الضوء فعلاً! أما كيف يتم ذلك فإليك شرحه .



شكل (٢٠)

تقول النظرية الكمومية بأن الضوء ينعكس عن كل أجزاء المرآة ، بين A و M ، بسعة احتمال واحدة .

لكي أجعل الأمور أسهل على الفهم أفترض أن المرآة تتألف ، بكل بساطة ، من عصابة طويلة ضيقة تذهب من اليسار إلى اليمين (أي أنني أهمل ، في الوقت الحاضر ، أن المرآة ذات امتداد آخر عمودي على مستوى الورقة ، شكل (٢١) . ورغم أن الضوء يستطيع في الواقع أن ينعكس عن عدد لا نهائي من المناطق على هذه العصابة ، سأقوم بعملية تقريبية تقضي أن أقسم المرآة إلى عدد لا متناه من المستطيلات الصغيرة وأن أعتبر أن كل واحد من هذه المستطيلات يتعلق بمسار واحد متاح للضوء (إن الحساب يصبح أكثر فأكثر دقة ، لكن أكثر فأكثر طويلاً ، كلما كانت مساحات المستطيلات صغيرة ، مما يزيد في عدد المسارات المتاحة) .

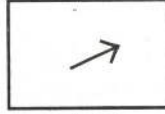


شكل (٢١)

لتسهيل الحساب نكتفي ، من سطح المرآة ، بعصابة ضيقة وطويلة نقسمها إلى مستطيلات صغيرة يُعَيَّن كل منها طريقاً متاحاً للضوء ، إن هذا التبسيط لا ينال من دقة عملية البحث عن الطريق الذي يسلكه الضوء .

والآن يجب أن أرسم سهماً من أجل كل مسار للضوء متاح . إن كل واحد من هذه الأسهم يتميز باتجاهه وطوله . سأعالج أولاً مسألة الطول . قد تتوقعون ، لأول وهلة ، أن يكون السهم المتعلق بالمسار المار بمنتصف المرآة ، G ، أطول بكثير من الأسهم الأخرى

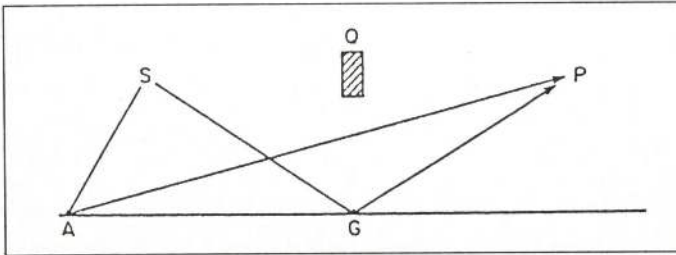
(لأنكم تعتقدون أن احتمال أن يسلك الضوء هذا الطريق أكبر بكثير من احتمال أن يسلك أي طريق آخر). ولكن كلا! فنحن لا نملك الحق في فرض هذه القاعدة الإضافية والواقع أبسط من ذلك بكثير: إن احتمال أن يسلك الفوتون أي طريق، للذهاب إلى الكاشف، يساوي عملياً احتمال أن يسلك أي طريق آخر. وعلى هذا ما علينا أن نرسم سوى أسهم ذات طول واحد عملياً، (الواقع أن من الواجب تصحيح ذلك، لأن المسافات والزوايا متفاوتة قليلاً من طريق لآخر، لكنني أهمل هذا التصحيح لأنه صغير الشأن جداً). لنمنح إذن طولاً اختيارياً مشتركاً لكل هذه الأسهم، وسأختار طولاً صغيراً جداً لأن علي أن أجمع عدداً كبيراً جداً من الأسهم (شكل ٢٢).



شكل (٢٢)

نعلق بكل طريق متاح للضوء سلوكه سهماً ذا طول معين نختاره.

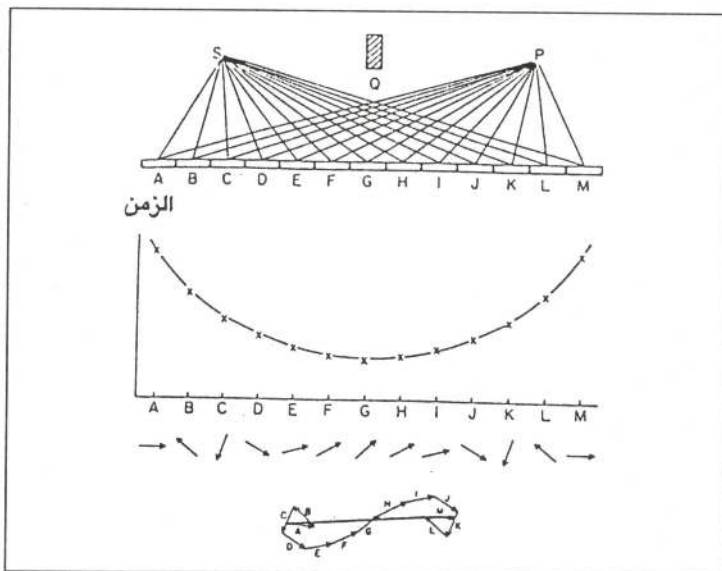
لئن كنا نستطيع، دون مجازفة كبيرة، أن نرسم أسهماً كلها ذات طول واحد، فإن عملية اختيار اتجاهاتها المتوالية تتطلب كثيراً من الحيلة، لأن الطرق المختلفة لا تستغرق زمناً واحداً (تذكروا ما قلناه في المحاضرة السابقة: إن اتجاه كل سهم يتعين باتجاه عقرب مزامن تخيلي يقيس الزمن الذي يستغرقه الضوء في كل طريق). وواضح أن الفوتون الذي يذهب إلى A، عند حافة المرآة، قبل أن ينعكس نحو الكاشف، يستغرق زمناً أطول مما يستغرق الفوتون الذي يمر بـ G (شكل ٢٣). تصوروا للحظة أنكم مستعجلون جداً وتريدون أن تذهبوا من المنبع إلى المرآة، ثم من المرآة إلى الكاشف. فإذا فكرتم قليلاً سترون أن الاندفاع دون تفكير نحو A ليس فكرة حسنة، ذلك أن ما يبقى عليكم أن تقطعوه بعد A إلى P طريق أطول بكثير، وأن من الأجدي بكثير أن تمروا بمنصف المرآة.



شكل (٢٣)

لكل الأسهم طول واحد (بتقريب أولي)، أما اتجاهاتها فتختلف كثيراً فيما بينها، لأن زمن سير الضوء يتعلق كثيراً بالطريق المسلك. فالطريق P A S مثلاً أطول بكثير من الطريق P G S.

إن تعيين اتجاه كل سهم يسهل كثيراً إذا رسمتُ ، تحت المرآة مباشرة (شكل ٢٤) مخططاً يمثل ، عند شاقول كل نقطة من المرآة ، الزمن الذي يستغرقه الفوتون المار بتلك النقطة . أحمل هذه الأزمنة على محور شاقولي : كلما كان الزمن الذي يستغرقه الضوء كبيراً ، كانت النقطة الممثلة له على مخططي الثاني ذات موقع أعلى .



شكل (٢٤)

إن كل واحد من الطرق المتاح للضوء سلوكها (أخذين في الحسبان التبسيطات التي ذكرناها) مرسوم في المخطط الأعلى . وفي المخطط الأوسط حملنا على شاقول كل نقطة من نقاط المرآة الزمن الذي يستغرقه الضوء المنعكس عندها في أثناء ذهابه من S إلى P . وتحت المخطط الأوسط رسمنا الأسهم المتعلقة بكل تلك الطرق ثم ، في الأسفل ، جمعنا كل هذه الأسهم ورسمنا السهم الحاصلة لها كلها . وهنا نرى بكل وضوح أن الأسهم التي تسهم بأقسط وافة في هذه الحاصلة هي تلك التي تتعلق بالطرق المارة بالنقاط المحصورة بين E و J . وهذا ناجم عن أن هذه الأسهم لها كلها اتجاه واحد عملياً ، وأنها ، بالتالي ، ناجمة عن طرق ذات أزمنة شبه متساوية . وتقدير ما نرى من أن هذه الطرق تحاير الطريق ذا الزمن الأصغر يمكن أن نقول ، بتقريب أولي ، إن الطريق الذي يجب للضوء سلوكه هو ذلك الذي يستغرقه فيه «أقصر زمن» . يمكن

لنبدأ بالنقط الموجودة قرب الحافة اليسرى للمرآة ، مثل A . إن الزمن الذي يستغرقه الضوء المار بـ A ، للذهاب من S إلى P ، طويل نسبياً ، مما يعني أن النقطة الممثلة له ، علي مخططي الثاني ، تقع عالياً على شاقول A . وكلما اقتربنا من مركز المرآة يتناقص الزمن الذي يستغرقه الضوء مروراً بالنقطة المعتمدة ، وتنزل بالتدريج النقاط الممثلة لهذه الأزمنة نحو الأسفل على شاقولات نقاط المرآة . لكن بمجرد أن نتجاوز مركز المرآة تأخذ الأزمنة بالتزايد والنقاط الممثلة بالصعود على شاقولات

نقاط المرور بالمرأة . فإذا وصلنا الآن النقاط الممثلة للأزمنة بخط مستمر نحصل على منحني متناظر بالنسبة لشاقول المنتصف G ، يبدأ بالنزول ثم يأخذ بالصعود .

والآن ماذا يمكن أن نستنتج بخصوص اتجاهات الأسهم؟ إن اتجاه كل سهم يتعين بالزمن الذي يستغرقه الفوتون للذهاب من S إلى P متبعاً الطريق الذي يتعلق به هذا السهم . لنرسم إذن هذه الأسهم بدءاً من اليسار . فبالنقطة A يتعلق زمن سير على الطريق P AS ، وبالتالي اتجاه ما (شكل ٢٤ المخطط الصغير في أسفله) للسهم الذي يتعلق به . وللسهم المتعلق بالنقطة B اتجاه آخر ، لأن زمن السير على PBS مختلف عن سابقة . لكن الأسهم المتعلقة بنقط مرور المرأة قريبة من المركز ، مثل F و G و H ، فذات اتجاه واحد تقريباً لأن أزمنة الطرق المارة بها تكاد تكون متساوية . وبمجرد أن نتجاوز مركز المرأة نرى أن كل طريق على اليمين يساوي طريقاً آخر مناظراً له على اليسار (هذا يعود إلى أننا اخترنا منذ البدء وضع تناظر يتساوى فيه بعدا المنبع والكاشف عن المرأة) . فنرى مثلاً ، أن الطريقين PIS و PDS متساويان . فيتعلق بهما سهمان لهما اتجاه واحد .

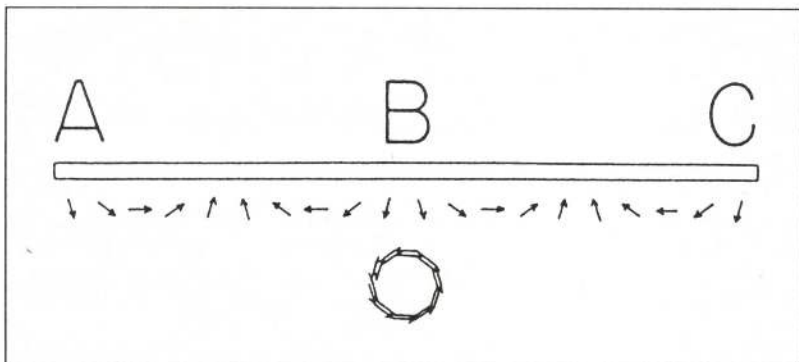
علينا الآن أن نجمع كل هذه الأسهم (شكل ٤٢ ، في الأسفل) . ولأجل ذلك نعلق بالتوالي ذيل كل سهم برأس سابقه بادئين بـ A . تصوروا أن عليكم أن تنجزوا جولة على مراحل ، سهماً بعد سهم . من المؤكد أنكم ، في بدء الرحلة ، لا تقدمون كثيراً ، لأن الاتجاه يتغير كثيراً من مرحلة الأخرى . ولا يصبح هذا التقدم كبيراً إلا عندما تصبح الأسهم ذات اتجاه واحد تقريباً ، ثم في المراحل الأخيرة ، عندما تصبح الأسهم من جديد متخالفة كثيراً ، تعودون إلى الدوران في مكان واحد تقريباً دون تقدم يذكر . ماعلينا ، أخيراً ، سوى أن نرسم السهم الحصىلة ، من ذيل السهم الأول إلى رأس السهم الأخير . انظروا الآن إذا كنا قد تقدمنا كثيراً ، نعم ، لأنكم ترون أن السهم الحصىلة ذو طول محسوس (شكل ٤٢ ، في الأسفل) . أي ، بفصيح العبارة ، أن الإلكتروديناميك الكمومي ينبىء فعلاً أن الضوء ينعكس عن المرأة! .

لنحاول الآن فهم ما يحدث . ما الذي يتحكم في طول السهم الحصىلة؟ نلاحظ أولاً أن طرفي المرأة ليس لهما في هذا الأمر شأن كبير ، لأن الأسهم المتعلقة بهما ليست ذات أهمية تذكر ، أي أننا لو أسقطنا طرفي المرأة لن نخسر شيئاً يذكر في الحصىلة (لقد كنتم تتوقعون منذ البدء أنني أهدر وقتي بالاهتمام بالطرق التي تمر قرب طرفي المرأة) .

فما هو إذن ، في هذه الظروف ، الجزء المهم من المرآة ، أي الجزء الذي يُسهم بنصيب الأسد في طول السهم الحصيلية؟ إنه ، بكل وضوح ، الجزء الذي يُقدم أسهما ذات اتجاه واحد تقريبا ، لأن الزمن الذي يستغرقه الضوء على الطرق المتعلقة بها يكاد يكون واحداً من أجلها كلها . فإذا عدنا الآن إلى مخطط الشكل ٤٢ (قسمه الأوسط) ، الذي يمثل التغيرات الزمنية من طريق لآخر ، نرى أن هذا الزمن ذو قيمة واحدة عملياً في منطقة المنحنى القريبة من النهاية الصغرى ، أي حيث الزمن أصغري . وباختصار نقول : إن المنطقة المرآتية التي تجعل زمن مسار الضوء أصغرياً هي أيضاً المنطقة التي تجعل زمن المسار غير متغير من طريق لآخر يمران بها ؛ إنها المنطقة التي تجعل احتمال أن ينعكس الفوتون عنها كبيراً . وذلك هو السبب الذي يبيح لنا أن نكتفي بهذه الصورة التقريبية للعالم ، التي تقضي بأن يسلك الضوء الطريق الذي يستغرق عليه زمناً أصغرياً (طريق «الزمن الأصغري») ، ويُبرهن عندئذ بسهولة على أن الطريق ذا الزمن الأصغري يحقق تساوي زاويتي الورد والانعكاس ، ولن أسوق لكم البرهان لضيق الوقت .

هكذا إذن يقدم لنا الإلكتروديناميك الكمومي الجواب الصحيح : إن وسط المرآة هو الذي يعطي جوهر الانعكاس ؛ لكن بلوغ هذه النتيجة اقتضى أن نفترض أن الضوء ينعكس عن كل نقاط سطح المرآة ، وقد اضطررنا إلى «جمع» عدد كبير من الأسهم تلغي في غالبيتها بعضها بعضاً . وإذا بدا لكم كل ذلك أمراً مشكوكاً في جدواه ، أو مجرد عبث رياضي ، فإن فكرة وجود «كائنات» كل وظيفتها هي أن يعدم بعضها بعضاً ، تبدو ، بعد كل شيء ، فكرة غير ذات سمات «فيزيائية» كثيرة .

سنضع الآن على المحك مفهوم انعكاس يحدث على كل سطح المرآة ، وذلك بالتجربة التالية . نبدأ بحذف ثلاثة أرباع المرآة ولا نحتفظ إلا بربعها الأيسر ، فيبقى لدينا مرآة ذات مساحة لا بأس بها ، والفرق الوحيد هو أن هذه المرآة ليست «في المكان المناسب» . كانت الأسهم المتعلقة بالقسم الأيسر من المرآة ، في التجربة ، ذات اتجاهات متخالفة كثيراً فيما بينها بسبب الفروق الكبيرة بين شتى الأزمنة اللازمة للسير على الطرق المارة بهذا القسم الأيسر (شكل ٢٤) ، حتى ولو كانت هذه الطرق متجاورة . عليّ هنا أن أجري حساباً أكثر دقة ، ولأجل ذلك أقسم هذا الجزء الأيسر من المرآة إلى مناطق أصغر بكثير ، وبذلك يصبح الفرق بين زمني طريقين متجاورين أصغر بكثير مما كان (شكل ٢٥) . ندرك عندئذ بسهولة أننا نحصل على أسهم يتجه ،



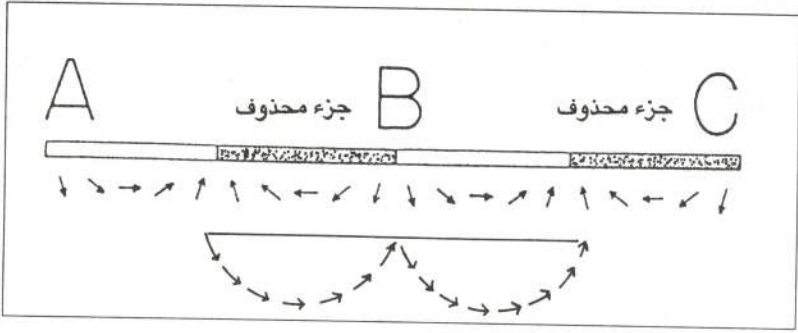
شكل (٢٥)

لكي نضع في الامتحان فكرة أن الانعكاس يحدث أيضا عند حافات المرأة (رغم أن شتى هذه الإسهامات تتفانى بالجمع بعضاً ببعض) نجبر الضوء على الانعكاس عن مرآة غير موجودة في «المكان الجيد» (بالنسبة لموقعي المنبع S والكاشف P). نقسم هذه المرأة إلى مستطيلات أصغر بكثير من ذي قبل (كما في الشكل ٢١) بحيث لا يتغير زمن المسير إلا قليلاً جداً من طريق لآخر مجاور. عندها نجد أن الأسهم ترسم، في أثناء جمعها، دورة مغلقة، مما يجعل السهم الحصيلية شبه معدوم.

إجمالاً، بعضها نحو اليسار وبعضها الآخر نحو اليمين. ولدى جمع هذه الأسهم كلها بالطريقة المعهودة نحصل على مضلع يشبه الدائرة، أي أننا إذا قمنا بجولة على متوالية هذه الأسهم نجد أننا ندور، بكل بساطة، في حلقة مفرغة، دون تقدم.

لكن لنفترض الآن أننا حككنا بعناية السطوح العاكسة للمناطق التي أعطت الأسهم المائلة إجمالاً نحو اليسار مثلاً. لن يبقى عندئذ لدينا سوى الأسهم المتجهة إجمالاً نحو اليمين (شكل ٢٦). وإذا جمعنا هذه الأسهم كلها نحصل على شكل هندسي ذي سلسلة من المنخفضات، وبالتالي على سهم حصيلية ذي طول غير معدوم. وتقول النظرية إننا لا بد أن نحصل عندئذ على انعكاس شديد، والمرأة المصنوعة بهذا الشكل هي ما يسمى شبكة انعراج (وهي تعمل على ما يُرام). أليست هذه الشبكة مرآة سحرية؟ لقد انطلقت من مرآة موضوعة في ظروف انعكاس معدوم، حككت مناطق من سطحها، فأصبحت عاكسة تماماً(*)!.

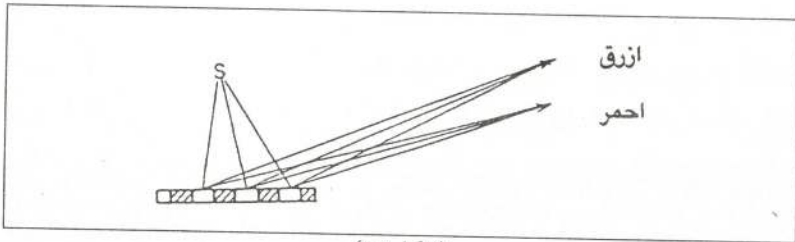
(*) إن المناطق المتعلقة بأسهم متجهة إجمالاً نحو اليسار تعطي أيضاً انعكاساً شديداً (لو أسقطنا المناطق المتعلقة بأسهم تميل نحو اليمين). ولا يحدث أن يتفانى مفعولاً هذين النوعين من الأسهم، النوع المائل نحو اليمين والنوع المائل نحو اليسار، إلا إذا بقيت المناطق المتعلقة بهما، كليهما، عاكسة (غير محكوكة). والحال هنا تشبه تماماً حال الانعكاس الجزئي عن سطحين: ففي حين يعكس كل سطح منهما الضوء، يحدث أن يكون السهم، المتعلقان بهما من اتجاهين متعاكسين فيتفانيان، وذلك حين يكون ثخن الصفيحة مناسباً لهذا التضاد في اتجاهي السهمين فيعدم أحد الانعكاسين الانعكاس الآخر.



شكل (٢٦)

إذا لم نجتمع ، من أسهم الشكل السابق ، سوى تلك التي لها ميل واحد تقريباً ، نحو اليمين مثلاً (كما هنا) ، أو نحو اليسار ، وذلك بعد إسقاط تلك التي تميل نحو الاتجاه الآخر (كأن نحكّ السطح العاكس عند الأجزاء التي نريد حذف أسهمها) ، نحصل على انعكاس إجمالي لا يمكن إهماله ، رغم أن المرأة ماتزال في غير «المكان الجيد» . إن المرأة التي حفرنا فيها خدوشاً ضيقة جداً ومتراصة تسمى : «شبكة انعراج» .

لكن شبكة الانعراج التي أتيت على صنعها لا تعمل هكذا إلا بالضوء الأحمر . فإذا أردت الحصول على الشيء نفسه بضوء أزرق ، يجب عليّ أن أصنع شبكة أخرى تكون المسافات بين مناطقها المحكوكة أقصر . وذلك ، كما ذكرت في محاضرتي الأولى ، لأن عقرب مزمان الفوتونات الزرقاء يدور بأسرع من عقرب مزمان الفوتونات الحمراء . فلا بد إذن من أن تكون أماكن المناطق المحكوكة ، التي تحسب من أجل الأزرق ، منزاحة بالنسبة للمناطق التي حُسبت من أجل الأحمر . وفي الأجزاء العاكسة الباقية لا تكون الأسهم «الزرقاء» كلها من اتجاه واحد ، فالشبكة التي تصلح تماماً للأحمر لا تعمل جيداً في حال الأزرق . ومع ذلك يمكن أن نجعل الشبكة المصنوعة للأحمر تعمل أيضاً في حال استخدام ضوء أزرق ، وذلك شرط أن نضع الكاشف وفق زاوية مختلفة عن زاوية الأحمر ، وهذا ناجم عن مصادفة سعيدة ذات علاقة بهندسة المسألة (شكل ٢٧) .



شكل (٢٧)

إن شبكة الإنعراج ذات الخدوش التي تلائم فواصلها الضوء الأحمر يمكن أيضاً أن تعمل بأضواء من ألوان أخرى شرط أن ننقل الكاشف إلى موقع آخر ملائم ، ذلك هو السبب الذي يجعلنا نرى علي سطح ذي خدوش (كسطح أسطوانات الموسيقى) ألواناً تتغير بتغير زاوية النظر إلى السطح .

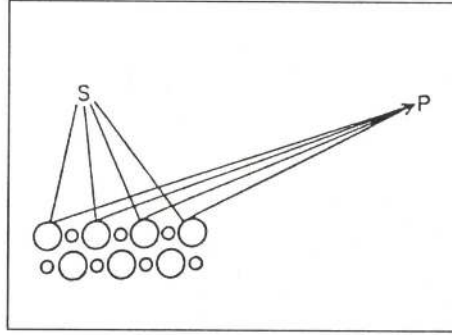
لنتخيل الآن أننا اسقطنا ضوءاً أبيض على شبكة انعراج . عندئذ يرتد الأحمر باتجاه ما ، والبرتقالي باتجاه مختلف قليلاً ، وهكذا يلي الأصفر فالأخضر فالأزرق ، وباختصار كل ألوان قوس قزح . وبصورة عامة يكون من شأن كل سطح حفرنا فيه خطوطاً متوازية متراصة جداً أن يولّد شتى الألوان عندما يضاء بضوء أبيض ويُمال ميلاً مناسباً : ونرى هذه الظاهرة بسهولة على قرص «الأسطوانة» الموسيقية . وربما كنتم قد صادفتُم هذا النوع من الظواهر على هياكل السيارات وهي تمر بكم ؛ ففي أثناء حركتها تلاحظون ألواناً لماعة جداً تتوالى من الأحمر إلى الأزرق .

فها أنتم الآن تعرفون كيف تنشأ هذه الألوان : الواقع أنكم ترون شبكة تتشكل من خدوش في الدهان ناعمة مفصولة فيما بينها بمسافات تناسب الأوضاع المتوالية لأعينكم (وهي الكاشف) وللشمس (وهي المنبع الأبيض) . أستطيع أيضاً أن أشرح لكم كيف تعمل الليزرز Lasers والهولوجرامات Holograms (أجهزة تشكل للأشياء خيالات مجسمة واقفة في الفضاء) ، لكنني أعتقد أن الجميع هنا لم يشاهدوا هولوغراماً قط . وعليّ ، من جهة أخرى أن أتحدث عن ظواهر كثيرة جداً ، ولا بد من اختيار الأهم مما يتسع له الوقت (*) .

إن وجود شبكات الانعراج يُثبت إذن أننا لا نستطيع تجاهل الأجزاء التي تبدو غير عاكسة . فنحن قد برهنا ، بفضل تعديلات طفيفة مناسبة على سطح المرآة ، على أن الانعكاسات عن هذه الأجزاء حقيقية بالفعل وأنها حجر الأساس في بعض الظواهر الغريبة .

لكن الأهم من ذلك أن تبيان واقعية الانعكاس بسطح المرآة كله يُبرز وجود

(*) ومع ذلك لأقاوم المتعة في أن أتكلم عن تلك الشبكات التي تصنعها الطبيعة ، أي بلورات الملح . فدرات الكلور والصوديوم تشكل فيها طبقات ذات فواصل متساوية ، وهي مجموعها تلعب دور شبكة انعراج (كالخدوش المحفورة على سطح) ، شريطة أن نرسل عليها الضوء ذا اللون المناسب (هنا أشعة سينية) . ويستطيع الكاشف ، إذا اتخذ أوضاعاً معينة ، أن يلتقط كل الضوء المرتد عن طائفة كاملة من تلك الانعكاسات الخاصة (وتوصف هنا بلغة الانعراج) ، وبمعرفة هذه الأوضاع نستنتج المسافة بين طبقتين من البلورة ، وبالتالي المسافة بين الدرات (شكل ٢٨) . وهذه طريقة أنيقة لتعيين البنية الذرية للبلورات ، وفي الوقت نفسه تتأكد الهوية الطبيعية للضوء وللأشعة السينية . وقد تم تنفيذ هذه التجربة عام ١٩١٤ ، وكانت أول مرة «رُئي» فيها تنضيد الدرات في البلورات .



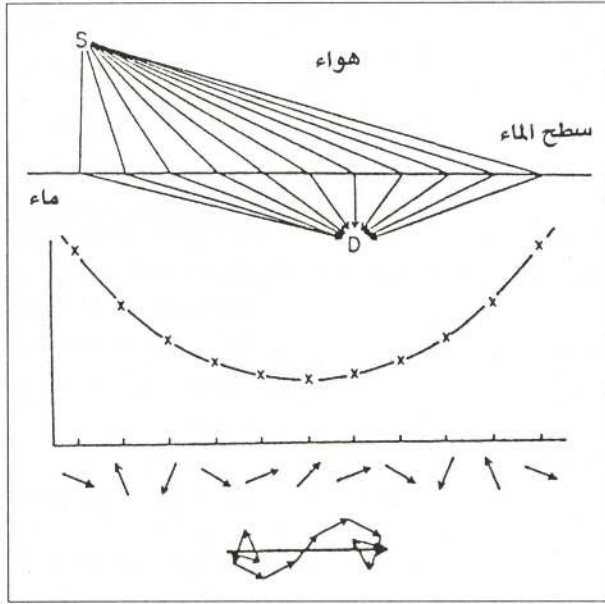
شكل (٢٨)

لقد صنعت الطبيعة عدة شبكات انعراج هي المواد المتبلورة . فبلورة الملح تعكس الأشعة السينية (وهي ضوء يتحرك عقرب مزمانيه بسرعة تساوي قرابة 10000 ضعف من تلك المتعلقة بالضوء المرئي) . ومن هذا يستنبط الفيزيائيون المواقع الصحيحة للذرات في البلورة .

سعة (سهم) تتعلق بكل أسلوب من الأساليب المحتملة لوقوع الحادث . وحساب احتمال حادث ما يتضمن ، كي نقوم بعملية الجمع السهمي ، أن نعرف الأسهم المتعلقة بكل الأساليب التي بموجبها يمكن للحادث المقصود أن يقع (وليس فقط الأسهم المتعلقة بالأساليب التي تبدو مهمة) .

وبعد هذا كله ، أريد الآن أن أحدثكم عن شيء مألوف لكم أكثر من الشبكات ، أقصد ما يحدث عندما يمر الضوء من الهواء إلى الماء . سنضع المضاعف الفوتوني ، هذه المرة ، في الماء (نفترض أن المجرب سيجد طريقة لتنفيذ ذلك) . المنبع S في الهواء (شكل ٢٩) ، والكاشف D غاطس في الماء . ومرة أخرى نستهدف حساب احتمال أن يذهب فوتون من المنبع إلى الكاشف . لأجل ذلك علينا أن نأخذ في الحسبان كل الطرق المتاحة للضوء . إن كل طريق منها يعطي سهماً صغيراً ؛ وكما في التجربة السابقة يكون لكل الأسهم طول واحد عملياً . وهنا أيضاً سنرسم المنحني الذي يصل بين النقط الممثلة لأزمة السير على كل الطرق . إن هذا المنحني يشبه تماماً ذلك الذي حصلنا عليه في حال الإنعكاس عن مرآة ، فهو ينطلق من الأعلى ، ينزل حتى يبلغ نهاية صغرى ، ثم يصعد إلى علو نقطة الإنطلاق . والإسهامات الهامة ، في السهم الحاصيلة ، تأتي من مناطق سطح الماء التي تقود إلى أسهم كلها ذات اتجاه واحد تقريباً (يكون زمن السير عندئذ واحداً ، عملياً ، على مسارين

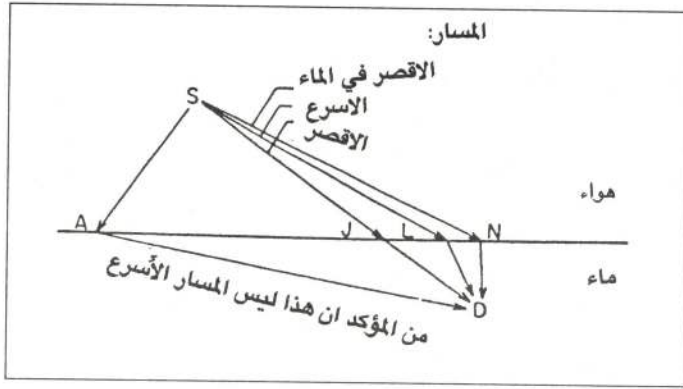
متجاورين) ، أي من المنطقة المقابلة لنهاية المنحني الصغرى . ولما كانت هذه النهاية الصغرى تتعلق بزمن أصغرى ، لا يبقى علينا سوى أن نجد الطريق ذا الزمن الأصغرى .



شكل (٢٩)

تقول النظرية الكمومية بأن الضوء يمكن أن يسلك عدة طرق للذهاب من منبع في الهواء إلى كاشف في الماء . وباعتماد التبسيطات التي اعتمدها في حال الانعكاس عن مرآة ، نرسم المنحني الممثل لتغير أزمنة المسير بتغير الطرق ، ثم نرسم (في الأسفل) الأسهم المتعلقة بهذه الطرق ، ثم نجتمعها فنرى أن الإسهام الرئيسي في السهم الحاصلة ناجم ، هنا أيضاً ، عن الطرق التي تعطي أسهماً لها اتجاه واحد تقريباً ، وهذه الطرق تتعلق بأزمنة مسير شبه متساوية . ومرة أخرى ، تقع هذه الطرق في جوار الطريق ذي الزمن الأصغرى .

الواقع أن الضوء يسير في الماء بأبطأ من سيره في الهواء (سأشرح لكم السبب في محاضرتي القادمة) ، وعلى هذا يستغرق في الماء زمناً أطول . ومن السهل أن نبحث في هذه الظروف عن الطريق ذي الزمن الأصغرى . تصور أنك مدرّب في السباحة ، وقد أوكلت إليك قضية الأمان على الشاطئ . أنت في S ، وفجأة ترى فتاة جميلة مشرفة على الغرق في D (شكل ٣٠) . فكيف تفعل لإنقاذها بالعجل ، علماً أنك تركض على الرمل بأسرع مما تسبح في الماء؟ .



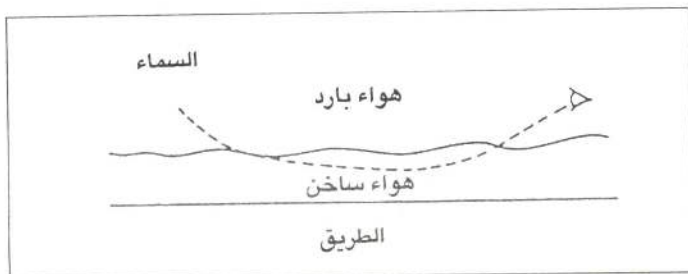
شكل (٣٠)

إن العثور على الطريق ذي الزمن الأصغري للضوء يعود إلى تعيين الطريق الذي يتيح للسباح المنقذ الجالس قرب الشاطئ، أن ينجذ بأسرع ما يمكن فتاة مشرفة على الفرق. إن الطريق الأقصر يجبر على سباحة طويلة الزمن، كما أن الطريق ذا الطول الأقصر في الماء يجبر المنقذ على الركض زمناً طويلاً على الرمل. أما الطريق ذو الزمن الأصغري فهو طريق وسط بين الاثنين.

تعود هذه المسألة إلى تعيين نقطة الدخول في الماء بما يضمن أن تصل بأبكر ما يمكن إلى المسكنة المشرفة على الغرق. واضح أنك لن تفكر في أن تهرع إلى النقطة A لتسبح بعدئذ كالجئون من A إلى D. فهل يجب أن تتجه في خط مستقيم نحو المنكوبة، أي أن تدخل في الماء من النقطة J؟ كلا ليس هذا الطريق أيضاً بالطريق الذي يأخذ منك زمناً أصغرياً. كما لا أتصور أن المنقذ سينتظر حتى يحسب الطريق ذا الزمن الأصغري قبل أن يهب لنجدة الفتاة. أما نحن فنستطيع أن نحسب نقطة الدخول في الماء كي يكون الطريق من S إلى D ذا زمن أصغري. فهذا الطريق لا بد أن يكون طريقاً وسطاً بين الخط المستقيم (المار بـ J) والخط الذي يحوي أصغر مسافة في الماء (المار بـ N). وهذا أيضاً شأن الضوء: إنه يسلك الطريق ذا الزمن الأصغري، ذلك الذي يجعله يدخل في الماء عند نقطة، ولنقل L، واقعة بين J و N.

أود الآن أن أحدثكم سريعاً عن ظاهرة ضوئية أخرى: السراب. لاشك أنكم قد رأيتم قبل الآن، وأنتم في سيارة تسير على طريق سخنته الشمس كثيراً، مناطق من الطرق تبدو وكأنها حومات ماء. الواقع أن ما ترونه ليس سوى السماء. لكنكم اعتدتم، عندما ترون صورة السماء على الطريق، على أن السبب هو وجود الماء (يحدث عندئذ انعكاس جزئي للضوء عن سطح واحد). فكيف نفسر، في تلك الظروف، أن نستطيع رؤية صورة السماء والماء غير موجود؟ إن هذا ممكن بمجرد أن نعلم أن الضوء يسير في الهواء البارد بأبطأ من سيره في الهواء الساخن. ولكي يُرى

السراب يجب أن يكون الناظر في منطقة من الهواء الأبرد أعلى من طبقة الهواء الساخن بتماس الطريق (شكل ٣١). يصبح عندئذ من السهل أن نفسر لماذا تُرى السماء عندما ننظر نحو الأرض لا في الهواء: يكفي أن نعيّن طريق الضوء ذا الزمن الأصغري. وليس هذا بالأمر الصعب، ولذلك أتركه لتعملوه في بيوتكم، سترون أن فيه تسلية مثيرة.



(شكل ٣١)

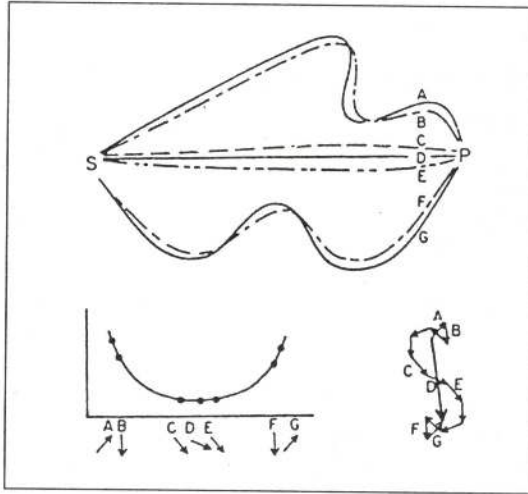
إن تعيين الطريق ذي الزمن الأصغري يتيح فهم ظواهر السراب، فالضوء أسرع سيراً في الهواء الساخن منه في الهواء البارد. ونحن نرى السماء تظهر أمامنا على طريق السيارة لأن الضوء القادم من السماء يصل إلى عين الناظر وكأنه قادم من أرض الطريق. ولما كانت المناسبات التي نرى فيها السماء ونحن ننظر نحو الأسفل هي تلك التي نتعرض لها عند وجود حومة ماء، نظن أن الطريق أمامنا مكسو بالماء... وما ذلك إلا سراب..

في المثالين اللذين أتيت على تفصيلهما، سواء في الانعكاس عن المرآة أو في مرور الضوء من الهواء إلى الماء، افترضتُ للتبسيط أن الضوء يتألف من قسمين مستقيمين بينهما زاوية. لكن ليس من الضروري أن نفترض أن الضوء، في وسط متجانس، يذهب في خط مستقيم، لكن هذا واقع يمكن أن نفسره أيضاً بموجب القاعدة العامة في النظرية الكمومية (تلك التي تقول بأن احتمال وقوع الحادث نحصل عليه من جمع الأسهم المتعلقة بكل الأساليب التي تتيح لهذا الحادث أن يقع).

ولهذا السبب، وكمثال آخر، سأبين لكم، بجمع الأسهم، كيف يتضح أن الضوء يسير في خط مستقيم. ليكن إذن المنبع S والمضاعف الفوتوني P (شكل ٣٢). ولنفحص كل الخيارات المتاحة للضوء كي يذهب من المنبع إلى الكاشف؛ أقول فعلاً كل الخيارات، بما فيها أغربها. ولما كنا قد تعلمنا درسنا جيداً، نعلم وجوب أن نرسم كل الأسهم المتعلقة بكل تلك الخيارات.

فمن أجل كل طريق متعرج، مثل A، نستطيع إيجاد طريق مجاور جداً له يكون مباشراً أكثر بقليل، وبالتالي ذا زمن أقصر. لكن الزمن على طريق شبه مباشر، مثل C، لا يختلف إلا قليلاً جداً عن طريق أكثر مباشرة منه. ففي هذه

المنطقة إذن نحصل على الأسهم الأكثر جدوى لدى جمعها، وفيها إذن يقع المسار الذي يسلكه الضوء .



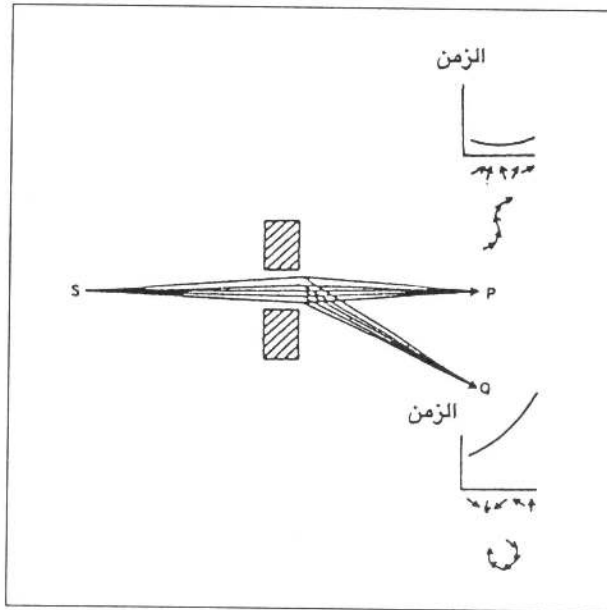
(شكل ٣٢)

تتيح النظرية الكمومية تفسير سير الضوء في خطم مستقيم . نفحص كل المسارات المتاحة . ففي جوار طريق أعوج يوجد طريق أقصر منه ، وبالتالي «أسرع» وبه يتعلق سهم ذو اتجاه مختلف . إن الطرق المجاورة للخط المستقيم ، D ، هي التي لها أسهم ذات اتجاه واحد تقريباً ، لأنها تتعلق بأزمنة سير شبه متساوية . فهذه الأسهم وحدها هي التي تسهم بأكبر الأقساط في السهم الحاصلة .

يجب أن نعرف هنا أن السهم الوحيد المتعلق بالطريق المستقيم ، على طول D (شكل ٣٢) ، لا يكفي وحده لحساب احتمال ذهاب الضوء من المنبع إلى الكاشف . ذلك أن الطرق المجاورة له ، مثل C و E ، تسهم هي الأخرى إسهاماً كبيراً في قيمة هذا الاحتمال . وهذا معناه أن الضوء ، في الحقيقة ، لا يسير في خط مستقيم فقط ، بل إنه ، بتعبير مجازي ، «يشتم» الطرق المجاورة ، إنه يحتاج إلى منطقة صغيرة من الفضاء تحيط ، «كأنبوب» ضيق ، بالطريق المستقيم . وكذلك الحال أيضاً في الانعكاس ؛ فلكي ينعكس الضوء يجب أن تكون المرآة ذات مساحة معقولة ؛ إذ لو كان سطحها صغيراً جداً ، أصغر من مقطع الأنبوب الذي تحتله الطرق المتجاورة مباشرة ، لتناثر الضوء في كل الاتجاهات ، مهما كان الموقع الذي نضع فيه المرآة .

سأفحص الآن عن كثر بنية هذا «الأنبوب» الضيق . ولأجل ذلك أضع ، بين المنبع S والكاشف P ، لبنتين غير شفافتين وظيفتهما أن تمنعا الضوء من أن يذهب «للنزهة» في مكان بعيد (شكل ٣٣) ؛ ثم أضع كاشفاً آخر Q وأفترض ، لتبسيط

الأمر أيضاً ، أن الضوء لا يستطيع الذهاب من S إلى Q إلا على طرق يتألف كل منها من قطعتين مستقيمتين فقط . فماذا يحدث عندئذ؟ إليكم الجواب : عندما تكون الفتحة بين اللبنتين واسعة بما يكفي لاحتواء طرق كثيرة ذاهبة من S إلى P أو من S إلى Q ، نجد أن الأسهم المتعلقة بالطرق المنتهية في P يسهم كل واحد منها إسهاماً فعالاً في عملية جمعها بالطريقة المعهودة (ذلك أن هذه الطرق تستغرق أزمنة شبه متساوية) ، في حين أن الأسهم المتعلقة بالطرق المنتهية في Q يلغي بعضها بعضاً في عملية الجمع (لأن أزمنة الطرق المتعلقة بها متفاوتة كثيراً) . والنتيجة : إن المضاعف الفوتوني Q لا يصدر «تكات» .

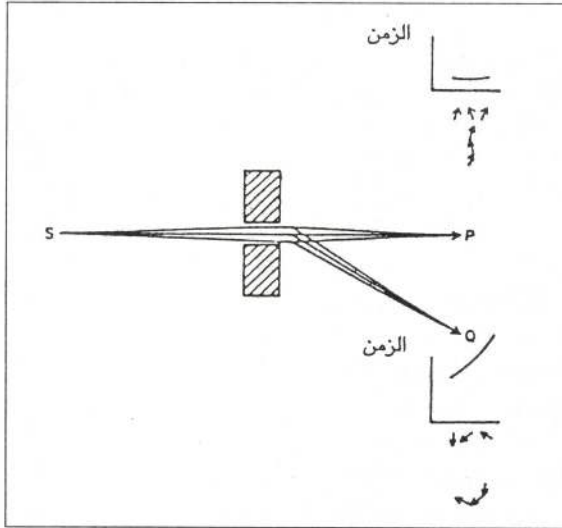


(شكل ٣٣)

إن الضوء لا يسير في خط مستقيم فحسب ، بل يمكنه أن يسلك الطرق المجاورة . وإذا كانت الفرجة بين الحاجزين (المخططين) واسعة بما يكفي لاحتواء هذه المسارات المتجاورة فإن الفوتونات تذهب إلى P «عادة» ولا يذهب عملياً أي منها إلى Q .

لكن إذا قربنا اللبنتين ، إحداهما من الأخرى ، سيأتي وقت يأخذ فيه الكاشف Q بإصدار «تكات» ، لماذا؟ لأن ضيق الفتحة لم يعد يتسع إلا لعدد قليل من الطرق الذاهبة إلى Q ، وتكون متجاورة جداً لدرجة أن تستغرق أزمنة شبه متساوية ، فتصبح الأسهم المتعلقة بها فعالة في عملية الجمع المعهودة (شكل ٣٤) . وواضح ، في

هذه الحالة ، أن قلة عدد الطرق النافذة من الفتحة ، سواءً إلى P أو إلى Q ، تجعل عدد الأسهم لكل من الكاشفين قليلاً فنحصل على سهمين حاصلين صغيرين كليهما (احتمالين صغيرين) ، أي على ضوئين ضعيفين في الكاشفين ؛ لكن هذا لا يمنع أن عدد التكتات الصادر عن Q شبه مساو لما يصدر عن P . وخلاصة القول : إننا ، عندما نحاول الحصول على حزمة ضوء ضيقة ، يرفض الضوء أن يتعاون معنا فيتشتت في كل اتجاه (*).



(شكل ٣٤)

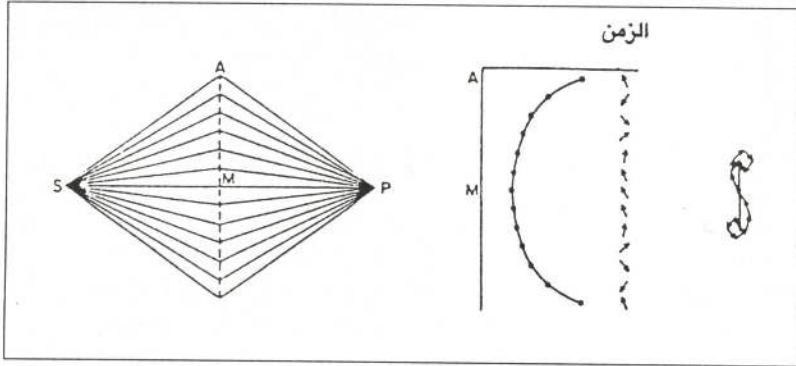
عندما تكون الفرجة بين الحاجزين ضيقة لدرجة أن لا تسمح إلا بمرور مسارات قليلة جداً ، فإن الضوء الذي يمر منها قادر على الذهاب إلى Q كما يقدر على الذهاب إلى P ، لأن عدد الأسهم الناجمة عن المسارات الذاهبة إلى Q لا يكفي لانعدام السهم الحاصلة .

وهكذا ترون أن فكرة انتشار الضوء في خط مستقيم ليست سوى تقريب سهل يتيح شرح ما حدث في عالمنا هذا ؛ إنه من قبيل التقريب الذي يدعو إلى القول ، في حال الانعكاس عن مرآة ، بأن زاوية ورود الضوء تساوي زاوية انعكاسه .

(*) لدينا هنا صورة لما يسمى «مبدأ الارتباك uncertainty Principle» . هناك ، بمعنى ما «تنامية complementarity» بين معرفة طريق الضوء في الفتحة بين اللبنتين وبين معرفة طريقه بعدهما ؛ ومن المستحيل بلوغ هاتين المعرفتين معاً في وقت واحد وبدقة تامة . يجب أن نضع نص هذا المبدأ في سياقه التاريخي : عندما انبعثت ، شيئاً فشيئاً ، الأفكار الثورية للفيزياء الكمومية ، اجتهد الفيزيائيون في تأويلها بوساطة الأفكار القديمة (لا سيما بفكرة أن الضوء يذهب في خط مستقيم) . لكن بما أن الفشل كان دوماً نصيب هذه المحاولات ، أصبح رجال العلم أكثر حذراً : «انتبهوا! إن الأفكار القديمة تصبح باطلة بمجرد أن . . .» لكن إذا تخلينا عن الأفكار القديمة لصالح الأفكار التي اشرحها لكم (جمع الأسهم المتعلقة بكل الأساليب المتاحة) ، تنتفي الحاجة إلى الاستعانة بأي مبدأ ارتباك !

لكن الطريقة التي أتاحت لنا ، بفضل حيلة ما ، أن نبیح للضوء الانعكاس بعدة زوايا ، هي التي تتيح إيجاد الحيلة التي نبیح بها للضوء أن يذهب من نقطة لأخرى على عدة طرق .

في البدء ، وللتبسيط ، أرسم خطاً شاقولياً متقطعاً (شكل ٣٥) بين المنبع والكاشف (ليس لهذا الخط أي معنى ، إنه تخيلي فقط) ، ولن أهتم إلا بالطرق المؤلفة من قطعتين مستقيمتين . إن المنحني الذي يحوي الأزمنة اللازمة لقطع تلك الطرق يشبه بشكله المنحني الذي وجدناه في حال المرأة ؛ كل ما هنالك أنني رسمته هنا بشكل شاقولي . يبدأ هذا المنحني من A فينعطف تدريجياً (لأن الطرق المارة في وسط الخط المتقطع أقصر) ثم يعود إلى شاقول نقطة البدء .



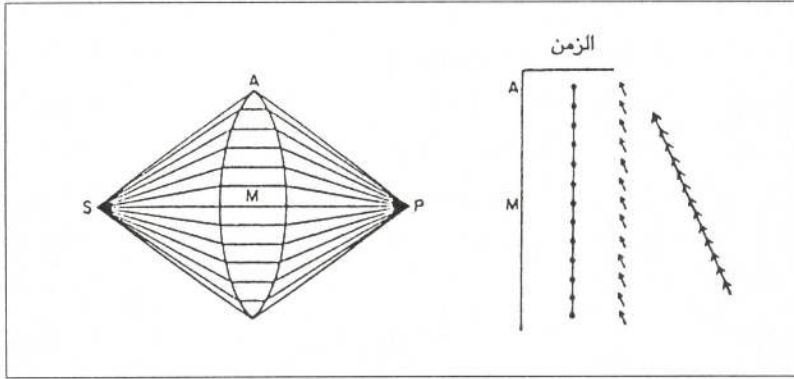
(شكل ٣٥)

إن تحليل الطرق المتاحة للذهاب من S إلى P يصبح بسيطاً جداً إذا لم ندرس سوى المسارات المؤلفة من قطعتين مستقيمتين متصلتين عند المستقيم المتقطع . وعلى شاكلة ما يحدث في الواقع ، وهو أشد تعقيداً ، نرى ظهور نهاية صغرى في منحنى تغير زمن المسير بتغير الطريق . وهنا نرى أيضاً أن الأسهم المجاورة لهذه النهاية الصغرى هي التي تسهم بأكبر الأقسام في السهم الحاصلة .

أقترح عليكم الآن اللعبة البسيطة التالية . سوف «نخادع» الضوء فنتدبر أمرنا بحيث تصبح كل الطرق ، بين A و B ، ذات زمن واحد . فكيف نفعل ذلك كي نجعل زمن المسار على الطريق الأقصر ، المار بـ M ، مساوياً زمن المسار على الطريق الأطول ، المار بـ A ؟

لقد ذكرنا أن الضوء أبطأ في الماء منه في الهواء ، وهو أيضاً أبطأ في الزجاج منه في الهواء . فإذا وضعنا إذن على الطريق الأقصر (المار بـ M) ثخناً مناسباً من الزجاج (شكل ٣٦) ، نستطيع أن نجعل زمن المسير على هذا الطريق مساوياً زمن

السير على الطريق المار بـ A . ومن أجل الطرق الأبعد أكثر فأكثر عن M نضع ثخانات من الزجاج أصغر فأصغر . وهكذا نستطيع إذن ، إذا أجرينا بعناية حساب كل ثخن من الزجاج بما يناسب المسار المستهدف ، أن نعدم الفروق الزمنية بين كل الطرق ، فتصبح كل أزمنتها متساوية . فإذا رسمنا الآن الأسهم الصغيرة المتعلقة بكل الطرق نجد أن لها كلها اتجاهاً واحداً صاعداً ، ولما كان عددها يساوي الملايين نجد ، بعد جمعها ، أن السهم الحصيلية طويل جداً .



شكل (٣٦)

نستطيع أن «نخادع» الطبيعة بتبطين الضوء على المسارات الأقصر طولاً . ولأجل ذلك ندسُ على طريق الضوء زجاجاً يتزايد ثخنه كلما قصر المسار وبعث يصبح للطرق الضوئية كلها زمن واحد . عندئذ تتجه الأسهم كلها باتجاه واحد ، فيصبح السهم الحاصل أكبر ما يكون ، أي أن النقطة تستقبل كمية كبيرة من الضوء . وقطعة الزجاج هذه المصنوعة بشكل يزيد في احتمال ذهاب الضوء من نقطة المنبع إلى نقطة أخرى تسمى عدسة مقربة .

لا شك أنكم حزرتُم ماذا تشكل تلك القطع الزجاجية الصغيرة : عدسة مقربة ، نعم! هكذا ، بتدبير أمر تلك الأزمنة كي تصبح متساوية كلها ، نحصل على احتمال كبير جداً كي يصل الضوء إلى نقطة معينة – ينعدم عملياً احتمال أن يصل إلى نقطة أخرى .

لقد هدفتُ ، من الأمثلة التي تناولتها ، إلى أن أريكم كيف تتيح نظرية الإلكتروديناميك الكمومي ، اللامعقولة في ظاهرها ، والمناقضة لفكرة السببية cau-sality ، والتخيلية تماماً والمستغنية عن كل آلية أساسية ، أن نفسر كل الظواهر المألوفة ، كانعكاس الضوء عن المرآة وانكساره عند السطح الفاصل بين الهواء والماء وتجمعه بعد اختراق العدسة الزجاجية . لكن هذا ليس كل شيء ؛ فهذه النظرية تفسر أيضاً ظواهر ربما لم تروها قط ، كالانعراج بالشبكات ، وسواها كثير . والواقع أن هذه النظرية تتسع لكل الظواهر الضوئية .

لقد بيّنت لكم ، من خلال الأمثلة ، كيف يُحسب احتمال حادث يمكن أن يقع بعدة أساليب : الواجب عندئذ أن نرسم سهماً لكل أسلوب وأن نجمع كل الأسهم التي نحصل عليها . وأقصد «بجمع الأسهم» العملية التي تقضي بربطها واحداً بالآخر ، بحيث ينطبق رأس كل سهم على ذيل السهم الذي يليه ، وب رسم السهم «الحصيلة» النهائي . ومربع طول هذا السهم النهائي يساوي احتمال وقوع الحادث المقصود .

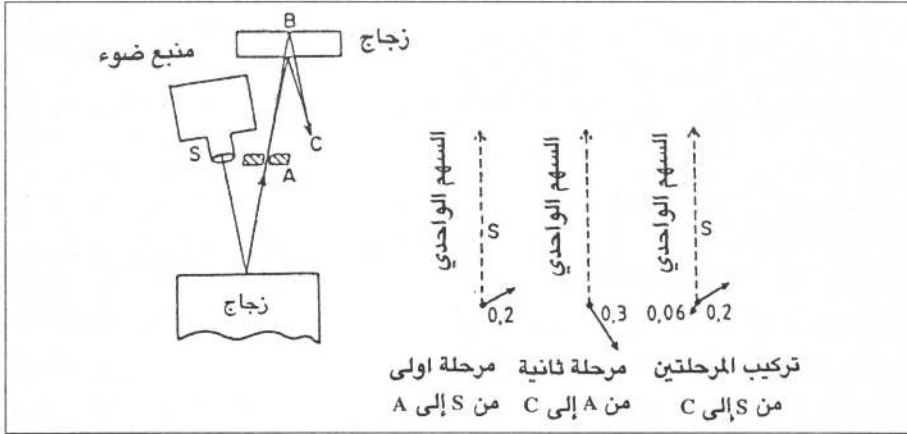
ولكي تأخذوا فكرة أكمل عن هذه النظرية الكمومية ، سأريكم الآن كيف يحسب الفيزيائيون احتمال حادث مُرْكَب ؛ ونقصد بذلك حادثاً يمكن تقسيمه إلى مراحل ، أو يحوي عدة «حوادث فرعية» مستقلة .

لنا بهذا الصدد مثال جيد في حادث مُرْكَب هو تعديل التجارب التي عالجناها ، تلك التي كنا أرسلنا فيها فوتونات حمراء على سطح وحيد زجاجي ، كي نبرز ظاهرة الانعكاس الجزئي . وبدلاً من أن نضع في A مضاعفاً فوتونياً ، نضع حاجزاً (شكل ٣٧) فيه ثقب لا يسمح بالمرور إلا للفوتونات التي تصل إلى A لتمر بعدئذ إلى صفيحة زجاجية موضوعة في B ، ونضع كاشفاً في C . فكيف نحلل احتمال ذهاب الفوتون من المنبع إلى C ؟.

نستطيع أن تتمثل هذا الحادث على أساس تتابع مرحلتين : أولاًهما ذهاب الفوتون من المنبع إلى A بعد أن ينعكس على سطح الزجاج ، والثانية ذهاب الفوتون من A إلى C ، حيث يوجد الكاشف ، بعد ارتداده عن الصفيحة الزجاجية الموجودة في B . فبكل واحدة من هاتين المرحلتين يتعلق سهم حصيلة - «سعة» (سأستخدم بعد الآن هاتين الكلمتين ، سهم وسعة ، بمعنى واحد) - ويمكن حساب كل من السعتين بتطبيق القواعد المعهودة . ونحن نعلم أن طول السعة المتعلقة بالمرحلة الأولى يساوي 0.2 (مربعها ، 0.04 ، هو احتمال الانعكاس عن سطح زجاجي وحيد) ويتجه باتجاه معين ، لنقل اتجاه العقرب الصغير لميقاتية تشير إلى رقم الساعة الثانية (شكل ٣٧) .

ولحساب السعة المتعلقة بالمرحلة الثانية نضع المنبع في A مؤقتاً ؛ فيرسل فوتونات إلى صفيحة الزجاج الموضوعة فوق A . لنرسم السهمين المتعلقين بالانعكاس عن وجهي الصفيحة ، ولنجمعهما معا . لنفترض أننا نحصل على سهم حصيلة طوله 0.3 ويتجه باتجاه العقرب الصغير لميقاتية تشير إلى رقم الساعة

الخامسة . والآن تنطرح مسألة تركيب هذين السهمين الحاصلين (الحصيلتين) تركيباً يعطي سعة الحادث المقصود بتمامه (ذهاب الفوتون من المنبع إلى الكاشف C). وهذا ما سيقودنا إلى تناول هذين السهمين تناولاً جديداً بطريقة التصغير reduction والتدوير .



شكل (٣٧)

يمكن تحليل الحادث المركب إلى مراحل متوالية . وفي هذا المثال يمكن تقسيم مسار الفوتون ، الذاهب من S إلى C ، إلى مرحلتين :

١) الفوتون يذهب من S إلى A ؛ ٢) الفوتون يذهب من A إلى C . يمكن تحليل كل مرحلة على حدة . والسهم المتعلق بها يمكن أيضاً أن يعتبر (وهذه طريقة أخرى في تناول الموضوع) ناجماً عن السهم الواحد (طوله يساوي 1 ويتجه باتجاه الشاقول الصاعد ، نقول باتجاه الساعة ١٢) بعد إجراء عملية تصغير لطوله وعملية تدوير لآتيجه . وفي هذا المثال هنا يتعلق بالمرحلة الأولى بتصغير نسبته 0,2 وتدوير ينقل الاتجاه من الساعة ١٢ إلى الساعة ٢ . أما المرحلة الثانية فتتقضي بتصغير إضافي نسبته 0,3 وتدوير إضافي يغير الاتجاه السابق بمقدار ٥ ساعات . نحصل على السعة الإجمالية للمرحلتين بإجراء العمليات المذكورة واحدة بعد أخرى : نصغر السهم الواحد من 1 إلى 0,2 وتدوره من الساعة ١٢ إلى الساعة ٢ . عندئذ نحصل على سهم نصفه بضرب طوله بـ 0,3 (كأنه كان سهماً واحداً) وتدوره بزاوية تعادل ٥ ساعات . وبذلك نجد سهماً نهائياً (يمثل سعة الحادث بتمامه) طوله 0,06 ويتجه نحو الساعة ٧ . إن مجمل هذه العمليات يسمى «ضرب» السهمين .

طول السعة الأولى هنا 0.2 وتشير إلى «الساعة الثانية» . تصوروا أننا انطلقنا من «سهم واحد» أي سهم طوله يساوي 1 ومتجهه باتجاه الشاقول الصاعد (يشير إلى الساعة ١٢) . فإذا أجرينا على هذا السهم تصغيراً ينزل بطوله من 1 إلى 0.2 ثم تدويراً يحرفه من الساعة ١٢ إلى الساعة ٢ ، نحصل على سعة المرحلة الأولى (من S إلى A) . كما أن بالإمكان اعتبار السهم المتعلق بالمرحلة الثانية (من A إلى C) على أنه ناجم عن تصغير (من 1 إلى 0.3) وتدوير (من الساعة ١٢ إلى الساعة ٥) .

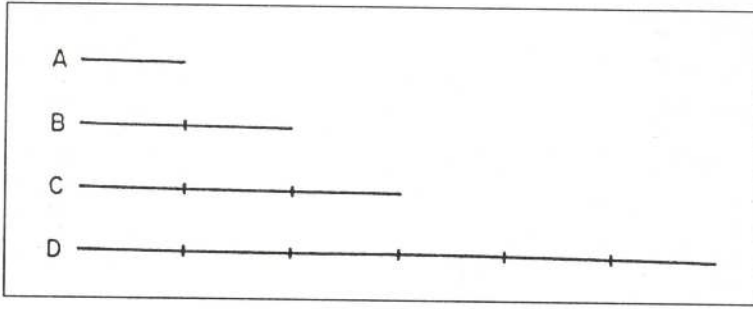
إن تركيب السهمين المتعلقين بالمرحلتين يُحصل عليه بإجراء عمليتي التصغير والتدوير واحدة بعد أخرى . نبدأ إذن بتصغير السهم الواحد من 1 إلى 0.2 ونقوم بتدويره من الساعة ١٢ إلى الساعة ٢ ؛ ثم نحري على السهم المحصول عليه عندئذ تصغيراً ثانياً من 0.2 إلى ثلاثة أعشار 0.2 ، وتدويراً ثانياً بمقدار ٥ ساعات . نجد في نهاية هذه العمليات سهماً طوله 0.06 ومتجهاً نحو رقم الساعة السابعة . والاحتمال الناجم عن هذا السهم الأخير يساوي مربع 0.06 ، أي 0.0036 .

إذا تفكرنا جيداً بما فعلناه نرى أننا كان بإمكاننا الوصول إلى هذه النتيجة نفسها إذا أجرينا ، دفعة واحدة على السهم الواحد ، تدويراً يساوي مجموع التدويرين (الساعة ٢ + الساعة ٥ = الساعة ٧) وتصغيراً يساوي جداء التصغيرين $(0.06 = 0.3 \times 0.2)$ أي جداء طولي السهمين . إن وجوب أن نجتمع الزاويتين ، للحصول على اتجاه السهم النهائي الأخير ، أمر واضح جداً : ذلك أن اتجاه السهم ، أي سهم ، يتعين بزاوية دوران عقرب المزمان التخيلي : ومن الطبيعي أن يكون السهم الممثل لحادث ذي مرحلتين متواليتين ذا اتجاه ناجم عن جمع زاوية دوران المرحلة الأولى مع زاوية دوران المرحلة الثانية .

إن العملية التي أتيت على وصفها تسمى «ضرب» سهم بسهم . وهي تحتاج إلى بعض الشروح .

لنعتمد ، للحظة ، وجهة نظر الإغريقين في عملية الضرب (ليس لهذا الأمر شأن في موضوع محاضرتي) . فللحصول على أعداد ليست بالضرورة أعداداً صحيحة ، كان الإغريق يمثلون الأعداد بقطع مستقيمة . وكل عدد قابل لأن يفهم على أساس أنه ناجم عن تحويل يتناول القطعة الواحدة ، وهو إما تصغير أو تكبير . افترضوا ، مثلاً ، أن A (شكل ٣٨) هي القطعة الواحدة ؛ عندئذ تمثل B العدد 2 ، و C العدد 3 .

وبعد هذا كيف نعمل لضرب 3 بـ 2؟ يكفي أن نطبق التحويلات واحداً بعد الآخر . أنطلق من A ، القطعة الواحدة ، فأكبرها 2 مرة ، ثم بعد ذلك 3 مرات (أو ، وهذا كذاك ، 3 مرات ثم 2 مرة - لا أهمية للترتيب) . أحصل عندئذ على القطعة D ، التي يمثل طولها العدد 6 . وما العمل الآن لو أردت ضرب 1/3 بـ 1/2؟ أتخذ القطعة D كقطعة واحدة ، أصغرّها إلى نصفها (فأحصل على C) ، ثم أصغرّها إلى ثلثها فأحصل على القطعة A التي تمثل 1/6 من C .



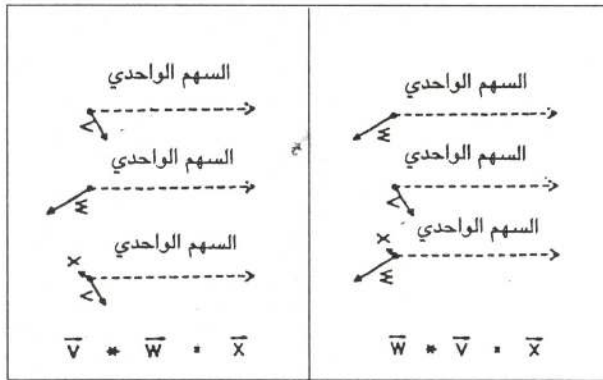
شكل (٣٨)

إن العدد، أي عدد، يمكن أن يُعتبر عملية تحويل تجريها على القطعة الواحدة. إذا كانت A تمثل الواحد، فإن B تمثل العدد 2 (تكبير بنسبة 2) وتمثل C العدد 3 (تكبير بنسبة 3). ويتم عملية الضرب بإجراء التحويلين، المتعلقين بحدي الضرب، على القطعة الواحدة بالتوالي. فلضرب 3 بـ 2 مثلاً نبدأ بتكبير القطعة الواحدة بنسبة 3 ثم نكبر النتيجة تكبيراً آخر بنسبة 2. نحصل عندئذ على قطعة D، أكبر من الواحدة بنسبة 6. وإذا اتخذنا الآن القطعة D كقطعة واحدة، فإن القطعة C تمثل العدد $1/2$ (تصغير إلى النصف) والقطعة B العدد $1/3$ (تصغير إلى الثلث). أما جداء $1/2$ بـ $1/3$ فيعود إلى تصغير D إلى نصفها ثم تصغير النتيجة إلى ثلثها. نحصل عندئذ على تصغير القطعة الواحدة بنسبة $1/6$. نجد A.

إن الضرب السهمي يعمل بهذه الطريقة نفسها (شكل ٣٩). نطبق على السهم الواحد التحويلات التي تمثل شتى «الضروب» الواجب إجراؤها، واحداً بعد آخر، علماً أن الفرق الوحيد هنا هو أن ضرب الأسهم معاً ينطوي على عمليتين اثنتين بدلاً من واحدة: تصغير وتدوير. فلضرب السهم V بالسهم W نبدأ بتصغير وتدوير السهم الواحد بما يتيح الحصول على V، ثم نصغّر ونُدوّر V بالمقادير التي يدلّ عليها W؛ وهنا أيضاً ليس لترتيب العمليات أهمية. فالضرب السهمي يخضع إذن لقواعد التحويل المعروفة في مجموعة الأعداد العادية (*).

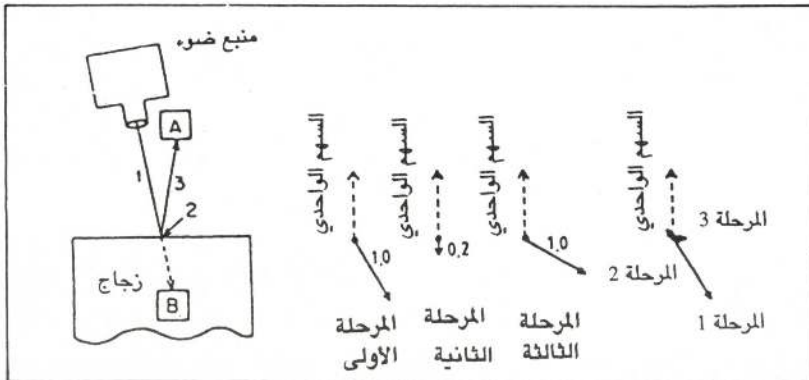
(*) لقد اجتهد الرياضيون في تحديد كل الأشياء التي تدعّن لقواعد الجبر ($A \times B = B \times A$, $A + B = B + A$). كانت هذه القواعد في البدء تخص الأعداد الصحيحة (غير الكسرية) الموجبة، تلك التي تُستخدم في عد التفاح والأشخاص. ثم أضيف لهذه الأعداد الصفر والأعداد الكسرية والأعداد الصماء (irrational) (تلك التي لا يمكن تمثيلها بنسبة عددين صحيحين) وأخيراً الأعداد السالبة، دون أن يطرأ على قواعد الجبر أي فساد. لكن إدخال بعض الأعداد التي خرجت من خيال الرياضيين لم يكن ليحدث دون مشاكل: إذ كيف نتصور أن نتكلم عن نصف الشخص؟ لكن هذه الصعوبات اختفت اليوم كلها: القول بوجود $3,2$ أشخاص في الكيلومتر المربع لا يطرح أية مشكلة إنسانية ولا يثير نوازع عدوانية دموية. فلا حاجة للجهد في تصور ما يعنيه $0,2$ من الشخص؟ ونحن نعلم أن العدد $3,2$ المذكور يجب أن يفهم بأنه يمثل 32 شخصاً في كل 10 كيلومترات مربعة. وعلى هذا فالأشياء التي تطيع قواعد الجبر يمكن أن تنطوي على فائدة للرياضيين، حتى ولو لم تتعلق بأي ظرف واقعي. ومنها الأسهم المرسومة في مستوى الورقة، فهي يمكن أن «تُجمع» بتعليق رأس كل سهم بذيل السهم الذي يليه، وأن «تُضرب» بعمليتي تصغير وتدوير، مذعنة في الحالين إلى قواعد الجبر في الأعداد العادية؛ ذلك هو السبب في إطلاق الرياضيين عليها اسم الأعداد. لكنهم، لتمييزها عن الأعداد العادية، يصفونها بـ «العقدية complex». ولمن مارس منكم الرياضيات حتى وصل إلى الأعداد العقدية كنت سأقول: «إن احتمال حادث معين هو «طويلة module» عدد عقدي، وعندما يتاح للحادث أن يقع بعدة أساليب، تجمع الأعداد العقدية المتعلقة بها؛ وعندما يمكن للحادث أن يُقسم إلى مراحل متوالية، فنضرب معاً الأعداد العقدية المتعلقة بكل هذه المراحل». إن هذه الطريقة في الكلام ذات سمات جدية وعلمية واضحة، لكن ما تعبر عنه لا يزيد شيئاً عما قلته حتى الآن، غير أنني اخترت في هذا الحديث لغة أخرى.

لنعد ، بعد هذا ، إلى التجربة الأولى في محاضرتي السابقة (الانعكاس الجزئي عن سطح وحيد) ولنفحصها كمراحل متوالية (شكل ٤٠) . إن الطريق الذي يسلكه الضوء في الانعكاس ينقسم إلى ثلاثة مراحل (1) الضوء يذهب من المنبع إلى سطح الزجاج ؛ (2) ينعكس عن الزجاج ؛ (3) يذهب من الزجاج إلى الكاشف A . يمكن أن نعتبر كل مرحلة تحويلاً (تصغيراً وتدويراً) يتناول السهم الواحد .



شكل (٣٩)

إن ضرب الأسهم ، على الصعيد الرياضي ، يمكن أن يُعتبر أيضاً سلسلة تحويلات (في هذه الحالة تصغيرات وتدويرات) تتناول السهم الواحد . وكما في الضرب العادي ، لا يهم ترتيب هذه التحويلات : فالسهم X نحصل عليه إما بضرب V بـ W أو بضرب W بـ V .



الشكل (٤٠)

الانعكاس بسطح واحد يمكن تقسيمه إلى ثلاث مراحل متوالية ، تُسلط كل منها على السهم الواحد تصغيراً أو / وتدويراً . فنحصل على سهم طوله 0,2 ، كذلك الذي حصلنا عليه في المحاضرة الأولى ، لكن التحليل الوارد هنا أكثر عمقاً .

ربما تتذكرون أنني ، في المحاضرة الأولى ، لم آخذ في الحسبان كل الطرق التي يمكن أن يسلكها الضوء المنعكس ؛ كان هذا سيجبرني على رسم حشد من الأسهم الصغيرة . فلتحاشي الدخول في التفاصيل تصرفتُ وكأن الضوء يتجه نحو نقطة خاصة من سطح الزجاج ، دون أن يتشتت . لكننا نعلم الآن أن الضوء ، في ذهابه من نقطة لأخرى ، يتناثر بكل معنى الكلمة (ما لم نمنعه من ذلك بواسطة عدسة) . ورغم أن هذا التناثر يتسبب في تصغير السهم الواحد ، أكتفي ، في الوقت الحاضر ، بالفرضية الأبسط وأعتبر أن الضوء لا يتناثر ؛ وعلى هذا لن أهتم بتصغير السهم الواحد الذي ذكرته . وأخيراً ، وضمن هذه الفرضية أيضاً ، يصبح من المعقول افتراض أن كل فوتون مغادر للمنبع سيذهب إلى A أو إلى B .

في هذه الشروط لا نُجري على السهم الواحد أي تصغير ، لكن لا بد من إجراء تدوير له يتعلق بدوران عقرب المزمان التخيلي الذي يقيس زمن ذهاب الفوتون من المنبع إلى سطح الزجاج الأمامي . لنقل ، لمتابعة الحساب ، إن السهم المتعلق بالمرحلة الأولى له طول يساوي 1 ويتجه نحو رقم الساعة الخامسة .

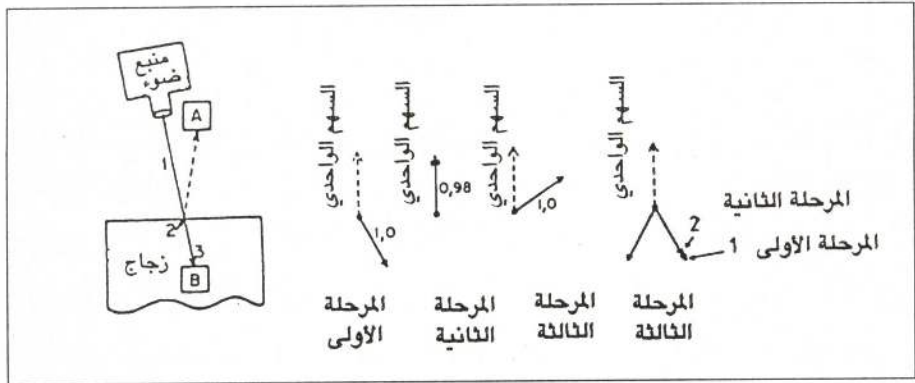
المرحلة الثانية هي انعكاس الفوتون عن الزجاج . لا بد هنا من إجراء تصغير (من 1 إلى 0.2) وتدوير قيمته نصف دورة . (إن هذه الأرقام تبدو لكم اليوم اعتباطية ؛ والواقع أنها تتعلق بنوع المادة التي تعكس الضوء ، وسأشرح لكم في المحاضرة التالية من أين تأتي هذه الأرقام) . فالسعة التي تمثل المرحلة الثانية لها إذن طول يساوي 0.2 واتجاه دار نصف دورة (يذهب نحو الساعة السادسة) .

والمرحلة الأخيرة هي ذهاب الفوتون من سطح الزجاج إلى الكاشف A (شكل ٤٠) . هنا ، كما في المرحلة الأولى ، لا داعي لتصغير السهم ، بل لا بد من تدويره ؛ وبما أن المسافة التي على الفوتون أن يقطعها في هذه المرحلة أقصر قليلاً من مسافة المرحلة الأولى ، لنقل إن السهم هنا يتجه نحو رقم الساعة الرابعة .

بقي علينا الآن أن نضرب معاً أسهم المراحل الثلاث ، 1 و 2 و 3 ، أي أن نجتمع الزوايا ونضرب الأطوال . نتأكد عندئذ أن المفعول الإجمالي للمراحل الثلاث - (1) تدوير ، (2) تصغير وتدوير نصف دورة ، (3) تدوير - لا يختلف بتاتاً عما وجدناه في المحاضرة الأولى . أي أن التدوير المتعلق بالمرحتين 1 و 3 معاً (الساعة ٥ + الساعة ٤) يساوي فعلاً ما داره عقرب المزمان التخيلي عندما كان يقيس زمن الفوتون لقطع الطريق كله («الساعة ٩») . أما بخصوص نصف الدورة المضاف في المرحلة (2)

فيقابل الطريق كله («الساعة ٩»). أما بخصوص نصف الدورة المضاف في المرحلة (2) فيقابل في الواقع ، الذي ذكرناه في المحاضرة الأولى ، وجوب أن نعتد لاتجاه السهم ، المتعلق بالانعكاس عن الزجاج ، عكس الاتجاه الذي يتخذه عقرب المزمان التخيلي . وفي الوقت ذاته نرى أن التصغير ، من 1 إلى 0.2 ، الذي أُجري على سهم المرحلة 2 ، يقود فعلاً إلى نسبة الانعكاس الجزئي ، 0.04 ، الذي لحظناه من أجل انعكاس عن سطح زجاجي وحيد .

إن هذه التجربة تطرح مسألة لم أذكرها في محاضرتي الأولى : ماذا يحدث للفوتونات الذاهبة نحو B ، تلك التي تخترق سطح الزجاج؟ لأول وهلة نظن أن السعة للفوتون الواصل إلى B يجب أن تكون ذات طول مساو تقريباً 0.98 ، لأن $0.98 \times 0.9604 = 0.9604$ ، وهي نتيجة قريبة من 0.96 . لكن هذه السعة يمكن تحليلها تحليلاً أدق بتقسيم الحادث إلى عدة مراحل (شكل ٤١) .



شكل (٤١)

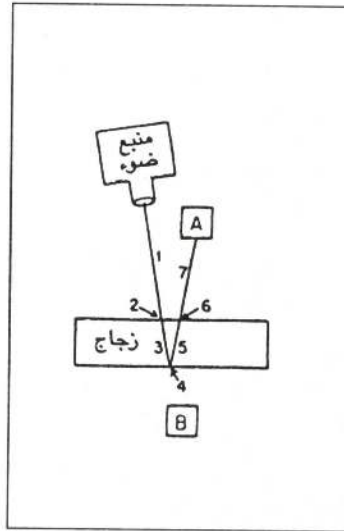
إن اختراق سطح واحد يمكن أيضاً تقسيمه إلى ثلاث مراحل متوالية ، تسلط كل منها على السهم الواحد تصغيراً أو / وتدويراً . نحصل على سهم نهائي طوله 0.98 يعطي ، بتربيعه ، احتمال اختراق مساوياً 0.96 . وبجمع هذا الاحتمال مع احتمال الانعكاس (4%) نجد الاحتمال الكلي 100% .

المرحلة الأولى لا تختلف عن أولى المراحل في الذهاب إلى A : الفوتون يذهب من المنبع إلى سطح الزجاج ؛ السهم الواحد لا يعاني سوى تدوير ينقله من الظُّهر (الساعة ١٢) إلى الساعة ٥ .

المرحلة الثانية هي اختراق السطح الزجاجي ؛ ولا يتعلق بهذا الاختراق أي تدوير ، بل يستدعي تصغيراً طفيفاً ، من 1 إلى 0.98 .

المرحلة الثالثة، سير الفوتون في الزجاج، تستدعي تدويراً إضافياً وتستغني عن التصغير. وهكذا نحصل أخيراً على سهم، للطريق كله، طوله 0.98 ويتخذ اتجاهها معيناً، ومربع طوله يعطي فعلاً القيمة 0.96 كاحتمال لذهاب الفوتون من المنبع إلى B. لندرس الآن من جديد ظاهرة الانعكاس الجزئي عن وجهي صفيحة زجاجية. فالانعكاس عن الوجه الأمامي يطابق الانعكاس عن سطح وحيد، ويمكن إذن تقسيمه إلى ثلاث مراحل، كما فعلنا في الشكل (٤٠).

أما الانعكاس عن الوجه الخلفي فيمكن تقسيم طريقه إلى سبع مراحل واضحة على الشكل (٤٢). ونرى بسهولة ما يلي: إن التدوير الإجمالي يساوي دوران عقرب المزمان في أثناء قطع الفوتون للمسافة من المنبع إلى A (المراحل: 1 و 3 و 5 و 7). أما التصغير فهو حاصل ضرب التصغيرات المعترضة في المرحلة 4 (من 1 إلى 0.2) والمرحلتين 2 و 6 فنحصل أخيراً على سهم يتجه في نفس الاتجاه الذي رأيناه فعلاً في المحاضرة الأولى، لكن طوله يساوي تقريباً 0.192 أي 0.2×0.98 (0.98) الذي كنت قرّبته إلى 0.2.



شكل (٤٢)

إن حدث الانعكاس بسطح خلفي لصفيحة زجاجية يمكن أن ينقسم إلى سبع مراحل متوالية. المراحل 1 و 3 و 5 و 7 لا تعطي السهم الواحد سوى تدويرات، أما المرحلتان 2 و 6 فتعطي كل منهما تصغيراً نسبته 0.98، وتعطي المرحلة 4 تصغيراً نسبته 0.2. نحصل في النهاية على سهم طوله 0.192 (وهو عدد كتبناه 0.2 في المحاضرة الأولى) ودار اتجاهه من الساعة ١٢ بزاوية يعينها عقرب المزمان الذي يقيس الزمن الذي يستغرقه الضوء لقطع الطريق كله من المنبع إلى A.

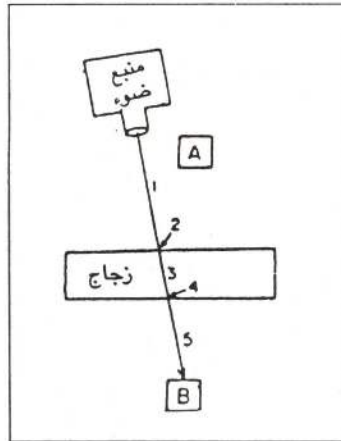
إليكم إذن باختصار القواعد التي تحكم ظواهر انعكاس الضوء ومروره إلى الوسط الآخر :

(١) الانعكاس من الهواء في الهواء (على سطح فاصل لوسط آخر) : تصغير السهم الواحد بنسبة 0.2 وتدويره نصف دورة ؛

(٢) الانعكاس من الزجاج في الزجاج (على الوجه الخلفي لصفحة) : تصغير بنسبة 0.2 أيضاً ولكن دون تدوير ؛

(٣) المرور من الزجاج إلى الهواء أو من الهواء إلى الزجاج : تصغير بنسبة 0.98 دون تدوير .

هذا ، ورغم علمي بأن الإنسان يملّ من كل شيء ، إلا أنني لا أستطيع مقاومة المتعة في أن أبين لكم ، بمثال آخر ، كيف يتم ذلك كله وما تتيحه قواعد التحليل المرحلي هذه . سأنقل الكاشف وأضعه تحت صفحة الزجاج ؛ وأطرح الآن السؤال التالي (الذي أهملناه في المحاضرة الأولى) : ما هو احتمال أن يخترق الفوتون وجهي الزجاج كليهما واحداً بعد الآخر (شكل ٤٣) ؟



شكل (٤٣)

إن اختراق السطحين يمكن تقسيمه إلى خمس مراحل متوالية . في المرحلة 2 يُصغّر السهم الواحد إلى قرابة 0.98 من طوله . وفي المرحلة 4 يُصغّر السهم الجديد إلى 0.98 من طوله ، فتكون النتيجة تصغيراً للسهم الواحد إلى قرابة 0.96 من طوله . لكن المراحل 1 و 3 و 5 لا تقتضي سوى تدويرات . والسهم النهائي ، الذي طوله 0.96 ، يعطي بتربيعة احتمال أن يخترق الفوتون الصفيفة كلها ، أي 92% . ونسبة الاختراق هذه تبقى للانعكاس نسبة (احتمالاً) قيمته 8% . لكننا نعلم أن هذا لا يحدث إلا مرتين في الدور الواحد (من الشكل ١٨) . وعندما يكون ثخن الصفيفة يؤدي إلى نسبة انعكاس تساوي 16% تصبح هذه المحاكمة هنا مغلوطة ، لأن حاصل جمع الاحتمالين (92% + 16%) يعطي احتمالاً كلياً أكبر من 100% ! وهذا غير معقول ، فما السبب؟ السبب واضح في الشكل (٤٤) .

الجواب واضح : إن احتمال أن يصل الفوتون إلى B نحصل عليه ، ببساطة ، من طرح احتمال أن يصل إلى A من 100% ؛ وقد حسبنا في المثال السابق احتمال وصوله إلى A . فإذا كان احتمال الوصول إلى A مساوياً 7% ، يكون احتمال الوصول إلى B مساوياً 93% . ولما كنا نعلم أن احتمال الوصول إلى A يتراوح بين 0% و 16% (بحسب ثخن الصفيحة) نستنتج أن احتمال الوصول إلى B يتراوح بين 100% و 84% .

صحيح أن الجواب بهذه المحاكمة واضح . لكن يجب أن يكون بالإمكان أيضاً الوصول إلى النتيجة نفسها بتربيع طول سهم ، كما يحدث لكل احتمال يحترم نفسه . فكيف نعمل لحساب سعة اختراق الصفيحة الزجاجية كلها؟

كيف يمكن للسهم المتعلق بالاختراق أن يتغير طوله بما يضمن أن يظل مجموع احتمالي الوصول إلى A وإلى B مساوياً دوماً 100% . سنقطع تلك المراحل ، واحدة تلو أخرى ، لنجري على كل مرحلة التصغير والتدوير اللازمين .

إن المراحل الثلاث الأولى هي نفسها التي ذكرناها في المثال السابق : ذهاب الفوتون أولاً من المنبع إلى سطح الزجاج (تدوير أول دون تصغير) ، مروره من الهواء إلى الزجاج ثانياً (لا يوجد تدوير بل تصغير بنسبة 98%) ، مسيره في الزجاج ثالثاً (تدوير دون تصغير) .

إن المرحلة الرابعة - اختراق وجه الصفيحة الخلفي - تماثل المرحلة الثانية في كل شيء : لا يوجد تدوير بل تصغير بنسبة 98% على الـ 98% المتبقية بعد المرحلة الثانية ، أي بالإجمال سهم طوله 0.96 .

ينفذ الفوتون أخيراً إلى الهواء (المرحلة الخامسة) متجهاً نحو الكاشف : تدوير جديد دون تصغير . نحصل ، في نهاية المراحل كلها ، على سهم طوله 0.96 ، أما اتجاهه فهو الاتجاه الذي يتخذه عقرب المزمان التخيلي الذي يقيس زمن الذهاب من المنبع إلى الكاشف .

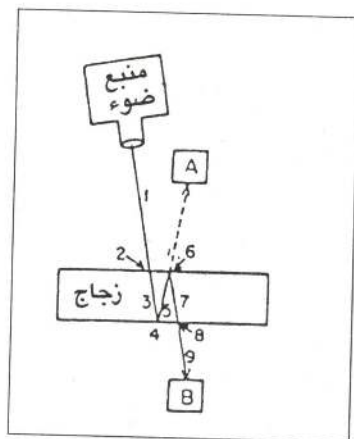
يتعلق بالسهم الذي طوله 0.96 احتمال يساوي قرابة 92% (مربع 0.96) أي أن 92 فوتوناً ، من أصل كل مئة تخرج من المنبع ، تصل إلى B . أو قل إن 8% فقط

تنعكس عن مجمل وجهي الصفیحة وتصل إلى A . لكننا ، فی المحاضرة السابقة ، وجدنا أن نسبة الانعكاس الإجمالية لا تساوي 8% إلا أحياناً («مرتين فی اليوم» ، أي فی الدورة الواحدة) ، وأنها تتناوب بین 0% و 16% دورياً لدى ازدياد ثخن الصفیحة . أمر غریب! ما الذي یطراً عندما یكون للصفیحة بالضبط الثخن الذي یجعل نسبة الانعكاس مساوية 16%؟ هل یجب أن نرغم أنفسنا علی القبول بأن 16 فوتوناً ، من أصل كل 100 تغادر المنبع ، تصل إلى A وأن 92 فوتوناً تصل دوماً إلى B ، أي ما مجموعة 108%؟ كلا ، إن هذا محال! . لا بد أن هنالك خطأ فی استنتاجتنا .

الخطأ ، ببساطة ، هو أننا لم نأخذ فی الحسبان كل الأسالیب التي یمكن أن ینتهجها الضوء للذهاب من المنبع إلى B! فالضوء یستطیع ، مثلاً ، أن ینعكس عن الوجه الخلفی ویقطع ثخن الصفیحة مرة ثانية ، وكأنه یتجه نحو A ، ثم ینعكس عن الوجه الأمامی عائداً أدراجه نحو B (شكل ٤٤) . إن هذا الطریق یمكن تقسیمه إلى تسع مراحل . وسندرس الآن ما یحدث للسهم الواحدی فی أثناء هذه المراحل التسع (لا تخافوا ، إن السهم الواحدی لا یعاني سوى تصغیرات وتدویرات!) .

شكل (٤٤)

یجب إجراء الحساب بشكل أدق . وهذا یقتضي أن نأخذ فی الحسبان أسلوباً آخر متاحاً للفوتون كي یخترق الصفیحة كلها . وهذا الأسلوب ، الموضح هنا ، یطوي علی وجوب إجراء تصغیرین ، كل منهما بنسبة 0.98 (المرحلتین 2 و 8) ثم تصغیرین آخرین ، كل منهما بنسبة 0.2 (المرحلتین 6 و 9) نحصل عنذئذ علی سهم نهائی طوله 0.0384 (نعتبره 0.04) .



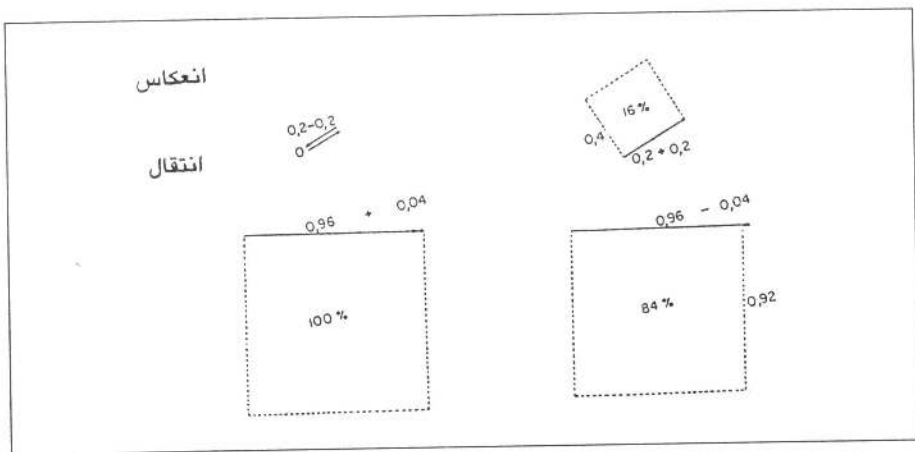
المرحلة الأولى : یسیر الفوتون فی الهواء : تدویر دون تصغیر . المرحلة الثانية : یخترق الفوتون السطح الأمامی (العلوی) : لا تدویر بل تصغیر بنسبة 0.98 . المرحلة الثالثة : الفوتون یعبر ثخن الصفیحة كله ، نازلاً ، تدویر دون تصغیر . المرحلة الرابعة : الفوتون ینعكس عن السطح الخلفی (السفلی) ؛ لا تدویر بل تصغیر بنسبة 0.2 یتسلط علی الـ 0.98 السابقة ، أي ما مجمله 0.196 . المرحلة الخامسة : الفوتون یعبر ثخن

الصفحة كله من جديد صاعداً، تدوير دون تصغير . المرحلة السادسة: الفوتون ينعكس عن السطح العلوي ، لا تدوير بل تصغير بنسبة 0.2 يتسلط على الـ 0.196 السابقة ، أي ما مجمله 0.0392 . المرحلة السابعة : الفوتون يعبر الزجاج نحو الاسفل ؛ تدوير دون تصغير . المرحلة الثامنة : الفوتون يخترق السطح السفلي : لا تدوير بل تصغير بنسبة 0.98 يتسلط على الـ 0.0392 السابقة ، أي ما مجمله 0.0384 . المرحلة التاسعة أخيراً : الفوتون يسير في الهواء حتى يبلغ الكاشف : تدوير بلا تصغير .

ففي نهاية هذه العمليات كلها ، من تدوير وتصغير ، نجد سعة (سهماً) طولها 0.03484 - لنقل 0,04 للتبسيط طالما لا نحتاج إلى دقة أكبر - وقد دارت بزوايا يحددها اتجاه عقرب المزمان التخيلي عندما يقف في نهاية المطاف . وهذه السعة تتعلق بأسلوب ثان متاح للضوء كي يذهب من المنبع إلى الكاشف . فنحن حيال حادث يمكن أن يقع بأسلوبين مختلفين ؛ ونعلم أننا يجب علينا ، في حال أسلوبين متاحين ، أن نجمع السعتين بالطريقة المعهودة . علينا إذن أن «نعلق» السهم الذي طوله 0.96 (الناجم عن الأسلوب الأول ، المباشر ، شكل ٤٣) بالسهم الذي طوله 0.04 (الناجم عن الأسلوب الثاني ، الطريق الأطول في الشكل ٤٤) .

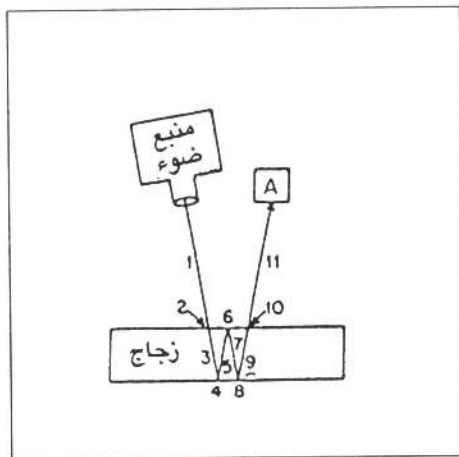
وبتعبير آخر : عندما يكون احتمال الانعكاس معدوماً يكون احتمال الاختراق مساوياً 100% (شكل ٤٥) . وفي مقابل ذلك ، إذا كان مجموع السهمين المتعلقين بالانعكاس مجدياً ، أي بحيث يعطي سعة تساوي 0,4 ، فإن السهمين المتعلقين بالاختراق يُعدّل أحدهما الآخر معطين سعة طولها 0.96 - 0.04 = 0.92 ، أي : عندما تكون نسبة الانعكاس مساوية 16% (مربع 0,4) تكون نسبة الاختراق مساوية 84% (مربع 0.92) . لنتوقف لحظة كي نُعجب بمهارة الطبيعة في صنع قوانينها ، بحيث تعطي دوماً احتمالاً كلياً يساوي 100% (*) .

(*) لا بد أنكم لاحظتم ، في كل ذلك ، أننا استعملنا 0,04 بدلاً من 0.0384 . واعتبرنا أن مربع 0.92 هو 84% ، بحيث أصبح مجموع الاحتمالين مساوياً تماماً 100% . والواقع أننا لو أخذنا في الحسبان كل الأساليب المتاحة لاستغنينا عن هذه التقريبات : إن الأسهم المتعلقة بكل الأساليب المتاحة تعطي ، بجمعها كلها ، احتمالاً كلياً يساوي 100% دوماً . ولأولئك الذين يحبون الاستمتاع بهذا النوع من الحسابات أدلهم علي طريق آخر متاح للضوء كي يذهب من المنبع إلى الكاشف A (شكل ٤٦) : ثلاثة انعكاسات وعبران ، تعطي كلها سهماً نهائياً طوله $0.98 \times 0.2 \times 0.2 \times 0.2 \times 0.98 = 0.008$ ، أي سهماً صغيراً جداً . فلإجراء الحساب بالكامل للانعكاس الجزئي بالسطحين يجب أن نضيف هذا السهم الثالث إلى الحساب السابق ، وكذلك أيضاً سلسلة أسهم أقصر فأقصر تتعلق بخمس انعكاسات ، وسبعة ، الخ .



شكل (٤٥)

إن الطبيعة تتدبر دوماً أمرها كي يكون مجموع احتمالي الاختراق والانعكاس مساوياً 100%. فعندما يكون من شأن ثخن الصفيحة أن يؤدي إلى سمعتي اختراق متراكمتين بالجمع، تصبح سمعتا الانعكاس متفانيتين. والعكس بالعكس، أي عندما تتراكم سمعتا الانعكاس، تتفاني سمعتا الاختراق.



شكل (٤٦)

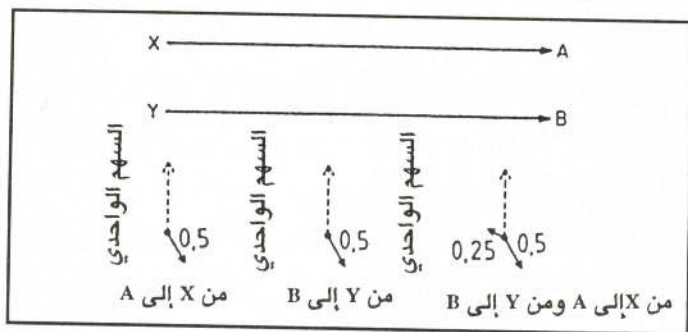
إذا أردنا إجراء الحساب بكل دقة، يجب علينا أن نأخذ في الحسبان أساليب أخرى متاحة للانعكاس. وقد رسمنا هنا أحد هذه الأساليب، وهو يؤدي إلى تصغيرين، كل منهما بنسبة 0.98 (المرحلتين 2 و 10)، متبوعين بثلاثة تصغيريات، كل منها بنسبة 0.2 (المراحل 4 و 6 و 8) نحصل بعدئذ على سهم نهائي طوله قرابة 0.008. ولما كنا هنا حيال أسلوب آخر متاح للانعكاس، يجب إضافة هذا السهم إلى الأسهم التي أطوالها 0.2 (انعكاسي بالوجه الأمامي) و 0.192 (انعكاس بالوجه الخلفي).

أخيراً - ثم أتوقف - أريد أن أقول لكم إن ضرب الأسهم صالح، ليس فقط في حال حادث يقبل التحليل إلى مراحل متوالية، بل أيضاً في حال حادث يتطلب تصافر عدة أمور (مستقلة وأحياناً في وقت واحد). تصوروا، على سبيل المثال، أن

لديكم منبعين X و Y وكاشفين A و B (شكل ٤٧) ، وأنكم تريدون أن تحسبوا احتمال أن يستقبل كل من A و B فوتوناً عندما يُصدر كل من X و Y فوتوناً.

ترون في هذا المثال أن المسألة ليس فيها انعكاس ولا اختراق ، وأن الفوتونات تذهب مباشرة من المنبع إلى المصب . وسأغتنم هذه الفرصة كي لا أستمّر في إهمال ما كنت أهملته حتى الآن ، أي بالتحديد تناثر الضوء في أثناء سيره . سأعرض أمامكم ، بكل بهائها ، القاعدة التي تحكم انتقال الضوء من نقطة من الفضاء إلى أخرى . فليس فيما سأقوله لكم أي نوع من التقريب أو التبسيط . هاكم القاعدة التي تنطوي على كل ما يجب معرفته عن طريق انتشار الضوء وحيد اللون في الفضاء (مع أخذ الاستقطاب بعين الاعتبار) : اتجاه السهم هو اتجاه عقرب المزمان التخيلي الذي يقيس الزمن الذي يستغرقه الضوء لقطع المسافة المقصودة (إن عدد دورات هذا العقرب ، على صفحة المزمان ، من أجل واحدة المسافة يتوقف على لون الضوء) ؛ طول هذا السهم متناسب عكسياً مع طول المسافة المقطوعة (بتعبير آخر ، يعاني السهم تصغيراً تزداد نسبته بازدياد المسافة^(*)).

لنفترض أن السهم المتعلق بالمسافة من X إلى A ذو طول مساو 0.5 ومتجه نحو الساعة الخامسة ، وأن هذا أيضاً شأن السهم المتعلق بالمسافة من Y إلى B (شكل ٤٧) . فإذا ضربنا هذا السهم بذلك نجد سهماً حاصلًا طوله 0.25 ويتجه نحو الساعة العاشرة .



شكل (٤٧)

إذا كان أحد الأساليب المتاحة لوقوع الحادث ينطوي على عدة عمليات تتم بشكل مستقل ، عندئذ نحصل على السعة المتعلقة بهذا الأسلوب من ضرب ساعات هذه العمليات المستقلة . الحادث النهائي هنا يمكن أن يوصف كما يلي : في كل مرة يصدر فيها فوتون من X و Y ، «يتك» الكاشفان في A و B . الأسلوب الأول : فوتون يذهب من X إلى A وفوتون يذهب من Y إلى B («حادثان تحتيان» مستقلان) . نحصل على سعة وقوع هذا الأسلوب الأول من ضرب السهم الناجم عن أحد «الحادثين» المستقل (من X إلى A) بالسهم الناجم عن الآخر المستقل (من Y إلى B) . (تمة هذه المحاكمة في الشكل ٤٨) .

(*) لاحظوا أن هذه القاعدة لا تناقض ما علموكم إياه في المدرسة ، من أن الطاقة الضوئية المرسلة إلى مسافة ما ، متناسبة عكسياً مع مربع المسافة ، ذلك أن السهم المصغر إلى نصفه يصبح مربعه أصغر بأربع مرات .

نحصل على السعة النهائية بجمع السهمين المتعلقين بالأسلوبين المذكورين .
ولما كان لهما عملياً طول واحد فقد يتفق أن يلغي أحدهما الآخر ، ولأجل ذلك
يكفي أن يتعاكس اتجاهاهما ، أي أن تزداد الزاوية بينهما ، ولا شيء أسهل من ذلك ،
إذ يكفي أن تزداد المسافة بين المنبعين (أو بين الكاشفين) .

وهكذا إذن يمكن ، بمجرد إبعاد أحد الكاشفين قليلاً عن الآخر ، أن يزداد
احتمال الحادث المقصود ، أو أن يتناقص حتى ينعدم (تماماً كما كانت الحال في
الانعكاس الجزئي عن سطحين) (*) .

لقد لجأنا في هذا المثال إلى ضرب سعتين جزئيتين ، إحداهما بالآخرى ، ثم
إلى جمع حاصلتي الضربين للحصول على السعة النهائية التي مربعها هو الاحتمال
المنشود . ويجب أن لا ننسى أبداً ، مهما كان عدد الأسهم الواجب جمعها أو ضربها ،
أن الهدف هو الحصول على سهم واحد ووحيد يمثل سعة الحادث المقصود . وأكثر
الأخطاء التي يرتكبها طلاب الفيزياء المبتدئون إنما تأتي من قلة الانتباه إلى هذه
الناحية . وبصادق القول أقول : إننا كثيراً ما ندعوهم إلى تحليل أمثلة لا تتناول سوى
فوتون واحد ، إلى أن اختلط عندهم السهم بالفوتون ، بما أنساهم أن الأسهم هي في
الحقيقة ساعات الاحتمال ، وأن مربعها يمثل احتمال الحادث ، وهو عموماً حادث
مركب (**) .

سأبدأ ، في المحاضرة القادمة ، بشرح مبسط لخواص المادة ، وسيقودني ذلك
إلى أن أشرح لكم ، من ضمن ما أشرح ، من أين يأتي العدد المعهود 0,2 ، ولماذا
يبدو أن الضوء أبطأ في الزجاج منه في الهواء ، إلخ . لأنني ، وهذا اعتراف صريح ،
ارتكبت حتى الآن خداعاً كبيراً : الواقع أن الفوتونات لا تنزو (لا تنعكس) ،
خلفاً لما قلت ، عن سطح الزجاج ، إنها تتفاعل مع الإلكترونات الموجودة في
أحشاء الزجاج . سأريكم كيف تذهب الفوتونات من إلكترون لآخر ، وسترون عندئذ
أن ظواهر الانعكاس والاختراق تنجم عن عملية يلتقط فيها الإلكترون فوتوناً ،
فيتردد لحظة ثم يُصدر فوتوناً جديداً . لكن هذا لا يمنع أن التبسيط الذي خدمننا
حتى الآن لا يخلو من متعة .

(*) إن هذه الظاهرة ، المعروفة باسم مفعول هنبوري - براون - تويس ، تسمح في الفلك الراديوي - radio - astronomy -
بتمييز منبع وحيد عن منبع مضاعف .

(**) إن من الخير أن يكون هذا المبدأ العام دائم الحضور في الذهن إذا أردنا اجتناب الوقوع في كل أنواع الاختلاطات مثل
«تقصير رزمة الأمواج» وسواها من المفعولات السحرية .

الفصل الثالث

الإلكترونيات وتفاعلاتها

الإلكترونات وتفاعلاتها

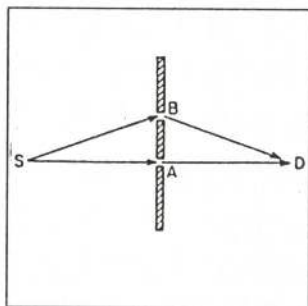
هاكم الآن ثلاثة المحاضرات الأربع المخصصة لنظرية الإلكترونديناميك الكمومي ، ذلك الموضوع الصعب . ولما كنت أرى بوضوح ، هذا المساء ، حضور جمهور أكبر من ذي قبل ، أستنتج أن فيكم أناساً لم يكونوا هنا في المحاضرتين السابقتين ولن يفهموا شيئاً مما سأقوله اليوم . أما أولئك الذين أصغوا حقاً إلى المحاضرتين الأوليين فسيجدون في فهم محاضرة اليوم صعوبة لا تقل عن ذي قبل ، لكنهم يعلمون أن ذلك شيء طبيعي : ذلك أن طريقتنا في وصف الطبيعة هي ، كما ذكرت في المحاضرة الأولى ، طريقة غير مبررة عموماً .

أريد أن أتكلم في هذه المحاضرات عن الميدان الذي نعرفه أحسن معرفة في الفيزياء ، ألا وهو التفاعل بين الضوء والإلكترونات . فمعظم ما هو مألوف لديكم من ظواهر ناجم عن هذا التفاعل بين الضوء والإلكترونات - تلك مثلاً ، حال مجموعة الظواهر التي تُدرس في الكيمياء والبيولوجيا (علم الحياة) . ولا تشذ عن هذه النظرية سوى ظواهر الثقالة والعمليات النووية ، أما كل الباقي فمن اختصاصها . كنا ، في المحاضرة الأولى ، قد شعرنا بالحاجة إلى آلية مُرضية توضح لنا كيفية حصول الظواهر ، ولو أبسطها ، كالانعكاس الجزئي للضوء عن الزجاج . كما نفتقد أيضاً طريقة للتنبؤ عما إذا كان الفوتون سينعكس عن الزجاج أو سينفذ فيه . وكل ما نستطيع عمله هو حساب احتمال أن يقع الحادث المقصود ، أي الانعكاس هنا . (إن هذا الاحتمال يساوي 4% عندما يصل الضوء عمودياً على سطح الزجاج ، وهو يزداد إذا كانت زاوية السقوط على الزجاج مائلة) .

إن الاحتمالات العادية تستجيب لـ «قاعدتي التركيب» التاليتين : (١) إذا كان الحادث يمكن الوقوع بأساليب عديدة متاحة ، نجمع احتمالات كل واحد من هذه الأساليب (البدائل) ؛ (٢) إذا كان الحادث يقع في نهاية مراحل متوالية ، أو إذا كان وقوعه يتعلق بعدد من الشروط المستقلة ، عندئذ نضرب معاً احتمالات كل مرحلة من المراحل ، أو كل شرط من الشروط ، الضرورية لوقوع الحادث .

إننا، في عالم الفيزياء الكمومية الممتع والمزخرف، نحصل على قيمة الاحتمال بحساب مربع طول سهم: فحيث نتوقع، في الظروف العادية، أن نجمع الاحتمالات نلجأ إلى «جمع» أسهم، وحيث نضرب الاحتمالات، نلجأ إلى «ضرب» أسهم. لكن الأجوبة العجيبة التي نحصل عليها من حساب الاحتمالات بهذه الطريقة تتفق تماماً مع النتائج التجريبية. هذا وإن وجوب اللجوء إلى قواعد ومحاكمات على هذه الدرجة من الغرابة، كي نفهم الطبيعة، لمما يغمرني بالسرور ويحجب إلى أن أتحدث عنه إلى الناس. وليس وراء هذا التخيل للطبيعة آليات خفية أخرى؛ فهاكم اليوم ما يجب أن تتقبلوه إذا أردتم فهم صاحبة الجلالة، هذه الطبيعة!

أحب أن أريك، قبل أن أدخل في صلب الموضوع، نموذجاً آخر لسلوك الضوء. وأريد أن أتكلم عن ضوء ضعيف جداً - ليس أكثر من فوتون واحد في كل إصدار - وذي لون واحد صافٍ. (شكل ٤٩). أضع بين المنبع S والكاشف D حاجزاً فيه ثقبان صغيران جداً، A و B، المسافة بينهما بضعة ميليمترات. (إذا كانت المسافة بين المنبع والكاشف قرابة متر واحد، يجب أن لا يزيد قطر الثقب عن عُشر الميليمتر) لنضع A على استقامة DS، فالثقب B ليس على المستقيم DS.



شكل (٤٩)

الثقبان الصغيران (A و B)، في حاجز يقع بين منبع S وكاشف D، يدعان كمية واحدة عملياً من الضوء (هنا 1%) تمر عبر كل منهما، إذا كان أحدهما فقط هذا أو ذاك، مفتوحاً. فإذا كانا مفتوحين معاً تحدث «تداخلات»: أي أن الكاشف «يتك» بنسبة تتراوح، بحسب المسافة بين الثقبين، بين الصفر و 4%؛ انظر الشكل ٥١ (a).

إذا أغلقنا الثقب B نحصل على «تكات» في D تمثل الفوتونات التي مرت عبر الثقب A (لنقل إن الكاشف يصدر «تكة» مرة واحدة في المتوسط من أجل كل 100 فوتون تصدر تبعاً عن المنبع، أي في 1% من عدد الفوتونات الصادرة في كل اتجاه). وعندما نغلق A وتفتح B تعلمون، منذ المحاضرة الثانية، أن صِغَرِ الثقبين

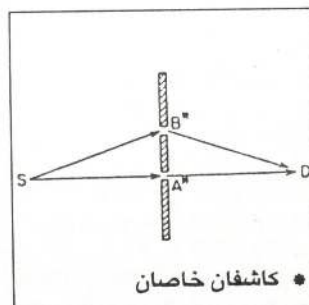
يجعل عدد التكات الوسطى مساوياً أيضاً 1% . (عندما تُجبر الضوء على سلوك مَرَّ ضيق جداً ، كما رأينا في تجربة الشكل (٣٤) ، فإن قوانين الضوء التقليدية - كذهاب الضوء في خط مستقيم - تصبح باطلة) ، لكننا ، عندما نفتح الثقبين معاً ، نحصل على نتيجة معقدة ، بسبب التداخل INTERFERENCE الذي يحدث : إذ ، من أجل فاصل معين بين الثقبين ، نحصل على تكات أكثر من الـ 2% المتوقعة (نسبتها العظمى 4% تقريباً) ، وإذا غَيَّرنا قليلاً هذا الفاصل يصمت الكاشف تماماً.

إن ما يحق لنا أن نتوقعه هو أن يؤدي فتح الثقب الآخر ، في كل الأحوال ، إلى مزيد من الضوء القادم إلى الكاشف ، لكن هذا لا يحدث في الواقع . فمن الخطأ إذن أن نقول بأن الضوء يمر «من هذا الطريق أو ذاك» . وما زال يُفَلت مني أن أقول جملاً من قبيل «إنه يمر من هنا أو من هناك» ، لكن من المهم أن تتذكروا أنني ، بهذا القول ، أقصد وجوب جمع السعات (الأسهم) : إن للفوتون سعةً للمرور من هذه الجهة وسعة للمرور من الجهة الأخرى . وإذا تعاكست السعتان فإن الضوء لا يذهب إلى الكاشف ولو كان الثقبان مفتوحين معاً .

واليكم الآن أيضاً ، من غرائب الطبيعة ، تصرفاً آخر أحب أن أحدثكم عنه . تصوروا (شكل ٥٠) أننا وضعنا كاشفين من نوع خاص - واحداً في A والآخر في B - يسمحان بتحديد الثقب الذي يمر منه الفوتون عندما يكون الثقبان مفتوحين (يمكن صنع كاشف يعلن عن مرور الفوتون به) . ولما كان احتمال أن يذهب الفوتون من S إلى D متعلقاً بالمسافة بين الثقبين ، فإن على الفوتون أن يجد في الخفاء طريقة للانقسام إلى نصفين يعودان بعدئذ إلى الالتحام . هل توافقون؟ في هذه الفرضية يجب على الكاشفين ، عند A و B ، أن «يتكا» معاً على الدوام (ربما نصف عدد المرات؟) في حين أن الكاشف D «يتك» باحتمال يتراوح بين الصفر و 4% ، بحسب المسافة بين A و B .

شكل (٥٠)

عندما نضع عند كل من A و B كاشفاً خاصاً ينبىء عن الثقب الذي مر عبره الفوتون ، والثقبان مفتوحان ، تتغير نتيجة التجربة . ولما كان الفوتون الواحد ، في حال مراقبة الثقبين بالكاشفين ، يمر من هذا الثقب أو ذاك ، فأننا نحصل على إحدى النتيجتين التاليتين (١) : الكاشفان في A و D «يتكان» ، أو (٢) الكاشفان في B و D «يتكان» . واحتمال وقوع كل من هذين الحادتين يساوي قرابة 1% . تجمع احتمالي هذين الحادتين جمعاً حسابياً فنجد احتمال أن «يتك» D ، هو 2% ؛ انظر الشكل ٥١ (b) .



لكن الذي يحدث في الواقع هو ما يلي : إن الكاشفين ، عند A و B ، لا «يتكان» أبداً معاً ، إما أن «يتك» A أو «يتك» B . إن الفوتون لا ينقسم إذن ؛ بل يمر من هذه الجهة أو من تلك .

زد على ذلك أن الكاشف D ، في هذه الظروف ، «يتك» مرتين في المئة ، وهي نسبة تساوي ببساطة مجموع احتمالي أن «يتك» A وأن «يتك» B (1%+1%). وهذه النسبة ، 2% ، لا تتغير بتغير المسافة بين A و B ، أي أن التداخل يزول عندما نضع كاشفاً عند كل من A و B ؛ شيء عجيب! .

إن الطبيعة قد تدبرت أمرها جيداً بحيث تمنعنا من معرفة طريقة عملها: عندما نضع أجهزة وظيفتها أن تتنبأ عن الطريق الذي اختاره الفوتون نحصل على الجواب المنشود ، لكن مفعولات التداخل الرائعة تزول! وإذا لم نضع تلك الأجهزة ، أي إذا تخلينا عن معرفة طريق الفوتون ، فإن مفعولات التداخل تعود إلى الوجود! أليس هذا غريباً جداً؟! .

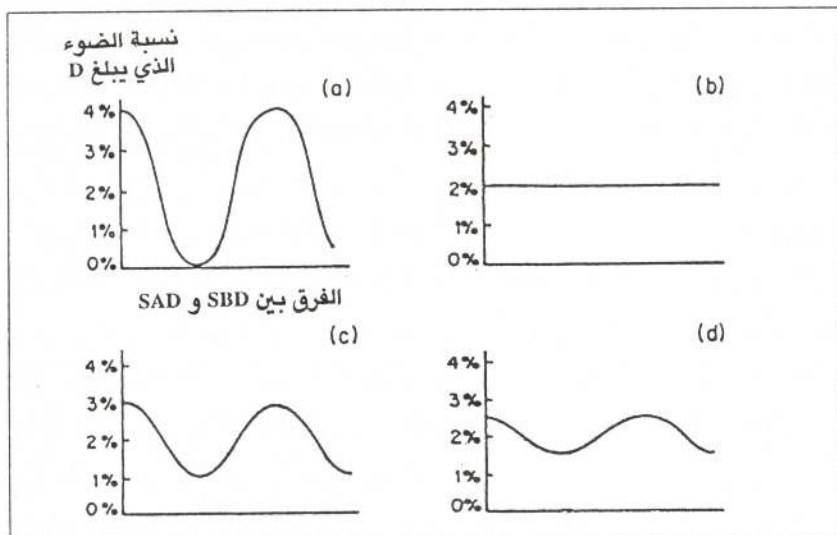
ولفهم هذه المفارقة أذكركم بمبدأ هام جداً : إن الحساب الصحيح لاحتمال الحادث يستدعي بذل عناية كبيرة في التحديد الواضح للحادث بكامله - لاسيما الشروط البدئية والنهائية للتجربة . فتفحص التجهيزات قبل التجربة وبعدها وما تغير في أثناء ذلك كله . فعندما استهدفنا احتمال ذهاب الفوتون من S إلى D بدون كاشفين في A و B ، كان الحادث ببساطة : الكاشف «يتك» مرة واحدة . ولما كان التغير الوحيد في الظروف هو صدور التكة عن D ، لم نكن نملك وسيلة لمعرفة الجهة التي مر منها الفوتون وحصل تداخل .

لكننا غيرنا ظروف المسألة عندما وضعنا الكاشفين عند A و B ، فأصبحنا نعالج حالة حادثين كاملين - مجموعتين من الظروف البدئية - وهما متمايزان : (١) الكاشفان ، في A و D «يتكان» ، أو (٢) الكاشفان في B و D «يتكان» . فعندما يتاح ، في تجربة ما ، عدد من الظروف النهائية ، يتوجب علينا أن نحسب احتمال كل ظرف وكأنه حادث منفصل كامل .

فلحساب سعة أن «يتك» الكاشفان في A و D يجب ضرب السهمين المتعلقين بالمرحلتين التاليتين : الفوتون يذهب من S إلى A ، ثم من A إلى D حيث «يتك» الكاشف . ويتربع السهم الحاصلة نجد احتمال هذا الحادث - 1% - ولا تختلف ظروف هذا الحادث عن الظروف السائدة عندما كان الثقب B مغلقاً ، لأن

كلا من هاتين الحالتين تنطوي على المرحلتين نفسيهما، ويُحسب احتمال الحادث الآخر بالطريقة نفسها، 1%.

وإذا لم نهتم إلا بتكة الكاشف D فقط، وتخلينا عن معرفة أي الكاشفين، A أم B، «يتك» في أثناء ذلك، نحصل على الاحتمال المنشود بجمع احتمالي الحادثين، فنجد 2%. ولو بقي شيء في الجملة نستطيع رصده، من حيث المبدأ، لنعلم من أي جهة مر الفوتون، نكون أمام حالتين نهائيتين متميزتين (ظرفين نهائيين مختلفين)، ويجب جمع احتمالي كل من الحالتين النهائيتين، لا جمع السعتين (*).



شكل (٥١)

في غياب الكاشفين الخاصين عن A و B يوجد تداخل: كمية الضوء الواصلة إلى D تتغير بين الصفر و 4% (a). وبوجود كاشفين موثوقين تماماً لا يوجد تداخل، فتكون كمية الضوء الواصلة إلى D ثابتة، وهي هنا 2% (b)، أما إذا كان الكاشفان رديئين (أي أن الواحد منهما قد لا «يتك» عندما يمر به الفوتون)، نصبح أمام بدائل ثلاثة: A و D يتكان، أو B و D يتكان، أو D وحده. يكون عندئذ المنحنى الحاصل مزيجاً مؤلفاً من إسهامات كل من هذه الظروف النهائية الثلاثة الممكنة. وكلما نقصت الثقة في الكاشفين، في A و B، يزداد عدد التداخلات. إن الثقة في هذين الكاشفين أقل في حال (c) منها في حال (d). إن المبدأ الذي يحكم التداخل هو التالي: نحسب بصورة مستقلة احتمال كل واحد من مختلف الظروف النهائية الممكنة بجمع الأسهم وبأخذ مربع طول السهم الحاصلة؛ وبعدئذ نجمع شتى الاحتمالات بالطريقة المعتادة.

(*) ونهاية القصة أكثر عجباً: إذا كان الكاشفان في A و B رديئين، يصمتان أحياناً رغم مرور الفوتون بهما، نصبح أمام ثلاثة ظروف نهائية: (١) الكاشفان في A وفي D «يتكان»، (٢) الكاشفان في B و D «يتكان» (٣) الكاشف في D «يتك» وحده، في حين يصمت A و B (يظان في الحالة البدئية). يحسب عندئذ احتمالا الحادثين الأولين بالطريقة المشروحة أعلاه (سوى أنه يوجد الآن مرحلة إضافية - تصغير احتمال أن «يتك» الكاشف [A و B]، لأن الكاشفين رديئان)، وعندما «يتك» D، وحده، لا نستطيع فصل الحادثين، وتتلاعب بنا الطبيعة بإحداث تداخل، كان الكاشف الذي صمت غير موجود (سوى أن السهم النهائي يصغر بنسبة سعة أن يصمت الكاشفان). وتكون النتيجة مزيجاً، مجرد مجموع الحالات الثلاث شكل (٥١). ولو ازدادت موثوقية الكاشفين لتضاءلت التداخلات.

لقد أبرزت لكم هذه الأشياء كي تروا أننا كلما ازددنا اكتشافاً لتصرفات الطبيعة ازدادت الصعوبة في صنع نموذج يفسر مجريات ظواهرها بصدق، مهما كانت بسيطة. ولذلك تخلى الفيزيائيون عن محاولاتهم بهذا الصدد.

وبالعودة إلى موضوعنا، تذكروا أنني أريتكم في المحاضرة الأولى كيف يمكن للحادث أن يقع بعدة أساليب، وكيف يمكن «جمع» الأسهم المتعلقة بكل واحد من هذه الأساليب. ثم رأيتم، في المحاضرة الثانية، كيف نستطيع تقسيم كل أسلوب إلى مراحل متوالية، وكيف أمكن اعتبار السهم المتعلق بكل مرحلة نتيجةً لتحويل تجربته على السهم الواحد، وكيف نستطيع - بالتصغير والتدوير مرحلة فمرحلة - أن «نضرب» الأسهم المتعلقة بكل مرحلة. فأنتم إذن متعودون الآن على القواعد المرعية في رسم الأسهم (التي تمثل حوادث بسيطة) والتعامل معها للحصول على سهم نهائي مربعه احتمال الحادث الفيزيائي المقصود.

ومن الطبيعي أن نتساءل إلى أي حد يمكن أن نستمر في عملية تحليل الحوادث إلى حوادث تحتية أكثر فأكثر بساطة. فما هي الحوادث الأكثر بساطة، الأكثر عنصرية؟ وهل هو محدود عدد هذه الحوادث العنصرية، التي تتيح بتضافرها تشكيل كل الظواهر التي تتناول الضوء والإلكترونات؟ وبتعبير مجازي: هل يوجد، في لغة الإلكترون ديناميك الكمومي، عدد محدود من «حروف» تتيح بشتى تشكيلاتها صنع «الكلمات» و «الجمل» التي تصف كل الظواهر المرصودة في الطبيعة تقريباً؟

الجواب هو نعم: هذا العدد هو ثلاث. لا يوجد سوى ثلاثة آليات أساسية لازمة لتشكيل كل الظواهر الضوئية والإلكترونية.

وقبل أن أعرض لكم هذه القطع الأساسية، عليّ أن أعرفكم بالمثلين على مسرح تلك العمليات. إنها الفوتونات والإلكترونات. لقد ناقشت بالتفصيل موضوع الفوتونات، جسيمات الضوء، في المحاضرتين الأولىين. أما الإلكترونات فقد تم عام ١٨٩٥ اكتشافها كجسيمات يمكن عدها، ويمكن وضع واحد منها على قطرة زيت وقياس شحنته الكهربائية. وشيئاً فشيئاً تبين أن حركة هذه الجسيمات هي التي تولد التيار الكهربائي في الأسلاك.

وبعد اكتشاف الإلكترونات بقليل، تخيل الناس أن الذرات تشبه منظومات شمسية صغيرة مؤلفة من جزء مركزي ثقيل (أسموه النواة) ومن إلكترونات خفيفة تدور حول النواة في «أفلاك» كما تدور الكواكب حول الشمس. فاذا ظننتم أن

الذرات مصنوعة هكذا، فأنتم في عام ١٩١٠. ثم تخيل لوي دو بردي L. de Broglie، عام ١٩٢٤، أن للإلكترونات مظهراً موجياً أيضاً، وبعد ذلك بقليل أثبت ديفيسون C.J. Davisson وجرمر L.H. Germer، من مختبرات بل Bell، برجم بلورة نيكل بالإلكترونات، أن الإلكترونات تنزو (كالأشعة السينية) وفق زوايا على هواها وأن بالامكان حساب طول موجة الإلكترون بقانون أعطاه دوبروي.

عندما نفحص الفوتونات على مسار طويل - أطول من المسار المتعلق بدورة من دورات عقرب الزمان التخيلي - نستطيع أن نشرح الظواهر الملحوظة، وبشكل تقريبي جيد جداً، بقواعد مثل: «الضوء يذهب في خط مستقيم»، لأن هناك من عدد الطرق ما يكفي لجعل ساعاتها تتعزز بالتضافر في جوار الطريق ذي الزمن الأصغري، وتتفانى في غير ذلك. لكن عندما تكون الفسحة التي يمر عبرها الضوء ضيقة جداً (كالمرور من الثقبين في تجربة الشكل ٥٠) فإن تلك القواعد تصبح باطلة - نلاحظ أن الضوء لا يذهب لزماً في خط مستقيم، وأن الثقبين يولدان تداخلاً، إلخ. ويحدث الشيء ذاته مع الإلكترونات: فلدى فحصها في مدى كبير نرى أنها تتحرك كجسيمات، على مسارات محددة تماماً. أما في المدى الصغير، كما في الذرة مثلاً، فالفسحة صغيرة لدرجة أن لا يوجد مسار رئيسي، أن لا يوجد «فلك». فكل أنواع المسارات متاحة للإلكترون، ولكل مسار سعة. وهنا يصبح التداخل عظيم الأهمية جداً، ولا بد لنا من جمع الأسهم كي نتنبأ بحظوظ الأمكنة التي يمكن أن يوجد فيها الإلكترون.

وقد يكون من المفيد أن نلاحظ أن الإلكترونات كان لها، في بدء اكتشافها، مظهر جسيمات، وأن المظهر الموجي لم يُكتشف إلا في وقت متأخر. ومن جهة أخرى، إذا تجاهلنا ما كان يعتقد نيوتن، لكن لأسباب رديئة، من أن الضوء «جسمي»، فقد تجلّى أول الأمر بسلوك موجي ولم تُكتشف خصائصه الجسيمية إلا فيما بعد. إن الإلكترونات والضوء ينطوي سلوكها على سمات كل من الجسيمات والأمواج بعض الشيء. وللاستغناء عن اختراع اسم مركب، مثل «جسيجة»، نستمر في تسمية هذه الأجسام بـ «جسيمات»، لكننا نعلم جميعاً أنها تخضع في سلوكها لقواعد شرحتها لرسم الأسهم والتعامل معها. وقد ثبت أن كل الجسيمات التي صنعتها الطبيعة - الكواركات quarks، الغليونات glouns، النترينوات neutrinos، إلخ (التي سنتكلم عنها في المحاضرة التالية) - تتصرف بهذا الشكل الكمومي. والآن أقدم لكم الأشياء الثلاثة الأساسية التي ينتهجها هذان الممثلان، الفوتون والإلكترون، في توليد الظواهر الضوئية والإلكترونية على مسرح الطبيعة.

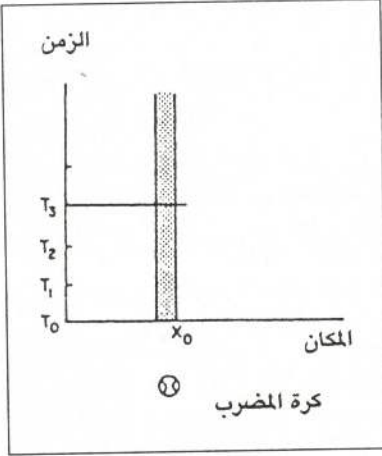
- النهج رقم ١ : الفوتون يذهب من مكان لآخر .
- النهج رقم ٢ : الإلكترون يذهب من مكان لآخر .
- النهج رقم ٣ : الإلكترون يُصدر أو يمتص فوتوناً .

لكل نهج سعة (سهم) خاصة به تُحسب بموجب قواعد محددة . وسأقول لكم ما هي هذه القواعد ، القوانين التي نستطيع أن نبني العالم (باستثناء الثقالة ونوى الذرات كالعادة!) على أساسات منها . إن المسرح الذي ستتوالى عليه هذه النهوج لن يكون بعد الآن المكان (الفضاء) وحده ، بل المكان والزمان . وقد أهملت حتى الآن الاعتبارات الزمنية (كالاهتمام بمعرفة أوقات صدور الفوتونات عن المنبع ووصولها إلى الكاشف ، مثلاً) . ورغم أن الفضاء المؤلف ذو ثلاثة أبعاد فسأعتمد إلى الاختصار على بعد واحد منه في البيانات التخطيطية التي سأرسمها : سأحمل على محور أفقي موقع الحادث المدروس ، وأحمل على محور شاقولي زمن وقوعه .

وأول شيء سأمثله في المكان والزمان - أو الزمكان ، كما سأقول غالباً - حالة كرة مضرب ساكنة (شكل ٥٢) . ففي صباح الخميس مثلاً ، وفي لحظة ما أدعوها T_0 ، تحتل الكرة حيزاً من الفضاء أدعوه X_0 ، وبعد برهة ، في اللحظة T_1 ، تحتل المكان نفسه لأنها ساكنة . وكذلك ، في لحظات لاحقة ، T_2 ، T_3 ، .. تظل في X_0 . فبيان كرة المضرب الساكنة هو إذن عصابة شاقولية تمتد نحو الأعلى . وماذا يحدث ، إذا كانت الثقالة غير موجودة ، لكرة مضرب ذاهبة نحو جدار شاقولي ؟ لنقل إنها تنطلق من X_0 في اللحظة T_0 من صباح الخميس (شكل ٥٣) ، لكنها بعد قليل لن تكون في المكان نفسه ، بل منحرفة قليلاً نحو X_1 . وباستمرارها على هذا النحو تولّد «عصابة كرة مضرب» مائلة في الزمكان . وعندما تصدم الجدار (وهو ، بسبب سكونه ، يتمثل بعصابة شاقولية) تنزو عنه في الاتجاه الآخر لتعود بالضبط إلى إحداثي نقطة انطلاقها (X_0) ، ولكن في لحظة لاحقة T_6 .

وفيما يخص سُلّم الزمن ، يكون من الأجدي أن نقيسه ، لا بالشواني ، بل بوحدات أصغر بكثير . وبما أننا نهتم بفوتونات وإلكترونات ذات حركة سريعة جداً ، سأمثل شيئاً يسير بسرعة الضوء وبميل يساوي 45° . فمن أجل جسيم يذهب من $X_1 T_1$ ، مثلاً إلى $X_2 T_2$ بسرعة الضوء تكون المسافة الأفقية من X_1 إلى X_2 مساوية المسافة الشاقولية بين T_1 و T_2 (شكل ٥٤) . ويرمز عادة بـ c لعامل مرور الزمن (كي يتولّد المستقيم المائل بزاوية 45° عن جسيم يسير بسرعة الضوء) ، وهذا

العامل وارد في جميع دساتير أينشتاين ، وسبب وجوده أننا نعتد الثانية الزمنية كوحدة لقياس الزمن بدلا من أن نعتد الفترة التي يستغرقها الضوء لقطع مسافة متر واحد .

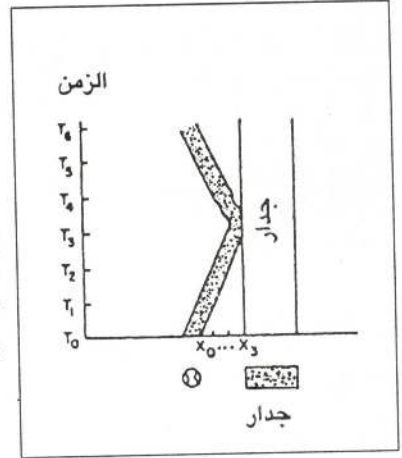


شكل (٥٢)

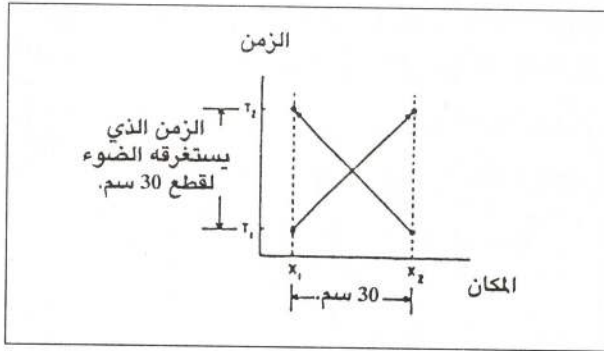
إن مسرح ما يحدث في العالم هو المكان - الزمان (الزمكان) . ولهذا الفضاء عموماً أربعة أبعاد (ثلاثة مكانية وواحد زمني) ، لكننا نكتفي هنا ببعدين : واحد أفقي للمكان وواحد شاقولي للزمن . في هذا الشكل نظل الكرة في موضع واحد مهما كانت لحظة مشاهدتها . ولهذا رسمنا «عصابة كرة مضرب» تمتد نحو الأعلى بمرور الزمن .

شكل (٥٣)

إن كرة المضرب التي تذهب نحو جدار ثم ترتد عنه نحو موضعها الأولي (المرسوم تحت البيان) تتطور في بعد واحد وتتمثل بـ «عصابة كرة مضرب» مائلة . في اللحظتين T_1 و T_2 تقترب الكرة من الجدار ، وفي T_3 تضربه وتنطلق في طريق عودتها .

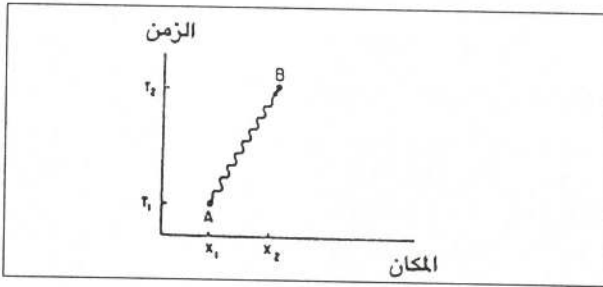


لندرس الآن النهج الأساسي الأول - فوتون يذهب من نقطة لأخرى - بالتفصيل . سأمثل هذا النهج - بلا سبب مُلزم - بخط متموج يذهب من A إلى B . ويجب أن أنتبه أكثر وأن أقول بالأحرى إن الفوتون ، الذي نعلم أنه موجود في مكان ما في لحظة معينة ، له سعة احتمال في أن يوجد في مكان آخر في لحظة أخرى . وعلى بياني التخطيطي الزمكاني (شكل ٥٥) يكون للفوتون في النقطة A - التي إحداثياتها x_1 و T_1 - سعة احتمال للظهور في النقطة B (x_2, T_2) سأرمز لقيمة هذه السعة بـ P (A إلى B) .



شكل (٥٤)

في وحدات الزمن التي استخدمها في هذه البيانات تتمثل الجسيمات السائرة بسرعة الضوء بمستقيم ميله في الزمكان 45°. ولكي يقطع الضوء مسافة 30 سنتيمتراً من x_1 إلى x_2 أو من x_2 إلى x_1 - يستغرق قرابة جزء من مليار جزء من الثانية .



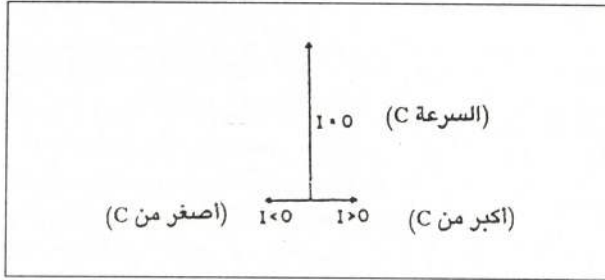
شكل (٥٥)

إن للفوتون (الذي تمثل مساره بخط متموج) سعة احتمال للذهاب ، في الزمكان ، من نقطة A إلى نقطة B . تُحسب هذه السعة التي أسميها P (A إلى B) بدستور لا يتعلق إلا بالفواصل المكاني $(x_2 - x_1)$ والفواصل الزمني $(t_2 - t_1)$. وهذا الدستور تابع بسيط ، أي هو فرق مربعيهما ، ونسميه «الجال» ونرمز له بـ I ويكتب كما يلي : $(x_2 - x_1)^2 - (t_2 - t_1)^2$

يوجد دستور يعطي طول السهم المتعلق بـ P (A إلى B) . وهو أحد القوانين الكبرى للطبيعة وبسيط جداً . إنه يتوقف على الفروق المسافية والفروق الزمنية بين النقطتين A و B . والصيغ لهذه الفروق هي $(x_2 - x_1)$ و $(t_2 - t_1)^{(*)}$ (اقرأ من اليسار إلى اليمين : x_1 مطروح من x_2 ، ...).

(*) في هذه المحاضرات أمثل على المحور X موقع نقطة في فضاء ذي بعد واحد ، ولتعيين موضع في نقطة الفضاء ذي الأبعاد الثلاثة ، يجب أن أتخيل «علبة» وأن أقيس أبعاد النقطة عن قعر العلبة وعن جدارين متجاورين (هذه الوجوه مستويات متعامدة) لنرمز بـ x_1 و y_1 و z_1 لهذه الأبعاد (تسمى إحداثيات) . إن المسافة بين هذه النقطة ونقطة أخرى إحداثياتها x_2 و y_2 و z_2 تُحسب من نظرية فيثاغورس في الأبعاد الثلاثة ، أي أن مربع هذه المسافة يساوي : $(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2$ أما الفرق بين هذا المربع ومربع الفرق الزمني ، أي $(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 - (t_2 - t_1)^2$ فيسمى أحياناً «الجال INTERVAL» ورمزه I ، وتقول نظرية اينشتاين النسبوية إن P (A إلى B) ، يجب أن يتعلق بهذه المضمومة . أما أكبر إسهام في السهم الحصيلية المتعلق بـ P (A إلى B) فيحصل عليه حقاً ، كما يمكن أن نتوقع ، عندما تكون المسافة المكانية مساوية للفرق الزمني ، أي عندما يكون I معدوماً . لكن هنالك ، في حال انعدام I ، إسهام إضافي وتناسب عكسي مع I ، وينتج نحو الساعة الثالثة عندما يكون I موجياً (عندما يسير الضوء بأسرع من c) ، ونحو الساعة التاسعة عندما يكون I سالباً . وفي أحيان كثيرة يتفانى هذا الإسهامان بتعديل أحدهما للآخر (شكل ٥٦) .

وكما نتوقع نحصل على أكبر إسهام في P (A إلى B) عندما يتحرك الفوتون بسرعة الضوء العادية - عندما يكون $(X_2 - X_1)$ مساوياً $(T_2 - T_1)$ - لكن يوجد أيضاً سعة كي يسير الضوء بسرعة أكبر (أو أصغر) من سرعته المعهودة (في الخلاء) . وهكذا ، وبعد أن تعلمت في المحاضرة السابقة أن الضوء لا يذهب في خط مستقيم ، ترون الآن أنه يسير دوماً بالسرعة ذاتها! .



شكل (٥٦)

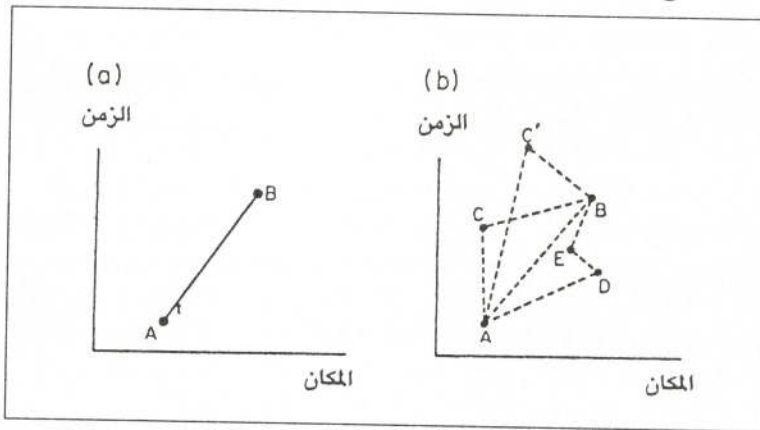
إذا كان الضوء يسير بالسرعة c ، بنعدم المجال I ونحصل على إسهام كبير يتجه نحو الساعة ١٢ - وإذا كان I موجباً نحصل على إسهام يتجه نحو الساعة ٣ ويتناسب عكسياً مع I ؛ وعندما يكون I سالباً نحصل على إسهام صغير يتجه نحو الساعة ٩ . وعلى هذا يكون للضوء سعة غير معدومة للذهاب بسرعة أكبر من c أو أصغر ، لكن هذه السعات تنعدم عندما تكون المسافات المقطوعة كبيرة .

ربما كانت مفاجأة لكم أن توجد سعة كي يسير الفوتون بسرعات أكبر أو أصغر من السرعة المعهودة c . إن الأسهم المتعلقة بهذه الإمكانات صغيرة جداً بالنسبة للأسهم المتعلقة بالسرعة c والواقع أنها تنعدم عندما يقطع الضوء مسافات طويلة . أما من أجل مسافات قصيرة - كما في بعض البيانات التي سأرسمها - يصبح لهذه الإمكانات أهمية جوهرية ويجب أخذها في الحسبان .

تلك إذن حال النهج الأساسي الأول ، قانون الفيزياء الأول - الفوتون يذهب من نقطة لأخرى . إنه يفسر كل علم الضوء ، نظرية الضوء برمتها! ليس تماماً بصادق القول : فقد تركت الاستقطاب جانبا (كالعادة) ، وتفاعل الضوء مع المادة ، وهذا ما يقودني إلى القانون (النهج) الثاني .

النهج الأساسي الثاني في الإلكتروديناميك الكمومي هو : الإلكترون يذهب في الزمكان من النقطة A إلى النقطة B . (تصوروا ، للحظة ، إلكتروناً وهمياً ، مبسطاً دون استقطاب - وهو ما يسميه الفيزيائيون إلكتروناً «سبينه spin صفر» . إن للإلكترونات في الحقيقة نوعاً من الاستقطاب ، وهذا لا يضيف شيئاً إلى الأفكار

الأساسية ؛ وكل ما هنالك أنه يعقد الدساتير قليلا) ودستور سعة هذا النهج ، التي أرمز لها بـ E (من A إلى B) ، تتعلق أيضا بـ $(X_2 - X_1)$ و $(T_2 - T_1)$ (بما يشبه ما شرحناه في الحاشية ٢) ، وكذلك بعدد أرمز له بـ n ، وهو عدد نعينه بحيث تتفق حساباتنا مع التجربة . (سنرى فيما بعد كيف نحصل على قيمة n) . وهو دستور معقد بعض الشيء وأنا آسف لعجزني عن أن أشرحه لكم بلغة بسيطة ولكن قد يهتمكم مع ذلك أن تعلموا أن صيغة P (A إلى B) - المتعلقة بفوتون يذهب من موضع لآخر في الزمكان - تصبح مطابقة تماما لصيغة E (A إلى B) - إلكترون يذهب من موضع لآخر - إذا وضعنا n مساويا للصفر في هذه الصيغة (*).



شكل (٥٧)

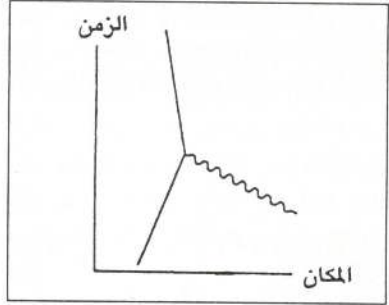
للإلكترون سعة ، سميها E (A إلى B) ، للذهاب من نقطة لأخرى في الزمكان ، ورغم أنني أمثل E (A إلى B) بخط مستقيم بين نقطتين (a) ، نستطيع أن نتخيلها كمجموع عدة ساعات (b) - منها سعة أن يغير الإلكترون اتجاهه في الزمكان (أي أن تتغير سرعته في المكان قيمة أو اتجاهها) عند النقطة C أو C ، على طريق ذي «قفزتين» ، ومنها أيضاً سعة أن يغير اتجاهه في D وفي E ، على طريق ذي «ثلاث قفزات» - بالإضافة إلى الطريق المباشر من A إلى B . ويمكن أن تحدث ، من هذا القبيل ، تغيرات عددها غير محدود (بين الصفر واللانهاية) ، بـ «محطات» لا تُحصى بين A و B . إن E (A إلى B) ينطوي على كل هذه الإسهامات مهما كان عددها .

(*) إن صيغة E (A إلى B) معقدة ، لكن من المفيد شرح مغزاها . يمكن أن نثل E (A إلى B) كمجموع هائل يتناول العدد الكبير من الأساليب المتاحة للإلكترون كي يذهب من A إلى B في الزمكان (شكل ٥٧) : يستطيع الإلكترون أن «يعبر بقفزة واحدة» كي يذهب مباشرة من A إلى B ، ويستطيع أن «يعبر بقفزتين» ماراً بـ «محطة» مرحلية في C ، ويستطيع أن «يعبر بثلاث قفزات» و «محطتين» في D ، E ، الخ . وبموجب هذا التحليل تكون سعة كل «قفزة» - من نقطة F إلى أخرى G - هي P (F إلى G) ، أي نفس سعة مرور الفوتون من F إلى G . والسعة المتعلقة بكل محطة هي n^2 ، n هو العدد الذي ذكرته أعلاه (العدد الذي يستخدم للتوفيق بين نتائج الحسابات والنتائج التجريبية) . إن صيغة E (A إلى B) تتجلى على شكل سلسلة حدود من الشكل : $P \times (D \text{ إلى } A) \times P \times (D \text{ إلى } E) \times P \times n^2 \times (E \text{ إلى } C) \times P \times n^2 \times (C \text{ إلى } B)$ (قفزتان ومحطة في C) + $P \times (D \text{ إلى } A) \times P \times n^2 \times (D \text{ إلى } E) \times P \times n^2 \times (E \text{ إلى } B)$ (ثلاث قفزات ومحطتان في D و E) + ... من أجل كل النقاط المرحلية الممكنة : C , D , E ، الخ .

لاحظ أنه كلما كان n كبيراً كان إسهام الطرق اللامباشرة في السهم النهائي كبيراً . وعندما ينعدم n (كما في حال الفوتون) تختفي كل الحدود التي تحوي n ، فلا يبقى سوى الحد الأول P (A إلى B) ، وهكذا نرى أن بين السعتين E (A إلى B) و P (A إلى B) علاقة وثيقة .

النهج الأساسي الثالث : الإلكترون يُصدر أو يمتص (لا يهيم) فوتوناً، سأسمي هذا النهج «توصلاً junction» أو «اقتراناً coupling» ؛ ولتمييز طريق الإلكترون عن طريق الفوتون أمثل طريق الإلكترون بخط مستقيم في الزمكان . فكل اقتران هو إذن تواصل بين خطين مستقيمين وخط متموج (شكل ٥٨) وصيغة سعة إصدار الفوتون أو امتصاصه ، من قبل الإلكترون ، ليست معقدة ؛ فهي لا تتعلق بشيء - إنها مجرد عدد! سأرمز لهذا العدد بـ z ، وهو يساوي تقريباً 0.1- (سالب) ، فمفعوله إذن تصغير للسهم إلى عشر طوله وتدويره نصف دورة (*).

(شكل ٥٨)



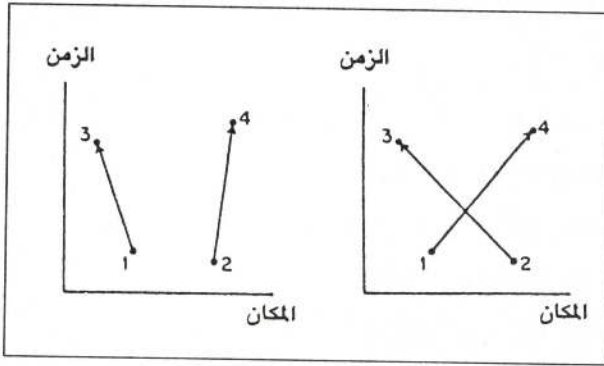
إن للإلكترون (ونظير مساره بخط مستقيم) سعة معينة كي يُصدر ، أو يمتص ، فوتوناً (مساره الخط المتموج) . ولما كان للإصدار والامتصاص سعة واحدة أسمي أيًا منهما «اقتراناً» . وسعة الاقتران عدد دبت أرمز له بـ z ، وهو يساوي 0.1- ، من أجل الإلكترون (ويسمى أحياناً «الحمولة»).

وهكذا انتهى الكلام عما يخص النهج الثلاثة الأساسية - باستثناء تعقيدات طفيفة ناجمة عن ذلك الاستقطاب الذي أهملناه . ومهمتنا الآن أن نركب هذه النهج لتمثيل مسرحيات معقدة .

لنحسب ، كمثال أول ، احتمال أن يذهب إلكترونان ، موجودان في النقطتين 1 و2 من الزمكان ، إلى النقطتين 3 و4 (شكل ٥٩) . يمكن لهذا الحادث أن يقع بأساليب عديدة . أولها أن يذهب الإلكترون ، المنطلق من 1 ، إلى 3 - سنبدل ، في الصيغة $E(A \text{ إلى } B)$ بـ $E(1 \text{ إلى } 2)$. وأن يذهب الإلكترون الآخر من 2 إلى 4 - يتعلق به $E(2 \text{ إلى } 4)$. إنهما «حادثان فرعيان» يقعان معاً ، فيجب إذن ضرب سهميهما للحصول على السهم المتعلق بهذا الأسلوب الأول المتاح لوقوع الحادث . نكتب إذن الجداء $E(1 \text{ إلى } 3) \times E(2 \text{ إلى } 4)$ للسهم المتعلق بـ «الأسلوب الأول» .

يمكن للحادث نفسه أن يقع بأسلوب ثان : أن يذهب الإلكترون الأول من 1 إلى 4 ، والآخر من 2 إلى 3 - أيضاً حادثان فرعيان مترافقان . يكون السهم الحاصل الناجم عن «الأسلوب الثاني» مساوياً الجداء $E(1 \text{ إلى } 4) \times E(2 \text{ إلى } 3)$ ، فنجمعه مع السهم المتعلق بالأسلوب الأول لنحصل على السهم النهائي المتعلق بالحادث المقصود (**).

(*) هذا العدد ، أي سعة إصدار الفوتون أو امتصاصه ، يدعى أحياناً «شحنة» الجسيم ، أو «حمولته» CHARGE .
(**) لو كان علي أن أخذ استقطات الإلكترون في الحسبان لوجب أن أطرح السهم المتعلق بـ «الأسلوب الثاني» ، أي أن أعكس اتجاهه وأضيفه إلى سهم «الأسلوب الأول» (سنعود إلى هذه النقطة فيما بعد) .



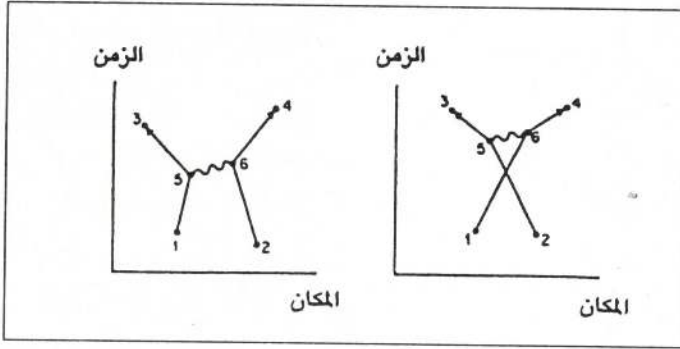
شكل (٥٩)

لكي نحسب احتمال أن يصل الإلكترونان المنطلقان من النقطتين 2 و 1 في الزمكان إلى النقطتين 3 و 4 يجب أن نحسب السهم الناجم عن الأسلوب الأول (المروان من 1 إلى 3 ومن 2 إلى 4) بمقتضى الوصفة التي تعطي E (A إلى B). نحسب بعدئذ السهم الناجم عن الأسلوب الثاني (المروان من 1 إلى 4 ومن 2 إلى 3). وأخيراً نجمع هذين السهمين، فنحصل على السهم النهائي بتقريب جيد. (هذا صحيح من أجل إلكتروننا الوهمي، المبسط الذي «سببته صفر». وإذا أخذنا استقطاب الإلكترون بالحسابان يصبح علينا أن نطرح أحد السهمين من الآخر بدلاً من أن نجمعهما).

وبذلك نحصل على قيمة تقريبية جيدة لسعة الحادث. ولإجراء حساب أدق، ذي اتفاق أحسن مع النتائج التجريبية، يجب التفكير بأساليب أخرى متاحة لوقوع الحادث. هناك مثلاً، في كل من الأسلوبين الرئيسيين المحسوبين أعلاه، احتمال أن يندفع أحد الإلكترونين نحو «أرض موعودة» أخرى ويصدر فوتوناً (شكل ٦٠). وفي أثناء ذلك قد يتاح للإلكترون الآخر أن يمتص في طريقه ذلك الفوتون. تُحسب عندئذ سعة أول هذين الأسلوبين الجديدين بضرب سعة أن يذهب إلكترون من 1 إلى 5 أولاً (حيث يُصدر فوتوناً) بسعة أن يذهب بعدئذ من 5 إلى 3، ومن ثم بسعة أن يذهب الإلكترون الآخر من 2 إلى 6 (حيث يمتص ذلك الفوتون) وبسعة أن يذهب بعدئذ من 6 إلى 4. ويجب طبعاً أن لاننسى سعة ذهاب الفوتون من 5 إلى 6. وهاكم الصيغة الرياضية جداً في حساب سعة وقوع الحادث بهذه الطريقة الجديدة، فاتبعوني (من اليمين إلى اليسار).

$E \times (1 \text{ إلى } 5) \times E \times (5 \text{ إلى } 3) \times E \times (2 \text{ إلى } 6) \times E \times (6 \text{ إلى } 4) \times P \times (5 \text{ إلى } 6)$ ، إنها سلسلة تصغيرات وتدويرات متوالية. (أترك لكم أن تجدوا الصيغة من أجل أسلوب رابع، مشتق من الأسلوب الثاني، بمحطتي إصدار فوتون وامتصاصه، ويذهب فيه إلكترون من 1 إلى 4 والآخر من 2 إلى 3)*.

(*) إن الظروف النهائية للتجربة المتعلقة بتلك الأساليب الاعداد هي نفس الظروف النهائية للأسلوبين المباشرين - الإلكترونان ينطلقان من 1 و 2 ويصلان إلى 3 و 4 - مما يجعلنا عاجزين عن التمييز بين الأسلوبين المباشرين وبين الأسلوبين غير المباشرين. ولذلك يجب أن نجمع السهم الحاصل عن الأسلوبين المباشرين مع السهم الحاصل عن غير المباشرين.



شكل (٦٠)

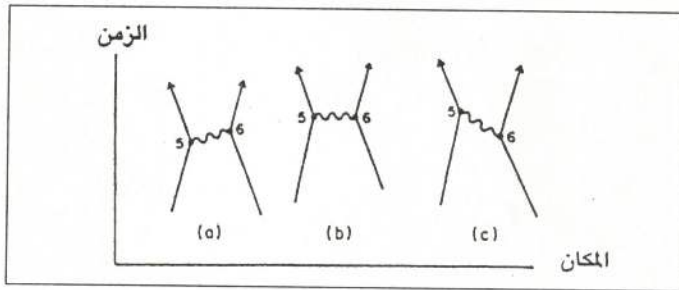
يوجد «أسلوبان آخران» متاحان لوقوع الحادث المذكور في الشكل ٥٩، في كل منهما يصدر فوتون في 5 ويُمتص في 6. والظرفان النهائيان هنا غير متخلفين عما جاء في أسلوبَي الشكل ٥٩ المباشرين - إلكترونان لدى الإنطلاق، إلكترونان لدى الوصول - فلا فرق إذن من حيث النتيجة. ويجمع السهمين الناجمين عن هذين «الأسلوبين الآخرين» مع السهم النهائي المحسوب في الشكل (٥٩) نحصل على تقريب أحسن من ذي قبل في معرفة السهم النهائي المقصود.

ولكن انتظروا قليلاً: إن كلاً من النقطتين 5 و6 يمكن أن توجد في أي موضع من المكان ومن الزمان - نعم، حقاً في أي موضع - وعلينا إذن أن نحسب الأسهم المتعلقة بكل نقاط الزمكان وأن نجمعها. وبذلك ترون أن الأمور بدأت تقتضي عملاً ضخماً.

وليس السبب أن القواعد (النهوج) مقعدة - الحال هنا تشابه لعبة الشطرنج: القواعد بسيطة لكن عدد مرات تطبيقها كبير. فصعوبة حساباتنا سببها العدد الكبير للأسهم التي علينا التعامل معها ضرباً وجمعاً. ذلك هو السبب في قضاء الطلاب أربع سنوات، بعد الشهادة الجامعية الأولى، ليتعلموا إجراء هذه الحسابات دون أغلاط، علماً أننا هنا حيال مسألة سهلة، تصوروا أنها ليست سوى أول الغيث! (عندما تصبح المسائل أصعب بكثير نستعين على حلها بالحاسوب!).

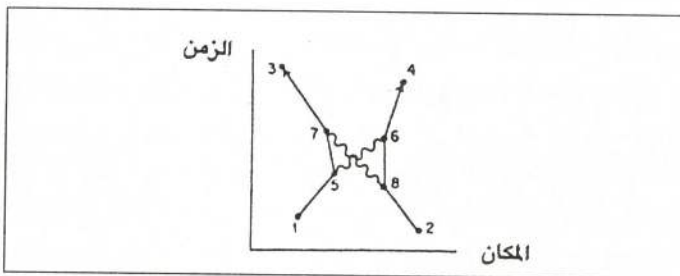
أحب أن ألفت نظركم إلى شيء بخصوص الفوتونات الصادرة والامتصة. إذا كانت النقطة 6 لاحقة للنقطة 5، أمكن أن نقول إن الفوتون قد صدر في 5 وامتص في 6 (شكل ٦١). وعندما تكون 6 سابقة لـ 5 يمكن أن نفضل القول بأن الفوتون صدر في 6 وامتص في 5، ولكن نستطيع سواء بسواء، أن نقول إن الفوتون صعد سلم الزمن نحو الماضي! والواقع أننا في غنى عن الاهتمام بجهة حركة الفوتون في الزمكان، فكل شيء محسوب حسابه في صيغة P (5 إلى 6)، ونكتفي بالقول إن فوتوناً قد حدث «تبادل». إن الطبيعة ذات بساطة رائعة(*)!

(*) إن هذا الفوتون المتبادل، الذي لا يظهر في الظروف البدئية ولا في الظروف النهائية للتجربة، يُدعى أحياناً «فوتوناً وهمياً» virtual.



شكل (٦١)

لما كان الضوء ذا سعة للذهاب بأسرع أو بأبطأ من سرعته المعهودة، نستطيع أن نتخيل أن الفوتونات، في الأمثلة الثلاثة أعلاه، تصدر في النقطة 5 وتمتص في 6، حتى ولو كان إصدار الفوتون وامتصاصه، في المثال (b)، يحدثان في لحظة واحدة، وكان الفوتون في المثال (c) قد امتص قبل أن يصدر - وهو موقف قد تفضلون التعبير عنه بالقول بأن الفوتون قد صدر في 6 وامتص في 5 وذلك كي توفرأوا عليه أن يصعد سلم الزمن (نحو الماضي)! أما فيما يخص الحساب (والطبيعة) فهذا القول لا يختلف عن ذلك (وهما ممكنان سواء بسواء)؛ وعلى هذا نكتفي بالقول بأن الفوتون قد «تبودل» وأن ندخل في وصفه حساب P (إلى B) قيم المواقع في الزمكان.



شكل (٦٢)

إن الحادث الموصوف في الشكل (٥٩) يمكن أيضاً أن يقع بأساليب تنطوي على تبادل فوتونين. وبهذا الصدد يوجد عدة مخططات متاحة (كما سنرى بتفصيل أكثر فيما بعد) نرسم أحدها هنا. والسهم الناجم عن هذا الأسلوب ينطوي على جميع النقاط المرحلية 5، 6، 7، 8، المتاحة، ويصبح حسابه صعباً جداً. ولكن لما كان ز أصغر من 0.1 فإن طول هذا السهم يكون عموماً أصغر من جزء من عشرة آلاف جزء (بسبب وجود أربعة اقتراءات) من السهمين الناجمين عن الأسلوبين الواردين في الشكل (٥٩)، اللذين لا يحويان أي ز.

والآن، وإضافة إلى الفوتون المتبادل بين 5 و 6، يمكن أن نفكر بتبادل فوتون آخر - بين نقطتين أخريين، 7 و 8 (شكل ٦٢). والحق أنني مللت من كتابة كل المراحل الأساسية التي يجب ضرب أسهمها، لكن كل خط مستقيم (كما لا بد أن لاحظتم) يعطي سعة E (إلى B) وكل خط متموج يعطي P (إلى B) وكل اقتراح يعطي ز، وذلك من أجل كل النقاط، 5، 6، 7، 8، الممكنة! وهذا يعطينا آلافاً مؤلفة من الأسهم التي نعالجها ضرباً وجمعاً.

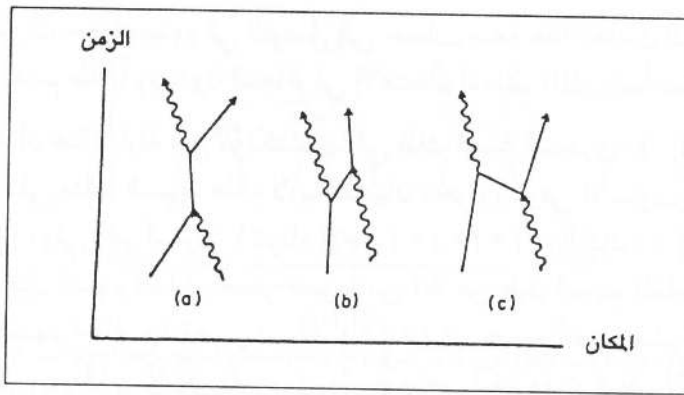
يبدو أن حفظنا معدوم في التوصل إلى حساب سعة هذا الحادث البسيط جداً، لكنكم لو كنتم طلاباً وتريدون النجاح في الامتحان لفعلتم ذلك رغماً عنكم .

بيد أن هناك بارقة أمل ، ونكتشفها في ذلك العدد السحري z . إن الأسلوبين المباشرين ، في مثالنا البسيط هذا ، لا يستدعيان دخول z ، وفي الأسلوب الثالث كان يوجد $z \times z$ ، وفي آخر أسلوب ذكرناه يوجد $z \times z \times z \times z$. ولما كان $z \times z$ أصغر من 0.01 فإن طول السهم المقابل أصغر عموماً من 1% من طول السهم المقابل لأسلوب مباشر ، والسهم الخاضع لتقصير نسبته $z \times z \times z \times z$ يصبح أقصر بعشرة آلاف مرة من طول السهم الذي لا يُضرب بـ z . ولو خُصص لكم وقت كاف لاستخدام الحاسوب (الكمبيوتر) في حساب الإمكانات الحاوية z^6 (واحد من مليون) لنافستم في الدقة أدق التجارب . هذه هي طريقة حساب الحوادث البسيطة . هكذا يُعمل ، وهذا كل ما في الأمر! .

لندرس الآن حادثاً آخر . نبدأ بفوتون وإلكترون وننتهي بفوتون وإلكترون . إن أحد الأساليب في وقوع هذا الحادث هو التالي : فوتون يمتصه إلكترون ، الإلكترون يتابع سيره قليلاً ثم يصدر منه فوتون آخر . يدعى هذا الحادث انتشار scattering الفوتون (أو تبعثره) . عندما نرسم بيانات الانتشار ، ونجري حساباتها ، يجب إدخال بعض الإمكانات الخاصة (شكل ٦٣) . ربما يصدر الإلكترون فوتوناً قبل أن يمتص فوتوناً (الرسم b) . والإمكانية (c) أكثر غرابة : يُصدر الإلكترون فوتوناً ، ثم يرجع أدراجه في الزمن كي يمتص فوتوناً ، وينطلق من جديد باتجاه الزمن . إن طريق مثل هذا الإلكترون ، الذي «يتراجع زمنياً» يمكن أن يكون طويلاً بما يكفي لظهوره في أثناء تجربة فيزيائية واقعية في المختبر . إن سلوكه مأخوذ في حسابان البيانات وفي المعادلة التي تعطي E (A إلى B) .

عندما نرصد أحد هذه الإلكترونات المنكفئة (التي تسلك في الزمن اتجاهها يعاكس اتجاهها فيه) نلاحظ أن له مظهر الإلكترونات العادية نفسه - يقال إن له «شحنة موجبة» . لو كُنت أدخلت مفعولات الاستقطاب لرأيتم لماذا تبدو إشارة شحنة هذا الإلكترون معكوسة ، مما يجعلها تبدو موجبة) ويُسمى «بوزترون positron» . فالبوزترون جسيم نديد للإلكترون ، إنه نموذج لـ «الجسيم المضاد antiparticle» (*) .

(*) اقترح ديراك Dirac فكرة وجود «الكترونات مضادة» عام ١٩٣١ ، وقد تم اكتشافها تجريبياً في العام التالي لدى أندرسون C. Anderson الذي أسماها بوزترونات . واليوم تنتج البوزترونات (من تصادم فوتونين مثلاً) وتُحفظ لمدة أسابيع في حقل مغنطيسي .



شكل (٦٣)

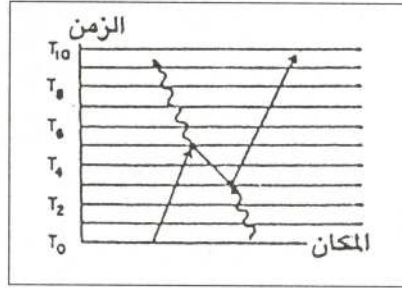
إن انتشار الضوء يتناول فوتوناً يلتقي إلكترونات وفوتوناً ناجماً عن هذا اللقاء . ولكن ليس بهذا الترتيب لزماً ، كما نرى في المثال (b) . المخطط (c) يمثل إمكانية عجيبة لكنها حقيقية: يُصدر الإلكترون فوتوناً ، ثم يذهب نحو الماضي حيث يمتص فوتوناً ويذهب بعده نحو المستقبل .

وهذه ظاهرة عامة . فلكل جسيم في الطبيعة سعة تتعلق بحركة متراجعة في الزمن ، وله بالتالي جسيم مضاد . وعندما يلتقي جسيم جسيمه المضاد فإنهما يتفانيان معاً وتشكل جسيمات أخرى (عموماً فوتون أو اثنان في حال تفاني إلكترون وبوزترون) . وماذا بشأن الفوتونات؟ لقد ذكرنا أن الفوتون لا يتغير من مميزاته أي شيء عندما يتراجع نحو الماضي ؛ فهو إذن جسيم نفسه المضاد . وهكذا ترون أي نوع من الحيل نلجأ إليه لإدخال الشذوذ في القاعدة!

أريد أن أشرح لكم ماذا نرى في الإلكترون الذي يرجع القهقري في الزمن ، نحن الذين نتطور في اتجاهه . ولأجل ذلك أقسم مستوى البيان الزمكاني إلى شرائح رقيقة بين T_0 و T_{10} (شكل ٦٤) ، بخطوط موازية لمحور المكان . أنطلق من T_0 مع إلكترون يتحرك باتجاه فوتون يتحرك ، هو الآخر ، للقاءه . وفجأة ، في T_3 ، يتحول الفوتون إلى جسيمين ، بوزترون وإلكترون جديد . البوزترون لا يدوم طويلاً ، بل يصدم الإلكترون القديم ، في T_5 ، ويتفاني معه مولّدين فوتوناً جديداً . وفي أثناء ذلك يتابع ذلك الإلكترون الجديد طريقه في الزمكان .

والآن أحب أن أتحدث إليكم عن الإلكترون في الذرة . ولفهم سلوك الإلكترونات في الذرات يجب أن أضيف لآعباً آخر هو النواة - الجسيم الثقيل في مركز الذرة والذي ينطوي على بروتون واحد على الأقل (إن البروتون «علبة

بندورا(*) سنفتحتها في المحاضرة القادمة) . ولن أعطيكم اليوم القوانين الصحيحة لسلوك النواة ، فهي معقدة جداً . أما في الحال التي تهمننا ، حيث تظل النواة هادئة غير مُثارة ، يمكن ، بعملية تقريبية ، أن نشبّه سلوك النواة بسلوك جسيم له سعة في الذهاب من نقطة لأخرى في الزمكان ، سعة معطاة بالصيغة E (A إلى B) ، لكن للعدد n فيها قيمة أكبر بكثير . ولما كانت النواة ثقيلة جداً بالنسبة للإلكترون نستطيع أن نعاملها ، تقريباً ، على افتراض أنها ساكنة عملياً ، في مكان واحد ، غير أنها متحركة بالنسبة للزمن .



شكل (٦٤)

لندرس المثال الوارد في الشكل (٦٣) باسم (c) ذاهبين بالاتجاه العادي لجريان الزمن (لأننا مجبرون على فعل ذلك في المختبر) . من T_0 إلى T_3 نرى الإلكترون والفوتون ذاهبين للتلاقي . وفجأة في T_3 «يتفكك» الفوتون ، وينشأ جسيمان - إلكترون وجسيم جديد اسمه «البوزترون» وهو إلكترون يصعد نحو الماضي ويبدو متجهاً نحو الإلكترون الأصلي نفسه! يتفانى البوزترون مع الإلكترون الأصلي ، في T_5 ، وينشأ عن تفانيهما فوتون جديد . وفي أثناء ذلك يتابع الإلكترون ، الذي انبثق من تفكك الفوتون الأصلي ، طريقه نحو المستقبل في الزمكان . . إن سلسلة الحوادث هذه يمكن رصدها في المختبر ، وهي مأخوذة آلياً بالحساب في E (A إلى B) دون أي تعديل .

تتألف أبسط الذرات ، واسمها الهيدروجين ، من بروتون وإلكترون . والإلكترون مجبر ، بفعل تبادل فوتونات مع البروتون ، على البقاء في جواره وهو يرتعش (شكل ٦٥)(**).

أود الآن أن أريككم بيان إلكترون في ذرة هيدروجين تنثر الضوء شكل (٦٦) . ففي أثناء تبادل فوتونات بين الإلكترونات والنواة ، يصل فوتون من خارج النواة ، فيصدم الإلكترون فيمتصه ، وبعد قليل يصدر فوتون جديد . (ويوجد ، كالعادة ، إمكانيات

(*) في أساطير الإغريق ، امرأة حكيمة من صنع الآلهة . أهداها كبيرهم ، زفوس Zeus ، علبة ربابية حظر عليها فتحها ، ففتحتها زوجها خلسة فانطلقت منها كل أصناف الخير والشر ولم يبق في قعرها غير الأمل . (الترجم) .

(**) إن السعة في تبادل الفوتون تساوي $P \times (z)$ (A إلى B) $x (z)$ ، أي جداء اقترانين بسعة ذهاب الفوتون من موضع لآخر . والسعة المتعلقة باقتران بروتون بفوتون هي (z) .