الجمهورية العربية السورية
وزارة التربية والتعليم
المركز الوطني للمتميزين

حلقة بحث للصف الثاني الثانوي في مادة الفيزياء بعنوان:

مبدأ الشّك لهايزنبرغ

The Heisenberg's Uncertainty Principle

تقديم الطالبة : أمل ثائر أبوتك

لمدرس المادة: الأستاذ حسام حاج قاسم

للعام الدراسيّ: ٢٠١٤ -٢٠١٥

الملخص

عُرف منذ القدم أن الأجسام الصلبة تشع عند إعطائها طاقة حرارية، وأن هذه الطاقة تزداد بازدياد التسخين، إلا أن ظهور معضلة الجسم الأسود وضع الفيزيائيين في حيرة، حيث وجدوا أن طاقته تزداد مع التسخين إلى حد معين ثم تبدأ بالانخفاض، حتى قام العالم "ماكس بلانك" بحل هذه المعضلة، واقترح أن الطاقة عبارة عن كمّات منفصلة، ثم جاء أينشتين الذي التقط فكرة وحدات الطاقة المستقلة والمنفصلة، ووصف الضوء على أنه يتكون من جسيمات مادية (فوتونات)، لكل منها طاقة محددة، ومع هذين الاكتشافين بدأ وجه الفيزياء بالتغير، حيث أطلقت هاتان الظاهرتان الشرارة لقيام فيزياء حديثة، ما لبثت أن تطورت ونمت بسرعة، فجاء دي بروي ليضع فكرة أمواج الاحتمال المرافقة للجسيمات المادية، والتي استفاد منها هايزنبرغ ليضع مبدأه الشهير "مبدأ الشك لهايزنبرغ"، الذي يعتبر أحد المبادئ الأساسية في الفيزياء الحديثة، والذي وضع حدوداً للدقة التي يمكن أن تصل إليها أجهزة القياس مهما بلغت درجة تطورها، إلا أن هذا المبدأ أزعج الحتميين الذين رفضوه، وحاولوا إثبات خطئه، فكانت مفارقة "أينشتين – بودولسكي – روزن" (أ.ب.ر)، إلا أنّ التجارب العملية أثبتت خطأ هذه المفارقة وصحة مبدأ الشك، ولكن مع تطور التكنولوجيا أُتيحت تقنية جديدة للقياس تدعى "تقنية القياس الضعيف" والتي لا تلغي الارتياب ولكن يعتقد أنها تستطيع تتخطى الحدود التي وضعها مبدأ الشك على الدقة، إلا أنه لم يتم أي تجارب عملية تثبت هذا الأمر حتى الآن.

Abstract:

It had been known that solid objects radiate when it is given thermal energy, and this energy is increasing by energy increasing, but the emergence of the black body catastrophe confused the physicists, where they found that its energy increases with heating to a certain point and then begin to decrease until the scientist "Max Planck "solved this problem, and suggested that energy is a separate quantum, then Einstein, picked up this idea, and described that the light consists of material particles (photons), each one has its own specific energy, and with these two discoveries the face of physics had changed, where these phenomena released the spark for the beginning of modern physics, which immediately started developing and growing up fast. Then De-Proly had come and put the idea of waves probability associated with the particles, which benefited from Heisenberg to put the famous principle, " Heisenberg's uncertainty principle", which is one of the basic principles of modern physics, which put limits on the accuracy can be reached by measuring devices, this principle gig the Inevitable supporters who rejected it, and tried to prove his mistake, then it was the paradox of "Einstein - Podolsky - Rosen" (E.B.R), but the practical experience proved the wrong of this paradox and the right of Heisenberg's principle, but with the evolution of technology allowed a new technique of measuring called "weak measurement technique", which does not eliminate the uncertainty but it is believed that it can overcome the limits which located by the doubt principle for the accuracy, but it has not been any practical experiments to prove this yet.

المقدمة

تمهيد:

في بداية القرن العشرين، خرجت إلى الساحة العلمية العديد من الظواهر، دقت المسامير الأخيرة في نعش فيزياء الحتمية، وأدت إلى نشوء فيزياء جديدة تعتمد على الاحتمالات وعدم اليقين، وفي عام ١٩٢٧، وضع العالم الألماني " فرنر هايزنبرغ "مبدأ جديداً، سمّي "مبدأ عدم التعيين (Uncertainty principle) "والذي ينص على وجود حدود معينة من الدقة لا يمكن تخطيها، جيث أنه لا أنت ولا أنا ولا أي شخص آخر يستطيع أن يعرف الحقيقة كاملة، وهذا ما سنراه في بحثنا هذا إن شاء الله...

إشكالية البحث:

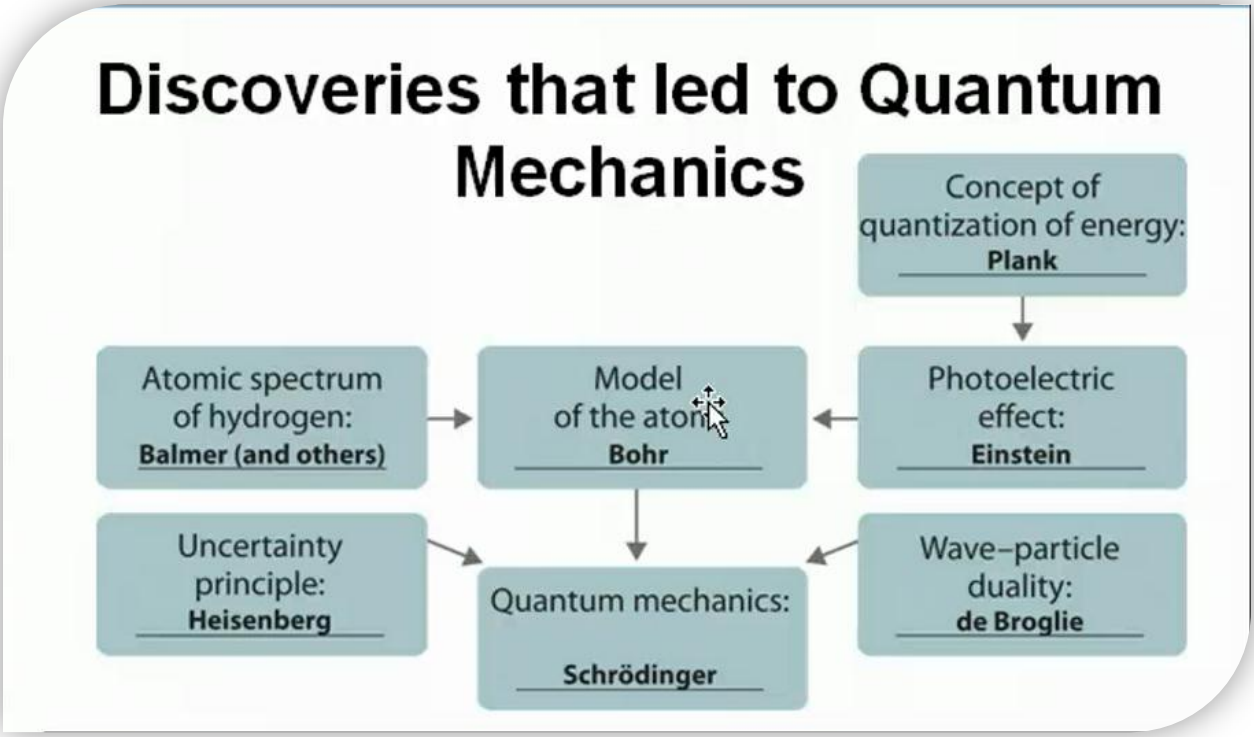
- ما هي الظواهر التي أدت إلى ضرورة وجود فيزياء جديدة؟ وما هي مراحل تطور هذه الفيزياء؟
- ما هو مبدأ الشك لهايزنبرغ وما هي الحدود التي يضعها؟
- وكيف واجه علماء الحتمية "مفارقة (أ.ب.ر)" هذا المبدأ؟
- وما هي الاعتراضات التي تعرض لها هذا المبدأ بعد تطور التكنولوجيا؟

أهداف البحث:

- التعرف على بعض مبادئ النظرية الكمومية ومراحل تطورها
- التعرف على مبدأ الشك ونصه
- المقارنة بين عمل مبدأ الشك في كل من العالمين المايكروسكوبي والميكروسكوبي
- التعرف على رأي أينشتين ومفارقة (أ.ب.ر)
- التعرف على قدرة التكنولوجيا الحالية على اختراق حدود مبدأ الشك.

الفصل الأول

موجز تطور نظرية الكم



١-١ إشعاع الجسم الأسود Black Body Radiation

منذ القدم عرفت ظاهرة انبعاث الإشعاعات من الأجسام الصلبة، حيث أنه عند تسخين قضيب من الحديد فإنه يشع ضوء ربما لا نراه، ولكن لو وضعنا يدنا بالقرب منه فإننا سنشعر بحرارة. هذه الإشعاعات غير المرئية تقع ضمن منطقة الأشعة تحت الحمراء Infra-red، ولو استمر تسخين هذا القضيب فإنه يبدأ بالتوهج باللون الأحمر، ومع استمرار التسخين يتوهج باللون الأصفر ومن ثم الأخضر ثم الأزرق وهكذا ... أي أن الأجسام الصلبة عند إعطائها طاقة حرارية تحولها إلى ضوء ينبعث من الجسم ذاته، ويتغير تردد هذه الأشعة بتغير درجة الحرارة.

ولكن عند تسخين الجسم الأسود[١] وُجِد أن له تصرف غريب، وهو أن طاقته كانت تزداد بازدياد التسخين حتى تصل لقيمة عظمى، ومن ثم تبدأ بالانخفاض، وهو ما خالف التصور القديم للأجسام الصلبة، ولقد حاول عالمان وهما "رايلي" و"جينز" تفسير هذه الظاهرة من المنظور الكلاسيكي الذي يقتضي بأن الجسم يشع إشعاعاً متصلاً وليس منفصلاً، واستنتجا قانوناً يسمى بـ (قانون رايلي –جينز Rayleigh-Jeans law)، والذي كان يعبر عن العلاقة بين كثافة الطاقة والطول الموجي كالتالي[٢]:

$$\mathrm{dF}(\lambda) = \left(\frac{8\pi\, KT}{\lambda^4}\right) d\lambda$$

ومن هذه العلاقة يتضح أن كثافة الطاقة تقل باستمرار زيادة الطول الموجي للأشعة المنبعثة، ولكن هذا القانون كان يتفق مع النتائج التجريبية في حالة الأطوال الموجية الكبيرة فقط، أما إذا كانت الأمواج قصيرة، فإن القانون يظهر قصوراً في التعامل معها. بل ويتوقع أن تكون قيمة الطاقة لا نهائية عند زيادة التردد أكثر فأكثر (أي أن الطول الموجي أقصر)، وبالطبع هذا لا

[١] الجسم الأسود هو جسم يمتص ويبعث كل الأشعة الضوئية الواردة عليه مهما كان طولها الموجي

[٢] The Ultraviolet catastrophe – vergil.chemistry.gatech.edu/notes/quainter/node3.html

يحـدث تجريبيـاً، وسـميت هـذه المشـكلة بالكارثـة فـوق البنفسـجية (*The Ultraviolet catastrophe*)، لأنه كلما زاد التردد توجهنا لمنطقة الأشعة فوق البنفسجية حيث تحدث المشكلة.

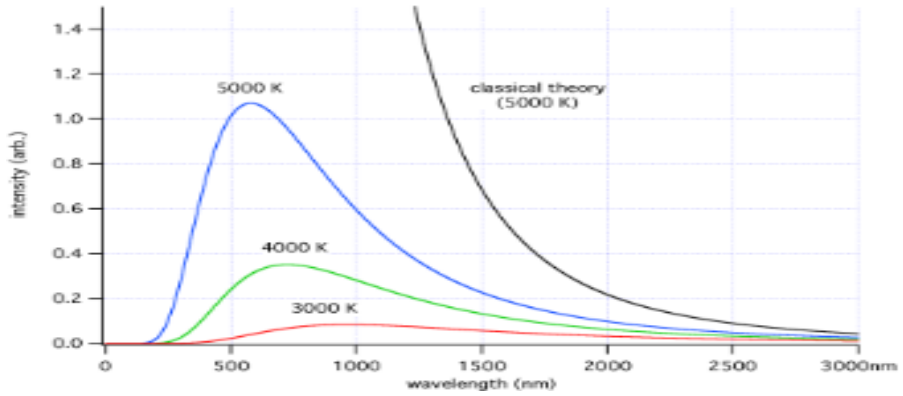
وللتغلـب علـى هـذه المفارقـة، اقتـرح "مـاكس بلانـك" أن الطاقـة لا تُمـتص ولا تُفقـد بصـورة مسـتمرة، بـل إن عمليـة الامتصـاص والانبعـاث عمليـة مكمَّمـة، وهـذا الفـرض أُطلـق عليـه "مبـدأ الكـم" أو "الطاقـة المكمَّمـة" "*Principle of quantization of energy*"، ويعنـي أن الطاقـة مكونـة مـن كمّـات أو وحـدات قائمـة بـذاتها ومسـتقلة عـن الوحـدات الأخـرى، وأطلـق بلانـك علـى هـذه الوحـدة اسـم "الكـوانتم"، وهي تتناسب مع تردد الضوء الممتص أو المنبعث

$$E = n\,hf$$

حيـث n عـدد صـحيح يمثـل وحـدات الطاقـة الممتصـة أو المنبعثـة " الكـوانتم" أي أن الجسـم يسـتطيع أن يمـتص أو يبعـث كـوانتم واحـد أو اثنـين وهكـذا... وh هـو ثابـت بلانـك و f تـردد الضـوء. وافتـرض بلانـك أن جزيئـات الجسـم الأسـود تتصـرف وكأنهـا مهتـزات *Oscillators* لهـا حالـة محـددة للاهتـزاز وكـل حالـة لهـا طاقـة ثابتـة ومعينـة، وعنـد إثـارة هـذه المهتـزات إلـى الحالـة العليـا برفـع درجـة الحـرارة فإنهـا تعـود إلـى حالتهـا المسـتقرة مـرة أخـرى وتفقـد الفـرق فـي الطاقـة فـي صـورة موجـات كهرطيسـية، وباسـتخدام مبـدأ بلانـك وعـدة عمليـات حسـابية أمكـن الوصـول إلـى المعادلـة الرياضـية التالية المعبرة عن كثافة الطاقة:

$$\mathrm{dF}(\lambda) = \left(\frac{8\pi \mathrm{hc}}{\lambda^5}\right)\left\{\frac{\exp\left(-\frac{hc}{\lambda KT}\right)}{1-\exp\left(-\frac{hc}{\lambda KT}\right)}\right\} d\lambda$$

ويعبـر الحـد الثـاني فـي هـذه المعادلـة والـذي هـو غيـر موجـود فـي معادلـة رايلـي–جينـز عـن اضـمحلال أو تنـاقص الطاقـة المنبعثـة كلمـا قـلَّ الطـول المـوجي λ أي أن الحـد $\exp(-\frac{hc}{\lambda \mathrm{kT}})$ يسـاوي الصـفر عنـدما تكـون $hc/\lambda \mathrm{kT}$ كبيـرة جـدّاً وحيـث أن جميـع مكونـات هـذا الحـد ثوابـت فإنـه يكـون كبيـراً جـدّاً فقط عندما تكون λ صغيرة جدّاً.



شكل ١: العلاقة بين الطول الموجي وشدة الموجة. الخط الأسود يعبر عن النظرة الكلاسيكية والتي تقتضي بزيادة شدة الإشعاع مع زيادة التردد (أو نقص الطول الموجي)، أما الخط الأزرق فهو المتفق مع تنبؤات بلانك ومتفق كذلك مع النتائج التجريبية.

١-٢ التأثير الكهروضوئي Photoelectric Effect

ظاهرة الفعل الكهروضوئي هي من الظواهر التي تثبت أن الضوء يسلك سلوك الجسيمات، حيث أنه عندما تسقط أشعة كهرطيسية ذات تواتر كافي على سطح معدني فإنها تحرر منها بعض الإلكترونات وتسمى هذه الظاهرة بالتأثير الكهروضوئي، وهو يتصف بما يلي:

لا تنطلق الإلكترونات من المعدن تحت تأثير الأشعة إلا إذا كان تواتر الإشعاع أكبر أو يساوي حدّ معين يسمّى العتبة، وتختلف العتبة من معدن إلى آخر، وإذا ازدادت شدة الأشعة (كميتها) دون أن يتغير تواترها[٣] فإن كمية الإلكترونات المتحررة تزداد، ولكن طاقة الإلكترونات المتحررة لا تتغير.

وإذا استخدمت أشعة ذات تواتر أعلى فإن الإلكترونات المتحررة تزداد طاقتها، ويمكن تفسير هذه الخواص للتأثير الكهروضوئي كما يلي:

كل إلكترون في المعدن يرتبط بذراته بقوة معينة، ولابدّ لاقتلاعه، من بذل طاقة معينة، وتختلف هذه الطاقة من معدن إلى آخر وهي تدعى تابع العمل *work function* ويرمز لها بـ ϕ، فإذا اعتبرنا الضوء مؤلفاً من جسيمات "فوتونات" حيث يكون لكل فوتون قدر من الطاقة $E = hf$ فإن الطاقة اللازمة لاقتلاع الإلكترون، أي ϕ، تأتي من طاقة الفوتون، فإذا كانت طاقة الفوتون

[٣] بشرط أن يكون التواتر كافياً لانتزاع الإلكترونات من الصفيحة المعدنية

أصغر من ϕ فإنه لا يستطيع اقتلاع الإلكترون، لهذا السبب لابد أن تكون طاقة الفوتون مساوية على الأقل ϕ، أي لابد أن يكون التواتر f مساوياً لقيمة دنيا هي العتبة، وهي تتعلق بطبيعة المعدن.

وإذا كانت طاقة الفوتون أكبر من ϕ أي $hf > \phi$ أي إذا تواتره f أكبر من العتبة، فإن قسماً من طاقته يستهلك لاقتلاع الإلكترون من المعدن، والقسم الآخر يكسب الإلكترون سرعة ابتدائية ينطلق بها، ويكون لدينا:

$$hf = \phi + \frac{1}{2} m\, v_0^2$$

حيث m كتلة الإلكترون و v_0 سرعته الابتدائية التي ينطلق بها من المعدن، ويمكن كتابة العلاقة السابقة على الشكل التالي:

$$hf - \phi = \frac{1}{2} m\, v_0^2$$

وبما أن الطاقة الحركية هي مقدار موجب نستنتج أن تواتر الإشعاع الواقع على سطح المعدن يجب أن يحقق العلاقة التالية كي يستطيع تحرير الإلكترون

$$hf - \phi \geq 0$$

وإذا كان $hf = \phi$ فإن الإلكترون يتحرر بسرعة ابتدائية تساوي الصفر، تعطي العلاقة السابقة الحدّ الأدنى للتواتر الذي يستطيع اقتلاع الإلكترون من المعدن، أي يعطي قيمة العتبة ، إذا رمزنا للعتبة f_0 نكتب:

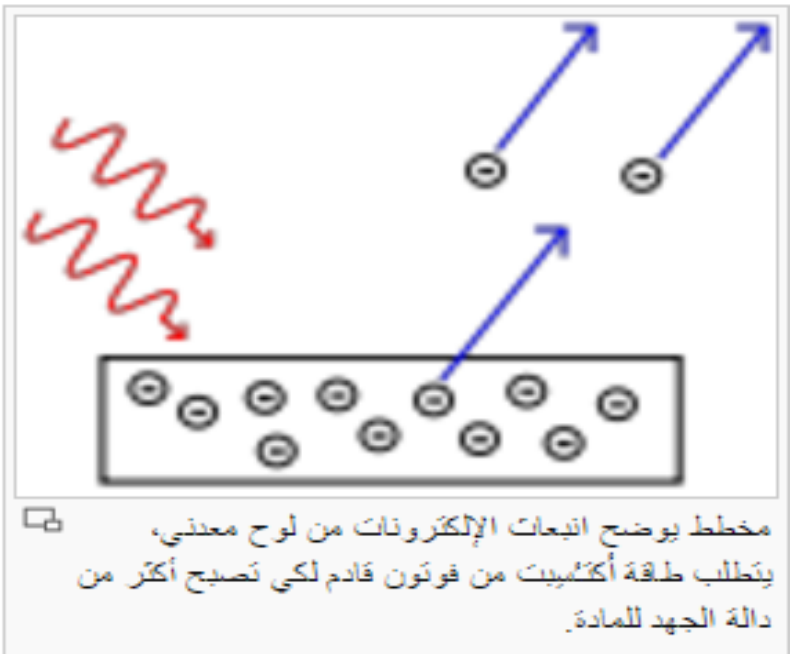
$$h\, f_0 = \phi$$

ومن العلاقتين السابقتين نحصل على:

$$hf - h\, f_0 = \frac{1}{2} m\, v_0^2$$

ويمكن التأكد من صحة هذه العلاقة تجريبياً، فإذا استخدمنا أشعة تواتراتها متزايدة، وقسنا من أجل كل قيمة للتواتر f سرعة الإلكترونات المنطلقة v_0 ثم رسمنا خطاً بيانياً لتحولات f بتابعية v_0^2، يجب أن نحصل على خط مستقيم، وهذا ما تؤيده التجربة.[٤]

وقد جاء التفسير لظاهرة التأثير الكهروضوئي في ورقة علمية قدمها العالم الفيزيائي "ألبرت أينشتين" عام ١٩٠٥.

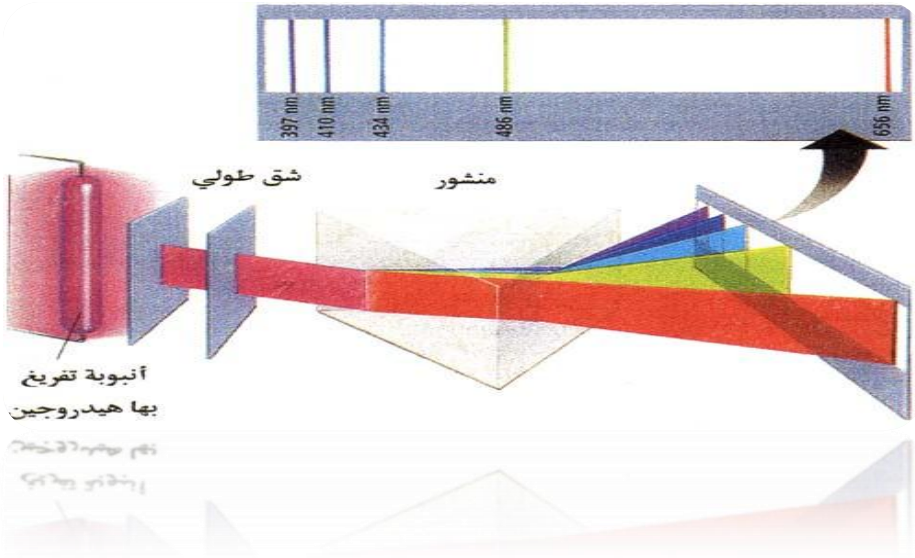


شكل ٢: : انتزاع الإلكترونات بفعل التأثير الكهرضوئي

[٤] الكيمياء الكوانتية –جامعة تشرين – سنة ثالثة ر ف ك – صفحة ٤٠

١-٣ الطيف الذري للهيدروجين Atomic spectrum of Hydrogen

نعلم أن الضوء العادي يتحلل إلى ألوان الطيف المعروفة إذا مر خلال منشور زجاجي، وإذا استبدل الضوء العادي بالإشعاع المنبعث من غاز الهيدروجين (بوضعه في أنبوبة تحت ضغط منخفض بين فرق جهد كهربائي مرتفع) ثم استقبل الإشعاع على لوحة فوتوغرافية فإنه يظهر عليها بعض الخطوط تكوِن ما يسمى بطيف الانبعاث كما في الشكل التالي:

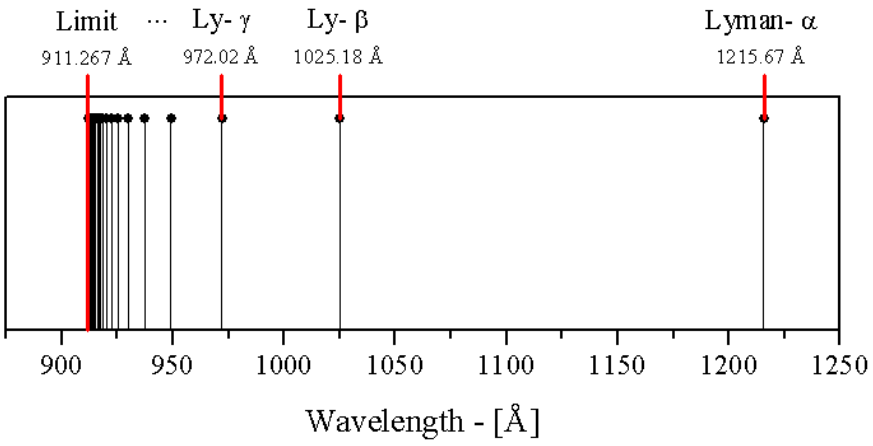


صورة ١: طريقة الحصول على خطوط طيف الانبعاث لذرة الهيدروجين

ولقد لاحظ بالمر (Palmar) سنة 1885 أربعة خطوط واضحة وعدد آخر من الخطوط تتقارب بجوار بعضها في الاتجاه الذي يقل فيه طول الموجة وسميت المجموعة بمتسلسلة بالمر، وقد تمكن بالمر من إيجاد العلاقة البسيطة الآتية:

$$\frac{1}{\lambda} = R(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n^2})$$

حيث λ طول الموجة، R ثابت يسمى ثابت ريدبرج و n عدد صحيح يأخذ القيم ٣ ، ٤ ،٥...للخطوط الأربعة الواضحة في طيف الانبعاث.



شكل ٣: خطوط طيف الانبعاث لذرة الهيدروجين.

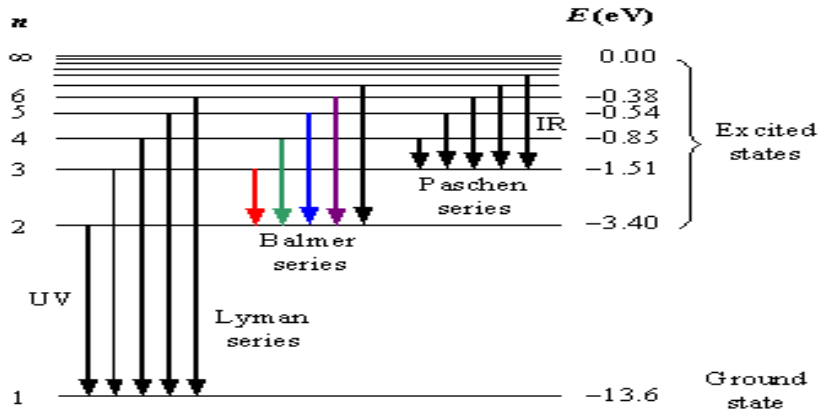
وقد أمكن تفسير ظهور هذه الخطوط في طيف الانبعاث بتطبيق نظرية بور كما يلي:

لما كان الإلكترون جسيم سالب الشحنة فإنه ينجذب بقوة إلى النواة الموجبة، ولذلك يحتاج إلى طاقة لكي يتحرك بعيداً عن النواة.

وبالعكس ينطلق قدر من الطاقة إذا اقترب الإلكترون من النواة، وعندما تكون الذرة في أدنى حالات الطاقة تكون قوة الطرد المركزي المصاحبة للإلكترونات سريعة الحركة وقوى التنافر بين هذه الإلكترونات كافية لإبقائها على مسافة معينة من النواة، ويمكن بطرق مختلفة كالتسخين او باستخدام جهد كهربائي مرتفع إثارة الإلكترونات في الذرة من مستوى طاقة منخفض إلى آخر مرتفع، وعند رجوع الإلكترونات المثارة إلى مستويات أدنى فإن فرق الطاقة يشع على هيئة ضوء، يتميز بتردد معين وبطول موجي محدد ممكن تعيينه بواسطة المطياف، حيث يظهر على هيئة خطوط في أماكن محددة من مناطق الطيف.

ولما كانت ذرة الهيدروجين هي أبسط الذرات تركيباً، فقد كان من المتوقع أن يكون لها طيف بسيط والواقع أن هذا ليس صحيحاً تماماً، إذ عند إثارة ذرات الهيدروجين فإن الالكترونات في الذرات المختلفة لا تثار كلها بنفس الدرجة وبعضها ينتقل من المستوى الأول إلى الثاني والبعض الآخر ينتقل عدة مستويات إلى أعلى لذلك تظهر بطيف الهيدروجين عدة متسلسلات تنتج عن رجوع الالكترونات إلى مستويات أدنى مختلفة في الطاقة، وهذه المتسلسلات هي على الترتيب متسلسلة ليمان(Lyman) وبالمر (Ballmer) وباشن(Pascshen) وبراكت(Brackett).

وإذا زادت الطاقة المعطاة للإلكترون عن قدر معين فإن الإلكترون ينفصل تماما عن الذرة، وفي هذه الحالة يقال أن الذرة تأينت، ويسمى الجهد اللازم لنزع الإلكترون بجهد التأين ويساوي 6.13 ev في حالة الهيدروجين، ويوضح الشكل التالي مستويات الطاقة في ذرة الهيدروجين ومقدار الطاقة لكل منها، وكذلك احتمالات انتقال الإلكترون بين الطبقات المختلفة الذي ينتج عنها متسلسلات الطيف الأربع السابق ذكرها.



Energy levels of the hydrogen atom with some of the transitions between them that give rise to the spectral lines indicated.

شكل ٤: مستويات الطاقة المختلفة في ذرة الهيدروجين.

وقد استفاد بور من الحقائق السابقة بأن حسب بطريقة رياضية تردد الخطوط المختلفة في طيف ذرة الهيدروجين أو أطوال موجاتها، إذ أن:

$$c = \lambda . f$$

حيث c سرعة الموجة، λ الطول الموجي، f التردد

ولابد لكي يصل إلى هذه النتائج من أن يحسب مقدار الطاقة التي يختص بها كل مدار من المدارات الثابتة فيمكن بذلك حساب كمية الطاقة المنطلقة عند رجوع الالكترون من مدار مرتفع إلى مدار منخفض وبالتالي يمكن تعيين تردد الأشعة المنبعثة من معادلة بلانك.

وبمقارنة الترددات المحسوبة بالترددات المعلومة بخطوط طيف ذرة الهيدروجين يمكن التأكد من فروضه أو عدمها.

٤-١ أمواج دي بروي والطبيعة المزدوجة Wave Particle Duality

اقترح العالم "لويس دي بروي" عام ١٩٢٣ أن كل جسيم مادي كتلته m ويتحرك بسرعة v تكون له موجة مصاحبة طولها λ، وقد استخدم دي بروي في فرضيته نتائج أينشتين في النسبية الخاصة والتأثير الكهروضوئي:

الطاقة الكلية للجسيم

$$E = \sqrt{p^2c^2 + m_0^2c^2} \quad (١)$$

حيث الفوتون جسيم كتلته الساكنة $m_0 = 0$

من العلاقة السابقة نجد العلاقة بين طاقة الفوتون وكمية حركته

$$E = p.c \quad (٢)$$

طاقة الفوتون حسب قوانين بلانك:

$$E = h.f \quad (٣)$$

نجد من ٢ و٣:

$$p = \frac{hf}{c} \quad (٤)$$

وبما أن $f = \frac{c}{\lambda}$ نجد أنَّ:

$$pc = \frac{hc}{\lambda} \quad (٥)$$

ومنه نستنتج:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (٦)$$

وقد قام دي بروي بتعميم هذه العلاقة لأي جسم كتلته m

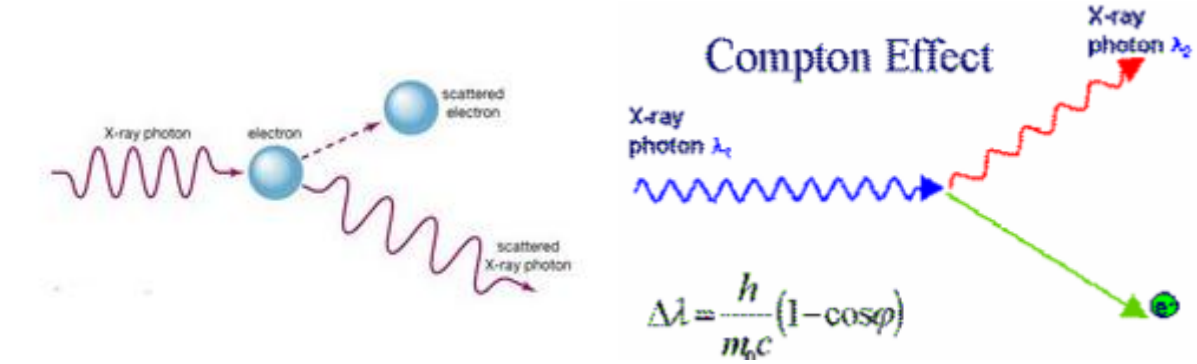
ويمكـن القـول بـأنَّ فرضـية دي بـروي هـذه كانـت تأسيسـاً للميكانيـك المـوجي للأجسـام، ولكـن ينبغـي التنبيـه إلـى أن أمـواج دي بـروي ليسـت أمواجـاً كهرطيسـية ولا أمـواج ميكانيكيـة (صـوتية مـثلاً)، بـل هي أمواج من نوع جديد تسمّى أمواج احتمالية لأنها تعبر عن احتمال وجود الأشياء الدقيقة جدّاً.

وإن تصـرّف الجسـيمات كـأمواج يجعـل مـن الصـعب تحديـد موقعهـا لـذلك لابـدّ مـن ظهـور قـدر مـن عـدم التأكـد فـي تحديـد الموقـع، والسـبب أن الجسـيم يكـون متحيّـزاً فـي مكـان محـدد بحسـب امتـداده لكـن الموجـة وبسـبب طبيعتهـا المتحولـة لا تحـدد إلا فـي حيّـز يقـارب طولهـا المـوجي، حيـث نلاحـظ أن طول الموجة لا علاقة له بأبعاد الجسم الذي تمثله.

١-٥ فعل كومبتون Compton effect

مـرة أخـرى، تتوضـح الطبيعـة الجسـيمية للضـوء فـي فعـل كومبتـون، حيـث يتبـدد الإشـعاع الكهرطيسـي (الأشـعة السـينية) بواسـطة الجسـيمات المشـحونة (الإلكترونـات)، وقـد درس كومبتـون سـنة ١٩٢٢م تجريبياً هذه الظاهرة، من خلال تمرير حزمة من أشعة *x* من خلال مادة ما.

لا يمكـن تفسـير هـذه الظـاهرة، والتـي تعـرف بظـاهرة كومبتـون مـن خـلال نظريـة طومسـون الكلاسـيكية، لـذلك اسـتخدم كومبتـون أفكـار بلانـك وأينشـتين عـن تكمـيم الطاقـة لتفسـير هـذه الظـاهرة، فـافترض أن الإشـعاع يتفاعـل مـع المـادة علـى صـورة كمـات منفصـلة مـن الطاقـة (فوتونـات)، واعتبـر الفوتونـات وكأنهـا جسـيمات، ثـم قـام بدراسـة تصـادم الفوتـون والإلكتـرون كتصـادم الجسـيمات الماديـة، مسـتخدما الميكانيك النسبي. ويظهر الشكل التالي عملية التصادم بين الفوتون الساقط مع الإلكترون الساكن.

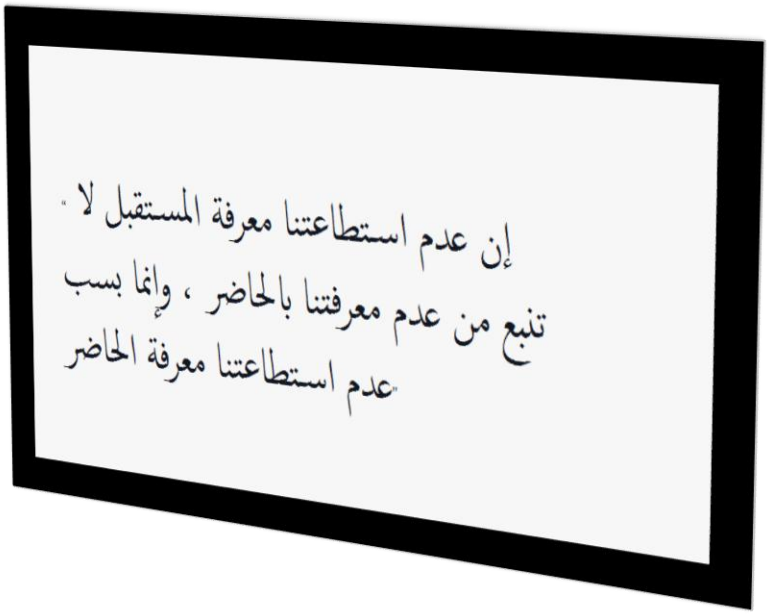


شكل ٥: انزياح إلكترون نتيجة اصطدامه بفوتون متحرك

ينقـل الفوتـون زخمـه إلـى الإلكتـرون السـاكن، فيدفعـه إلـى الحركـة، ويسـتطير فوتـون آخـر بطاقـة أقـل ينـتج عـن التصـادم بـين الفوتـون الأصـلي والألكتـرون، ويكتسـب الإلكتـرون المتحـرك طاقـة حركيـة تسـاوي الفـرق بـين طـاقتي الفوتـونين، وهـذه الظـاهرة تثبـت أن للفوتونـات خـواص جسـيمية واضـحة وبذات الوقت لها صفات موجية أيضاً.

الفصل الثاني

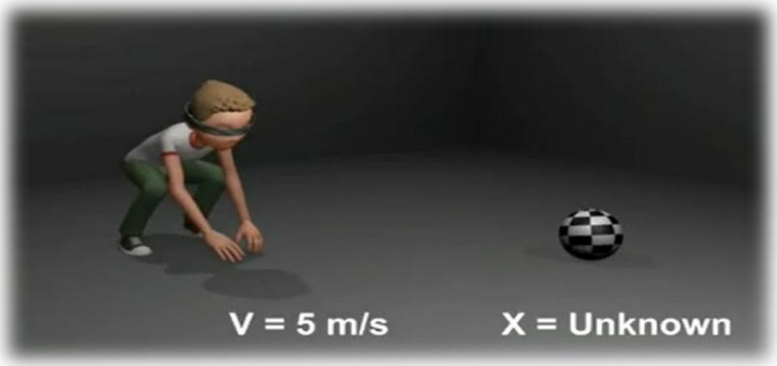
مبدأ الشك لهايزنبرغ



The Heisenberg's Uncertainty Principle

٢-١ ما هو مبدأ الشك؟!

نفترض وجود طفل معصوب العينين وكرة متحركة بسرعة محددة ولتكن $5m.s^{-1}$، إلا أنَّ الطفل لا يعلم أين هي الكرة حتى يصطدم بها، ولكنه عند الاصطدام بالكرة فإنه يعطيها دفعاً، مما يؤدي إلى تغير سرعتها، وبالتالي نكون قد علمنا موضع الكرة، ولكننا فقدنا معرفتنا بالسرعة.



نستنتج من هذه التجربة أنه لا يمكن تحديد موقع الكرة وسرعتها في الوقت ذاته، وهذا مثال على "مبدأ الشك" الذي صاغه العالم الألماني "فرنر هايزنبرغ" عام ١٩٢٧، ونصه كالتالي:

"لا يمكن تحديد خاصتين فيزيائيتين مترابطتين (كالسرعة والموضع في مثالنا) في الوقت ذاته وبدقة"

وصيغته الرياضية:

$$\Delta x.\Delta p \geq \hbar/2$$

حيث Δx الخطأ في تحديد الموضع، Δp الخطأ في تحديد كمية الحركة، $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ثابت بلانك الأصغري

كما يمكن أن تعطى علاقة الشك بالشكل:

$$\Delta E.\Delta t \geq \hbar/2$$

العلاقة السابقة تبين أن تحديد قيمة الطاقة بدقة ΔE خلال فترة زمنية Δt تعطى بالعلاقة:

$$\Delta E = \hbar/\Delta t$$

لنفترض أننا أجرينا تجربة لقياس موضع إلكترون خلال فترات زمنية Δt متساوية ، فإن نتيجة القياس كما تبين التجربة لن تقع على منحنٍ مستمر، فبحسب المفاهيم الكوانتية كلما كانت عملية القياس دقيقة كانت نتائج القياس غير مستمرّة ومتشتتة، وهذا ما يمكن استنتاجه من مبدأ الشك (ليس للإلكترون مسار محدد).

وإذا فرضنا الآن أن Δt صغيرة جدّاً، أي أن الفاصل الزمني بين عمليتي القياس صغير جدّاً، تظهر التجربة أن نتائج القياس تعطي قيماً متقاربة جدّاً للموضع. وعلى الرغم من أن هذه القيم تقع في منطقة صغيرة جدّاً فإن توزعها غير منتظم، وإذا جعلنا $\Delta t \to 0$ فبحسب المفاهيم الكوانتية لن تقع نتائج القياس المتجاورة على خطّ مستقيم.

وهذا يعني أنه لا يوجد في ميكانيك الكم مفهوم سرعة الجسيم، أو أن السرعة تحسب بالعلاقة

$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

فبحسب المفاهيم الكمومية (مبدأ الشك) إذا وجد لجسيم (إلكترون مثلاً) موضع معيّن x فإن سرعته v_x تكون غير محددة، والجسيم في هذه الحالة ليس له مسار معيّن في أثناء حركته، أي أن الإلكترون في ميكانيك الكم لا يمتلك مساراً معيّناً ونكتب علاقة الشك في هذه الحالة:

$$\Delta x . \Delta v_x \geq \hbar/2$$

وبحسب هذه العلاقة فإن السرعة والموضع في ميكانيك الكم هي متحولات ديناميكية لا يمكن قياسها بنفس الوقت.

إذاً في الميكانيك الكلاسيكي كما نعلم تتعين حالة الجملة بتعيين موضعها وسرعتها في لحظة ما، واعتماداً على ذلك تكتب معادلات الحركة التي تصف سلوك الجسيم في كل لحظة لاحقة، ولكن في ميكانيك الكم وبحسب مبدأ الشك لا يمكن وصف حالة الجملة بمعرفة الموضع والسرعة، لأنه كما استنتجنا قبل قليل أن الكميات الديناميكية المترابطة لا يمكن قياسها بالوقت ذاته، ومن هنا تبرز نتيجة بالغة الأهمية وهي أنه في ميكانيك الكم توصف حالة الجملة بأقل عدد من المتحولات الديناميكية، وبالتالي يعتبر ميكانيك الكم أقل تفصيلاً من الميكانيك الكلاسيكي.[٥]

وقد استفاد هايزنبرغ من فرضية دي بروي للأمواج المادية، وفعل كومبتون في استنتاج هذا المبدأ، ويظهر تأثيره بشكل واضح بالنسبة للجسيمات الكوانتية (الكترون، فوتون ...)، حيث تكون أطوال الأمواج المرافقة كبيرة بالنسبة لأبعاد الجسيمات.

ويعد هذا المبدأ من المبادئ الأساسية في الميكانيك الكوانتي.

[٥] ميكانيك الكم (١)، الدكتور ميخائيل فرح، منشورات جامعة حلب، صفحة ٤٨-٥٠

٢-٢ مجهر هايزنبرغ

في الأيام الأولى للنظرية الكوانتية حاول فيرنر هايزنبرغ أن يشرح جذور عدم التعيين، حيث كان يفكر بنوع مثالي من المجاهر يمكنها أن تُستخدم في دراسة إلكترون واحد. مثل هذا المِجهر سيستخدم حداً أدنى من التشويش فوتوناً واحداً في كل مرة[٦].

أولاً، يُحددُ فوتونٌ واحدٌ سرعةَ الإلكترون ومن ثم تُدوّن النتيجة. وبعدها، يُحددُ فوتونٌ واحدٌ موقعَ الإلكترون ومن ثم تُدون النتيجة.

ولكن بقياس هذا الموقع، يتلقى الإلكترون تأثيراً من قِبل الفوتون، فيُغيّر سرعته بشكل تبادلي حسب فعل كومبتون، بقياس السرعة، يَحرف الفوتونُ المؤثِّرُ الإلكترونَ عن مساره، وبذلك يزحزحه عن موقعه.

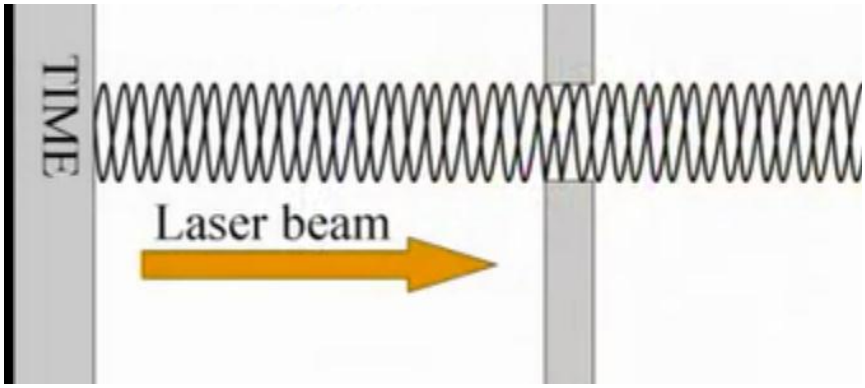
حيث يكون الخطأ في تحديد الموضع مساوياً لطول موجة الفوتون، ولتصغير الخطأ في تحديد الموضع نختار فوتون ذو موجة أقصر (أي ذات تردد أعلى)، مما يؤدي إلى زيادة طاقة الفوتون، وبالتالي زيادة التغير في كمية الحركة، بتعبير آخر، أشار هايزنبرغ إلى أنه حالما تحاول قياس موضع الإلكترون، فإنك تغير سرعته، وما أن تحاول أن تقيس سرعة الإلكترون، فإنك تغير موقعه، وحسب مبدأ الشك فإن زيادة الدقة في تحديد أحد المتغيرين تؤدي إلى زيادة الخطأ في تحديد المتغير الآخر، فثمة على الدوام عنصر من اللاتعيين غير قابل للاختزال يشمل السرعة والموقع، وغيرها من القيم الديناميكية في الميكانيك الكوانتي.

---

[٦] بما أن الكوانتم الواحد غير قابل للقسمة وهو مشترك بين الملاحِظ والملاحَظ، فليس بمقدور الفيزياء أن تقول ما إذا كان فوتون واحد ناتج عن الجهاز، أو عن الإلكترون الملاحَظ، أو عن كليهما. وبسبب ذلك لا يمكن حساب أثر التشويشات على السرعة والموقع وتالياً إجراء معادلة لإنقاص عدم التعيين

٢-٣ توضيح مبدأ الشك لهايزنبرغ من خلال تجربة عملية

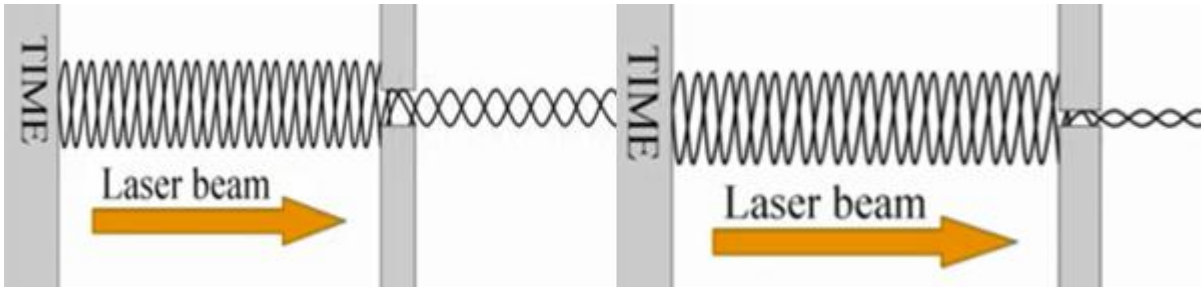
تعتمد التجربة على إرسال ضوء من الليزر عبر شق متغير القطر، وكما نعلم أن الضوء له خصائص موجية، فإن ضوء الليزر سيعبر الشق كالتالي:



شكل ٦: مرور أشعة الليزر "الفوتونات" عبر شق كبير نسبياً

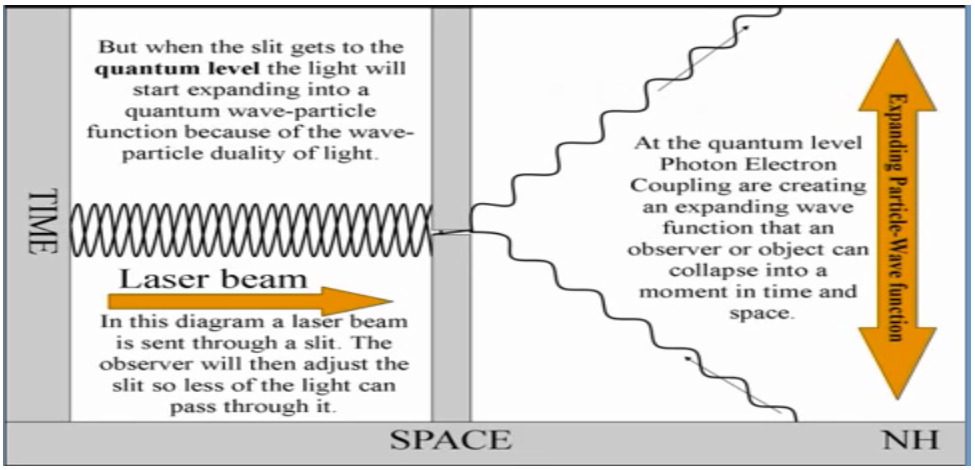
حيث تكون فتحة الشق كبيرة بالنسبة لأبعاد ضوء الليزر، فيكون الخطأ في تحديد موقع الفوتون كبيراً، وبالتالي تكون كمية الحركة محددة بدقة.

نبدأ بتصغير قطر الشق، فنلاحظ زيادة في طاقة الفوتون وزيادة في دقة تحديد موضع الفوتون، ولكننا لم نتجاوز بعد حدود ميكانيك الكم في الدقة وما زال بقدرتنا تحديد كمية الحركة كما في الشكل التالي:



شكل ٧: عبور حزمة من الليزر لشق منفرد بعد تصغير قطره لحدود أكبر من حدود مبدأ الشك

ولكن عند الاستمرار في تضييق الشق، وزيادة الدقة في تحديد موضع الفوتون، نلاحظ أننا نصل إلى حد معين يبدأ فيه الضوء العابر للشق بالتمدد إلى موجة مادية، بسبب الطبيعة المزدوجة للضوء، وعندها يصبح الخطأ في تحديد كمية الحركة كبيراً، كما في الشكل:



شكل ٨: شكل يوضح تشتت حزمة الليزر بعد تصغير قطر الشق للمستوى الكوانتي

مناقشة نتائج التجربة:

نلاحظ أن الارتياب في تحديد كمية الحركة، يكون غير موجوداً عندما يكون قطر الشق كبير نسبياً، وذلك لأن الخطأ يبقى أكبر من حدود مبدأ الشك لهايزنبرغ، ومع الاستمرار بتصغير القطر يبقى بإمكاننا تحديد كمية الحركة بدقة، حتى يصل الخطأ في تحديد الموضع إلى المستوى الكوانتي، حيث يبدأ التشويش في تحديد كمية الحركة، وذلك لمنع اختراق الحدود التي يضعها مبدأ الشك لدقة القياس:

$$\Delta X \, \Delta P \geq \frac{\hbar}{2}$$

حيث $\hbar = \frac{h}{4\pi} = 1.055 \times 10^{-34}$ وهو ثابت بلانك الأصغري

Δx عرض الشق ويمثل الخطأ في تحديد موضع الإلكترون، Δp الخطأ في تحديد كمية الحركة

٤-٢ مقارنة بين تأثير مبدأ الشك على كل من العالمين الميكروسكوبي والمايكروسكوبي

للمقارنة نأخذ كرة بيسبول وإلكترون، وكلاهما يتحركان على المحور x بسرعة $m.s^{-1}$ 50، كتلة كرة البيسبول تساوي kg 0.058، والدقة في تحديد سرعة كل منهما هي 0.02%، وعلينا حساب الخطأ في تحديد موقع كل منهما.

الحل: حسب مبدأ الشك نجد بالنسبة لكرة البيسبول:

$$\Delta x.\Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad \Rightarrow \Delta x \approx \frac{\hbar}{2\Delta p} = \frac{\hbar}{2\mathrm{m}\Delta v}$$

$$= \frac{1.055 \times 10^{-34} \times 100}{2 \times 0.058 \times 0.02 \times 50} = 0.9 \times 10^{-31}\, m$$

أما بالنسبة للإلكترون فنجد:

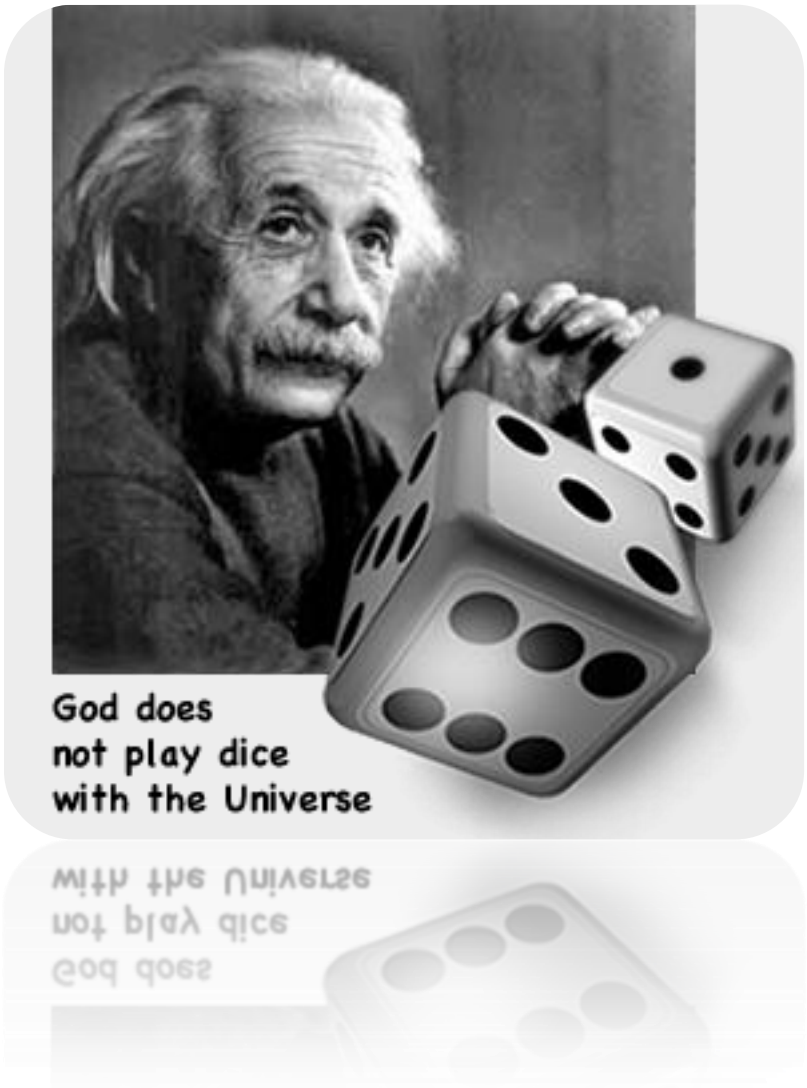
$$\Delta x.\Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad \Rightarrow \Delta x \approx \frac{\hbar}{2\Delta p} = \frac{\hbar}{2\mathrm{m}\Delta v}$$

$$= \frac{1.055 \times 10^{-34} \times 100}{2 \times 9.11 \times 10^{-31} \times 0.02 \times 50} \approx 0.6 \times 10^{-2}\, m$$

نلاحظ أن الخطأ الناتج عن قياس موضع كرة البيسبول صغير جداً ولا يمكن قياسه، لذلك يمكن إهمال هذا الخطأ أمام حجم الكرة واعتباره غير موجود. أما بالنسبة للإلكترون فإن هذا الخطأ يعتبر كبيراً جداً بالنسبة لأبعاد الالكترون، لذلك يجب أخذه بالحسبان.

لـذلك يمكـن إهمـال حـدود مبـدأ الشـك إذا مـا أخـذناها علـى المقيـاس المايكروسـكوبي، حيـث أن قيمـة ثابت بلانك الأصغري J.S 10^{-34} x 1.055 = $\hbar$ وهو مقدار صـغير جداً ولا يمكن مقارنتـه بالأبعـاد المايكروسـكوبية، وبإمكاننـا القـول أن تـأثير مبـدأ الشـك يقتصـر علـى الأبعـاد الذريـة ومـا دونها.

الفصل الثالث



التحديات التي واجهت مبدأ الشك

٣-١ مفارقة (أينشتين – بودولسكي – روزن) (أ.ب.ر)

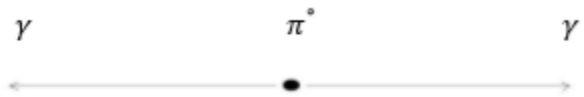
عام ١٩٣٥م ، في مؤسسة الدراسات المتقدمة بجامعة برينستون، نشر ثلاث رجال وهم أينشتين، وبودولسكي وروزن نشرة بعنوان:

" هل يمكن أن نعتبر توصيف الحقيقة الفيزيائية المستمدّة من ميكانيك الكم توصيفاً كاملاً ؟؟!! "

كانت تلك النشرة تضم حجة منطقية بسيطة جدّا، ولكنها ماكرة، وكان الهدف منها إثبات إمكانية قياس متغيرين ديناميكيين في آن واحد، سيكون المتغيران هنا هما الموضع وكمية الحركة، وهذا بالطبع يخالف مبدأ الشك الذي وضعه العالم هايزنبرغ ١٩٢٧.

وجاءت النشرة كما يلي:

لدينا الجسيم المتعادل الشحنة π° في حالة السكون، ومن المعلوم أن هذا الجسيم ينحلّ إلى فوتونين يتحركان في اتجاهين متضادين كما هو موضح في الشكل



شكل ٩: انحلال البايون المتعادل إلى فوتونين يسيران في اتجاهين متضادين

إن كمية الدوران للبايون المتعادل تساوي الصفر، لذلك لابدّ من أن يمتلك الفوتون الأول والثاني كمية دوران مغزلي متعاكسة، حتى نحافظ على مبدأ حفظ كمية الدوران المغزلي.

مثلاً، لو وجدنا أن الفوتون الأول لديه كمية تحرك مغزلي في الاتجاه العلوي على المحور x فيجب أن تكون كمية التحرك للفوتون الثاني إلى الأسفل على نفس المحور.

هنا، إذا قمنا بقياس كمية الدوران المغزلي للفوتون الأول، سيؤدي ذلك إلى معرفة كمية الدوران المغزلي للفوتون الثاني بدون قياسه، والسبب في ذلك هو مبدأ حفظ كمية التحرك المغزلي الكلية. وفي هذه التجربة قد فُرض أنّ قياس كمية الدوران المغزلي لأحد الجسيمات لا تؤثر على كمية الحركة للجسيم الآخر في أي حال من الأحوال مهما كانت المسافات بينهما (سواء بالميكروميتر

أم بالسنة الضوئية) ومن هنا نكمل، نقوم بقياس كمية الدوران المغزلي للفوتون الأول على المحور x بالتالي سنكون غير قادرين على معرفة كمية الدوران المغزلي على المحاور الأخرى y وz، وهذا يوافق مبدأ الشك.[٧]

بعدها نقوم بقياس كمية الدوران المغزلي للفوتون الثاني على المحور y وهنا أيضاً لن نكون قادرين على معرفة كمية الدوران المغزلي على المحاور الأخرى x وz، ولكن قياسنا لكمية دوران الفوتون الأول على المحور x يجعلنا قادرين على معرفة كمية الدوران المغزلي للفوتون الثاني على المحور x بحسب مبدأ حفظ كمية الدوران المغزلي، وبالمثل فإننا إذا قسنا كمية الدوران المغزلي للفوتون الثاني على المحور y فإننا سنعرف كمية الدوران للفوتون الأول على المحور y.

مناقشة نتائج التجربة:

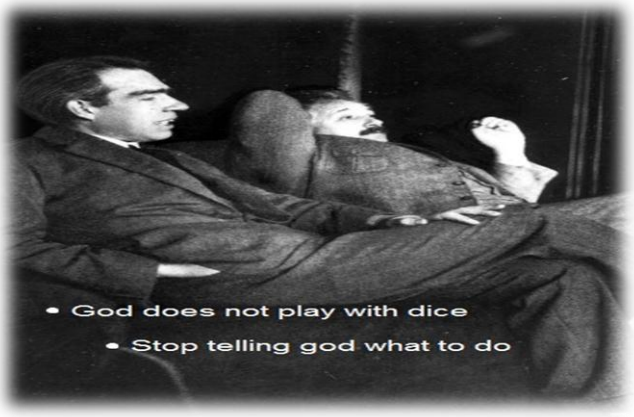
هذه التجربة، تمكّننا من تحديد كمية الدوران المغزلي للفوتون الأول وكذلك الثاني على نفس المحورين x وy بنفس الوقت وهذا يخالف مبدأ الشك القائل بعدم إمكانيتنا قياس كمية الدوران المغزلي على كلا المحورين بنفس الوقت.

و نرى أنه طالما تمكنّا من قياس كمية الدوران المغزلي للجسيم الأول فهذا سيمكننا من معرفة كمية الدوران المغزلي للجسيم الثاني قبل إجراء أي قياس عليه، وهذا ما يتناقض مع ما ذهب إليه بور بأنه لا يوجد قيمة محددة لأي كمية متغيرة قبل القياس، كما تبين هذه التجربة أننا تمكنّا من قياس مركَّبتين لكمية الدوران المغزلي في آن واحد، وهذا يخالف بشكل واضح مبدأ الارتياب، وبالتالي نستطيع بنفس الأسلوب قياس موضع وكمية حركة الفوتون في آن معاً، حيث نقيس موقع الفوتون الأول وبالتالي نستطيع تحديد موقع الفوتون الثاني ونقيس كمية حركة الفوتون الثاني بالتالي نستطيع معرفة كمية حركة الفوتون الأول وبذلك نكون قد حددنا موضع وكمية حركة الإلكترون في نفس الوقت.

كما أن هذه التجربة تمكننا من أن نقول أنه إذا كان هناك تأثير لحظي غير متموضع بين الجسيمات، أي أن أحدهما يؤثر في الآخر بشكل مباشر أو آني، فهذا يخالف مبدأ النظرية النسبية

[٧] في ميكانيك الكم لا يمكن قياس كل مركبات أي قيمة ديناميكية متغيرة في نفس الوقت، فمثلاً، لو قسنا كمية مركبة الحركة لجسيم ما على المحور x فلا يمكن عندها قياس أو معرفة مركبات كمية التحرك على المحاور الأخرى y وz وذلك حسب مبدأ الشك

الخاصة التي تنص على أن سرعة الضوء هي الحدّ الأعلى للسرعة في الكون، وإن وجد تأثير بين الجسيمات فيجب أن ينتقل بسرعة أبطأ من سرعة الضوء، وبالتالي فإنه سيكون متوضّعاً.



صورة ٢: أينشتين وبور في مؤتمر سولفاي ١٩٢٧

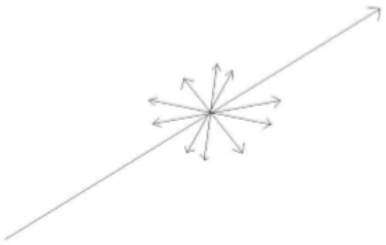
٣-٢ مفارقة جون بيل، هل الصواب بجانب (أ.ب.ر) ؟؟

في عام ١٩٦٤ نشر جون بيل مقالة بعنوان " حول مفارقة أ ب ر"، وفيها عبر عن رأيه بما ورد في تلك النشرة، وبدأ هذه المقالة بفرضيتين أساسيتين:

- الأولى: قيم الكميات الفيزيائية لا علاقة للقياس بشأنها
- الثانية: افترض فيها صحة علاقة التموضع (بمعنى أنه لا يمكن أن ينتقل التأثير بين أي جسيمين بشكل آني أو لحظي)

نعود إلى تجربة "البايون" الذي ينحل إلى فوتونين لهما كمية دوران مغزلي متعاكسة:

إن التجارب التي أجريت لاختبار مفارقة "أ ب ر" لم تعتمد على كمية الدوران المغزلي للفوتونات بل اعتمدت على كمية أخرى تسمّى الاستقطاب *polarization*.[٨]



شكل ١٠: تكون خطوط الحقل الكهربائي عمودية على جهة انتشار الموجة

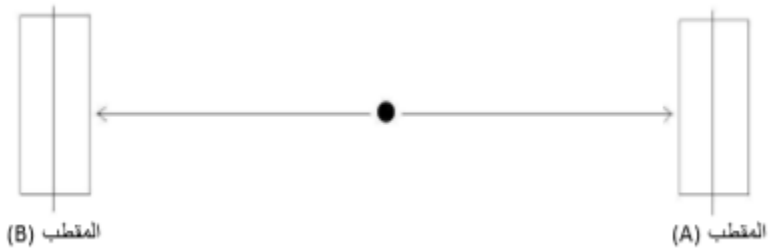
لنفترض أنه لدينا مصدر للبايونات المشعّة للفوتونات، ولنفترض كذلك بأن كل واحد من الفوتونات المنطلقة له اتجاه استقطاب، إما إلى الأعلى أو إلى الأسفل.

نضع الآن مقطبين في طريق كل من الفوتونين المنطلقين، وبحسب مبدأ حفظ الكميات، فإنه إذا ما علمنا عن حالة استقطاب أحد الفوتونين لدى وصوله إلى المقطب سوف نعلم عن حالة الأخر

[٨] يمكن وصف الاستقطاب بالنسبة للضوء باتجاه المجال الكهربائي في الفضاء، فعندما ينتشر الضوء (موجات كهرومغناطيسية) تكون خطوط المجال الكهربائي عمودية على جهة انتشاره في كل الاتجاهات كما هو موضح بالشكل

بدون قياسه، فمثلاً لو عبر الفوتون المتجه إلى المقطب *A* منه، فإننا نستنتج بإنَّ الفوتون الذاهب إلى المقطب *B* سوف يعبر هو الآخر بدون إجراء أي قياس عليه، وإذا لم يعبر الفوتون الأول من المقطب *A* فإنّ الفوتون الذاهب إلى المقطب *B* يجب ألا يعبر كذلك

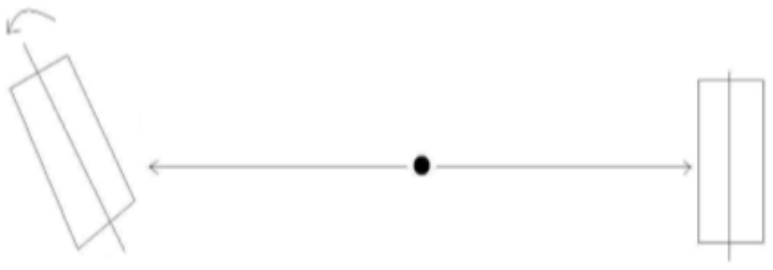
في البداية سنضع المقطبين بشكل متوازٍ مع كل من الفوتونين المنطلقين كما هو موضح بالشكل:



شكل ١٢: المقطبين في وضعية توازي مع كل من الفوتونين المنطلقين

ويوجد راصدان عند كل من المقطبين *A* و*B* حتى يخبراننا بحالة استقطاب كل من الفوتونين بشكل متعاكس، في هذه الحالة ستكون نتائج كلا الراصدين متطابقة تماماً، وهذا متوقع لأنه إذا كانت حالة استقطاب الفوتون المتجه إلى المقطب *A* عمودية، أي موازية لاتجاه المقطب فإن الفوتون سوف يعبر، وبهذا نكون قد علمنا عن حالة استقطاب الفوتون الذاهب إلى *B* قبل أن يقيسه الراصد الموجود هناك.

نقوم بإدارة المقطب *B* بزاوية ٤٥ْ مع محور القطب *A* كما هو موضح بالشكل:



شكل ٦: ميلان القطب B بزاوية ٤٥ بالنسبة للمحور A

الآن إذا عبر الفوتون المتجه إلى القطب *A* فإننا نكون قد علمنا حالته قبل الوصول إذا كانت حالته عمودية، وبالتالي يجب أن تكون حالة الفوتون الذاهب إلى المقطب *B* أيضاً عمودية، وبالتالي لن يعبر من المقطب المائل بزاوية ٤٥ْ مع منحنى المقطب *A*، ولكن هذا ما فرضناه

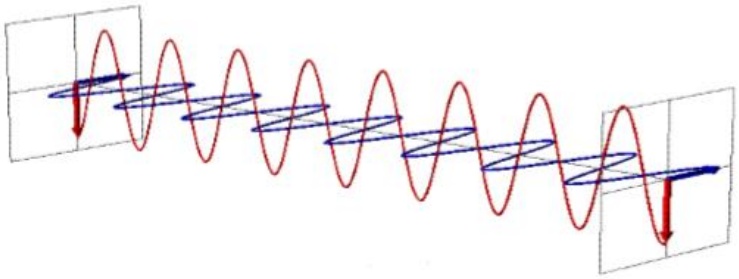
نظريّـاً حيـث أن التجربـة أعطـت نتـائج أخـرى، حيـث سـيجد الراصـد الموجـود عنـد المقطـب B بـأن نصـف الفوتونـات قـد عبـر ونصـفها الآخـر لـم يعبـر أي أن هنـاك حالـة تطـابق بنسـبة $50\ \%$ بـين نتائج الراصد A وB.

<u>مناقشة نتائج التجربة:</u>

لمـاذا يمـرّ بعـض الفوتونـات ويمتنـع بعضـها الآخـر؟ ألـيس مـن المفـروض بـأن لا يمـرّ أي منهـا لأننـا قد علمنا عن حالتهما قبل عملية القياس؟؟

كانـت إحـدى المحـاولات الأولـى لحـل هـذه المعضـلة، هـي افتـراض وجـود تـرابط أو تشـابك بـين كـل مـن الفوتـونين أو المقطبـين، لكـن نتيجـة هـذا الحـلّ هـو اختـراق مبـدأ أساسـي وهـو عـدم وجـود أي إشـارة تنتقـل بسـرعة أكبـر مـن سـرعة الضـوء، ونحـن نعلـم أن الفوتـونين لهمـا سـرعة الضـوء نفسـها، وبالتـالي صـدور إشـارة مـن المقطـب A فـي حالـة وصـول الفوتـون إلـى المقطـب B ليعلمـه بـأن الفوتـون الخـاص بـه قـد عبـر أو لا سـتكون أسـرع بكثيـر مـن سـرعة الضـوء، وهـذا كمـا قلنـا يتنـاقض مـع مبـدأ فيزيـائي أساسي وهو أن سرعة الضوء هي الحدّ الأعلى للسرعة في الكون فما هو الحل إذاً؟؟

الحـل هـو أن الكميـات المتغيـرة ليسـت لهـا قيمـة محـددة قبـل القيـاس، أي حالـة اسـتقطاب الفوتـون الـذاهب إلـى المقطـب B لـيس لهـا قيمـة أو معنـى محـدد قبـل الاصـطدام بالمقطـب، فحالـة اسـتقطاب الفوتـون قبـل أن يصـطدم بالمقطـب عبـارة عـن تراكـب مـن عـدّة حـالات، وبالتـالي نسـتطيع الافتـراض بـأن حالـة اسـتقطاب الفوتـون قبـل عمليـة القيـاس مكونـة مـن مـوجتي احتمـال، إحـداهما موازيـة لمحـور المقطب والأخرى عمودية عليه كما في الشكل:



شكل ١٤: تراكب موجتي احتمال

كل واحدة من هذه الموجتين لها شدة احتمال معينة، تكون هي المسؤول عن احتمالية عبور الفوتون أو عدم عبوره، ففي الحالة الأولى عندما كان المقطبين متوازيان كان سبب تطابق النتائج هو وضعية المقطبين نفسها، فوضعية المقطبين بشكل عمودي يزيد من احتمالية عبور موجة الاحتمال العمودية بشكل كبير، لكن هذا لا يعني أنه في كل مرة سوف يمر الفوتونين فهناك احتمال ولكن ضئيل جدّاً بأن لا يعبر الفوتونين، لكن يبقى الترابط بين الفوتونين موجوداً في كل عملية قياس، وبالتالي يمكن القول، بأن الراصد هو المسؤول عن تحديد ما اذا كان الفوتون سيعبر أم لا، وذلك عن طريق تحكمه بوضعية المقطب نفسها.

لذلك عندما وضعنا المقطب بزاوية 45° مع المقطب A، أصبحت فرصة عبور كلا موجتي الاحتمال العمودية والأفقية متساوية، أي $50\ \%$ لكليهما وهذا يفسّر لماذا خرجت نصف الفوتونات وامتنع النصف الآخر عن الخروج، وهكذا إذا قمنا بزيادة درجة ميلان المقطب B عن 45°، ستتغير شدة الاحتمال بحيث تزداد فرصة عبور موجة الاحتمال الأفقية أكثر حتى تصل إلى زاوية 90°، وتصبح فرصة عبور الموجة الأفقية كبيرة جدّاً.

وهذا أكبر دليل على صحة رأي بور ورفاقه القائل بعدم وجود قيمة للكميات الفيزيائية قبل عملية القياس، وقد بدأ الفيزيائيون بتقبل هذا الرأي تدريجيّاً، وبالتالي تكون محاولات أينشتين ورفاقه في وضع تجربة لتثبت صحة رأيهم قد باءت بالفشل، وهكذا انقلب السحر على الساحر، وباتت تلك التجربة أعظم دليل ضد أينشتين ورفاقه.

صورة ٣: تعليق ستيفن هوكينغ على رأي أينشتين

٣-٣ اختراق حدود مبدأ الشك عن طريق تقنية القياس الضعيف

كان مبدأ الشك لهايزنبرغ محوراً لنقاش العلماء على مرّ العصور، يحاولون إثباته أو نفيه بأي طريقة أمكنت... وقد بقيت هذه المحاولات مستمرّةً حتى وقتنا هذا، حيث استطاع مجموعة من الباحثين من جامعة تورنتو قياس مدى التشويش بدقة أكبر من التي يسمح بها مبدأ الشك.

حيث صنعوا جهازاً لحساب خاصية الاستقطاب لفوتون واحد، ثمّ أرادوا أن يقيسوا إلى أي مدى يسبب ذلك الجهاز اضطراباً في خاصية الفوتون كما قال العالم "لي روزيما" المشرف على التجربة.

وللقيام بذلك كان عليهم قياس الفوتون قبل عرضه على الجهاز ولكن هذا القياس نفسه سيؤدي إلى اضطراب للفوتون، ولتجاوز هذه العقبة استعمل روزيما وزملاؤه تقنية تسمّى " القياس الضعيف" حيث يكون تأثير جهاز القياس على ما يتم قياسه ضعيفاً جدّاً، وتم استعمال هذه التقنية قبل مرور الفوتون على الجهاز،

وبعد ذلك قيست الخاصية " الاستقطاب" مرة أخرى وتمت مقارنة النتائج، وما وجدوه كان أقل قيمةً مما يتطلبه مبدأ الشك الذي صاغه العالم هايزنبرغ، حيث قال روزيما أن كل تجربة أعطتهم معلومات محددة جدّاً عن الاضطراب ولكن بتكرار التجربة أصبح لديهم تصوّر جيد عن مقدار اضطراب الفوتون.

هذا الاكتشاف يضاف إلى اعتراضات حديثة على مبدأ الشك من طرف علماء في العديد من مناطق العالم فهناك العالم ماسناو أوزاوا من جامعة ناغويا في اليابان، والذي وضع افتراضاً بأن مبدأ الشك لا يعمل بالنسبة للقياسات، ولكنه لم يضع سوى وسيلة غير مباشرة لتأكيد ذلك تجريبياً، وقد تمّ إثبات ذلك بالاعتماد على طريقته من قبل مجموعة يوجي هاسيغاوا من جامعة فيينا للتكنولوجيا، وفي عام ٢٠١٠ بين العالمان اوستين لند وهاوارد وايزمان من جامعة غريفيث أن تقنية القياس الضعيف يمكن استعمالها لتحديد سمات نظام كوانتي معين، ولكن كان هناك عدّة

عقبات يجب تجاوزها حيث أن فكرتهم كانت تتطلب فعلياً صنع حاسوب كوانتي صغير وهو ما جعل الأمر صعباً.

يقول روزيما: " في الماضي كنا قد عملنا على تقنية القياس الضعيف بالإضافة إلى تقنية "الحوسبة الكوانتية في الحالة العنقودية" لتبسيط عملية بناء الحواسيب الكوانتية، وبدمج هاتين الفكرتين استنتجنا أنه من الممكن تطبيق فكرة "لند" و"وازمان" في المختبر"

النتائج من هذه التجارب التي لم تنفذ عملياً حتى الآن تجبرنا على إعادة تصورنا للحدود التي يضعها ميكانيك الكم على القياسات، وهذه الحدود مهمّة لأسس النظرية وضرورية لتطوير تكنولوجيا " التشفير الكوانتي" التي تعتمد على مبدأ اللايقين لضمان أن أي متطفل سيتم ضبطه نظراً للاضطراب الذي ستحدثه محاولة قياسه.[٩]

[٩] ***Scientists cast doubt on Heisenberg's uncertainty principle***
http://www.sciencedaily.com/releases/2012/09/120907125154.htm

الخاتمة

لقد رأينا أهم الظواهر التي أدت إلى نشوء فيزياء حديثة وكان من أهمّ هذا الظواهر إشعاع الجسم الأسود، الفعل الكهرضوئي، ازدواجية الجسيم والأمواج، فعل كومبتون والطيف الذرّي للهيدروجين، كما تعرّفنا على صيغة مبدأ الشكّ وهي أنه لا يمكن قياس خاصتين فيزيائيتين مترابطتين بدقة وفي وقت واحد كما رأينا رأي العلماء مؤيدي الحتمية حول مبدأ الشك والاعتراضات التي قدموها حوله، وتعرفنا على إمكانية وجود طريقة قياس جديدة يمكنها أن تقلص من حدود الارتياب في القياس التي عينها مبدأ الشك ولكنها لا تلغيه تماماً تسمّى تقنية القياس الضيعف.

نتائج البحث

- الطاقة مكونة من وحدات قائمة بحد ذاتها ومستقلة عن الوحدات الأخرى "كوانتم" حيث أن $E = n.h.f$
- يجب أن يمتلك الفوتون حداً أدنى من الطاقة حتى يستطيع تحرير الكترون من سطح معدن.
- لكل جسيم مادي موجة احتمال تحقق العلاقة $\lambda = \frac{h}{p}$.
- عند اصطدام فوتون متحرك بإلكترون ساكن، فإن الالكترون يمتص طاقة من الفوتون مما يؤدي إلى تغيير كمية حركته.
- الارتياب في تحديد موضع جسيم أولي يعتمد على طول موجة الفوتون المستخدم في القياس.
- لا يمكن تحديد خاصيتين فيزيائيتين مترابطتين في آن واحد وبدقة، وعند زيادة الدقة في تحديد أحد المقدارين، فإن ذلك سيؤدي لزيادة الخطأ في تحديد المقدار الآخر وفق العلاقة:

$$\Delta A.\Delta \mathrm{B} \geq \frac{\hbar}{2}$$

- لم تنجح مفارقة (أ.ب.ر) في إسقاط مبدأ الشك

- ما زال هناك شك حول تقنية القياس الضعيف وقدرتها على اختراق الحد المسموح به من الدقة في ميكانيك الكم.

وفي نهاية هذا البحث نتمنى أن نكون قدمنا ما فيه الفائدة، ونأمل أن يستفيد من هذا البحث زملاؤنا الطلبة، وأخيراً أتوجه بالشكر إلى كل من قدم لي يد المساعدة في هذا البحث، وللمدرسين في المركز الوطني للمتميزين على تعاونهم جهودهم المبذولة للارتقاء بمسيرة العلم والتطور...

المراجع والمصادر

المراجع الأجنبية:

- *Bell's Inequality and The EPR Paradox – http://library.thinkquest.org/C008537/cool/bellsinequality/bellsinequality.html*
- *Photoelectric Effect – http://physics.info/photoelectric*
- *Photoelectric Effect – http://m.everythingscience.co.za/grade-12/16-optical-phenomena-and-properties-of-matter/16-optical-phenomena-and-properties-of-matter-03.cnxmlplus*
- *Proving Uncertainty: New Insight into Old Problem - http://www.aip.org/publishing/journal-highlights/proving-uncertainty-new-insight-old-problem*
- *Scientists cast doubt on Heisenberg's uncertainty principle http://www.sciencedaily.com/releases/2012/09/120907125154.htm*
- *The Basic Fundamental Law of Nature- http://bpramana.tripod.com/uut03.htm5Z*
- *The Ultraviolet catastrophe – vergil.chemistry.gatech.edu/notes/quainter/node3.html*

المراجع العربية

- البناي، يوسف، ميكانيكا الكم بين الفلسفة والعلم
- د. الجابري ، محمد عابد، مدخل إلى فلسفة العلوم العقلانية المعاصرة وتطور الفكر العلمي (بيروت: مركز دراسات الوحدة العربية، الطبعة السادسة، ٢٠٠٦)
- د. فرح، ميخائيل، ميكانيك الكم (١)، منشورات جامعة حلب
- لندلي، ديفيد، مبدأ الريبة، ترجمة نجيب الحصادي
- من اليقين إلى اللايقين http://www.alawan.org/article586.html
- هوكينغ، ستيفن، تاريخ موجز للزمان، ترجمة د. مصطفى ابراهيم فهمي
- وولف، فريد آلان، مع القفزة الكمومية، ترجمة أدهم السمان

الفهارس

فهرس الأشكال

شكل ١: العلاقة بين الطول الموجي وشدة الموجة ٧
شكل ٢: انتزاع الإلكترونات بفعل التأثير الكهرضوئي **خطأ! الإشارة المرجعية غير معرّفة.**
شكل ٣: خطوط طيف الانبعاث لذرة الهيدروجين. ١١
شكل ٤: مستويات الطاقة المختلفة في ذرة الهيدروجين. ١٢
شكل ٥: انزياح الكترون نتيجة اصطدامه بفوتون متحرك ١٥
شكل ٦: مرور أشعة الليزر "الفوتونات" عبر شق كبير نسبيّاً ٢١
شكل ٧: عبور حزمة من الليزر لشق منفرد بعد تصغير قطره لحدود أكبر من حدود مبدأ الشك ٢١
شكل ٨: تشتت حزمة الليزر بعد تصغير قطر الشق للمستوى الكوانتي ٢٢
شكل ٩: انحلال البايون المتعادل إلى فوتونين يسيران في اتجاهين متضادين ٢٦
شكل ١٠: تكون خطوط الحقل الكهربائي عمودية على جهة انتشار الموجة ٢٩
شكل ١١: استقطاب الضوء عند مروره داخل المقطب. **خطأ! الإشارة المرجعية غير معرّفة.**
شكل ١٢: المقطبين في وضعية توازي مع كل من الفوتونين المنطلقين ٣٠
شكل ١٣: ميلان القطب B بزاوية ٤٥ بالنسبة للمحور A ٣٠
شكل ١٤: تراكب موجتي احتمال ٣١

فهرس الصور

صورة ١: طريقة الحصول على خطوط طيف الانبعاث لذرة الهيدروجين ١٠
صورة ٢: أينشتين وبور في مؤتمر سولفاي ١٩٢٧ ٢٨
صورة ٣: تعليق ستيفن هوكينغ على مقولة أينشتين ٣٢

فهرس المحتويات

المقدمة	٣
الفصل الأول : موجز لتطور نظرية الكم	٤
إشعاع الجسم الأسود Black Body Radiation	٥
التأثير الكهروضوئي Photoelectric Effect	٧
الطيف الذري للهيدروجين Atomic spectrum of Hydrogen	١٠
أمواج دي بروي والطبيعة المزدوجة Wave Particle Duality	١٣
فعل كومبتون Compton effect	١٥
الفصل الثاني: مبدأ الشك لهايزنبرغ	١٦
ما هو مبدأ الشك؟!	١٧
مجهر هايزنبرغ	٢٠
توضيح مبدأ الشك لهايزنبرغ من خلال تجربة عملية	٢١
مقارنة بين تأثير مبدأ الشك على كل من العالمين الميكروسكوبي والمايكروسكوبي	٢٣
االفصل الثالث: التحديات التي واجهت مبدأ الشك	٢٥
مفارقة (أينشتاين – بودولسكي – روزن) (أ.ب.ر)	٢٦
مفارقة جون بيل، هل الصواب بجانب (أ.ب.ر) ؟؟	٢٩
اختراق حدود مبدأ الشك عن طريق تقنية القياس الضعيف	٣٣
الخاتمة	٣٥
نتائج البحث	٣٥
المراجع والمصادر	٣٧
الفهارس	٣٨