ميكانيكا الكم

مقدمة

إن التقدم العلمى يتطلب من المشتغلين به الأخذ بمضامين فكرية جديدة والعمل بها، وبالطبع فإن كل المشتغلين بالعلم على استعداد تام لذلك، غير أنه عند الخوض فى أرض جديدة يتحتم علينا أحيانا ليس فقط الأخذ بمضامين جديدة ولكن أيضا تغيير التركيب الفكرى ذاته. ويبدو أن الكثيرين من المشتغلين بالعلم غير مستعدين أو قادرين على إنجاز هذه الخطوة، ولكن الصفوة منهم القادرين على سبر المجهول وكشفه هم الذين يقدمون للبشرية العلامات المضيئة فى طريق البحث العلمى الأصيل.

ويعتبر علم ميكانيكا الكم من العلوم الحديثة نسبيا، فقد ظهر فى بداية القرن العشرين ونما فى الربع الثانى من القرن على أيدى عدد من العلماء الأكفاء الذين حصلوا على جائزة نوبل فى الفيزياء لأبحاثهم المتميزة. وقد نجح هذا العلم فى تقديم تفسيرات لعدد من المشكلات الفيزيائية التى كانت قائمة وفشلت الفيزياء التقليدية فى تقديم تفسير لها.

ويعتمد الجزء الأساسى من الفيزياء التقليدية على الميكانيكا النيوتونية التى تعتبر المادة مكونة من جسيمات تتحرك تحت تأثير قوى التفاعل المتبادلة فيما بينها طبقا لقوانين "نيوتن" (١٦٤٢ – ١٧٢٧)، وأهمها قانون الحركة الذى ينص على أن "القوة = الكتلة × العجلة" وكذلك قانون الجاذبية. وقد نجحت هذه القوانين فى وصف حركة الكواكب، ولكنها لم تنجح فى وصف حركة الجسيمات داخل الذرة.

obeikandl.com

ويهتم الشق الثانى من الفيزياء التقليدية بدراسة الظواهر الكهربية والمغناطيسية، حيث نجد أن أفضل وصف لها يتم بدلالة المجالين الكهربى والمغناطيسى. ويرتبط هذان المجالان بكثافة الشحنة وكثافة التيار من خلال معادلات "ماكسويل" (١٨٣١ - ١٨٧٩).

أما أول من أدخل الفكرة الأساسية للنظرية الكمية فهو العالم "ماكس بلانك" (١٨٥٨ - ١٩٤٧) حين كان يدرس الإشعاع الحرارى للأجسام وتوصل إلى فكرة الطاقة الكمية أى قيم الطاقة المتقطعة (غير المستمرة) للإشعاع. غير أن مفهوم التكميم قد نجح فيما بعد فى حل العديد من المشكلات الفيزيائية التى احتاج تفسيرها إلى تبنى هذا المفهوم سواء فى حساب طاقة الجسيمات أو فى حساب الزخم الزاوى (حاصل ضرب الكتلة فى السرعة فى نصف قطر المسار).

الإشعاع الحرارى:

فى نهاية القرن التاسع عشر اكتشف العلماء أن أى جسم يطلق إشعاعا حراريا يعتمد على مادة الجسم ودرجة حرارته، وسمى "إشعاع الجسم الأسود". ومع زيادة درجة الحرارة يظهر للعين هذا الإشعاع فى صورة لون مثل اللون الأحمر للحديد المنصهر واللون الأبيض لسلك التنجستن لمصباح الإضاءة. وقد حاول العلماء صياغة العلاقة بين شدة الإشعاع الحرارى وطول موجة هذا الإشعاع ولكنهم فشلوا فى إيجاد صياغة تتفق مع النتائج التجريبية، وظلت هذه العلاقة غير محددة طبقا للقوانين الفيزيائية التقليدية حتى اكتشف "بلانك" فى عام ١٩٠٠ صيغة لتلك العلاقة اتفقت تماما مع النتائج التجريبية. وفى هذه العلاقة أدخل "بلانك" مقدارا ثابتا فى الصياغة عرف فيما بعد باسم "ثابت بلانك" (h) وقدرت قيمته بالقيمة ($h = 6.626 \times 10^{-34}$ J.s) وهو بوحدات "الجول ثانية" أو "الفعل". ثم شرح "بلانك" طبيعة الجزيئات المتذبذبة عند سطح الجسم المشع بأن أدخل قيم الطاقة المتقطعة - غير المستمرة - بحيث تساوى الطاقة حاصل ضرب التردد فى ثابت "بلانك" فى عدد صحيح سمى بالعدد الكمى، ولذا ظهر تعبير الطاقة الكمية ومستويات الطاقة التى تعتمد على قيم العدد الكمى، بحيث إذا انتقل الجزئ من مستوى إلى آخر ينبعث من (أو يمتص)

الجزئ كمية من الطاقة تساوى قيمة التردد مضروبا فى ثابت "بلانك"، أو أحد مضاعفات هذا المقدار.

وكان التوصل إلى فكرة مستويات الطاقة الكمية هو مولد نظرية الكم القديمة، وحصل "بلانك" على جائزة نوبل عام ١٩١٨ عن هذه النظرية، وبمرور الوقت ظهر أن النظرية المبنية على مفهوم الكم هى التى يمكن أن تفسر العديد من الظواهر الفيزيائية على المستوى الذرى.

التأثير الكهروضوئى:

وفى نهاية القرن التاسع عشر أيضا أثبتت التجارب أن الضوء الساقط على سطوح معدنية معينة يسبب انبعاث الإلكترونات من هذه السطوح وسميت الإلكترونات الضوئية. وقد حاول العلماء تفسير هذه الظاهرة باستخدام الفيزياء التقليدية، من حيث أن انبعاثها يتم بعد امتصاص الضوء الساقط عليها ويعتمد على التفاعل بين شحنات الإلكترونات الحرة فى المعدن والمجال الكهرومغناطيسى للضوء، وظن العلماء أن متوسط طاقة حركة الإلكترونات المنبعثة يتناسب مع شدة الضوء الساقط، ولكن ظهر أن هذه النتيجة تتعارض مع النتائج التجريبية.

وقد قدم "أينشتين" (١٨٧٩ – ١٩٥٥) تفسيرا مقبولا لهذه الظاهرة فى عام ١٩٠٥ حيث استخدم مفهوم "بلانك" للتكميم بتطبيقه على الموجات الكهرومغناطيسية بأن قال بأن الضوء – وهو موجات كهرومغناطيسية – يتكون من جسيمات صغيرة بدون كتلة (سميت فوتونات) أو "حزم طاقة" تتحرك بسرعات كبيرة جدا وكل منها له طاقة تساوى حاصل ضرب التردد فى ثابت "بلانك"، وأن الفوتون الساقط يتم امتصاصه بواسطة إلكترون داخل المعدن وبذلك يكتسب الإلكترون طاقة تساوى ثابت "بلانك" مضروبا فى تردد الفوتون، وإذا كان الإلكترون فى حاجة إلى كمية من الشغل لتحريره من سطح المعدن فإن "طاقة حركة الإلكترون المنبعث = ثابت "بلانك" × تردد الفوتونات – الشغل اللازم لتحرير الإلكترون من سطح المعدن". كما وضع "أينشتين" مبدأ نظريا آخرا وهو أن الفوتون رغم كونه بدون كتلة فإن له زخم

(حاصل ضرب الكتلة × السرعة) يمكن حسابه بقسمة طاقة الفوتون على سرعة الضوء.

وفى عام ١٩٢١ نال "أينشتين" جائزة نوبل عن إنتاجه العلمى فى التأثير الكهروضوئى، وليس عن نظريته النسبية الخاصة التى وضعها عام ١٩٠٥ أو النسبية العامة التى وضعها عام ١٩١٦.

زخم الأشعة وتأثير "كومبتون":

فى عام ١٩٢٣ أجرى "كومبتون" (١٨٩٢ - ١٩٦٢) تجربة لدراسة تأثير أشعة إكس (وهى موجات كهرومغناطيسية) على الأهداف المختلفة، فقام بتسليط فوتونات أشعة إكس على هدف كربونى فتشتتت الإلكترونات من الهدف وانحرفت فى اتجاه، وانحرفت الفوتونات فى اتجاه آخر مثلما يحدث عند تصادم كرتين من البليارد. وبتطبيق قانون حفظ الزخم [وهو أحد قوانين الفيزياء التقليدية والذى ينص على أنه فى أى عملية تصادم تظل محصنة الزخم الكلى بعد التصادم مساوية لها قبل التصادم]، ومع حساب زوايا الانحراف أثبت "كومبتون" عمليا أن الأشعة لها زخم مثلها مثل الجسيمات المادية واستخدم طريقة حساب زخم الأشعة التى اقترحها "أينشتين"، وبذلك توصل "كومبتون" إلى ما يعرف بالسلوك الجسيمى للأشعة. وقد حصل "كومبتون" على جائزة نوبل عن هذا العمل فى عام ١٩٢٧.

الفوتونات والموجات الكهرومغناطيسية:

إن ظاهرتى التأثير الكهروضوئى وتأثير "كومبتون" تقدمان دليلا واضحا على أنه عندما يتفاعل الضوء مع المادة فإنه يتصرف كما لو كان مكونا من جسيمات تحمل طاقة تساوى حاصل ضرب ثابت "بلانك" فى تردد الضوء وزخم يساوى ثابت "بلانك" مقسوما على طول موجة الضوء. وقد احتار العلماء فى ذلك الوقت وعقدوا اللقاءات للإجابة عن الأسئلة التالية:

كيف يمكن اعتبار الضوء فوتون (أى جسيم) ونحن نعلم أنه موجه؟

فنحن من جهة نصف الضوء بدلالة الفوتونات التى تحمل طاقة ولها زخم، ومن جهة أخرى نعلم أن الضوء والموجات الكهرومغناطيسية الأخرى يظهر لها تأثير التداخل والحيود بما يتفق تماما مع خصائص الموجات.

obeikandl.com

فأى النموذجين صحيح؟ هل الضوء موجة أو جسيم؟

وكانت الإجابة على هذه الأسئلة تعتمد على الظاهرة محل الدراسة، فبعض التجارب يمكن تفسيرها فقط بمفهوم الفوتون، بينما البعض الآخر تفسر بنموذج الموجة. وعلى ذلك فيتحتم علينا أن نقبل بالنموذجين ونقر بأن الطبيعة الحقيقية للضوء لايمكن وصفها بدلالة نموذج واحد. ويجب أن نعلم أيضا أن نفس شعاع الضوء الذى يتسبب فى انبعاث الإلكترونات الضوئية من معدن (ومعناه أن الشعاع يتكون من فوتونات) هو نفسه الذى يعانى حيودا عندما يسقط على بلورات (ومعناه أن الشعاع عبارة عن موجة). أى أن نظرية الفوتونات والنظرية الموجية للضوء يتكاملان.

إن نجاح نموذج الجسيم للضوء فى تفسير التأثير الكهروضوئى وكذلك تأثير "كومبتون" يثير لدينا مجموعة من الأسئلة:

إذا كان الضوء جسيم، فما معنى تردده وطول موجته؟ وأى من هاتين الخاصتين تحدد طاقته وزخمه؟ وهل الضوء يكون فى نفس الوقت موجه وجسيم؟ ورغم أن الفوتون ليس له كتلة (كمية لايمكن مشاهدتها)، هل يوجد صيغة سهلة للكتلة المؤثرة للفوتون المتحرك؟ وإذا كان للفوتون كتلة، فهل يخضع لقانون الجاذبية؟ وما هو حدود الحيز الذى يشغله الفوتون فى الفراغ؟ وكيف يمتص الإلكترون (أو يشتت) فوتون؟

الإجابة على هذه الأسئلة تظهر فى علم ميكانيكا الكم الذى يعطى الضوء طبيعة أكثر مرونة وأكثر ميوعة وذلك بدمج كل من نموذج الجسيم ونموذج الموجة للضوء.

والآن نقدم مثالا لتوضيح كيفية تواؤم الفوتونات مع الموجات الكهرومغناطيسية من خلال موجة الراديو ٢,٥ ميجا هيرتز. إن طاقة الفوتون الذى يحمل نفس التردد تساوى جزء من مائة مليون جزء من الإلكترون فولت، وهذه الطاقة أصغر كثيرا من إمكان كشفها. أما جهاز الاستقبال فيلزمه وجود عشرة بلايين من هذه الفوتونات لإمكان استقبال الإشارة، وهذا العدد الهائل سوف يظهر على هيئة موجة مستمرة. ومعنى ذلك أنه باستخدام موجة

obeikandl.com

الراديو ٢,٥ ميجا هيرتز لايمكن كشف الفوتونات الفردية التى تصطدم بالهوائى.

أما فى حالة طول موجة أكثر قصرا مما سبق، فسوف يصبح فى الإمكان الإحساس بالفوتون وكذلك بخصائص الموجة فى نفس الوقت، والسبب أنه مع قصر طول الموجة تزداد قيمة طاقة وزخم الجسيم، وبالتالى فإن الطبيعة الفوتونية للضوء تكون أكثر وضوحا من الطبيعة الموجية. وكمثال على ذلك عملية امتصاص فوتون أشعة إكس التى يمكن كشفها كحدث فردى، وعلى ذلك فكلما قل طول الموجة زادت صعوبة كشف التأثير الموجى.

إشعاع التفريغ الكهربى:

شغل موضوع إشعاع التفريغ الكهربى علماء الفيزياء فى بداية القرن العشرين، ويتلخص هذا الموضوع فى أنه إذا تعرض عنصر غازى تحت ضغط منخفض لعملية تفريغ كهربى (أى يتعرض الغاز لجهد يزيد عن الجهد المطلوب لتفكيكه) ثم يتم تحليل الضوء الناتج طيفيا تظهر مجموعة من الخطوط الملونة – كل منها يمثل أشعة ذات طول موجى معين – ويكون لكل عنصر خطوطه الخاصة، غير أنه كان من الملاحظ أن عنصر الهيدروجين يكون له أبسط خطوط طيف.

ونظرا لأن كل عنصر يشع خطوط طيف تختلف عن الآخر، فقد استخدمت هذه الطريقة لتحديد العناصر الموجودة فى أى عينة مجهولة. فمثلا أمكن تحديد العناصر الموجودة فى الشمس بتحليل أشعة الشمس، وكذلك بالتحليل الطيفى لصخور القمر أمكن تحديد عناصره. ولكن بقى هناك سؤالان هامان وهما: لماذا تشع ذرات عنصر معين خطوط طيف معينة؟ ولماذا تمتص هذه الذرات نفس قيم هذه الطاقة المشعة؟ هذان السؤالان ظلا بدون إجابة حتى توصل "نيلز بور" إلى نظريته الذرية. وقبل التعرض لهذه النظرية نستعرض بإيجاز النماذج التى سبقتها.

obeikandl.com

النماذج الأولية للذرة:

فى بداية القرن العشرين اقترح "جوزيف تومسون" (١٨٥٦ – ١٩٤٠) نموذجا للذرة عبارة عن كرة موجبة الشحنة، وتتواجد الإلكترونات سالبة الشحنة بداخلها مثلما تتواجد البذور داخل أى ثمرة، ولكن "إرنست رذرفورد" (١٨٧١ – ١٩٣٧) أجرى فى عام ١٩١١ – بالتعاون مع تلميذيه "جيجر" و"مارسدن" – تجربة هامة أثبتوا منها أن نموذج "تومسون" لايمكن أن يكون صحيحا، إذ أطلقوا حزمة من جسيمات ألفا موجبة الشحنة على شريحة معدنية رقيقة، فاخترقت معظم الجسيمات هذه الشريحة كما لو كانت متحركة فى فراغ ولكن عدد من هذه الجسيمات انحرف عن المسار الأصلى بزوايا كبيرة، وقليل منها ارتد راجعا.

وقد أصابت هذه الانحرافات الكبيرة "رذرفورد" بالدهشة لتعارض ذلك مع نموذج "تومسون". فطبقا لهذا النموذج – الذى يعتبر ذرة الشريحة المعدنية كرة موجبة الشحنة – لا يمكن لجسيمات ألفا الموجبة أن تصل قريبا من ذرات الشريحة بحيث يحدث انحرافا، واستنتج من ذلك أن الشحنة الموجبة فى الذرة تتركز فى منطقة صغيرة بالنسبة لحجم الذرة، وسمى هذا الجزء "نواة" الذرة. وأضاف أن إلكترونات الذرة تتحرك فى باقى حجم الذرة خارج النواة، وهى لاتنجذب نحو النواة الموجبة لتحركها فى مسارات حولها بنفس طريقة حركة الكواكب حول الشمس. وحصل "رذرفورد" على جائزة نوبل عام ١٩٠٨.

ولكن هذا النموذج الكونى للذرة قوبل بصعوبتين بالغتين أولاهما عدم إمكان تفسير الإشعاعات الكهرومغناطيسية التى تطلقها أى ذرة بترددات محددة. أما الصعوبة الثانية فهى أن الإلكترونات فى هذا النموذج تتعرض لتسارع مركزى ناشئ عن الحركة الدائرية التقليدية، وطبقا للنظرية الكهرومغناطيسية فإن الشحنات المتسارعة دائريا بتردد معين تشع موجات كهرومغناطيسية بنفس التردد، وكلما أطلقت الإلكترونات إشعاعا فإن نصف قطر المسار يقل باستمرار وتزداد قيمة تردد الدوران، وبالتالى تزداد قيمة تردد الإشعاع المنبعث مما يؤدى فى النهاية إلى اتجاه الإلكترون السالب نحو النواة الموجبة ليتم امتصاصه، ومع توالى امتصاص الإلكترون السالب نحو النواة الموجبة.

نموذج "نيلز بور" الكمـــى للذرة:

قدم "نيلز بور" فى عام ١٩١٣ تفسيرا للطيف الذرى وركز على نمـــوذج ذرة الهيدروجين التى تتكون من جسيم البروتون الموجب الشحنة (نـــواة الـــذرة) وإلكترون واحد سالب الشحنة. وقد استخدم "بور" نظرية الكم القديمة للعـــالم "بلانك" لشرح التركيب الذرى والطيف الذرى موضحا العلاقة بين مســـتويات الطاقة لإلكترونات الذرة وتردد الضوء المنبعث من (أو الممتـــص) بواســـطة الذرة، وتضمن النموذج أربعة فروض: الفرض الأول هو أن الإلكترون بـور فى مسار دائرى حول البروتون تحت تأثير قـــوة الجـــذب الكولومبيـــة بيـــن الشحنتين والتى تمثل القوة الجاذبة المركزية. والفرض الثانى هو أن بعـــض المسارات فقط تكون مستقرة وفيها لايشع الإلكترون أى طاقة وتظل الطاقـــة الكلية للذرة ثابتة. والفرض الثالث هو أن الإشعاع ينطلق من الذرة عندما يقفز الإلكترون من مسار ذى طاقة أعلى إلى مسار ذى طاقة أقل، ويكون تردد هذا الإشعاع مساويا الفرق بين الطاقتين مقسوما على ثابت "بلانك". أما الفـــرض الربع فيتناول تحديد المسارات المسموح بها للإلكترون بحيث يكـــون الزخـــم الزاوى للإلكترون حول النواة مقدارا كميا يساوى ثابت "بلانك" مضروبا فـــى عدد صحيح ومقسوما على ضعف النسبة التقريبية. وهو بهذا قد قام بتكميـــم الزخم الزاوى مثلما فعل "بلانك" قبله لتكميم الطاقة.

ومن هذه الفروض استطاع "بور" أن يحسب الطاقة الكلية لذرة الـــهيدروجين، كما أمكن حساب نصف قطر المسار، وفيما بعد عرف أصغر نصـــف قطـــر لذرة الهيدروجين بأنه نصف قطر "بور" وهو يساوى ٠,٠٥٢٩ نـــانو مـــتر. وظهرت الطاقة الكلية لذرة الهيدروجين بقيمـــة ســـالبة لأنـــها طاقـــة ربـــط للإلكترون. ولكى يتحرر الإلكترون من الذرة يجب أن تستقبل الـــذرة طاقـــة خارجية تساوى على الأقل قيمة طاقة الربط. ويسمى المستوى الأدنى لـــــهذه الطاقة "المستوى الأرضى" وذلك عندما يكون العدد الصحيح – الذى أصبـــح يسمى العدد الكمى الأساسى – يساوى واحدا، وفى هذه الحالة تكون طاقة ذرة الهيدروجين تساوى – ١٣,٦ بوحدات الإلكترون فولت. وعندما يكون العـــدد

obeikandl.com

الكمى الأساسى مساويا اثنان تصبح الذرة فى مستوى الإثارة الأول وتكـــون الطاقة مساوية -٣,٤ إلكترون فولت.

وطبقا لفروض "بور" يصبح من السهل حساب تردد الفوتون المنطلـــق مـن الذرة عندما يقفز الإلكترون من مسار إلى آخر. فإذا كانت ذرة الـــهيدروجين فى المستوى الأرضى حيث العدد الكمى الأساسى يساوى ١، فإن الإلكـــترون يمكنه أن يقفز إلى أحد المستويات الأخرى ذات عدد كمى أساسى يســـاوى ٢ أو ٣ أو ٤ أو...، وقد أكتشف "ليمان" خطوط الطيف المناظرة لهذه الانتقالات وسميت متسلسلة "ليمان"، وبالمثل ظهرت متسلسلة "بالمر" عندما تكون الـــذرة فى مستوى العدد الكمى الأساسى ٢ وتنتقل إلى المستويات ذات العدد الكمـــى الأساسى ٣ أو ٤ أو ٥ أو... وكذلك متسلسلة "باشن" التى تنطلـــق مـــن ذرة الهيدروجين فى مستوى العدد الكمى الأساسى ٣.

وقد نجح نموذج "بور" نجاحا باهرا فى الاتفاق مع العديد من النتائج التجريبية. كما نجح فى إيجاد تفسير لسبب إشعاع الذرة لطاقـــة إشـــعاعية ذات أطـــوال موجات معينة أو امتصاصها لطاقة إشعاعية ذات نفس الأطوال. ونجح أيضـــا فى تخطى العقبات التى قابلت نموذج "رذرفورد".

وقد نال "نيلز بور" جائزة نوبل فى عام ١٩٢٢ عن النموذج الكمـــى للـــذرة. وفيما بعد قام "بور" بتعميم النموذج الكمى لـــذرة الـــهيدروجين علـــى ذرات العناصر الأخرى عندما يكون بها إلكترون واحد مثل الهليوم أحادى الشـــحنة الموجبة أو الليثيوم ثنائى الشحنة الموجبة أو البريليوم ثلاثى الشحنة الموجبة.

نموذج "بـــور - ســـتونر" لبناء الذرات:

اقترح "بور" و"ستونر" توسيع نطاق نموذج ذرة الهيدروجين ليشـــمل جميـــع ذرات عناصر الجدول الدورى. فإذا كان العدد الذرى لذرة ما هو "م" فمعنـــى ذلك وجود "م" من الإلكترونات تحيط بنـــواة الذرة، وهذه الإلكترونات تتحرك -طبقا لهذا النموذج- فى قشرات كروية مماثلة لذرة الهيدروجين. وأضـــاف "بور" و"ستونر" أنه إذا كان العدد الكمى الأساسى لقشرة مـــا هـــو "ن" فإنـــها تستوعب ضعف مربع هذا العدد من الإلكترونات، ومعنى ذلك أنه إذا كانت ن

openkanal.com

= ١ فإن عدد الإلكترونات يساوى ٢، وإذا كانت ن = ٢ يصبح عدد الإلكترونات ٨، وإذا كانت ن = ٣ ارتفع عدد الإلكترونات إلى ١٨ وهكذا.

وانطبق هذا النموذج على معظم عناصر الجدول الدورى، إلا أن القاعدة السابقة لم تنطبق تماما على العناصر الثقيلة.

نظام "ولسون" و"زومرفيلد" الكمى:

علمنا فى ما سبق أن "نيلز بور" قد أدخل نظام تكميم الزخم الزاوى للإلكترون المتحرك حول النواة، كما سبقه "بلانك" فى تكميم الطاقة الكلية لنظام فيزيائى. وقد ظل العلماء فترة من الزمن فى حيرة أى نظام تكميم هو الأعم حتى قدم العالمان "ولسون" و"زومرفيلد" عام ١٩١٦ قاعدة للتكميم تسرى على أى نظام فيزيائى له إحداثيات تتغير بطريقة تكرارية مع الزمن، وهذه القاعدة هى أن التكامل المغلق للزخم الخطى بالنسبة لأى إحداثى خلال دورة كاملة يساوى ثابت "بلانك" مضروبا فى عدد صحيح. وقد نجح هذا النظام فى دراسة بعض النظم الذرية، خاصة وأنه اتضح فيما بعد أن كلا من تكميم "بور" وتكميم "بلانك" هما حالتان خاصتان من هذا النظام.

نموذج "زومرفيلد" الذرى:

سبق أن أشرنا إلى أن نموذج "بور" ذى المدارات الدائرية نجح فى تحقيق طيف ذرة الهيدروجين، ولكن مع تطور الأجهزة الفيزيائية ظهر أن بعض خطوط الهيدروجين تنقسم إلى عدة مركبات، وظهر قصور نموذج "بور" فى تفسير هذه المركبات حتى قام "زومرفيلد" بتعديل هذا النموذج بأن سمح للإلكترونات أن تتحرك فى مدار على هيئة قطع ناقص، وكان هذا التطوير سببا فى تفسير البناء الدقيق لخطوط طيف ذرة الهيدروجين. وبتطبيق قاعدة "ولسون" و"زومرفيلد" للتكميم فى الإحداثيات القطبية تبين أن العدد الكمى الأساسى عبارة عن مجموع عددين كميين كل منه خاص بأحد الإحداثيات القطبية فى الحركة المستوية. ولكن طاقة الإلكترون ظلت لها قيمة واحدة تعتمد على العدد الكمى الأساسى، وإذا كانت قيمة هذا العدد "واحد" تحول مدار القطع الناقص إلى مدار دائرى، أما إذا زاد هذا العدد عن "واحد" تعددت

المدارات وأصبح بعضها على هيئة قطع ناقص. وهنا يظهر ما سمى بالعدد الكمى المدارى، وهو الذى يحدد القشرة الفرعية الذرية.

الخاصية الموجية للجسيمات:

سبق أن أشرنا إلى الخاصية الجسيمية للأشعة والتى اقترحها "أينشتين" وأثبتها "كومبتون" عمليا، وهى أن الأشعة الكهرومغناطيسية تتكون من جسيمات ليس لها كتلة ولكن لها زخم وتسمى هذه الجسيمات فوتونات. أى أن الأشعة الكهرومغناطيسية لها خواص موجية فى انتشارها وخواص جسيمية فى تفاعلها مع المادة.

وفى عام ١٩٢٣ قدم "لويس دى بروى" (١٨٩٢ - ١٩٨٧) رسالته للحصول على الدكتوراه واقترح فيها أن الازدواج فى سلوك الأشعة الكهرومغناطيسية ينطبق تماما على المادة، وأضاف أن جميع الأجسام المادية لها خصائص الأشعة بالإضافة إلى خصائص الأجسام، ووضع صيغة لطول الموجة المصاحبة للجسيم بأنها تساوى ثابت "بلانك" مقسوما على زخم الجسيم، وصيغة أخرى لتردد هذه الموجة تساوى قيمة طاقة الجسيم مقسومة على ثابت "بلانك". ومعنى ذلك أن جسيم مثل الإلكترون له كتلة متحركة ويصحبه موجة لها سرعة وتردد كما أن لها طول، واقترح "لويس دى بروى" أن الخواص الموجية والخواص الجسيمية متلازمين لحركة الجسيم. وقد قوبلت هذه الفكرة الثورية بمعارضة شديدة من العلماء واعتبروها مجرد تخمين وفكر أساتذته فى عدم منحه درجة الدكتوراه ولكن أينشتين توسط لديهم لمنحه الدرجة رغم عدم اقتناعه تماما برأى "دى بروى".

وبعد هذه الضجة بثلاث سنوات تصادف أن قام عالمان فى الفيزياء التجريبية هما "دافيسون وجرمر" بإجراء تجربة لدراسة تشتت الإلكترونات ذات الطاقة المنخفضة من هدف من النيكل موضوع فى منطقة مفرغة من الهواء. ولكن بسبب حدوث عطل فى جهاز التفريغ تسرب الهواء إلى الداخل وحدث تأكسد لسطح عينة النيكل، فقام العالمان بإزالة طبقة التأكسد عن طريق تعريض العينة إلى تيار من الهيدروجين الساخن، وبعد ذلك استقبل العالمان الإلكترونات المشتتة فوجدا أنها -على غير العادة- تتجمع عند زوايا محددة

وتبين أن النيكل قد كون مناطق بلورية على السطح وأن هذه المناطق تتكون من ذرات مرتبة في مستويات على أبعاد منتظمة، وقد ساهمت هذه المستويات في تشتت الإلكترونات كمحزوزات حيود لموجات الإلكترونات. وبعد ذلك قام العالمان بإجراء تجارب أخرى على تشتت الإلكترونات من بلورات أخرى وتحققا من النتائج التى تثبت الخاصية الموجية للإلكترونات كما تحقق من صيغة طول الموجة التى اقترحها "لويس دى بروى". وفيما بعد توصل علماء الفيزياء التجريبية إلى محزوزات الحيود لحزم من ذرات الهليوم وأخرى من ذرات الهيدروجين وكذلك حزم من النيوترونات، وبذلك تحققت الطبيعة العامة للموجات المصاحبة للمادة.

ولقد نال "لويس دى بروى" جائزة نوبل فى عام ١٩٢٩ عن السلوك الإزدواجى للمادة، وفى خطابه فى حفل قبوله الجائزة قال ما يلى:

"لايمكن اعتبار النظرية الكمية للضوء كافية لأنها تحدد طاقة جسيم الضوء (الفوتون) بدلالة تردده. والآن لاتحتوى النظرية الجسيمية على ما يساعدنا لتعريف التردد، ولهذا السبب فقط يجب علينا أن ندخل فكرة الجسيم وكذلك فكرة التكرارية فى حالة الضوء. وعلى الوجه الآخر فإن تحديد الحركة المستقرة للإلكترونات فى الذرة تعتمد على الأعداد الصحيحة، وحتى الآن فإن الظواهر الوحيدة التى تعتمد على الأعداد الصحيحة فى الفيزياء هى التداخل الضوئى والأسلوب العمودى للاهتزازات. هذه الحقائق جعلتنى أقتنع بفكرة أن الإلكترونات لا يمكن اعتبارها جسيمات فقط، وإنما تسلك أيضا سلوك الموجات."

مبدأ التكاملية "نيلز بور":

على الرغم من قبول علماء الفيزياء لفكرة الازدواجية إلا أن مشكلة فهم الطبيعة الازدواجية للمادة والإشعاع كانت صعبة لأن النموذجين يتعارضان. ولكن "نيلز بور" ساهم فى حل هذه المعضلة باقتراح مبدأ التكاملية الذى ينص على أن نموذجى الموجة والجسيم لكل من الإشعاع والمادة يكملان بعضهما، إذ لايمكن استخدام أحدهما وحيدا لوصف المادة أو الإشعاع ولكن لابد من جمع النموذجين بطريقة تكاملية للفهم الجيد لهذا الموضوع. فالنظرية الموجية

obeikandl.com

للضوء تعتمد على احتمال وجود فوتون عند نقطة معينة فى زمن معين، كما تقدم النظرية الموجية للمادة احتمال تواجد جسيم من المادة عند نقطة معينة فى زمن معين. وتوصف موجات المادة بدالة موجية مركبة (أى جزء منها حقيقى والآخر تخيلى) ويرمز لها عادة بالرمز (ψ)، ويتناسب مربع مقياسها مع احتمال وجود الجسيم عند نقطة معينة فى زمن معين، وتحتوى هذه الدالة الموجية على المعلومات الخاصة بالجسيم. وقد اقترح العالم "ماكس بورن" (١٨٨٢-١٩٧٠) هذا التفسير لموجات المادة فى عام ١٩٢٨.

ويوجد مجموعة من التجارب التى توضح أن المادة لها طبيعة موجية وطبيعة جسيمية. ولكن العلماء ظلوا فى حيرة من أمرهم عندما يصفون حركة جسيم وكيف يتخيلون الحركة الموجية. وباسترجاع معلوماتهم عن حالات موجات الأوتار وموجات المياه وموجات الصوت حيث يتم تمثيل الموجة بكمية تتغير مع الزمن والموضع، أمكنهم تمثيل موجات المادة بدالة موجية (ψ) تعتمد أيضا على موضع الجسيمات وكذلك على الزمن، ولذا فهى تكتب على الصورة $\psi\,(x, y, z, t)$. وإذا علمت هذه الدالة لجسيم فإن خصائص الجسيم يمكن تحديدها. ولقد أصبحت المشكلة الرئيسية هى كيفية إيجاد الدالة الموجية لجسيم عند أى زمن إذا علمت الدالة عند لحظة محددة.

وقد سبق أن ذكرنا العلاقة بين زخم الجسيم وطول الموجة المصاحبة كما وضعها "لويس دى بروى". وفى حالة جسيم حر له زخم معلوم فإن دالته الموجية تكون عبارة عن موجة جيبية طولها يساوى ثابت "بلانك" مقسوما على زخم الجسيم، ونظرا لأن الدالة فى هذه الحالة تمثل جسيما واحدا فإن مربع مقياس الدالة هو الكثافة الاحتمالية لوجود الجسيم عند نقطة معينة من الفراغ يساوى احتمال وجود الجسيم. ونظرا لأن الجسيم لابد وأن يتواجد فى مكان ما فإن هذا الاحتمال يجب أن يساوى واحدا (وهى القيمة العظمى للاحتمال). وهذه العلاقة الأخيرة تسمى شرط التسوية للدالة الموجية.

معادلة شرود نجر:

بعد أن استقر الوضع لوصف حركة الإلكترون الموجية طبقا لما توصل إليه "لويس دى بروى"، اتجه تفكير العلماء إلى كيفية الحصول على مواصفات

obeikandl.com

للموجة المصاحبة للإلكترون إذا تعرض لتأثير مجـــال خـــارجى، فاســتعان العلماء بالمعادلة الموجية التقليدية وهى معادلة تفاضلية من الدرجة الثانية فــى دالة الموجة التى تعتمد على الإحداثيات المكانية الثلاثة بالإضافة إلى الزمن.

وفى حالة دراسة نظام ذرى محدد بطاقة كلية معينة ثابتة، فإن تردد موجـــات "دى بروى" المصاحبة لحركة الجسيم تكون ثابتة أيضا، وفى هذه الحالة يمكننا اعتبار الدالة الموجية عبارة عن حاصل ضرب دالتين: الأولى تعتمــد علـــى الإحداثيات المكانية فقط والثانية تعتمد على الزمن فقط. وباعتبار أن الطاقـــة الكلية تمثل حاصل جمع طاقة الحركة للنظام وطاقة الجهد له، طـــور العـــالم "اروين شرودنجر" هذه الأفكار وتمكن من الوصول إلى المعادلة الموجية وهى المعادلة التفاضلية المعروفة الآن باسم معادلة "شرودنجر"، وهى تمثـــل القـــانون الذى تتبعث وفقا له موجات من مادة ما تقع تحت تأثير مجال خارجى، وقـــد استطاع "شرودنجر" أيضا بناءا على هذا التصور المقارنة بيـــن المســتويات الطاقية الثابتة للأغلفة الذرية والاهتزازات الطولية لنظام كالوتر المهتز مثـلا. ومن هذه المقارنة تبين أن طاقات هذه المستويات تتصـــرف مثـــل تـــرددات الاهتزازات الطولية.

وإذا عرفت طاقة الجهد لأى نظام ذرى فإنه من الممكن حل معادلة شرودنجر للتوصل إلى الدالة الموجية المصاحبة للنظام وكذلك قيم الطاقة المسموح بـــها لهذا النظام. ونظرا لأن طاقة الجهد تتغير مع اختلاف قيم الإحداثيات المكانية، فأحيانا يلزم حل المعادلة على مراحل مكانية بحيث تتصل الـــدوال الموجيـــة للمناطق المختلفة على الحدود بينها بطريقة طبيعية. وبلغة الرياضيـــات فـــإن الدالة الموجية يجب أن تكون دالة مستمرة، كما يجب أن تؤول الدالة الموجيـــة إلى الصفر إذا ما آلت الإحداثيات إلى ما لا نهاية، وأيضا يجـــب أن تكـــون الدالة الموجية أحادية القيمة ويكون معامل تفاضلها الأول دالة مستمرة.

وعالم ميكانيكا الكم ببساطة لايمكن مشاهدته، فنحن لا نشاهد الدالة الموجيـــة مباشرة، ولكننا نمارس مشاهدة غير مباشرة من خلال بعض القياسات التـــى تكون مقاديرها احتمالية.

وأحيانا يكون حل معادلة شرودنجر صعب للغاية وذلك بسبب شكل دالة طاقة الجهد. ولكن بالممارسة تبين أن معادلة شرودنجر تنجح جدا فى تفسير النظم الذرية والنووية، وذلك على عكس الفيزياء التقليدية التى فشلت فى ذلك. وعلى الوجه الآخر فى حالة تطبيق الميكانيكا الموجية على الأجسام الكبيرة فإن نتائجها تتفق مع نتائج الفيزياء التقليدية. وهذا الالتحام بين النظريتين يحدث عندما تكون موجات "دى بروى" قصيرة بالمقارنة بأبعاد النظام. وهذا الموقف يماثل الاتفاق بين الميكانيكا النسبية والميكانيكا التقليدية عندما تكون السرعة أصغر كثيرا من سرعة الضوء.

وهناك العديد من أمثلة النظم الفيزيائية التى يمكن حلها باستخدام معادلة "شرودنجر"، وسوف نعرض بعضا منها بعد تبسيطه رياضيا مثل "الجسيم فى الصندوق" و"الجسيم فى بئر محدود العمق" وعملية "اختراق عائق من خلال نفق". وجميع هذه النظم تمثل فى الأصل مشاكل فيزيائية ولكن تم تبسيطها لكى نتمكن من حل المعادلة التى تمثلها.

الجسيم فى الصندوق:

هى مشكلة تواجد جسيم فى منطقة ذات بعد واحد فى مسافة محدودة ذات طاقة جهد تساوى صفر ويحيط بها من الجهتين منطقة ذات طاقة جهد تصل إلى ما لا نهاية، وتسمى هذه المشكلة "الجسيم فى الصندوق". ومن وجهة نظر الفيزياء التقليدية فإن الجسيم يكون محدد الحركة على محور (×) ذهابا وإيابا بين حائطين لايمكن اختراقهما. فإذا تحددت سرعة الجسيم تحدد زخمة وكذلك طاقة حركته، ولاتضع الفيزياء التقليدية قيودا على قيم الزخم أو الطاقة. أما مدخل الميكانيكا الموجية لهذه المشكلة فيختلف اختلافا جذريا ويستلزم إيجاد الدالة الموجية التى تتمشى مع شروط طاقة الجهد اللانهائية على الحدود.

وقبل أن نتعرض لحل المشكلة من وجهة نظر الميكانيكا الموجية نستعرض الموجات المستقرة على وتر مشدود ومثبت من طرفيه حيث يتواجد عقد عند الطرفين، ويحدث الرنين عندما يكون طول الوتر مساويا أحد مضاعفات نصف طول الموجة. وهذه النتيجة معناها تكميم طول الموجة المستقرة.

والآن دعنا نصف مشكلة الجسيم فى الصندوق من وجهة نظر الميكانيكا الموجية. فبالنظر إلى أن الحائطين لايمكن اختراقهما (بسبب الجهد اللانهائى) فإن الدالة الموجية يجب أن تساوى صفرا عند الطرفين، والدالة التى تحقق هذا الشرط هى الدالة الجيبية، وبنفس الطريقة التقليدية يكون طول المجال هو أحد مضاعفات نصف طول الموجة، وهذا هو التكميم لطول الموجة المستقرة.

ومن المعروف أن حل معادلة "شرودنجر" يهدف إلى إيجاد الدالة الموجية وخلال محاولة التوصل إلى الدالة الموجية تظهر شروط للحل تؤدى إلى الوصول إلى القيم المسموح بها للطاقة. فإذا قمنا بحل هذه المعادلة فى حالة الجسيم فى الصندوق تظهر الشروط المؤدية للقيم المحتملة للطاقة.

وتسمى المستويات المسوح بها للنظام المستويات المستقرة لعدم اعتمادها على الزمن. ومن هذه الحلول يمكننا التوصل إلى الكثافة الاحتمالية عند أى نقطة فى المجال، وهى بطبيعة الحال تساوى صفرا عند الطرفين.

ومن العلاقة بين الزخم وطول الموجة يمكن الحصول على قيم الطاقة (E_n) بدلالة طول المجال (L) وكتلة الجسيم (m) وثابت "بلانك" (h) وكذلك الأعداد الصحيحة (n) وهى:

$$E_n = h^2 n^2 / 8mL^2, n = 1, 2, 3, ...$$

ويظهر من نتائج الطاقة أن الميكانيكا الموجية لاتسمح بأن يكون الجسيم ساكنا. وهذه النتيجة تتعارض مع الفيزياء التقليدية التى تسمح بإمكان انعدام السرعة وطاقة الحركة. أما مستويات الطاقة فى الحل الكمى فإن لها أهمية خاصة، لأنه إذا كان الجسيم مشحونا فيمكنه أن يطلق فوتونا عندما يهبط من مستوى مثل E_2 إلى مستوى أقل منه مثل E_1، وبالعكس يمكنه أن يمتص فوتون له طاقة تساوى الفرق بين المستويين فيرتفع من المستوى الأول إلى الثالث.

الجسيم فى بئر محدود العمق:

إذا اعتبرنا وجود جسيم فى منطقة ذات بعد واحد (×) حيث طاقة الجهد تساوى صفر ومحاطة من الجهتين بطاقة جهد لها قيمة محددة ولتكن (U)، فإذا كانت طاقة الجسيم (E) أقل من (U) فإنه من وجهة نظر الفيزياء التقليدية

obeikandl.com

يصبح الجسيم مقيدا داخل البئر. أما إذا طبقنا الميكانيكا الموجية فسوف يظهر احتمال تواجد الجسيم خارج البئر، أى أن الدالة الموجية للجسيم (وبالتالى الكثافة الاحتمالية له) لن تتلاشى خارج البئر.

وإذا اتبعنا منهج الحل كما فى المثال السابق نجد أنه بحل معادلة "شرودنجر" داخل البئر نحصل على قيم محتملة للطاقة تختلف عن الصفر كما ظهر فى المثال السابق. أما الدالة الموجية فسوف نجد أنها تأخذ قيم الدالة الجيبية، ونظرا لأن الشروط الحدودية هنا تختلف عن الحالة السابقة (حيث تنعدم فرصة اختراق الجسيم للحائط اللانهائى) فإن الجسيم يمكن أن يتواجد (فرضيا) خارج البئر (المحدود الارتفاع) وعليه يمكن أن تكون الدالة الموجية ذات قيمة محدودة.

وبحل معادلة "شرودنجر" خارج البئر نحصل على دالة موجية على صورة الدالة الأسية ذات أس سالب سواء على يمين البئى أو على يساره لكى تؤول الدالة الموجية إلى الصفر عندما تبعد عن البئر كثيرا. وبتطبيق شروط الدالة الموجية من حيث الاستمرارية عند حدود البئر يمكننا الحصول على دالة متصلة ملساء لتمثيل الجسيم فى المجال.

اختراق عائق من خلال نفق:

هذه ظاهرة فيزيائية من الظواهر التى توضح الفرق بين الفيزياء التقليدية والميكانيكا الموجية، عندما يصطدم جسيم بعائق ذى ارتفاع محدود وكذلك ذى عرض محدود. فلنفترض أن للجسيم طاقة (E) ويصطدم بمجال له طاقة جهد U ويؤثر لمسافة (L) حيث تقل طاقة الجسيم عن طاقة الجهد.

المقابل التقليدى لهذا المثال هو دحرجة كرة أعلى تل، فإذا لم تعط الكرة طاقة كافية فلن تتمكن من الوصول للقمة. لذا فمن وجهة نظر الفيزياء التقليدية يرتد الجسيم لأنه ليس لديه طاقة كافية لاختراق العائق، بينما تتيح الميكانيكا الموجية للجسيم التواجد سواء قبل العائق أو بعده أو بداخله، وذلك لأن سعة موجة الجسيم لاتنعدم فى هذه المناطق.

وبحل معادلة "شرودنجر" فى المناطق الثلاث نحصل على دالة جيبية قبل العائق ودالة جيبية أخرى بعد العائق ودالة أسية ذات أس سالب داخل العائق.

وبتطبيق الشروط الحدودية من اتصال الدوال عند الحدود وتساوى المعامل التفاضلى الأول أيضا عند الحدود يمكننا التوصل إلى حل كامل للمشكلة، ويظهر لنا فى النهاية ما يلى:

١- منطقة قبل العائق تحتوى على دالة جيبية ساقطة عليه ودالة جيبية أخرى مرتدة فى الاتجاه الآخر.

٢- منطقة بعد العائق تحتوى على دالة جيبية نافذة.

٣- منطقة داخل العائق تحتوى على دالة أسية ذات أس سالب.

ونظرا لأن الجسيم الساقط إما أن يرتد أو ينفذ فإن "معامل الارتداد + معامل النفاذ = ١". ويكون معامل النفاذ على الصورة:

$$T = \exp [-4\pi L \{2m (U - E)\}^{1/2} / h]$$

وكمثال على هذا الاختراق نفترض أن إلكترونا ذى طاقة ٣٠ إلكترون فولت يسقط على عائق ارتفاعه (طاقة جهده) ٤٠ إلكترون فولت وعرضه جزء من عشرة من النانو متر، فيكون معامل النفاذ طبقا للصيغة السابقة هو ٣٩ من الألف. أى أن احتمال نفاذ الإلكترون من هذا العائق يساوى حوالى ٤%.

أما فى حالة تطبيق الفيزياء التقليدية فإن احتمال اختراق الإلكترون للعائق هو صفر.

ويوجد تطبيقات عملية متعددة على تأثير النفق، أهمها هو الميكروسكوب النفقى الماسح.

الميكروسكوب النفقى الماسح:

يعتبر تأثير النفق من أهم تطبيقات ميكانيكا الكم، وقد أدى إلى اختراع الميكروسكوب النفقى الماسح الذى يتيح لنا الحصول على صور مفصلة للسطوح وبدقة تصل إلى حجم الذرة. هذه التقنية تتيح للعلماء أن يروا التفاصيل الدقيقة على السطوح حتى أبعاد جزأين من عشرة من النانو متر وبعمق يصل إلى جزء من ألف من النانو متر.

هذه الدقة تختلف تماما عن دقة الميكروسكوب الضوئى والميكروسكوب الإلكترونى. فالميكروسكوب الضوئى لاتصل دقته إلى رؤية دقائق أقل من

obeikandl.com

٢٠٠ نانو متر وهى حوالى نصف طول الموجة للضوء المرئى. أما الميكروسكوب الإلكترونى فعلى الرغم من أن دقته قد تصل إلى جزئين من عشرة من النانو متر باستخدام موجات الإلكترونات بالطول المذكور، إلا أنها فى حالة اختراقها لعينة مثل الجرافيت لايمكن الحصول على معلومات عن ذرات سطح العينة.

وتعتمد فكرة الميكروسكوب النفقى الماسح على استخدام مسبر على شكل مخروط ذى قيمة غير مدببة ويحرك هذا المسبر بالقرب من سطح العينة. وحيث أن الإلكترون الموجود فى سطح العينة والمنجذب نحو الأيونات الموجبة فى السطح تكون طاقته الكلية أقل من الإلكترون الموجود فى الفراغ بين السطح والمسبر، كما يحدث نفس الشئ لأى إلكترون فى قمة المسبر الذى ينجذب نحو الأيونات الموجبة فيه.

وبتطبيق ميكانيكا نيوتن، فإن الإلكترونات لايمكنها التحرك بين سطح العينة وقمة المسبر لعدم كفاية الطاقة التى تحملها على الهروب من أيهما. ولكن ميكانيكا الكم تسمح للإلكترونات بالخضوع لتأثير النفق وتخترق عائق الفراغ بينهما، وبالسماح بوجود فرق جهد بين سطح العينة وطرف المسبر يمكن للإلكترونات أن تعبر النفق. ومن هذه الخاصية يكون الميكروسكوب حساسا للعمق، والسبب فى ذلك أن الدالة الموجية للإلكترون فى منطقة الفراغ عبارة عن دالة أسية تقل بصفة مستمرة بمعدل يقرب من الثلث خلال هذه المسافة. ويستخدم العلماء حساسية العمق فى هذا الجهاز خلال مرور قمة المسبر فوق سطح العينة فتمكنهم من قياس السمات السطحية للعينة.

ولكن هذا الميكروسكوب له جوانب سلبية وهى اعتماده على الموصلية الكهربية للعينة وللمسبر، ونظرا لأن معظم المواد لاتكون موصلة كهربيا عند السطوح فإن ذلك يحد من استخدام هذا الميكروسكوب.

الأعداد الكمية:

سبق أن ذكرنا عند عرض نموذج "بور" الكمى لذرة الهيدروجين أن الطاقة الكلية للذرة تعتمد على عدد صحيح (n) يأخذ القيم بدءا من الواحد، ويسمى العدد الكمى الأساسى. وقد تم تطبيق هذا النموذج على ذرة الهيدروجين

باعتبارها مكونة من إلكترون يدور حول النواة (بروتون) فى دائرة (نموذج "بور") أو فى قطع ناقص (نموذج "زومرفيلد")، ومعنى هذا أن الحركة تتم فى مستوى واحد.

أما إذا طبقنا معادلة "شرودنجر" على ذرة الهيدروجين فسوف نحصل على حل فى ثلاثة أبعاد، ويؤدى الحل الممكن رياضيا وفيزيائيا إلى ظهور عدد كمى آخر (ℓ) يسمى العدد الكمى المدارى ويأخذ القيم بدءا من الصفر ثم الواحد، حتى ينتهى بالعدد (n-1)، كما يظهر عدد كمى ثالث (m_l) يأخذ القيم بدءا من (-l) حتى القيمة (l) مرورا بالصفر.

كما يوجد عدد كمى رابع يسمى العدد الكمى المغناطيسى المغزلى (m_s) وهو يعبر عن غزل الإلكترون (أى دورانه حول نفسه)، وهو إما أن يدور فى اتجاه عكس عقرب الساعة ويسمى الغزل العلوى، أو يدور فى اتجاه عقرب الساعة ويسمى الغزل السفلى. وقد اكتشف هذا العدد عند تحليل طيف بخار الصوديوم، فقد وجد أن أحد الخطوط الهامة لطيف الصوديوم عبارة عن خطين قريبين من بعضهما جدا (أحدهما بطول ٥٨٩ نانو متر والآخر بطول ٥٨٩,٦ نانو متر). ولحل هذه المعضلة اقترح عالم الفيزياء "ولفجانج باولى" (١٩٠٠–١٩٥٨) استحداث عدد كمى جديد يسمى العدد الكمى المغزلى. وفى وجود مجال مغناطيسى خارجى تختلف طاقة الإلكترون فى حالة الغزل العلوى عن حالة الغزل السفلى مما يؤدى إلى وجود فرق فى الخط الطيفى. وقد اتفق العلماء على قيم هذا العدد الكمى بحيث يكون ($m_s = 1/2$) للغزل العلوى، ويكون ($m_s = -1/2$) للغزل السفلى. ولقد أثبت "بول ديراك" (١٩٠٢–١٩٨٤) فيما بعد أن هذا العدد يظهر عندما نعالج حركة الإلكترون النسبية إذ يلزم لها أربعة أعداد كمية لوصف موضع الإلكترون فى فراغ رباعى الأبعاد (مكان وزمان).

قاعدة الاستثناء (وولفجانج باولى):

علمنا أنه لتحديد مستوى ذرة الهيدروجين نحتاج إلى أربعة أعداد كمية (n, ℓ, mi, ms). فعلى سبيل المثال فى حالة إلكترون موجود فى المستوى الأرضى لذرة الهيدروجين يمكن أن تكون قيم هذه الأعداد كالآتى:

$(n = 1, \ell = 0, m_l = 0; m_s = 1/2)$ وقد اتخذ هذا النظام لتحديد مستوى أى إلكترون فى أى ذرة. والسؤال الآن هو: كم عدد الإلكترونات المسموح بها لأى مجموعة من الأعداد الكمية؟

وقد أجاب على هذا السؤال العالم "ولفجانج باولى" عام ١٩٢٥ بوضعه قاعدة الاستثناء وهى تنص على ما يلى: "لايمكن لأى إلكترونين التواجد فى نفس المستوى الكمى، بمعنى أن كل إلكترون فى ذرة يجب أن يكون له مجموعة خاصة من الأعداد الكمية الأربعة ولايشاركه فيها أى إلكترون آخر".

إذا لم تكن هذه القاعدة صحيحة فإن كل إلكترون سوف ينتهى به الأمر فى أسفل مستوى طاقة للذرة مما يؤدى إلى تغيير السلوك الكيميائى للعناصر. وفى واقع الأمر فإننا نعلم الآن أن التركيب الإلكترونى للذرات المركبة يتم بامتلاء المستويات واحدا بعد الآخر. وكقاعدة عامة فإن ترتيب امتلاء القشرات الفرعية للذرة بالإلكترونات يتم كما يلى:

عند امتلاء القشرة الفرعية فإن الإلكترون التالى يذهب إلى أقل مستوى طاقة بالقشرة الفرعية الفارغة التالية للأولى. ويمكن فهم هذه القاعدة بالعلم بأنه إذا لم تكن الذرة فى مستوى الطاقة السفلى المتاح فإنها سوف تشع طاقة حتى تصل إلى هذا المستوى.

وقبل الدخول إلى التركيب الإلكترونى للعناصر المختلفة فإننا نعرف مدار الإلكترون بمجموعة الأعداد (n, ℓ, m_l). ومن قاعدة الاستثناء فإنه لايتواجد فى أى مدار سوى إلكترونين، أحدهما له العدد الكمى المغناطيسى المغزلى $(m_s = 1/2)$ والآخر $(m_s = -1/2)$.

وتسهيلا لتعريف مواضع الإلكترونات فى القشرات، اتفق على تسمية كل إلكترون بقيمة العدد الكمى الأساسى واستبدل العدد الكمى المدارى برمز فأصبح $(\ell = 0)$ يسمى (s) والعدد $(\ell = 1)$ يسمى (p) والعدد $(\ell = 2)$ يسمى (d) وهكذا... ويوضع عدد الإلكترونات فى القشرة الفرعية على هيئة أس لرمز القشرة وبعد ذلك يتم ترتيب العناصر طبقا لترتيب امتلاء القشرات الذرية، فعلى سبيل المثال يكون المستوى الأرضى لذرة الأرجون هو $(1s)^2 (2s)^2 (2p)^6 (3s)^2 (3p)^6$، ومعنى هذه الرموز أن ذرة الأرجون بها ١٨

obeikandl.com

إلكترون منها إثنان فى المدار ($n = 1, \ell = 0, m_l = 0$) أحدهما غزل علوى والآخر غزل سفلى، وإلكترونان فى المدار ($n = 2, \ell = 0, m_l = 0$) أحدهما غزل علوى والآخر غزل سفلى ثم ستة إلكترونات فى المدارات ($n = 2, \ell = 1, m_l = 1, 0, -1$): ثلاثة غزل علوى وثلاثة غزل سفلى، ثم إلكترونان فى المدار ($n = 3, \ell = 0, m_l = 0$) أحدهما غزل علوى والآخر غزل سفلى وأخيرا ستة إلكترونات فى المدارات ($n = 3, \ell = 1, m_l = 1, 0, -1$): ثلاثة غزل علوى وثلاثة غزل سفلى.

مبدأ الارتياب (فيرنر هيزنبرج):

إذا أردنا أن نقيس موضع وسرعة جسيم فى أى لحظة، سوف نواجه بعدم دقة فى النتائج المعملية. ومن وجهة نظر الفيزياء التقليدية فإنه لايوجد عائق أساسى لتحسين الجهاز أو طريقة القياس. بمعنى آخر يمكن -من ناحية المبدأ- إجراء القياسات بخطأ اختيارى صغير. ولكن ميكانيكا الكم تتنبأ بأنه من المستحيل إجراء قياسات فى نفس اللحظة لموضع جسيم وسرعته بدقة متناهية.

وقد توصل "فيرنر هيزنبرج" (١٩٠١-١٩٧٦) إلى هذا المبدأ فى عام ١٩٢٧ فأحدث دويا هائلا بين علماء الفيزياء، وفيما بعد تناول قصة توصله إلى مبدأ الارتياب فى كتابه "الجزء والكل" الذى نشره بالألمانية فى عام ١٩٧٣ وظهرت ترجمته بالعربية فى عام ١٩٨٦. وفيما يلى نستعرض جهود "هيزنبرج" فى وضعه ميكانيكا الكم الجديدة، وكذلك كيفية توصله إلى مبدأ الارتياب.

ميكانيكا الكم الجديدة:

يتكلم "هيزنبرج" فى كتابه المذكور عن الحلقات العلمية التى كان يعقدها علماء الفيزياء فى العقد الثالث من القرن العشرين، والتى كانت تدور حول البحث عن نظرية جديدة للكم لكى تحل محل ميكانيكا "نيوتن"، ولكن حدود هذه النظرية لم تكن معروفة فى ذلك الحين. وفى نفس الوقت كلف "نيلز بور" "هيزنبرج" بتطوير نظرية الكم الخاصة بظواهر التشتت مستلهما نظرية التشتت التقليدية. وبعد ذلك حاول "هيزنبرج" استنتاج العلاقات الرياضية

obeikandi.com

الصحيحة التى تعبر عن شدة خطوط الطيف لغاز الهيدروجين، ولكن هذه المحاولة باءت بالفشل إذ وقع فى أدغال معادلات رياضية معقدة لم يجد منها مخرجا، ولكنه خرج منها بتصور أنه ليس عليه أن يسأل عن مسارات الإلكترونات فى الذرة ولكن عن تردد الاهتزاز وشدة خطوط الطيف التى يمكن حسابها بكميات تسمى السعات لإمكان مشاهدة هذه الكميات مباشرة خلال التجارب العملية.

واقتنع "هيزنبرج" بأن الكميات القابلة للمشاهدة تلعب فى الفيزياء الجديدة نفس الدور الذى لعبته شروط الكم فى نظرية "بور – زومرفيلد". ومن هذه النقطة الهامة فى بناء النظرية الجديدة اتضح له أنه لم تعد هناك حرية فى اشتقاق التركيبات الرياضية اللازمة وأن الأمور أصبحت تسير وفقا للحتمية الجبرية، وتوصل "هيزنبرج" إلى نظرية الكم الجديدة.

وفى نفس هذه الفترة الزمنية تمكن "بول ديراك" فى جامعة كمبردج ببريطانيا من اقتراح طريقة مختلفة لحل نفس المشكلة وتمكن أيضا من بناء نسق رياضى متكامل أدى إلى الأمل فى إمكانية تفسير التجارب المتعددة فى مجال الذرة.

محاورات "هيزنبرج" و"أينشتين":

وفى خريف عام ١٩٢٦ دعى "هيزنبرج" لإلقاء محاضرة فى برلين حول ميكانيكا الكم الجديدة، وبعد إنتهاء المحاضرة دعاه "أينشتين" لمناقشة أفكاره الجديدة التى اعتبرها "أينشتين" غريبة للغاية بسبب محو فكرة مسارات الإلكترونات فى الذرة على الرغم من إمكان مشاهدة مسارات الإلكترونات داخل غرف الضباب، ورد عليه "هيزنبرج" بأن الإنسان لايستطيع أن يرى مسارات الإلكترونات داخل الذرة، ولكن الأشعة التى تنبعث من الذرات أثناء عملية التفريغ تمكننا مباشرة من التأكد من وجود الترددات الاهتزازية وسعاتها، كما أن هذه المعلومات تمثل تعويضا عن المسارات الإلكترونية.

وحاوره "أينشتين" بعدم جدوى نظرية فيزيائية تعتمد فقط على الكميات التى يمكن مشاهدتها، ورد "هيزنبرج" عليه بأنه (أى أينشتين) فى نظريته النسبية لم يتحدث عن أزمنة مطلقة لعدم إمكان مشاهدة هذه الأزمنة. وهنا حاول

"أينشتين" الدفاع عن فلسفته فقال أنه من المهم التذكير بما نستطيع مشـــاهدته بالفعل ولكنه من الخطأ تأسيس نظرية على الكميات القابلة للمشاهدة، بل علـى العكس فإن النظرية هى التى تحدد ما يمكن مشاهدته، كما أن المشاهدة فى حد ذاتها تعد عملية معقدة للغاية. فالحدث الذى نريد مشاهدته له تأثيرات معينـــة على الأجهزة التى نستخدمها فى المشاهدة، وكذلك فإن هناك أحداثا أخرى تقع فى الجهاز وتؤدى بطريقة ملتوية إلى انطباعاتنا الحسية وإلى تثبيـــت نتـائج المشاهدة فى شعورنا، لذا فإنه يتوجب علينا أن نعرف القوانين الطبيعيـــة إذا أردنا أن نزعم أننا قد شاهدنا شيئا ما. وفى رأى "أينشتين" أن زعم "هيزنبرج" الخاص بأخذ الكميات القابلة للمشاهدة فقط فى الاعتبـــار يحمـل تخمينـا أن نظريته سوف لاتمس الوصف الحالى لعمليات الإشعاع.

وأكد "هيزنبرج" أن علماء الفيزياء لايعرفون بأى لغة يمكنهم الحديـــث عمـا يحدث داخل الذرة. وفى واقع الأمر فإن لديهم نسق ريـــاضى يمكنـهم مـن حساب مستويات الطاقة الثابتة للذرة أو احتمالات الانتقال من مستو إلى آخر، ولكنهم لايعرفون كيف ترتبط هذه "اللغة" مع اللغة الفيزيائية العادية، وهم فـى حاجة إلى هذه الرابطة من أجل تطبيق النظرية على التجارب العملية (التـــى يتحدثون عنها بلغة الفيزياء التقليدية). وبناء عليه فإن "هيزنـــبرج" يعتقـد أن العلماء لم يفهموا ميكانيكا الكم بعد، رغم أن النسق الرياضى صحيـــح فعـلا ولكن علاقته مع "اللغة العادية" لم تتكون بعد.

ثم بدأ "أينشتين" حوارا آخر حول ميكانيكا الكم وأن لها جانبين مختلفين تماما، أحدهما خاص باستقرار الذرات بحيث تدع الأشكال نفسها تتكون مـن جديـد دائما، والجانب الآخر يصف عنصرا غريبا من عدم الاستمرارية فـى الطبيعـة يمكن رؤيته عند مشاهدة ومضة الضوء المنبعثة من عينة من المواد المشـعة فوق الشاشات الضوئية. ونظرا لارتباط هذين الجانبين ببعضهما فمن المحتـم الحديث عنهما أثناء تناول ميكانيكا الكم خاصة عند الحديث عـــن الإرســال الضوئى لذرة ما. فمن الممكن حساب قيم الطاقة المحددة للمستويات المسـتقرة وبالتالى فإن النظرية تستطيع حساب اســـتقرارية الأشـكال التـى لاتنتقـل باستمرارية ولكنها تختلف بكميات نهائية محددة وتتكون من جديد دائما. فمثلا

فى محاولة تصور هبوط الذرة فجأة من قيمة طاقة ثابتة إلى قيمة أخرى حيث ينبعث الفرق بين القيمتين على هيئة حزمة طاقة أو ما يسمى بالكم الضوئى واعتباره مثلا خاصا لعنصر عدم الاستمرارية.

وأفاد "هيزنبرج" بأنه تعلم من "بور" عدم إمكان الحديث عن مثل هذا الانتقال باستخدام المصطلحات الحالية ولا يمكن وصفه كحدث فى الزمان والمكان، كما أنه لايمكنه وضع إجابة محددة عن وجود الكم الضوئى. ويبدو له أن عملية الإشعاع ترتبط بعنصر من عدم الاستمرارية يتجلى فى ظاهرة التداخل الضوئى الذى يمكن تفسيره بالنظرية الموجية. ومن خلال ميكانيكا الكم يمكن الحصول على معلومات هامة إذا اعتبرت الذرة فى حالة تبادل طاقى مع الذرات الأخرى القريبة منها أو مع المجال الضوئى المحيط بها، ويمكن بعد ذلك البحث عن اهتزاز الطاقة فى الذرة إذا تغيرت بطريقة غير مستمرة حيث يكون أكبر من الاهتزاز بطريقة مستمرة.

وهنا احتج "أينشتين" بأن أفكار "هيزنبرج" تتحرك فى اتجاه خطير جدا، إذ هو يتحدث عما هو معروف عن الطبيعة وليس عما تقوم به الطبيعة بالفعل. وقد يكون من الممكن أن كلا منهما يعرف شيئا مختلفا عن الطبيعة. فإذا كانت نظرية "هيزنبرج" صحيحة بالفعل فيتحتم عليه أن يخبر "أينشتين" عما تفعله الذرة أثناء انتقالها من مستوى ثابت إلى مستوى آخر خلال عملية الإشعاع الضوئى.

العلاقة بين نظريتى "شرودنجر" و"هيزنبرج":

ومن حسن حظ "هيزنبرج" أنه فى فترة محاوراته مع "أينشتين" كان العالم "شرودنجر" يقوم بتطوير معادلته الموجية لوصف حركة الجسيمات وتوصل بطريقة مباشرة إلى طاقات مستويات الأغلفة الذرية تتفق مع نتائج ميكانيكا الكم الجديدة التى وضعها "هيزنبرج". كما نجح "شرودنجر" فى إثبات أن الميكانيكا الموجية التى بناها تنطبق رياضيا مع ميكانيكا الكم الجديدة وبالتالى فإن ثمة تعبيرين رياضيين مختلفين لموضوع واحد.

وقد كان "هيزنبرج" سعيدا بهذه التطورات وازدادت ثقته فى التعبيرات الرياضية التى أدخلها باستخدام المصفوفات والتى حالت تعقيداتها دون إجراء حسابات لبعض النظم الذرية، بينما كانت الميكانيكا الموجية مرتعا سهلا

لإجراء تلك الحسابات، وأصبحت الصعوبة هى فى التفسير الفيزيائى للنسق الرياضى الذى أقامه "شرودنجر". فقد اعتقد "شرودنجر" أنه بالانتقال من فكرة الجسيمات البحتة إلى فكرة الموجات المادية أمكنه التغلب على كل المتناقضات التى حالت دون فهم نظرية الكم لأزمنة طويلة. إن الموجات المادية يجب إذن أن تكون عمليات ظاهرية فى المكان والزمان بنفس المنطق الذى تعودنا به إدراك الموجات الكهرومغناطيسية أو الموجات الصوتية فى الفيزياء التقليدية.

وعندما دعى "شرودنجر" لإلقاء محاضرة عن الميكانيكا الموجية فى ميونخ فى صيف عام ١٩٢٦، وذهب "هيزنبرج" إلى هناك لمناقشته، خاصة بعد أن قام بتطبيق معادلة "شرودنجر" على ذرة الهليوم. وكان وقع المحاضرة رائعا وتحمس الجميع لما قاله "شرودنجر" عن استخدام الطرق الرياضية المعروفة بتناسق كامل فى حل مشكلة ذرة الهيدروجين.

وبعد فترة قصيرة التقى علماء الفيزياء فى كوبنهاجن حيث مقر "نيلز بور" لمتابعة المناقشات. وبدأ "شرودنجر" النقاش بعدم موافقته على القفزات الكمية وكذلك على زعم البعض أن الإلكترون الموجود فى ذرة ما يدور فى مسار معين بطريقة دورية دون أن يشع، بيد أن هؤلاء لايعطون أسبابا واضحة لعدم إشعاع الإلكترون وهو ما يتعارض مع نظرية "ماكسويل" التقليدية.

محاورات "نيلز بور" و"هيزنبرج":

وفى الأشهر التالية أصبح التفسير الفيزيائى لميكانيكا الكم يمثل الموضوع الرئيسى للمناقشات بين "بور" و"هيزنبرج"، فقد اهتما بما يسمى التجارب العقلية – وهى تجارب افتراضية معروفة النتائج لايمكن إجراؤها فى المختبر والهدف منها هو اختبار النظريات الفيزيائية المختلفة –لقياس مدى فهمهما لميكانيكا الكم. واتضح لهما اختلاف آرائهما، فقد ركز "بور" على المساواة بين الصورة الجسيمية والصورة الموجية بينما اهتم "هيزنبرج" بدور ميكانيكا الكم فى التفسير الفيزيائى للكيمات الفيزيائية مثل "القيم المتوسطة للطاقات" و"العزم الكهربى" و"الدفع" وغيرها، وكيف أنه ليس لديه الحرية فى إعطاء التفسير الفيزيائى، بل يجب عليه استخدام الاستنباط المنطقى البحت.

obeikandl.com

وانتهت مناقشات العالمان "بـــور" و"هيزنبرج" إلى لا شئ، فتفرق الرفيقـــان، كل ذهب إلى مكان منعزل عن الآخر، بهدف التفكير فى هدوء.

التوصل إلى مبدأ الارتياب:

وفى أحد الأيام تذكر "هيزنبرج" محاوراته مع "أينشتين" حينما قال "إن النظرية هى التى تحدد ما نستطيع مشاهدته بالفعل"، وظل "هيزنبرج" يبحث عن مفتاح البوابة المغلقة فى هذا الموضوع من خلال تفكير عميق فى عواقـــب مقولـــة "أينشتين". ثم استرجع "هيزنبرج" ما كان يقوله دائما من أن مسار الإلكـــترون فى غرفة الضباب يمكن رؤيته، ولكن ربما كان ذلك الذى نراه أقل من ذلـــك، ربما نستطيع فقط إدراك سلسلة محدودة من الأماكن المعينـــة غـــير الدقيقـــة للإلكترون. إن ما نراه فعلا فى غرفة الضباب هو قطرات منفردة من المـــاء التى تكبر الإلكترون آلاف المرات. وتوصل "هيزنـــبرج" إلـــى أن الســـؤال الواجب طرحه هو: هل نستطيع من ميكانيكا الكم تمثيل موقف معين نشـــغل فيه الإلكترون موضعا معينا بطريقة تقريبية –أى ببعض من عدم الدقة– وفى نفس الوقت يملك فيه الإلكترون سرعة معينة بطريقـــة تقريبيـــة أيضـــا –أى ببعض من عدم الدقة– وهل نستطيع تصغير عدم الدقة هذا بحيث لانقع فـــى صعوبات مع التجربة ذاتها؟

لقد قام "هيزنبرج" بعملية حسابية بسيطة لإمكان تمثيل مثـــل هـــذه المواقـــف رياضيا، وأن ثمة علاقة لعدم الدقة فى الموضع والسرعة عرفت بعـــد ذلـــك باسم علاقة الارتياب فى ميكانيكا الكم، ومؤدى هذه العلاقة هـــو أن حـــاصل ضرب الارتياب فى الموضع والارتياب فى الزخم لايمكن أن يكون أقل مـــن كم التأثير للعالم "بلانك"، وبناء على ذلك فقد بدا له أن العلاقة بين المشـــاهدات فى غرفة الضباب والرياضيات الخاصة بميكانيكا الكم قد تكونت أخيرا، ولـــم يعد المطلوب سوى إثبات أنه فى أى تجربة عملية تتكون فقط المواقف التـــى تحقق علاقة الارتياب. ولكن ذلك بدا له منطقيا منذ البداية لأن الأحداث فـــى كل تجربة –أثناء المشاهدة– لابد وأن تحقق بذاتها قوانيـــن ميكانيكـــا الكـــم. وبالتالى فإنه بافتراض هذه القوانين هنا فإنه لن تتكون لدى التجارب مواقـــف

obeikandl.com

لاتتفق مع ميكانيكا الكم بناء على المبدأ: "**إن النظرية هى التى تحدد ما نستطيع مشاهدته بالفعل**".

وتذكر "هيزنبرج" محاورة أخرى أجراها مع زميل له حينما تناولا الصعوبات المصاحبة لتصور المسارات الإلكترونية فى الذرة، وتخيل زميله احتمال بناء ميكروسكوب ذى قدرة تحليلية كبيرة للغاية بحيث يمكن به رؤية مسار الإلكترون مباشرة، وأن مثل هذا الميكروسكوب لايمكن أن يعمل بالضوء العادى ولكن ربما بواسطة أشعة جاما، واتفقا على أنه من ناحية المبدأ، ربما يكون ممكنا باستخدام مثل هذا الجهاز تصوير مسارات الإلكترون فى الذرة فوتوغرافيا.

لقد كان على "هيزنبرج" إثبات أنه حتى فى مثل هذا الميكروسكوب فإنه من غير المسموح به تعدى الحدود المعطاة خلال علاقة الارتياب. ونجح فى الوصول إلى هذا الإثبات وبالتالى فقد زادت ثقته فى صحة التفسير الجديد.

إذا أجريت عملية قياس موضع جسيم بدقة ($\Delta\chi$) وفى نفس اللحظة قياس مركبة الزخم (p_x) بدقة (Δp_x) فإن حاصل ضرب الارتيابين لايمكن أن يكون أصغر من ($h / 4\pi$)، أى $\Delta\chi . \Delta p_x \geq h / 4\pi$.

وبلغة أخرى: من المستحيل قياس الموضع الدقيق والزخم الدقيق لجسيم فى نفس اللحظة. فإذا كانت ($\Delta\chi$) صغيرة جدا فإن (Δp_x) تصبح كبيرة وبالعكس. ولقد كان "هيزنبرج" دقيقا بحيث أوضح أن الارتيابين ($\Delta\chi$), (Δp_x) لا ينتجان من عيوب فى أجهزة القياس، ولكنهما ينبثقان من التركيب الكمى للمادة: تأثيرات مثل الارتداد –الذى لايمكن التنبؤ به– للإلكترون عندما يصطدم بفوتون أو تأثير حيود الضوء أو حيود الإلكترونات إذا مرت خلال فتحة صغيرة.

برهان مبدأ الارتياب للموضع والزخم:

ولنفرض أنك ترغب فى قياس موضع وزخم إلكترون بدقة على قدر الإمكان فإنه يمكنك أن تشاهد الإلكترون باستخدام ميكروسكوب ضوئى قوى. ولكى ترى الإلكترون وتحدد موضعه، فيجب أن ينعكس من الإلكترون فوتون واحد

obeikandi.com

على الأقل ثم يمر خلال الميكروسكوب حتى يصل إلى عينيك، وعندما يصطدم الفوتون بالإلكترون فإن الفوتون ينقل جزءا من زخمه إلى الإلكترون، ومن ثم خلال عملية تحديد مكان الإلكترون بدقة شديدة (أى جعل $\Delta\chi$ صغيرة جدا)، فإن نفس الضوء الذى يسمح بمتابعة التغيرات فى زخم الإلكترون لمدى غير محدد (بجعل Δp_x كبيرة).

وبتحليل عملية التصادم فإن الفوتون يكون له زخم (h / λ) وكنتيجة للتصادم فإن الفوتون ينقل جزء من زخمه إلى الإلكترون. وعلى ذلك فإن الارتياب فى زخم الإلكترون بعد التصادم يكون فى كبر زخم الفوتون الساقط $(\Delta p_x = h / \lambda)$ وحيث أن الضوء له أيضا خصائص الموجة، فالمتوقع أن نستطيع تحديد موضع الإلكترون بدقة طول موجة من الضوء لرؤياه، وعليه فإن $(\Delta x = \lambda)$.

$\therefore \Delta x . \Delta p_x = \lambda (h / \lambda) = h$ وهذا يمثل أقل قيمة لحاصل ضرب الارتيابين، وعليه تكون $\Delta x . \Delta p_x \geq h$ وهذه العلاقة تختلف عن التى وضعها "هيزنبرج" بالقيمة العددية $(1 / 4\pi)$، ولكنها لاتتناقض معها.

إن مبدأ الارتياب يساعدنا على فهم طبيعة "الموجة-الجسيم" الازدواجية للضوء والمادة.

ولقد رأينا كيف أن وصف الموجة يختلف تماما عن وصف الجسيم، وعلى ذلك إذا صممت تجربة (مثل التأثير الكهروضوئى) لكشف خصائص الجسيم (إلكترون) فإن الخاصية الموجية تصبح أقل وضوحا، وإذا صممت تجربة أخرى (مثل الحيود الناتج من السقوط على بلورة) لتحديد الخصائص الموجية للإلكترون فإن الخصائص الجسيمية تصبح أقل وضوحا.

برهان مبدأ الارتياب للطاقة والزمن:

إن العلاقة الارتيابية تضع حدا على الدقة التى يمكن بها قياس طاقة نظام (ΔE) إذ يمكن قياسها إذا سمح بفترة زمنية محدودة (Δt) لإجراء القياس. وهذه العلاقة الارتيابية للطاقة والزمن يمكن كتابتها على الصورة

$$\Delta E . \Delta t \geq h / 4\pi$$

obeikandl.com

هذه العلاقة تكون مقبولة إذا أجرى قياس لتردد الموجة. ولنفترض أننا نجرى قياسا لموجة كهربية ١٠٠٠ هيرتز، فإذا كان جهاز قياس التردد له حساسية (± ذبذبة واحدة) فإنه يمكننا أن نقيس فى ثانية واحدة تردد (١٠٠٠ ± ١) ذبذبة فى الثانية، بينما نقيس فى ثانيتين تردد (٢٠٠٠ ± ١) ذبذبة فى الثانيتين.

لذلك يكون الارتياب فى التردد (Δf) متناسبا عكسيا مع (Δt) وهو الزمن الذى يتم القياس خلاله. ويمكننا كتابة هذه العلاقة كالآتى:

$$\Delta f . \Delta t \cong 1$$

ونظرا لأن جميع النظم الكمية هى من النوع الموجى ويمكن اعتبارها تخضع للعلاقة $E = hf$ فمن هذه العلاقة نحصل على $\Delta f = \Delta E / h$ وبالتالى تصبح العلاقة السابقة: $\Delta E . \Delta t \cong h$ وهى تتفق مع العلاقة الارتيابية للطاقة والزمن.

مناقشات مؤتمرات الفيزياء:

ثم التقى "هيزنبرج" مرة أخرى مع "بور"، وكل منهما على استعداد لعرض ما توصل إليه على الآخر، واتفقا على جعل مبدأ الازدواجية بين الصورة الموجية والصورة الجسيمية للإلكترون الأساس الموضوعى للمناقشة. وعرض "بور" مبدأ التكامل الذى يصف موقفا نكون فيه قادرين على إدراك حدث معين بطريقتى وصف مختلفتين. هاتان الطريقتان للوصف تلغى كل منهما الأخرى ومع ذلك فأى منهما تكمل الثانية. وفقط من وجود الطريقتين المتضادتين للوصف كل بجوار الأخرى يصبح الهيكل الظاهرى للظاهرة التكرارية مستنفذا تماما.

أما "بور" فقد أبدى فى أول الأمر بعض التحفظات إزاء علاقة الارتياب التى اعتبرها حالة خاصة جدا للموقف العام لمبدأ التكاملية ولكن باستمرار المناقشة اقتنعا سويا بعدم وجود اختلاف بالمرة بين التفسيرين وأصبح من المهم لكليهما تمثيل الموضوع بحيث يصبح مفهوما للرأى العام الفيزيائى.

وفى خريف عام ١٩٢٧ اجتمع الفيزيائيون فى تجمعين، الأول هو المؤتمر الفيزيائى فى "كومو" الذى ألقى فيه "بور" محاضرة ملخصة عن الموقف

obeikandl.com

الجديد، أما التجمع الثانى فهو مؤتمر "سولفاى" فى "بروكسل" الذى حضره مجموعة صغيرة من المتخصصين لمناقشة قضايا نظرية الكم بالتفصيل. وقد وقع العبء الأساسى فى الصراع حول تفسير نظرية الكم على "بور" و"أينشتين" الذى لم يكن مستعدا لقبول الصفة الإحصائية لنظرية الكم الجديدة. وبالطبع لم يكن "أينشتين" معترضا على عقد مقولات احتمالية حيثما تكون معرفة كل الأدوات اللازمة لتحديد نظام معين غير ميسرة، فقد استندت على مثل هذه المقولات كل من الميكانيكا الإحصائية وعلم الحرارة، ولكن "أينشتين" لم يرد التسليم بأنه من غير الممكن مبدئيا معرفة كل الجوانب الضرورية للتحديد الكامل لحدث ما وقال: "إن الإله الحبيب لايضرب بالنرد" وظل يردد هذه العبارة كثيرا أثناء المناقشات.

ومن هنا لم يكن ممكنا لـ "أينشتين" التلاؤم مع علاقة الارتياب، وحاول من ناحيته التفكير فى تجارب تؤدى إلى إسقاط هذه العلاقة، وكانت المناقشات تبدأ فى الصباح الباكر بأن يشرح "أينشتين" لمجموعة الفيزيائيين أثناء طعام الإفطار تجربة عقلية جديدة تتناقض حسب رأيه مع علاقة الارتياب، وبالطبع سرعان ما يبدأ "هيزنبرج" بالتحليل وفى الطريق إلى قاعة المؤتمر يكونوا قد توصلوا إلى أول تفنيد لموضوع التجربة المقترحة. وأثناء النهار تدور الأحاديث عن ذلك، وأثناء العشاء يكون قد حان الوقت لأن يثبت "نيلز بور" أن التجربة العقلية التى اقترحها "أينشتين" لايمكن أن تؤدى إلى إسقاط علاقة الارتياب. وبعد هذا التفنيد الكامل يبدو "أينشتين" هادئا تماما، ولكن سرعان ما يأتى الصباح التالى كى يعاود الكلام عن تجربة عقلية جديدة أكثر تعقيدا من سابقتها ثم يصر على أنها تبين فعلا عدم صلاحية علاقة الارتياب، وبالطبع كانت هذه المحاولة تسقط فى المساء مثل سابقتها.

وبعد أن استمرت هذه اللعبة عدة أيام قال صديق "أينشتين" العالم "بول أيرنفست" (١٨٨٠ - ١٩٣٣) موجها كلامه إلى "أينشتين": "إننى أشعر بالخجل لك لأنك تحاول تقديم الحجج ضد نظرية الكم الجديدة تماما كما فعل المناهضون لك ضد النظرية النسبية".

وبالرغم من هذه الملاحظة لم يقتنع "أينشتين". فقد كرس حياته العلمية من أجل البحث فى العالم الموضوعى للظاهرة الطبيعية، التى تتم فى الخارج فى المكان والزمان مستقلة وفقا لقوانين ثابتة. إن الرموز الرياضية للفيزياء النظرية يجب أن تصور هذا العالم الموضوعى، وبذلك يمكنها التنبؤ عن تصرفه فى المستقبل.

لقد كان أنصار نظرية الكم الذرية يزعمون أنه عندما نهبط بأنفسنا عند حدود الذرة، فإن مثل هذا العالم الموضوعى فى المكان والزمان لايصبح موجودا وأن الرموز الرياضية للفيزياء النظرية تصور عندئذ ما هو محتمل فقط وليس ما هو واقع بالفعل. ومن ثم لم يكن "أينشتين" مستعدا -كما تطرق الشعور إليه- بأن تسحب الأرض من تحت قدمية بطريقة بسيطة هكذا.

وحتى بعد ذلك، حينما صارت نظرية الكم جزءا ثابتا من الفيزياء المعاصرة، لم يستطع "أينشتين" أن يغير موقفه. لقد اعتبر نظرية الكم حلا مؤقتا وليس نهائيا لتفسير الظواهر الذرية. ولم يترك "أينشتين" الفرصة لأحد كى يزحزحه عن هذا المبدأ.

obeikandl.com