كلية التربية

القائم بالتدريس

د. اسماء سيد

سلسلة محاضرات ميكانيكا الكم 1

د. محمد علوش -قسم الفيزياء- جامعة جنوب الوادي

الفرقة الثالثة - تعليم أساسى

2022-2023

(ان من لم تصدمه نظرية الكم

لابد أنه لم يفهمها)

نيلز بوهر

تمهيـــــــد:

ميكانيكا الكم هي إحدى النظريتين اللتين تشكلان الفيزياء الحديثة بجانب النسبية لآينشتاين، لكن مهلاً هذه ليست بالنظرية العادية؛ ففيزياء الكم هي النظرية التي أحرجت أعظم فيزيائي على مر التاريخ (آينشتاين) بعد أن حاربها فأخرجته منهزماً معترفاً بهزيمته وهي النظرية الأكثر دقة في وصف سلوك الذرات والجسيمات دون الذرية على الرغم من أنها تستند على مبدأ الشك والريبة والاحتمالات فكيف يكون ذلك؟ ولماذا حاربها آينشتاين؟ وما هو مبدأ الشك ومن هو صاحبه؟

كيف تغير فهمنا للفيزياء؟

بدأت الحكاية عندما اقترح الفيزيائي ماكس بلانك عام 1900م تفسيراً لإشعاع الجسم الأسود بافتراض أن الطاقة تُبعث أو تمتص على شكل "كمات؛مفردها كمة" من الطاقة ونال على إثر ذلك جائزة نوبل عام 1918م ثم توالى العلماء من بعده؛ فنيلز بور وضع أول نموذج للذرة معتمداً على مبدأ تكميم الطاقة الذي فسر طيف الذرات المنفصل ونال بذلك جائزة نوبل عام 1922م وكذلك دي برولي الذي اكتشف أن الجسيمات تتصرف كموجات والتي جاءت متوافقة مع نموذج بور.

لكن الأمور لا زالت بسيطةً حتى الآن، لأن البداية الحقيقية لفيزياء الكم بدأت عندما وضع الفيزيائي هيزنبيرغ المبدأ الشهير المعروف بمبدأ الشك أو الريبة والذي ينص على أنه كلما زادت دقتك في قياس موقع جسيم ما، قلت دقتك في معرفة زخم ذلك الجسيم والعكس صحيح.

بداية انهيار الفيزياء الكلاسيكية

أثار هذا المبدأ جدلاً كبيراً وواسعاً في المجتمع العلمي آنذاك وكان من بين أولئك الذين لم يتقبلوا هذا المبدأ الفيزيائي الشهير آينشتاين الذي تبين لاحقاً أنه على خطأ، في الحقيقة تعتبر

ردة الفعل هذه تجاه مبدأ الشك متوقعة لأنه لا يتوافق مع الفيزياء الكلاسيكية لوصف حركة الجسم التي كانت سائدة في ذلك الوقت، لتبسيط الأمور تخيل أنك شرطي مرور تراقب حركة السيارات باستخدام الرادار؛ تخبرنا الفيزياء الكلاسيكية أنه بمقدورك معرفة مكان وسرعة أي سيارة في أي لحظة فتقول مثلاً تسير سيارة مرسيدس على الشارع الفلاني من أمام المبنى الفلاني (بذلك حددت مكانها) بسرعة 80كم/ساعة(بذلك حددت سرعتها وبالتالي زخمها) وهذا يبدو منطقيا للغاية، لكن ما يخبرنا به مبدأ الشك شيءٌ آخر؛ فإذا قام الرادار بقياس سرعة السيارة بدقة كبيرة مثلاً80كم/ساعة فستكون غير قادر على معرفة مكان السيارة بدقة كما لو أنها تتواجد في أكثر من مكان في نفس الوقت وإذا وجدت مكان السيارة وحددته بدقة فلن يعطيك الرادار قراءة دقيقة لسرعة السيارة وكأنه يخبرك بأن سرعة السيارة تتراوح بين 10 -80 كم/ساعة، غريب صحيح؟

بهذه الصورة بدا موقف هيزنبيرغ في البداية في المجتمع العلمي ضعيف، ثم توالت السنون وخرج بطلٌ آخر من أبطال حكاية فيزياء الكم وهو الفيزيائي الشهير صاحب أغرب قطة في التاريخ ، نعم نعم إنه شرودينغر وقطته(قطة شرودينغر). اقترح شرودينغر ميكانيكا الموجات لوصف سلوك الجسيمات ووضع معادلات لذلك حاملةً اسمه، وصفت هذه المعادلات بشكل دقيق سلوك الإلكترونات في الذرة كما وعالجت المآخذ على نموذج بور للذرة التي كان من أهمها: نوذج بور يتنبأ بسلوك ذرات الهيدروجين والذرات أحادية الإلكترون فقط مستثنياً بذلك الذرات عديدة الإلكترونات.

اعتمد شرودينغر على فرض دي برولي في أن الجسيمات تتصرف كموجات في صياغة معادلاته التي تعرف بمعادلات شرودينغر التي ينتج عن حلها ما يعرف بالدالة الموجية التي تصف بالصيغة الرياضية السلوك الموجي للجسيمات مثل الإلكترونات في ذرات المادة. لكن مهلاً، هناك من لم ننصفه بعد، نعم إنه صاحب مبدأ الشك الذي يعتبر حجرالأساس لميكانيكا الكم أوميكانيكا الموجات، لذلك هنا السؤال يطرح نفسه؛ ما علاقة هذا المبدأ بميكانيكا الكم؟

في البداية دعنا نتفق على أمر مهم وهو أنَّ السلوك الموجي يكون أكثر وضوحاً في الجسيمات الصغيرة كالإلكترونات والبروتونات وغيرها ويكون أقل وضوحاً في الأجسام الكبيرة كالسيارة والكُرات وغيرها.

- ***المحتويات:***

- **مقدمة**
  - **الخصائص الجسيمية للأشعة الكهرومغناطيسية**
- **نظرية الكم الأولى: "ماكس بلانك" وإشعاع الجسم الأسود**
- **الفوتونات: كمية الضوء**
- **التأثير الكهروضوئي**
- **الوصف الكمي للمادة: نموذج " بوهر" للذرة**
- **ازدواجية الموجة-الجسيم**
- **تطبيق لنموذج بور**
  - **الخصائص الموجية للجسيمات**
- **فرضية دي براولى**
- **تطور ميكانيكا الكم الحديثة**
- **تأويل كوبنهاغن**
- **مبدأ عدم اليقين**
- **التطبيق على ذرة الهيدروجين**
- **المعنى الفيزيائي للدالة الموجية(التابع ألموجي) المرافقة للجسيم المادي**
- **معادلة شرودنجر**
- **بعض التطبيقات لميكانيكا الكم**

- **مقدمة:**

- **ميكانيكا الكم هي مجموعة من المبادئ العلمية التي تفسر سلوك المادة وتفاعلاتها مع الطاقة على مقياس الذرات والجسيمات دون الذرية .توضح الفيزياء التقليدية دراسة المادة والطاقة بالعين المجردة المستوى على نطاق مألوف لتجربة إنسانية بما في ذلك سلوك الأجسام الفلكية. لكنها تبقى المفتاح الأساسي لقياس الكثير من العلوم والتكنولوجيا الحديثة؛ ومع ذلك في نهاية القرن 19 اكتشف العلماء ظواهر في العوالم الماكروية (الكبيرة (والمايكروية (متناهية الصغر (لم تتمكن الفيزياء التقليدية من تفسيرها.**

فسّر توماس صامويل كون في تحليله لفلسفة العلم، أن "بنية الثورات العلمية" التي تُذكر في إطار هذه الحدود قادت إلى ثورتين عظميين في الفيزياء، ما خلق تحولاً في النموذج العلمي الأصلي: وهما نظرية النسبية وتطوّر ميكانيكا الكم توضّح هذه المقالة كيف اكتشف الفيزيائيون قيود الفيزياء التقليدية وكيف طوروا مفاهيم نظرية الكم التي حلّت محلها في العقود الأولى من القرن العشرين. وصفت هذه المفاهيم الترتيب الذي اكتشفت فيه. قد تبدو بعض جوانب ميكانيكا الكم متناقضة أو غير منطقية وذلك لأنها تصف سلوكا مختلفا للغاية وفي حين تعد الفيزياء الكلاسيكية مقاربة ممتازة للواقع ويعتبر ريتشارد فيمان أن ميكانيكا الكم تتعامل مع" الطبيعة وكأنها عبثية". تتصرف أنواع عديدة من الطاقة مثل الفوتونات (وحدات ضوئية منفصلة) كالجسيمات من ناحية وكالأمواج من ناحية أخرى. مشعات الفوتونات (كضوء النيون) لها طيف انبعاث منفصل فقط في حالة وجود ترددات معينة من الضوء، تتنبأ الميكانيكا الكمية بالطاقات والألوان والكثافة الطيفية لجميع أشكال الإشعاع الكهرومغناطيسي يعني بذلك مبدأ الشك للميكانيكا الكمية وبه يمكن تحديد أقرب خاصية للقياس (كموقع الجسيم) ويجب أن يكون أقل دقة لقياس خاصية أخرى تتعلق بالجسيم نفسه (كزخم حركته). وماهو أكثر إثارةً للقلق؟ هو أنه يمكن خلق أزواج من الجسيمات " كتوأم

متشابك ،" كما هو موصوف مفصلا في مقال التشابك الكمي تظهر الجسيمات المتشابكة ما أسماه انسترين "فعل عصبي على بعد مسافة " فالتشابه بين الحالتين أن الفيزياء الكلاسيكية تصر على أن يكون عشوائيا حتى لو أن المسافة وسرعة الضوء تؤكدان على أن عدم اعتبار أي علاقة سببية فيزيائية لهذه العلاقات المتبادلة.

- **لِمَ احتجنا نظرية ميكانيك الكم؟**

مع اقتراب نهاية القرن التاسع عشر ظنّ الناس أنّ الفيزياء قد انتهت، وأنّها لا تحتاج الى المزيد من التطور لتفسير الواقع من حولنا. فقد وصفت النظريات القوية في ذاك الوقت جميع الظواهر الطبيعية التي لاحظها وعاشها الناس، واحتاجت بعض التفاصيل الفرعية الترتيب والتفسير أكثر، فقط لا غير. لكن خلال العقود الزمنية التي تلَتها، بدأت النظرية تضعف. أثبتت الملاحظات أنّه وعندما يتم العمل على مقياس صغير جداً، لا تعمل الطبيعة كما ظنّ الناس أنه يجب عليها. فتم تطوير ميكانيكا الكم لشرح هذه الصورة المستجدّة. حتى نُعطيك فكرة عمّا كان يحدث، سننظر بشكل قصير الى اثنتين من الاكتشافات المحرجة بعض الشيء في ذاك الوقت.

- **الضوء الشيزوفرنيSchizophrenic light**

وهذا أحد الاكتشافات، وركّز على طبيعة الضوء .منذ سبعينيات القرن التاسع عشر، كان الفيزيائيون متأكدين أنّ الضوء ينتقل على شكل أمواج، وبالتحديد أمواج الكهرومغناطيسية وهي فكرة ربما كانت مألوفة بالنسبة لك. الأمواج ذات الترددات المختلفة تنسجم مع الضوء بألوان مختلفة، وعندما تمتزج العديد من الأمواج ذات ترددات مختلفة، نرى اللون الأبيض كنتيجة لهذا المزيج. هذا التفسير للضوء أمواج كهرومغناطيسية كان ولا يزال يُحترم كأحد التحسينات العظيمة في الفيزياء، لكن كان هناك مشاكل.

إحدى هذه المشاكل هي عندما تُوجه شعاعاً من الضوء على المعدن. كما هو متوقع، سيقوم الضوء بقذف الإلكترونات إلى خارج المعدن، لكنها فعلت ذلك بطريقة لا يمكن للأمواج فعلها. هذه الظاهرة تُسمى بالتأثير الكهروضوئي .Photoelectric effect وحيّرت الناس لوقت من الزمن.

كتشف آلبرت آينشتاين في عام 1905 حلّاً لهذه المشكلة. اقترح أن نُفكِّر بالضوء كحزم صغيرة من الطاقة (أو كمّيات صغيرة من الطاقة .(Quanta شرحت هذه الطريقة الحديثة في النظر للأشياء التأثيرَ الكهروضوئي بطريقة ممتازة ومتكاملة، لكنها لم تستبدل الصورة الموجية للضوء.

وحتى تُفسَّر جميع الظواهر التي تتضمن وجود الضوء، يجب أن تتمسك بالصورة الموجية للضوء كذلك. حيث يشبه الضوء الأمواج في بعض الأشياء، ويشبه حُزم الجسيمات الصغيرة في أشياء أخرى. أي كما يمكن أن يُقال أنّه لا يمكن تحديد ماهيته.

- **<u>الذرّات المُنهارة من مدار لآخر</u>**

وهذه إحدى الملاحظات الأُخرى التي تضمنّت الحديث عن بُنية الذرّات. مع نهاية القرن التاسع عشر أيضاً ظنّ الفيزيائيون أنّ الذرات تشبه كعكة البرقوق كما أسموها: حيث أنّها تتكون من إلكترونات مشحونة بشحنة سالبة (وشبهوها بالبرقوق)، ومُحاطة بشحنة موجبة موزّعة بشكلٍ متساوٍ (وشبهّوها بِبُنية الكعكة المُحيطة بالبرقوق). بالرغم من ذلك، وفي عام 1911، اكتشف العالم إيرنست رذفورد Ernest Rutherford وزملاؤه اكتشافاً مُثيراً للاهتمام عندما قاموا بإطلاق جُسيمات مشحونة بشحنة موجبة تُسمّى بـ"جسيمات ألفا Alpha– Particles" على غشاء رقيق من الذهب. بالاعتماد على نموذج كعكة البرقوق، من المفترض أن تمرّ من خلال الغشاء. ولكن لِحُسن حظّهم، لاحظ الباحثون أنّ بعض هذه الجسيمات ارتدّت عن الغشاء الذهبي. وكما عبّر عنه رذرفورد قائلاً:

"هذا الأمر مُثير للفضول كإطلاق قذيفة مدفعية على قطعة ورق، وترتد القذيفة."

كان تفسير راذرفورد اللاحق بسيطاً بقدر ما يحتوي من ذكاء. إذا افترضنا أنّ الشحنة الموجبة بدلاً من أن تكون موزّعة بشكل متساوي في صفيحة الذهب كانت مركّزة في مركزها، سيكون المركز قويّاً بما يكفي لمنع جسيمات ألفا العرضية والتي صدف أن تصطدم بالمركز. قادت الفكرة رذرفورد إلى تشبيه الذرة بالنظام الشمسي، حيث توجد الشحنة الموجبة في المركز وتتوزع الشحنات السالبة في مدارات تدور حول هذه المركز، والذي هو النواة .

على الرغم من تفسير رذرفورد الذكي، إلّا أنّ المشكلة في هذا التفسير أنّ الإلكترونات التي تدور حول نواة يتحتم عليها -بالاعتماد على النظرية- أن تُشعّ بعضاً من طاقتها مع مرور الزمن. وسيقود فقدان الطاقة الإلكترونات للدوران بشكل حلزوني نحو النواة، مما يسبب بالتالي انهيار الذرة في ذاتها. زِد على ذلك، أنّ نمط اشعاع الطاقة سيكون متواصلاً، ولا يمكن أن يكون مشابهاً لأي شيء قد شهده العالم في الواقع، وهذا ما عُرِف بطيف طاقة ذرة الهيدروجين، والذي لوحِظ لأول مرة في عام 1885.

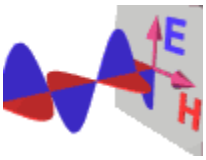
قدّم العالم نيلز بور Niels Bohr – هذا الحل للمعضلة عام 1913، حيث اقترح أنّه لا يمكن للإلكترونات أن تدور حول نواة الذرة بأي مسافة تختارها، بل فقط بمسافات محددة لها. عندما يخسر أحد الإلكترونات مقداراً من الطاقة، لا ينتقل مباشرة إلى النواة، بل ينتقل بشكل قفزة - قفزة كمّية- إلى المسافة المسموحة للطاقة التي يمتلكها. بمعنى آخر، بُعد الإلكترونات عن النواة مُقترن بكمية الطاقة التي يمتلكها الإلكترون، ويستطيع الإلكترون الدوران حول النواة ضمن مدارات محددة بحيث كل مدار ينتقل له الإلكترون بسبب كمية الطاقة الموجودة لديه. وعندما يصل الإلكترون إلى مرحلة المسافة الأقل المسموحة له بالاقتراب من النواة، يبقى في مكانه، وفي هذه الحالة يمكننا أن نقول أنّ الذرّة ستبقى مستقرّة.

احتوى نموذج بور على ميّزة أُخرى، وهي: أنّه استطاع فصل طيف الهيدروجين المذكور سابقاً، والذي حيّر الناس حتى الآن.

أثبتت هذه الظاهرة الجديدة وتفسيراتها شيئاً كان ناقصاً في النظريات الكلاسيكية. لم نُفكّر أنّ الطبيعة بإمكانها تحديد عملية قفز، أو احتوائها على تصرّفات انفصامية مثل الضوء. كان من الواضح أنّ الفيزياء احتاجت نظرية جديدة، نظرية تستطيع تفسير هذه التصرفات الغريبة ولا تحتاج إلى تضميد الفجوات الناقصة فيها. وهذه النظرية كانت نظرية ميكانيكا الكم.

The particle aspects of electromagnetic radiation

الخصائص الجسيمية للأشعة الكهرومغناطيسية



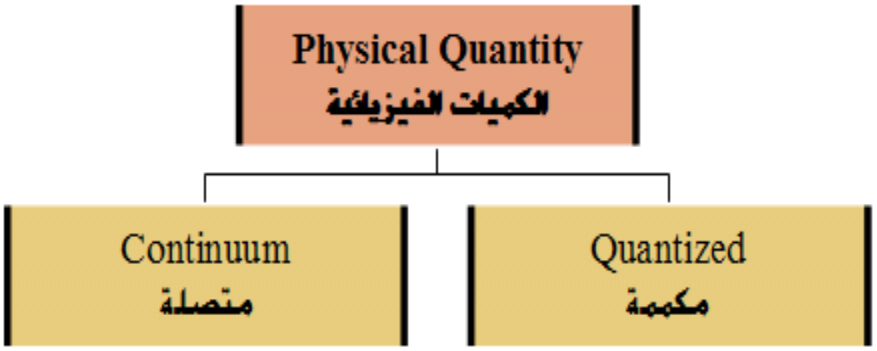
قبل الشروع في دراسة موضوع الخصائص الجسيمية للأشعة الكهرومغناطيسية يجب أن نعرف ما هي الأشعة الكهرومغناطيسية وما هي خصائصها وكيف تتولد وما هو مصدرها ولهذا يرجى العودة إلى موضوع المنشور تحت باب التفسيرات الفيزيائية والإطلاع على موضوع ما هي الأشعة الكهرومغناطيسية؟

إن للأشعة الكهرومغناطيسية خاصية مزدوجة فهي لها خصائص موجية عندما نتحدث عن ظواهر فيزيائية مثل الحيود والتداخل وهذه الظواهر لا يمكن تفسيرها إلا إذا تعاملنا مع الأشعة الكهرومغناطيسية على أساس إنها تتصرف بخاصيتها الموجية.. ولكن ظواهر أخرى مثل انعكاس الأشعة الكهرومغناطيسية على أسطح المرايا أو انكسارها عند مرورها في وسط منفذ له معامل انكسار مختلف عن الوسط الذي سقطت منه مثل العدسات والمنشور الزجاجي فإن الأشعة الكهرومغناطيسية تتصرف بخاصيتها الجسيمية ولا يمكن هنا التعامل مع الأشعة الكهرومغناطيسية إلا على إنها جسيمات مادية.. وهذا ما جعل العلماء ينقسموا إلى قسمين الأول مؤيد للخاصية الموجية والآخر مؤيد للخاصية الجسيمية..

ولكن مع التقدم العلمي في مطلع القرن العشرين تم اكتشاف ظواهر أخرى غير التي سبق ذكرها مثل إشعاع الجسم الأسود أو الظاهرة الكهروضوئية أو ظاهرة كمبتون وغيرها وهذه الظواهر لا يمكن التعامل معها أو تفسيرها إلا إذا اعتمدنا الخاصية الجسيمية للأشعة الكهرومغناطيسية واستعنا بمفهوم فيزياء الكم Quantum Physics.

<u>مفهوم فيزياء الكم</u>

تعتبر النظرية النسبية ونظرية الكم من أعظم إنجازات القرن العشرين العلمية, حيث قدمت النظرية النسبية مفهوما جديدا للمكان والزمان والذي كان له بالغ الأثر في علوم الميكانيكا والكهرومغناطيسية, أما نظرية الكم فقدمت طريقة جديدة للتفكير في سلوك الجسيمات الدقيقة كالذرات والانوية والالكترونات. استخدام نظرية الكم ليس علم جديدا بل إن له تطبيقات في الفيزياء الكلاسيكية أيضا .. وتقسم الكميات الفيزيائية إلى قسمين إما مكممة أو متصلة كما هو موضح في الشكل التالي:

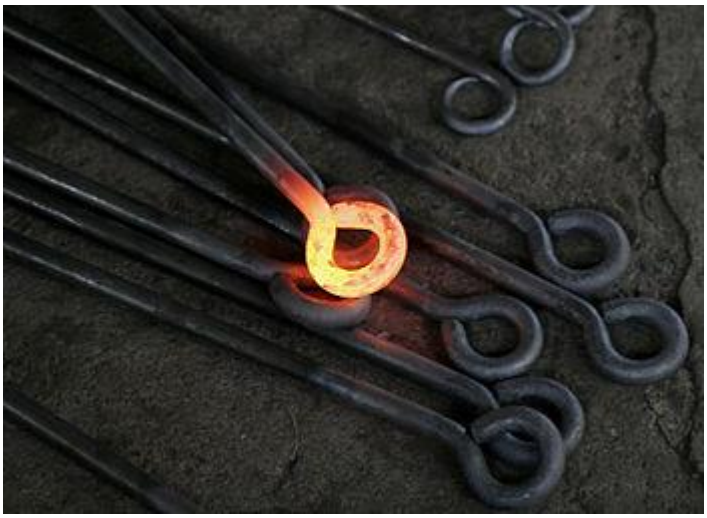


- سرعة الضوء في الفراغ دائما تساوي c.
- الشحنة التي يكتسبها الجسم دائما تكون عدد صحيح من شحنة الإلكترون.
- الأمواج الموقوفة التي تتكون نتيجة اهتزاز وتر مثبت عند طرفيه.

- سرعة الأجسام المادية يمكن إن تكون أية قيمة من الصفر إلى اقل من سرعة الضوء.
- الطاقة الميكانيكية التي تربط جسيمين يمكن إن تأخذ قسم متصلة بالسالب أو الموجب.
- الزاوية التي تأخذها إبرة مغناطيسية موجودة في مجال مغناطيسي خارجي. أيضا تأخذ قيم متصلة.

تم أكشاف نظرية الكم بعد استخدامها في تفسير ظاهرة إشعاع الجسم الأسود والتي لم يتمكن العلماء من تفسير هذه الظاهرة إلا عندما قدم العالم ماكس بلانك في عام 1900 تفسيرا معتمدا على نظرية الكم.. وهذه الظاهرة التي سنبدأ بها لتوضيح المفهوم الفيزيائي للنظرية الكمية والخاصية الجسيمية للإشعاع الكهرومغناطيسي..

- **نظرية الكم الأولى: "ماكس بلانك" وإشعاع الجسم الأسود**
- **Blackbody Radiation**



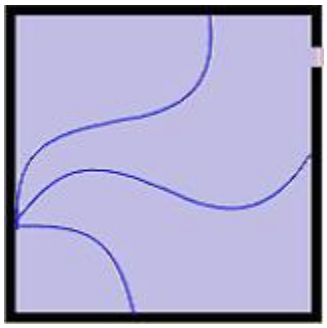
ينبعث إشعاع كهرومغناطيسي من كل الأجسام عند أية درجة حرارة يتواجد عندها ويسمى بالإشعاع الحراري. كمية هذا الإشعاع الحراري المنبعث من الجسم يزداد بزيادة درجة حرارة ويقل بنقصانها. كما أن الأجسام تتبادل الحرارة بينها وبين الوسط المحيط بها إذا اختلفت درجات الحرارة بينهما, فإذا كانت درجات الحرارة متساوية ففي هذه الحالة يكون الجسم في حالة اتزان حراري Thermal Equilibrium أي إن ما يمتصه الجسم من أشعة حرارية من الوسط المحيط به لكل وحدة زمن تساوي ما ينبعث منه.

إن توزيع الأشعة المنبعثة من الجسم عند درجة حرارة معينة كدالة في الطول الموجي كانت مسألة محيرة للعلماء حيث إنهم لم يجدوا تفسيراً علمياً للنماذج العملية التي توضح علاقة توزيع الأشعة مع الطول الموجي ولم تكن النظرية الكلاسيكية قادرة على إيجاد تفسير لها وذلك حتى مطلع القرن العشرين.

المنحني الموضح في الشكل التالي يوضح العلاقة لتوزيع شدة الأشعة المنبعثة من الجسم الأسود كدالة في الطول الموجي بوحدة النانومتر.. والمنطقة المحددة بالون الأزرق إلى اللون الأحمر توضح الجزء المرئي من الطيف الكهرومغناطيسي.

ما هو الجسم الأسود

تعتمد الأشعة المنبعثة من الجسم بالإضافة إلى درجة حرارته على عدة عوامل مثل نوع مادة الجسم ولذلك تم تعريف جسم مثالي عبارة عن جسم اسود قادر على امتصاص كافة الأشعة الساقطة عليه وهذا الجسم عبارة عن صندوق مجوف له ثقب صغير فإذا سقط شعاع إلى داخل الصندوق من خلال الثقب فإن الشعاع ينعكس على جدران الصندوق الداخلي حتى يتم امتصاصه بالكامل.



توزيع الانبعاث الحراري الصادر عن الجسم الأسود

بدراسة الانبعاث الحراري المنبعث من الجسم الأسود عند درجات حرارة مختلفة وجد عملياً أن هناك نتيجتان هما:

*** النتيجة الأولى: أن هناك توزيعاً معيناً لشدة الإشعاع المنبعث من الصندوق الأسود كدالة في الطول الموجي (λ) أو طاقة الأشعة لأن الطاقة E ترتبط مع الطول الموجي من خلال العلاقة**

$$E = hc / \lambda$$

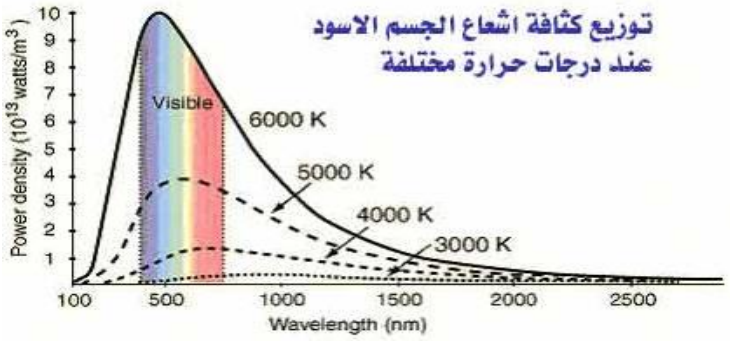
كما إن الطاقة ترتبط مع التردد من خلال العلاقة التالية:

$$E = = h\nu$$

حيث ν المتردد.

*** النتيجة الثانية: كلما زادت درجة الحرارة للجسم الأسود تكون الطاقة المنبعثة منه تحدث عن أطوال موجية اقل ويزداد مقدار الإشعاع بزيادة درجة الحرارة.**

الشكل التالي يوضح رسم بياني للنتائج العملية لإشعاع الجسم الأسود عند درجات حرارة مختلفة



لا شك إن ظاهرة إشعاع الجسم الأسود نلاحظها في حياتنا اليومية فعند تسخين جسم ما مثل الحديد نلاحظ إن الجسم عندما ترتفع حرارته يبدأ في إشعاع لون قريب من اللون الأحمر وعندها تكون درجة حرارة الجسم تقارب 700 درجة مئوية ثم بزيادة الحرارة يتحول

إلى اللون البرتقالي وهكذا حتى يصل إلى اللون الأبيض والذي يدل على أن الجسم وصل إلى درجة جرارة 1200 درجة مئوية. فمثلاً فتيلة المصباح الكهربي التي تعطي الضوء الأبيض فإن حرارتها ترتفع بمرور التيار الكهربي فيها إلى إن تصل درجة الحرارة إلى 1200 درجة مئوية.

محاولات وتفسيرات العلماء للطيف المنبعث من الجسم الأسود

- **قانون ستيفان بولتزمان**

ينص قانون ستيفان بولتزمان على أن الطاقة المنبعثة من الجسم الأسود لكل وحدة مساحة تتناسب مع القوة الرابعة لدرجة جرارة الجسم.

$$E(T) \alpha T^4$$

$$E(T) = \sigma T^4$$

E(T) is the energy of the blackbody radiation per unit area

σ is called Stefan constant = 5.67×10^{8} Watt/m^2K^4

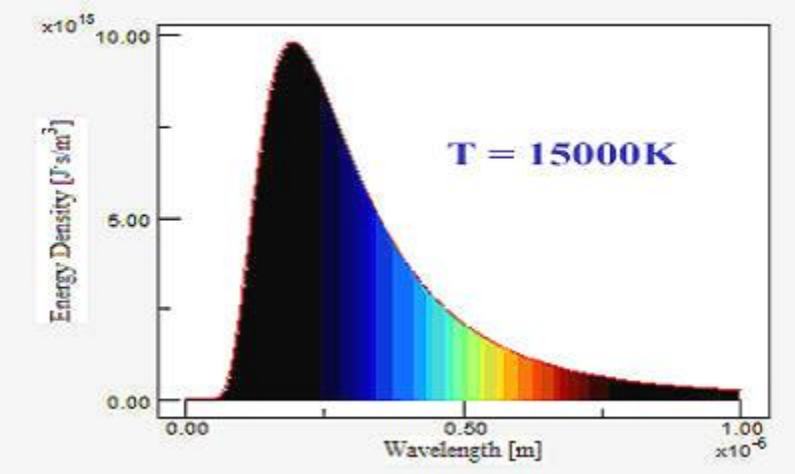
T is the temperature in Kelvin

وثابت ستيفان لا يعتمد على المادة أو طبيعتها أو شكلها وهو ثابت عام.

وهذا القانون أثبته العالم بولتزمان باستخدام قوانين الديناميكا الحرارية وسمي باسميهما..

- **قانون وينز**

يتعلق قانون وينز بتردد الأشعة التي يكون عندها الإشعاع الحراري اكبر ما يمكن وقد وجد علمياً أن التردد يزداد بزيادة درجة الحرارة كما هو موضح في المنحنيات التالية:



ووضع العام وينز القانون التالي:

$$\nu_{max} = \text{constant} \times T \qquad \textbf{(Winz Displacement Law)}$$

حيث إن قيمة الثابت تساوي 5.88×10^{10}Hz/K

قام العالم وينز بوضع معادلة لتفسير توزيع كثافة الطاقة على الأطوال الموجية في حدود المدى من $\lambda \rightarrow \lambda+d\lambda$ وهي على النحو التالي:

$$E(\lambda)d\lambda = c_1\lambda^{-5}e^{-c_2/\lambda T}d\lambda$$

حيث أن c_1, c_2 ثوابت اختيارية لمطابقة المعادلة مع النتائج العملية ووجد أن هذه المعادلة تنطبق على إشعاع الجسم الأسود عن الترددات العالية فقط (الأصول الموجية القصيرة).

- **<u>نظرية رايلي جينز</u>**

اعتبر العالمان رايلي وجينز أن الجسم الأسود مكون من عدد كبير من المتذبذبات المشحونة التي تتحرك حركة توافقية بسيطة simple harmonic motion وهذه المتذبذبات المشحونة تطلق أشعة كهرومغناطيسية أثناء حركتها بحيث تكون كثافة توزيع الطاقة المنبعثة من الجسم الأسود مساوية لكثافة الطاقة للمتذبذبات عند الاتزان الحراري. وقد وضع العالمان بناء على هذه الفرضية المعادلة التي تعطي عدد المتذبذبات لكل وحدة حجوم المسئولة عن كثافة الإشعاع عند طول موجي معين حيث أن:

$$g(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi}{\lambda^4}d\lambda$$

وتكون طاقة هذا العدد من المتذبذبات هي المسئولة عن طول موجي في المنطقة من $\lambda \rightarrow \lambda + d\lambda$ عند درجة حرارة T

$$E(\lambda, T) = \frac{2\pi C}{\lambda^4}KT$$

حيث KT تعطي قيمة متوسط طاقة المتذبذبات و K هو ثابت بولتزمان والطرف الأيسر من المعادلة يعبر عن الطاقة لكل وحدة حجوم.

ولكن هذه الفرضية لرايلي وجينز فشلت في تفسير طيف الجسم الأسود.

<u>نظرية بلانك لإشعاع الجسم الأسود</u>

وضع بلانك نظريته لتفسير ظاهر إشعاع الجسم الأسود وقد كانت نظريته ناجحة وذلك لاعتماده على استخدام مبدأ تكميم الإشعاع. وقد وضع بلانك بعض الافتراضات على أساس النظرية الكمية للإشعاع وهي على النحو التالي:

(1) كمية الطاقة المنبعثة أو الممتصة من المتذبذب في الجسم الأسود تتناسب مع تردده أي أن

$$\Delta E \alpha \nu$$

$$\Delta E = h\nu$$

where h is the blank constant = 6.6×10^{-34}J.s

(2) تأخذ طاقة المتذبذب قيم محددة (مكممة) أي أن

$$E_n = nh\nu \quad *$$

Where n is the principle quantum number (n = 0, 1, 2, 3, …….)

فإذا كانت n=0 يكون المتذبذب في أدنى قيمة له في الطاقة ويسمى Ground Level أما إذا كانت n=1 فإن المتذبذب يكون في مستوى طاقة رقم (1) وهكذا ….

من هنا نلاحظ أن بلانك ادخل مبدأ التكميم على المتذبذبات في الجسم الأسود وأنها لها طاقات محددة وبقيم محددة بالعدد الكمي n ولا وجود لقيم متصلة للطاقة كما افترض العالمان رايلي جينز.

وعند امتصاص أشعة أو انبعاثها من الجسم الأسود فإن طاقتها تساوي فرق الطاقة بين مستويات الطاقة للمتذبذبات بحيث إن

$$E = h\nu$$

ويحمل هذا الكم من الطاقة جسيم يسمى الفوتون Photon وتكون كمية حركته

$$P = h/\lambda$$

وعلى أساس هذه الفرضيات تمكن العالم بلانك من اشتقاق قانون بلانك لإشعاع الجسم الأسود الذي فسر النتائج العلمية

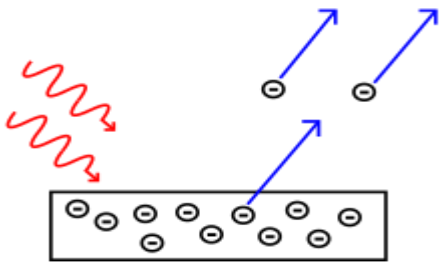
$$E(\lambda,T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{h\nu/KT}-1}$$

$$E(\nu,T) = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2}\frac{1}{e^{h\nu/KT}-1}$$

- **الفوتونات : كمية الضوء**

في عام 1905 اتخذ ألبرت آينشتاين خطوة إضافية أشار فيها أن كمية الضوء لم تكن خدعة رياضية حيث أن الطاقة في شعاع الضوء تظهر في حزم فردية والتي تسمى الآن فوتونات وتحسب طاقة الفوتون الواحد عن طريق ضرب التردد بثابت بلانك وقد تجادل العلماء لعدة قرون بين نظريتين محتملتين للضوء: هل هو موجة أم تيار من الجسيمات الصغيرة؟ وبحلول القرن التاسع عشر تم تسوية الجدال بشكل عام لصالح نظرية الموجة حيث كانت قادرة على تفسير آثار ملحوظة كانكسار وانحراف الضوء والاستقطاب وقد بين جيمس كليرك ماكسويل أن كلًا من الكهرباء والمغناطيس والضوء مظاهر لنفس ظاهرة الحقل الكهرومغناطيسي وتصف معادلات ماكسويل والتي هي مجموعة كاملة من قوانين الكهرومغناطيسية الكلاسيكية الضوء على أنها موجات مجموعة من الحقول الإلكترونية والمغناطيسية المتذبذبة وبسبب رجحان الأدلة لصالح نظرية الموجة فإن فكرة إينشتاين التقت مبدئيًا بشكوك هائلة ولكن وفي نهاية المطاف أصبح نموذج الفوتون محبذًا وكان أحد الأدلة المهمة لصالحه هو قدرته على تفسير عدد من الخصائص المحيرة للتأثير الكهروضوئي والذي سيتم وصف ه في القسم التالي ومع ذلك ظل تشبيه الموجة أساسيًا لا غنى عنه لمساعدته في فهم خصائص أخرى للضوء كانحراف الضوء.

- **التأثير الكهروضوئي**



يشع الضوء (الأسهم الحمراء، يساراً) فوق المعدن. إذا كان الضوء ذا ترددٍ كافٍ (أي طاقة كافية)، فإن الإلكترونات تنطلق (الأسهم الزرقاء، يمين)

The Photoelectric Effect
الظاهرة الكهروضوئية

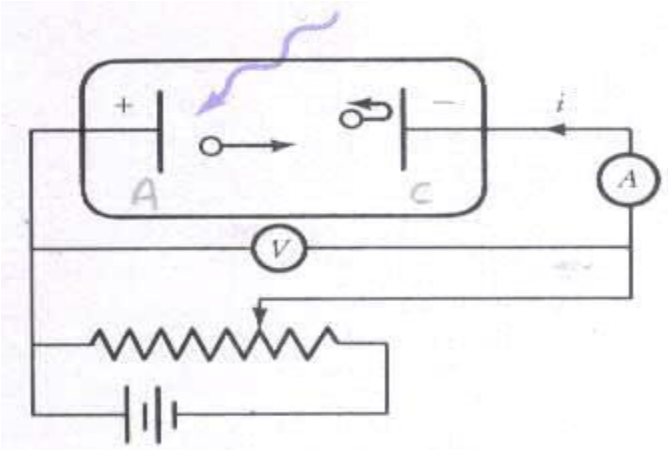
الظاهرة الكهروضوئية هي إحدى الظواهر العديدة التي يمكن منها انبعاث الكترونات من سطح مادة فمن هذه الظواهر (1) الانبعاث الحراري (2) الانبعاث الثانوي (3) الانبعاث الكهربي (4) الانبعاث الكهروضوئي.

الظاهرة الكهروضوئية تحدث عند سقوط إشعاع كهرومغناطيسي على سطح معدن فينتج عنه تحرير الكترونات من سطح المعدن. ولتفسير ما يحدث هو إن جزء من طاقة الشعاع الكهرومغناطيسي يمتصها الإلكترون المرتبط بالمعدن يتحرر منه ويكتسب طاقة حركة. وهذه العملية تعتمد على العديد من المتغيرات وهي:

- **تردد الشعاع الكهرومغناطيسي**
- **شدة الشعاع الكهرومغناطيسي**
- **التيار الفوتوضوئي الناتج**
- **طاقة حركة الإلكترون المتحرر من سطح المعدن**
- **نوع المعدن**

ولفهم تأثير كل عامل من العوامل السابقة فإننا سندرس تأثير العوامل السابقة على التيار الكهربي الناتج والذي يسمى هنا التيار الفوتوضوئي photocurrent لأنه نتج عن تحرير الالكترونات بواسطة الضوء (شعاع كهرومغناطيسي.)

من خلال إجراء عدة تجارب عملية تعتمد على تغيير احد هذه العوامل مع تثبيت الباقي ودراسة تأثيره على التيار الفوتوضوئي. وفي الشكل التالي يوضح الجهاز المستخدم لهذا الغرض.



عندما يسقط شعاع كهرومغناطيسي أحادي اللون (Monochromatic) على سطح معدن (الأنود) متصل مع الطرف الموجب للبطارية وموجود داخل وعاء مفرغ من الهواء وذلك لمنع تصادم الالكترونات المتحررة بجزيئات الهواء. عندما تتحرر الالكترونات من سطح المعدن وتتمكن من الوصول إلى اللوح السالب (الكاثود) - وفي الأغلب يكون من نفس مادة الأنود - فإن تيارا كهربيا يمر في الدائرة ويمكن قياسه من خلال الأميتر والذي يعبر عن شدة التيار الفوتوضوئي المار في الدائرة وكلما ازدادت عدد الالكترونات المتحررة من سطح المعدن كلما كان التيار الناتج اكبر. (لاحظ هنا أن اتجاه التيار الاصطلاحي في عكس اتجاه حركة الالكترونات).

لاحظ أن

- **طاقة الالكترونات المتحررة من الأنود مختلفة**
- **القوة الكهربية الناتجة عن المجال الكهربي بين الكاثود والأنود تعمل في عكس اتجاه حركة الالكترونات.**

طاقة حركة الالكترونات تكون مساوية للشغل المبذول عليها بواسطة المجال الكهربي من خلال العلاقة التالية:

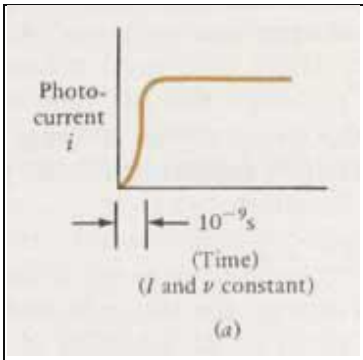
$$1/2mv^2=eV \qquad (1)$$

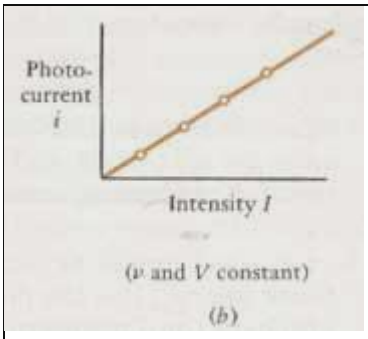
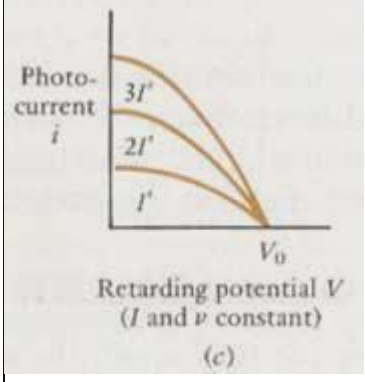
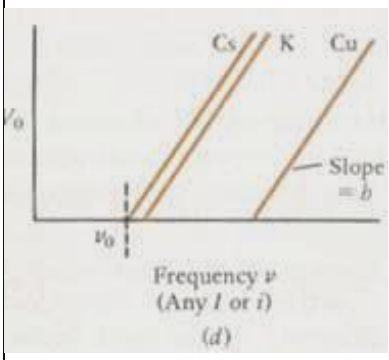
حيث v سرعة الالكترونات و V فرق الجهد المطبق بين لوحي الانود والكاثود. ويعمل فرق الجهد هذا على إيقاف الالكترونات ويمكن زيادته تدريجياً إلى أن نصل إلى القيمة التي عندها يسمى فرق الجهد المطبق بفرق جهد الإيقاف stopping potential وهو الجهد اللازم لإيقاف أسرع الالكترونات أو تلك التي تمتلك أعظم طاقة حركة. وعندها يكون التيار المار في الدائرة مساوياً للصفر.

$$1/2mv^2max=eV_o \qquad (2)$$

ومن خلال هذه المعادلة يمكن تقدير أقصى سرعة للالكترونات المنطلقة من الأنود وذلك من خلال زيادة فرق الجهد إلى أن يصبح التيار المار مساويا للصفر ومن ثم إيجاد مقدار هذا الجهد والتعويض في المعادلة (2).

النتائج العملية للتجربة

(1) بمجرد تسليط الشعاع الكهروضوئي على الأنود يمر التيار في الدائرة في نفس اللحظة تقريبا وقد قدر الفارق الزمني بـ 10-9s ولا يعتمد الفارق الزمني بين سقوط الشعاع الكهرومغناطيسي والمرور التيار على شدة الأشعة أو ترددها.	

(2) عند تثبيت التردد وفرق الجهد فإن التيار الكهروضوئي يزداد بزيادة شدة الأشعة الكهرومغناطيسية I الساقطة على الأنود.	
(3) عند ثبوت تردد الأشعة الكهرومغناطيسية وشدتها I فإن التيار الكهروضوئي يقل بزيادة فرق الجهد المطبق حتى تصل إلى القيمة صفر. وعندها تكون قيمة فرق الجهد هي Voوالتي تسمى بجهد الإيقاف . ولا تعتمد قيمة جهد الإيقاف على شدة الأشعة الكهرومغناطيسية عند نفس التردد ولنفس المعدن	
(4) وجد عمليا أن قيمة جهد الإيقاف تعتمد على تردد الأشعة الكهرومغناطيسية فكلما زاد التردد كلما كانت قيمة جهد الإيقاف اكبر. قيمة جهد الإيقاف تتغير بتغير نوع مادة المعدن. كما وجد أيضا أن قيمة جهد الإيقاف لا تعتمد على شدة الأشعة الكهرومغناطيسية. **كما تجدر الإشارة هنا إلى أن أدنى تردد noمطلوب للانبعاث الالكتروني من سطح المعدن يسمى بالتردد الحرج threshold frequency.**	

لا يمكن أن نحصل على تيار كهروضوئي إلا إذا كان تردد الأشعة الكهرومغناطيسية اكبر من التردد الحرج.

لأي معدن يستخدم في التجربة فقد وجد من تحليل النتائج العملية للتجربة (4) أن المنحنيات هي معادلة خط مستقيم يأخذ المعادلة التالية:

$$eV_o = h\nu - h\nu_o \quad (3)$$

حيث أن h هي ميل المنحنى والتي وجدت أنها ثابتة لكل المعادن المستخدمة في التجارب. وأن ν_o هي التردد الحرج لكل معدن. كما يمكن كتابة المعادلة السابقة بالصورة التالية:

$$h\nu = 1/2mv^2max + h\nu_o \quad (4)$$

التفسير الفيزيائي لنتائج التجارب العملية السابقة

لم يتمكن العلماء من ايجاد تفسير لنتائج التجارب العملية للظاهرة الكهروضوئية إلا بعد ان قام العالم ألبرت اينشتاين بتطبيق نظرية الكم Quantum theory على الاشعاع الكهرومغناطيسي في عام 1905.

طبقا لنظرية الكم فإن الأشعة الكهرومغناطيسية التي تعاملنا معها في الفيزياء الكلاسيكية على إنها موجات تنتشر في الفراغ تم اعتبارها في نظرية الكم على إنها جسيمات تسمى فوتونات photons كل فوتون يحمل طاقة E تعتمد على تردده من خلال المعادلة التالية:

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (5)$$

حيث ان الثابت h هو ثابت بلانك Planck constant

h=6.626*10-34 J.s

من وجهة نظر ميكانيكا الكم فإن الشعاع الضوئي ذو التردد νيحتوي على عدد من الفوتونات طاقة كل فوتون هي hνيتعامل كل فوتون مع إلكترون مرتبط بسطح المعدن فإذا كانت طاقة

الفوتون هذه اكبر من طاقة ربط الإلكترون بالمعدن فإنه يتحرر من سطح المعدن وباقي طاقة الفوتون يكتسبها الإلكترون المتحرر على شكل طاقة حركة تمكنه من الوصول إلى الكاثود.

وبناء على ما سبق يمكن تفسير نتائج التجارب العملية للظاهرة الكهروضوئية على النحو التالي:

<u>النتيجة (4)</u>

توضح المعادلة (4) مفهوم الطاقة المتبادلة بين الفوتون والإلكترون الذي يعطي التيار الكهروضوئي.

$$h\nu = 1/2mv^2_{max} + h\nu_o \qquad (4)$$

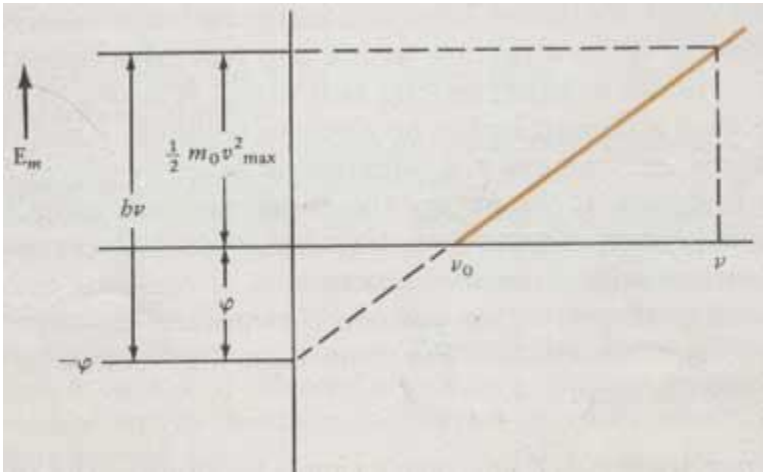
حيث يمثل الطرف الأيسر من المعادلة الطاقة التي يحملها الفوتون الساقط على سطح المعدن والتي يكتسبها الإلكترون المرتبط بسطح المعدن. يتحرر الإلكترون الأقل ارتباطاً بسطح المعدن مكتسباً طاقة حركية kinetic energy. أما الطرف الأيمن من المعادلة يعطي طاقة الإلكترون التي يكتسبها من الفوتون على صورة طاقة حركية وطاقة ربط. ويعبر عن طاقة ربط الإلكترون بسطح المعدن بالرمزφوالذي يعرف على انه دالة الشغل work function والتي تعرف على إنها الشغل اللازم لتحرير الإلكترون الأقل ارتباطا بسطح المعدن. وتعتمد دالة الشغل على نوع المعدن.

$$\varphi = h\nu_o \qquad (6)$$

ويمكن كتابة المعادلة (4) على الصورة التالية:

$$h\nu = 1/2mv^2_{max} + \varphi \qquad (7)$$

ولهذا فإن تردد الأشعة الكهرومغناطيسية للحصول على تيار كهربي يجب أن يكون طاقته اكبر من دالة الشغل.



النتيجة (3)

أعظم طاقة حركة يكتسبها الإلكترون عند تردد معين للأشعة الكهرومغناطيسية تعتمد فقط على التردد لان التردد يحدد قيمة طاقة الفوتون من خلال $E=h\nu$

النتيجة (2)

شدة الأشعة الكهرومغناطيسية من وجه نظر ميكانيكا الكم تكون عبارة عن طاقة الفوتون مضروبة في عدد الفوتونات الساقطة على المعدن لكل وحدة زمن لكل وحدة مساحة. ولهذا يمكن تفسير النتيجة الثانية على انه بزيادة شدة الأشعة الكهرومغناطيسية يزداد عدد الفوتونات وبالتالي يزداد عدد الالكترونات المتحررة ويزداد التيار الكهروضوئي.

النتيجة (1)

التيار الكهروضوئي يمر في الدائرة الكهربية بمجرد سقوط الفوتون على الإلكترون بدون أي تأخير زمني لان إذا كانت طاقة الفوتون الواحد كافية لتحرير الإلكترون يتحرر مباشرة

لينقل التيار ولا يحدث في أي حال من الأحوال أن تتراكم الفوتونات على الإلكترون لتكسبه الطاقة على شكل تراكمي حيث أن طاقة الربط لا تعتمد على شدة الأشعة إنما تعتمد على ترددها.

احتساب طاقة الشعاع الكهرومغناطيسي بوحدة الإلكترون فولت eV

يمكن التعبير عن الشعاع الكهرومغناطيسي بوحدة التردد (الهرتز Hz) أو بوحدة الطول الموجي (Å) ومن خلال المعادلة (4) و (5) يمكن أيضا التعبير بوحدة الطاقة الإلكترون فولت.

دة الإلكترون فولت هي وحدة طاقة وتعرف على إنها مقدار الطاقة التي يكتسبها كترون عندما يعجل في فرق جهد قدره 1 فولت.

$$E = qV = e\,V = 1.6x10\text{-}19\ C\ 1\ volt = 1.6x10\text{-}19\ eV$$

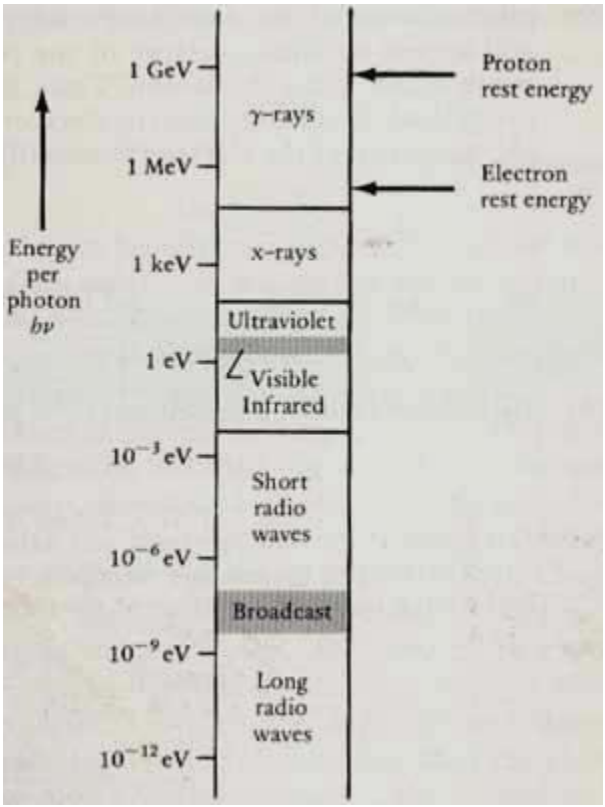
$$1\ joul = 1.6x10\text{-}19\ eV$$

يمكن إيجاد علاقة مباشر بين طاقة الفوتون بوحدة الإلكترون فولت والطول الموجي بوحدة الانجستروم فعلى سبيل المثال إذا كان شعاع كهرومغناطيسي طوله الموجي 1 انجستروم يحتوي على فوتون طاقته بوحدة الإلكترون فولت هي:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.626 \times 10^{-34}\ \mathrm{J\cdot s})(2.998 \times 10^{8}\ \mathrm{m/s})}{(1.0\ \text{Å})(10^{-10}\ \mathrm{m/Å})(1.602 \times 10^{-19}\ \mathrm{J/eV})}$$
$$= 1.240 \times 10^{4}\ \mathrm{eV} = 12.40\ \mathrm{keV}$$

وبصورة عامة طاقة الفوتون بوحدة الإلكترون فولت يمكن تحويلها إلى طول موجي بوحدة الانجستروم من خلال المعادلة التالية:

$$E = \frac{1.240 \times 10^4 \text{ eV}\cdot\text{Å}}{\lambda} = \frac{0.01240 \text{ MeV}\cdot\text{Å}}{\lambda}$$



مخطط للطيف الكهرومغناطيسي بوحدة الإلكترون فولت.

نلاحظ أن اقل طاقة يمتلكها الفوتون هي طاقة موجة الراديو واكبر طاقة يمتلكها الفوتون هي في موجة أشعة جاما..

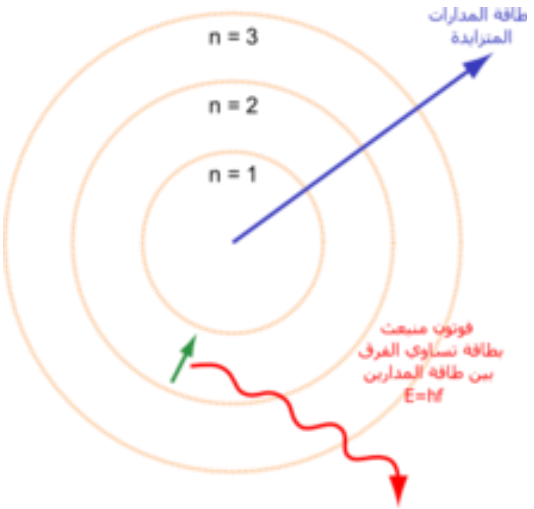
- **الوصف الكمي للمادة: نموذج " بوهر" للذرة**

في مطلع القرن العشرين، تطلب برهان وجود المادة نموذجاً للذرة مع سحابة من الإلكترونات السالبة المنتشرة والتي تحيط بنواة صغيرة عالية الكثافة وموجبة الشحنة ولأجل هذه الخصائص تم اقتراح نموذج تدور فيه الإلكترونات حول النواة كما تدور الكواكب حول الشمس. ومع ذلك، كان من المعروف أيضا أن الذرة في هذا النموذج ستكون غير مستقرة.

وفقا للنظرية الكلاسيكية (التقليدية) في هذا الشأن التي ترى أن الإلكترونات الدوارة تخضع لتسارع الجاذبية وبالتالي فإنها تطلق الإشعاع الكهرومغناطيسي، كما أن فقدان الطاقة يؤدي إلى التوجه في دوامة نحو النواة عندها يحدث الاصطدام بها في جزء من الثانية.

الحيرة الثانية المتعلقة بها كانت في الإشعاعات الطيفية للذرات فعندما يسخن الغاز تطلق الضوء ولكن في ترددات منفصلة مثلا الضوء المرئي المطلق من الهيدورجين يحتوي على أربعة ألون مختلفة كما هو موضح في الصورة أدناه بينما في المقابل الضوء الأبيض يحتوي على إشعاعات مستمرة بلا انقطاع عبر نطاق الترددات المرئية.

- **الصيغة الرياضية التي تصف طيف انبعاث الهيدروجين .**



نموذج بور للذرة، يبّين إلكترون من مدار واحد، ينتقل من مدار إلى آخر عن طريق انبعاث فوتون.

في عام 1913، قدّم نيلز بور نموذجاً جديداً للذرة يشمل مدارات الإلكترون المكممة، ولا تزال الإلكترونات في نموذج بوهر تدور حول النواة بقدر الكواكب التي تدور حول الشمس ويُسمح لها بالتواجد في مدارات معينة فقط وليس في أي مدار أو على أي مسافة . إن الذرة عندما تبعث أو تمتص الطاقة، فإن الإلكترونات لا تتحرك في مسار مستمر من مدار واحد حول النواة إلى آخر كما هو متوقع بشكل تقليدي، بدلاً من ذلك فإن الإلكترون يقفز من مدار إلى آخر على الفور ويُطلق الضوء المنبعث على هيئة فوتون، يتم تحديد الطاقات الممكنة من الفوتونات التي تخرج من كل عنصر على حسب الإختلافات في الطاقة بين المدارات وبالتالي فإن طيف الإنبعاث لكل عنصر من شأنه أن يحتوي على عدد من الخطوط.

نيلز بور

كان نموذج بور قادرًا على ربط الخطوط الطيفية المرصودة في انبعاثات الطيف للهيدروجين بالكميات الثابتة المعروفة مسبقاً، بالرغم من أن هذا النموذج لم يوضح لماذا يجب أن تكون المدارات مكممة بتلك الطريقة وكان نموذج بور غير قادر أيضاً على وضع توقعات دقيقة لذرات الإلكترونات المتعددة أو لشرح لماذا بعض الخطوط الطيفية أكثر سطوعاً من غيرها ومع مرور الوقت تم إدراك الطريقة التي تسلكها الإلكترونات بأنها مختلفة بشكل يلفت النظر عن ذرة بور وكذلك عن ما نشاهده في العالم من تجاربنا اليومية وهذا ما تم مناقشته في الأسفل عن الكم الحديث للنموذج الميكانيكي في الذرة.

- **ازدواجية الموجة-الجسيم**

عام 1923 اقترح لويس دي بروي فكرة أنه كما أن للضوء خصائص كلاً من الموجات والجسيمات معاً فإن للمادة أيضاً خصائص الموجات ، الطول الموجي λ المتعلق بجسيمٍ ما مرتبط بكمية حركته p من خلال ثابت بلانك : h تنطبق العلاقة السابقة (والتي سُميت بفرضية دي بروي) على كل أنواع المادة ولذلك فإن كل المواد تمتلك خصائص كلاً من الجسيمات والموجات، بعد 3 سنوات تم الكشف عن طبيعة الإلكترون المشابهة للموجات عن طريق إظهار أن شعاع من الإلكترونات يمكنه الحيود (الإنحراف) تماماً مثل شعاع الضوء.

في جامعة أبردين قام جورج ثومسون بتمرير شعاع من الإلكترونات عبر طبقة معدنية رقيقة ولاحظ أنماط الحيود المتوقعة وفي مختبرات بل قام كلاً من دافيسون وجيرمر بتمرير شعاع من الإلكترونات عبر شبكات كريستالية، تم لاحقاً الكشف عن ظواهر مشابهة في الذرات وحتى في الجزيئات الصغيرة حيث تمتلك خصائص الموجات أيضاً، مُنح دي بروي جائزة نوبل للفيزياء عام 1929 عن فرضيته، كما تقاسم ثومسون ودافيسون جائزة نوبل للفيزياء عام 1937 لتجاربهم المتعلقة بهذا المجال.

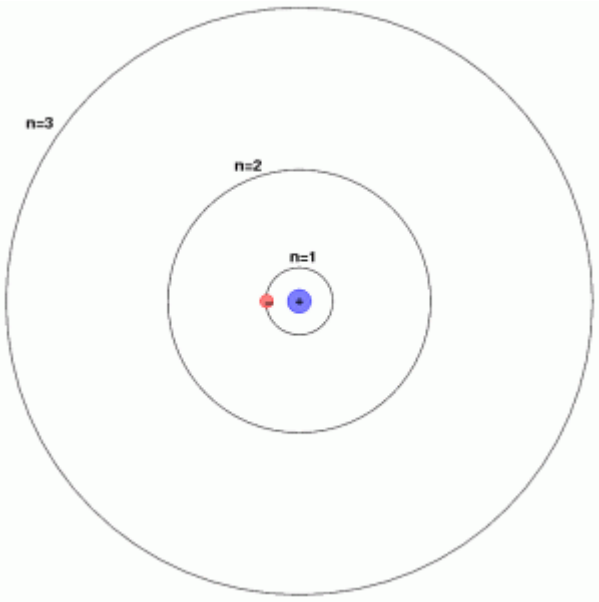
مبدأ ازدواجية الموجة-الجسيم يُظهِر أن المفهوم الكلاسيكي لنظرية "الجسيمات" و"الموجات" لايمكنه وصف سلوك المواد (سواء كانت جسيمات أو فوتونات) على المستوى الكمي بشكل كامل ودقيق ولذا فإن ازدواجية الموجة-الجسيم هو مثال على مبدأ التكامل principle of complementarityفي فيزياء الكم سوف يتم مناقشة مبدأ ازدواجية الموجة-الجسيم من خلال تجربة شقي يونغ Double-slit experiment . لا يمكن للمفهوم الكلاسيكي للجسيمات أو للموجات أن يصف مفهوم موجة-الجسيمات الازدواجية بشكل متكامل لسلوك كائنات الكم بكلا الحالتين: كفوتون أو كمادة، في الواقع اقترح عالم الفيزياء أي إس إيدينغتون في عام 1927 أنه " بإمكاننا أن نصف هذا الكيان كموجة أو

كجسيم وربما كحل وسط ينبغي أن نطلق عليه ."Wavicle " (هذا المصطلح اشتهر لاحقاً عن طريق الرياضي بانيش هوفمان) ، موجة الجسيمات الازدواجية هي مثال على مبدأ ازدواجية الجسيمات في الكم الفيزيائي ومثال فريد لموجة الجسيمات الازدواجية وهي تجربة الشقين، ستتم مناقشتها لاحقا فمعالجة الدكتور بروغلي لأحداث الكم هي النقطة البدء لشورديغر عندما أنشئ معادلة الموجة لشرح أحداث الكم النظرية.

- **الثغرة الكوانتية (التكميم):**

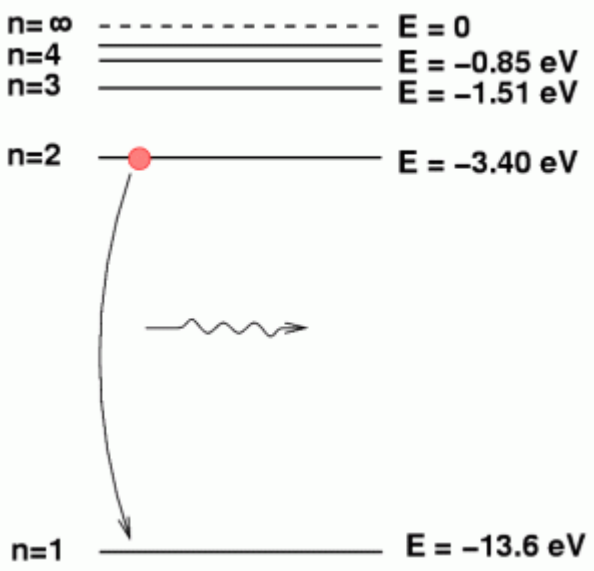
في أوائل القرن التاسع عشر، وخلال تفسير إشعاع الجسم الأسود، اكتشف ماكس بلانك أنّ الطاقة وعلى المستوى دون الذري من الممكن أن تتحرّر أو تُمتصّ بكميات منفصلة غير قابلة للتجزئة وليس بشكل مستمر تسمى "كوانتا" (مضاعفات ثابت معين)، مما يعني أنّ الإلكترونات لها مدارات ثابتة حول الذرة بما أنّ طاقتها تأتي بشكل منفصل، أي أنّه عندما يُثار الإلكترون أو العكس، سوف يمتص أو يُحرّر كمية محددة من الطاقة "كوانتا" مما يعني أنّه سوف يقفز إلى مدار أبعد أو أقرب من دون أن يتواجد بين هذه المدارات.

عندما يكتسب الإلكترون الطاقة فإنّه يقفز لمدار أبعد، وعندما يخسر الطاقة فإنّه يقفز لمدار أقرب، وتكون الطاقة اللازمة حتى يقفز الإلكترون لمدار أبعد أو أقرب مساوية لفرق الطاقة بين المدارين.



تظهر في الصورة ذرة الهيدروجين، حيث تُعطى كمية الطاقة لكل مدار بالعلاقة:

$$En = -\frac{13.6}{n^2}\ [\text{electronvolts}]$$



عندما يقفز الإلكترون من المدار الثاني إلى الأول، فعندها سوف يُصدر فوتون طاقته تساوي فرق الطاقة بين المدارين، وهناك علاقة تربط بين طاقة الفوتون وتردّده بعد ضربه بثابت:

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$$

h ثابت بلانك
c سرعة الضوء
λ الطول الموجي

ويظهر من المعادلة أنّ الطاقة الكبيرة سوف ترتبط مع طول موجي أقل، وعلى هذا الأساس يمكننا معرفة أنّ الأزرق يمتلك طاقة أكبر من الأحمر! وقد لوحِظَ سابقاً من تحليل الضوء من خلال المنشور أنّ الألوان المختلفة تعطي حرارات مختلفة، لذلك سوف يعتمد لون"تردد" الفوتون الصادر على الطاقة التي يمتلكها، والتي تعتمد على الفروق الطاقية بين مدارات الذرة ولكل ذرة مختلفة "مادة مختلفة" سوف تكون هنالك مدارات طاقة مختلفة، مما يعني أنّه بتحليل الضوء الصادر عن النجوم البعيدة قد نعرف الكثير عن المادة المشكِّلة لهذه النجوم وحرارتها! فمثلاً عند تحليل طيف الإصدار الذرّي لضوء الشمس يظهر طيفا ذرتيّ الهيدروجين والهيليوم بوضوح، وبهذا تمّ الاستنتاج بأنّ الشمس تتكون بصفة أساسية من الهيدروجين والهيليوم .

The wave aspects of material particles

الخصائص الموجية للجسيمات المادية

علمنا مما سبق أن للأشعة الكهرومغناطيسية خاصية موجية وخاصية جسيمية وان العديد من الظواهر الفيزيائية للأشعة الكهرومغناطيسية لا يمكن تفسيرها إلا إذا اعتمدنا على الخاصية الجسيمية مثل ظاهرة الانعكاس والانكسار والظاهرة الكهروضوئية، كما ان هناك ظواهر فيزيائية مثل التداخل والحيود لا يمكن تفسيرها إلا بالاعتماد على الخاصية الموجية للضوء.

بتطبيق نظرية الكم على الشعاع الكهرومغناطيسي يمكن اعتبار الضوء مكون من فوتونات لها طاقة E وكمية حركة p.

$$\text{Energy of the photon} \qquad E = h\nu$$

$$\text{Momentum of the photon} \qquad p = h/\lambda$$

تظهر الخصائص الموجيه في هاتين المعادلتين في الطرف الأيمن في λ و ν بينما تظهر الخواص الجسيمية في الطرف الأيسر من المعادلتين في E و p.

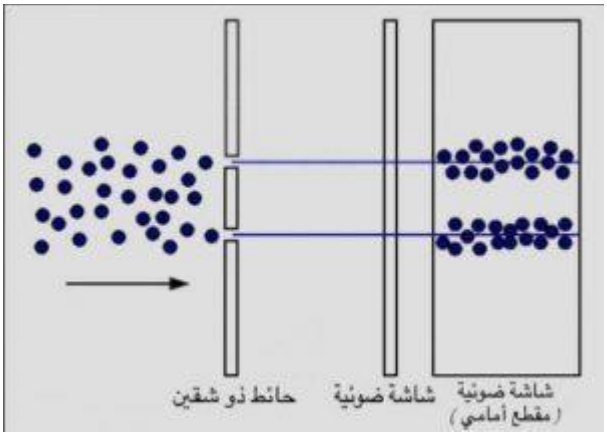
والسؤال الذي يطرح نفسه الآن هل يمكن للجسيمات المادية كالإلكترون؟ أي هل الخاصية المزدوجة موجودة في الجسيمات؟

وللإجابة على هذا التساؤل سنتناول دراسة الجزء الثاني من الفيزياء الحديثة.....

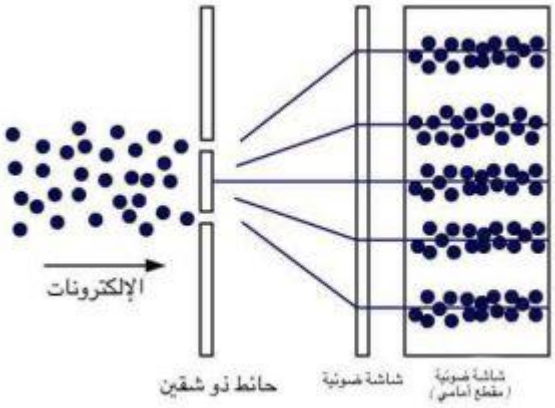
- **<u>الجسيمات تتصرّف كالأمواج:</u>**

هناك تجربةٌ شهيرة في الفيزياء الكميّة تسمى تجربة الشقّ المزدوج، والتي تكشف حقائق مُحيِّرة عن المادة، وهي أنّ الجسيمات تتصرّف كجسيمات وأمواج في نفس الوقت! سوف نتخيّل التجربة على مستوى أكبر في البداية.

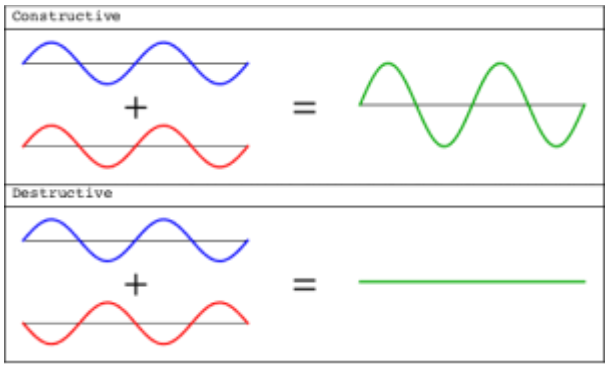
تخيّل أنّك تقوم بقذف كرات التنس عبر جدار فيه فتحتين، وقد وُضِعَ خلف هذا الجدار جدارٌ آخر وعليه حسّاسات بحيث يستطيع تحسّس مكان اصطدام الكرات به، وسوف يكون واضحاً أنّك عندما ترمي هذه الكرات باتجاه الجدار، فإنّ البعض منها سوف يذهب من الفتحه اليمينيّة أو اليساريّة أو يصطدم بالمنتصف، وعندما تنتهي من ذلك وتطّلع على النتائج، سوف تصطدم الكرات بالجدار الثاني في المكان المقابل للفتحتين فقط، كما في الصورة:



سوف نقوم الآن بتكرار نفس التجربة لكن على المستوى الأصغر بكثير! سوف نقوم برمي الإلكترونات باتجاه الجدار وتسجيل النتائج على الجدار الآخر، تبدو النتيجة واضحة، أليس كذلك؟ لا!

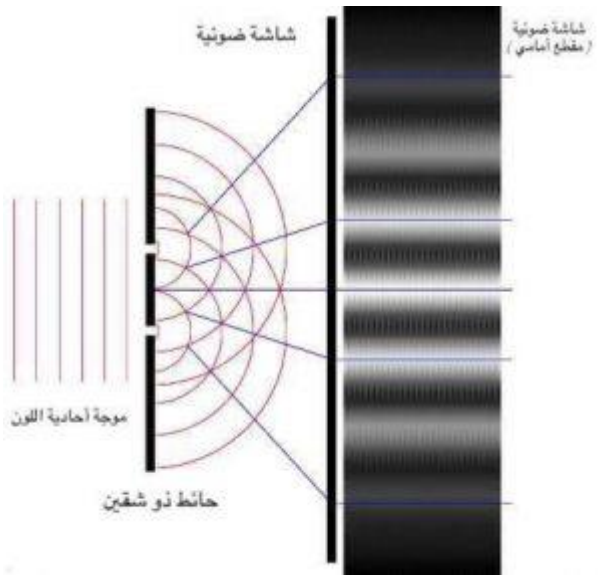


كما في الصورة، سوف تأخذ هذه الإلكترونات أماكن مختلفة وبنسب توزيع مختلفة، فهناك أماكن سيتواجد بها الكثير من الإلكترونات، وأماكن أخرى لن يتواجد بها. النمط الذي وجدناه يسمى نمط تداخل وهو متعلّق تحديداً بالموجات.



تخيّل تداخل الموجتين في القسم الأعلى من الصورة، إنّ قمة الموجة سوف تصبح أكبر وكذلك قاعها، لأن الموجتين متشابهتين. والآن في الحالة الأخرى، حيث أنّ الموجة الثانية تعاكس الأولى، سوف تفني الموجتين بعضهما!

إذا تخيّلنا أنّ الإلكترونات تتصرّف بشكل موجي أيضاً، وليس ككرات التنس، ماذا سيحدث؟



عندما تتجاوز هذه الموجات الشقّين، سوف تتشتّت حول هذه الثقوب مُشكّلةً جبهتين دائريتين من الموجات، هذه الموجات سوف تتفاعل مع بعضها وتشكّل أماكن ذروة (حيث توجد فيها أكبر كمية من الإلكترونات) وقاع (حيث لن تتواجد أيّة إلكترونات) وأماكن بين هذين الحدّين.

هذا النمط سوف يُظهر نفسه تماماً في حال قمنا بإرسال موجة باتجاه الجدار "ضوء مثلاً" ولذلك يبدو أنّ الموجة سوف تمثّل احتمالات تواجد الإلكترون بمكانٍ ما، ويبدو أنّ الإلكترون قد دخل من الشقّين بنفس الوقت. قام شرودينغر بتطوير معادلة تفاضليّة تصف تغيّر هذه الموجة مع الزمن، وبحلّ هذه المعادلة سوف نحصل على "دالّة الموجة" التي ستسمح لنا بحساب احتمال وجود الإلكترون بمكان ما

- **<u>تأثير المراقبة:</u>**

لأخذ فكرة أفضل سوف نقوم بمراقبة الشقّين حتى نعرف من أيّ شقّ قد دخل الإلكترون. في الواقع عند مراقبة هذه الإلكترونات سوف تسلك سلوك كرات التنس مجدداً ولن يظهر نمط التداخل بل سوف يظهر نمطٌ مثل الصورة الأولى، وسوف يدخل الإلكترون من أحد الشقّين، وكذلك في حال قمنا بسدّ أحد الشقّين. يبدو أنّ فعل المراقبة جعل دالّة الموجة تنهار وجعل الإلكترون يسلك سلوك جسيم.

رأينا سابقا أن الذرات والجزيئات في المستوى المايكروسكوبي لا تتصرّف بشكل يمكن التنبؤ به حيث أنّ الإلكترون يتصرّف مثل موجّه عندما لا تتم مراقبته، ويمثل هذا الموجّه احتمالات وجوده في مكان ما، ولكن عند مراقبته سوف يتصرّف كجسيم والسؤال الذي قد يطرحه البعض هو :لماذا يتصرّف الإلكترون بهذه الغرابة ولا تتصرّف كرة التنس هكذا مثلاً؟

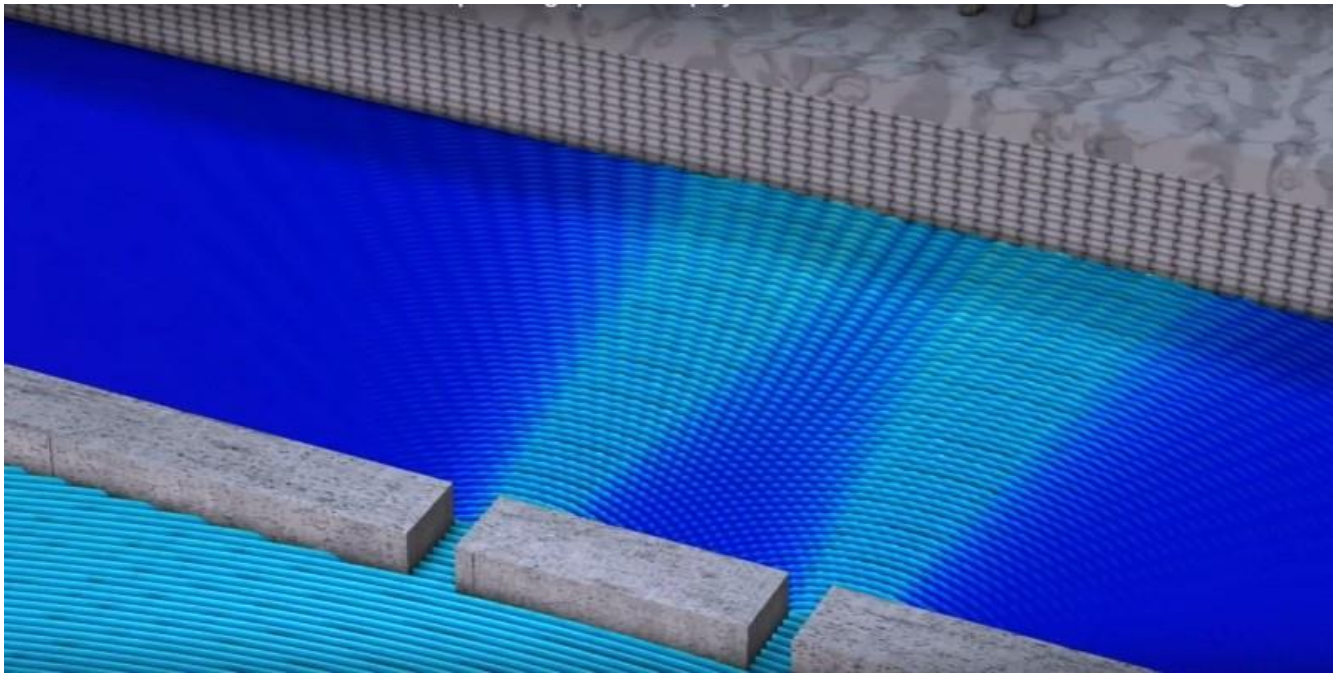
وبصيغةٍ أخرى، لماذا لا تدخل كرة التنس من الشقين بنفس الوقت عندما لا تتم مراقبتها؟ لماذا لا تتصرّف الأجسام الكبيرة مثل الصغيرة؟

في الواقع، تمتلك الأجسام الكبيرة خاصيّة موجيّة مثل الأجسام الصغيرة تماماً، ولكن الفرق هو أنها تمتلك طاقةً أكبر وترتبط الطاقة الكبيرة للأمواج مع التردّدات العالية والطول الموجيّ الصغير جداً، فسيكون لموجة كرة البيسبول طول موجي يساوي 33-^10 متر

$$E=h.f = h/\lambda$$

(تتناسب طاقة الجسم عكسياً مع الطول الموجي وطردياً مع التردّد)

ويمكن ملاحظة أنّ تفاعل الأمواج ذات التردّدات العالية مع بعضها يختلف عن ذلك في التردّدات المنخفضة نسبياً "مثل الإلكترون مثلاً"



فعندما تمرّ الموجة عالية التردد لن يظهر نمط التداخل كما في حالة الموجة منخفضة التردد وسوف تكون النتيجة مشابهة للسلوك الجسيمي، ولذلك لا تظهر الخاصية الموجية في حالة الأجسام الكبيرة، بل تظهر في الصغيرة فقط. ولنعد إلى حالة الإلكترون. سوف نقوم بتجربة ذهنية، كما في الصورة، سوف نضع جسماً خلف كل فتحة.

نقوم بقذف الإلكترون باتجاه الحائط، ونراقب ذلك، سوف يسلك الإلكترون سلوك الجسيم، وسوف يدخل من إحدى الفتحتين ويقوم بصدم أحد الجسمين وإيقاعه أرضاً.

<u>لكن ماذا لو قذفنا الإلكترون ولم نراقب النتيجة؟</u>

في الواقع عندها سوف تدخل موجة الاحتمالات من كلا الفتحتين وسوف يصبح حدث صدم الإلكترون للجسمين أيضاً تابعاً لموجة الاحتمالات، ومهما انتظرنا قبل أن نراقب النتيجة فلن يكون للجسيمن أي وضع محدد، وتبعاً للرياضيات التي تشرح الدّالة الموجيّة، فإنّ أيّاً من الحالتين هو ليس أكيداً وفقط عندما نقوم بالمشاهدة، سوف نرى النتيجة وسوف يكون أحد الجسمين واقعاً بينما الآخر واقفاً. وفي الواقع الأمر ليس أنّنا نحن فقط لا نعرف النتيجة قبل

أن ننظر، بل يبدو أنّ الكون نفسه لا يعرف أيّ جسم قد ظل واقفاً وأيّ جسم قد وقع حتى نقوم نحن بالمراقبة.

- **تفسير الطبيعة الموجية للجسيمات**

نفترض العلاقة بين احتمالية مشاهدة الجسيم ومربع سعة موجته يماثل تماما العلاقة بين احتمالية مشاهدة الفوتون ومربع سعته 2E

فإذا رمزنا لسعة موجة الجسيم بالرمز ψ ونسميها الدالة الموجية wave function فإن الدالة الموجية ψ هي كمية فيزيائية مربعها ψ^2 يتناسب طردياً مع احتمالية رصد الجسيم المادي عند نقطة معينة في الفراغ في وحدة الزمن..

وعلى هذا فإن الدالة الموجية للجسيم تماثل المجال الكهربي للفوتون, ومثلما تكون E دالة تعتمد على كلاً من الزمان والمكان فإن ψ أيضاً دالة في الزمان والمكان. وحيث انه من غير الممكن تحديد موقع أي فوتون عند لحظة معينة من الزمن بدقة متناهية ولكن من الممكن فقط تحديد الاحتمالية 2E لمشاهدة الفوتون في وحدة الزمن, وبالمثل من غير الممكن تحديد موقع أي جسيم مادي عند أي لحظة من الزمن بدقة متناهية ولكن من الممكن تحديد احتمالية وجوده □□ عند موقع في الفراغ في لحظة معينة وعلى هذا الأساس فإن الدالة الموجية □ للجسيم تعبر عن توزيع احتمالية تواجده المكاني..

- **فرضية ديئ برولى (De Broglie Hypothesis)**

إن موجة دي برولي المرافقة للجسيمات المادية(de Broglie matter wave)

The waves can be described using the language of *quantum* particles (photons).

Can particles behave as waves?

(السلوك ألموجي) لا يقتتصر على الفوتونات (يقول دوبري) بل يمتد على كافة الجسيمات المادية (الكترونات،بروتونات،نيترونات،.....).

وسنحاول استنتاج العلاقة التي تربط طول الموجة مع كمية الحركة (العلاقة((3)كما افترضها دوبري وذلك كما يلي:

•من فرضية بور :كمية الحركة الزاوية المدارية للإلكترون حول النواة تساوي عددا صحيحا من ثابت بلانك أي:

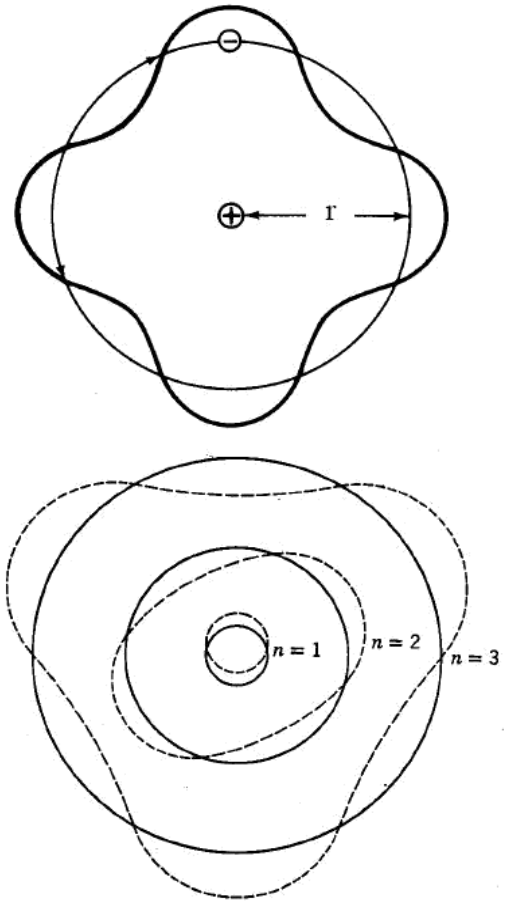
$$L = r.p = n\hbar = \frac{nh}{2\pi} \Rightarrow 2\pi r = \frac{nh}{p} \qquad (1-3)$$

من شرط بور – سمر فيلد : مسار الإلكترون حول النواة يكون مستقرا إذا كان يساوي عددا صحيحا من طول الموجة(الشكل 1) أي:

$$2\pi r = n\lambda \qquad (2)$$

من العلاقة 1 و2 نجد:

$$\lambda = {}^{h}/_{p} \qquad (3)$$



الشكل (3) مسار الإلكترون يساوي عددا صحيحا من طول الموجة

والنظرية النسبية لاينشتاين قدمت جوابا مقنعا لعلاقة دىبرولى من خلال علاقة التكافؤ بين الكتلة والطاقة ، فالكتلة التي تمثل الصفة المادية هي شكل من أشكال الطاقة ومعلوم أن الطاقة ترتبط بالتردد والطول ألموجي التي سبق عرضها أعلاه . والعلاقة الأخيرة لموجة دوبري تبين أن أي جسم يتحرك يمكن اعتباره موجة !! بما فيما ذلك الأجسام الضخمة !! ولكن الأمثلة التالية توضح أي نوع من الأجسام تحمل المعنى الفيزيائي للأطوال الموجية المرافقة للأجسام .

- **تمارين:**

1- ما هو طول موجة دوبري لإلكترون طاقته 50 إلكترون فولت؟

2- ما هو طول موجة دوبري لكرة تنس كتلتها 70 جرام وسرعتها 25 م\ثا؟

لاحظ أن الطول ألموجي الناتج صغير جدا ولا يحمل معنى فيزيائي وخارج نطاق الاكتشاف التجريبي لان الأجسام الكبيرة لا تظهر طبيعتها الموجية للعيان ولا يحصل لها تداخل بناء وهدام .

3- احسب طول موجة دوبري لجسيم كمية حركته(اندفاعه) 1 كيلو إلكترون فولت\سرعة الضوء؟

4- احسب طول موجة كرة السلة ذات الكتلة 0.2kg وسرعتها 10m/s.

ما هو تعليقك على الجواب؟

5- ما هو طول موجة الإلكترون في ذرة الهيدروجين؟

هذا الطول ألموجي يساوي تقريبا قطر ذرة الهيدروجين ومن خلاله يمكننا تكوين تصور مبدئي لحجم الذرة , أي أن الخواص الموجية للإلكترون تعطينا أبعاد الذرة وهذه ميزة ممتازة لان الإلكترون يظهر كغيمة ضمن حجم يحدد أبعاد الذرة.

6- أحسب طول موجة النيترون علما أن طاقته الحركية لحظة تحرره من النواة تساوي 10Mev .

وهذا الطول ألموجي يتوافق مع أبعاد النواة والتي تكون من مرتبة الفيرمي، لاحظ بالمقارنة بين أبعاد الذرة والنواة نجد أن أبعاد الذرة اكبر من أبعاد النواة بمليون مرة ،وهو دليل على الكثافة العالية للمادة النووية(1 سم^3 مادة نووية تساوي تقريبا كتلته مقدارها 120 مليون طن).

7- أحسب طول موجة الكوارك الذي يمتلك طاقة حركية مقدارها 2000Me ..

- **تطور ميكانيكا الكم الحديثة**

ميكانيكا الكم نظريّة فيزيائية أساسية، جاءت كتعميم وتصحيح لنظريات نيوتن الكلاسيكية في الميكانيكا. وخاصة على المستوى الذري ودون الذري. تسميتها بميكانيكا الكم يعود إلى أهميّة الكم في بنائها (وهو مصطلح فيزيائي يستخدم لوصف أصغر كمّية يمكن تقسيم الإشياء إليها، ويستخدم في للإشارة إلى كميات الطاقة المحددة التي تنبعث بشكل متقطع، وليس بشكل مستمر).

قام إروين شرودنغر في عام 1925 بناءً على فرضية دي برولي بتطوير المعادلة التي تصف سلوك الموجة الميكانيكية الكميّة وتعد المعادلة التي يطلق عليها معادلة شرودنجر نسبة للعالم الذي اكتشفه، أساسية لميكانيكا الكم، فهي تعرّف الحالات المستقرّة للنظام الكمّي وتصف كيف تتغير الحالة الكمية للنظام الفيزيائي عبر الزمن . وكان سكرودنغ قادرا على حساب مستويات الطاقة في الهيدروجين وذلك بمعالجة إلكترون ذرة الهيدروجين كموجة كلاسيكي متحركا داخل جدارا من الجهد الكهربي بفعل البروتين. وتعيد هذه العملية إنتاج مستويات طاقة نموذج بوهر. كان ورنر هايزنبرغ في زمن سابق يحاول إيجاد تفسير للإختلافات الموجودة في قوة انبعاث طيف الهيدروجين بسلسة من التماثلات الرياضية إذ كتب عن قوة التماثلات الميكانيكية الكمية، بعد ذلك بوقت قصير أدرك زميله ماكس بورن أن طريقة هايزنبرغ في حساب احتمالات انتقال مستويات الطاقة المختلفة يمكن أن يفسر أفضل باستخدام مفهوم المصفوفات. في مايو 1926، أثبت شارودنغر أن نظريتي هايزنبيرغ لميكانيكا المصفوفات وميكانيكيا الموجة في التنبؤ بخصائص وسلوكيات الإلكترون متطابقتان رياضياً، لكن مع ذلك لم يتفق شارودنغر وهايزنبيرغ على التفسير المشترك للنظرية فهايزنبيرغ مثلاً لا يرى أي مشكلة في فرضية الانتقال الفوري للإلكترونات بين المدارات في الذرة، بينما كان شارودنغر يأمل بأن تتجنب النظرية القائمة على خصائص الموجة الطولية ما أسماه (القفزات الكمية حول النواة) والتي أقتبست من قبل فلهام فيين

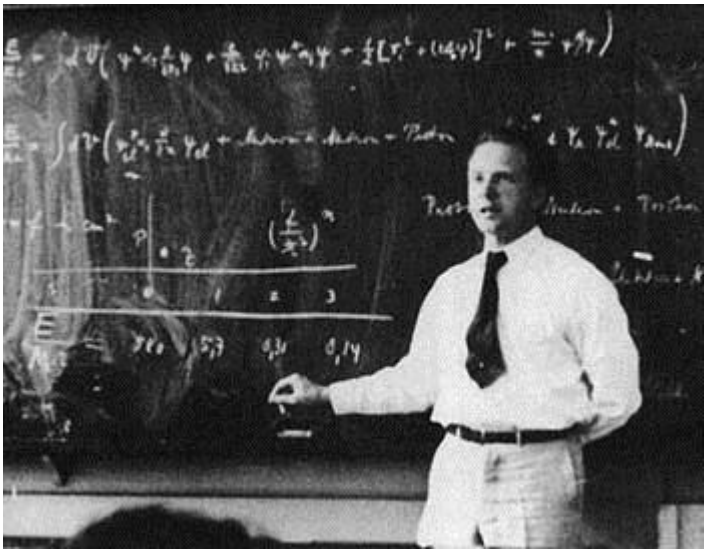
- **تأويل كوبنهاغن**

تفسير كوبنهاغن هو من أحد أهم التفسيرات شيوعاً في علم ميكانيكا الكم، ويفترض التفسير أن ميكانيك الكم لا تسفر عن وصف الظواهر الطبيعية بشكل موضوعي ولكن تتعامل فقط مع احتمالات الرصد والقياس، ولعل أغرب فروض هذا التفسير أن عملية القياس تؤثر على سلوك النظام الكمي بمعنى أن عملية القياس تسبب ما يعرف بـ انهيار الدالة الموجية، وقد وضعت المفاهيم الأساسية لهذا التفسير من قبل نيلز بور وفيرنر هايزنبرج وماكس بورن وغيرهم في السنوات 1924-1928م.

- **المبادئ الأساسية لتفسير كوبنهاغن هي:**

1. **يوصف النظام كلياً بواسطة دالة الموجة .Ψ (هايزنبرج)**
2. **كيفية تغير Ψ عبر الزمن معطاة بواسطة معادلة شرودنجر.**
3. **وصف الطبيعة هو قائم على الاحتمالات أساساً، فاحتمالية حدث ما - على سبيل المثال أين سيظهر الجسيم على الشاشة في تجربة الشقين مرتبطة بمربع القيمة المطلقة للسعة التي في معادلة الموجة (مبدأ الشك)**
4. **إنه من غير الممكن معرفة قيم كل الخصائص للنظام في نفس الوقت هذه الخصائص الغير معروفة بدقة يجب أن توصف بالإحتمالات. مبدأ الشك لهايزنبرج**
5. **المادة كالطاقة تظهر إزداوجية الموجة - الجسيم فيمكن لتجربة ما أن تستعرض الخصائص الجسيمية للمادة أو خصائصها الموجية لكن لا تستطيع استعراض كلتيهما في نفس الوقت مبدأ التكامل لـ بور.**
6. **أدوات القياس هي أساساً أدوات كلاسيكية وتقيس خصائص كلاسيكية كالموضع وقوة الحركة.**
7. **الوصف الميكانيكي الكمي لنظام كبير ينبغي أن يكون قريباً جداً من الوصف الكلاسيكي. مبدأ التوافق لـ بور وهايزنبرج.**

- **مبدأ عدم اليقين (عدم التعيين, الشك,....) لهايزنبرغ**
- **The Uncertainty Principle**



Werner Heisenberg, 1901-1976.

يعتبر مبدأ الريبة أو مبدأ هايزنبرغ أحد نتائج الطبيعة الموجية للمادة، حيث يضع حدوداً لمدى دقة قياسنا لزوج من الخواص المتكاملة "مثل المكان وكمية الحركة" أو "الطاقه والزمن" حيث أنّه كلما زادت دقة قياسنا لمكان جسيم ما، كلما قلّت معرفتنا عن كمية حركته، وبالعكس، حيث يأخذ المبدأ الشكل الرياضي:

Δx عدم التعيين بمكان الجسيم.
Δp عدم التعيين بكمية حركة الجسيم.
h ثابت بلانك المصغر.

فكلما قلّ عدم التعيين بخاصية، كلما ازداد في الأخرى، لكن لماذا؟

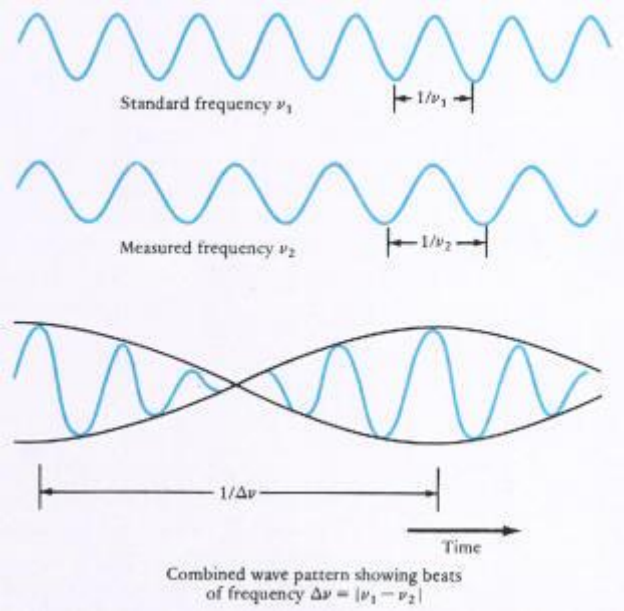
إذا قمنا بدراسة الجسيم باعتبار خواصه الجسيمية فهذا بالضرورة يؤدي إلى فقد خواصه الموجية والعكس صحيح أي اذا درسنا الجسيم باعتبار الخاصية الموجية فهذا سيؤدي إلى فقد خواصه الجسيمية. وإذا أردنا أن ندرس الخاصيتين معاً فإننا سوف لا تستطيع تحديد موقع الجسيم بدقة بل نعين احتمالية تواجد الجسيم في الفراغ

وفي هذه الحالة من عدم الدقة في تحديد موقع الجسيم فإنه لن يفقد خواصه الموجية.. لذا من المستحيل أن نطبق الخواص الموجية والجسيمية في وقت واحد على الجسيمات المادية أو الفوتونات فإذا اخترنا أحد الصفتين فلابد من استبعاد الأخرى. لذا فإن مبدأ الشك يجمع الخاصيتين معاً.

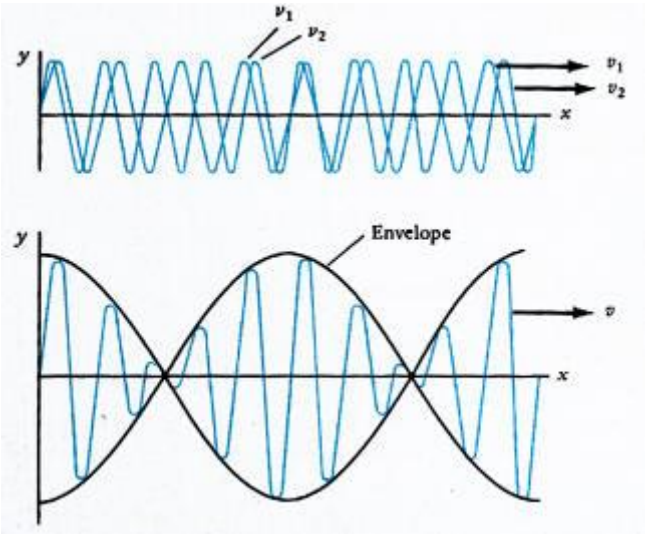
- **<u>مبدأ الشك في الفيزياء الكلاسيكية</u>**

الجسيم المثالي هو الجسيم الذي يمكن تعيين موقعه في الفراغ بدقة كما إن كتلته وشحنته محددة بدقة. والموجة المثالية هي موجة جيبية لا يمكن تحديد مدى انتشارها في الفراغ أي أنها تمتد امتداداً لانهائياً ولها تردد محدد ν وطول موجي معين λ وسرعة انتشار $v = \lambda\nu$

لنفترض أن لدينا موجة مثالية ونريد أن نقارن موجة مجهولة بتلك الموجة القياسية. والسؤال هنا كيف يمكن أن نقول بمنتهى الدقة أن تردد الموجة المجهولة يساوي تماماً تردد الموجة المثالية؟



سوف ندع الموجتان تداخلان لكي ينتج عنها ظاهرة الضربات Beats عدد الضربات في وحدة الزمن يساوي الفرق في ترددهما, إذا قمنا بمراقبة الموجتان لمدة محدودة من الزمن قد لا نلاحظ تغيراً ملحوظاً على سعة الموجة المحصلة الناتجة من التداخل ولكن لا يمكننا بذلك أن نجزم بأنه لا يوجد ضربات إذ أنه إذا انتظرنا وقتاً كافياً لأمكننا تسجيل ضربة. ولكي نكون متأكدين تماماً من عدم وجود ضربات أي أن فرق التردد بين الموجتين يساوي صفر أي لهما نفس التردد فلابد من الانتظار زمناً لانهائياً.



إذا كان الفرق في التردد بين الموجتين هو $\Delta\nu$ فإن الفاصل الزمني بين ضربة والتي تعقبها هو $1/\Delta\nu$

ولذلك لا بد من أن ننتظر زمناً Δt على الأقل أكبر من الزمن بين الضربتين أي أن

$$\Delta t \geq 1/\Delta\nu$$

بمعنى أن اللاحتمية (الشك) في قياس التردد $\Delta\nu$ تكون كبيرة إذا كان التردد قد قيس على امتداد فترة زمنية قصيرة وحتى يكون الشك في التردد $\Delta\nu$ مساوياً للصفر فإن Δt لا بد أن تكون لانهائية.

$$\Delta\nu\Delta t \geq 1 \qquad (1)$$

العلاقة التي تعطي اللاحتمية المناظرة للطول الموجي هو $\Delta\lambda$ يمكن اشتقاقها كالتالي:

$$\Delta x = v\Delta t$$

$$\Delta t \geq \frac{1}{\Delta\nu} \qquad \Delta t = \frac{\Delta x}{v}$$

$$\therefore \frac{\Delta x}{v} \geq \frac{1}{\Delta\nu}$$

But $v = \lambda\nu \rightarrow$ $\nu = \frac{v}{\lambda}$ $\rightarrow$ $\Delta\nu = \frac{v\Delta\lambda}{\lambda^2}$

$$\frac{\Delta x}{v} \geq \frac{\lambda^2}{v\Delta\lambda}$$

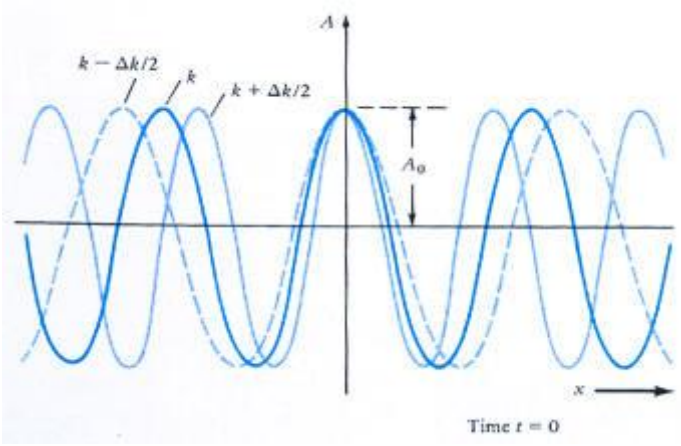
$$\Delta\lambda \geq \frac{\lambda^2}{\Delta x}$$

$$\Delta\lambda\Delta x \geq \lambda^2 \qquad (2)$$

المعادلة (2) تشير إلى انه إذا كان امتداد الموجة في الفراغ غير محدد أو لا حتمي بمقدار Δx فإن طولها الموجي غير حتمي بمقدار $\Delta\lambda$ حيث أن $\Delta x/\Delta\lambda=\lambda^2$. بمعنى أنه لكي تكون الموجة وحيدة اللون $\Delta\lambda=0$ فإن امتدادها يكون لا نهائي في الفراغ.

النبضة الموجية Wave Packet

النبضة الموجية هي اهتزازة موجية محصورة في مدى محدد من الفراغ يمكن إثبات (رياضياً) إن تلك الموجة مكونة من عدة موجات مختلفة في التردد ومتطابقة الواحدة فوق الأخرى أي لها محتوى ترددي $\Delta\nu$ وإذا جمعنا عدد الموجات ذات الترددات المختلفة التي تداخلها مع بعضها البعض لنحصل على نبضة حادة تماماً فسوف نجد أن جميع الترددات من صفر إلى مالانهاية أي أن المحتوى الترددي لهذه النبضة هو $\Delta\nu=\infty$ ومعنى ذلك أن $\Delta\lambda=\infty$ ومن المعادلة (2) فإن $\Delta x=0$ وهي الصفة الجسيمية.



- **مبدأ الشك لهيزنبيرج**

$$\Delta x=\Delta t=0$$

ومن ناحية أخرى فإن الشك في تحديد الطول الموجي والتردد يكونان مالانهاية

$$\Delta\lambda=\Delta\nu=\infty$$

إذا اعتبرنا حالة وسط أي ان يكون رصد الفوتون في المكان والزمان بطريقة غير محددة بدقة بل بنسبة شك قدرها Δx للمكان و Δt للزمان فإن من المعادلتين (1) و (2) يكون

$$\Delta\nu\Delta t \geq 1 \qquad (1)$$

$$\Delta\lambda\Delta x\geq\lambda^2 \qquad (2)$$

والمعادلة (1) تعني أنه في حالة قياس التردد لموجة خلال فترة محددة من الزمن Δt يكون الشك في التردد هو $\Delta\nu$

والمعادلة (2) تعني أنه في حالة قياس الطول الموجي لموجة في مسافة قدرها Δx فإن الشك في قياس الطول الموجي يكون $\Delta\lambda$.

هاتين المعادلتين تم استنتاجهما على أساس الفيزياء الكلاسيكية وفي الفيزياء الحديثة يستعان بهاتين المعادلتين في ربط الخصائص الجسيمية (الطاقة وكمية الحركة) مع الخصائص الموجية (التردد والطول الموجي). من خلال المعادلتين التاليتين:

Energy of the photon $E = h\nu$

Momentum of the photon $p = h/\lambda$

وبإجراء التفاضل للمعادلة الأولى نحصل على مقدار الشك في الطاقة بالنسبة للشك في التردد

$$\Delta E = h\Delta\nu$$

$$\Delta E \Delta t \geq h \qquad (3)$$

وهذه الصيغة الأولى لمبدأ الشك لهيزنبيرك والتي تنص على أن حاصل ضرب مقدار الشك في الطاقة والزمن يكون على الأقل اكبر من أو يساوي ثابت بلانك. وهذا يعني أن في حالة جسيم مثل الإلكترون أو الفوتون أو مجموعة من الجسيمات تكون في مستوى طاقة معين لفترة زمنية محددة بـ Δt, وعليه يكون الشك في مقدار مستوى الطاقة صفر إذا بقيت الجسيمات في ذلك المستوى لفترة زمنية لانهائية, وحيث أن الجسيمات تمكث في مستوى الطاقة فترة زمنية محددة إذا سيكون هناك مقداراً من الشك في الطاقة قدره ΔE ويساوي ثابت بلانك على Δt.

لجسيم يتحرك في بعد واحد على محور x فإن العلاقة بين الشك في كمية حركة الجسيم والشك في الطول الموجي يمكن الحصول عليه بتفاضل المعادلة $\lambda/p = h$

$$\Delta\lambda = \frac{h}{p_x^{\,2}}\Delta p_x$$

$$\Delta\lambda\Delta x = \frac{h\Delta p_x}{p_x^{\,2}}\Delta x \geq \lambda^2$$

$$\Delta p_x \Delta x \geq \frac{(\lambda p_x)^2}{h}$$

$$\Delta p_x \Delta x \geq h$$

- **وهذه الصيغة الثانية لمبدأ الشك لهيزنبيرك والتي تنص على أن حاصل ضرب مقدار الشك في الموقع ومقدار الشك في كمية الحركة يساوي على الأقل ثابت بلانك. وعليه فإنه من المستحيل قياس كلاً من المكان وكمية الحركة في نفس اللحظة بدقة متناهية.**

- **<u>نتائج مبدأ هايزنبرغ:</u>**

لانستطيع في هذه العجالة أن نغطي بالتفصيل مبدآ هايزينرغ في مقرر الكم 1 ولكن هذه مقتطفات من نتائج مبدأ اللاتحديد لهايزنبرغ

a. علاقة عدم التعيين عبارة رياضية تعبر عن وجود خواص جسيميه وموجية للجسيمات (فرضية دوبري) ،ولا معنى للقياس المفرد في العلاقة ،والجداء المزدوج هو الذي يعطي العلاقة أهميتها في ميكانيكا الكم.

b. لايجوز على الإطلاق دراسة الظاهرة الموجية للجسيم دون الظاهرة الجسيمية لأننا نحصل على مفاهيم خاطئة.

c. لايمكن تطبيق مفاهيم العالم ألجهري (الأجسام الكبيرة – قوانين نيوتن) على مفاهيم العالم المجهري الذي يستند إلى مبدأ هايزنبرغ.

d. إن مسألة الدقة المتناهية في القياس مسألة خيالية في الجمل المجهرية والتي تعتمد في القياس على مبدأ الاحتمال .

- **تمارين:**

- **أوجد مقدار الخطأ في قياس كمية تحرك إلكترون يحمل طاقة قدرها 1000 إلكترون فولت ويتحرك على استقامة محور x أفترض أن الخطأ الحتمي في قياس موقع الإلكترون لا يتعدى 1 انجستروم (وهذا يمثل الأبعاد الذرية)**

- **أوجد مقدار اللاحتمية (الشك) في قياس كمية تحرك جسم كتلته 10 جرام يتحرك بسرعة قدرها 10سم/ثانية. افترض أن اللاحتمية في تحديد موقع الجسم تساوي 10^{-3}سم**

- **التطبيق على ذرة الهيدروجين**

نموذج المدار الذري كان نموذج بور الذري كوكبياً حيث تدور الإلكترونات حول "الشمس" الذرية، لكن مبدأ الشك في الإلكترون ينص على أنه لا يستطيع أن يمتلك مكاناً محدداً وسرعة متجهة في أنٍ واحد كما تمتلك الكواكب بدلاً عن المدارات التقليدية ، لذلك يُقال عن الإلكترونات بأنها تقطن في مدارات ذرية، المدار هو "غيمة" ويعني الأماكن التي يُحتمل وجود إلكترون فيها لذا هو عبارة عن توزيع احتمالات عوضاً عن مكان محدد. لكل مدار ذرّي ثلاثة أبعاد، وهي نوعاً ما أكثر من المدارات الثنائية، وغالباً ما تصور كمناطق ثلاثية أبعاد داخلية مع احتمال وجود الإلكترون داخلها بنسبة 95%. وقد تمكن العالم إرفين شرودينغر من حساب مستويات طاقة الهيدروجين بمعاملة إلكترون ذرة الهيدروجين كموجة، ووصفت بـ " الدالة الموجيةΨ "، وأما في فرق الجهد الكهربائيV ، فيعد البروتون مكُوّنها. كما أن الحلول لمعادلة شرودينغر كانت تكمن في تصنيف احتمالات لأوضاع وأماكن الإلكترون. وللمدارات الذرية مجموعة مختلفة من الأشكال الثلاثية الأبعاد. ومن الممكن حساب طاقة هذه المدارات التي تتطابق بدقة مع مستويات الطاقة في نموذج بور.

- **وفي مثال شرودينغر، لكل إلكترون أربع خصائص:**

1. تعيين "مداري" يشير إلى ما إذا كانت موجة الجسيم الأقرب من النواة لها طاقة أقل أو أن الأبعد من النواة لها طاقة أكثر.

2. "شكل" المدار سواء كان كروي أو غير ذلك.

3. "ميل" المدار، وذلك بتحديد العزم المغناطيسي للمدار حول محور.z-

4. " عزل" الإلكترون.

والاسم المجمع لهذه الخصائص هو الحالة الكمومية للإلكترون .quantum state والحالة الكمومية يمكن أن توصف بإعطاء رقم لكلٍ من هذه الخصائص: وهذه الأرقام

تعرف بأعداد الكم للإلكترونquantum numbers ، الحالة الكمومية للإلكترون توصف بدالته الموجية، وينص مبدأ استبعاد باولي بأنه لا يمكن لإلكترونين في الذرة أن يكون لهم نفس القيم لكل الأرقام الأربعة. أول خاصية تصف المدار هي عدد الكم الرئيسي وهي الأعداد الصحيحة ورقم الكم لمدار الكتروني n هو نفسه نموذج بور بحيث يمثل n مستوى الطاقة لكل مدار كما أن القيم الممكنة لـ n هي أعداد صحيحة. عدد الكم التالي هو عدد الكم المداري الذي تمت الإشارة إليه يصف الشكل المداري Iوهذا الشكل نتيجة لزخم الزاوية المداري ويتم هذا الزخم الزاوي بمقاومة اللف المغزلي لزيادة السرعة أو إبطاءها تحت تأثير قوى خارجية ويمثل عدد الكم المداري زخم الزاوية المداري للإلكترون حول النواة والقيمة الممكنة لـ I هي الأعداد الصحيحة من 0 إلى 1

يُرمز لشكل كل مدار بحرف معين أيضاً. الشكل الأول يرمز إليه بالحرف) s ليساعد في تذكر كلمة .("sphere" الشكل الثاني يرمز إليه بالحرف p وله شكل الدمبل (الذي يستخدم في تمرين عضلات اليد)، المدارات الأخرى لها أشكال أكثر تعقيداً (أنظر المدار الذري) ويرمز إليها بالحروفd ، f، وg.

الرقم الكمي الثالث، الرقم الكمي المغناطيسي، يصف اللحظة المغناطيسية للإلكترون، ويرمز إليه بـml) أو .(m القيم المحتملة لـ ml هي أعداد صحيحة من -| إلى |: العدد الكمي المغناطيسي يقيس المُكَوِّن للعزم الزاوي في اتجاه معين، اختيار الاتجاه يتم اعتباطيا، اعتياديا يتم اختيار الاتجاه.z

عدد الكم الرابع، عدد الكم الدوار (متعلق "باتجاه" دوران الإلكترون) ويرمز له بـ ms، مع اتخاذ القيمة +1/2 أو -1/2.

- **<u>التشابك الكمي</u>**

ينص مبدأ باولي للاستبعاد على أنه لا يمكن لإلكترونين في نفس النظام أن تكون لهم نفس الحالة، الطبيعة -على أي حال- تترك الاحتمالية مفتوحة لأن يكون للإلكترونين

كلا الحالتين "متداخلة" على كل واحد منهم، نستذكر أن دوال الموجة التي تنشأ في نفس اللحظة من شقين إثنين تصل إلى شاشة الكشف في حالة تراكب فلا شئ مؤكد مالم تنهار الأشكال الموجية المتراكبة ففي تلك اللحظة يبرز إلكترون في مكان ما حسب الإحتمالية التي هي مربع القيمة المطلقة لمجموع السعات ذات القيم المركبة للشكلين الموجيين المتراكبين فالحالة هناك هي تصورية جدا حالياً فهي طريقة محددة في التفكير عن الفوتونات المتشابكة الفوتونات حيث تتراكب حالتان متضادتان إثنتان على كل منهما في نفس الحدث هي كما يلي:

تخيل أن تركيب حالتين يمكن وصفهما ذهنياً باللون الأزرق والآخر باللون الأحمر فسوف يظهر (تخيلياً طبعاً) كحالة أرجوانية ولنفترض أيضاً أن الفوتونان نتجا عن نفس الحدث الذري وقد يكون تكونهما ناتج عن إثارة كريستالة لديها خاصية امتصاص فوتون ذو تردد معين ومن ثم إصدار فوتونان لديهما نصف التردد الأصلي لذا فكلا الفوتونين يكونان بالحالة الأرجوانية.

إذا ما قام المختبر ببعض التجارب لتحديد كون أحد الفوتونات أحمر أو أزرق فإن هذه التجربة تغير حالة الفوتون المعني من كونه يمتلك حالة تراكب من "الأحمر" و"الأزرق" إلى فوتون لديه واحد فقط من هذه الصفات كانت المشكلة التي عانى منها اينشتاين مع هذه الحالة التخيلية هي أنه إذا كان أحد هذه الفوتونين في حالة ارتداد مستمر بين مرايا متعددة في مختبرعلى كوكب الأرض وقطع الفوتون الثاني نصف مسافة الطريق إلى أقرب نجم خارجي فعندما يتم الكشف عن الفوتون الأول بكونه أزرق أو أحمر فهذا يعني أن الفوتون البعيد عليه أيضاً ان يفقد حالته الأرجوانية فإذا تم اختباره بعد قياس الفوتون التوأم فإنه حتماً سوف يظهر في الحالة المعاكسة لحالة توأمه.

في محاولة لإثبات أن ميكانيكا الكم ليست نظرية كاملة بدأ اينشتاين بالتنبؤ الخاص بالنظرية التي تنص على أن اثنين أو أكثر من الجسيمات التي تفاعلت في الماضي

يمكن أن يُظهرا ارتباطاً قوياً عندما يتم قياس خصائصهما المختلفة في وقتٍ لاحق، سعى اينشتاين لتفسير هذا التقاعل بطريقة كلاسيكة أي من خلال ماضيهما المشترك، مفضلاً أن لا يكون التفسير على افتراض "عمل تخيلي عن بعد" وقام كلاً من إينشتاين وبودولسكي وروزن عام 1935 بكتابة ورقة بحثية علمية شهيرة عُرفت اختصاراً بـ EPR)إي-بي-آر نسبة إلى الحروف الأولى لأسمائهم) مفصلة مايُعرف الآن ب"مفارقة إي-بي-آر EPR paradox "والتي استناداً على مايُعرف الآن بالواقعية المحلية تحاول أن تُظهر من خلال النظرية الكمية أن الجسيم يمتلك موضع وكمية حركة في آنٍ معاً على عكس ما يفترضه تفسير كوبنهاغن القائل بأنه واحد فقط من هذه الخصائص يمكن أن يتواجد وفقط في اللحظة التي يتم قياسه فيها. تستنتج فرضية إي-بي-آر أن النظرية الكمية غير مكتملة لأنها ترفض الأخذ بالإعتبار الخصائص الفيزيائية التي توجد بشكل مؤثر في الطبيعة (تعد ال إي-بي-آر أحد أكثر فرضيا اينشتاين ذِكراً في مجالات الفيزياء) ففي نفس العام استخدم إرفين شرودنغر Erwin Schrödingerمصطلح "التشابك الكمي "entanglement" "وصرح قائلاً: "لايمكنني أن أصفه بأنه صفة واحدة بل سمة مميزة من سمات ميكانيكا الكم". يظل التساؤل حول ما إذا كان "التشابك الكمي" حالة واقعية محل خلاف وجدل بين العلماء. كما تظل مبرهنة (لاتساويات) بيل Bell inequalities من أكبر التحديات التي تواجه فرضية اينشتاين.

- **المعنى الفيزيائي للدالة الموجية(التابع ألموجي) المرافقة للجسيم المادي**

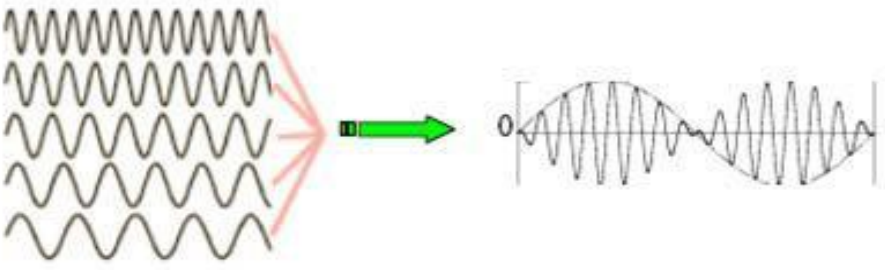
- **مقدمة**
- **المعلومات التي تحويها الدالة الموجية المرافقة للجسيم المادي وفق المنظور الجديد**
- **احتمال وجود الجسيم في مكان ما**

- **مقدمة:**

يبدو من خلال دراسة سرعة المجموعة أن الموجة المرافقة للجسيم ليست جيبية بل تراكب عدة موجات جيبية متقاربة التردد(حزمة أمواج) لتعطي دالة مركبة ، يمكن تحليل حزمة الأمواج تلك وفقا لتحليل فورييه حيث يمكن تحليل أي دالة دورية إلى مجموع دوال جيبية وفق آلية رياضية (راجع الرياضيات للفيزيائيين) يمكن من خلالها التعرف على الدوال الجيبية التي شكلت الدالة الدورية ،أي أن الدالة الموجية التي سنتعامل معها مستقبلا هي حزمة الأمواج (مجموعة الأمواج المتراكبة) ،يمكن كتابة ذلك بالشكل:

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2 + \Psi_3 + \cdots \Psi_n$$

(1)



الشكل (1): تراكب عدة موجات تعطي نبضة مغلفها يمثل سعة الدالة الموجية

مثال تراكب موجتين متقاربين في التردد والعدد ألموجي:

$$\Psi(x,t) = \Psi_1(x,t) + \Psi_2(x,t)$$
$$\Psi_1(x,t) = \sin(kx - \omega t)$$
$$\Psi_2(x,t) = \sin((k+\Delta k)x - (\omega + \Delta\omega)t) \quad \textbf{(2)}$$

وجمع الدالتين يعطي:

$$\Psi(x,t) = 2\cos\left(\frac{\Delta k}{2}x - \frac{\Delta\omega}{2}t\right)\sin\left(\frac{2k+\Delta k}{2}x - \frac{2\omega+\Delta\omega}{2}t\right)$$

(3)

وذلك بالاستفادة من القاعدة الرياضية:

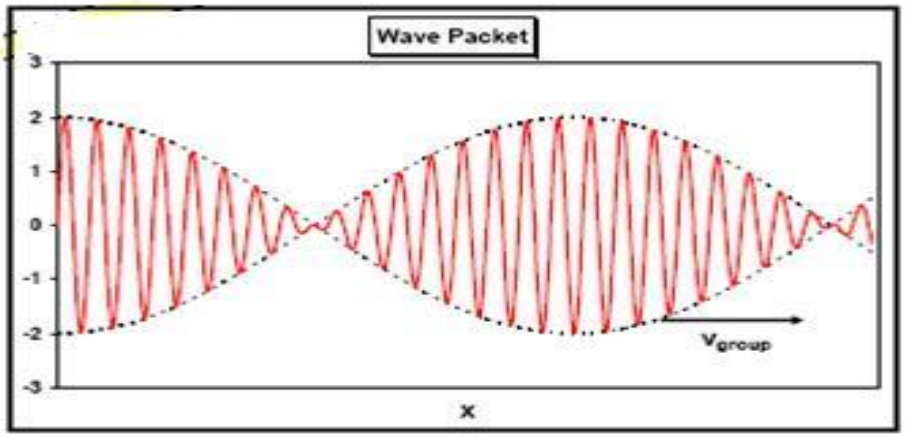
$$\sin A + \sin B = 2\cos\left(\tfrac{1}{2}(A-B)\right)\sin\left(\tfrac{1}{2}(A+B)\right) \quad \textbf{(4)}$$

Now suppose that $\Delta k << 2k$ and $\Delta\omega << 2\omega$ so that

$$\Psi(x,t) \approx 2\cos\left(\frac{\Delta k}{2}x - \frac{\Delta\omega}{2}t\right)\sin(kx-\omega t) = P(x,t)\sin(kx-\omega t).$$

(5)

العلاقة (5) تمثل الدالة الموجية الجديدة حيث P(x,t) يمثل سعة الموجة ويلاحظ أنها تمثل موجة جيبية تغلف حزمة الأمواج المتراكبة(الشكل 2).



الشكل (2): تراكب (تداخل) موجتين

- **المعلومات التي تحويها الدالة الموجية المرافقة للجسيم المادي وفق المنظور الجديد:**

نستفيد هنا من الدالة الموجية للموجة الكهرومغناطيسية باعتبار أن الفوتون يمثل الجانب المادي للموجة والتي نحصل عليها من حل المعادلة التفاضلية الموجية للفوتون وتكتب بالشكل:

$$\nabla^2\phi(r,t) = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\phi(r,t)}{\partial^2 t}$$

$$\phi(r,t) = A\,e^{i(\vec{\kappa}.\vec{r} - \omega t)} \qquad (6)$$

المعادلة (6) دالة مركبة (عقدية)تحوي وصفا موجيا لأنها تحوي متجهة الموجة والتردد الزاوي (لاحظ أن A تمثل سعة الموجة الموصوفة أعلاه)،ويمكننا استخدام العلاقات التي تربط الخواص الموجية مع الخواص المادية من العلاقتين :

$$\vec{P} = \hbar\vec{k} \quad \Rightarrow \vec{k} = \frac{\vec{P}}{\hbar}$$

$$E = \hbar\omega \quad \Rightarrow \omega = \frac{E}{\hbar} \qquad (7)$$

وبتعويض (7) في (6) نحصل على دالة موجية تحوي في طياتها وصفا ماديا وهو ما نريده هنا بتمثيل دالة موجية تعبر عن حركة جسيم مادي وسنعطيها العلاقة التالية:

$$\psi(r,t) = A\,e^{\frac{i}{\hbar}(\vec{p}.\vec{r} - Et)} \qquad (8)$$

العلاقة (8) هي حل لمعادلة شرودينجر ،أي يجب أن نحصل عليها من حلول معادلة شرودينجر لاحقا ، ولكننا هنا نبحث عن أهميتها وماذا تقدم لنا من معلومات عن الجسيم الذي ترافقه وتتحرك معه وبسرعته؟؟؟؟؟

<u>يفترض بالدالة الموجية أن تعطينا كافة المعلومات الفيزيائية المتعلقة بطاقة الجسيم وكمية حركته وهذه أول ميزة لهذه الدالة الموجية. والفقرات اللاحقة تعطي الميزات الأخرى.</u>

- **<u>احتمال وجود الجسيم في مكان ما:</u>**

تحتل الدالة الموجية أو دالة الموجة مكانة مهمة في ميكانيكا الكم، حيث ينص مبدأ الشك على عدم قدرتنا بنفس اللحظة تحديد موضع وسرعة جسيم ما بنفس الدقة، لكن نعمد إلى دالة موجية مرافقة لكل جسيم حسب التصور الموجي الذي قدمه شرودنغر، وتقوم هذه الدالة الموجية بتحديد احتمال وجود الجسيم في أي نقطة من الفراغ التي يمكن للجسيم التواجد به، وذلك حسب اقتراح ماكس بورن 1926م (Max (Born والذي بين فيه أن مربع الدالة الموجية($\psi^2 = \psi\ \psi^*$ النجمة تعني مرافق الدالة المركبة(عقدية أو تخيلية))يحمل معنىً فيزيائيا رائعا ألا وهو معرفة احتمالية وجود الجسيم في عنصر حجم مقدار dv بدلالة دالته الموجية، فالدالة الموجية ψ لإلكترون ذرة الهيدروجين (مثلا)المتواجد في مكان ما من الفضاء حول النواة يمكن معرفة احتمالية تواجده في الأمكنة المختلفة المحيطة بالنواة من خلال العبارة الرياضية التالية:

$$dp = \left|\psi^2(r,t)\right| dv = \psi(r,t)\psi^*(r,t)\,dv \qquad (9)$$

حيث *dp* احتمال تواجد الجسيم بالحجم *dv* ويأخذ دوما قيما حقيقية.

في العلاقة (9) عند تقسيم الطرفين على عنصر الحجم نحصل على أبعاد كثافة نسميها كثافة الاحتمال (probability density)كما في العلاقة التالية:

$$\rho(r,t)=\frac{dp}{dv}=\left|\psi^2(r,t)\right| \qquad (10)$$

أما احتمال تواجد الجسيم في الفضاء كله فإننا نكامل العلاقة (9) على الفضاء كله الممتد من اللانهاية والذي يعبر عن مجموع احتمالات تواجد الجسيم في كل عناصر الحجم المتراصة حول بعضها البعض مكونة الفضاء اللانهائي ، وهنا نحن متأكدون من تواجد الجسيم في هذا الفضاء المفروض وبالتالي فان احتمال تواجد الجسيم سيكون(100%=1)،ونكتب ذلك بالعلاقة الرياضية التالية:

$$\int_0^1 dp=\int_{-\infty}^{+\infty}\left|\psi^2(r,t)\right|dv=\int_{-\infty}^{+\infty}\psi(r,t)\psi^*(r,t)dv=1 \qquad (11)$$

إن العلاقة التي تحقق الشرط في العلاقة (11) تسمى دالتها الموجية بالدالة المعايرة أو المنظمة وتسمى العلاقة بعلاقة المعايرة أو شرط لتنظيم (normalization condition)،وإذا كانت الدالة ليست معايرة فإننا نضربها بثابت بحيث تتحقق العلاقة (11) كما يلي:

$$\int_0^1 dp=\int_{-\infty}^{+\infty}|\psi(r,t)|^2dv=\int_{-\infty}^{+\infty}\psi(r,t)\psi^*(r,t)dv=N\neq 1$$

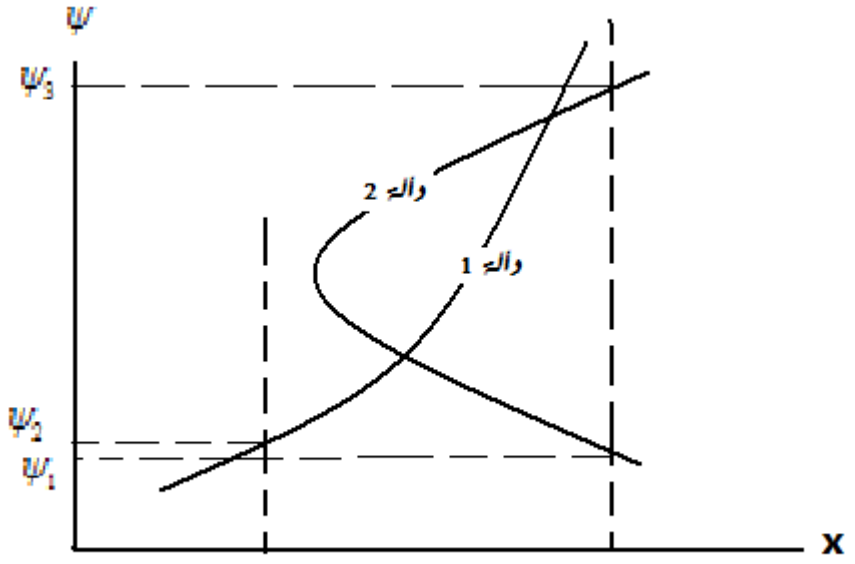
$$\int_{-\infty}^{+\infty}\psi(r,t)\psi^*(r,t)dv=N\Rightarrow\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{|\psi(r,t)|^2}{N}dv=1$$

$$\frac{1}{N}\int_{-\infty}^{+\infty}|\psi(r,t)|^2dv=1 \qquad (12)$$

- **<u>يشترط بالدالة الموجية التي تحقق شرط المعايرة مايلي</u>**

- **أن تكون الدالة الموجية أحادية القيمة أي أن كل قيمة محددة للموضع يقابلها قيمة وحيدة للدالة الموجية فقط وليس أكثر، وهذا شرط أساسي لان الدالة أحادية القيمة تعطي احتمال واحد لتواجد الجسيم بينما المتعددة القيمة تعطي**

أكثر من احتمال لتواجد الجسيم وهذا مرفوض لان الجسيم لايمكن أن يتواجد في أكثر من مكان في نفس اللحظة والعكس أيضا لايمكن لجسيم أن يكون له دالتان مختلفتان في نفس المكان ، انظر الشكل (3) يمثل دالتين أحداهما أحادية القيمة والثانية متعددة القيمة.



الشكل (3) يمثل دالتين أحداهما أحادية القيمة والثانية متعددة القيمة

- **أن تكون الدالة الموجية متصلة (continuous) وكذلك مشتقاتها متصلة ، لأن كون الدالة غير متصلة (عندها انقطاع في الدالة في مكان ما) يصبح الجسيم غير في معرف في منطقة الانقطاع.**

- **يجب على الدالة أن تكون معرفة في كل نقطة ولا يجوز ان تكون قيمتها مالانهاية لان احتمال تواجد الجسيم يصبح مالانهاية وهو أمر غير مقبل فيزيائيا.**

- **معادلة شرودنجر**

معادلة شرودنجر هي معادلة تفاضلية من الدرجة الثانية تحققها دالة موجية. هذه المعادلة تصف تطور حالة الجسيم خلال الزمن كما تحدد الحالات المستقرة للجسيم في وضعيات معينة.

تطلّب التصور الجوهري الجديد الذي أعلنه ديبرولي وجود فيزياء جديدة. كيف من الممكن أن تتحد الطبيعة الموجية والجسمية في الرياضيات؟ قام آينشتاين سابقاً بربط طاقة الفوتون مع تردد الضوء، والذي بدوره أثبت وجود علاقة مع طول الموجة حسب المعادلة:

$\lambda = c/f$. **حيث أنّ λ هي طول الموجة، و c هي سرعة الضوء، و f هي التردد. وباستخدام نتائج النظرية النسبية من الممكن أن نوجد تناسب بين الطاقة والفوتون وكمية تحرّكه. لنخرج بالعلاقة التالية:**

$$\lambda = h/p$$

حيث أنّ λ هي طول موجة الفوتون، و *p* هي كمية تحرّكه، و *h* هي ثابت بلانك.

وباستنتاج السابق، افترض ديبرولي أنّ نفس العلاقة بين طول الموجة وكمية التحرّك يجب أن تعمل على أي جُسيم.

في هذه المرحلة، من الأفضل أن تفصل حدسك عن ما هو معنى قول أنّ الجسيمات تتصرف كالأمواج (سيُشرح الموضوع بالتفصيل في مقالنا التالي) ومتابعة الرياضيات فحسب.

في الميكانيكا الكلاسيكية، تشرح معادلة الموجة Wave Equation تطوّر الموجة عبر الوقت، مثل موجة الصوت وموجة الماء، وهي معادلة تفاضلية حلّها هو اقتران الموجة الذي يُعطيك شكل الموجة في أي وقت.

على سبيل المثال، افترض أنّ لدينا أمواج تتحرك عبر حبل مشدود على المحور السيني(X-axis)، ويهتّز في سطح المحاور السيني والصادي .(XY-plane) حتى توصف الموجة كُلّياً، سنحتاج إيجاد إزاحة الحبل في اتجاه المحور الصادي، ويرمز لها بالرمز Y(x,t) حيث x هي كل نقطة يمر بها و tهي كل وقت خلال الحركة. باستخدام قانون نيوتن الثاني للحركة، نجد أنّ لدينا هذه المعادلة:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2},$$

حيث أنّ v هي سرعة الأمواج.

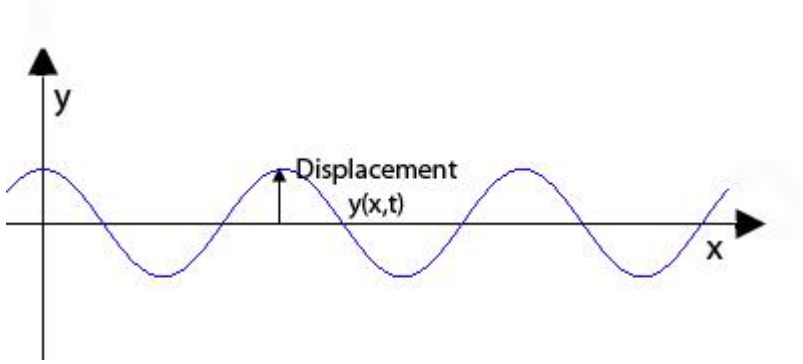


Figure2: the displacement in XY-plane

إنّ الحل العام لهذه المعادلة معقّدٌ بعض الشيء، بسبب حقيقة أنّه من الممكن أن يتذبذب الحبل بجميع الطُرُق الممكنة، وحقيقة أنّنا نحتاج معلومات إضافية عن النظام (مثل الحالة الأولية للنظام والظروف المحيطة به) حتى نجد بالتحديد ما هو نوع الحركة الموجود. ولكن كمثال، فإنّ المعادلة التالية تصف حركة الموجة في اتجاه المحور السيني الموجب (Positive X-direction) مع وجود التردد الزاويّ ω ، إذاً كما تم التوقّع، من الممكن إيجاد حل لمعادلة الموجة:

$$y(x,t) = A\cos\omega(t - \frac{x}{v})$$

وبالتشابه، يجب أن توجد معادلة موجيّة تحكم تطوّر لُغز "أمواج المادة"، بغض النظر عمّا يكون في خلال الوقت. يجب أن يكون حلّها اقتران موجي) ψ لكن يقاوم فكرة

وصفه على أنّه موجة حقيقية) والذي يخبرنا كل ما نريد معرفته عن النظام الكمومي– مثل جسيم واحد يدور داخل صندوق – في أي وقت. وهو ما أخرجه العالم النمساوي إيروين شرودنجر عام 1926. لنظام جسيم وحيد يدور ويتحرك في الثلاثة أبعاد، يمكن كتابة معادلته كالتالي:

$$\frac{ih}{2\pi}\frac{\partial\Psi}{\partial t} = -\frac{h^2}{8\pi^2 m}\left(\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\Psi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2}\right)+V\Psi.$$

حيث أنّ V هي طاقة الوضع للجسم (واقتران بدلالة x,y,z و(t ، و i هو العدد التخيّلي، و m هي كتلة الجسيم، و hهو ثابت بلانك. حل هذه المعادلة هو اقتران الموجة

$$\psi(x,y,z,t)$$

في بعض الحالات، لا تعتمد طاقة الوضع على الوقت. وفي هذه الحالة نستطيع في العادة حل السؤال من خلال اعتبار نسخة عدم الاعتماد على الوقت-time independentمن معادلة شرودنجر، حيث يعتمد الاقتران على الفراغ فقط:

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}+\frac{8\pi^2 m}{h^2}(E-V)\psi = 0,$$

حيث أنّ E هي الطاقة الكلّية للجسيم، وحلّ المعادلة الكاملة يكون:

$$\Psi = \psi e^{-(2\pi iE/h)t}.$$

تُطبَّق هذه المعادلات على جُسيم يتحرك حركة ثلاثية الأبعاد، لكن لديها نظائر تصف نظام بأي عدد من الجُسيمات. وعِوضاً عن صياغة اقتران الموجة كاقتران يعتمد على الموقع والزمن، يمكننا صياغته كاقتران يعتمد على كمية التحرك والزمن.

- **<u>إدخال عدم اليقين</u>**

سنقوم باستعراض حل معادلة شرودنجر لمثال بسيط في الفقرة التالية، وكيف يشابه حلّه بشكل كبير المعادلة الرياضية التي تصف حركة الأمواج.

لكن ما هو معنى هذا الحل؟ لا يمكن أن يُعطي موقع محدد للجُسيم المدروس في وقت مُعطى، لذلك لا يمكنه أيضاً التنبؤ بمسار الجُسيم مع مرور الوقت. بدلاً من ذلك، يُعطي هذا الحل اقتراناً مع الوقت ويُعطي قيمة لجميع الأماكن الممكنة($\psi(x,y,z,t)$ ، ويكون حلّه .(x,y,z) والسؤال الآخر، ما هو معنى هذه القيمة؟ في عام 1926 قام العالم ماكس بورن Max Born بإيجاد تفسير احتمالي للمعنى. حيث قام بافتراض أنّ مربّع القيمة المطلقة لاقتران الموجة يُعطي احتمالية لإيجاد الجُسيم في هذه الأماكن في الوقت المُعطى. بمعنى آخر، احتماليّة أنّنا سنجد هذا الجُسيم في منطقة R عند وقت tمن خلال الصيغتين التاليتين:

$$|\Psi(x,y,z,t)|^2$$

$$\int_R |\Psi(x,y,z,t)|^2 dxdydz.$$

يرتبط هذا التصور الاحتمالي بشكل أو بآخر بنتيجة صادمة لصيغة ديبرولي لطول الموجة وكمية التحرّك للجسيم، التي اكتشفها ورنر هايزينبيرج Warner Heisenbergعام 1927. وجد هايزينبيرج وجود حدود أساسية للدقة التي من الممكن أن نقيس بها موقع وكمية تحرّك جسيم متحرك. كلّما زادت دقّة قياسك لأحد الجُسيمات، قلّت دقّتك لقياس الآخر. وهذا ليس بسبب جّودة آلات القياس، وإنّما بسبب وجود انعدام يقين أساسي في الطبيعة. تُعرف هذه النتيجة الآن باسم مبدأ هايزينبيرج للايقينHeisenberg's uncertainty principle ، وهي إحدى النتائج التي تُقتبَس لتسليط الضوء على غرابة ميكانيكا الكم. وهذا يعني: أنه لا يمكننا في ميكانيكا الكم التحدث ببساطة عن مسار أو موقع أحد الجُسيمات التي نقوم بدراستها.

لِمَ يجبُ علينا تصديق هذه الادعاءات الخيالية؟ في هذا المقال، قُمنا بتقديم معادلة شرودنجر كما لو أنّها التُقطت من الفراغ، لكن من أين أتت فعلياً؟ كيف اشتقّها شرودنجر؟ اعتبر الفيزيائي ريتشارد فاينمان Richard Feynman هذا السؤال

سؤالاً عقيماً: "من أين أتينا بهذه المعادلة؟ ليس من الممكن اشتقاقها من أي شيء قد تعرفه. لقد أتت من عقل شرودنجر فحسب."

حتى الآن، تماسكت المعادلة في جميع التجارب التي أُجريت عليها. واعتبرها العلماء إحدى المعادلات الأساسية في ميكانيكا الكم، واعتبروها نقطة الانطلاق لجميع أنظمة ميكانيكا الكم التي نحاول تفسيرها مثل: البروتونات والنيوترونات والإلكترونات وغيرها. إنّ الظاهرة الأساسية التي أدّت إلى ميلاد ميكانيكا الكم، وسُمّيت لاحقاً بـ"مُحفّز شرودنجر" هي وصف ظاهرة طيف الطاقة لذرة الهيدروجين. بالنسبة لنموذج رذرفورد الذي شرحناه في مقالنا السابق، إنّ تردد الإشعاع من ذرة مثل الهيدروجين يجب أن يكون مستمرّاً.

لكنّ أظهرت التجارب أنّه غير مستمر: تشعّ ذرة الهيدروجين فقط عند ترددات مُعيّنة، ويوجد قفزة عند تغيّر التردد. كان هذا الاكتشاف بمثابة صفعة للأحكام التقليدية، والتي أيّدت مقولة وضعها الفيلسوف في القرن السابع عشر جوتفريد ليبنيز:Gottfried Leibniz

"الطبيعة لا تقوم بقفزات".

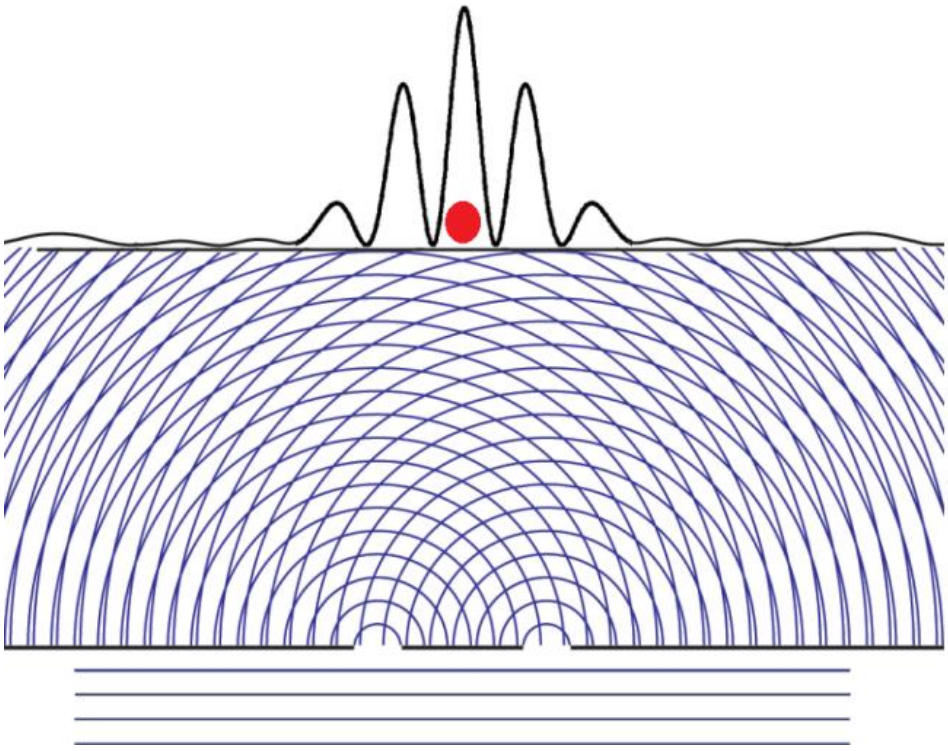
في عام 1913، وضع بور نموذجاً ذرّيّاً جديداً تكون فيه الإلكترونات مرتبطة بمستويات طاقة محددة. طبّق شرودنجر معادلته على ذرة الهيدروجين ووجد أنّ حلوله أنتجت مستويات الطاقة التي تحدّث عنها بور. وهو ما إعتُبِر لاحقاً أحد أهم إنجازات معادلة شرودنجر.

مع كثرة النجاحات العملية لمعادلة شرودنجر، أصبحت النظير الأساسي لقانون نيوتن الثاني في الحركة لميكانيكا الكم.

- **بعض التطبيقات لميكانيكا الكم:**

- **ظاهرة النفق الكمي**

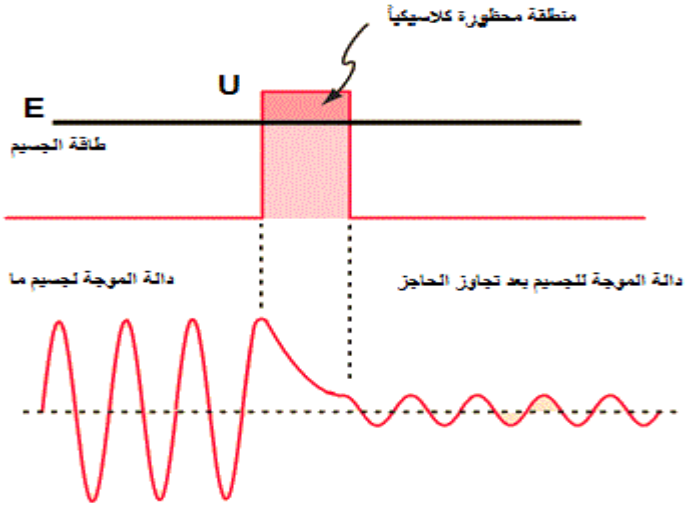
لكي نستطيع فهم النفق الكمي علينا أن نتذكر أنّ الجسيمات لا تمتلك مكاناً محدداً، وبالمقابل فإنّ جميع الجسيمات يتم وصفها بما نسميه "دالة الموجة" حيث احتمال تواجد الجسيم في مكان معين يعطى بأخذ مربع مطال الموجة في هذا المكان.



فمثلاً في تجربة الشقّ المزدوج تعبّر الموجة عن احتمالية تواجد الإلكترون في مكان ما، والجسم باللون الأحمر هو المكان ذو أكبر احتمال أن نجد به الإلكترون عند المراقبة.

لنفترض مثلاً أننا نتجاوز بهذه الكرة جبلاً، فسوف نحتاج لتحريك الكرة من فوق الجبل، أي أننا سوف نعطي الجسم طاقةً حركية والتي بدورها سوف تتحول في قمة الجبل إلى طاقة كامنهEa.

في ظاهرة النفق الكمي، سيستطيع الجسيم تجاوز هذا الجبل من دون أن يصعد فوقه. فهنالك احتمال -تبعاً لدالة الموجة- أن يتجاوز جسيم يحمل الطاقة E حاجزاً يحمل طاقةU ، حيث ستُظهر دالة الموجة انخفاضاً متزايداً ضمن هذا الحاجز إلا أنها سوف تستمر بعد تجاوزه.



في النهاية سوف يكون احتمال تواجد الجسيم بعد الحاجز ضئيلاً إلا أنه ليس صفراً، تم التحقق من هذه الظاهرة من خلال التجارب وتستخدم هذه الظاهرة في العديد من مكونات الأجهزة الإلكترونية.

- **<u>بوزون هيغز :</u>**

أو ما يسمى بالجسيم الإلهي- . جسيم أولي يُظن أنه المسؤول عن اكتساب المادة لكتلتها. وقد تم رصد إشارات لجسيم هيجز عملياً في عام 2011 في مايعرف بـ مصادم الهادرونات الكبير، وأعلن مختبر سرن في 4 يوليو 2012 أنه متأكد بنسبة 99.999% من وجود بوزون هيغز فعلياً. وكان قد تنبأ الفيزيائي الإسكتلندي "بيتر هيغز" عام 1964 بوجوده في إطار النموذج الفيزيائي القياسي الذي يفترض أن القوى الأساسية قد انفصلت عند الانفجار العظيم ، وكانت قوة الجاذبية هي أول ما انفصل ثم تبعتها بقية القوى. ويُعتقد طبقا لهذه النظرية أن البوزون - وهو جسيم أولي افتراضي ثقيل ، تبلغ كتلته نحو 200 مرة كتلة البروتون - هو المسؤول عن طريق

ما ينتجه من مجال هيجز عن حصول الجسيمات الأولية كتلتها ، مثل الإلكترون والبروتون والنيوترون وغيرها . وتمكن العلماء من رصده عمليا بنسبة 99.999% بواسطة مصادم الهادرونات الكبير (LHC) الموجود في مختبر سرن حيث تصل فيه سرعة البروتونات إلى سرعة الضوء تقريبا. والأعظم من ذلك أنه في معجل الهادرونات الكبير يصوب شعاعي بروتونات كل منهما بسرعة مقاربة لسرعة الضوء ضد بعضهما رأسيا، ثم دراسة نتائج هذا الاصطدام الذي يماثل ظروف الانفجار العظيم على مستوى مصغر. ولتمثيل ظروف اللحظة الزمنية 10^{-35} من الثانية الأولى بعد الانفجار العظيم، والتي يُعتقد أن بوزونات هيجز تكونت عندها, يتطلب تخليقها ظروفا قد تصل إلى 5000 مليار إلكترون فولت.

المراجع:

1. يوليو 20 نسخة محفوظة الإذاعة الوطنية العامة من *Quantum Mechanics* واي باك مشين 2017 على موقع.
2. Kuhn ،Thomas S. *The Structure of Scientific Revolutions*. Fourth ed. Chicago; London: The University of Chicago Press ،2012. Print.
3. Taylor ،J. R. ؛Zafiratos ،C. D. ؛Dubson ،M. A. (2004). *Modern Physics for Scientists and Engineers*. Prentice Hall. 9–127 صفحات. ISBN 0-13-589789-0.
4. Stephen Hawking, *The Universe in a Nutshell*, Bantam, 2001.
5. McEvoy ،J. P. ؛Zarate ،O. (2004). *Introducing Quantum Theory*. Totem \Books. 89–70 صفحات, especially p. 89.ISBN 1-84046-577-8.
6. *World Book Encyclopedia*, page 6, 2007.
7. Dicke and Wittke, *Introduction to Quantum Mechanics*, p. 10f.
8. *Introducing Quantum Theory*, p. 87
9. Van der Waerden ،B. L. (1967).*Sources of Quantum Mechanics* (German translated to English). Mineola, New York: Dover Publications.