Chapter One
Physical Foundation of Quantum Mechanics

ما هو ميكانيك الكم او ما هو مفهوم ميكانيك الكم ؟

ميكانيك الكم هو ذلك التخصص من الفيزياء الذي يتناول دراسة الانظمه المجهرية ووجد لحل الفشل الذي واجهه الميكانيك الكلاسيكي لتفسير بعض الظواهر مثل ظاهرة كومبتون وتوليد زوج الالكترون- بوزترون واستقرارية الذرة وكذلك الظاهره الكهروضوئيه.

ان الفيزياء الكلاسيكيه اشتملت حتى عام 1909 على ثلاثة مواضيع رئيسيه هي :
1- الميكانيك الكلاسيكي : الذي يدرس حركة الاجسام الظاهريه
2- الثرموداينمك: ويعني تناول العمليات ذات التفاعلات الحراريه
3- الكهرومغناطيسيه: وتهتم بدراسة المجالات الكهربائيه والمغناطيسيه والعلاقه فيما بينهما وبين الشحنات والتيار.

الميكانيك الكلاسيكي : يعالج الظواهر التي ترى بالعين المجرده Macroscopic system

الميكانيك الكمي : يعالج الظواهر التي لا ترى بالعين المجرده Microscopic system

1- تاثير كومبتون

عند سقوط حزمه من الاشعه السينيه على صفيحه معدنيه فان جزء من الاشعه سوف تتشتت وهذه الاشعه المتشتته يتغير طولها الموجي تبعا للعلاقه

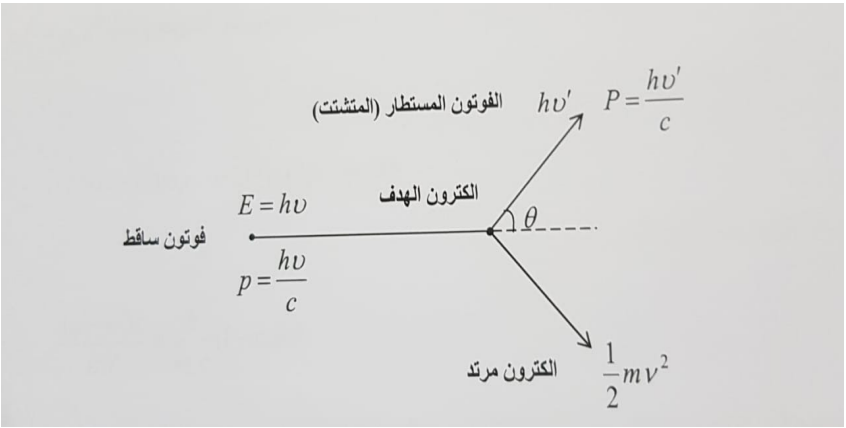
$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\vartheta)$$

حيث λ' طول الموجة المتشتته ، ϑ زاوية التشتت ، λ الموجه الساقطه على المعدن. فشلت النظريه الكلاسيكيه في تفسير المعادله اعلاه وذلك لافتراضها ان الالكترون في المعدن يمتص جزء من الاشعه السينيه ويتراجع للخلف ثم

يشع هذه الطاقه بموجه اقل من موجة الاشعه السينه حسب تاثير دوبلر ثم يستمر هذا التراجع حتى تكون موجة الالكترون ثابته اي ان هناك مجموعه من الترددات للموجه المتشتته ، في حين دعم تشتت كومبتون النظريه الكميه أذ افترض ان الاشعاع هو جسيمات ذات طاقه مكممه $h\nu$ يمكن ان تتفاعل مع الماده بدون امتصاص والموجه المتشتته ذات تردد واحد يعتمد فقط على زاوية التشتت وهذا يتفق مع الواقع التجريبي

ومن تكافؤ الزخم والطاقه: فان الفوتون يمتلك طاقه $h\nu$ وزخم $\frac{h\nu}{c}$ حيث ان الفوتون يتحرك بسرعة الضوء c وبذلك يكون زخمه $p=\frac{h\nu}{c}=\frac{h}{\lambda}$ ومن قانون حفظ الطاقه والزخم يمكن اشتقاق معادلة تشتت كومبتون .

من الشكل نستنتج وحسب قانوني حفظ الطاقه والزخم في عملية التصادم أن :



على المحور الافقي $\frac{h\nu}{c}=\frac{h\nu'}{c}\cos\vartheta+p_e\cos\varphi$ ..... (1)

على المحور $0=\frac{h\nu'}{c}\sin\vartheta-p_e\sin\varphi$ ..... (2)

العمودي

حفظ الطاقه $h\nu+m_0c^2=h\nu'+T$ ..... (3)

φ زاوية ارتداد الالكترون بعد تصادمه مع الفوتون و T طاقة الالكترون الحركيه

من المعادلتين (1) و(2) نتخلص من الزاويه φ وذلك بتربيع المعادلتين وجمعهما معا فيكون لدينا

$$\frac{(h\nu)^2}{c^2} - \frac{2h^2\nu\nu'}{c^2}\cos\vartheta + \frac{(h\nu')^2}{c^2} = p_e^2$$

نضرب طرفي المعادله في c^2 نحصل على

$$p_e^2c^2 = (h\nu)^2 - 2h^2\nu\nu'\cos\vartheta + (h\nu')^2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

الطاقه الكليه ، E ، للالكترون

$$E = m_0c^2 + T \quad \ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

ومن العلاقه النسبيه فان الطاقه الكليه تعطى بالعلاقه

$$E = \sqrt{m_0^2c^4 + p_e^2c^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

نساوي العلاقتين (5) و (6) نجصل على

$$p_e^2c^2 = 2m_0c^2T + T^2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (7)$$

من العلاقتين (4) و (7)

$$2m_0c^2T + T^2 = (h\nu)^2 - 2h^2\nu\nu'\cos\vartheta + (h\nu')^2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (8)$$

ولكن طاقة الالكترون الحركيه T تساوي فرق الطاقه بين طاقةالفوتون الساقط وطاقة الفوتون المتشتت اي ان

$T = h\nu - h\nu'$ نعوض في العلاقه (8) نحصل على

$$2m_0c^2(h\nu - h\nu') + (h\nu - h\nu')^2 = (h\nu)^2 - 2h^2\nu\nu'\cos\vartheta + (h\nu')^2$$

$$2m_0c^2(h\nu - h\nu') + (h\nu)^2 - 2h^2\nu\nu' + (h\nu')^2 = (h\nu)^2 - 2h^2\nu\nu'\cos\vartheta + (h\nu')^2$$

$$m_0c^2(h\nu - h\nu') - h^2\nu\nu' = -h^2\nu\nu'\cos\vartheta$$

$$m_0c(\nu c - \nu' c) - h\nu\nu' = -h\nu\nu'\cos\vartheta$$

$$m_0c(\nu c - \nu' c) = h\nu\nu'(1 - \cos\vartheta) \quad \ldots\ldots\ldots \quad (9)$$

نضرب طرفي المعادله (9) في $\frac{1}{m_0c\nu\nu'}$ نحصل على

$$\frac{1}{\nu\nu'}(\nu c - \nu' c) = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\vartheta)$$

$$\frac{c}{\nu'} - \frac{c}{\nu} = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\vartheta)$$

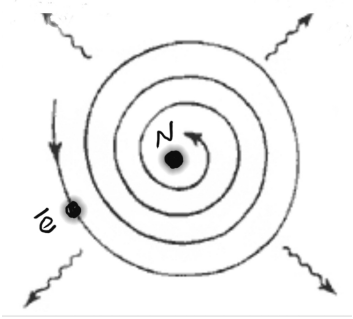
$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\vartheta)$$

2- **تولید زوج الالکترون – بوزترون**

تعتبر ظاهرة تكوين زوج الالكترون– بوزترون دعم اخر للنظريه الكميه للاشعاع حيث يتولد هذا الزوج عندما تزيد طاقة الاشعه السينيه عن ضعف طاقة السكون للالكترون والبوزترون اي ان طاقة الاشعاع (الموجه) $h\nu$ يجب ان تكون اكبر من $2m_0c^2$ حيث m_0 كتلة السكون لكل من الالكترون والبوزترون ($2m_0c^2 = 1.02\ MeV$) يحدث تكوين الزوج عندما تمر الاشعه قرب مجال النواة في المعدن.

3- **أستقرارية الذره**

فشل اخر للميكتنيك الكلاسيكي في تفسير استقرارية الذره ، اذ يفترض ان الالكترون يدور حول النواة مغير اتجاه حركته باستمرار ولذلك فهو جسيم معجل وطبقا للنظريه الكهرومغناطيسيه الكلاسيكيه ان اي شحنه كهربائيه متحركه بتعجيل تبعث اشعاعا كهرومغناطيسيا ولذلك يجب ان يفقد الالكترون الدائر حول النواة داخل الذره جزءا من طاقته اثناء الدوران اي انه يخسر طاقته بصورة مستمره مادامت الحركه مستمره وبالتالي فيجب ان ينتهي بحركه حلزونيه مقتربا من النواة وكما نعرف فان الذره في الظروف الطبيعيه تعتبر تركيبا مستقرا لا يبعث اشعاع.



مسار الالكترون حسب النظريه الكلاسيكيه وهو يشع طاقة نتيجة تعجيله

اما على الجانب الكمي ... وحسب فرضيات بور:

1- يستطيع الالكترون ان يدور في مدارات متميزه ومستقره(نصف قطر المدار يساوي r) اذا كان زخمه الزاوي L يساوي حاصل ضرب عدد صحيح، n في مقدار ثابت اي ان $L = n\hbar = pr_n$ وان $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.05x10^{-34}$ joule sec

.

2- يستطيع الالكترون ان ينتقل من مدار الى اخر اذا حصل تغير في الطاقه مقداره ΔE بسبب امتصاص او انبعاث في الاشعاع وان تردد الاشعاع ν يعطى بالعلاقه $\nu = \frac{\Delta E}{h}$ اذ افترض بور ان الالكترون يدور في مسار دائري مركزه نواة الذرة ونصف قطره r وسرعته الزاويه w

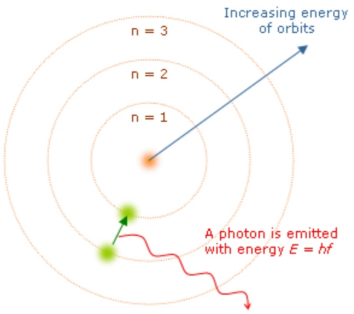
$$L = n\hbar = pr_n = mVr_n = mwr_n^2$$

اذ ان

$$V = wr_n$$

$$n\hbar = mwr_n^2 \Rightarrow w = \frac{n\hbar}{mr_n^2} \quad ..... \quad (1)$$

أذ ان $n = 1,2,3,....$ وهو عدد صحيح موجب



من المعروف ان القوة الكهربائيه بين الالكترون والنواة تعطى بالعلاقه $F_1 = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n^2}$ وهي قوة جذب النواة للالكترون ولكي يبقى الالكترون ثابتا في

مداره يجب ان تكون هناك قوة اخرى $F_2 = mw^2 r_n$ ناتجه من حركته الزاويه وهاتين القوتين متساويتين

$$\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_n^2} = mw^2 r_n \qquad \text{.....} \quad (2)$$

وبالتعويض عن w من المعادله (1) في المعادله (2)

$$r_n = \frac{4\pi\varepsilon_0 \hbar^2}{me^2} n^2 \qquad \text{.....} \quad (3)$$

ايضا يمكن ايجاد علاقة ألى w من المعادلتين (1) و(2) وذلك بالتعويض عن قيمة r من ا لمعادله (1) في المعادله (2)

$$w_n = \frac{me^4}{(4\pi\varepsilon)^2 \hbar^3} \frac{1}{n^3} \qquad \text{.....} \quad (4)$$

نلاحظ من المعادلتين (3) و (4) ان هناك مجموعه واسعه من المدارات والسرع الزاويه المستقره عددها لا نهائي يتميز بعضها عن البعض الاخر بقيمة n .

وحسب فرضية بور الثانيه نستطيع حساب ΔE كالتالي:

الطاقة الكامنه للالكترون (P.E) في المدار r_n تساوي $P.E = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{r}$

وبالتعويض عن r من المعادله (3) نحصل على

$$P.E = -\frac{me^4}{(4\pi\varepsilon_0\hbar)^2}\frac{1}{n^2} \qquad \text{.....} \quad (5)$$

وكذلك فان الالكترون يمتلك طاقة حركيه T ، اضافة الى طاقته الكامنه

$T = \frac{mV^2}{2}$ او $T = mw^2 r^2 / 2$ وباستخدام المعادلتين (3) و(4) نجد ان

$$T = \frac{me^4}{32(\pi\varepsilon_0\hbar)^2}\frac{1}{n^2} \qquad \text{.....} \quad (6)$$

اما الطاقه الكليه E_n فهي تساوي

$$E_n = T + P.E = -\frac{me^4}{2(4\pi\varepsilon_0\hbar)^2}\frac{1}{n^2} \qquad \text{.....} \quad (7)$$

ان انتقال الالكترون من مدار $n_2 = 2$ الى المدار $n_1 = 1$ يصاحبه انبعاث اشعاع له تردد يمكن حسابه من العلاقه أذ ان $\nu = \frac{\Delta E}{\hbar} = \frac{E_2 - E_1}{\hbar}$

$$\Delta E_{12} = - \frac{me^4}{2(4\pi\varepsilon_0\hbar)^2}\left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2}\right) \quad \text{.....} \quad (8)$$

وعليه تردد الاشعاق المرافق لانتقال الالكترون

$$\nu = - \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3}\left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2}\right) \quad \text{.....} \quad (9)$$

يمكن ايجاد العدد الموجي $\bar{\nu}$ ويساوي $\bar{\nu} = \frac{\nu}{c} = \frac{1}{\lambda}$ أو $\bar{\nu} = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 c h^3}\left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2}\right)$

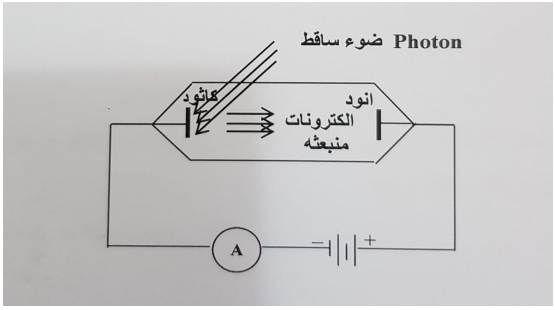
$$\bar{\nu} = R\left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2}\right) \quad \text{.....} \quad (10)$$

أذ ان $R = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 c h^3}$ والذي يسمى ثابت رايدبرك Rydberg constant

المعادله(10) تمثل مقياس نجاح نظرية بور لان هناك معادله تجريبيه مماثله توصل اليها العالم بلمر عام 1885 .

4- **التأثيرالكهروضوئي** Photoelectric effect

هي ظاهرة انبعاث الالكترونات من سطح معدني نتيجة أضائته باشعاع كهرومغناطيسي ذو تردد فعال



عمليا وجد :

1- ان الالكترون لا ينبعث الا عندما يكون تردد الفوتون، ν (الضوء الساقط) اكبر من تردد العتبه

ν_0

2- أن الالكترون المنبعث له طاقة حركيه مساويه الى $K.E = h(\nu - \nu_0)$.

3- الالكترونات المنبعثه تعتمد على تردد الضوء الساقط وليس على شدته

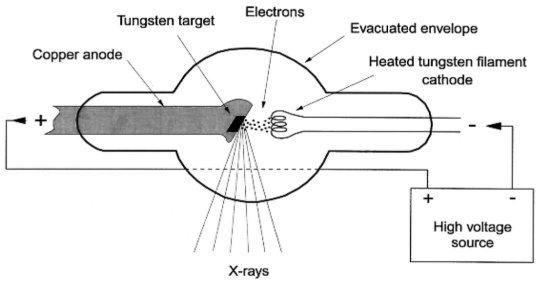
4 -لا توجد فتره زمنيه بين سقوط الضوء وانبعاث الالكترونات.

تبعا للنظريه الكلاسيكيه فان الالكترون يمتلك شحنه تتفاعل مع المجالات الكهربائيه والمغناطيسيه للضوء نتيجة لقوة لورنس والتي ينص قانونها على ان القوة المسلطه على جسيم مشحون، e يتحرك في مجال كهرومغناطيسي بسرعة V هي $F = e(\mathrm{E} + \mathrm{V} \times \mathrm{B})$ وزيادة شدة الاشعاع تعني زيادة مجالاته وعليه نتوقع ان زيادة شدة الضوء تعني زيادة الطاقه الحركيه للالكتون المنبعث بالاضافه الى ذلك فان الالكترون يحتاج الى فتره زمنيه لتعاظم طاقته والافلات من المعدن وهذان الاستنتاجان يتناقضان مع الواقع التجريبي ومن هنا فشلت النظريه الكلاسيكيه في التفسير لهذه الظاهره

اما من وجهة النظر الكميه فقد وضع العالم اينشتاين فرضيته والتي تقول بان الضوء ليس اشعاعا مستمرا من الامواج ولكنه يتكون من مجموعة من الدقائق اي ان الاشعاع يتالف من جسيمات تدعى الفوتونات وان طاقة الفوتون هي $E = h\nu = \hbar w$ اذ يمتص الالكترون طاقة الفوتون كليا وهذه الطاقه تساوي مجموع طاقة الشغل والطاقه الحركيه للالكترون المنبعث وأن معادلة اينشتاين $h\nu = h\nu_0 + \frac{1}{2}mV^2$ اي ان الالكترون ينبعث اذا كانت الطاقه التي امتصها اكبر من $h\nu_0$ وهذا يحصل عندما $\nu \gg \nu_0$ وعليه تكون الطاقه الحركيه للالكترون المنبعث هي $K.E = h\nu - h\nu_0 = h(\nu - \nu_0)$.

5- **توليد موجة الاشعه السينيه الصغرى Generation of the minimum x- ray wave**

من المعلوم ان الالكترونات ذات الطاقه العاليه في انبوب الالشعه السينيه تستطيع ان تولد فوتونات اشعه سينيه بطاقة عظمى محدده، وهي ظاهره لايمكن تفسيرها الا على اساس ان الاشعاع الكهرومغناطيسي يتصرف كفوتون عند تفاعله مع الماده.



$$h\nu_{\max} = eV_0$$

اذ ان V_o هو الفولتيه المسلطه على اقطاب الانبوبه ، $\nu_{\max}$ هو اعلى تردد للاشعه (اكبر طاقه للفوتون).

$$\nu_{\max} = \frac{eV_0}{h} = \frac{c}{\lambda_{\min}}$$

الترددالعالي يقابله طول موجي قصير

$$\lambda_{\min} = \frac{ch}{eV_0}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{12396}{V_0} \quad \text{A}^{\circ}$$