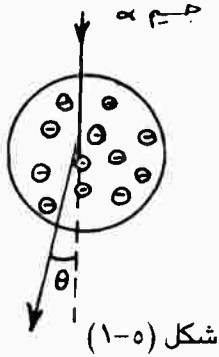
الجزء الثانى

الباب الخامس
النظرية الذرية للحالة الصلبة
Atomic theory of the solid state

نستعرض أولاً وبسرعة تركيب الذرة

الذرة وتركيب المادة :

كان تومسون هو أول من حاول وضع نموذج للذرة وفيه افترض أن الشحنة الموجبة فى الذرة تتوزع بانتظام داخل كرة ، وأن الإلكترونات تتخللها وتحتل أماكن معينة بها ، شكل (٥-١) .



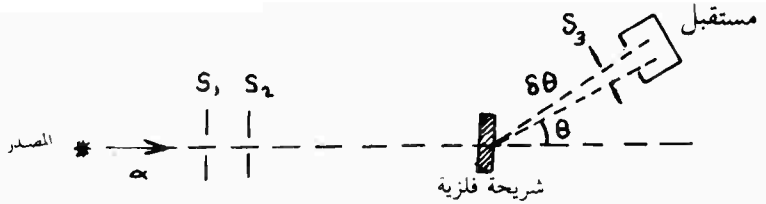
شكل (٥-١)

ويعود فشل هذا النموذج إلى أن الإنحراف المتوقع حدوثه لأشعة ∝ يجب أن يكون صغيرا ، وهذا يخالف الواقع حيث إنه وجدت انحرافات كبيرة بزوايا قد تزيد عن ٩٠° .

نموذج رذرفورد : افترض رذرفورد أن الشحنة الموجبة تتركز فى حيز صغير جدا (أقل من $١٠^{-١٢}$ سم) وأن الإلكترونات تحيط هذه النواة بشكل ما .

وقد استخدمت تجربة تشتت جسيمات ∝ لدراسة كيفية توزيع الكتلة والشحنة داخل الذرة ، شكل (٥ - ٢) .

تسقط حزمة من أشعة ∝ على شريحة رقيقة من فلز ، ويمكن دراسة التوزيع الزاوى للجسيمات المستطارة Angular distribution بواسطة شاشة فلورية أو غرفة تأين I . C . detector.



شكل ٥ – ٢

ولتفسير النتائج رياضيا فرض رذرفورد ما يأتى :

١ – الذرة عبارة عن فراغ فيما عدا كتلتها وهى مركزة فى نقطة .

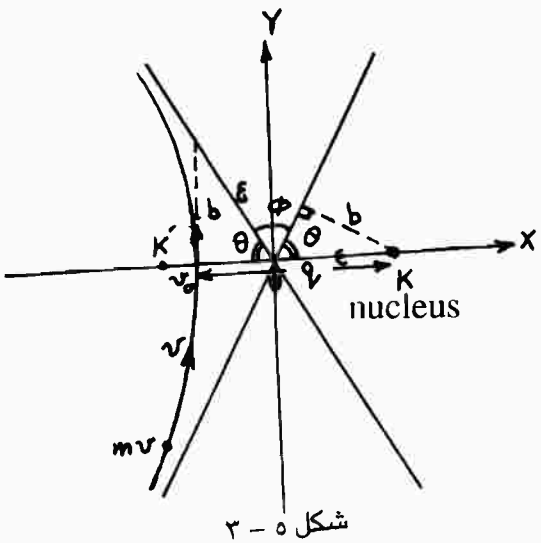
٢ – القوى الكولومية بين جسيمات α والنواة هى فقط التى تحدد انحراف المسار للجسيمات .

٣ – استخدام رذرفورد ميكانيكا نيوتن لتعيين انحراف المسار .

معادلة رذرفورد للتشتيت :

نفرض أن الشحنة على النواة Ze وأن جسيم α يقترب من نواة الذرة عند K فينحرف مساره صانعا قطعاً زائداً تنطبق إحدى بؤرتيه مع النواة K ، شكل (٥–٣) .

b = المسافة العمودية بين النواة K واتجاه جسيم α الأصلى وتسمى b : بمعامل التصادم impact parameter .



شكل ٥ – ٣

أما q فهى المسافة من K إلى رأس القطع الزائد .

ومن هندسة الشكل : $q = \varepsilon (1 + \cos \theta)$.

حيث ε هى المسافة OK وتسمى eccentricity ،

و θ هى الزاوية بين الاتجاه الأصلى للجسيم والاتجاه السينى من الشكل :

$$\varepsilon = \frac{b}{\sin \theta}$$

$$q = a + \varepsilon = \varepsilon \cos \theta + \varepsilon = \varepsilon (1 + \cos \theta)$$

$$\therefore \; q = \frac{b (1 + \cos \theta)}{\sin \theta} \qquad \therefore \; \frac{b}{q} = \frac{\sin \theta}{1 + \cos \theta}$$

نفرض أن v هى سرعة الجسيم بعيدا عن النواة وأن v_0 هى سرعته عندما يكون أقرب ما يمكن منها ، وإن m هى كتلته .

بتطبيق قانون بقاء الطاقة :

$$1/2 \, m \, v^2 = 1/2 \, m \, v_0^2 + \frac{Z e E}{q}$$

« طاقة الموضع فى أقرب نقطة + طاقة الحركة فى أقرب نقطة = طاقة الحركة الأصلية للجسيم » .

$E = 2 e$ هى مقدار الشحنة على الجسيم ∝ .

بوضع $K = \frac{Z e E}{m v^2}$

وباختصار المعادلة بالضرب × $\frac{2}{m v^2}$ نحصل على :

$$\frac{v_0^2}{v^2} = 1 - \frac{2 K}{b} \cdot \frac{\sin \theta}{1 + \cos \theta}$$

وبتطبيق قانون بقاء كمية الحركة الزاوية conservation of angular momentum نحصل على :

$$m v b = m v_0 q$$

$$\therefore \quad \frac{v_0}{v} = \frac{b}{q} = \frac{\sin\theta}{1+\cos\theta}$$

$$\therefore \quad \frac{v_0^2}{v^2} = \frac{\sin^2\theta}{(1+\cos\theta)^2} = \frac{1-\cos\theta}{1+\cos\theta} \qquad \ldots (2)$$

ومن المعادلتى (١) ، (٢) وبالاختصار نحصل على $b = K \tan\theta$ لكن من الشكـــل $\phi = \pi - 2\theta$ حيث ϕ هى زاوية انحراف الجسيم $\propto$.

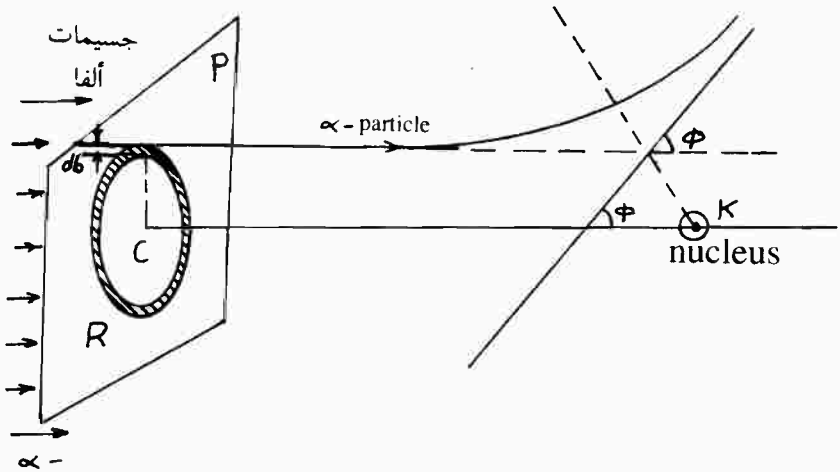
$$\therefore \quad \theta = \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\phi}{2}\right)$$

$$\therefore \quad b = K \tan\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\phi}{2}\right) = K \cot\frac{\phi}{2} \qquad \ldots (3)$$

هذه المعادلة تعطى مقدار انحراف الجسيم ، ولكن بدلالة b التى لا يمكن قياسها بطريقة مباشرة فى المعمل .

حساب عدد جسيمات $\propto$ التى تنحرف بزاوية معينة :

نفرض مستوى P عموديا على اتجاه أشعة $\propto$ ، شكل (٥-٤)



شكل ٥ - ٤

نفرض K نواة ذرة فى طريق الأشعة .

مسقط K على المستوى P هو C .

جميع الجسيمات التى تمر خلال الحلقة R التى أنصاف أقطارها b & b + db تتعرض لانحراف يقع بين (ϕ & $\phi + d\phi$) .

نفرض أن عدد الجسيمات التى تمر خلال وحدة المساحات من المستوى P هى N فى الثانية الواحدة .

عدد الجسيمات التى تعبر الحلقة P فى الثانية =

$$d N(\phi) = 2 \pi b \, d b \, . N$$

لكن من معادلة (3) .

$$db = K \, d (\cot 1/2 \, \phi) = \frac{K \, d \phi}{2 \sin^2 \phi / 2}$$

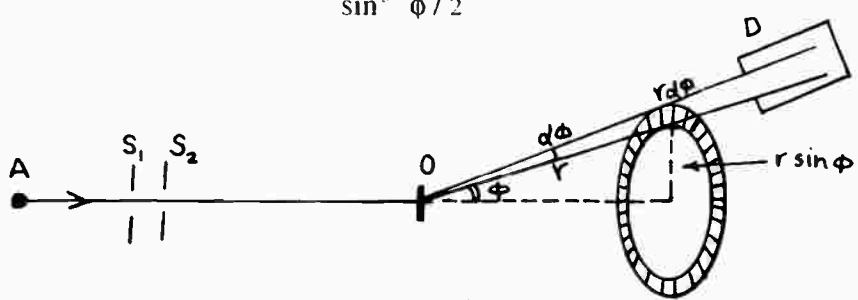
∴ عدد جسيمات ∝ التي تستطار بين ϕ ، $\phi + d\phi$ هى

$$d N (\phi) = - \pi K^2 \frac{N \cos \phi}{\sin^2 \phi / 2} \quad d \phi$$

الإشارة السالبة تعنى تناقص d N عند تزايد ϕ هذا بالنسبة لنواة ذرة واحدة .

ولكن إذا اعتبرنا أن t هو سمك شريحة الفلز الذى تستطار عليه الجسيمات ، وأن n هو عدد الذرات فى وحدة الحجوم لهذه المادة تكون عدد الذرات فى وحدة المساحات عند O هو n t ويكون العدد الكلى للجسيمات المستطارة على الشريحة فى الزاوية $d\phi$ هو :

$$d N (\phi) = \pi \, n \, t \, N \, K^2 \frac{\cos \phi / 2}{\sin^3 \phi / 2} \quad d\phi$$



شكل ٥ – ٥

إذا كان عدد الجسيمات المستطارة D على بعد r من الشريحة O ، كما فى شكل (٥-٥) فإن العدد السابق $d N(\phi)$ يتوزع على مساحة الحلقة dA حيث نصف قطرها $2\pi r \sin\phi$ وسمكها $r\, d\phi$

$$\therefore dA = 2\pi r^2 \sin\phi \, d\phi$$

ويكون عدد الجسمات فى وحدة المساحات من هذه الحلقة هو :

$$N(\phi) = \frac{dN(\phi)}{dA}$$

$$= \frac{\pi nt\, N K^2 \cos\phi/2}{2\pi r^2 \sin\phi \sin^3\phi/2} =$$

$$= \frac{nt\, N K^2}{4 r^2 \sin^4 \phi/2}$$

$$\therefore N(\phi) = \frac{N'}{r^2} \cdot nt \cdot 1/4\ e^4 \frac{Z^2}{K_\infty^2 \sin^4 \phi/2}$$

وقد استبدلنا $2e = E$ فى المقدار $K = 1/2\ m v^2$ ووضعنا $\frac{Ze E}{m v^2}$

تسمى هذه المعادلة بمعادلة الاستطارة لرذرفورد . وقد وجد أنها تتفق مع التجربة ،، مما يثبت صحة النموذج الذى افترضه رذرفورد للذرة النووية .

صعوبات هذا النموذج :

١ - إذا كانت الإلكترونات فى حالة سكون ، فلا يوجد ما يمنع سقوطها إلى داخل النواة بواسطة القوى الكولومية .

٢ - إذا كانت فى حالة حركة دائرية حولها ، فعلى حسب النظريات الكلاسيكية الكهرومغناطيسية فإن الإلكترون يشع من طاقته أثناء الحركة ، وبالتالى تنقص سرعته تدريجيا فيقترب من النواة حلزونيا حتى يسقط بداخلها .

وقد صحح بوهر فى نظريته هذه الصعوبات والتى استخدم فيها نظرية الكم لبلانك .

نظرية بوهر للتركيب الذرى :

النتائج الأساسية لنظرية الكم لبلانك هى :

١ – أى متذبذب oscillator يوجد على أحد مستويات كمية Discrete quantum states each of particular energy value . محللة يحدد كل منها قيمة طاقة معينة .

٢ – يمكن للطاقة أن تمتص أو تنبعث بكميات محددة ، وان الإشعاع ذا التردد f يكون مصحوبا بمقادير من الكم quanta قيمة كل منها hf ، حيث h هو ثابت بلانك ($h = 6.624 \times 10^{34}$ j . sec)

فروض بوهر :

وقد استخدم بوهر النتيجة الثانية لنظرية بلانك وفرض :

١ – أن الإلكترون الذرى لا يستطيع أن يتحرك فى أى مسار حول النواة ، ولكنه يتحرك فى مستويات طاقة أو مسارات معينة .

٢ – لا يفقد الإلكترون أثناء حركته أى جزء من طاقته stationary orbit .

٣ – يمكن للإلكترون أن يقفز من مسار إلى آخر ذى طاقة أقل ، مع انبعاث كم من الطاقة يعادل الفرق بين طاقتى المسارين $E_1 - E_2 = h f$

٤ – فرض بوهر مسارات دائرية للإلكترون . واعتبر أن كمية الحركة الزاوية تخضع للمبدأ الكمى quantization of the angular momentum

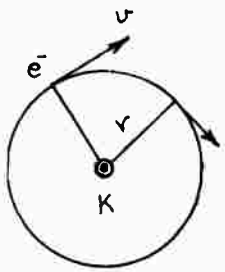
أى أن :

$$\therefore m v r = \frac{n h}{2 \pi}$$

حيث r نصف قطر المسار n هو العدد الكمى وm هى كتلة الألكترون ، v سرعته .

الحالات الكمية للإلكترون فى الذرة

يحدث اتزان حركى للإلكترون حول النواة عندما تتساوى القوة الطاردة المركزية $\frac{mv^2}{r}$ للخارج مع القوة الجاذبية الكولومية بين شحنة الإلكترون e والنواة Z e ، شكل (٦-٥)



شكل (٥-٦)

$$\therefore \quad \frac{mv^2}{r} = mr\omega^2 = \frac{Z\,e^2}{r^2}$$

وبحذف سرعة الإلكترون v من المعادلتين السابقتين

نحصل على نصف قطر المسار :

$$r = \frac{n^2\,h^2}{4\,\pi^2\,m\,e^2 Z}$$

طاقة الإلكترون الكلية = طاقة حركته + طاقة موضعه

$$= -\frac{Ze^2}{r} + 1/2\ m\,v^2$$

$$= -\frac{Z\,e^2}{r} + 1/2\ \frac{Ze^2}{r}$$

$$\therefore \quad -1/2\ \frac{Ze^2}{r} = E_n$$

$$E_n = -\frac{2\,\pi^2 m\,e^4\,Z^2}{n^2\,h^2}$$

تعطى هذه المعادلة مستويات الطاقة المختلفة التي يمكن أن يكون عليها الإلكترون .

بالنسبة لذرة الأيدروجين : $Z = 1$ نصف قطر المسار الأول $n = 1$ هو :

$$r_o = \frac{h^2}{4\,\pi^2\,me^2} = 25.27 \times 10^{-9}\ \text{cm}$$

أى أن قطر الذة فى حدود ١ إنجستروم .

طيف ذرة الأيدروجين :

عندما يقفز إلكترون من مسار خارجى لمسار داخلى تنقص طاقته ، ويظهر الفرق فى الطاقة على شكل فوتون

$$E_2 - E_1 = h\,f$$

ويكون تردد خط الطيف الناتج هو :

$$f = \frac{2\pi^2 me^4 Z^2}{h^3} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

وبدلالة العدد الموجى :

$$\frac{1}{\lambda} = \bar{f}$$

حيث :

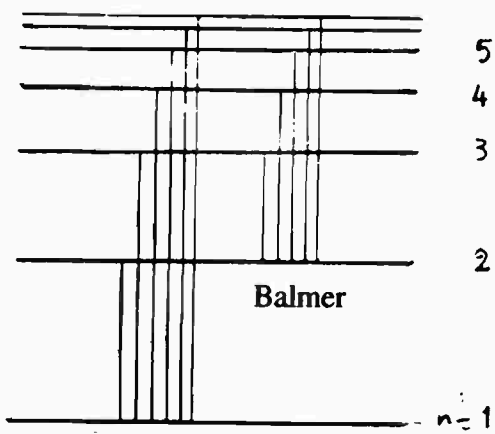
$$\bar{f} = R Z^2 \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

$$R = \frac{2\pi^2 me^4}{c h^3}$$

وتسمى R_H للأيدروجين بثابت ريدبرج ويساوى

$1.097 \times 10^7 m^{-1}$

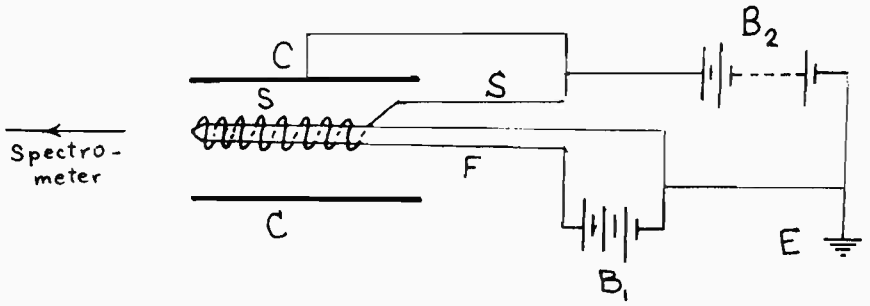
وقد فسرت نظرية بوهر ما سبق اكتشافه فى المتسلسلات الطيفية مثل متسلسلة بالمر ومتسلسلة ليمان الخ ، شكل (٥-٧) والتى تم اكتشافها بالتجربة فقط .



شكل (٥-٧)

قياس جهد الإثارة : Excitation potential

لقياس جهد الإثارة يستخدم الجهاز المبين بشكل (٥ - ٨) ويتركب من شبكة حلزونية S ،



شكل ٥ – ٨

F فتيل يسخن بواسطة بطارية B_1.

C أسطوانة معدنية تحيط بالشبكة الموضوعة فى محورها ويتصلان معا ليكون لهما نفس الجهد الكهربى .

يوجد داخل الأسطوانة C الغاز تحت الاختبار بضغط مخلخل .

يوضع فرق فى الجهد بواسطة البطارية B_2 بين الأسطوانة والشبكة وبين الفتيل F .

تتسارع الإلكترونات بواسطة جهد الشبكة . وبعد خروجها منها تتحرك فى حيز خال من أية قوى force free وذلك لتساوى جهد الشبكة والاسطوانة C .

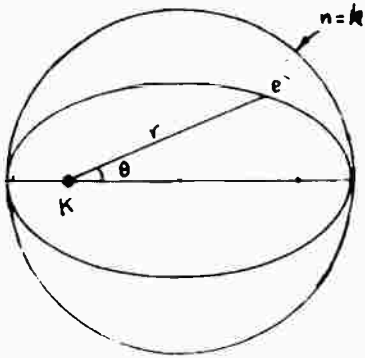
إذا كانت طاقة الإلكترونات كافية لاحداث إثارة لذرات الغاز تخرج فوتونات يمكن رؤيتها بجهاز اسبكترومتر .

وتجرى التجربة برفع فرق الجهد بين S & F تدريجيا ، مع ملاحظة الرؤية فى المطياف . نجد أنه عند جهد معين (جهد الإثارة) يبدأ انبعاث الفوتونات من الغاز وهذه تظهر على شكل خط من خطوط الطيف .

مثال : فى حالة الصوديوم وجد أن جهد الإثارة للخط الأصفر ٢,٠٩ فولط ، فتكون طاقة الاثارة لهذا الخط $e\,V = 2.09 \times 1.6 \times 10^{-12} = 3.34 \times 10^{-12}$ ارج

$$\frac{h\ c}{\lambda} = h\ f =$$

$= 3.36 \times 10^{-12}$ ارج



شكل (٥ - ٩)

حركة الإلكترونات فى قطع ناقص :

اعتبر سومر فيلد حركة الإلكترونات فى قطاعات ناقصة ، كما هو الحال فى حركة الكواكب حول الشمس . تكون إحدى بؤرتى القطع هى نواة الذرة K ، انظر شكل (٥-٩)

للإلكترون فى هذه الحالة درجتان من درجات الحرية تمثلان $r : \theta$ بالإحداثيات القطبية . ينتج عن ذلك نوعان من كمية الحركة : ١ - كمية حركة زاوية $P\theta$ ٢ - كمية حركة نصف قطرية Pr ، ويوجد عندئذ عددان كميان k & n بدلا من عدد واحد كما فى نظرية بوهر ذات المسارات الدائرية.

واضح أنه يمكن وجود أكثر من مسار يختلف فى قيمة k ، ولكن له نفس العدد الكمى n ويصبح المسار دائريا عندما يكون $n = k$.

لم يستطع هذا التعديل فى نظرية بوهر من تفسير التركيب الدقيق fine structure لأطياف الذرات الثقيلة . ولذلك بدأ التفكير فى الميكانيكا الموجية .

فرض دى برولى **De Broglie Hypothesis**

أدخل دى برولى فكرة الطبيعة المزدوجة للمادة dual nature of matter

فرض أن :

١ - كل جسيم كمية حركته p ، يكون مصحوبا بموجة طولها λ ، حيث

$\lambda = \frac{h}{p}$ ، h هوثابت بلانك .

٢ – كلما وجدت موجة طولها λ فإن مربع سعة حركتها square of amplitude يتناسب مع احتمال وجود جسيم له كمية حركة $p = \frac{h}{\lambda}$

وقد أمكن استخدام النظرية الموجية لإثبات هذا الفرض .

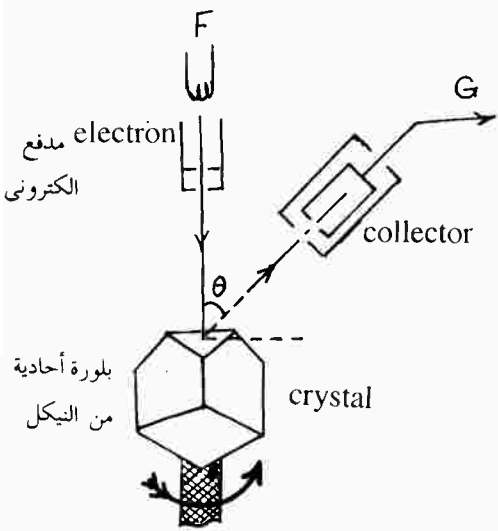
إيجاد طول موجة دى برولى عمليا : Davisson and Germer Expt.

تجربة دافيسون وجيرمر :

درس دافيسون وجرمر انعكاس الإلكترونات على بلورة أحادية من النيكل باستخدام الجهاز المبين بشكل (٥ – ١٠) .

ويتركب من مدفع إلكترونى ، يمكن الحصول منه على إلكترونات ذات سرع معينة ويمكن التحكم فى قيمتها .

تسقط حزمة الإلكترونات عموديا على المستوى (111) من سطح بلورة من النيكل ، فتشتت الإلكترونات فى جميع التجاهات .

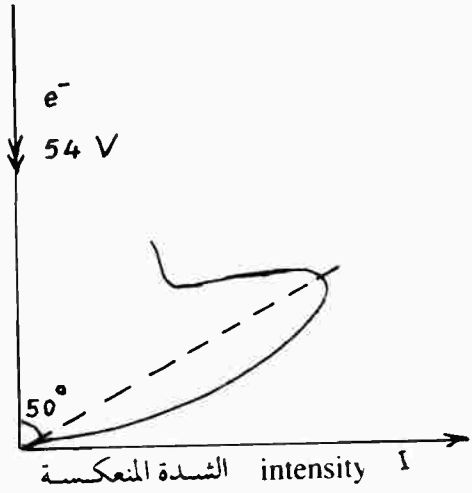


شكل (٥ – ١٠)

وباستخدام غرفة تأين collector يمكن قياس شدة تيار الإلكترونات المنعكسة فى الاتجاهات المختلفة حول البلورة . (ويمكن إدارة البلورة حول محور رأسى ينطبق مع اتجاه الأشعة الساقطة) .

وبدراسة تغير شدة التيار الإلكترونى المنعكس على البلورة مع الزاوية θ بين الشعاع الوارد والشعاع المنعكس الذى يدخل غرفة التأين ، شكل (٥ – ١١) وجد انعكاس كبير

بزاوية قدرها ٥٠° عندما كانت الإلكترونات تسقط خلال فرق فى الجهد قدره ٥٤ فولط بالمدفع الإلكترونى .



شكل (٥ - ١١)

إذا كانت سرعة الإلكترون v وكتلته m .

∴ طاقة الإلكترون بسقوطه في فرق جهد V فولط داخل المدفع الإلكترونى هى :

$$1/2\ m\ v^2 = e\ V$$

(e مقاسة بالكولوم)

$$\therefore\ mv = \sqrt{2\,m\,e\,V}$$

كمية الحركة للإلكترون $\therefore\ p = m\ v$

وبتطبيق فرض دى برولى تكون الموجة المصاحبة للإلكترون هى :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{12.24}{\sqrt{V}}\ A^0$$

وفى حالتنا هذه عندما يكون $V = 54$ تكون :

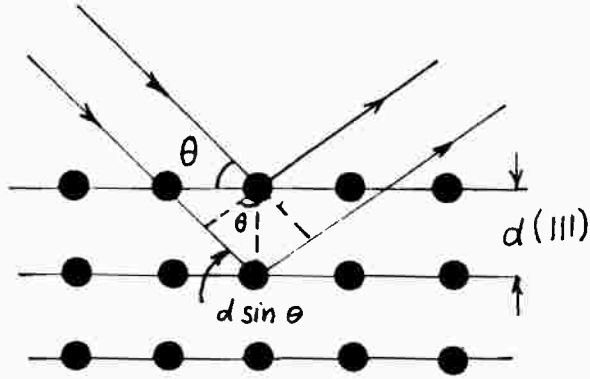
$$\lambda_e = 1.67\ A^0$$

أما إذا اعتبرنا أن الإلكترونات الساقطة ما هى إلا موجات طولها λ فيمكن تطبيق قانون براج باعتبار أن البلورة تمثل محزوز حيود ، انظر شكل (٥ - ١٢)

$n \lambda_e = d \sin \theta$ حيث :

وبمعرفة أن d (111) للنيكل = 2.15 إنجستروم وأن $\theta = 50$ بالتجربة فإن طول الموجة مقاسة بطريقة براج هى :

$\lambda_e = 2.15 \sin 50 = 1.65 \ A^0$



شكل (٥ – ١٢)

وواضح أن قيمة λ المقاسة بواسطة قانون براج ، أى باعتبار أن الإلكترونات هى أمواج تتفق إلى حد كبير مع طول الموجة كما تحدده معادلة دى برولى مما يحققها عمليا .

مشكلة الإثير : Ether

إذا اعتبرنا الجسيمات (الإلكترونات مثلا) أمواجا لها طول موجة معينة ، فما هو نوع الوسط الناقل لهذه الأمواج ؟

من المعروف أن سرعة الأمواج C ترتبط بكثافة الوسط d ومعامل المرونة الحجمى له B بالمعادلة $C = \sqrt{B / d}$

إذا تخيلنا وسطا ما تكون كثافته هى أقل كثافة معروفة لتكن ($١٠^{-٤}$ جم / سم^{٣}) ، ومعامل مرونته الحجمى أكبر معامل معروف لأى مادة (لتكن $١٠^{١٢}$ داين / سم^{٢} مثلا) فإن سرعة الأمواج فى هذا الوسط التخيلى هى :

$C = \sqrt{10^{12} / 10^{-4}} = 10^8 \ cm / sec .$

واضح أن هذه السرعة أقل بكثير من قيمة سرعة الضوء المعروفة . وهذا يدل على أن

وجود مثل هذا الوسط ليس صحيحا .

∴ لا صحة لوجود أى وسط ناقل للأمواج الكهرومغناطيسية وبالرغم من ذلك فإننا سنحاول وضع معادلة موجية (أسوة بالمعادلات الموجية للصوت حيث يوجد وسط ناقل للموجة) يمكن بواسطتها وصف حركة تلك الأمواج المصاحبة للجسيمات ، حتى وإن كانت هذه الأمواج ليست أمواجا بالمعنى المفهوم .

فمثلا نعتبر أن الضوء عبارة عن جسيمات أو فوتونات طاقة كل منها hf . فتتناسب شدة الضوء فى أى مكان مع كثافة الفوتونات (عدد الفوتونات فى وحدة الحجوم فى ذلك المكان) .

وتتناسب كثافة الفوتونات مع درجة احتمال وجود الفوتون .

أى إننا سنهمل وجود وسط يهتز أثناء انتقال الأمواج كما هو الحال فى الذبذبات الميكانيكية ، وبدلا من ذلك نعتبر ما سنسميه أمواج الاحتمال probability waves ، وكلما كانت سعة هذه الأمواج كبيرة كلما كان احتمال وجود الجسم كبيرا .

مبدأ عدم اليقين لهيزنبرج Uncertainty principle :

لا يمكن بالتجربة قياس أزواج من المتغيرات مع تحديد الدقة تحديدا لا نهائيا (غير محدود) .

مثلا : تحديد مكان جسيم وكمية حركته p_x & x

تحديد طاقة جسيم فى زمن معين E & t

تحديد كمية الحركة الزاوية مع الزاوية p_ϕ & ϕ

وينص المبدأ على أنه إذا كانت كمية الحركة تتحدد بالمدى Δp ، وكان موضع الجسيم بتحديد بالمقدار Δx فإن :

$$\Delta p \ . \ \Delta x \cong h$$

$$\Delta p \ . \ \Delta \phi \cong h$$

وبالمثل : $\Delta E \cdot \Delta t \cong h$

لتوضيح هذا المبدأ نفرض أننا نريد تحديد بدقة كبيرة موضع إلكترون نستخدم لذلك ميكروسكوب من نوع معين يسقط فوتونات على هذا الألكترون لتحديد مكانه . وكلما أردنا التحديد بدقة أكبر كلما وجب استخدام أطوال موجة أقصر لهذه الفوتونات أى إننا لنميز مسافات أبعادها $١٠^{-٩}$ سم يجب استخدام أشعة جاما في هذا الميكروسكوب .

لكى نرى الإلكترون يجب أن يرتد عليه فوتون واحد على الأقل داخل الميكروسكوب . يتصادم هذا الفوتون أصلا مع الإلكترون لكى يرتد وبذلك يعطيه دفعة تغير حتما من سرعته وبالتالى كمية حركته . وكلما أردنا المزيد من الدقة كان علينا استخدام فوتونات أكبر كتلة $\left(m = \frac{hf}{c^2} \right)$ وبذلك يزداد التغير فى كمية الحركة . أى أن زيادة الدقة فى تحديد المكان x كانت على حساب الدقة فى تحديد قيمة كمية الحركة p .

مسائل علي الباب الخامس

١ – جسيم ألفا طاقته 7.7 Mev يتجه نحو نواة ذرة رصاص (الوزن الذرى 82). أوجد المسافة التى يصل إليها الجسم من النواة قبل ارتداده باعتبار النواة ثابتة .

٢ – أوجد طول موجة نيوترون طاقته 10 M e v وكتلة النيوترون 1.67×10^{-27} kg

٣ – أوجد طول الموجة المصاحبة لإلكترون اكتسب طاقته خلال سقوطه فى فرق جهد قدره 20 V .

٤ – أثبت أن إلكترون الذرة يوجد خارج النواة وليس دخلها . اعتبر نصف قطر الذرة 1 °A ونصف قطر النواة 10^{-12} cm . الطاقة القصوى للإلكترون 2 M e V وكتلته 9.1×10^{-31} kg

٥ – ما هى طاقة حركة إلكترون فى أدنى مستوى للطاقة عند سقوطه فى بئر جهد اتساعه 5×10^{-9} cm .

٦ – احسب مستويات الطاقة لجسيم كتلته 0.001 kg موجود فى بئر جهد مربع اتساعه 10^{-2} cm .

ماذا يجب أن تكون قيمة m لكى تكون طاقة الحركة 1 Joul ؟ وما المسافة التى تفصل مستويى الطاقة E_n & E_{n+1} ؟

٧ – ما هى زاوية السقوط لتى تسبب انعكاساً لنيوترونات طاقتها 0.025 e V عند

سقوطها على سطح بلورة تبعد مستوياتها الذرية عن بعضها $1.15\ ^{\circ}A$ ؟ (كتلة النيوترون $1.67 \times 10^{-24}\ gm$)

٨ – ما هي درجة الدقة التى يمكن بها تحديد سرعة سيارة كتلتها $1.5 \times 10^{2}\ kg$ يتحدد موضع مركز الكتلة لها إلى $1\ ^{\circ}A$

٩ – عمر الإثارة لنواة ذرة هو $5 \times 10^{-14}\ sec$ ما هو أقل خطا فى قياس طاقتها ؟