الجزء الثاني

الفيزياء الذريـــة

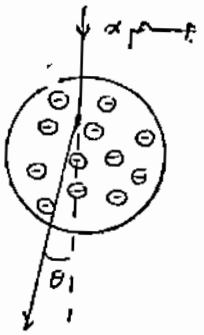
الباب الخامس

النظرية الذرية للحالة الصلبة Atomic theory of the solid state

نستعرض أولا وبسرعة تركيب الذرة

الذرة وحدة المادة :

كان تومسون هو اول من حاول وضع نموذج للذرة وفيه افترض أن الشحنة الموجبة فى الذرة تتوزع بانتظام داخل كرة وان الالكترونات تتخللها وتحتل اماكن معينة بهـــا .



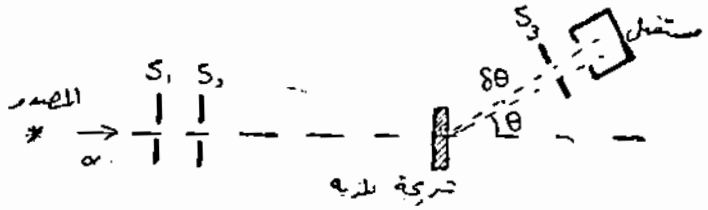
شكل ٥ ــ ١

ويعود فشل هذا النموذج الى ان الانحراف المتوقع حدوثه لاشعة α يجب ان يكون صغيرا وهذا يخالف الواقع حيث انه وجدت انحرافات كبيرة بزوايا قد تزيد عن ٩٠° .

نموزج رذرفورد : افترض رذرفورد أن الشحن الموجبة تتركز فى حيز صغير جدا (أقل من ١٠ ــ ١٢ سم)وان الالكترونات تحيط هذه النواه بشكل

وقد استخدمت تجربة تشتت جسيمات α لدراسة كيفية توزيع الكتلة والشحنة داخل الذرة .

تسقط حزمة من اشعة α على شريحة رقيقة من فلز ويمكن دراسة التوزيع الزاوى للجسيمات بواسطة شاشة **Angular distribution** فلوريه او غرفة تاين **I.C. detector**



شكل ٥ ــ ٢

ولتفسير النتائج رياضيا فرض رذفورد ما يأتى :

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

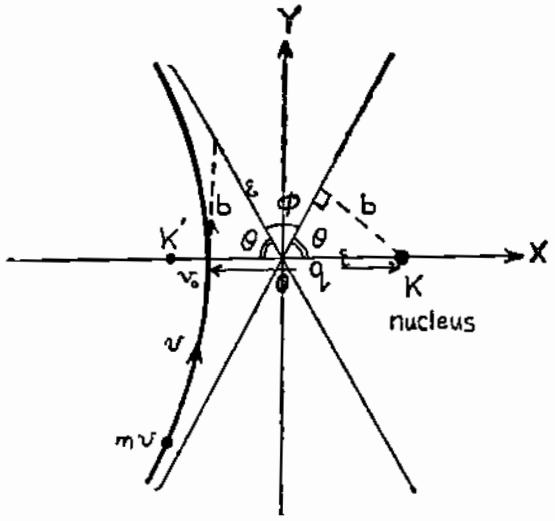
٢ ــ **القوى الكولوميه بين جسيمات** α والنواة هى فقط التى تحدد انحراف المســـــار للجســـيمات .

٣ ــ استخدام رذرفورد ميكانيكا نيوتن لتعيين انحراف المسار .

معادلة رذر فورد للتشتيت

نفرض ان الشحنة على النواة Ze وان جسيم α يقترب من نواة الذرة عند K فينحرف مساره صانعا قطع زائد تنطبق احدى بؤرتيه مع النواة K .

b = المسافة العمودية بين النواه K واتجاه جسيم α الاصلى وتسمى **impact parameter** :



شكل ٥ — ٣

q = المسافة من K الى راس القطع الزائد .

من هندسة الشكل : $q = \varepsilon (1 + \cos \Theta)$

حيث ε هى المسافة OK وتسمى eccentricity

و Θ هى الزاوية بين الاتجاه الاصلى للجسيم والاتجاه السينى من الشـــكل :

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

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

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

نفرض ان v هى سرعة الجسيم بعيدا عن النواه وان v_0 هى سرعته عندما يكون أقرب مايمكن منها وان m هى كتلته .

بتطبيق قانون بقاء الطاقة : —

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

« طاقة الموضع فى أقرب نقطة + طاقة الحركة فى أقرب نقطة = طاقة الحركة الاصلية للجسيم »

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

بوضع

$$k = \frac{Z e E}{m v^2}$$

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

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

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

$$m v b = m v_0 q$$

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

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

ومن المعادلتين (١) ، (٢) وبالاختصار نحصل على $b = k \tan \Theta$

لكن من الشكل $\varphi = \pi - 2\Theta$ حيث φ هى زاوية انحراف الجسيم α

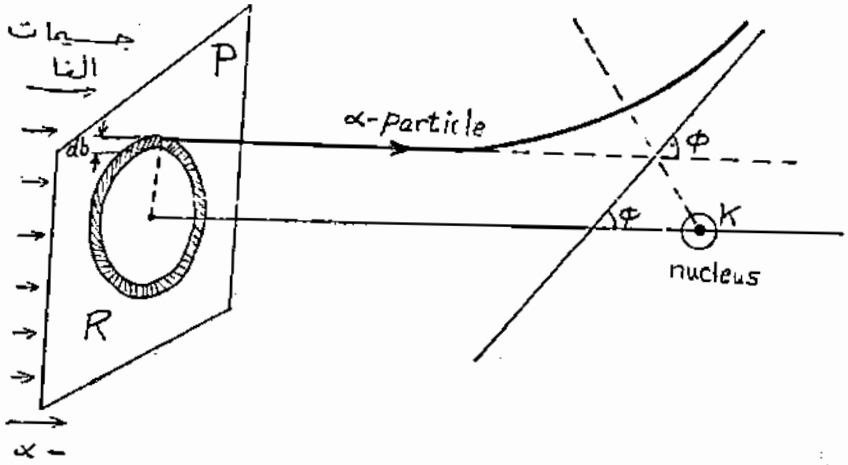
$\therefore \Theta = (\frac{1}{2}\pi - \frac{1}{2}\varphi)$

$\therefore b = k \tan(\frac{1}{2}\pi - \frac{1}{2}\varphi) = k \cot \frac{1}{2}\varphi \quad \ldots (3)$

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

حساب عدد جسيمات α التى تنحرف بزاوية معينة

نفرض مستوى P عمودى على اتجاه أشعة α



شكل ٥ — ٤

نفرض K نواة ذرة فى طريق الاشعة .

مسقط K على المستوى P هو C

جميع الجسيمات التى تمر خلال الحلقة R التى انصاف اقطارها b + db & b تتعرض لانحراف يقع بين (φ+ d φ & φ)

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

عدد الجسيمات التى تعبر الحلقة R فى الثانية =
$$d N (\varphi) = 2 \pi \, b \, d b . N$$

لكن من معادلة (3)

$$db = k \, d (\cot ½ \varphi) = - \frac{k \, d \varphi}{2 \sin^2 \varphi / 2}$$

∴ عدد جسيمات α التى تتشتت بين φ، φ + d φ هى

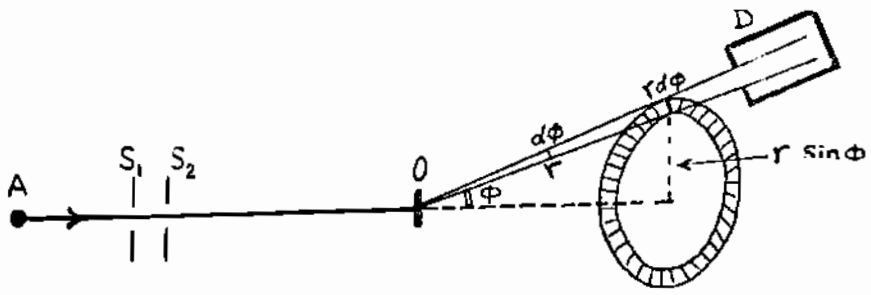
$$d N (\varphi) = - \pi \, k^2 \frac{N \cos \varphi}{\sin^3 \varphi / 2} \, d \varphi$$

الاشـــــارة السالبة تعنى تناقص d N عند تزايد φ هذا بالنسبة لنواه ذره واحدة

ولكن اذا اعتبرنا أن t هو سمك شريحة الفلز الذى تتشتت عليه الجسيمات وان n هو عدد الذرات فى وحدة الحجوم لهذه المادة تكون عدد الذرات فى وحدة المساحات عند O هو n t ويكون

العدد الكلى للجسيمات التى تتشتت على الشريحة فى الزاويه dφ هـــــو

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



شكل ٥ — ٥

اذا كان عداد الجسيمات المشتته D على بعد r من الشريحة O فان العدد السابق d N (φ) يتوزع على مساحة الحلقة dA حيث نصف قطرها $2\pi r \sin\varphi$ وسمكها r dφ

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

ويكون عدد الجسيمات فى وحدة المساحات من هذه الحلقة هو

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

$$= \frac{\pi nt \; N k^2 \cos \varphi/2}{2\pi \; r^2 \sin\varphi \; \sin^3 \varphi/2} =$$

$$= \frac{nt \, N k^2}{4 r^2 \sin^4 \varphi/2}$$

$$\therefore \quad N(\varphi) = \frac{N}{r^2} . nt . {}^1\!/_4 \; e^4 \frac{Z^2}{K^2 \sin^4 \varphi/2}$$

$$\alpha$$

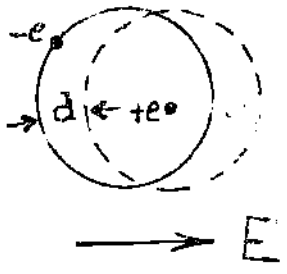
وقد استبدلنا $E = 2e$ فى المقدار $k = \frac{Z e E}{m v^2}$ ووضعنا $K = \frac{1}{2} m V^2$

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

صعوبات هذا النموذج :

١ ــ اذا كانت الالكترونات فى حالة سكون فلايوجد مايمنع سقوطها الى داخل النواه بواسطة القوى الكولوميه .

٢ ــ اذا كانت فى حالة حركة دائرية حولها فعلى حسب النظريات الكلاسيكية الكهرو مغناطيسية فان الألكترون يشع من طاقته اثناء 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 : ــ

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

٢ ــ يمكن للطاقة أن تمتص أو تنبعث

بكميات محددة وان الاشعاع ذو التردد f يكون مصحوبا بمقادير من الكم quanta قيمـــة كل منهـا h f حيث h هو ثابت بلانك

($h = 6.624 \times 10^{-34}$ j. sec)

فروض بوهر :

وقد استخدم بوهر النتيجة الثانية لنظرية بلانك وفرض : —

١ — ان الألكترون الذرى لا يستطيع أن يتحرك فى اى مسار ممكن حول النواة ولكنه يتحرك فى مستويات طاقة او مسارات معينة .

٢ — لا يفقد الألكترون أثناء حركته اى جزء من طاقته
stationary orbit

٣ — يمكن للألكترون أن يقفز من مسار الى آخر ذو طاقة اقل مع انبعاث كم من الطاقة يعادل الفرق بين طاقتى المسارين

$$E_1 - E_2 = h f$$

٤ — فرض بوهر مسارات دائرية للالكترون . واعتبـر ان كميـة الحركة الزاوية تخضع للمبدأ الكمى
quantization of the angular momentum

اى أن

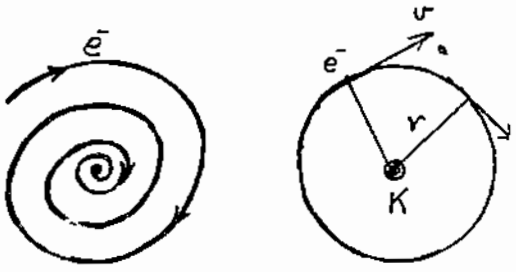
$$\therefore \quad m v r = \frac{n h}{2 \pi}$$

حيث r نصف قطر المسار n هو العدد الكمى

و m هى كتلة الألكترون ، v سرعته

الحالات الكمية للالكترون فى الذرة

يحدث اتزان حركى للالكترون حول النواة عند ما تتساوى القوة الطاردة المركزية $\frac{mv^2}{r}$ للخارج مع القوة الجاذبة الكولومية بين شحنة الالكترون e والنواة Ze



شكل ٥ ــ ٦

$$\therefore \quad \frac{mv^2}{r} = mrw^2 = \frac{Ze^2}{r^2}$$

وبحذف سرعة الالكترون v من المعادلتين السابقتين نحصل على نصف قطر المسار

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

طاقة الالكترون الكلية = طاقة حركته + طاقة موضعه

$$-\frac{Ze^2}{r} + \frac{1}{2} m V^2 =$$

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

$$\therefore \quad -\frac{1}{2}\frac{Z e^2}{r} = E_n$$

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

تعطى هذه المعادلة مستويات الطاقة المختلفة التى يمكن أن يكون عليها الالكترون

بالنسبة لذرة الايدروجين : $z = 1$ نصف قطر المسار الأول $n = 1$ هو

$$r_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 m e^2} = 5.27 \times 10^{-9} \quad cm$$

اى ان قطرة الذرة فى حدود ١ انجستروم .

طيف ذرة الايدروجين :

عندما ما يقفز الكترون 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

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

وبدلالة العدد الموجى

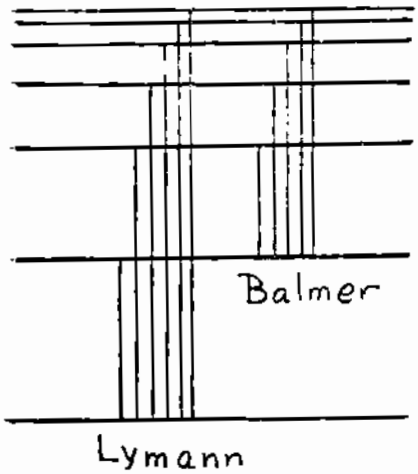
$$\frac{1}{\lambda} = \bar{f}$$

حيث

$$\bar{f} = RZ^2 \left(\frac{1}{n^2_2} - \frac{1}{n_1^2} \right)$$

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

وتسمى R_H للأيدروجين بثابت ريدبرج ويساوى $1.097 \times 10^7 m^{-1}$



شكل ٥ — ٧

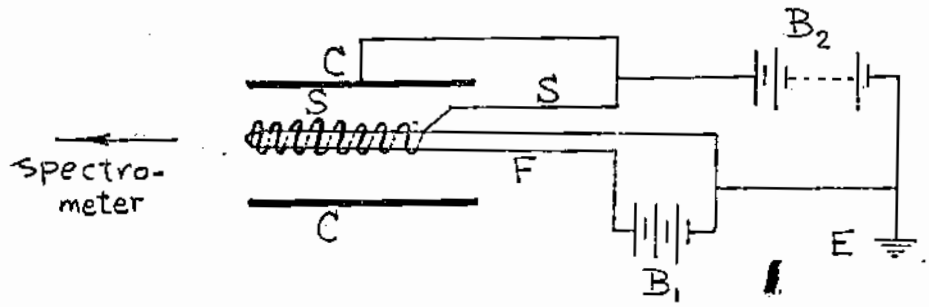
وقد فسرت نظرية بوهر ما سبق اكتشافه فى المتسلسلات الطيفية مثل متسلسلة بالمر ومتسلسلة ليمان الخ .

والتى تم اكتشافها بالتمرين فقط .

قياس جهد الاثارة :

Excitation potential.

S شبكة حلزونية



شكل ٥ ــ ٨

F فتيل يسخن بواسطة بطارية B_1

C اسطوانة معدنية تحيط بالشبكة الموضوعة فى محورها ومتصلان معا ليكون لهما نفس الجهد الكهربى .

يوجد داخل الاسطوانة C الغاز تحت الاختبار بضغط مخفف .

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

تتسارع الالكترونات بواسطة جهد الشـــــبكة . وبعد خروجها منها تتحرك فى حيز لا تؤثر فيه اية قوى force free وذلك لتساوى جهد الشبكة والاسطوانة C .

اذا كانت طاقة الالكترونات كافية لاحداث اثارة لذرات الغاز تخرج فوتونات يمكن رؤيتها بجهاز اسبكترومتر .

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

مثال : فى حالة الصـــوديوم وجد أن جهد الاثارة للخط الأصفر ٢٫٠٩

فولط فتكون طاقة الاثارة لهذا الخط = e V = $2.09 \times 1.6 \times 10^{-12}$

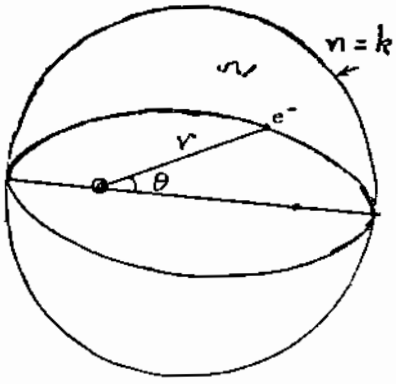
= 3.34×10^{-12} ارج

طاقة الفوتون للخط الاصفر

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

= 3.36×10^{-12} ارج

حركة الالكترونات فى قطع ناقص



اعتبر سومر فيلد حركة الالكترونات فى قطاعات ناقصة كما هو الحال فى حركة الكواكب حول الشمس . تكون احدى بؤرتى القطع هى نواة الذرة .

شـــكل ٥ ــ ٩

للالكترون فى هـــذه الحالة درجتين من درجات الحرية تمثـــلان بـــ Θ ، r بالاحـــداثيات القطبية . ينتج عن ذلك نوعان من كمية الحركة : ١ ــ زاوية $P\,\Theta$ ٢ ــ نصف قطرية Pr ويوجد عندئذ عددان كميان k & n بدلا من عدد واحد كما فى نظرية بوهر ذات المسارات الدائرية .

واضح أنه يمكن وجود اكثر من مسار يختلف فى قيمة k ولكن له نفس العدد الكمى n ويصبح المسار دائريا عند ما يكون $k = n$

لم يستطع هذا التعديل فى نظرية بوهر من تفسير التركيب الـــدقيق

Fine structure لأطياف الذرات الثقيلة . ولذلك بدأ التفكير فى الميكانيكا الموجية .

فرض دى برولى De Broglie Hypothesis

ادخل دى برولى فكرة الطبيعة المزدوجة للمادة
dual nature of matter

فرض ان : —

١ — كل جسيم كمية حركته p يكون مصحوبا بموجة طولها λ

حيث $\lambda = \frac{h}{p}$ و h هو ثابت بلانك

٢ — كلما وجدت موجة طولها λ فان مربع سعة حركتها square of amplitude يتناسب مع احتمال وجود جسيم له كمية حركة

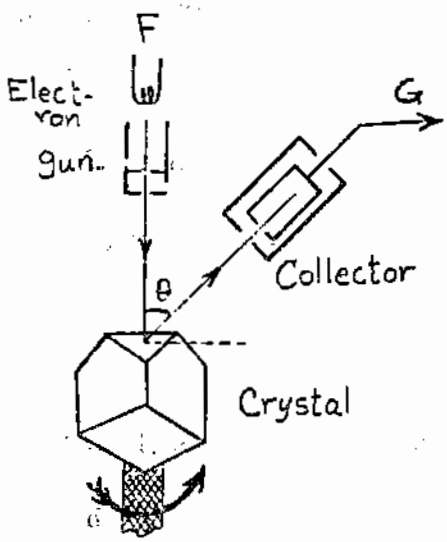
$$p = \frac{h}{\lambda}$$

وقد أمكن استخدام النظرية الموجية لاثبات هذا الفرض .

ايجاد طول موجة دى برولى عمليا : تجربة دافيسون وجيرمر : Davisson and Germer Expt.

درس دافيسون وجرمر انعكاس الالكترونات على بلورة احادية من النيكل

يتركب الجهاز من مدفع الكترونى يمكن الحصول منه على الكترونات ذات سرع معينة ويمكن التحكم فى قيمها .

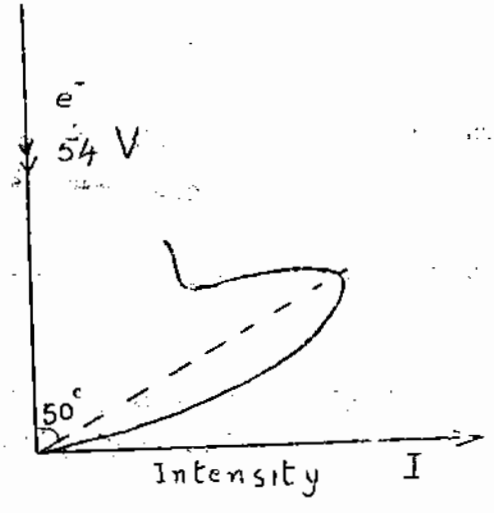


تسقط حزمة الالكترونات عموديا على سطح بلورة من النيكل فتتشتت الالكترونات فى جميع الاتجاهات .

شكل (٥ — ١٠)

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

وبدراسة تغير شدة التيار الالكترونى المنعكس على البلورة مع الزاوية Θ بين الشعاع الوارد والشعاع المنعكس الذى يدخل غرفة التأين ، وجد انعكاس كبير بزاوية قدرها ٥٠° عند ما كانت الالكترونات تسقط خلال فرق فى الجهد قدره ٥٤ فولط بالمدفع الالكترونى



اذا كانت سرعة الألكترون v وكتلته m

∴ طاقة الالكترون بسقوطه فى فرق جهد V فولط داخل المدفع الالكترونى هى :

$$\frac{1}{2} m v^2 = e V$$

(e مقاسة بالكولوم)

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

كمية الحركة للالكترون $\therefore \quad p = m v$

وبتطبيق فرض دى برولى تكون الموجة المصاحبة للالكترون هى :

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

وفى حالتنا هذه عند ما يكون $V = 54$ تكون

$$\lambda_e = 1.67 \quad A^\circ$$

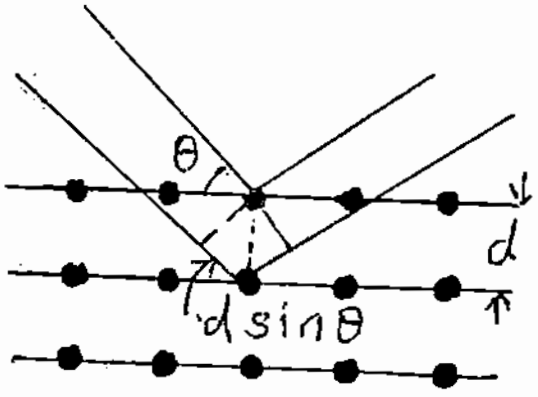
أما اذا اعتبرنا ان الألكترونات الساقطة ما هى الا موجات طولها λ

يمكن تطبيق قانون براج باعتبار ان البلورة تمثل محزوز حيود

$$n \lambda_{e'} = d \sin \Theta$$

وبمعرفة أن d للنيكل = 2.15 انجستروم وان $\Theta = 50$ بالتجربة فان طول الموجة مقاسة بطريقة براج هى

$$\lambda_e = 2.15 \sin 50 = 1.65 \quad A^\circ$$



شكل ٥ — ١٢

وواضـــح أن قيمة λ المقاسة بواسطة قانون براج اى باعتبار ان الالكترونات هى امواج تتفق الى حد كبير مع طول الموجة كما تحدده معادلة دى برولى مما يحققها عمليا .

مشـــكلة الاثير : Ether

اذا اعتبرنا الجسيمات (الالكترونات مثلا) امواجا 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 $C = \sqrt{B/d}$

اذا تخيلنا وســطا مــا تكون كثافته هى اقل كثافة معروفة لتــكن ($١٠^{-٤}$ جم/سم ٣).

ومعامل مرونته الحجمى اكبر معامل معروف لأى مادة (لتكن ١٢١٠ داين/سم٢ مثلا) فان سرعة الأمواج فى هذا الوسط التخيلى هى :

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

وواضح أن هذه السرعة اقل بكثير من قيمة سرعة الضوء المعروفة . وهذا يدل على أن وجود مثل هذا الوسط ليس صحيحا .

∴ لا صحة لوجود اى وسط ناقل للأمواج الكهرومغناطيسية . وبالرغم من ذلك فاننا سنحاول وضع معادلة موجية (اسوة بالمعادلات الموجية للصوت حيث يوجد وسط ناقل للموجة) يمكن بواسطتها وصف حركة تلك الأمواج المصاحبة للجسيمات حتى وان كانت هذه الأمواج ليست امواجا بالمعنى المفهوم .

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

وتتناسب كثافة الفوتونات مع درجة احتمال وجود الفوتون .

اى اننا سنهمل وجود وسط يهتز اثناء 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 الجسيم كبيراً .

مبدأ عدم التحديد 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 انه اذا كانت كمية الحركة تتحدد بالمدى Δp وكان موضع الجسيم يتحديد بالمقدار ΔX فان

$$\Delta p \cdot \Delta x = h$$

$$\Delta p \cdot \Delta \varphi = h$$

وبالمثل :

$$\Delta E \cdot \Delta t = h$$

لتوضيح هذا المبدأ نفرض اننا نريد تحديد بدقة كبيرة موضع الكترون 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 اننا لنميز مسافات أبعادها ١٠^-٤ سم يجب استخدام اشعة جاما فى هذا الميكروسكوب .

لكى نرى الألكترون يجب أن يرتد عليه فوتون واحد على الأقل داخل الميكروسكوب . يتصادم هذا الفوتون أصلا مع الألكترون 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 x كانت على حساب قيمة P .