سلسلة محاضرات فيزياء الجوامد : مجموعة محاضرات تغطي مقرر فيزياء الجوامد لطلاب الفيزياء ،السنة الرابعة ،ومفردات هذه المحاضرات مرتبة وفق ما ورد في الخطة الفصلية لأغلب الجامعات مع التفاوت من حيث التفصيل وسأتخذ الوسطية في العرض ،وأشير إلى المرجع في حال وجود تفصيلات معقدة لم ترد في الشرح ليستفيد منها من يود الاستزادة. والمواقع التالية مفيدة جدا وممتعة وخصوصا الموقع الثاني لجامعة كامبردج لكافة المحاضرات كمرجع باللغة الانجليزية:

- http://en.wikipedia .org/wiki/Solid_state_physics

http://www.msm.cam.ac.uk/doitpoms/index.html http://www.matter.org.uk/diffraction/sitemap.htm

الحيود في البلورات

Diffraction in crystals

1- مقدمة:

يتم التعامل مع الجسيمات المادية وفق فرضية دوبري على أنها ذات طبيعة مثنوية(موجة-جسيم) ويتحدد طول الموجة المرافقة للجسيم وفق العلاقة التالية:

$$\lambda = \frac{h}{p} \qquad (1)$$

إن شرط حيود الأمواج(الأشعة) أثناء اختراقها للبنية البلورية أن تكون أطوال أمواجها من مرتبة المسافة بين الذرات في البلورة أي من مرتبة أطوال المتجهات الأولية $\vec{a},\vec{b},\vec{c}$ ،عندها يمكننا أن نجد حزما موجية تحيد باتجاهات مختلفة عن اتجاه الحزمة الداخلة إلى البلورة ومن خلال ذلك نستطيع تحديد التركيب البلوري ،ومن ثم الحصول على المسافة الوسطية بين الذرات ومجموعات التناظر وأمور أخرى متعددة سندرس أهمها.

2- طاقة فوتونات الأشعة السينية(the energy of x-ray photons):

تعتبر الأشعة السينية المصدر الرئيس للمعلومات عن بنية البلورات وذلك لأنها تتمتع بطيف واسع من الأطوال الموجية (الأشعة البيضاء) تتناسب تماما مع كافة الأبعاد بين ذرية في الجامد. حيث يمكن استخدام البلورات الحقيقة كشبكات حيود فضائية (فراغية) للأشعة السينية التي أطوال أمواجها من مرتبة الأبعاد الذرية (Von laue 1927) .

وكما هو معلوم في حيود الضوء فان زاوية الحيود تتعلق بشكل رئيس بتغير البنية البلورية وبطول موجة الحزمة الضوئية الساقطة (حزمة الورود)على البلورة ، ولمعرفة طول موجة الحزمة يجب أن تكون طاقة الأشعة ذات أطوال موجية من مرتبة المسافة بين الذرات في البلورة ويتم معرفة ذلك وفقا لمعالجة الرياضية التالية:

تعطى طاقة الفوتون من خلال علاقة اينشتاين التالية:

$$E = \hbar\omega = h\upsilon = h\frac{c}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{E} \qquad (2)$$

تبين العلاقة (2) أن طول الموجة دالة لطاقة أشعة اكس لأن hc= 1240 ev.nm , ولحساب طول الموجة بالأنجستروم ($1A^0=10^{-10}m$) تؤخذ الطاقة بالكيلو إلكترون فولت (Kev)حيث($1ev= 1.602\times10^{-19}$) ومنه تصبح العلاقة:

$$\lambda = \frac{1240 \quad ev.nm}{E \ Kev} = \frac{12.4}{E} \quad A^0 \qquad (3)$$

إذا كانت المسافة بين الذرات من مرتبة مضاعفات الأنجستروم وأجزاءه فان طاقة الفوتون يجب أن تكون مبين (10-50 Kev)،وهو طيف الطاقة اللازم لإجراء التجارب بالأشعة السينية على البلورات ويعتبر طيف واسع يتناسب مع كافة الأبعاد البلورية ويمكننا من تحليل الصورة الناتجة عن الحيود وتحديد توزع الذرات في البلورة .

3- طاقة النيترونات(Energy of neutrons):

يعطي حيود النيترونات معلومات هائلة عن البنية البلورية وخصوصا تلك المغناطيسية، ولمعرفة طول الموجة للنيترون حيث يتحقق شرط الحيود نستخدم علاقة دوبري(1) ونستنتج كمية الحركة(p) من الطاقة الحركية للنيترون وهي:

$$E_n = \frac{p^2}{2m} = \frac{h^2}{2m_n\lambda_n^2} \quad \Rightarrow \lambda_n = \frac{h}{\sqrt{2m_nE_n}} \qquad (4)$$

نبدل قيم الثوابت في العلاقة (4) حيث($m_n=1.675\times10^{-27}Kg$) والتعبير عن قيم الطاقة بالإلكترون فولت وطول الموجة بالأنجستروم نجد أن :

$$\lambda_n \approx \frac{0.28}{\sqrt{E_n}} \quad A^0 \qquad (5)$$

حتى يكون طول موجة النيترون من مرتبة الأنجستروم يجب أن تكون الطاقة للنيترون من مرتبة ($E_n=0.08$ ev) وهذه الطاقة من مرتبة الطاقة الحرارية KT في درجة حرارة المختبر والتي تساوي 0.025 ev ولهذا السبب تدعى هذه النيترونات بالنيترونات الحرارية وهي تتحرك بسرعة من مرتبة 4000m/s .وبما أن النيترونات تملك عزوما مغناطيسية فإنها تلعب دورا مهما في الكشف عن البلورات المغناطيسية بالإضافة إلى الكشف عن الأبعاد بين الذرات في البلورة.

4- طاقة الإلكترونات(Energy of electrons):

تلعب هذه الدراسة دورا مهما في الكشف عن الطبيعة الموجية لالكترونات من ناحية ودراسة الحيود من ناحية أخرى حيث أن الآلية المسئولة عن حيود الالكترونات في البلورات هو المجال الكهربائي المتولد في الذرات داخل الجسم الجامد (النوى ذات الشحنات الموجبة والالكترونات ذات الشحنة السالبة)الذي

يكون شديدا كلما اقتربنا من مركز الذرة أي أن الالكترونات تتبادل التأثير بشدة مع الذرات بسب شحنتها وبالتالي فهي لا تستطيع اختراق البلورات إلا لمسافات صغيرة نسبيا.

تأخذ العلاقة الرياضية بين طول موجة الإلكترون وطاقته علاقة شبيهة بعلاقة النيترونات مع استبدال كتلة النيترون في العلاقة (5) بكتلة الإلكترون($m_e=0.91\times10^{-30}Kg$) وتصبح كما يلي:

$$\lambda_e = \frac{12.25}{\sqrt{E_e}} \quad A^0 \qquad (6)$$

أي أن الالكترونات التي أطوال أمواجها من مرتبة الانجستروم تمتلك طاقة تقريبية من مرتبة 150 ev وتتحرك بسرعة 7×10^6 m/s .

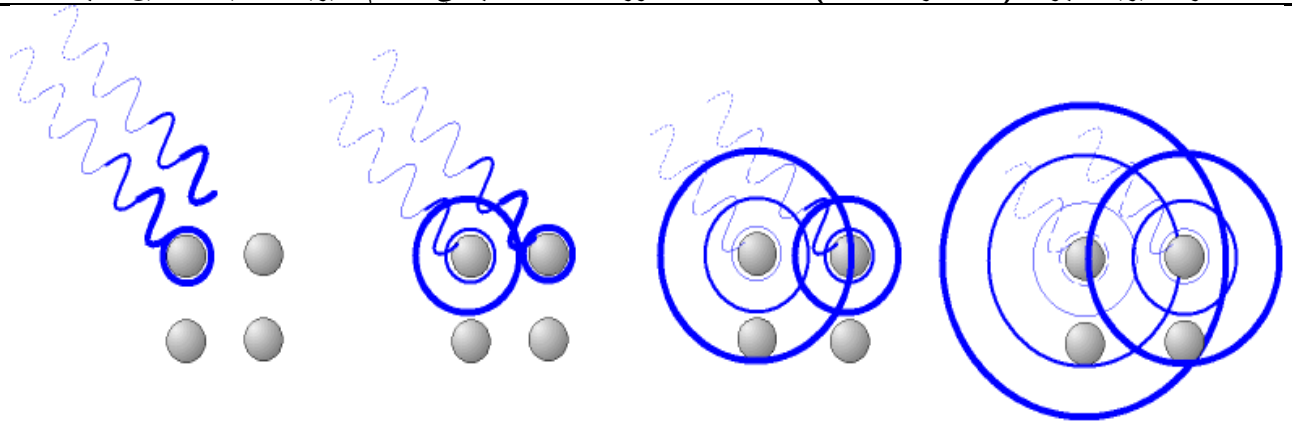
5- قانون براغ (Bragg's law) فى الحيود :

في عام 1913 م وضع براغ الشروط الهندسية لحيود حزمة وحيدة الطول ألموجي من الأشعة السينية وقد افترض أن حزمة الأشعة الساقطة على البلورة تنعكس مثلما تنعكس الأشعة العادية عن مرآة مستوية(زاوية السقوط تساوي زاوية الانعكاس) بالنسبة لمختلف المستويات الذرية في البلورة ،وان الربط بين زاوية السقوط وطول الموجة للضوء المستعمل والمسافة بين مستويات الانعكاس شرط أساسي للانعكاس الجيد(براغ).

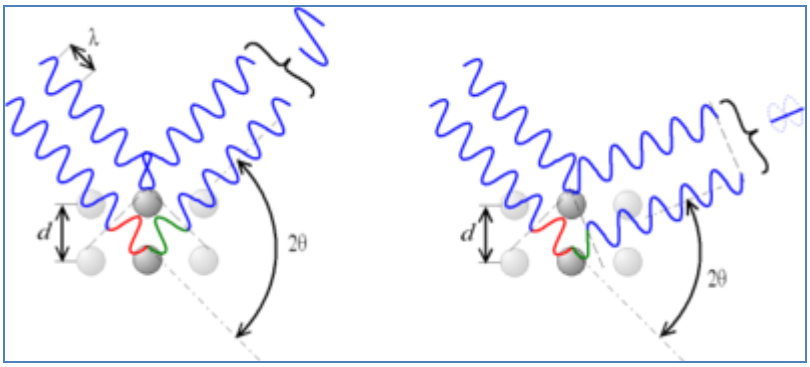
تسقط أشعة اكس بشكل حزمة متوازية على المستويات الذرية (تابع الأشكال بدقة من 1-8)حيث من المفترض أنها ستخترق الطبقات المختلفة للبلورة وتتبادل التأثير مع كافة المستويات الذرية حتى العميقة منها، ويفترض أيضا أن المستويات الذرية تعكس قسما صغيرا من الأشعة والباقي ينفذ إلى المستويات الأخرى.

وبما أن البلورة تتألف من عدة مستويات ذرية وان أي مستوي يمتلك ترتيب دوري للذرات فان هذه المستويات ستتفاعل مع الأشعة السينية وكأنها شبكات حيود مستوية(راجع خواص شبكة الحيود المستوية من أي مصدر) وسوف يؤدي ذلك إلى حيودات من رتب مختلفة اعتبارا من المستوي الأول إلى الثاني إلى الثالث .....الخ. وسيؤدي دخول أشعة اكس إلى أعماق البلورة إلى ظهر كم هائل من الأشعة المنعكسة الناجمة عن آلاف المستويات الذرية(شبكات حيود) ولكن القسم الأكبر منها يضعف شدته نتيجة لعملية التداخل والقسم الأخر تزداد شدته وهذا الشرط يتحقق عندما يكون فرق المسير بين الأشعة الساقطة(الواردة)والمنعكسة يساوي إلى عدد صحيح من طول الموجة المستخدمة(راجع الموقع التالي على شبكة الانترنتhttp://en.wikipedia.org/wiki/Bragg%27s_law)أي :

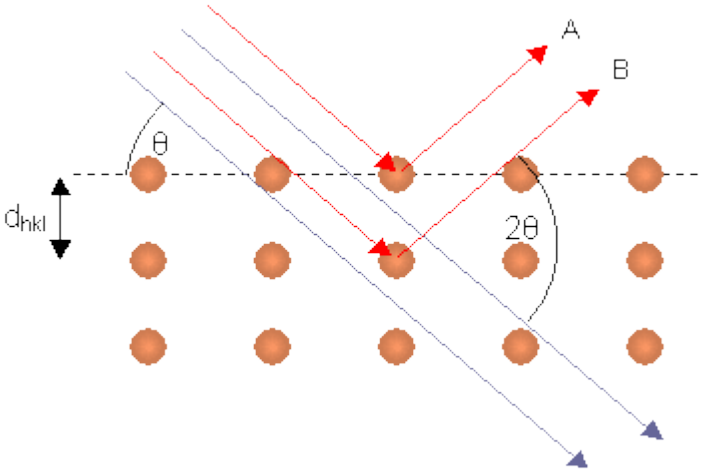
$$\Delta = n\lambda \qquad (7)$$



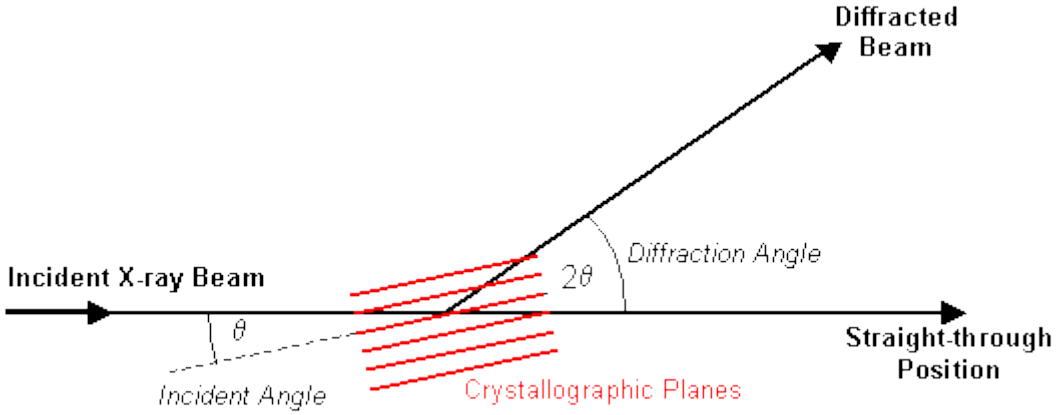
شكل(1):تفاعل الإشعاع مع المادة



شكل(2):الحيود عن مستويين ذريين



شكل(3): الحيود واختراق الأشعة للمستويات



شكل(4) : شكل تخطيطي يمثل أشعة اكس الساقطة والشعاع المنعكس وفق نظرية الحيود لبراغ

ومن الشكل ألتخطيطي (5) حيث يسقط شعاع عند النقطةA على البلورة،نجد فرق المسير بين الشعاع المنعكس على المستوي الأول عند النقطة A وبين الجزء الباقي من الشعاع الأصلي المنعكس على المستوي السفلي عند النقطة B يساوي إلى:

$$(AB + BC) - (AC') \quad (8)$$

وإذا كان هذا الفرق يحقق العلاقة(7) فإننا نستطيع أن نكتب العلاقة التالية:

$$(AB + BC) - (AC') = n\lambda \quad (9)$$

ونلاحظ من الشكل (5) أيضا العلاقات المثلثية التالية:

$$AB = \frac{d}{\sin\theta} \qquad BC = \frac{d}{\sin\theta}, \qquad AC = \frac{2d}{\tan\theta} \quad (10)$$

وكذلك نجد أن:

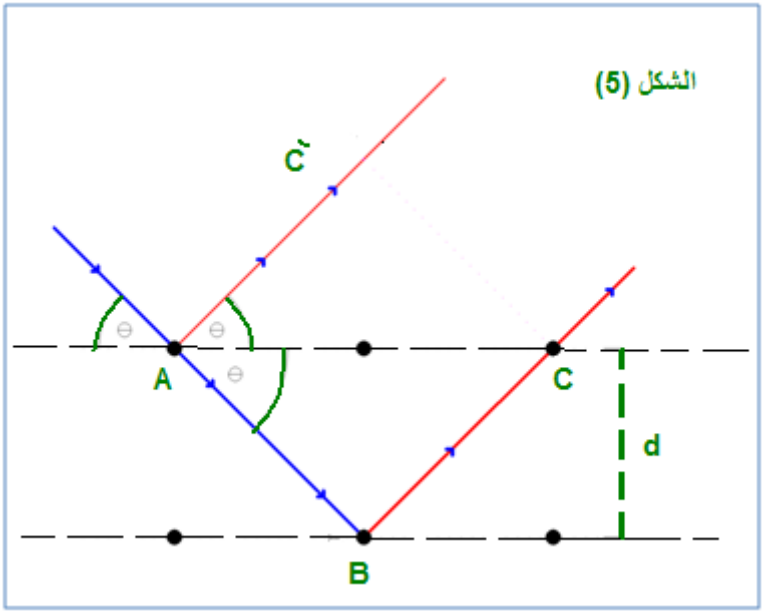
$$AC' = AC \cdot \cos\theta = \frac{2d}{\tan\theta}\cos\theta \quad (11)$$

نعوض في العلاقة (9) فنجد:

$$n\lambda = \frac{2d}{\sin\theta} - \frac{2d}{\tan\theta}\cos\theta = \frac{2d}{\sin\theta}(1 - \cos^2\theta) = \frac{2d}{\sin\theta}\sin^2\theta \quad (12)$$

ومنه نحصل على قانون براغ في الحيود:

$$n\lambda = 2d \cdot \sin\theta \quad (13)$$



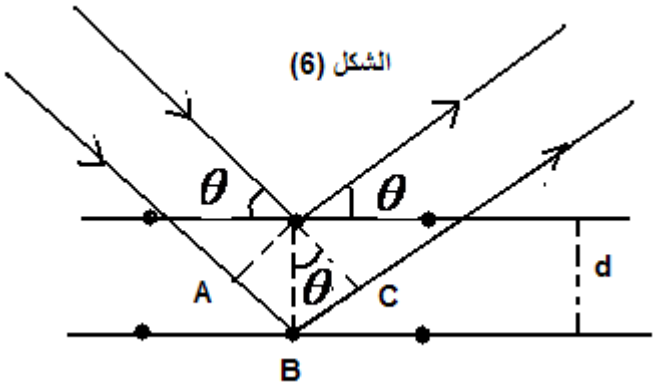
أو بشكل مختصر من الشكل (6) أيضا فرق المسار بين شعاعين احدهما يسقط على المستوي الأول والثاني على المستوي الثاني نجد:

$$\Delta = ABC = 2BC = n\lambda$$

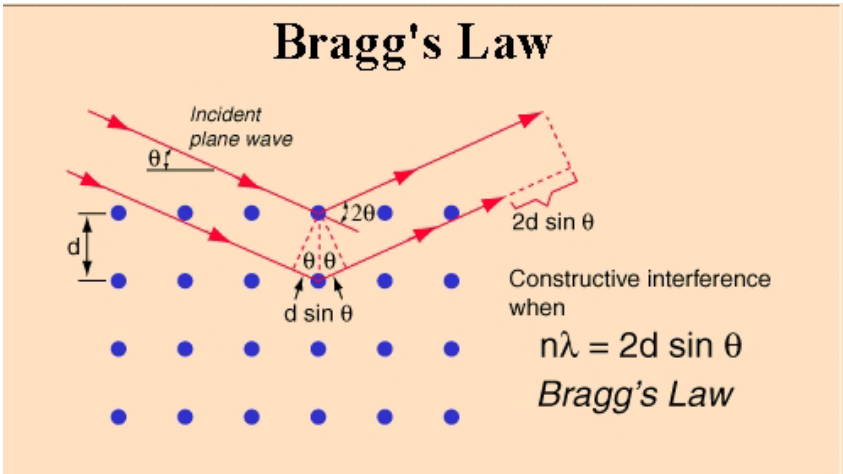
$$\sin\theta = \frac{BC}{d} \Rightarrow BC = d\ \sin\theta$$

$$\Delta = 2BC = 2d\ \sin\theta = n\lambda \qquad (14)$$

وهي نفس العلاقة (13). وتعطينا مبدئيا المسافة بين المستويات الذرية ،ويجب استعمال أكثر من طول موجي للحصول على تصور فضائي للبلورة.



Bragg Diffraction: Bragg's Law



شكل (7):قانون براغ وعملية الحيود هندسيا

Bragg Peaks

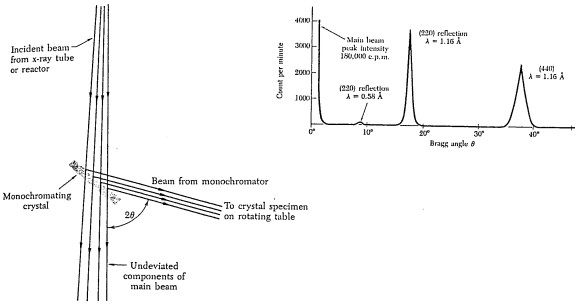


Figure 3 Sketch of a monochromator which by Bragg reflection selects a narrow spectrum of x-ray or neutron wavelengths from a broad spectrum incident beam. The upper part of the figure shows the analysis (obtained by reflection from a second crystal) of the purity of a 1.16 Å beam of neutrons from a calcium fluoride crystal monochromator. The main beam is that not reflected from the second crystal. (After G. Bacon.)

شكل (8): قمم براغ في الخط البياني تمثل الزوايا التي توافق شرط الحيود

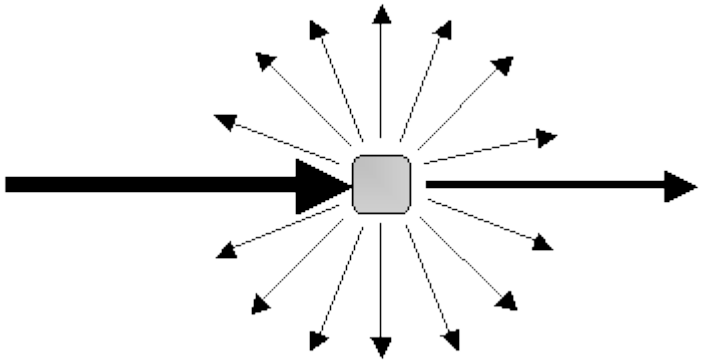
6- الطرق التجريبية لحيود الأشعة(الأمواج) على البلورات

(Experimental methods in X-ray diffraction at crystals)

1- طريقة فون لاوي:

وهي طريقة سريعة ومجدية لكشف توجهات البلورة وكشف العيوب البلورية حيث تتعرض البلورة إلى حزمة من أشعة اكس البيضاء وبطيف مستمر يتراوح مابين 0.2-3 أنجستروم وذلك لتغطية

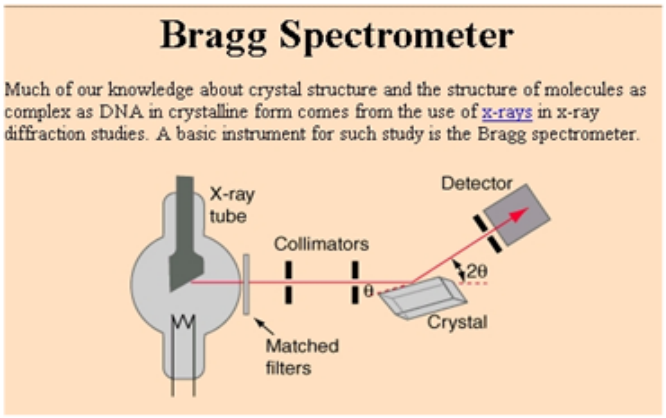
كافة الاحتمالات الممكنة للأبعاد بين ذرية وهنا كل مستوي انعكاس بلوري يختار الطول ألموجي المتناسب مع الأبعاد بين ذرية وبحيث يتحقق قانون براغ (الشكل 9).



شكل (9): شكل تخطيطي يبين حيود أشعة اكس في كافة الاتجاهات ووفق قانون براغ.

2- **<u>طريقة البلورة الدوارة(طريقة براغ):</u>** يتم فيها تعريض البلورة إلى حزمة من أشعة اكس الوحيدة ،ثم يدرس الانعكاس على جملة معينة من سطوح متوازية وذلك عند تدوير البلورة، ووفق قانون براغ يلاحظ الانعكاس من اجل زوايا سقوط معينة تحقق شرط الحيود ويم من خلالها التعرف على d لجملة السطوح المتوازية ، وغالبا يستعاض عن تدوير البلورة بتغيير زوايا سقوط الأشعة الواردة على البلورة ونحصل على نفس النتائج(أنظر الشكل 10).

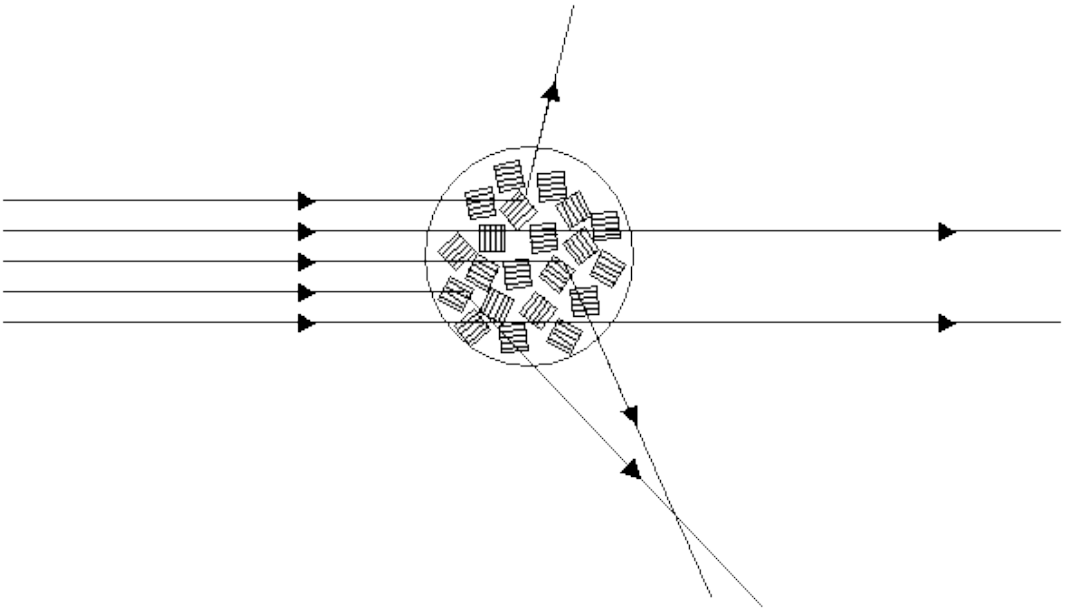
Bragg Spectrometer



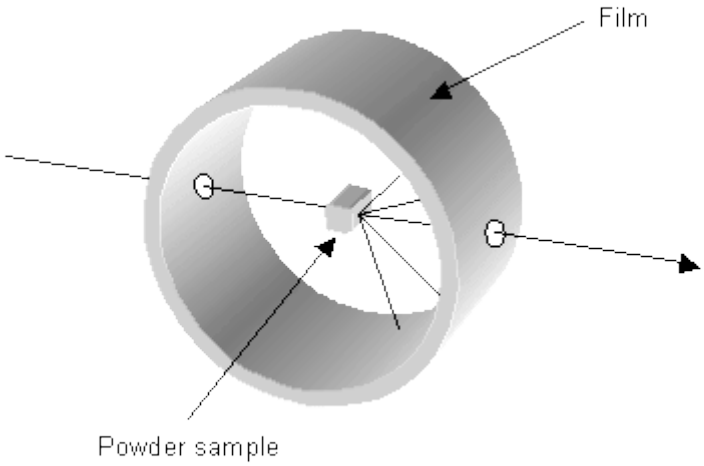
الشكل(10) : طريقة براغ التجريبية في الحيود

3- **<u>طريقة المسحوق– Scattering in X-ray powder diffraction - أو طريقة ديباي- شرر:</u>**

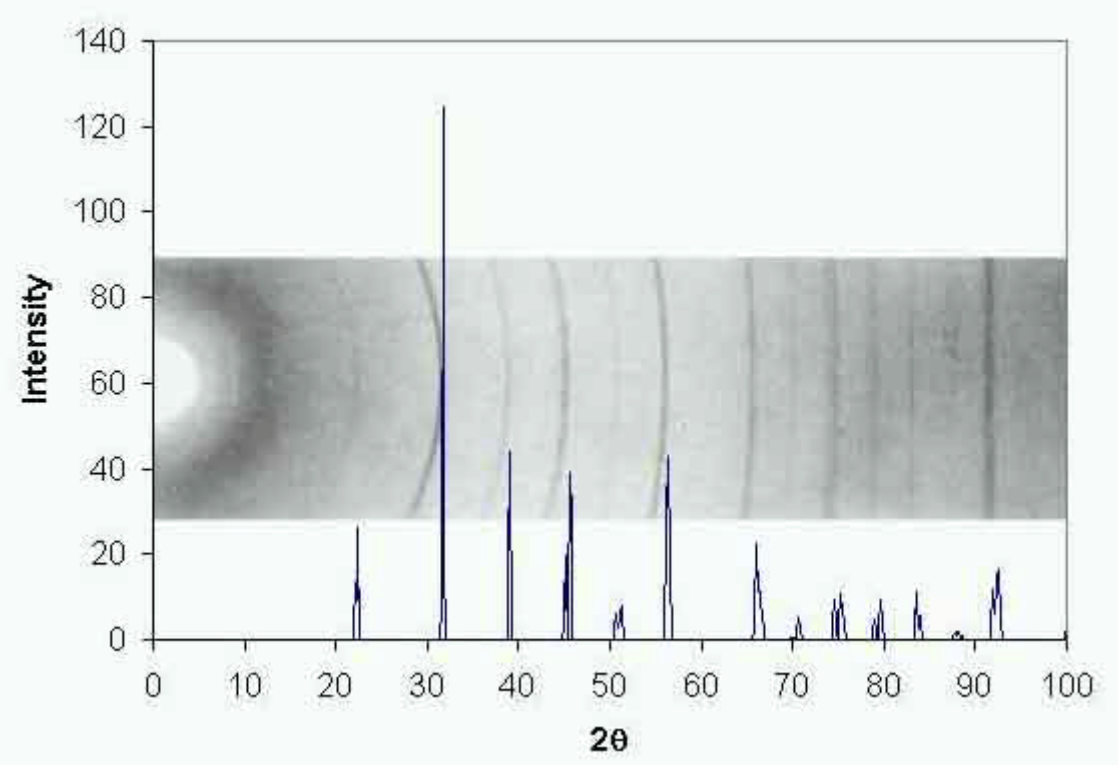
تستخدم هذه الطريقة للحصول على اكبر عدد من البلورات وتصبح كل بلورة عرضة لتحقق قانون براغ بالحصول على العديد من الانعكاسات وبالتالي الحصول على العديد من الأبعاد البلورية ، ويستخدم في هذه الطريقة تقنية الأفلام التي تصور كافة الحالات التي يتحقق فيها شرط الحيود ومن ثم الحصول على نتائج رائعة حول الأبعاد البلورية (الشكل 11 و 12 و13).



شكل(11): شكل تخطيطي لطريقة المسحوق(البودرة).



شكل(12) : طريقة الفيلم مع المسحوق



شكل (13): شكل مطابقة حقيقي بين الفلم وتظهر عليه الخطوط الداكنة وبين زوايا الحيود الموافقة لشرط براغ على الخط البياني.

4- طرق أخرى:

بعد فرضية دوبري ظهرت الرغبة في تقصي حقيقة الموجه المرافقة للجسيم المادي ولهذا الغرض أجريت تجارب هدفها الحصول على طول الموجة المرافقة للجسيم وذلك من معرفة البعد بين ذري للبلورة ،وبعد ذلك استخدمت تلك الجسيمات في دراسة البنية البلورية للجوا مد ومن هذه الطرق :

1 -تجارب دفيسون – جرمير (Davisson-Germer) على الالكترونات.
2 -تجارب تومسون (Thomson)على الالكترونات.
3 -تجارب متعددة فائقة الدقة بحزم من النيترونات وحتى حزم من الذرات عبر قنوات خاصة في المفاعلات النووية والمسرعات.