

الفحوصات الاشعاعية الفحص بالاشعة السينية X-Ray Testing

1-1 المقدمة

اكتشف العالم رونتينج **Rontgen 1895** اشعة جديدة عرفت بالاشعة السينية ولا يزال اسم الاشعة ينسب باسم مكتشفها **RontgenRay** . ولقد توصل رونتينج ان الاشعة السينية هي اشعاع كهرومغناطيسي بطول موجي قصير جداً يتراوح ما بين $(10^{-9}-10^{-11}m)$ ولها مواصفات متشابهة للضوء حيث انها تنتقل بخطوط مستقيمة منبعثة من مصدرها ولا تنحرف عن اتجاهها عند مرورها خلال المجالات المغناطيسية والكهربائية ولذلك فهي ليست دقائق مشحونة بالكهربائية.

1-2 الخصائص الرئيسية للاشعة السينية

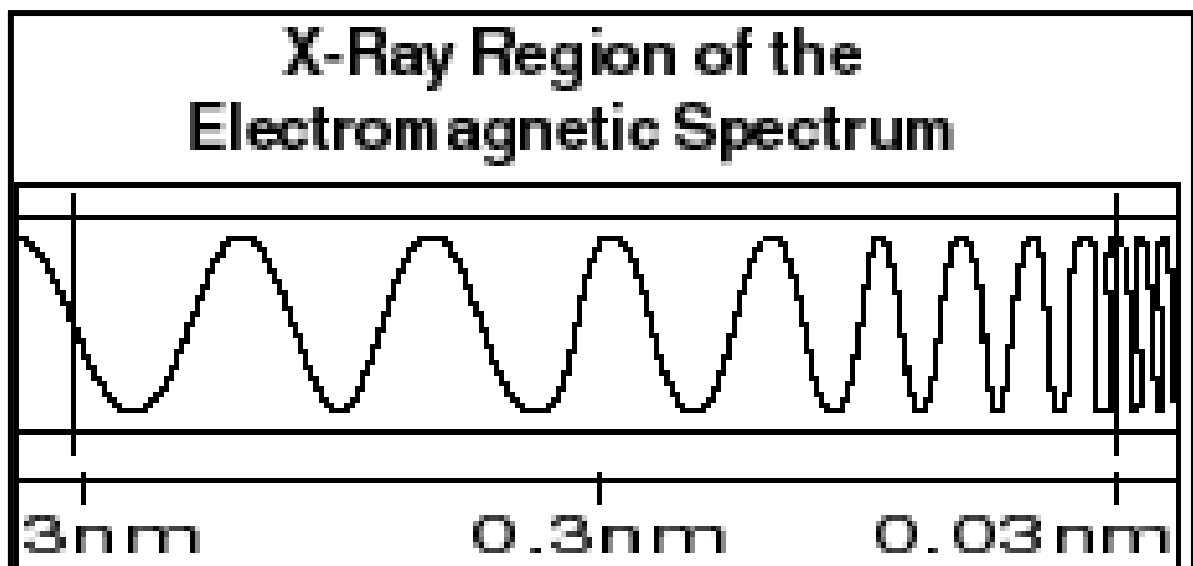
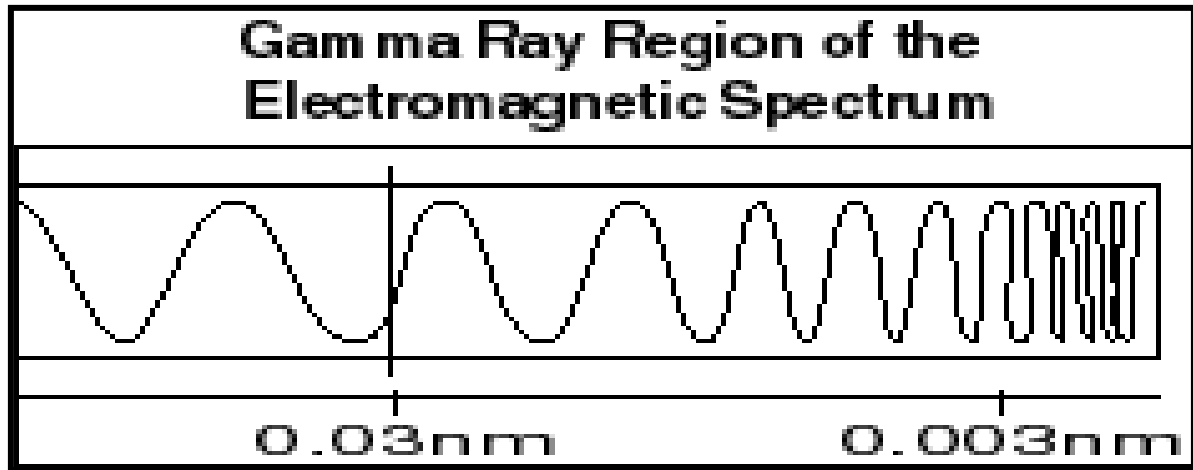
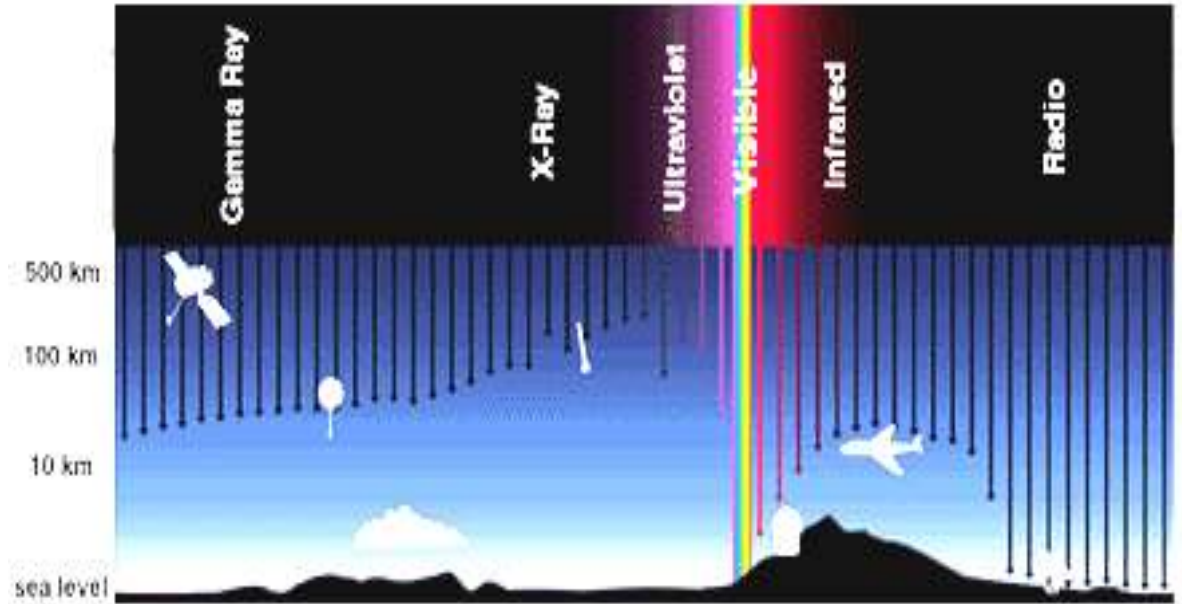
تتصف الاشعة السينية واشعة كاما بالخواص التالية :

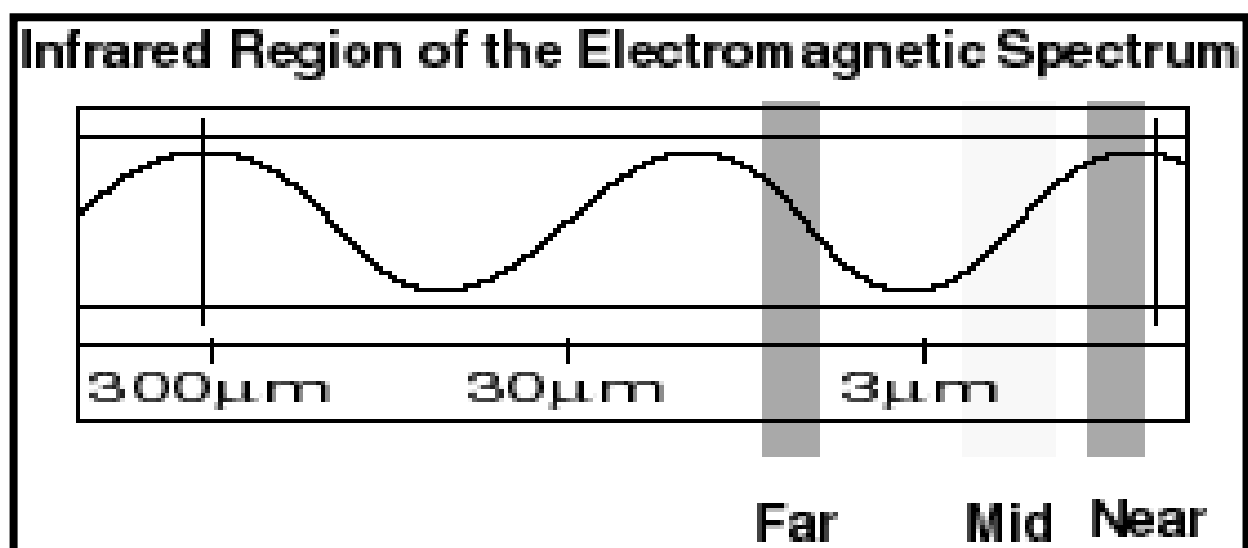
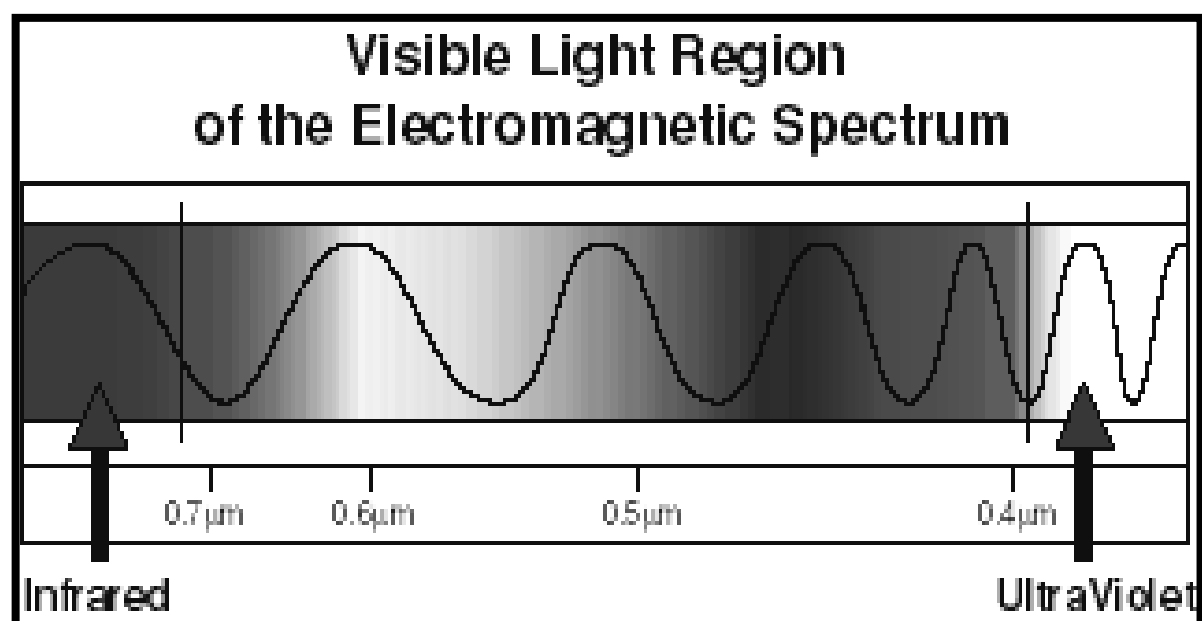
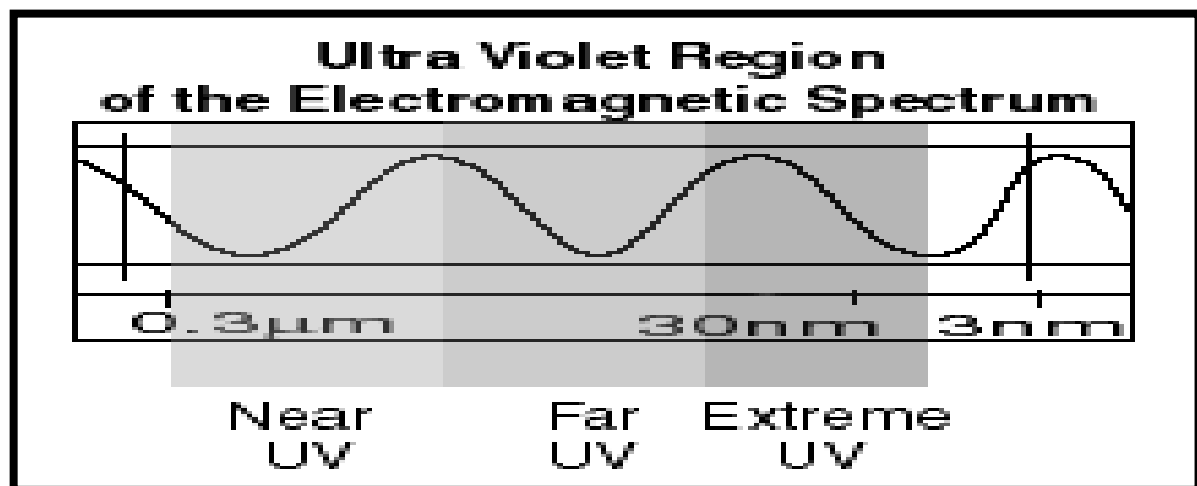
- A. اشعة غير مرئية كهرومغناطيسية.
- B. نستطيع اختراق المواد المعدنية والخلايا الحية.
- C. تخترق المواد السميكة وحسب شدة والطول الموجي للاشعة السينية.
- D. تسير بخطوط مستقيمة .
- E. تؤثر كيميائياً على المستحلبات التصويرية ولذلك تستخدم افلام التصوير في الكشف عن باطن الاجسام و عيوب المعادن بعد تعرضها للاشعة السينية.
- F. تؤين الغازات التي تمر خلالها.
- G. لا تتأثر بالمجالات الكهربائية والمغناطيسية.
- H. تسير بسرعة مقدارها $3 \times 10^{10} \text{ cm/sec}$
- I. تحرر فوتوالكترون (الكترونات الضوئية) عند سقوطها على عنصر .
- J. لا تنحرف الاشعة السينية بواسطة العدسات او الموشور على الرغم من امكانية حيودها عند مرورها خلال فتحة صغيرة .
- K. تتولد الاشعة السينية عند اصطدام الشعبة الكاثودية في أنبوب التفريغ باى جسم صلب . وتكون العناصر الثقيلة مثل البلاتين أكثر كفاءة من العناصر الخفيفة مثل الالمنيوم.
- L. تؤثر الاشعة السينية على تسبب الاشعة السينية تلف الخلايا الحية.

M. تعتبر الاشعة السينية جزء من الامواج الكهرومغناطيسية وتتحدد اطوالها الموجية من 10^{-9} - 10^{-11} m.

ويوضح الشكل (1) الاطوال الموجية للطيف الكهرومغناطيسي.

شكل(1) الطيف الكهرومغناطيسي





1-3 استخدامات الاشعة السينية

تستخدم الاشعة السينية في المجالين الصناعي والطبي حيث لها استخدامات واسعة في

المجال الصناعي للكشف عن العيوب الداخلية التالية:

- (a) عيوب عمليات السباكة (فجوات، شقوق، الاوساخ، الشوائب)
- (b) اخطاء عملية اللحام (الشقوق ، الفجوات، الاوساخ)
- (c) اختلاف التركيب الكيميائي من منطقة الى اخرى وفي حالات الاختلافات الكبيرة .
- (d) لتحديد هوية المواد وخاصة لمعادن .
- (e) الكشف عن اخطاء التجميع النهائي للمنتجات وتضيف الاشعة السينية المستخدمة وحسب استخدامها في المجال الطبي او الصناعي بالاتي :-
- الاشعة الضعيفة الاختراق soft Rays باستخدام فرق جهد 20-60 KV وتستخدم في المجال الطبي .
- الاشعة القوية الاختراق Hard Rays باستخدام فرق جهد 60-300KV وتستخدم في المجال الصناعي .
- وقد تستخدم الاشعة الضعيفة في بعض مجالات الصناعة.

1-4 الفحص اللااتلافي بواسطة الاشعة السينية واشعة كاما

التصوير بالاشعة السينية او باشعة كاما هي احدى الطرق المهمة في مجال الفحوصات

اللااتلافية في الكشف عن العيوب الداخلية التي تكون في داخل المواد او الاجزاء المصنعة وكذلك التي

تكون على السطح، وهي من اقدم الطرق المستعملة في الفحوصات حيث ان استعمالها يعود الى

العشرينات من هذا القرن، وهي الان من اوسع الطرق استعمالاً نتيجة للناتج الجيدة التي يمكن الحصول

عليها لمعرفة مدى خلو الاجزاء من العيوب ، والفكرة وراء استعمال الاشعة السينية في الكشف عن

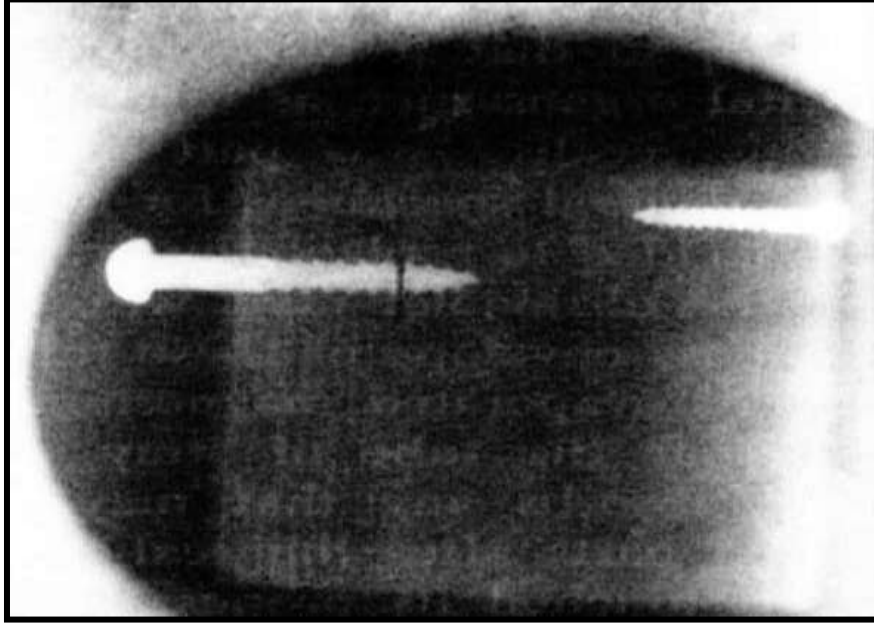
العيوب هو تعرض النموذج المراد فحصه والفلم الفوتوغرافي الى الاشعة السينية فتظهر نتائج

الفحوصات بعد غسل الفلم الفوتوغرافي الى تغيير في شدة الاشعة عند مرورها خلال المواد المختلفة

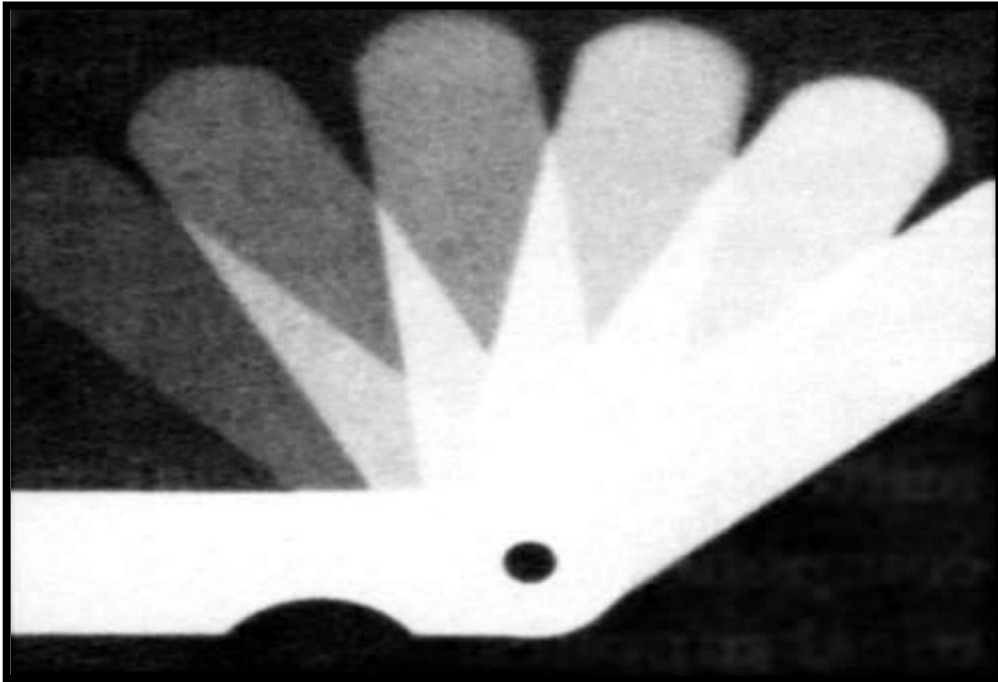
بسبب العيوب مثل الفجوات الصغيرة porosity واختلاف تركيز المواد والشقوق .. الخ ، فيظهر

الفلم اكثر سواداً عند الشقوق والفجوات واقل سواداً عند زيادة تركيز المواد ووجود الخبث ... الخ .

توضح الاشكال (2 ، 3 ، 4، 5، 6) تصوير الاشعة السينية لنماذج صناعية وكائنات حية مختلفة..



شكل (2) تصوير الاشعة السينية لبسمار في قطعة خشبية

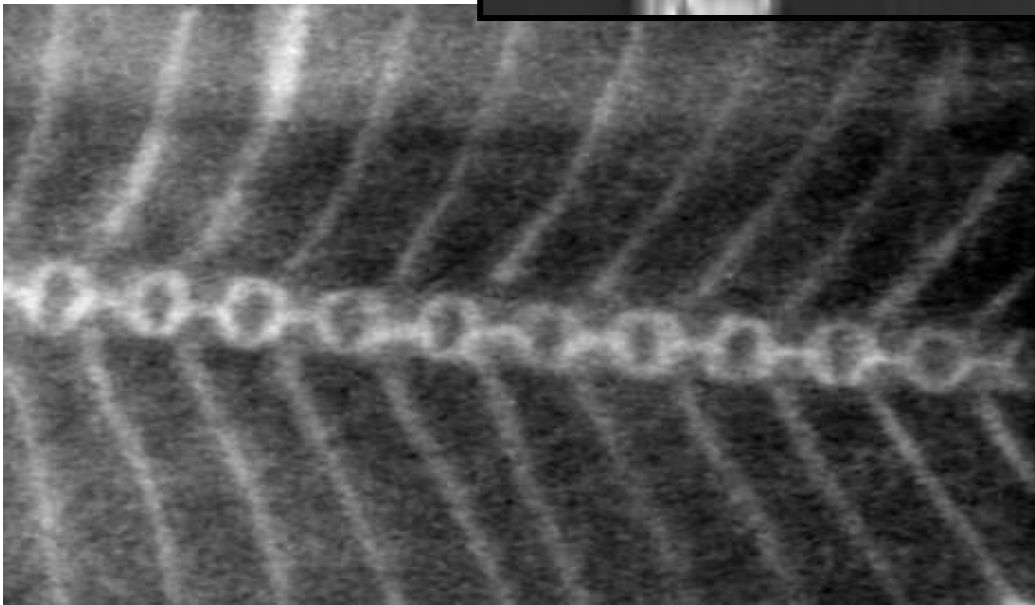


شكل (3) تصوير الاشعة السينية لاختلاف تركيز الحديد في سبكة معدنية



شكل (4) تصوير الاشعة السينية للقفص الصدري لكائن حي

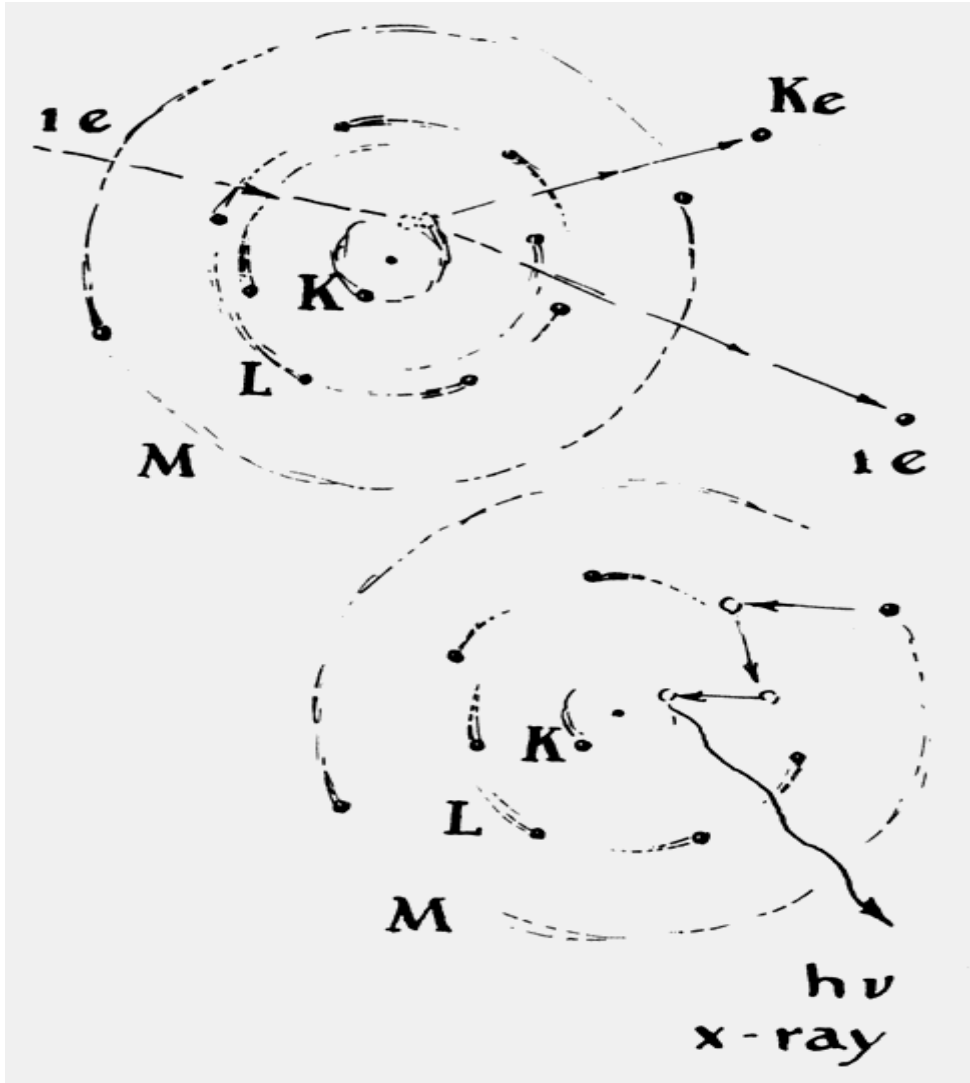
شكل (5) تصوير الاشعة السينية ليد
لكائن حي



شكل (6) تصوير الاشعة السينية لسمكة

1-5 ميكانيكية تحليل الاشعة السينية

قام موزلي 1913 بأول دراسة للاطياف المميزة للاشعة السينية النبعثة من قبل العناصر (حدد دراسته على 38 عنصر) واعتبر كل عنصر هدف في اتياب توليد الاشعة السينية.... ومن ثم يتم تحليل الاطياف الخارجة من كل عنصر بواسطة مطيافية احادي البلورة (البلورة المستخدم هي فيرو سيانيد البوتاسيوم) ويتم تسجيل الطيف على لوح فوتوغرافي داخل غرفة مفرغة من الهواء لتفادي امتصاص الاشعة الطويلة في الهواء .



**يوضح الشكل (7) ميكانيكية توليد الاشعة
السينية**

أظهرت الالواح الفوتوغرافية بأن الخطوط المنبعثة من العناصر تنتمي الى سلسلتين مختلفتين احدهما في منطقة الموجة القصيرة تعرف بسلسلة (K) والثانية موجتها اطول تعرف بسلسلة (L) .
يتم احتساب طاقة تلك السلاسل حسب نظرية بور :

$$fh = E_{n_2} - E_{n_1} \dots\dots\dots(1)$$

f-تردد السلاسل

h- ثابت بلانك

n₂ - مستوى الطاقة الاعلى

n₁ - مستوى الطاقة الاقل وبحسب التردد للاشعة المنبعثة

$$f = \frac{m_e e^4 z^2}{8 \epsilon_0^2 h^3} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \dots\dots\dots(2)$$

وبحسب العدد الموجي wave number

$$f' = \frac{1}{\lambda} = \frac{f}{c} = \frac{m_e e^4 z^2}{8 \epsilon_0^2 h^3 C} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = 1.0973 \times 10^7 m^{-1} \dots\dots\dots(3)$$

وقد اجرى موزلي تجاربه في نظرية بور لذرة الهيدروجين وبين ان تردد الخط (K_α) و (L_α) لابد ان يكتب بالصيغة التالية ، بعد ان يطرح (Z) العدد الذري من كمية ثابتة فتصبح تردد الخط K_α :

$$fK_{\alpha} = Rc (Z - 1)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) \dots\dots\dots(4)$$

علمنا ان :- $1.0973 \times 10^7 m^{-1} \quad Rc =$

$$fL_{\alpha} = RC (Z - 7.4)^2 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) \dots\dots\dots(5)$$

تفسر معادلة (4) ان الخط K_{α} ينبعث عندما يدخل الالكترون مدار عدده الكمي $n=2$ (الغلاف L) الى مدار عدده الكمي $n=1$ (غلاف K) . ، وهذا لا يحدث الا اذا كان الغلاف K فاقد لاحدى الالكترونين الموجودين فيه. ان تفسير (Z-1) بدلاً من Z لان الالكترون المنتقل من الغلاف $L \rightarrow K$ يتحرك في مجال شحنة النواة الموجبة ($+Ze$) والشحنة السالبة ($-e$) للالكترون المتبقي في الغلاف k ، وعليه فأن المجال سوف يعادل مجال الشحنة الموجبة مقدارها (Z-1) ويقال ان الالكترون في غلاف K يحجب النواة ويجعل شحنتها الفعالة اقل من شحنتها الاصلية .

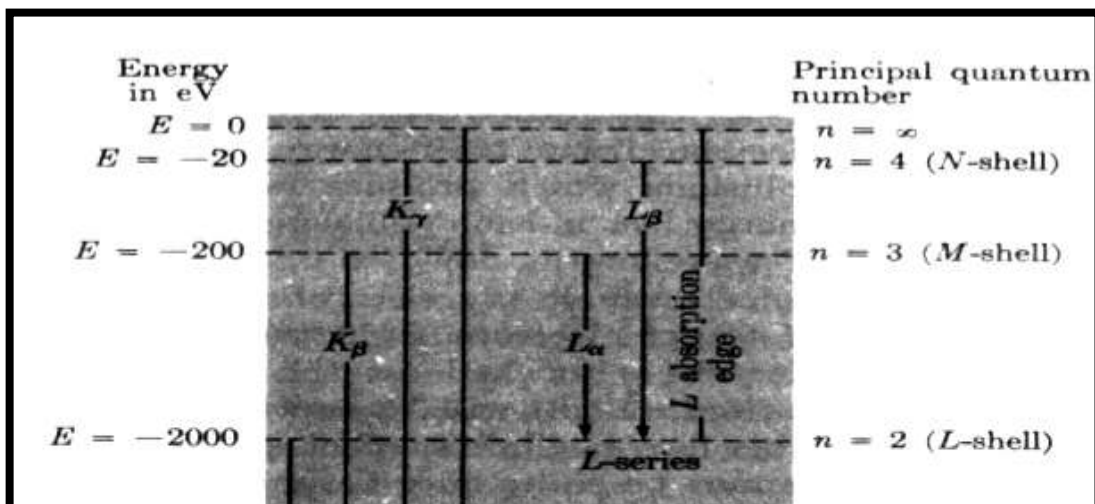
$$Z_{eff} = Z - 1$$

اما تغيير معادلة (5) في هذه الحالة فأن الالكترون المقتلع هو احدى الالكترونات غلاف $n=2$ وعند انتقال الالكترون من مدار $n=3$ (غلاف M) الى الغلاف (L) يبعث فوتون تردده يساوي تردد الخط L_{α} ، ويظهر في المعادلة (Z-7.4) سبب ذلك يعود الى كون الالكترونات في غلاف (L) منتشرة اكثر من الالكترونات في غلاف (K) ولذا فأن جميع هذه الالكترونات لاتحجب النواة عن الكترونات في الغلاف (M) كما تفعل في غلاف (K).

1-6 مستويات الطاقة للأشعة السينية

في موضوع تغيير توزيع الالكترونات في المدارات ($n=1$ الغلاف k) ويحتوي على (2 electrons) والمدار L يحتوي (8 electrons) والمدار $n=3$ (غلاف M) يحتوي على (18 electrons) ، والمدار $n=4$ (الغلاف N) يحتوي على (32 electrons) ويعرف (E_K) بالطاقة اللازمة لازالة احد الالكترونات من غلاف K الى خارج الذرة ، (E_L) هي الطاقة اللازمة لازالة احد الالكترونات من غلاف (L) وكذلك E_M الخ . ان الغلاف (L) اقرب من غلاف M للنواة فذلك ان طاقة الترابط للالكترونات من الغلاف (K) هي اكبر من طاقة ترابط الالكترونات من غلاف (L) وان :

$$E_K > E_L > E_M > E_N$$



انتقال الالكترون من غلاف $L \rightarrow K$ يبعث خط طيف K_α ذات تردد

$$f_{K\alpha} = \frac{E_K - E_L}{h} \dots\dots\dots (6)$$

انتقال الالكترون في غلاف $M \rightarrow K$ يبعث خطأً هو K_β ذات تردد

$$f_{KB} = \frac{E_K - E_M}{h} \dots\dots\dots (7)$$

انتقال الالكترون من غلاف $N \rightarrow K$ يعطي خط طيف K_γ ذات تردد

$$f_{KY} = \frac{E_K - E_N}{h} .$$

وكذلك يبعث خطوط طيفية للمدارات الاخرى وكما موضح في الشكل (5).

1-7 طيف الاشعة السينية

عند قياس شدة الاشعة السينية المنبعثة عن هدف كدالة لطول موجتها بواسطة مطياف بلوري وجد بأن طيف الاشعة السينية الناتج يتألف من نوعين متميزين:-

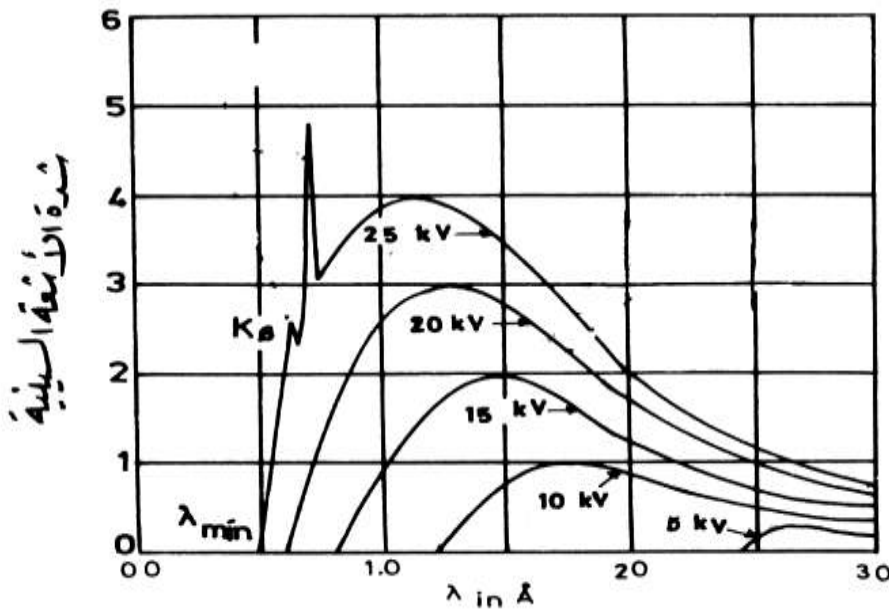
(a) طيف مستمر

(b) طيف خطي

(c) مركب على الطيف المستمر .

والشكل (8) يبين طيف الاشعة السينية لهدف المولبدنيوم لفروق جهد مختلفة مسلطة على الانبوب ،ويظهر الطيف الخطي عند فرق الجهد 25 كيلو فولت ،والخطان الحادان الظاهران هما من مميزات معدن المولبدنيوم ويعرفان بخطي $k\alpha$ و $k\beta$ للمولبدنيوم.

وينتج الطيف المستمر بسبب فقدان الالكترونات لمعجلة طاقتها على شكل اشعاع عند اصطدامها بجسيمات الهدف وتباطؤها ، كما بينا سابقاً ينبعث الاشعاع عندما يتعجل (او يتباطأ) جسم مشحون ويسمى هذا النوع من الاشعاع باشعة البريمشترهناك (او اشعة التوقف) والذي ينتج بسبب توقف الالكترونات المعجلة بالاصطدام ، اما الطيف لخطي فينتج بسبب الاشعاع الناجم عن اعادة ترتيب الالكترونات المدارية لذرات مادة الهدف في مستويات الطاقة المختلفة ،والذي يتبع تحرر احد هذه الالكترونات من الذرة نتيجة اصطدام الالكترونات المعجلة بها . ولما كانت قيمة طاقة المستويات الذرية محددة فان انتقال الالكترونات المدارية من مستوى واطئ يؤدي الى اشعاع فوتون ذي طاقة معينة تساوي فرق الطاقة بين المستويين وبذلك يكون طول موجته محدداً ويظهر على شكل خط حاد في الطيف ، ولما كانت قيمة طاقة المستويات الذرية هي من مميزات ذرات مادة الهدف لذلك كان الطيف الخطي من مميزات مادة الهدف ايضاً.



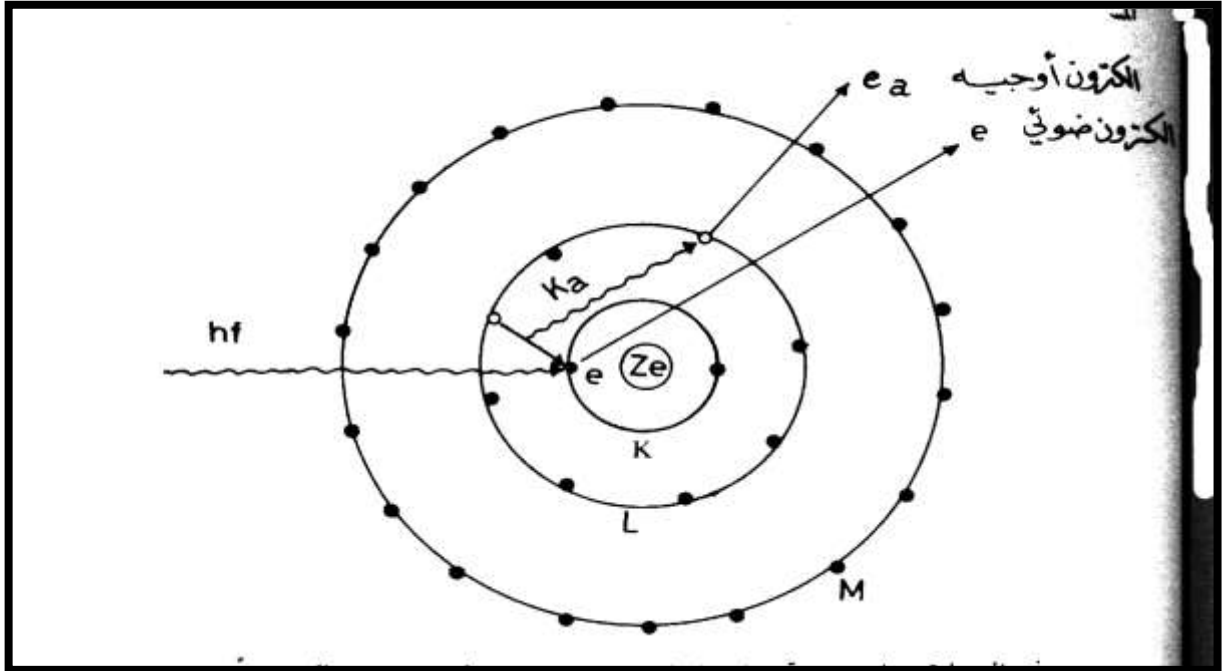
شكل(8) يوضح طيف الاشعة السينية

1-8 الانتقالات الغير مشعة : ظاهرة اوجيه

عندما يسقط فوتون الاشعة السينية على ذرة معينة ويتمكن من قطع احد الالكترونات في الغلاف (K) فينتقل الالكترون من $L \rightarrow K$ مع بعث فوتون الاشعة السينية من خط طيف نوع $K\alpha$ وهذا

الفوتون النبعث قد يقطع الكترون في غلاف L تاركاً الذرة ثنائية التأين في المستوي L وكما موضح في الشكل (7) ، وتكون الطاقة الحركية للالكترون اوجيه هي :

$$T_a = E_K - E_L - E_L$$



شكل (9) ظاهرة اوجيه

فعملية الانتقال من مستوى K إلى مستوى L يؤدي إلى انتقال الكترون في غلاف L مؤدياً إلى بعث طاقة كافية لاقتلاع الكترون.

هنالك احتمالات أخرى فقد يبعد الفوتون K إحدى اللكترونات في غلاف M ويكون كل من المستوي احادي التأين فتكون الطاقة الحركية للكترونات هي:

$$T_a = E_K - E_L - E_M$$

9-1 توليد الاطيف المميزة للأشعة السينية

- (A) باسقاط الأشعة الكاثودية أو اللكترونات السريعة الحركة على ذرات العناصر .
- (B) باسقاط فوتونات ذات طاقة كافية على ذرات العناصر كما في التأثير الضوئي الكهربائي للأشعة السينية والذي يتبعه إعادة ترتيب اللكترونات في الذرة فتؤدي إلى إنتاج الطيف المميز للأشعة السينية وتسمى هذه باطيف الفلورية للأشعة السينية.
- (C) باسقاط ايونات موجبة كالبروتونات أو جسيمات ألفا ذات طاقة عالية .
- (D) بطريقة أسر الكترون - تحدث عملية الأسر اللكترون في حالات الانشطار النووي لأحد ذرات العنصر حيث تنتشر النواة إلى نواة الأم ونواة وليدة فتأسر النواة الوليدة أحد اللكتروني

الغلاف K القريبة من النواة فينتقل احد الكترونات الغلاف L او M ... او K باعثاً فوتون الاشعة السينية من نوع K_{α} او K_{β} واحسن دليل على حدوث هذه العملية هو انبعاث الطيف المستمر للاشعة السينية . مثال على ذلك أحدى النظائر لعنصر $^{107}\text{Cd}_{48}$ التي تتحول الى ^{107}Ag .

(E) ينبعث فوتون اشعة كما عند انتقال نواة متجهة من مستوي عالي الطاقة الى مستوي طاقتة واطئة او الى المستوي الارضي للنواة ، فيحدث ان يقلع هذا الفوتون الكترونات من احد الاغلفة الداخلية مما يؤدي الى انتقال الكترون من غلاف خارجي الى الغلاف الذي فقد الالكترون فيبعث فوتون الاشعة السينية وبذلك ينتج الطيف المميز للاشعة السينية.

(F) تحدث عملية التحويل الداخلي كبديل لانبعاث اشعة كما فبدلاً من انبعاث اشعة كما عند انتقال نواة متجهة الى مستواها الارضي ، يكتسب احد الالكترونين الغلاف K القريب من النواة الغلاف في الطاقة الناتج من انتقال النواة ويترك الذرة في الحالة K وعندئذ ينتقل الكترون من الغلاف M,L,K... الى K باعثاً فوتون الاشعة السينية من نوع K_{α} ، K_{β} ... وبذلك ينتج الطيف المميز للاشعة السينية.

1-10 الاجهزة المستخدمة لتوليد الاشعة السينية (X-ray prodection)

يمكن توليد الاشعة السينية عن طريق استعمال الكترونات بسرعة عالية تصطدم بهدف من مادة معدنية حيث يؤدي ذلك الى توليد الاشعة السينية عن طريق تحول قسم من طاقة هذه الالكترونات لتوليد اشعة X .

المتطلبات الاساسية لانتاج الاشعة السينية تتمثل بثلاثة اجزاء :

1. مصدر الكترونات
 2. طريقة يمكن بواسطتها تعجيل الالكترونات للوصول بها الى سرع عالية .
 3. هدف معدني (Metal Tarjet)
- في الانابيب التي تولد الاشعة السينية تعجل الالكترونات عن طريق فرق جهد عالي بين مصدر الالكترونات الذي يدعى الكاثود والهدف ، فرق الجهد هذا يدعى بفولتية انبوب الاشعة السينية .

- الالكترونات المتحركة من الكاثود الى مادة الهدف تدعى بتيار انبوب الاشعة السينية.
- طاقة الاختراق للاشعة السينية تقاس عادة بالكترون - فولت (ev) والكيلو الكترون - فولت (kev) او ميكا الكترون - فولت (Mev).

ويعرف (ev) بأنه الطاقة التي يكتسبها الالكترون عند تعجيله في مجال كهربائي الذي يحدثه فرق جهد مقداره فولت واحد..

السرعة التي يصدم بها الالكترون مع مادة الهدف يحدد بواسطة فولتية الانبوب والطاقة التي تتولد بها الاشعة السينية تتناسب مع مربع السرعة التي يتحرك بها الالكترون $\frac{1}{2}mv^2$.

تزداد قابلية الاشعة السينية على اختراق المواد كلما كانت طول موجتها قصيرة .. وهناك نوعان من انابيب توليد الاشعة السينية والتي يمكن ان تستعمل في تصوير الاشعة وهما انبوب الغاز وانبوب كولتج Coolidge.

وانبوب كولتج يستعمل بصورة واسعة في الوقت الحاضر وهي وكما في الشكل (9)، ويجري تفريغ الهواء من الانبوب بصورة جيدة، الكاثود موجود بشكل سلك بشكل جلزوني وهو من عنصر التتستن عادة ويسخن بواسطة بطارية كما في الشكل لكي يجهز الانبوب بالالكترونات. اشعاع الالكترونات من الكاثود بالشكل المشروح يدعى thermo Ionia emission.

- التجارب والبحوث النظرية تقرر ان انبعاث الالكترونات من الكاثود الساخن تتناسب مع درجة الحرارة الكاثود.

- السلك الذي يمثل الكاثود موضوع داخل cup حيث يعمل على تنظيم المجال الكهرومغناطيسي بحيث ان الالكترونات تسقط على مساحة صغيرة جداً من الانود (الهدف).

- الفولتية العالية تسلط بين الكاثود والهدف حيث يعمل فرق الجهد بين هاتين النقطتين على تعجيل الالكترونات لكي تصدم الهدف بقوة.

- شدة الاشعة السينية التي تتولد نتيجة اصطدام الالكترونات بالهدف تتناسب مع تيار الانبوب (اي الالكترونات المنطلقة من الكاثود الى الهدف) وكذلك جهتي تعتمد على فولتية انبوب الاشعة السينية.

كفاءة توليد الاشعة السينية تعطى بالعلاقة التالية:-

$$E = 1.4 \times 10^7 Z V$$

حيث E تمثل الكفاءة

و Z العدد الذري لمادة الهدف

و V هي فولتية الانبوب

من هذه العلاقة يتضح ان كفاءة توليد الاشعة السينية تكون قليلة عندما تكون فولتية الانبوب قليلة او واطئة فعند استعمال فولتية مقدارها 300 كيلو فولت فقط 3% من طاقة الالكترونات تتحول الى اشعة

سينية اما البقية فتتحول الى طاقة حرارية حيث ان الطاقة الحرارية التي تتولد على الهدف تتناسب مع حاصل ضرب فولتية الانبوب في تياره IV وهي مقدار كبير تؤدي الى ارتفاع درجة حرارة الهدف بسرعة حيث يؤدي ذلك على كفاءة الجهاز والتي تأثيرات اخرى ،لذلك يجب تبريد الهدف حيث قد وضعت عدة اتصاميم او طرق لاجراء عملية التبريد ومن هذه الطرق :

A. جعل الماء او الزيت يمر باستمرار داخل الهدف ويخرج منه .

B. ربط قضبان طويلة من مادة معدنية موصلة الى الهدف وتمتد الى خارج الانبوب حيث تقوم بنقل الحرارة من الهدف الى خارج الانبوب

C. وفي المجالات الاخرى يعمل الهدف بحيث يستطيع الدورات حيث تسقط الالكترونات على نقاط متغيرة اثناء دورانه .

D. وفي حالات اخرى يكون مثبت في كتلة كبيرة من النحاس تعمل على نقل الحرارة بعيدا عن الهدف .

في التصوير الشعاعي يفضل ان يكون مصدر الاشعة السينية صغ ير الحجم اي ان الاشعة تنطلق من نقطة ويمكن الحصول على ذلك من تصميم معين لشكل الهدف ولكن ذلك يعقد عملية التبريد . يصمم الهدف بحيث انه الالكترونات تسقط على مساحة كبيرة .

السلوك الذي يستعمل كفتيل هو من مادة التتكستن ،الفولتية المستعملة لتسخين الفتيل من (6-15) فولت حيث يكون التيار من (3-5) امبير ، الطاقة الكهربائية التي يشغل فيها جهاز الاشعة السينية تجهز من الشبكة العامة للكهرباء باستعمال محولات لكل من الفتيل وفرق الجهد الذي يعمل به الجهاز مع استعمال مقومات تيار تقوم بتحويل التيار المتناوب الى تيار مستمر ب حيث يكون الانود دائماً موجب والكاثود سالب مما يجعل الالكترونات التي تنطلق من الفتيل المسخن تتجه وبتعجيل الى الهدف متصلة بسرعة عالية وعند اصطدامها به تتولد الاشعة السينية وكما ذكرنا سابقاً .

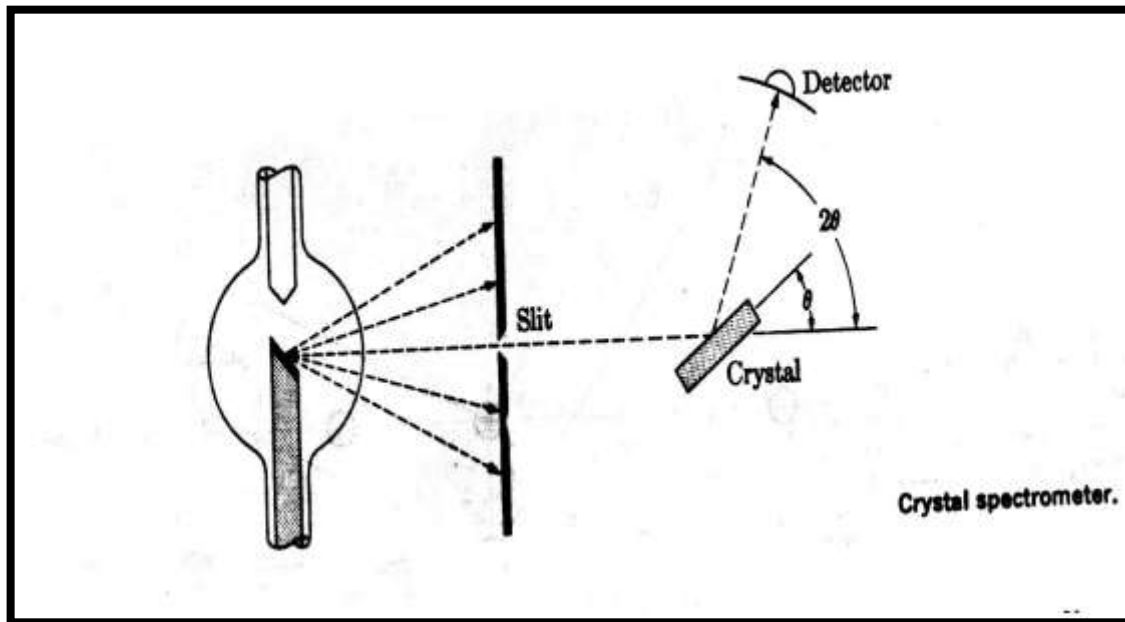
11المطياف البلوري crystal Spectrometer للاشعة السينية

يوضح الشكل (11) طريقة براك التي استخدمت البلورات كمحزر حيود في مطياف الاشعة السينية ،حيث تمر الاشعة السينية القادمة من اليسار خلال شق في صحيفة من الرصاص للحصول على حزمة ضيقة ،اذ يقوم الرصاص بامتصاص جميع الاشعة ماعدا التي تمر خلال الشق.

بعد ذلك تسقط الاشعة على بلورة حرة الدوران وعمودية على مستوى الشكل ويمكن قياس الزاوية ϕ بين مستويات البلورة واتجاه الاشعة الساقطة ويحدث انعكاس براك ذو الشدة العظمى فقط بالاتجاه الذي يضع 2ϕ مع اتجاه الاشعة الساقطة عندما يتحقق شرط براك الثاني .

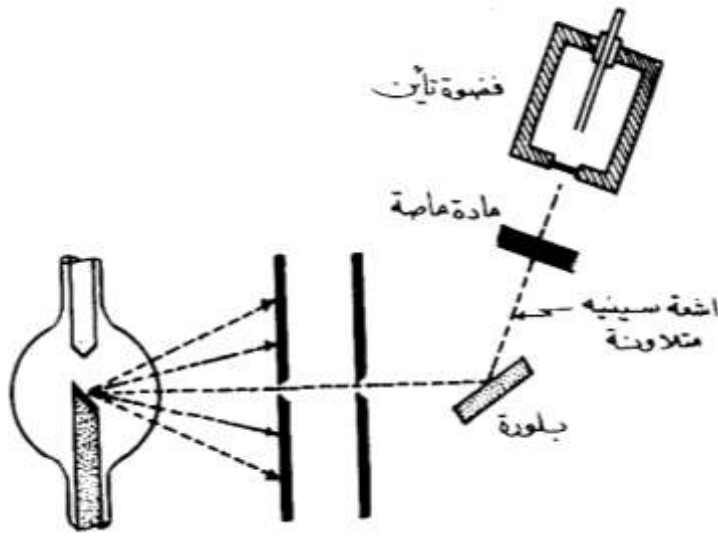
$$n\lambda = z d \sin \phi$$

قيمة (d) ثابتة بين مستويات بلورية معينة ، ويتم قياس الزوايا التي يحدث فيها اشد انعكاس يقود الى معرفة طول موجة الاشعة السينية . اكثر البلورات شيوعاً هي بلورات ملح الطعام وفلوريد الليثيوم والكوارتز.

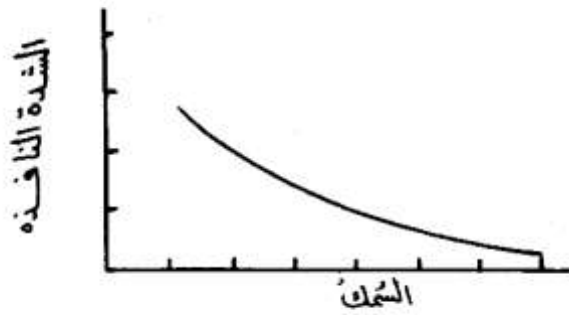


1-12 م عاملات امتصاص الاشعة السينية

اذا أمرت حزمة ضيقة للاشعة السينية بأمرارها خلال شقين ثم تعكس بواسطة بلورة مطياف براك المنفردة ثم تمر بعد ذلك خلال المادة المراد دراستها وتقاس شدة الاشعة النافذة بأخذ خطوة التأينوكما موضح في الشكل (12) .



عندما ترسم العلاقة بين تغيير سمك المادة (dx) وتغيير شدة الشعاع النافذ (D_i) نحصل على الشكل (13)



وهذا الشكل عبارة عن منحنى اضمحلال اسي Exponential Decay ويوضح ذلك خلال العلاقة الرياضية :

$$-dx = MI \quad dx \dots\dots\dots(1)$$

حيث يمثل $(-dx)$ مقدار الرقضان في اشعاع المار خلال السمك المادة (x) و

