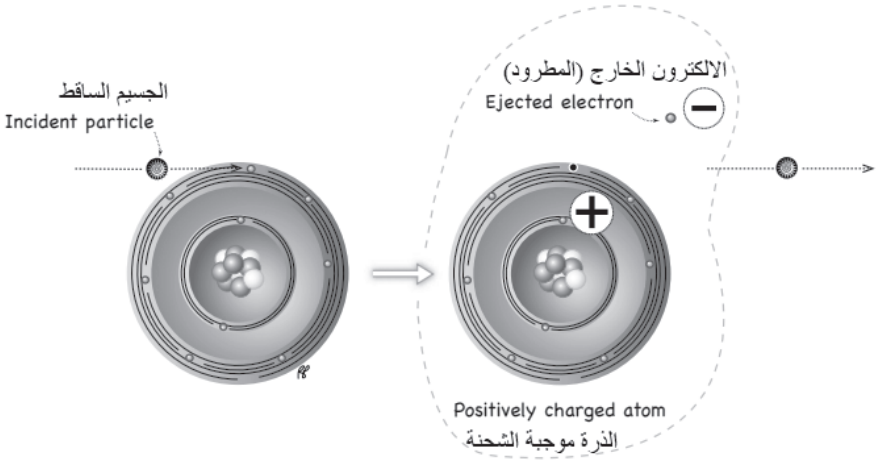


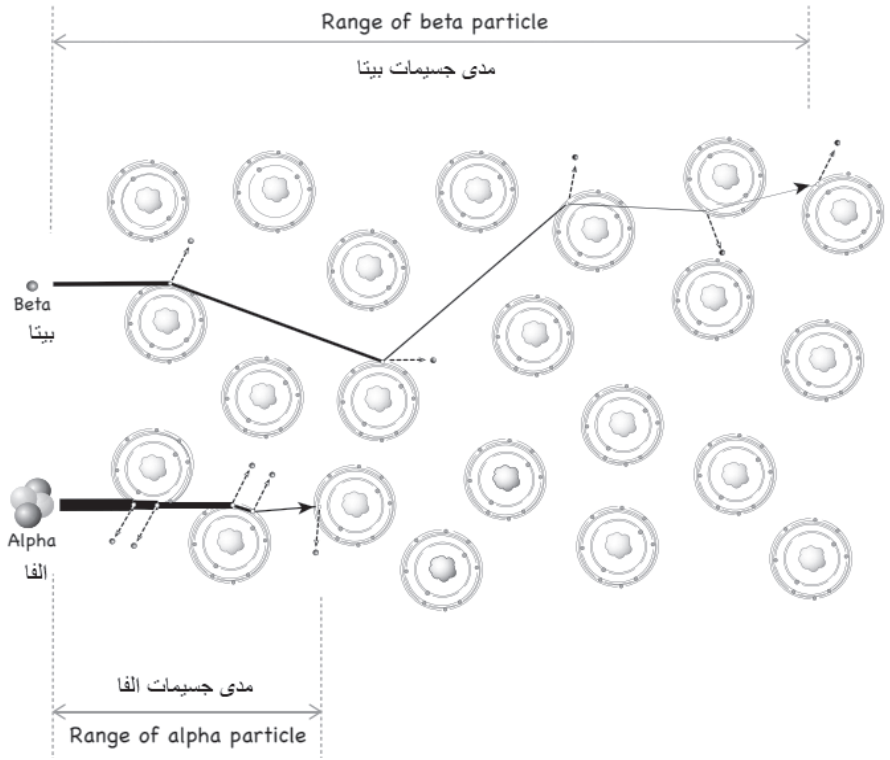

**الشكل** 2-9 **التأين**.

الالكترون المطرود والذرة الموجبة الشحنة تسمى "الزوج"، المتمثلة بالخط المتقطع

**المدى Range**

المدى هو المسافة التي ينتقل فيها الإشعاع خلال الماص. الجسيمات التي تكون أخف وزنا وتكون أقل شحنة (مثل جسيمات بيتا) و/ أو تكون لها نقل طاقة أكبر من الجسيمات الأكثر ثقلا، والتي تمتلك شحنة أكبر (مثل جسيمات ألفا) و/ أو تمتلك طاقة اقل كما في الشكل (2-10).

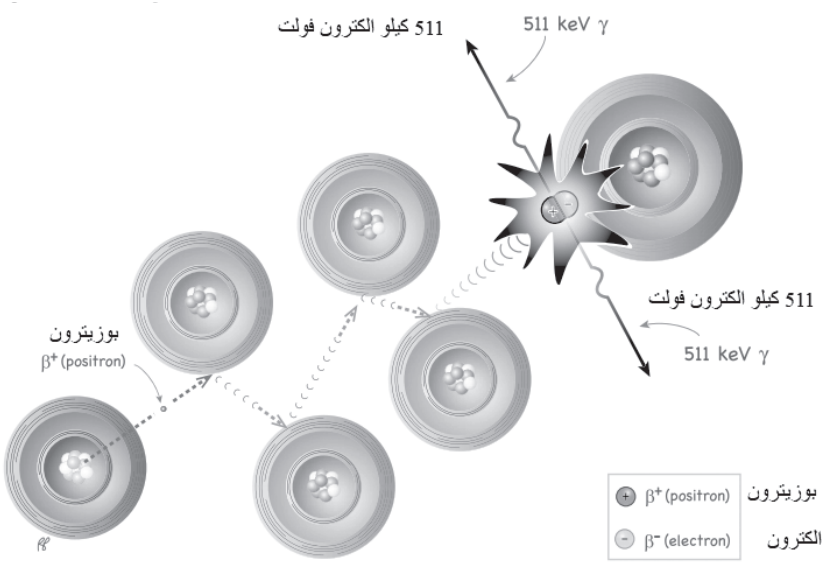
في اجتياز المادة الماصة، فان الإلكترون يفقد الطاقة في كل تفاعل مع ذرات الماص. فقدان الطاقة لكل تفاعل يكون متغير. لذلك، فإن المسافة الإجمالية التي تقطعها الإلكترونات من نفس الطاقة يمكن أن تختلف بنسبة تصل إلى 3-4٪. ويسمى هذا الاختلاف في المدى بخداع المديات. لا تتأثر جسيمات ألفا الأثقل لدرجة كبيرة وتظهر القليل جدا من الخداع للمدى.



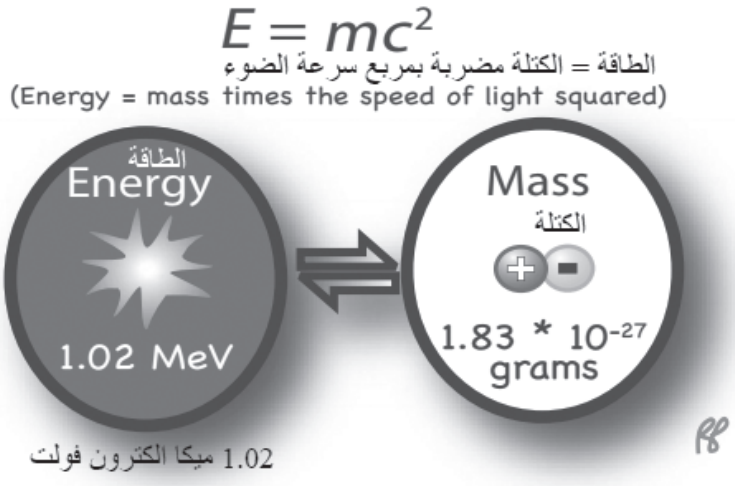

**الشكل 2-10 مجموعة الجسيمات في المادة الماصة.**

### الفناء Annihilation

هذا التفاعل في معظم الأحيان يتضمن على بوزيترون (الكترون موجب) والإلكترون (النيكاترون). بعد أن نقل البوزيترون معظم طاقته الحركية عن طريق التأين والتهيج، فإنه ينجمع مع إلكترون سالب حر او قليل الارتباط. تذكر أن الإلكترونات والبوزيترونات لها كتلة متساوية ولكن لها شحنة كهربائية مضادة. هذا التفاعل هو تفاعل مفرقع، حيث يتم تحويل الكتلة المشتركة من الجسيمين على الفور إلى طاقة في شكل اثنين من الفوتونات معكوسي الاتجاه، لكل واحد 511 كيلو الكترون فولت. ويشار إلى هذا على أنه تفاعل الفناء (الشكل 2-11). وهو مثال آخر على قابلية التغير بين الكتلة والطاقة الموصوفة في معادلة آينشتاين: الطاقة تساوي الكتلة في مربع سرعة الضوء، أو $E = mc^2$ (الشكل 2-12).



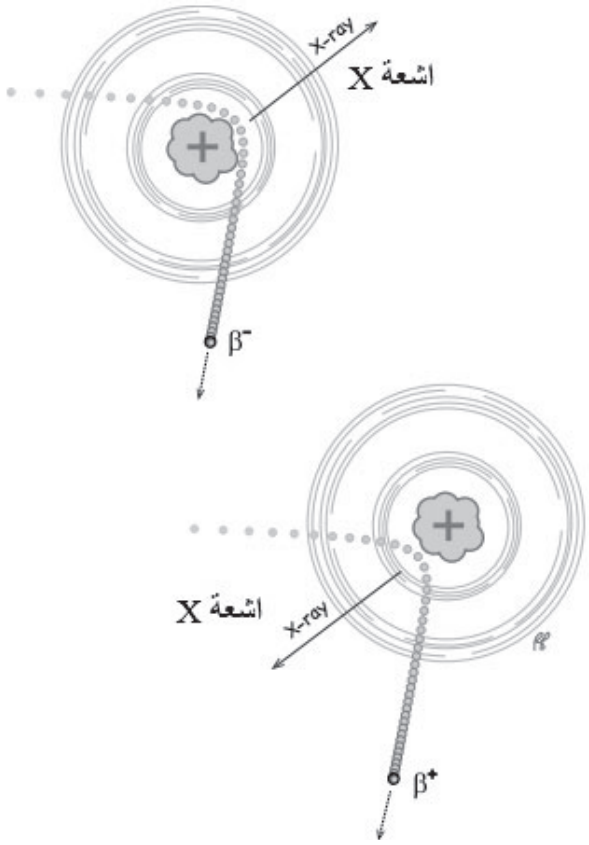

**الشكل** 2-11 **تفاعل الفناء.**




**الشكل** 2-12 **نظرية أينشتاين لتكافؤ الطاقة والكتلة.**

### أشعة الكبح Bremsstrahlung

قد تحيد جسيمات مشحونة صغيرة مثل الإلكترونات أو البوزيترونات عن النوى عندما تمر عبر المادة، والتي يمكن أن تعزى إلى الشحنة الموجبة للنوى الذرية. هذا النوع من التفاعل يولد الأشعة السينية المعروفة باسم بريمسترالونغ (الشكل 2-13)، والتي في الألمانية تعني «كبح الإشعاع.»




**الشكل 2-13 اشعة الكبح. الجسيمات بيتا ($\beta^-$) و بوزيترون ($\beta^+$) التي تنتقل بالقرب من النواة سوف تجذب أو تنفر من قبل الشحنة الموجبة للنواة، وتولد الأشعة السينية في هذه العملية.**

## المصادر Reference

1. Shapiro, J. Radiation Protection. A Guide for Sci- entists, Regulators, and Physicians, 4th Edition, Harvard University Press, Cambridge MA, 2002, pp. 42 and 53.

## الأسـئلة Questions

1 - أي مما يلي ينطبق على تفاعل الجسيمات المشحونة مع المادة؟

( أ ) جزيئات ألفا لديها LET أعلى من جسيمات بيتا.

(ب) مدى جسيمات ألفا أكبر عموما من جسيمات بيتا.

(ج) جسيمات ألفا لها تأين محدد أعلى من جسيمات بيتا.

**2** - صحيح أو خطأ: بريمسترالونغ هو الأشعة السينية المنبعثة عندما يتحرك الإلكترون أو البوزيترون ببطئ وينحرف على مقربة من نواة.

**3** – صحيح أو خطأ: التأثير الكهروضوئي هو النوع المهيمن من التفاعل الفوتوني في الأنسجة للنويدات المشعة المستخدمة في ممارسة الطب النووي.

**4** – لكل من الشروط المذكورة هنا، حدد التعريف المناسب.

(أ) HVL (طبقة القيمة النصفية)

(ب) TVL (طبقة القيمة العشرية)

(ج) $\mu$ (معامل التوهين الخطي)

( د) $\theta$ (معامل الامتصاص)

( . ) سمك الموهن الذي سيقلل من شدة (عدد الفوتونات) في حزمة بنسبة 90٪.

(..) سمك الموهن الذي سيقلل من شدة (عدد الفوتونات) في شعاع بنسبة 50٪.

(...) HVL/0.693.

**5** - أي من الأمور التالية تحدث خلال تفاعلات الفوتون مع المادة والتي تحدث خلال تفاعلات الجسيمات المشحونة مع الذرات (قد يتم تطبيق أكثر من إجابة واحدة)؟

( أ ) التهيج

(ب) إنتاج الزوج.

(ج) التأين.

(د) استطارة كومبتون.

(ه) اشعة الكبح.

(و) التأثير الكهروضوئي.

(ز) تفاعل الفناء.

**6** - أي مما يلي يحدث أثناء تفاعل الجسيمات المشحونة مع الذرات (قد يتم تطبيق أكثر من إجابة واحدة)؟

( أ ) الإثارة.

(ب) إنتاج الزوج.

(ج) التأين.

(د) استطارة كومبتون.

(هـ) اشعة الكبح.

(و) التأثير الكهروضوئي.

(ز) تفاعل الفناء.

**7** - أي مما يلي صحيح حول تفاعل الفناء؟

(أ) تحويل كتلة البوزيترون والإلكترون إلى طاقة هو مثال على قابلية التبادل للكتلة والطاقة كما وصفتها معادلة آينشتاين الشهيرة $E = mc^2$.

(ب) ينبعث فوتونان موجهان بطريقة 450 كيلو الكترون فولت معاكسان نتيجة تفاعل الفناء.

(ج) ليس صحيحا كل من (أ) و (ب).

**8** - أي مما يلي يشار إليه بالإشعاع غير المخترق؟

(أ) البوزيترونات.

(ب) فوتونات كاما.

(ج) الأشعة السينية.

(د) جسيمات ألفا.

(هـ) جسيمات بيتا.

**9** - أي مصطلح يشير إلى فقدان الطاقة أو إضعاف حزمة الإشعاع لأنه يمر عبر المادة؟

( أ ) التوهين.

(ب) الامتصاص.

**10** - أي مصطلح يستخدم لوصف نقل الطاقة من الإشعاع إلى المادة المحيطة؟

( أ ) التوهين.

(ب) الامتصاص.

**11** - أنت تحمي عينة من $^{99m}Tc$ باستخدام ورقة سمكها 1 مم من الرصاص. ما هو جزء من الانبعاثات المحظورة من خلال الرصاص؟ معامل التوهين الخطي للرصاص بالنسبة للفوتونات هو 140 كيلو الكترون فولت وهو 23.1 سم$^{-1}$.

## الأجـوبة Answers

1 - (أ) و (ج) صحيحان، (ب) خطأ؛ جسيمات ألفا لديها مجموعة أقصر من جزيئات بيتا.

2 - صحيح.

3 - خطأ: استطارة كومبتون هو التفاعل المسيطر.

4 - (1) (ب). (2) (أ). (3) (ج).

5 - (ب)، (ج)، (د)، (و).

6 - (أ)، (ج)، (هـ)، (ز).

7 - (أ).

8 - (أ)، (د)، (هـ).

9 - (أ).

10 - (ب).

11 - 0.21.

الفصل الثالث

# تشكيل النويدات المشعة

## Formation of radionuclides

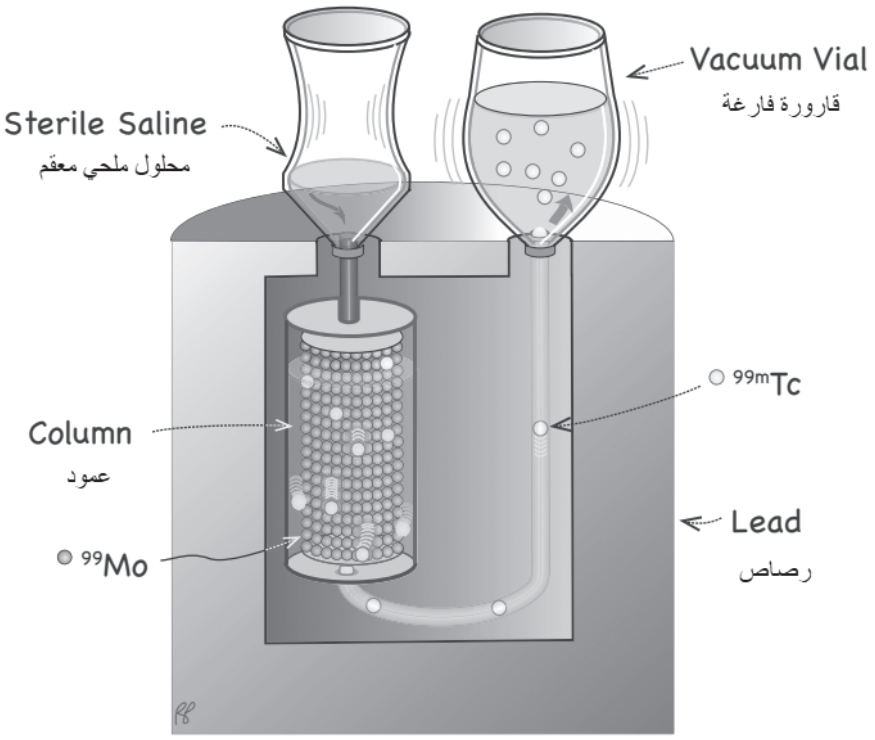
توجد العديد من النويدات المشعة في الطبيعة. مثال على ذلك هو $^{14}C$، الذي يتحلل ببطء مع عمر نصف هو 5700 سنة، ويستخدم حتى الآن في تحديد تاريخ الحفوريات. ومع ذلك، فإن النويدات التي نستخدمها في الطب النووي لا تحدث بشكل طبيعي، بل تتم عن طريق قصف ذرات مستقرة أو عن طريق انشقاق ذرات ضخمة. هناك ثلاثة أنواع أساسية من المعدات التي تستخدم لصنع النويدات الطبية: المولدات، السيكلوترونات، والمفاعلات النووية.

**المولدات Generators**

المولدات هي الوحدات التي تحتوي على النويدات المشعة "الأم" مع عمر نصف طويل نسبيا والذي يتحلل إلى عمر قصير وتسمى النويدات "البنت". والمولد الأكثر استخداما هو مولد التكنيتيوم-99m ($^{99m}Tc$) كما في الشكل (3-1)، الذي يتكون من عمود مدرع بشدة مع الموليبدينوم-99 ($^{99}Mo$؛ الام) مربوط إلى عمود من الألومينا. و $^{99m}Tc$ (البنت) وهو "المستحلب" (إلمزال) عن طريق تصميم محلول ملحي معقم يمر بالعمود الى القارورة الفارغه. الام $^{99}Mo$ هي (الدوائر الرمادية الصغيرة) الباقية على العمود، ولكن البنت $^{99m}Tc$ هي (الدوائر البيضاء) يتم غسلها بعيدا في المحلول الملحي.

ويسمى المولد مثلما وصف كثيرا بالبقرة، ويشار إلى استخراج النويدة البنت باسم الحلب، ويسمى الرصاص المحيط به بالنهم، وهو مصطلح يستخدم لأي حاوية المعادن الخام. المولدات تأتي في أحجام صغيرة للاستخدام في قسم

الطب النووي القياسية أو في أحجام أكبر لاستخدامها في المختبرات المركزية. ويصف الجدول (3-1) ملامح لثلاثة مولدات مشتركة.




**الشكل** 3-1 **مولد تكنيتيوم** -99m .

**الجدول** 3-1 **خصائص ثلاثة مولدات مستعملة على نحو مشترك**

| مولد (الاب-البنت) | الاستخدامات السريرية للنويدة البنت | نصف عمر الام (T1/2P) | نصف عمر البنت (T1/2D) | T1/2p/ T1/2d |
|---|---|---|---|---|
| $^{99}$Mo–$^{99m}$Tc (الموليبدينوم-99-تكنيتيوم-m99) | المستخدمة في معظم الأدوية المشعة | 66 h | 6 h | 11 |
| $^{82}$Sr–$^{82}$Rb (السترونتيوم 82 الروبيديوم-82) | تصوير النضح القلبي | 25.5 يوم | 75 ثانية | 29,000 |
| $^{81}$Rb–$^{81}$mKr (الروبيديوم-81-الكريبتون-m81) | فحوصات تهوية الرئة | 271 يوم | 68 دقيقة | 5,800 |

### منحنيات النشاط للمولدات Activity Curves for Generators

الوصف الرياضي الرسمي لسلوك نشاط النويدات المشعة الام والبنت معقد، لأنه ينطوي على منافسة بين التراكم - الناجم عن تحلل النويدات المشعة الام- وبين انحلال البنت. يصف المنحنى كمية من نويدة ابنة في مولد له جزأين. الجزء الاول يتتبع فترة تراكم سريع من نويدة ابنة يتبعه إنشاء مولد أو استخراج (إزالة) جزء من نويدة ابنة. هذا الجزء من المنحنى يستمر لمدة أربعة أنصاف اعمار تقريبا من النويدة البنت. ( $^{99m}Tc$ تستغرق تقريبا حوالي 24 ساعة). الجزء الثاني من المنحنى يتتبع ما يسمى فترة التوازن، اثناء ذلك الوقت ينخفض مقدار النويدة البنت كما انحلال النويدة الأم.

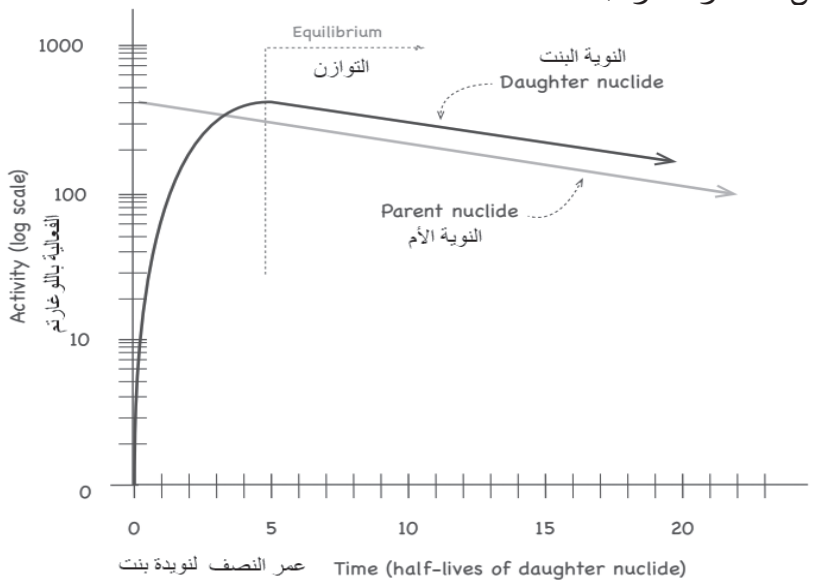
لأنظمة مولد النويدات المشعة الطبية، ولأسباب عملية، لها عمر افتراضي أطول من عمر النصف لبناتها - وفي معظم الحالات فهو أطول من ذلك بكثير. نقوم بتصنيف المولدات الكهربائية إلى مجموعتين: تلك التي يكون فيها نصف عمر الام 10 إلى 100 مرة من عمر البنت وتلك التي يكون عمر النصف الأصل للام فيها أكثر من 100 مرة من عمر البنت. في المجموعة الأولى، ينخفض نشاط البنت أثناء التوازن بشكل ملموس مع مرور الوقت (عندما يتم قياس الوقت بوحدات عمر النصف للبنت). وهذا ما يسمى التوازن العابر. من ناحية أخرى، فإن قطاع التوازن في منحنى المجموعة الثانية هو نسبيا مسطح. وهذا ما يسمى التوازن القرني.

### التوازن العابر Transient Equilibrium

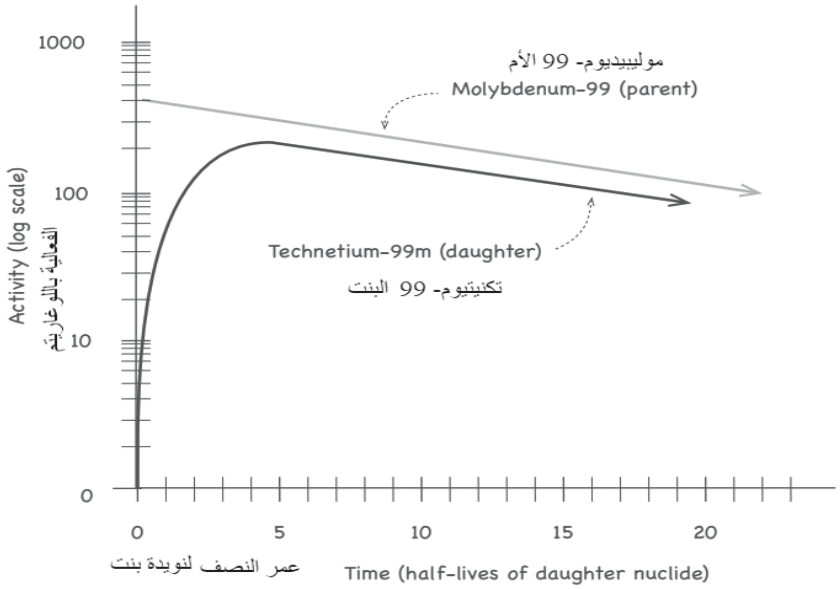
يتضح التوازن العابر في الشكل (3-2). في هذا المثال، يكون عمر النصف للنويدة الأم حوالي 10 أضعاف عمر البنت. وبعد عملية الاستخراج يزيل كل من البنت المتاحة، وتزداد كمية النويدة البنت بسرعة حتى يتجاوز نشاط البنت قليلاً نشاط الام في عمر يتراوح بين أربعة وخمس سنوات. بعد ذلك ينخفض نشاط البنت بنفس معدل نشاط الام.

ويستند المثال السابق للتوازن العابر إلى مخطط للتحلل والذي يتحلل فيه ٪100 من النويدات الأصل إلى نويد البنت. ومع ذلك، في المولد $^{99}Mo$-$^{99m}Tc$ والذي هو شائع الاستخدام، فقط ٪86 من الموليبدينوم -99 يتحلل إلى البنت

تكنيتيوم -99 م؛ والباقي يتحلل مباشرة إلى تكنيتيوم 99 كما في (الشكل 3-3). ونتيجة لذلك، يكون نشاط $^{99m}Tc$ دائمًا أقل من نشاط $^{99}Mo$ (انظر الشكل -.3 مرة أخرى).



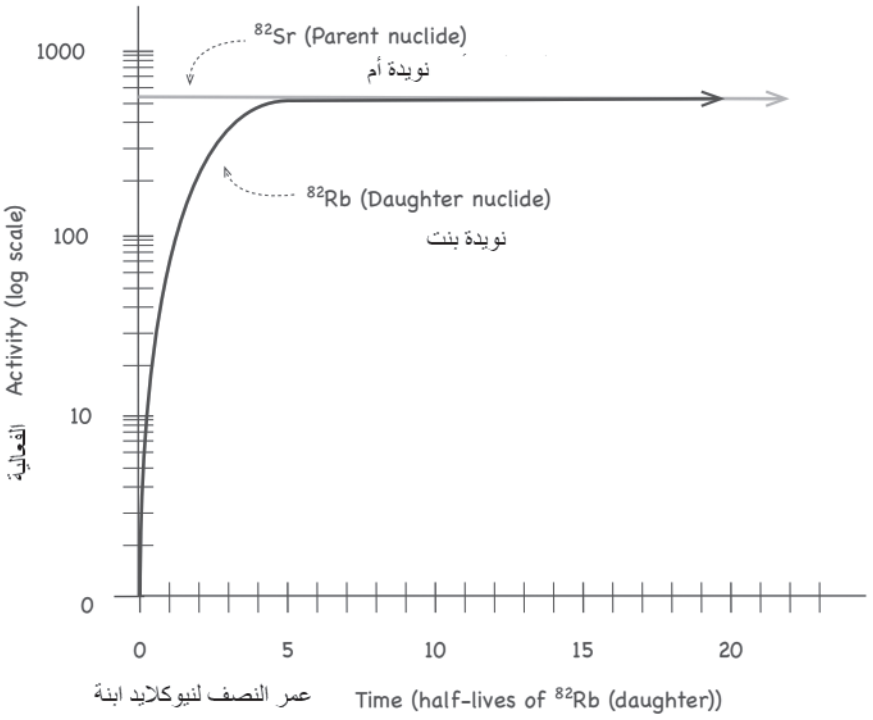

**الشكل 3-2 التوازن العابر.**




**الشكل 3-3 التوازن العابر في مولد $^{99m}Tc$-$^{99}Mo$.**

### التوازن القرني Secular Equilibrium

بالنسبة للمولدات الكهربائية حيث يكون عمر النصف الرئيسي للام أكبر من 100 مرة من عمر النويدة البنت نظرًا لأننا مهتمون بجداول زمنية بناءً على ترتيب عمر النصف للبنت، يمكننا فقط اعتبار أن النويدة الام تميل الى الاستقرار. يتم تحقيق التوازن القرني، مثل التوازن العابر، بسرعة بعد شطف يزيل كل النويدات البنت المتاحة. بعد ذلك، يكون نشاط النويدة البنت مساوي تقريبًا لنشاط الام. مع ذلك، يبدو أن منحنى تحلل الام يكون في عمر النصف، حيث أن عمر النصف للام أطول من عمر النويدة البنت. يمكن رؤية مثال على التوازن القرني مع مولد $^{82}Rb$ - $^{82}Sr$ (انظر الشكل 3-4).

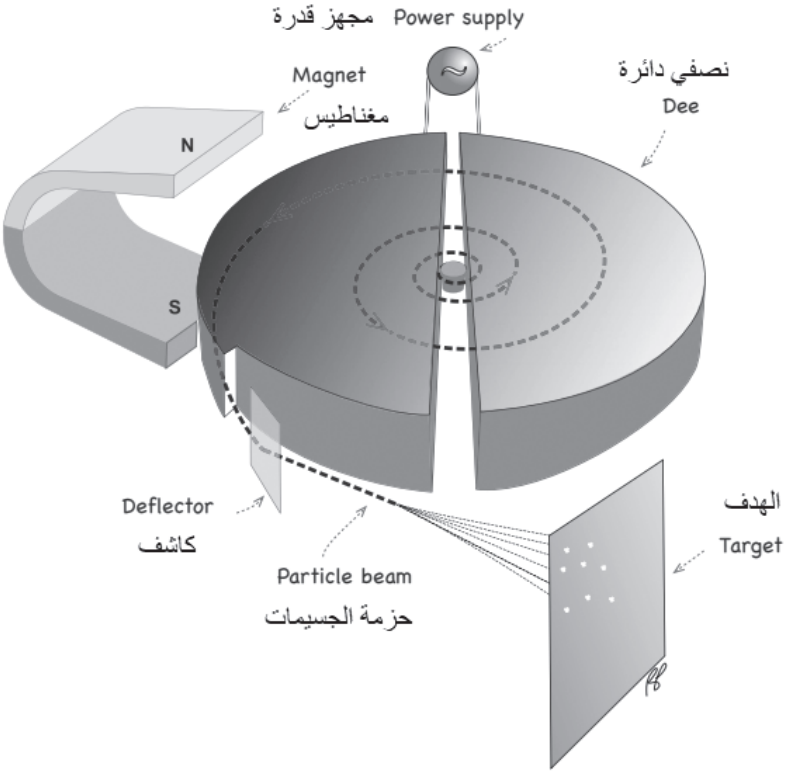



**الشكل 3-4 التوازن القرني.**

### السيكلوترونات Cyclotrons

السيكلوترونات هي أجهزة دائرية كما في الشكل (3-5) حيث يتم تسريع الجسيمات المشحونة مثل البروتونات وجسيمات ألفا في مسار حلزوني بداخل

فراغ. يوفر مجهز القدرة جهد متناوب وبسرعة عبر حلقة (نصفين من دائرة). وهذا ينتج مجالا كهربائيا متناوب بسرعة بين النصفين الذي يسرع الجسيمات، والتي تكتسب بسرعة طاقات حركية عالية. وتتحرك هذه المواد حلزونيا إلى الخارج تحت تأثير الحقل المغناطيسي إلى أن يكون لها سرعة كافية وتنحرف إلى هدف.




**الشكل 3-5 سيكلوترون.**

يتم استخدام منحرف لتوجيه الجسيمات خارجا عبر نافذة سيكلوترون إلى الهدف. وتدمج بعض الجسيمات والطاقة الحركية من هذه الجسيمات في نوى ذرات الهدف. هذه النوى (متهيجة) هي اي ان النواة غير مستقرة.

إنديوم-111 ($^{111}In$) ينتج في سيكلوترون. والجسيمات المتسارعة (القاصفة) هي البروتونات. الذرات المستهدفة هي الكادميوم 112 ($^{112}Cd$). عندما يدخل

بروتـون نـواة ذرة $^{112}Cd$، يتم تحويل $^{112}Cd$ إلى $^{111}In$ عـن طريق تفريغ نيوترونين. يمكن كتابة هذا التفاعل على النحو التالي:

ذرة الهدف (جسـيم مقذوف، جسيمات منبعثة) تنتج نويدة كادميوم112- (بروتون، نيوترونين) إنديوم-111، أو $^{111}In$ $(p,2n)^{112}Cd$.

هنـاك امثلـة اخرى الأمثلـة الأخرى لتفاعـلات السـيكلوترون تتضمن $^{121}Sb(\alpha,2n)^{123}I$, $^{68}Zn(d, n)^{67}Ga$, $^{10}B(d,n)^{11}C$. **حيث تشـير الرموز α و d إلى جسيمات ألفا و الديوترون (بروتون+ نيوترون)، على التوالي.**

### المفاعلات Reactors

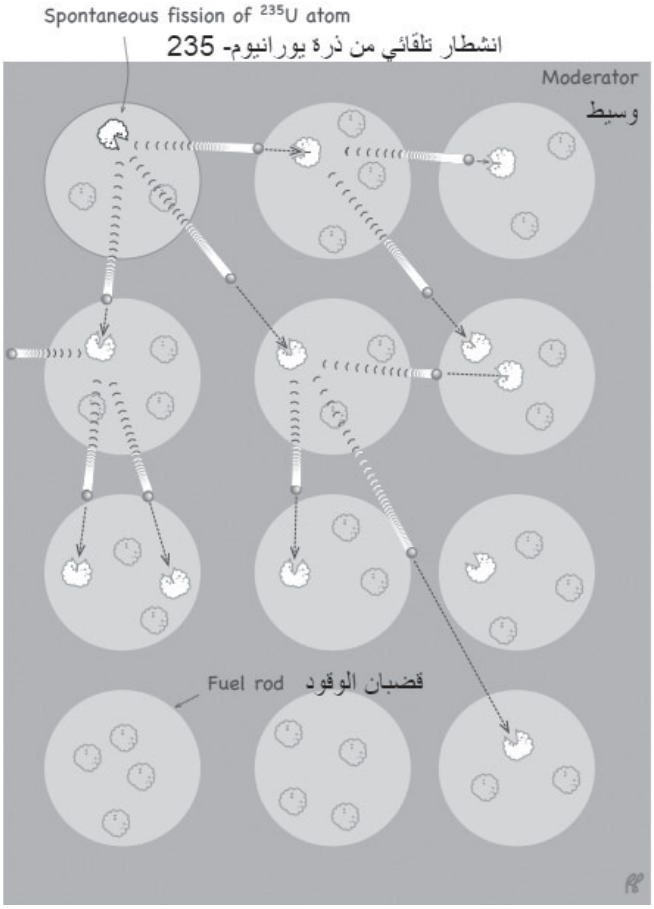
تنتج النويدات المشعة للطب النووي في المفاعلات النووية. وتشمل بعض الأمثلة $^{131}I$ ، $^{133}Xe$، و $^{99}Mo$.

### أساسيات المفاعل Reactor Basics

يتكـون المفاعـل مـن قضبان الوقود الـتي تحتـوي على ذرات كبيرة (عادةً اليورانيوم 235 أو اليورانيوم 238 أو البلوتونيوم 239) غير المستقرة بطبيعتها. تخضـع هـذه الذرات للانشـطار (انظـر الشـكل 14-1). ينبعث اثنـان أو ثلاثة نيوترونـات وحوالي 200 ميكافولت مـن الطاقة الحرارية خـلال هذه العملية. وتترك هذه النيوترونات النواة ذات طاقة حركية عالية إلى حد ما، ويشـار إليها بالنيوترونـات السريعـة. يتم تباطؤ النيوترونات من خلال وسـط ملطف مثل الكرافيـت، الماء، أو المـاء الثقيل. النتيجة من هذه الخطـوة نيوترونات "بطيئة جـدا" أو النيوترونات الحراريـة، وبدرجة أقل النيوترونـات السريعة، مما يؤثر بـدوره على ذرات أخـرى قابلة للانشـطار في ذراتها، وهكذا دواليك (الشـكل 3-6). إذا كانت هذه السلسلة تنمو دون رادع، فإن الكتلة تتوسع وتكبر كثيرا. للحفـاظ على المفاعل و السـيطرة، يتم إدخال قضبـان التحكم من الكادميوم لامتصاص النيوترونات في المفاعل. ويمكـن إدخالها أو سـحبها للسيطرة على سرعـة التفاعل. يتم تصنيع النويدات الطبية في المفاعلات بواسـطة عمليات الانشطار أو التقاط النيوترونات.

### الطاقة الحركية KINETIC ENERGY

الحركية تعني «الحركة». شكل الطاقة الذي يعزى إلى حركة جسم ما وهو طاقته الحركية. وترتبط الطاقة الحركية بكلا من الكتلة (m) والسرعة (v) للكائن، بشكل خاص ($1/2\ mv^2$). فالسيارة المتحرك لديها الطاقة الحركية، والسيارة المتوقفة ليس لديها شيء. فالسيارة السريعة تحتوي على قدر كبير من الطاقة الحركية التي يمكن تبديدها بسرعة كالحرارة والضوضاء، وتدمير المعادن في الاصطدام.




**الشكل 3-6 سلسلة من التفاعلات التي تنطوي على $^{235}U$ والنيوترونات البطيئة.**

### الانشطار النووي Fission

في هذه العملية، النويدات المشعة المرغوبة هي واحدة من شظايا الانشطار النووي من عنصر ثقيل ($Z> 92$)، إما ذرة الوقود نفسها أو ذرات الهدف

وضعت داخل المفاعل. يتم فصل المنتج الثانوي كيميائيا عن شـظايا الانشطار النووي الأخرى. يشار إلى مفاعل الانشطار كما في

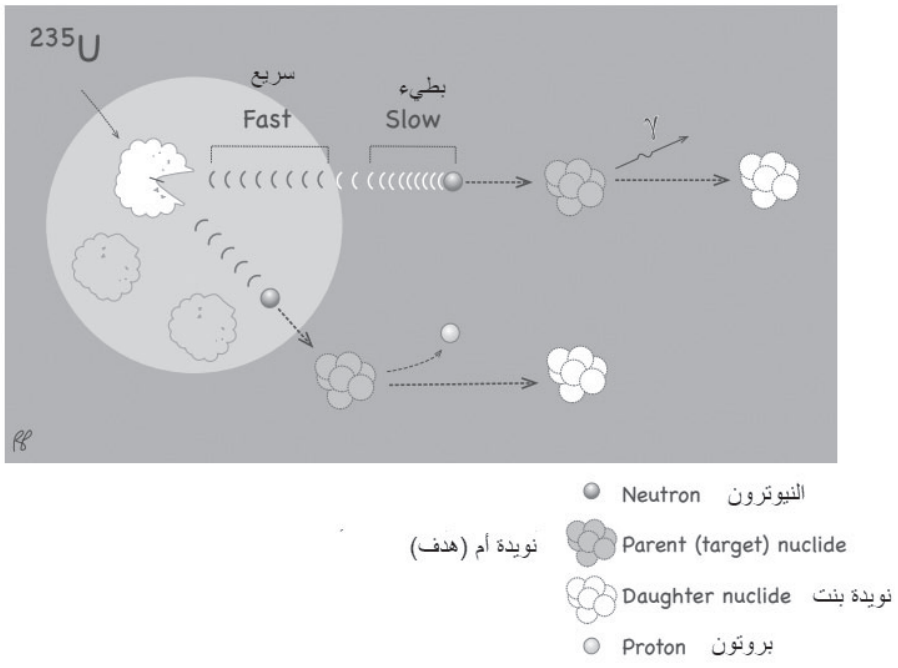
اليورانيوم-235 $^{235}$ U (النيوترون، الانشطار) نويدة بنت

على سـبيل المثال، يتم تشكيل اليود -131 والموليبدينوم -99 ويكتب كما يلي:

$$^{235}U(n,f)^{131}I\ ,\ ^{235}U(n,f)^{99}Mo$$

### التقاط النيوترون Neutron Capture

في التقـاط النيوتـرون ذرة الهـدف يلتقـط نيوتـرون. الذرة الجديـدة هي مشـعة وتبعث فوتونات كاما أو جسـيمات مشحونة لإنتاج نويدة بنت كما في الشـكل(3-7). ينبعث فوتـون كاما بعد التقاط النيوترون الحـراري. يتم كتابة هذا التفاعل كما يلي.




**الشكل** 3-7 **التقاط نيوترون. التقاط نيوترون حراري بطيء مع انبعاث كاما في (ألأعلى)؛ التقاط نيوترون سريع مع انبعاث البروتون في (ألأسفل).**

الهدف (النيوترون، كاما) نويد بنت على سبيل المثال، $^{98}Mo(n, \gamma)^{99}Mo$

عندما تلتقط ذرة الهدف النيوترون السريع يمكن أن ينبعث بروتون. يشار إلى هذا التفاعل في بعض الأحيان على أنه تحويل ويرمز له: الهدف (النيوترون، بروتون) نويدة بنت

على سبيل المثال, $^{32}S(n,p)^{32}P$

وترد في الملحق أ قائمة بالنويدات الطبية الشائعة وطرق إنتاجها وطرق انحلالها ونواتج الانحلال.

**إنتاج النويدات المشعة Radionuclide production**

غالبًا ما يكون هناك أكثر من طريقة لصنع النويدات المشعة. على سبيل المثال، يتم إستخدام $^{111}In$ بشكل شائع في سيكلوترون باستخدام تفاعل $^{112}Cd\ (p, 2n)^{111}In$، ولكن يمكن أيضًا صنعه من خلال استهداف كادميوم-111 باستخدام تفاعل $^{111}Cd\ (p,n)^{111}In$ ، أو من الفضة 109 المستهدفة باستخدام تفاعل $^{109}Ag\ (\alpha,2n)^{111}In$.

تنطوي المقايضات على الكفاءة النسبية للإنتاج لمختلف طاقات السيكلوترون والقضايا المتعلقة بفصل المنتج وتنقيته. بشكل عام، يزيد قصف الهدف بواسطة الجزيئات المشحونة في السيكلوترون من نسبة الشحن إلى الكتلة، وبالتالي من المحتمل أن تكون النواة في المنتج غنية بالشحن (فقير نيوتروني) وبالتالي تتحلل عبر تحلل بيتا بلس أو القبض على الإلكترون. هذا هو السبب في أن معظم النويدات المشعة PET تنتج باستخدام السيكلوترون. وعلى العكس من ذلك، فإن قصف الهدف بالنيوترونات في المفاعل يميل إلى زيادة كتلة النوى المستهدفة، مما يجعلها غنية بالنيوترونات وبالتالي من المحتمل أن تتحلل عن طريق تحلل بيتا سالب.

## الأسئلة Questions

1 - أي من العبارات التالية صحيحة حول مولدات النويدات المشعة؟

(1) النويدة الأم لديها دائما عمر نصف أقصر من النويدة البنت.

(2) إذا كان $T_{1/2}$ من النويدات الأم أكبر بـ 50 مرة من $T_{1/2}$ النويدة البنت، فإن جزء التوازن في منحنى النشاط مسطح أساسا ويصنف على أنه "قرني".

(3) النويدة الأم هي أقل ارتباطا إلى العمود من النويدة البنت.

(4) كل ما ورد اعلاه.

(5) لا شيء مما سبق.

**2** - صحيح أو خطأ: خلال حالة التوازن داخل مولد $^{99}Mo$-$^{99m}Tc$ النشاط الكلي من $^{99m}Tc$ هو دائما أقل من إجمالي نشاط $^{99}Mo$ لأن ٪14 من $^{99}Mo$ يتحلل مباشرة إلى $^{99}Tc$، متجاوزا حالة تعدد الاستقرارية.

**3** - أي مما يلي مثال للمولد الذي يصل إلى التوازن العابر؟

(أ) $^{99}Mo$ - $^{99}mTc$.

(ب) $^{82}SR$ - $^{82}Rb$.

**4** -ربط كل من المصطلحات التالية من(أ) الى (ي) من خلال (ك) مع أنسب الطرق الثلاث لإنتاج النويدات المدرجة هنا:

(.) مولد Generator

(..) السيكلوترون Cyclotron

(...) المفاعل. Reactor

(أ) ملطف Moderator

(ب) تفاعل السلسلة Chain reaction

(ج) النيوترونات الحرارية Thermal neutron

(د) نصف قرص Dee

(هـ) قضيب التحكم Control rod

(و) الهدف Target

(ز) البقرة Cow

(ح) النهم Pig

(ط) عمود Column

(ي) شطف Elution

(ك) حسب المنتج

**5** - قـم بربط كل من التفاعلات النووية التالية (أ) إلى (د) بأسـاليب الإنتاج الثلاثة المذكورة:

(1) السيكلوترون.

(2) تفاعل الانشطار (مفاعل).

(3) التقاط النيوترون (مفاعل).

(أ) $^{111}Cd(p,n)^{111}In$.

(ب) $^{68}Zn(d,n)^{67}Ga$

(ج) $^{235}U(n,f)^{99}Mo$

(د) $^{98}Mo(n,\gamma)^{99}Mo$

**6** - يتم إنتاج F-18:

(أ) في المولد.

(ب) في السيكلوترون.

(ج) من المواد الثانوية للانشطار النووي.

(د) عن طريق القصف النيوتروني في مفاعل نووي.

**7** - يتم إنتاج Mo-99:

(أ) في المولد.

(ب) في السيكلوترون.

(ج) من المواد الثانوية للانشطار النووي.

(د) عن طريق القصف النيوتروني في مفاعل نووي.

**8** - يتم إنتاج Tc-99m:

(أ) في المولد.

(ب) في السيكلوترون.

(ج) من المواد الثانوية للانشطار النووي.

(د) عن طريق القصف النيوتروني في مفاعل نووي.

**9** - عمر النصف من $^{99m}Tc$ هو 6 ساعات وعمر النصف $^{99}Mo$ هو 66 ساعة. في الساعة 8 صباحًا من صباح الاثنين، تم إخراج مولد Tc / Mo والعائد 100mCi $^{99m}Tc$. كم تقريبًا، سنتمكن من إزالة $^{99m}Tc$ من المولد يوم الجمعة الساعة 8 صباحًا؟

( أ ) صفر أساسًا، منذ انقضاء أكثر من 10 سنوات.

(ب) 36 ميللي متر مكعب.

(ج) 100 mCi.

(د) 50 ميكرومتر.

## الأجوبة Answers

1 - (هـ) لا شيء مما سبق: (أ) أن يكون عمر النصف للام دائمًا أطول من عمر النصف للبنت؛

(ب) إذا كان عمر النصف للام ما بين 10 و 100 مرة أكبر من عمر النصف للبنت، يكون منحنى النشاط منخفضًا ويطلق عليه التوازن "عابر"؛ (ج) أن النويدة البنت أقل ارتباطًا بإحكام، وبالتالي يمكن إزالته أو محاولة إزالته للاستخدام.

2. صحيح.

3. (ب).

4. (أ) و (ب) و (ج) و (هـ) و (و) و (ك) هي مصطلحات للمفاعلات؛

(د) و (و) عبارة عن مصطلحات للسيكلوترونات؛ (ز) ، (ح) ، (ط) ، و (ي) مصطلحات للمولدات.

5. (أ) (1). (ب) (1). (ج) (2). (د) (3).
6. (ب) في السيكلوترون.
7. (د) عن طريق القصف النيوتروني في مفاعلات نووي.
8. (أ) في المولد.
9. (ب) 36 مللي متر مكعب.

الفصل الرابع

# أجهزة الكشف اللاوميضيه

## Non-scintillation detectors

لأننا وبشكل عام لا يمكن أن نشعر بوجود النشاط الإشعاعي، تم تطوير معدات إلكترونية للكشف عن الإشعاعات المؤينة (الجسيمات والفوتونات على حد سواء) حيث لا يمكننا عموما الشعور بوجود النشاط الإشعاعي. يستكشف هذا الفصل الأنواع الشائعة من أجهزة الكشف عن الإشعاعات اللاوميضيه المستخدمة في قسم الطب النووي؛ يناقش الفصل 5 أجهزة الكشف الوميضية.

### كواشف مملوءة غاز Gas-Filled Detectors

### نظرية التشغيل Theory of Operation

تعمل أجهزة الكشف عن الغاز عن طريق قياس التأين الذي ينتجه الإشعاع داخل الغاز. هناك عدة أنواع من أجهزة الكشف التي تعمل على المبدأ العام، ولكنها تختلف اختلافا كبيرا في تفاصيل البناء والطريقة التي يقاس بها التأين الناتج عن الإشعاع. كما هو متوقع، كل نوع لديه واحد أو أكثر من التطبيقات الأكثر ملائمة.

أحد العوامل الهامة التي تحدد إمكانية تطبيق أجهزة الكشف عن الغاز هي طبيعة وحالة الغاز نفسه. على سبيل المثال، بسبب كون جزيئات الغاز منفصلة بمسافات واسعة نسبيا، فإنها أكثر عرضة للتأين من قبل الجسيمات المشحونة التي تؤين بقوة، مثل اشعاع ألفا وبيتا، وايضا اشعاع كاما أو فوتون. لهذا السبب جزئيا، يستخدم عادة كاشف الغاز لرصد إشعاع ألفا وبيتا، على

الرغم من أنه مع تصميم مناسب يمكن أيضا أن تستخدم الكاشف المملوء بالغاز لقياس اشعاع الفوتون (كاما أو الأشعة السينية)

## مبادئ القياس Principles of Measurement

### تحايد الشحنة Charge Neutralization

ربما واحدة من أبسط وأقدم الأساليب لقياس التأين الحاصل في كاشف الغاز وهو الملاحظة المرئية للهب من إليكتروسكوب. ومن الأمثلة على ذلك مقياس الجرعات الجيبية، الذي يتضح لاحقا في هذا الفصل في الشكل (4-1)، الذي يحتوي على غرفة صغيرة مملوءة بالغاز، تربط فيها خيط رفيع من سلك بإطار معدني. عندما تكون مشحونة إيجابيا، يتنافر السلك عن الإطار، الذي يحمل أيضا شحنة موجبة. ويلاحظ ان الخيط يعود إلى موقع التوقف كما يتم تحييد الشحنة من قبل الأيونات المنتجة للإشعاع. وكلما زاد الإشعاع الواصل كلما اقترب السلك نحو الموقع المحايد.

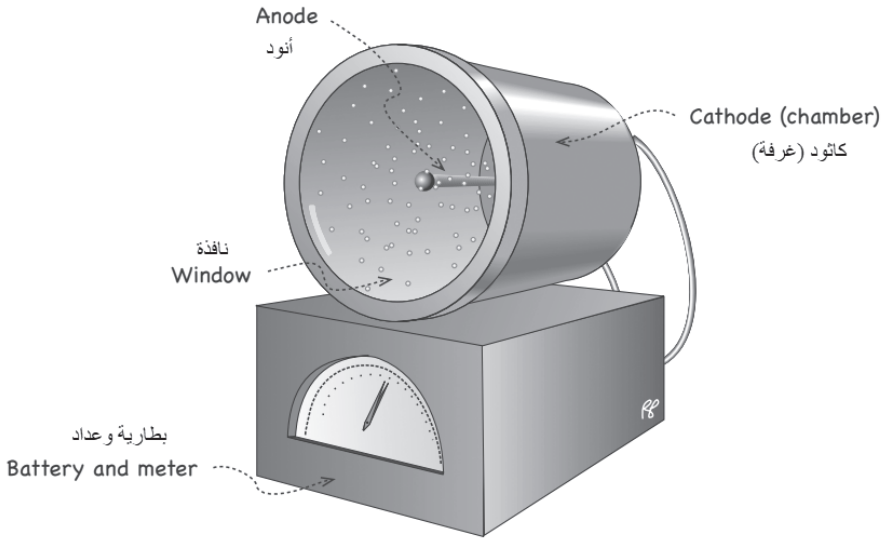
### تدفق الشحنة Charge Flow

### تيار القياس Measuring Current

يتعلق هذا الموضوع بقياس تدفق الشحنة التي تنتجها الإشعاعات المؤينة في جهاز كشف الغاز. الأيونات التي تنتجها الإشعاعات هي جسيمات مشحونة. الجسيم السالب هو إما إلكترون حر أو جزيء أوكسجين أو نيتروجين يمتص الكترون حر. الجسيم الموجب هو جزيء الغاز الذي فقد الكترون.

إن جهاز الكشف عن الغاز يحتوي على كل من القطب الموجب والسالب كما في الشكل (4-1). كما هو مبين في مقطع عرضي في الشكل (4-2)، يتم الحفاظ على فرق الجهد بينهما بواسطة بطارية. الأيونات الموجبة والسالبة تنتج في الغاز عن طريق تحرك الإشعاعات في اتجاهات متعاكسة، الأيونات الموجبة نحو الكاثود السالب والأيونات السالبة نحو الأنود. حركة الايونات (الشحنات) هو التيار الكهربائي، والتي يمكن الكشف عنها باستخدام مقياس حساس.

والتيـار بين الأقطاب هو مقياس لكمية الإشـعاع الداخلـة. غرفة التأين، التي ستوضح لاحقا في هذا الفصل، هي أداة عملية تعمل بهذه الطريقة.

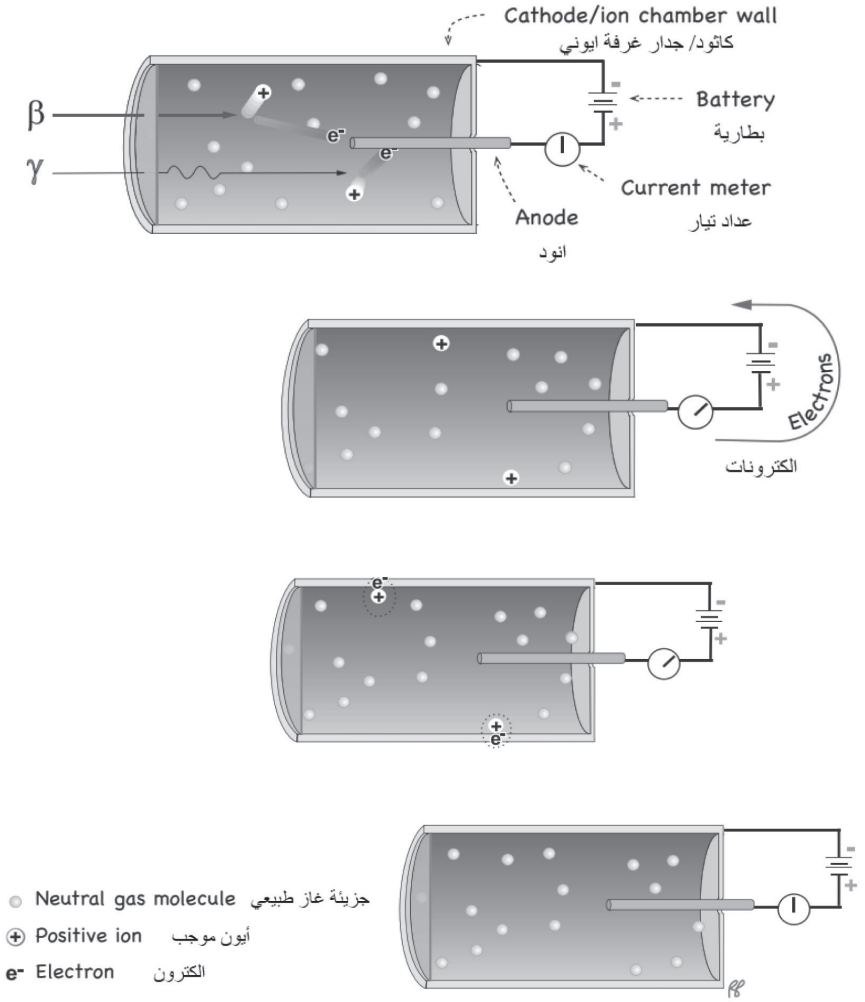



**الشكل 4-1 الكاشف المملوء بالغاز البسيط.**

### عد نبضات التيار Counting Pulses of Current

البديـل لقيـاس التيـار هو عـد النبضـات الفردية الناتجة من كل جسـيم أو فوتـون مشـحون يدخـل الغاز. عـداد كايكر هو مثال على هـذا النوع من الكاشـف. إن المعدل الذي يحدث في بعض الكواشف هو مقياس مباشر لكمية الإشعاع الداخل.

عملية التأين، هو جمع الشـحن المنتجة، وتسجيل العد والتي تجري بسرعة كبـيرة، ولكنهـا بعيـدة كل البعد عن اللحظيـة. الوقت هو المطلـوب للأيونات للوصـول إلى أقطـاب كل منها وللكاشـف للعودة إلى حالة الراحـة. ما يتضح في هـذا الوقت يعتمد على بناء الكاشـف، ونوع الغازات التي يحتوي عليها وشـدة الجهد المسـلط. أخيرا يكون التناسـب طرديا مع الجهد المسلط على الأقطاب. على الرغـم مـن أن جميع العوامل الثلاثة تحدد خصائص الكاشـف، فمن المفيد دراسة الفولتية المسلطة في مزيد من التفاصيل.




**الشكل 4-2 يتم الكشف عن وجود الإشعاعات المؤينة بواسطة انحراف لمقياس التيار.**

## خصائص مناطق الجهد الرئيسية المسلطة عبر الكاشف المملوء-بالغاز

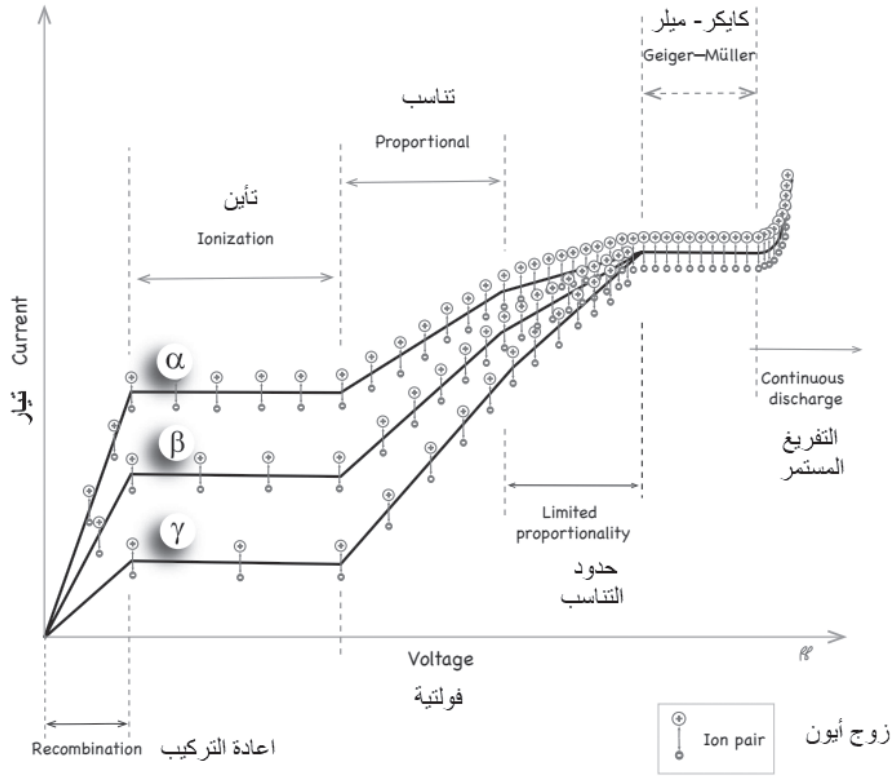
## Characteristics of the Major Voltage Regions Applied Across a Gas-Filled Detector

### منخفض Low

في الكاشف المملوء بالغاز، قيمة الجهد بين الأقطاب يحدد نوع الاستجابة لكل الجسيمات المشحونة أو الفوتون. عندما يكون الجهد بين الأقطاب

منخفض نسبيا، فإن المجال داخل الغاز ضعيف والعديد من الأيونات ببساطة تتحد، وتترك فقط جزء صغير للوصول إلى الأقطاب الكهربائية. قليلا إذا كانت أي شحنة تتدفق بين الأقطاب والمقياس في الدائرة الخارجية يبقى عند الصفر.

في الجهد العالي إلى حد ما، يشار إلى منطقة التأين كما في الشكل (4-3)، فإن معظم الأيونات التي يتم تشكيلها تصل إلى الأقطاب الكهربائية. هناك زيادة صغيرة أخرى في الجهد لا تزيد من التيار مرة واحدة في الجهد وهي كافية لجمع ٪100 من الأيونات التي تشكلت. نبض الموجة الحالية للتيار الناتجة عن الإشعاع المؤين الداخل للغرفة، يتوقف حتى دخول الجسيمات المشحونة التالية أو الفوتون للغاز. هذا التيار صغير ومن الصعب عده حدثا فرديا.



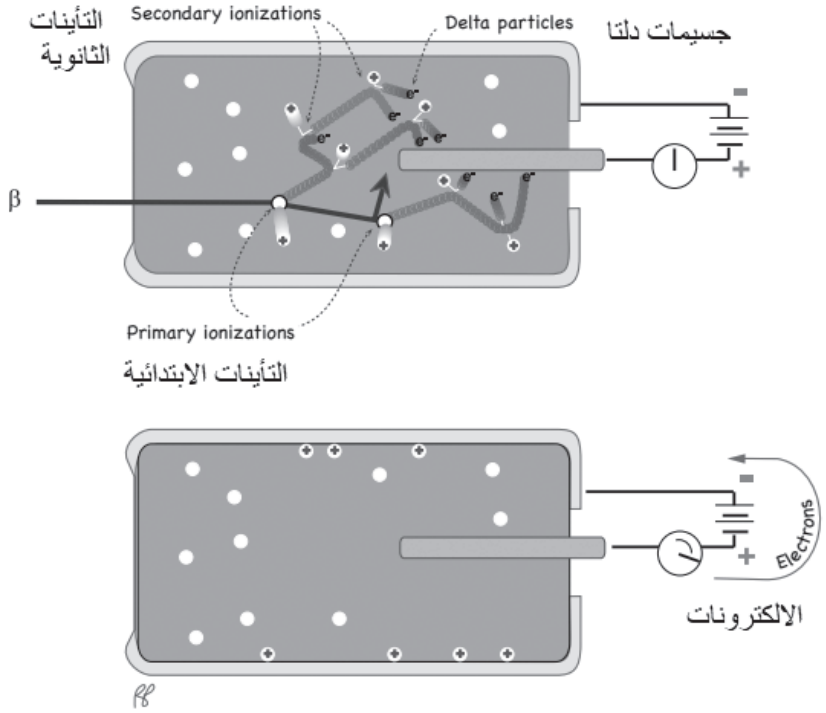

**الشكل 4-3 التيار كدالة للجهد المسلط في كاشف الغاز. وتشمل المناطق ذات الاهتمام: التأين، التناسب، وكايكر.**

في هذه المنطقة، التيار مستقل نسبيا عن الزيادات الصغيرة في الجهد. غير أنها تتأثر بنوع الإشعاع. جسيم ألفا، لأنه يحمل وحدتين من الشحنة وهي ضخمة نسبيا، تنتج العديد من أزواج الأيون أثناء الانتقال لمسافة قصيرة في الغاز. جسيم بيتا، وهو أخف بكثير ويحمل شحنة واحدة فقط، تنتج أزواج أيون أقل لكل وحدة من المسافة المقطوعة. الفوتون، لأنه لا يحمل شحنة ولا كتلة، يخلق أقل من أزواج ألايون. على أي حال، عمليا جميع أزواج الأيون التي يتم إنشاؤها يتم جمعها على الأقطاب لأن الجهد المسلط يولد مجال كهربائي قوي كفاية لمنع إعادة التركيب.

في الكواشف الصغيرة، بعض من التأين من اشعاع بيتا والكثير أو حتى معظم التأين من اشعاع الفوتون قد يفلت من الكشف. في هذه الحالة، فإن التيار التابع للإشعاع من قبل جسيم ألفا يكون أكبر بكثير من ذلك الناجم عن جسيم بيتا من طاقة مماثلة، والتيار المتولد لكل من الجسيمين سيكون كلاهما أكبر من ذلك الناجم عن إشعاع الفوتون من طاقة مماثلة.

### متوسط Intermediate

مع زيادة في الجهد، الكاشف يمر في المنطقة التالية من العملية (انظر الشكل 4-3). وفي هذه المنطقة المسماة بالمنطقة التناسبية، يلاحظ وجود ظاهرة جديدة وهي - تضخم الغاز كما في (الشكل 4-4).



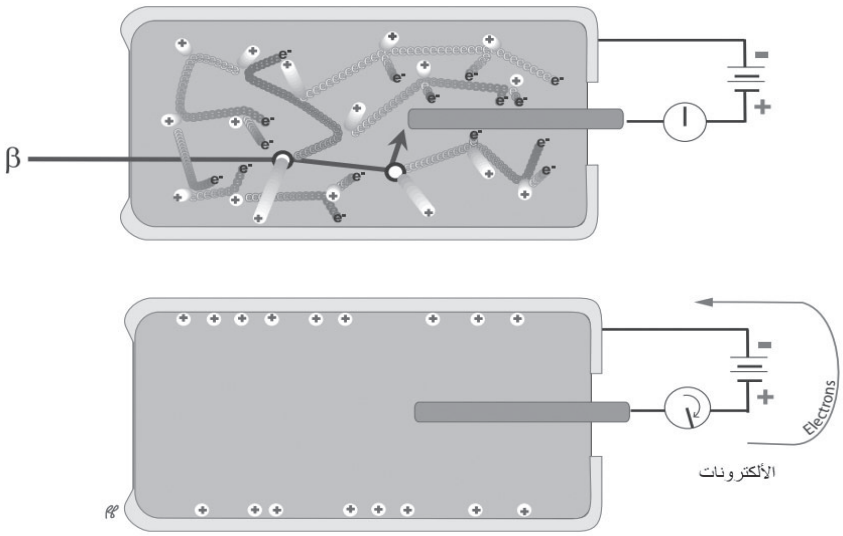

**الشكل 4-4 العداد التناسبي. الجهد يسبب تضخيم الغاز الذي يعطي الإلكترونات ليتم فصلها خلال التأين الأولي ما يكفي من الطاقة للتأين الثانوي.**

يكون فيه تسارع بشدة أكبر نحو القطب الموجب في هذا الجهد العالي، والإلكترونات التي ينتجها الإشعاع (تسمى الجسيمات الأولية) وتنتقل بسرعة بحيث هم بنفسهم قادرون على تأيين بعض من جزيئات الغاز المحايد سابقا. هذه العملية، تشبه التي تنتجها جسيمات الإشعاع الأصلي، يمكن أن يتصور على أنها إلكترون مسرع يضرب الكترون جزيئي خارجي (ايونات سالبة جديدة) ويترك وراءه جزيء الغاز الموجب الشحنة (أيون إيجابي جديد). الإلكترونات المفصولة حديثا (تسمى دلتا أو الجسيمات الثانوية) وأيضا هي تتسارع نحو القطب الموجب، وبدورها، تأين جزيئات الغاز الإضافية. نبضة الشحنة التي بدأها الاشعاع الداخل يتم تضخيمه بشكل كبير بواسطة هذه السلسلة القصيرة من التفاعل.

في هـذه المنطقـة، يتناسـب التيـار الناتج مـع عـدد الأزواج الأيونية التي ينتجهـا الإشـعاع الداخـل. التيار هـو الأعلى لجسـيم ألفا من بيتـا، والتيارات لكليهما أعلى من الفوتون. وبسـبب تضخم الغـاز، فإن العدد الإجمالي للأزواج الأيونيـة، الأوليـة والثانويـة، أعلى بكثير ممـا هو عليه في منطقـة التأين ذات الجهـد المنخفض. هذه النبضـة الناتجة للتيار كبيرة بما فيه الكفاية للكشـف عن الحدث الفردي، والتي يمكن عدها.

**مرتفع High**

بالنسـبة للكاشـفات الـتي تعمـل في فولتيـة أعلى مـن ذلك، فـوق المنطقة التناسبية، فان نبض التيار أكبر ولكنه يصبح مستقلا عن عدد الأيونات التي ينتجها الحدث الأولي. كما ان زيادة الجهد، للتوصل إلى نقطة التي يكون فيها معظم الغاز داخل الكاشـف يشارك على نطاق واسع بالتضخم، للتأين المتعاقب كما في الشـكل (4-5). وبمجرد أن يكون كل الغاز مشـاركا، لن يكون هناك تضخيـم أكـبر للغاز حتى يكون لأي زيـادة إضافية في الفولتيـة تأثير ضئيل على حجم نبض التيار. هذا هو ما يسـمى منطقة كايكر. عمل الكاشف في هذه المنطقة يسمى عداد كايكر، أو عداد كايكر ميلر، بعد ان تم تطوريه في وقت قريب. في منطقة كايكر، ليس فقط حجم نبض التيار لا يعتمد على التغيرات الصغيرة في الجهد، ولكن حجم النبض هو أيضا مستقل عن كمية التأين التي تنتجهـا الإشـعاعات الداخلة. بعبارة أخرى، في منطقـة كايكر، يكون التيار الذي ينتجـه جسـيم أو فوتون مشـحون كبـيرا مقارنة بالتي تنتـج في المنطقة التناسـبية. ,التيار هو مسـتقل عن التقلبات في الجهـد، وحجم كل نبض للتيار يعتمد على خواص الكاشف نفسه بدلا من الجسيمات الداخلة أو الفوتون.




**الشكل 4-5 عداد كايكر. الإشعاع الأولي يؤدي بسرعة الى سلسلة متزايدة من التأين التي تتضمن معظم الغاز.**

لا تستخدم الفولتية فوق منطقة كايكر لأنه حتى في حالة عدم وجود الإشعاع تم تصميم العداد للكشف عن وجود تأين تلقائي ومستمر من جزيئات الغاز التي تتوقف فقط عندما يتم خفض الجهد. هذا يشبه التأين المرئي يمكن رؤيتها في علامة النيون كما في (الشكل 4-6). مع مثل هذه الفولتية العالية، فان الجهاز ليس مفيد ككاشف للإشعاع.

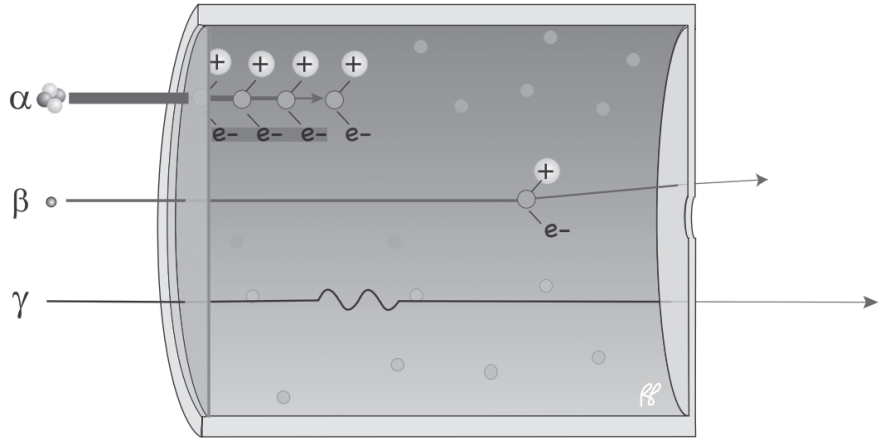
**الشكل 4-6 التفريغ المستمر. الجهد المسلط على علامة النيون عالي بما فيه الكفاية لتوليد التأين التلقائي الذي يستمر حتى يتم إيقاف تشغيل الطاقة.**

### الحساسية Sensitivity

### جوهريا Intrinsic

سوف يستجيب جهاز الكشف عن الغاز إلى كل حدث إشعاعي تقريبا يسبب التأين في الغاز. ولكي يتم الكشف عن الجسيمات أو الفوتون، يجب أن

تكون نشطة بما فيه الكفاية لعبور وجه الكاشف في الحجم الحساس للغاز، ولكن يجب ألا تكون نشطة بحيث تمر عبر الغاز دون أن تسبب أي تأين. الحد الأول مهم لجزيئات ألفا أو بيتا ذات الطاقة المنخفضة، والتي لا تملك سوى قدرة محدودة على اختراق «النافذة» للكاشف ولكن مرة واحدة بالداخل تتأين بقوة. والثاني هو النظر في الفوتونات عالية الطاقة، التي تخترق بسهولة ولكن قد تمر من خلال كاشف يسبب التأين القليل أو المعدوم كما في (الشكل 4-7).




**الشكل 4-7 التأين بواسطة جزيئات ألفا وبيتا والفوتونات في الكاشف المملوء بالغاز.**

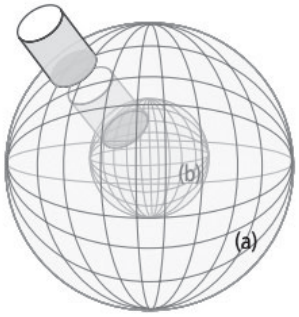
ويمكن زيادة حساسية الجسيمات المشحونة (ألفا أو بيتا) باستخدام مواد رقيقة قابلة للاختراق لنافذة الكشف مثل ورقة رقيقة من الميكا أو لأكبر حساسية من خلال وضع العينة المشعة داخل الحجم الحساس. تحسنت الحساسية لفوتونات عالية الطاقة من خلال زيادة مساحة حجم الحساس أو، من خلال «التشويش» المزيد من جزيئات الغاز تحت الضغط أو باستخدام نافذة اسمك.

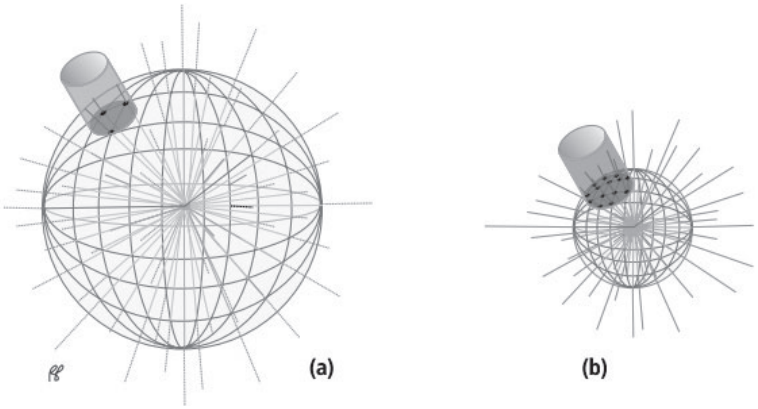
وتكون أجهزة الكشف النموذجية التي تعمل بالغاز حساسة لجسيمات ألفا ذات طاقات أكبر من 3 ميكا الكترون فولت إلى 4 ميكا الكترون فولت، وإشعاع بيتا فوق 50 كيلوالكترون فولت إلى 100 كيلو الكترون فولت، وإشعاع كاما فوق 5 كيلو الكترون فولت إلى 7 كيلو الكترون فولت. ويعتمد

الحد الأعلى لإشـعاع كاما أو الأشعة السينية على نوع الغاز وضغطه ونوع المواد المستخدمة في نافذة وجدران الكاشف.

### هندسيا Geometric

أكـبر نافذة وأقـرب للمصدر، يعني المزيد من الإشـعاع يدخل الكاشـف. على مسـافات بعيـدة من المصـادر المدمجة، تنخفض كمية الإشـعاع التي تصل إلى الكاشـف مع مربع المسـافة. عامل التحكم، بـصرف النظر عن امتصاص الإشـعاع في الهواء المتداخل، هو الجزء من المصدر الذي تشـاهده النافذة. كما يمكـن أن يـرى في الشـكل 4-8، هذا هو جزء مـن المجال الفـرعي المائل (أو المنظور) من خلال النافذة.




**الشكل 4-8 الكفاءة الهندسية للكاشفات. كلما كان الكاشف أقرب إلى المصدر، كلما زاد عدد الفوتونات التي تعبر نافذة الكاشف.**

## أنواع الكواشف المملوءة بالغاز Types of Gas-Filled Detectors

### غرف التأين Ionization Chambers

#### هيكل وخصائص Structure and Characteristics

**هيـكل**: غرفة التأين، في أبسـط أشـكالها، هي عبـارة عـن غاز يمكن أن يكـون (الغـاز عادة الهـواء) مـع نهاية نفـاذة للإشـعاع (النافذة)، الأسـلاك المركزيـة، المقياس، والبطارية (انظر الشـكل -14). غالبا ما يكون الغاز تحت الضغط الجوي العادي، ولكن قد يكون تحت ضغط، كما نوقش في القسـم الذي يتحـدث عن عـدادات كايكر. هنـاك نافذة رقيقة في نهايـة واحدة من العلبة تسـمح بدخول الإشـعاع. تحافـظ البطارية أو مجهز القدرة على السـلك المركـزي عنـد جهد موجب بالنسـبة للجـدران المحيطة بالعلبـة والتي تعمل كقطـب سـالب. يتم تعيين حجم الجهد المنخفض نسـبيا لضمان التشـغيل في منطقة التأين، وبالتالي تسمى غرفة التأين (انظر الشكل 4-3). عداد الحساسية لقياس تيار الأيونات هو مكمل للجهاز.

**الوظيفـة**: غرفـة التأين لا تسـتخدم عادة لحسـاب الأحداث الإشـعاعية المنفصلة ولكن بدلا من ذلك لقياس متوسـط عدد التأينات في الدقيقة التي تحـدث داخل الغاز. إذا كانت الأحداث غـير مترددة على نحو كاف، قد يلاحظ المقياس المرافق للانتقال لمسـافة قصيرة مثل الجسـيم أو الفوتون من الإشعاع يحفز الكاشف ويعود ببطء قبل الحدث الثاني.

**الحساسـية**: يتم تحديد الحد الأدنى للحساسـية لغرفة التأين من حساسية المقيـاس المسـتخدم لقياس التيـار. من حيث التعرض للإشـعاع، الحساسـية تنخفض إلى اقل من 1mR/hr للفوتونات منخفضة ومتوسـطة الطاقة (10 كيلو الكترون فولت إلى 1 ميكا الكترون فولت) هو متاح في عدادات المسح القياسية ومقاييس الجرعات.

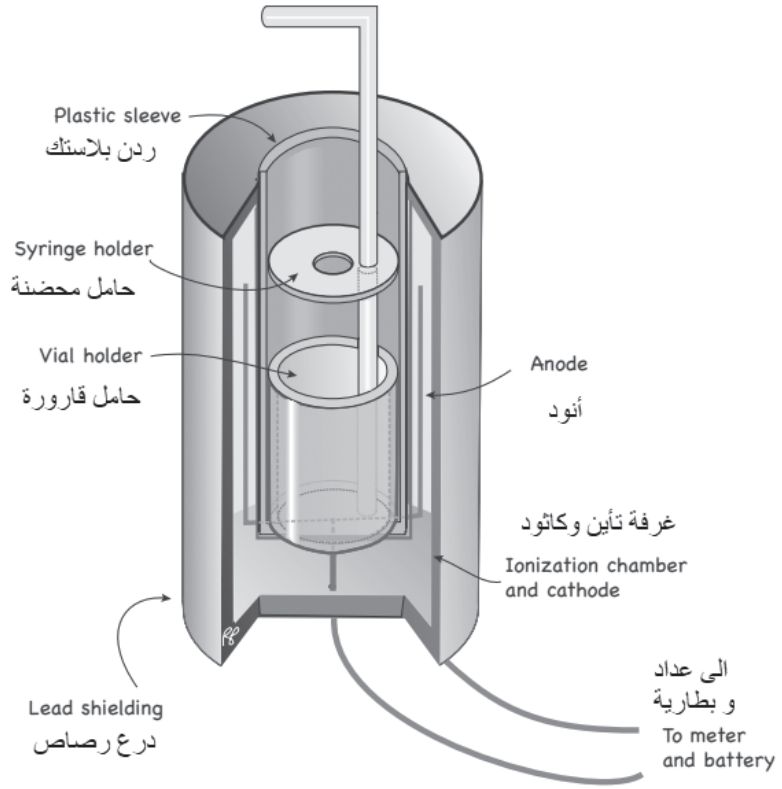
**استقلالية الطاقة**: في منطقة التأين من عمل الأقطاب تجمع جميعها عمليا لـكل الأزواج الايونية المتشـكلة في الغاز. ولأن عدد الأيونات يتناسـب طرديا

مع طاقة الإشعاع الداخل، فإن التيار الذي ينتج عنه هو مقياس للمعدل الذي تودع فيه الطاقة داخل الغاز بواسطة الإشعاع المؤين. يتم التعبير عن القراءات بالراد أو سيفرت لكل ساعة. وان معدل التأين، وما يترتب على ذلك من الجرعة الإشعاعية، تعتمد جميعها على طاقة الجسيمات أو الفوتونات الداخلة. نتيجة لذلك، على الأقل لغرفة تأين مثالية، فإن قراءة العداد تعطي مقياسا موثوقا لمعدل الجرعة الإشعاعية. مع ذلك، لاحظ أن هذه الموثوقية لها حدودها. كما أشير إلى ما سبق، فإن الأشعة قد لا تخترق غرفة التأين، في طاقات منخفضة جدا، وعند طاقات عالية جدا، قد يمر الإشعاع تماما من خلال الجهاز دون وجود العديد من التفاعلات المؤينة مع الغاز.

**التطبيقات Applications**

**معايرة الجرعة**: غالبا ما يستخدم معايرة الجرعة في قسم الطب النووي كغرفة تأين اعلى منضدة للتأكيد على أن الكمية الصحيحة من النشاط قد تم توزيعها قبل إعطاء جرعة من الأدوية المشعة (الشكل 4-9). تتكون معايرة الجرعة من غرفة التأين المحيطة بجدار بئر مفتوح. جدران البئر قابلة للنفاذية للفوتونات. والتيار الذي ينتج في الدوائر يتناسب مع عدد مرات التأين الأولية في الغرفة. يتم تسجيل كمية التيار كنشاط اشعاعي في ميكا بيكيرل أو ملي كوري. ويمكن معايرة الجرعة والإبلاغ فقط عن النشاط، وليس نوع الإشعاع أو المادة الإشعاعية.

وتتأثر دقة القراءة بعوامل مثل نوع حاوية الجرعة، ووضعها المناسب في معايرة الجرعة، ومعايرة الجهاز وإعادة ضبطه بانتظام. نظرا لأهمية إدارة الكمية الصحيحة من النشاط للمرضى، فهناك قواعد صارمة لاستعمال ومعايرة الجرعة. ويناقش هذا في الفصل 9.



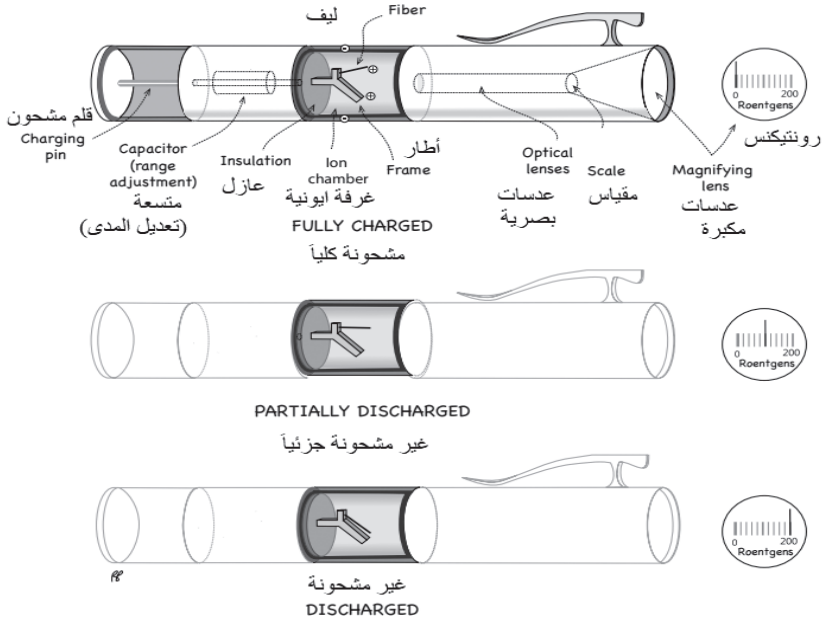

**الشكل 4-9 معايرة الجرعة.**

مقياس المسح: عندما يتم استخدام غرفة التأين كمقياس للمسح، وعادة ما تفسر القراءة الحالية على أنها متوسط كثافة الإشعاع بالروتنكن (R) لكل ساعة. على سبيل المثال، قد يسجل مقياس المسح معدل التعرض (30 mR/hr) على 1 متر من الشخص الذي عولج مع (370 MBq) (10mCi) لـ $I^{131}$. يتم تحديد رونتكن من حيث التأين المنتج في الهواء وليس من قبيل المصادفة، أن غرفة التأين يمكن استخدامها لقياس كثافة الإشعاع بالروتنكن.

**رونتكن (R) Roentgen**

ان رونتكن هو مقياس اشعة كاما أو الأشعة السينية المكتشفة في الهواء، وليس الأنسجة. وواحد رونتكين هو كمية الإشعاع التي تنتج ($2.58*10^{-4}$) كولوم (C) من الشحنة (أو $2 \times 10^9$ زواج أيوني) لكل كيلوغرام من الهواء الجاف تحت الظروف القياسية.

تجويف مقياس الجرعة: غرفة تأين صغيرة وهي قلب تجويف مقياس الجرعة. لهذا التطبيق، سلك كهربائي صغيرو مستقيم، معزول من جدران الغرفة، مركبة داخل غرفة التأين كما (الشكل 4-10). لتحضير الغرفة للاستخدام، يتم وضع شحنة موجبة على السلك من قبل الشاحن الذي يربط ببساطة بقطب موجب للبطارية إلى السلك. متى ما شحن، والسلك الموجب ينفر من خلال الإطار المشحون إيجابيا. عندما يخترق الإشعاع جدران الغرفة، يتأين الغاز وتنجذب الأيونات إلى الإطار والالياف أو جدران الغرفة، التي تحيد جزئيا شحنتهم. يتم تنافر السلك بأقل قوة من قبل الإطار ويبدأ في التحرك نحو موقع محايد. يمكن رؤية موقع السلك من خلال عدسة باتجاه المقياس على نهاية الغرفة للمعايرة في رونتكن أو راد في الساعة. معزولة تماما عن عملية الغرفة ويمكن أن تبقى الشحنة الموجبة على السلك لساعات. أجهزة قياس الجرعة من هذا النوع غير مكلفة نسبيا، ويمكن استخدامها لقياس التعرض للفوتونات من مدى صفر إلى عدة مئات من ميلي رونتكن. ان جهاز الشحن المنفصل هو المطلوب.




**الشكل 4-10 تجويف مقياس الجرعة. الأيونات المنتجة في الغاز المتعادلة الشحنة على السلك والإطار والعائدة من السلك باتجاه موقعها المحايد. (مقتبس من رسم مقياس الجرعات في FEMA، بعد اخذ الاذن من(FEMA.**

## عداد تناسبي Proportional Counters

### هيكل وخصائص Structure and Characteristics

الغرفة المملوءة بالغاز: في بنائها، العداد التناسبي يشبه إلى حد كبير غرفة التأين. ومن المرجح أن تكون مملوءة بغاز الأركون أو خليط الأركون والميثان أكثر من الهواء، ولكن الفرق الأساسي بينهما هو الجهد العالي وما ينتج عنه من غاز. لهذا السبب يسبب الإشعاع الداخل نبضة تيار كبير بما فيه الكفاية ليتم تسجيلها كعدة منفردة.

### تطبيقات عداد المسح Applications as Survey Meter

العداد النسبي مناسب بشكل خاص عندما يكون من المهم التمييز بين أنواع الإشعاع المختلفة. لأن حجم النبضة من العداد النسبي يتناسب مع التأين الأولي، لجسيمات ألفا، والتي تأين أكثر من جسيمات بيتا، والمنتجة لنبضات أكبر، ويمكن استخدام هذا الاختلاف للتمييز بينهما.

قد يتطلب عد الجسيمات منخفضة الطاقة وجود قرب شديد جدا بين الكاشف والعينة. يمكن بناء العدادات النسبية لهذا النوع من العد مع عدم وجود نافذة أو فقط تكون رقيقة جدا، وغشاء التسرب هو إلى حد ما بين العينة والغاز للغرفة. في نوع عديم النافذة، يتم وضع العينة مباشرة داخل الغرفة المملوءة بالغاز. إن التدفق المستمر للغاز من خلال الكاشف يعوض عن أي خسارة في الغاز عند إدخال العينات أو، في حالة النافذة الرقيقة، لأي غاز يتسرب عبر الغشاء. إن عد الغازات هو أمر مضبوط نسبيا، ولأغراض كثيرة، تم الاستعاضة عنه بالعداد الوميضي السائل الأقل ضبط.

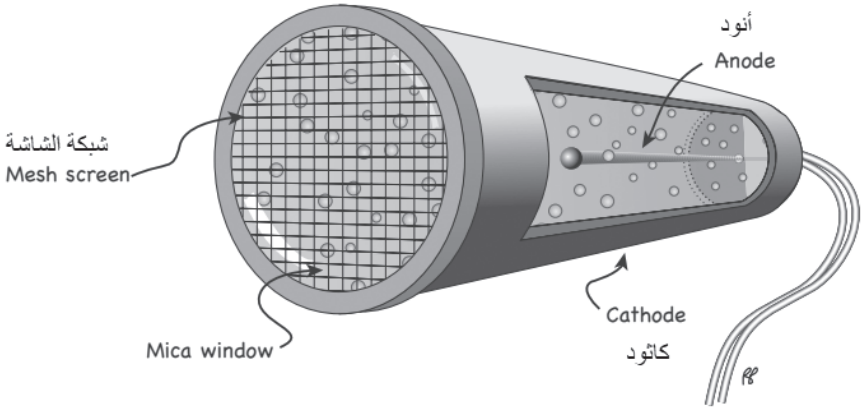
## عدادات كايكر Geiger Counters

### الهيكل والخصائص Structure and Characteristics

الأنبوب ومليء بالغاز: عداد كايكر هو غرفة التأين التي تعمل على تسليط الجهد العالي نسبيا (الشكل 4-11). وعادة ما تكون الغرفة مغطاة بالأركون تحتوي على آثار غازات أخرى مثل الهالوجين أو الميثان، على الرغم من أن الكاشف سيعمل بملء بسيط مثل الهواء الجاف. النهاية الحساسة من

المجس هي عموما نافذة الميكا المحمية بواسطة شبكة معدنية خارجية. في بعض التطبيقات، يتم تغطية نافذة رقيقة من غرفة التأين بواسطة غطاء الألومنيوم. الفوتونات تضرب سقف الغطاء واخرجت الإلكترونات الثانوية التي بدورها تأين الغاز داخل الغرفة. جدران الغرفة قد تعمل أيضا بالمثل.

قد يكون الغاز في غرفة مملوءة بالضغط الجوي أو قد تكون مضغوطة لزيادة الحساسية. عند الضغط العالي، وعادة بضع مرات من الضغط الجوي العادي، وعدد من جزيئات الغاز «مكتظة» في الغرفة هي الأكبر. هذا يثير احتمال أن الإشعاع القادم سوف يواجه ويأين جزيء الغاز داخل الغرفة. الضغط مفيد بشكل خاص لإشعاع الفوتون حيث ان الطاقة عالية بما فيه الكفاية، وبالتالي مداه في الغاز طويل بما فيه الكفاية، للسماح لها للمرور تماما من خلال غرفة عديمة الضغط دون مواجهة وتأين جزيء الغاز. لا يمكن لعداد كايكر التمييز بين أنواع الإشعاع لأن كل تفاعل من الإشعاع مع الغاز يسبب التأين الأقصى.

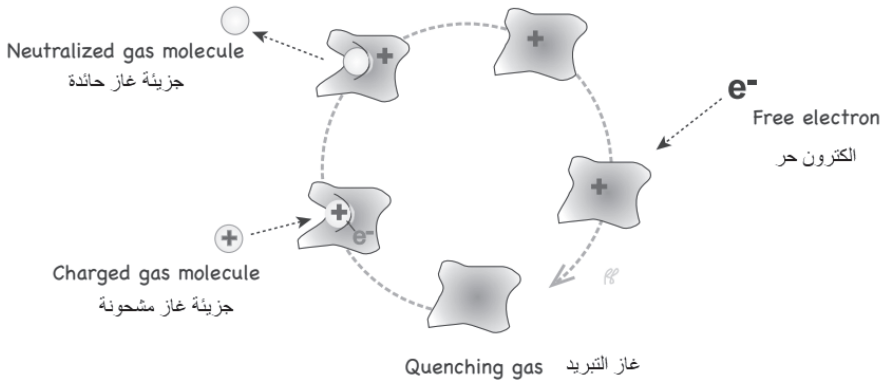



**الشكل 4-11 مجس كايكر.**

### التجميد Quenching

تضخيم الغاز، الذي يميز منطقة كايكر، بسبب حدث إشعاعي داخلي واحد ويعطي نبضة تيارية كبيرة، غير أن تضخيم الغاز يحمل العيب في التفريغ، الذي بدأه الإشعاع، ومن المرجح أن يحافظ على نفسه بشكل دائم. في

وقت يستمر التفريغ، لا يتأثر الكاشف بالمزيد من الإشعاع الوارد؛ فإنه مشلول بشكل فعال (هذا الوقت الميت يستمر (100–500 µs) لعدادات كايكر). يجب إخماد التفريغ قبل الأنبوب ويمكن ان تعد الانبوبة مرة اخرى. طريقتين شائعتين للتبريد او الاخماد هي بسرعة إسقاط الجهد المسلط أو بإضافة مواد التبريد إلى مملوء الغاز. هذه المادة تعمل على إخماد التفريغ عن طريق امتصاص الطاقة الحركية للإلكترونات وتسهيل إعادة التركيب مع الأيونات الموجبة كما في (الشكل 4-12). وعادة ما تستخدم مركبات الهالوجين والجزيئات العضوية الصغيرة مثل غاز الميثان لهذا الغرض. أيا كانت الطريقة المستخدمة، التجميد هو شفافية للمستخدم.




**الشكل 4-12 غاز التبريد المستخدم في مجس كايكر.**

## التطبيقات Applications

كان عداد كايكر منذ فترة طويلة الأكثر استخداما على نطاق واسع للكواشف المملوءة بالغاز. تتمثل استخداماته الرئيسية في رصد مساحات مثل مختبرات الطب النووي للإشعاع والكشف عن التلوث. عندما تستخدم كمراقب للإشعاع للكشف عن الفوتونات الفردية أو معدلها (عادة ما يشار إلى العد أو معدل العد، على التوالي)، عداد كايكر لا يعتمد على طاقة الفوتون. هذا صحيح شريطة أن الفوتون نشط بما فيه الكفاية لدخول غرفة العد ولكنه ليس نشط جدا بأن يمر من خلال ذلك دون تفاعل. عند استخدامها كمقياس مسح لقياس معدل التعرض، وهي عادة ما تكون ميلي رونتكن في الساعة،

وتتأثر قراءة العدادات بقوة بواسطة الطاقة من الفوتونات. بالنسبة للفوتونات ذات الطاقة المنخفضة، وهي عادة تلك التي تقل عن 100 كيلو الكترون فولت، فإن معدل التعرض الفعلي ليس سوى جزء صغير من القراءة المعروضة على العداد. السبب في ذلك هو أن العداد يكشف الفوتونات الفردية، وليس طاقتها، في حين أن معدل التعرض يعتمد على كل من طاقة الفوتون وسيل الفوتونات. يتم عادة معايرة العداد للفوتون من الطاقة المعتدلة أو حتى عالية مثل تلك $Cs^{137}$ أو $Co^{60}$. يجب إعادة المعايرة إذا كان من المتوقع أن تكون طاقة الفوتون مختلفة جدا عن تلك المستخدمة لمعايرة المصنع.

**الحساسية**: يمكن أن يتوقع من عداد كايكر أن يستجيب لأي جسيم فردي أو فوتون تكون طاقته عالية بما فيه الكفاية للسماح له بالدخول إلى الغرفة ولكن منخفضة بما فيه الكفاية بحيث لا يمر أو من غير المرجح أن يمر دون تأيين أي جزيئة غاز. من هذا، من الواضح أن الاعتبارات الهندسية- من حيث حجم وشكل الكاشف والمسافة عن المصدر- يمكن أن تكون أهم العوامل التي تحد من الحساسية.

لرصد الإشعاع لكثافة منخفضة، تكون الحساسية هو أكثر محدودية بواسطة العد الخلفي. يجب أن يكون معدل العد للإشعاع الرصود يكون كاف لزيادة معدل العد الكلي بشكل كبير فوق الخلفية. بالنسبة للإشعاع عالي الكثافة، قد تكون الحساسية محدودة بسبب ما يسمى بالوقت الميت للعداد، والذي هو، كما موضح أعلاه، فهو الوقت قبل إخماد تفريغ واحد ويكون الأنبوب قادرا على حساب حدث آخر.

### كواشف أشباه الموصلات Semiconductor Detectors

أشباه الموصلات هي مواد بلورية مع إلكترونات متحركة أقل من المواد المعدنية. كنتيجة لذلك، فإن مقدار الشحن الكهربائي في هذه المواد مقيد أكثر من ذلك الموجود في المعدن مثل النحاس، ومن هنا جاء اسم "أشباه الموصلات". يمكن اعتبار أجهزة الكشف أشباه الموصلات بانها مناسبة وظيفيا للكشف عن الغاز ولكن مع كل المزايا للمادة الصلبة. بطريقة مشابهة لما يحدث عند

تفاعـل الاشـعاع مع إلكترونات جزيئـات الغاز، الكترونـات الذرة لهذه المواد الصلبة يمكن "طردها" من خلال الإشـعاع المؤيـن. بدلا من جزيئات الغاز المشـحونة إيجابيا، يتم إنشـاء «فجـوات» موجبة داخل الهيـكل البلوري كما في (الشـكل 4-13). الالكترونات والفجوات، التي تهاجر في شبه الموصل كما انها تنجذب هذه الكيانات المشحونة إلى الأنود والكاثود وتعلق على الجوانب المقابلة للكاشف كما في (الشكل 4-14).

مواد أشـباه الموصلات هي أقل توصيـلاً من المعادن لحمل التيار الكهربائي (مثل النحاس)، وبالتالي فهي اسمها أشباه الموصلات.

والميزة الرئيسـية لاسـتخدام المـواد الصلبة بدلا من الغاز للكواشـف هي كثافتها العالية. وكلما زادت كثافة مادة ما ازداد التفاعل بين الإشـعاع الداخل مـع ذرات المـواد. بالإضافـة إلى ذلـك، فـإن الإلكترونات في أشـباه الموصلات تكون أقل ارتباطا بذراتها من الإلكترونات في ذرات جزيئات الغاز. يستغرق فقـط 2 فولـت إلى 3 فولت إلى «إطلاق» الإلكترون من مادة أشـباه الموصلات مقارنـة مع ما يقرب من 35 فولت لإطلاق الإلكترون في الهواء. وهذا يعني أنه بالنسـبة لأي إشـعاع داخل فهنـاك خضوع كبير جدا للشـحنات (الفجوات الموجبة والإلكترونات السالبة) في أشباه الموصلات مما هو في الهواء (أو الغازات الأخرى) من حجم مماثل. نتيجة لذلك، هناك حاجة إلى حجم أصغر نسبيا من المواد الصلبة، والذي يسمح لإنتاج أجهزة الكشف الأصغر بكثير.

القليل من العديد من مركبات أشباه الموصلات المتاحة للاستخدام تحتوي الكادميـوم تيلوريـد (CdTe) والكادميوم الزنك تيلوريـد (CdZnTe)، والزنك تيلوريـد (ZnTe). ونظرا لارتفاع تكلفة تصنيع مواد أشـباه الموصلات، فهي تسـتخدم حاليـا فقـط لوحدات الكشـف الصغـيرة (مثل مجسـات العمليات الداخليـة). مرة واحدة يتـم حل بعض من صعوبات التصنيع، ومن المتوقع أنها ستكون متاحة للاستخدام في أجهزة التصوير.