مذكرة الفيزياء الذرية (كواشف اشعاعية) ووقاية اشعاعية

الفرقة الرابعة فيزياء – كلية التربية بقنا

اعداد

أ.د/ عبدالباسط عبادى محمد

د/ عادل جاد الكريم عبادى

كاشفات الاشعاع وقياساته

Radiation Detectors & Measurements

يتم الكشف عن الاشعاع عن طريق الأيونات التي يحدثها عند اختراقه للمواد المختلفة، أو عن طريق الإثارة التي يحدثها لذرات تلك المواد. وفي أحيان أخرى يتم الكشف عن طريق التفاعلات التي تحدث بينه وبين المواد المختلفة.

الكشف عن الأيونات التي يحدثها الإشعاع داخل المواد:

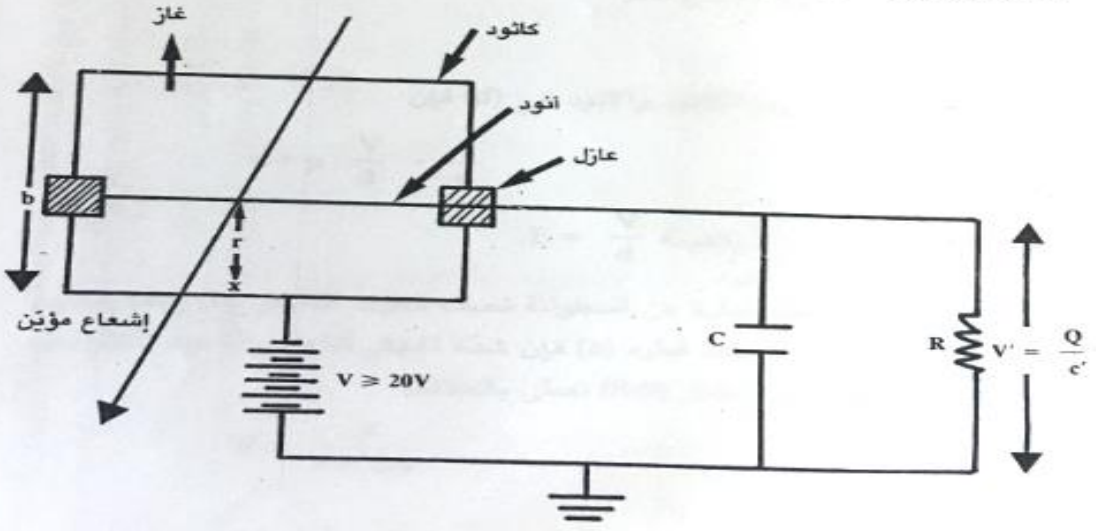
ويتم ذلك بعدة طرق رئيسية وهي:

1 ـ تقنية الإبصار والتصوير باستخدام آلات تصوير خاصة.
2 ـ طريقة المستحلب الفوتوغرافي.
3 ـ طريقة كهربية: وذلك بتسجيل الشحنات الكهربية الناتجة عن هذه الأيونات.

الطرق الكهربية:

ـ الكاشفات الغازية Cas-filled Detectors:

تتركّب هذه الكاشفات بصورة عامة من اسطوانة تحوي غازاً ما (حسب نوع الكاشف وجهد تشغيله) يوضع وسطها وعلى طول محورها سلك معدني يمثّل إلكتروداً مركزياً. وعادة يوضع على هذا السلك جهد موجب أي يشكل الأنود (المصعد) بينما يوضع على الجدار الخارجي للاسطوانة جهد سالب وبذلك يشكل هذا الجهد كاثود (مهبط) الجهاز ويعزل الأنود عن الكاثود جيداً. ويبيّن شكل رقم ١ رسماً توضيحياً لهذه

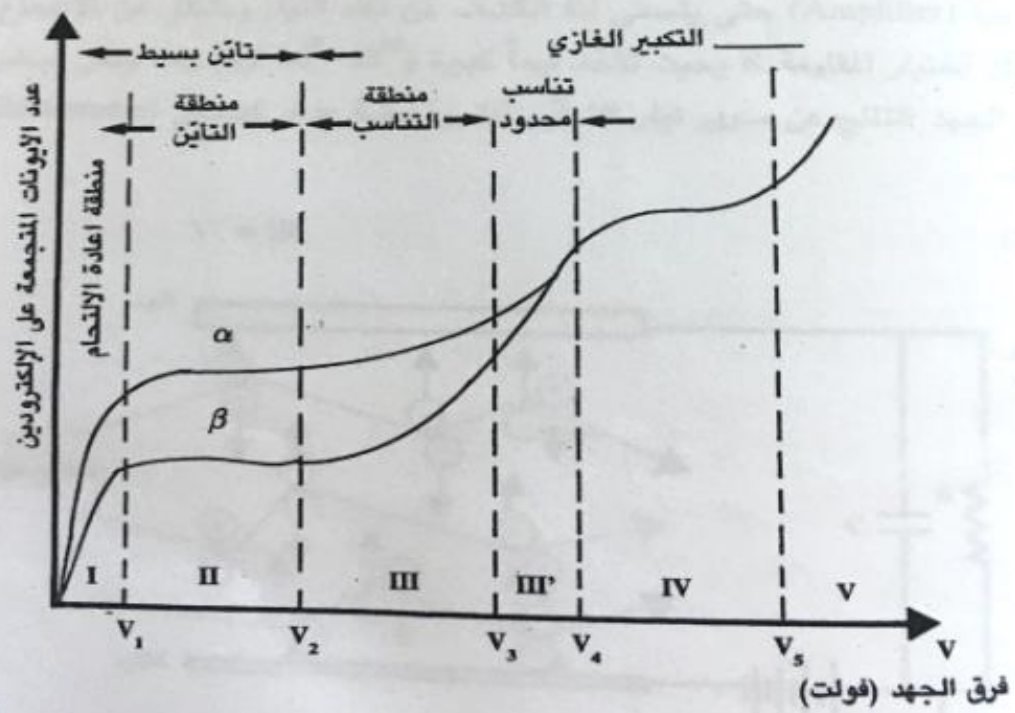


شكل رقم ١ الكاشف الغازي.

الكاشفات. يوضع الجهد الموجب على الأنود من خلال المقاومة R والمكثّفة C. وتساوي السعة الكلية للدائرة (سعة الكاشف + السعة الخارجية C) ويرمز لها بالرمز C'.

ينتج عن مرور الإشعاع المؤيّن خلال الحجم الحساس للكاشف Sensitive Volume تأييناً للغاز إلى أيونات موجبة وأخرى سالبة. وتتحرّك كل من هذه الأيونات إلى الإلكترود المخالف لها في الشحنة وذلك تحت تأثير المجال الكهربي الناتج عن جهد البطارية V. ويعتمد عدد الأيونات التي تصل إلى الإلكترودين على: تصميم الغرفة، الغاز المملوءة به، فرق الجهد المؤثّر V.

يبيّن شكل رقم ٢ العلاقة العامة التي تربط بين عدد الأيونات المتجمعة على الإلكترودين وفرق الجهد بينهما. من دراسة الشكل يتضح أن هناك منطقتين رئيسيتين هما: منطقة التأيّن البسيط ومنطقة التكبير الغازي Gas Multiplication. وسنتعرّض فيما يلي للمناطق المختلفة بالتفصيل:



شكل رقم ٢ خواص العد للكواشف الغازية

1 ـ منطقة إعادة الالتحام: (I) Recombination Region

وتمتد هذه المنطقة من فرق الجهد صفر وحتى القيمة V_1. في هذه المنطقة لا تتمكن كل الأيونات المتكوّنة تحت تأثير الإشعاع من الوصول إلى الإلكترودين وذلك لضعف المجال الكهربي. وهنا يمكن لبعض هذه الأيونات أن تعيد الالتحام Recombine مع بعضها البعض. وكلما زاد فرق الجهد V يزداد عدد الأيونات التي يمكنها الوصول إلى الالكترودين. وهناك محصلة عامة لحركة الأيونات في اتجاه خطوط المجال الكهربي. أي أن هناك محصلة لسرعة الانسياب Drift velocity في اتجاه المجال. وتتناسب هذه السرعة مع شدّة المجال الكهربي E وعكسياً مع ضغط الغاز بين الإلكتروين (p). وتعطى سرعة الانتقال (v) بالعلاقة:

$$v = \frac{dx}{dt} = \mu \frac{E}{P} \qquad ١$$

حيث:

μ هي تحريكية الأيون (Mobility).

P هي ضغط الغاز.

فإذا كانت المسافة بين الكاثود والأنود هي (d) فإن:

$$v = \mu \frac{V}{d} \cdot \frac{1}{p} \qquad ٢$$

حيث استعضنا عن E بالقيمة $E = \frac{V}{d}$.

فإذا ما كان الكاشف عبارة عن اسطوانة نصف قطرها الداخلي (b) بينما يتكوّن الأنود من سلك معدني نصف قطره (a) فإن شدّة المجال الكهربي E عند نقطة تبعد مسافة قدرها r عن الأنود تعطى بالعلاقة:

$$E = \frac{V}{r \ln b/a} \qquad ٣$$

وينتج أن v تعطى بالعلاقة:

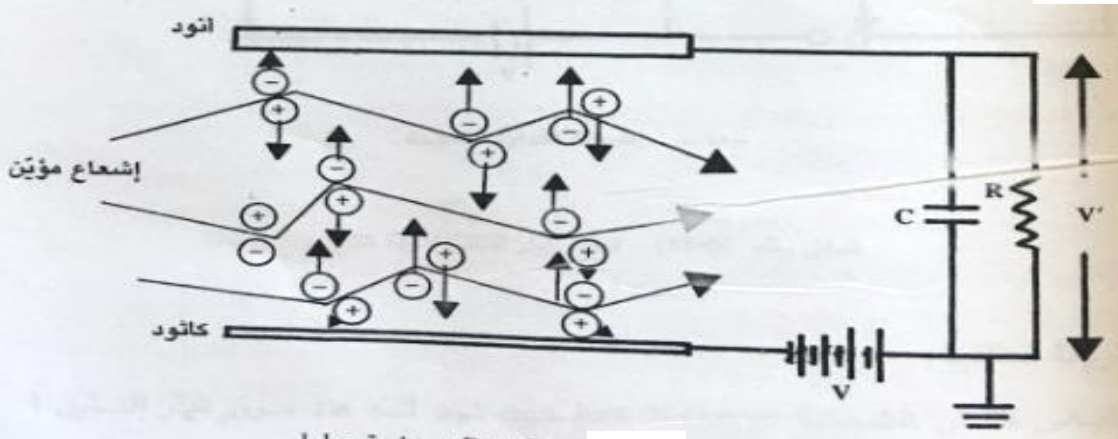
$$v = \mu \frac{V}{pr \ln b/a} \qquad ٤$$

2 ـ منطقة التأيّن (II) Ionization Region:

عند زيادة فرق الجهد عن V_1 فإن فرق الجهد يصبح كافياً لسحب كل الأيونات الناتجة عن الإشعاع نحو الإلكترودين. وهنا لا يتأثّر عدد الأيونات المتجمعة بزيادة فرق الجهد الكهربي بين الإلكترودين. وهكذا فإننا نحصل على عدد ثابت من الأيونات المتجمعة على الإلكترودين عندما يقع فرق الجهد بين القيمتين V_1، V_2 شكل ٢ حيث تتمكّن كل الأيونات المنتجة من الوصول إلى الإلكترودين. وهنا يسمى فرق الجهد بجهد التشبّع Saturation Voltage. وتسمى الكاشفات التي تعمل في هذه المنطقة بغرف التأيّن Ionization Chambers. ويعتمد جهد التشبع على كل من نوع الغاز المستخدم في الغرفة، ضغطه وأبعاد هذه الغرفة. ويبيّن شكل رقم ٣ رسماً توضيحياً لغرفة التأيّن وتفصيل الأحداث التي تقع فيها.

يتناسب عدد الأيونات المتجمعة على كل من الكاثود والأنود، وبالتالي شدّة التيار المار في المقاومة R مع طاقة الأشعة الممتصة في الغرفة. في الواقع لقد لوحظ أن شدّة التيار المار في الدائرة الخارجية صغيرة جداً ولذلك يجب استخدام دائرة تكبير خارجية (Amplifier) حتى يتسنى لنا الكشف عن ذلك التيار وبالتالي عن الإشعاع. ويمكن اختيار المقاومة R بحيث تأخذ قيماً كبيرة ($10^{9}-10^{12}$ اوم) وهنا يمكن قياس فرق الجهد الناتج عن مرور تيار التأيّن (i) بواسطة عداد كهربي Electrometer حيث:

$$V' = iR \qquad ٥$$



شكل رقم ٣ غرفة التأيّن ونظرية عملها.

حيث:

V' هي فرق الجهد بين طرفي المقاومة R، شكل ٣ أ.

وتعطى كمية الشحنة الكلية (Q) الناتجة عن الأيونات بالعلاقة:

$$Q = C' V' \qquad ٦$$

حيث:

C' هي السعة الكلية للغرفة والدائرة الكهربية معاً.

وفي الواقع فإن هناك طريقتين لقياس تيار التأيّن Ionization Current:

C′ هي السعة الكلية للغرفة والدائرة الكهربية معاً.

وفي الواقع فإن هناك طريقتين لقياس تيار التأيّن Ionization Current:

الطريقة الأولى:

قياس فرق الجهد الناتج في المقاومة R أو طريقة IR:

يبيّن شكل رقم (٤ - أ) الدائرة الكهربية لغرفة التأيّن وقياس تيار التأيّن بطريقة فرق الجهد. عند مرور الإشعاع تنتج الأيونات التي تتحرك نحو الإلكترودات المخالفة لكل منها في الشحنة وينتج تبعاً لذلك تيار تأيّن في الدائرة الخارجية. يمر هذا التيار إلى الدائرة الخارجية RC′ وينمو الجهد خلال المقاومة R وفق المعادلة:

$$V'(t) = IR\,(1-e^{-t/RC'}) \qquad ٧$$

حيث:

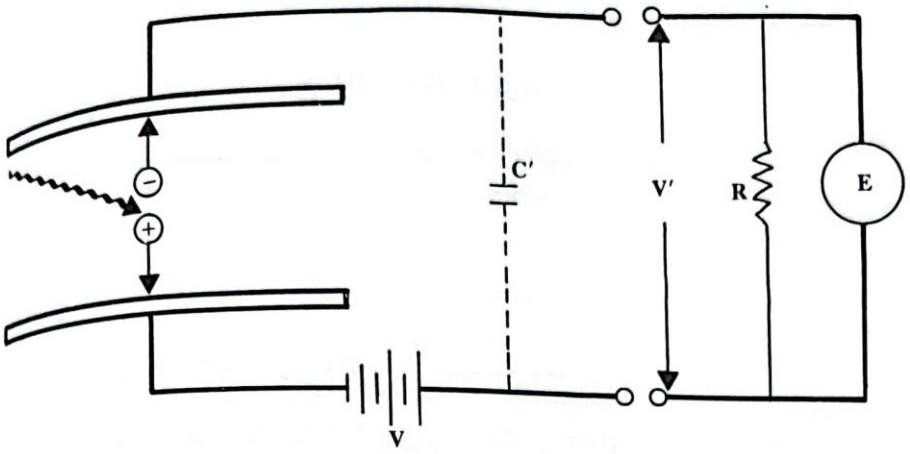
C′ هي السعة الكلية في الدائرة (تساوي سعة الغرفة والسعة الخارجية للدائرة الكهربية)،

I هو تيار التأيّن الناتج عن الأيونات الموجبة والسالبة.

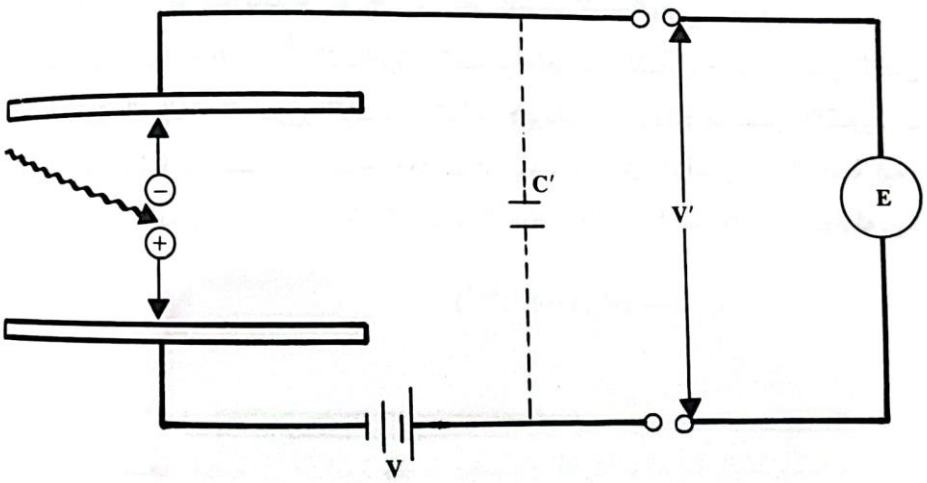
لاحظ أنه عندما يصبح الزمن (t) كبيراً جداً فإن الجهد V′ يؤول إلى IR. أي أن:

$$\lim_{t\to\infty} V'(t) = IR \qquad ٨$$

ويمكن قراءة فرق الجهد باستخدام العداد الكهربي Electrometer (E).



ـ أ ـ طريقة فرق الجهد



ـ ب ـ طريقة فقدان الشحنة

شكل رقم ٤ قياس تيار التأيّن لغرفة التأيّن.

الطريقة الثانية:

قياس فقدان الشحنة loss of charge حيث نجد أنه عند مرور تيار التأين I سيشحن المكثّف C′ وتنتج نبضة pulse تعطى بالعلاقة:

$$V'(t) = \frac{1}{c'} \int_0^t I\,dt$$

$$= It/c'$$

$$= Q/c' \qquad ٩$$

وأيضاً يمكن قراءة فرق الجهد هذا باستخدام العدد الكهربي.

لاحظ أن معادلة ٩ هي معادلة مماثلة لمعادلة ٦ . حيث Q هي الشحنة الناتجة عن مرور التيار I لفترة زمنية هي t.

تستخدم غرفة التأيّن للكشف عن معظم أنواع الإشعاعات المعروفة. إلا أن حساسيتها لأشعة γ صغيرة وذلك لأن هذه الغرفة تملأ بالغازات التي يصعب عموماً إيقاف أشعة γ فيها. هذا ويمكن استخدام الغرفة للكشف عن النيوترونات وذلك بملئها بغاز مناسب (محوِّل) أو بتغطية سطحها الداخلي بمادة (محوِّلة) Converter مناسبة. وعلى كل حال فإن استخدام هذه الغرفة في الكشف عن الإشعاع قد انتشر في السابق أما في الوقت الراهن حيث تقدّمت التكنولوجيا كثيراً فقد استعيض عنها بكواشف أخرى أكثر ملاءمة ولها مميّزات عديدة على غرفة التأيّن.

من التطبيقات العملية لغرف التأيّن استخدامها في أجهزة المسح الإشعاعية Radiation Survay Instruments. تصمم هذه الغرف بحيث يمكن حملها Portable إلى حقول الإشعاع المطلوب قياس جرعة الإشعاع فيها ومنها وذلك لبساطة تركيبها وسهولة حملها. وهناك أشكال عديدة منها. أما التصميم العام فيتركّب من حيّز مقفل من الهواء وتقاس شدّة التيار الناتج عن الأيونات المتكوّنة فيه بفعل الإشعاع بواسطة عداد كهربي Electrometer يستمد طاقته من بطارية صغيرة يزود بها الجهاز. تمتاز هذه الأجهزة بالدّقة وإمكان قياس جرعة الإشعاع الممتص (مقدرة بالرام Rem) مباشرة حيث تعاير هذه الأجهزة قبل ذلك إلى نوع الإشعاع المطلوب قياسه. يبيّن شكل رقم ٥ عداداً ماسحاً يستخدم عموماً للقياسات الميدانية لحقول الإشعاع المختلفة.

حركة الإلكترونات والأيونات في الغازات
Motion of electrons and ions in gasses

عند مرور الإشعاعات المؤينة في الغاز تتكون أزواج إلكترونية – أيونية. وتكون كل من الإلكترونات والأيونات حرة الحركة. ونتيجة لهذه الحركة تتصادم كل من الإلكترونات والأيونات مع ذرات أو جزيئات الغاز الذي تتحرك فيه. ويتناسب متوسط المسار الحر للإلكترونات أو الأيونات في الغاز المعين تناسبا عكسيا مع عدد جزيئات الغاز في وحدة الحجوم (متوسط المسار الحر هو عبارة عن متوسط المسافة التي يتحركها الجسيم دون تصادم). ويبلغ متوسط المسار الحر في الظروف المعيارية للضغط والحرارة حوالي $10^{-5} - 10^{-4}$ سم بالنسبة لمعظم الغازات (الظروف المعيارية للضغط هي 760 مم زئبق وللحرارة هي 20° م). وعموما، يكون اتجاه حركة الإلكترونات والأيونات المتحركة عشوائيا، طالما لا تخضع لتأثير مجال كهربائي.

1 الحركة الانسياقية The drift motion

عند وجود الإلكترونات والأيونات المتكونة في الغاز تحت تأثير مجال كهربائي شدته E تتحرك هذه الإلكترونات والأيونات حركة انسياقية تحت تأثير هذا المجال، في نفس اتجاه المجال بالنسبة للأيونات الموجبة وفي اتجاه معاكس لاتجاهه بالنسبة للإلكترونات. ويقصد بالحركة الانسياقية أن الجسيم المشحون (سوء الإلكترون أو الأيون) يبدأ تحركه بتسارع تحت تأثير المجال الكهربائي لكنه سرعان ما يصطدم بذرات الغاز الموجودة في الحيز فيفقد كل طاقته التي اكتسبها أو جزءا منها، ثم يبدأ في التسارع من جديد ... وهكذا. ويمكن تحديد السرعة المتوسطة للحركة الانسياقية من العلاقة:

$$v = \mu (E / P) \qquad ١٠$$

حيث v سرعة الحركة الانسياقية ، E شدة المجال الكهربائي، P ضغط الغاز . ويعرف المعامل μ بمعامل الحركية mobility (أي القدرة على الحركة)، وهو يتوقف على نوع الغاز كما يعتمد على كل من شدة المجال الكهربائي المؤثر E والضغط P . ويكون مقدار μ صغير عندما يكون مقدار E/P صغير، إلا أن μ يصبح ثابتا عندما يصبح مقدار E/P كبيرا . وتصل السرعة الانسياقية للإلكترونات في الغاز إلى ما يقرب من $10^{6} - 10^{7}$ سم/ثانية عندما تكون E/P في حدود 10 فولت/سم. x مم زئبق .

2 الالتصاق The attachment

هناك ظاهرة أخرى تحدث أثناء حركة الإلكترونات والأيونات في الغاز. فعند تصادم الإلكترون الحر مع جزئ متعادل (أو ذرة) من جزيئات الغاز (أو ذرات) يمكن أن يلتصق هذا الإلكترون مع الجزيء (أو الذرة) المتعادل، ويتكون بالتالي جزيء سالب. وتعرف هذه الظاهرة باسم الالتصاق.

ويعرف معامل الالتصاق h بأنه عبارة عن احتمال حدوث الالتصاق عند تصادم إلكترون واحد بجزيء متعادل. ويعتمد هذا

المعامل على نوع الغاز، وتصل قيمته بالنسبة للأكسجين وبخار الماء والغازات الهالوجينية الأخرى حوالي 10^{-3} وهي قيمة كبيرة. ويؤدي الالتصاق إلى فقد الإلكترونات الحرة من مجموعة الإلكترونات الناتجة عن التأيين. لذلك، فإنه يجب مقاومته حتى لا يفقد جزء كبير من هذه الإلكترونات. لهذا السبب يجب عدم استخدام الغازات الهالوجينية أو الأكسجين أو بخار الماء في بعض أنواع الكواشف الغازية.

3 إعادة الالتحام The recombination

عند وجود إلكترون سالب وأيون موجب بالقرب من بعضهما البعض فإنهما يمكن أن يعيدا التحامهما، مكونين بذلك ذرة أو جزيئا متعادلا. وتعرف هذه الظاهرة باسم إعادة الالتحام (recombination) . ويتناسب معدل إعادة الالتحام (أي عدد مرات إعادة الالتحام في وحدة الحجوم وفي وحدة الزمن) تناسبا طرديا مع تركيز كل من الإلكترونات n_- والأيونات n_+ ويمكن تحديده من العلاقة:

$$dn_+/dt = dn_-/dt = -\alpha n_+ n \qquad (11)$$

حيث α معامل ثابت يعرف باسم معامل إعادة الالتحام، ويتراوح مقداره للهواء بين 10^{-7} ، 10^{-10} ، وذلك عندما تكون الشحنات السالبة والموجبة موزعة توزعا متجانسا في الحيز الذي تشغله. أما إذا كانت الشحنات مركزة في منطقة ما (كما يحدث عند تكون الأزواج الإلكترونية الأيونية على طول أثر(مسار) الجسيم المشحون يزداد معامل إعادة الالتحام زيادة واضحة.

وتجدر الإشارة إلى أن حركية الإلكترونات أكبر بكثير من حركية الأيونات. كذلك، فإن حركية الإلكترونات، لا تؤدي إلى حدوث تغير ملموس في ضغط الغاز أو في شدة المجال الكهربائي.

التيار الإلكتروني والأيوني في الغازات
The electron and ion currents in gasses

يمثل انتقال الإلكترونات والأيونات في الغـــاز انتقـــالا للشـــحنة الكهربائية. وهذا بدوره هو بمثابة مرور تيار كهربي شـــدته I يمكـــن تحديده من العلاقة التالية:

$$I = I_+ + I_- \qquad ١٢$$

حيث: I_+ ، I_- ، هما عبارة عن شدة التيار الأيوني والإلكتروني على الترتيب.

وعموما، يمكن أن يمر تيار كهربائي في الغاز حتى فـــي حالـــة عدم وجود مجال كهربائي، وذلك بسبب ظاهرة الانتشـــار (diffusion) ، حيث تنتشر كل من الإلكترونات والأيونات من الوسط الأكثر تركيزا إلى الوسط الأقل تركيزا. ويتكون نتيجة لهذا الانتشار تيار كهربـــائي شـــدته للأيونات هي:

$$I_{D+} = - e D_+ (dn_+ /dx) \qquad ١٣$$

وشدته للإلكترونات هي:

$$I_{D-} = - e D_- (dn_- /dx) \qquad ١٤$$

حيث: D_+ ، D_- معامـــل الانتشـــار للأيونـــات وللإلكترونـــات بالترتيب. أما (dn_+ /dx) فهو معدل تغير تركيز الأيونات بتغير المسافة، (dn_- /dx) فهو معدل تغير تركيز الإلكترونات بتغير هذه المسافة. بتغير المسافة .

أما في حالة وجود مجال كهربائي شدته E فإنـــه إلـــى جانـــب الحركة الانتشارية تتحرك كل من الأيونات والإلكترونات حركة انسياقية تحت تأثير هذا المجال بالإضافة إلى تلك الحركة الانتشارية. وينتج عن هذه الحركة الانسياقية مرور تيار كهربائي شدته لوحدة المساحات (أي كثافته) للأيونات هي:

$$I_{E+} = e n_+ v_+ \qquad ١٥$$

وللإلكترونات هي:

$$I_{E-} = - e n_- v_- \qquad ١٦$$

حيث v_+ ، v_- هما سرعتا الانسياق لكل من الأيونات والإلكترونات بالترتيب.

بذلك، يمكن إيجاد شدة التيار الكلي الناتج عن كل من الانتشار والمجال الكهربائي لكل من الإلكترونات والأيونات، وذلك بجمع مركباته الأربعة المختلفة (من ١٣ حتى ١٦)، أي أن:

$$I = e (n_+ v_+ + n_- v_- - D_+ (dn_+/dx) + D_- (dn_- /dx) \qquad ١٧$$

الكواشف الغازية The gas detectors

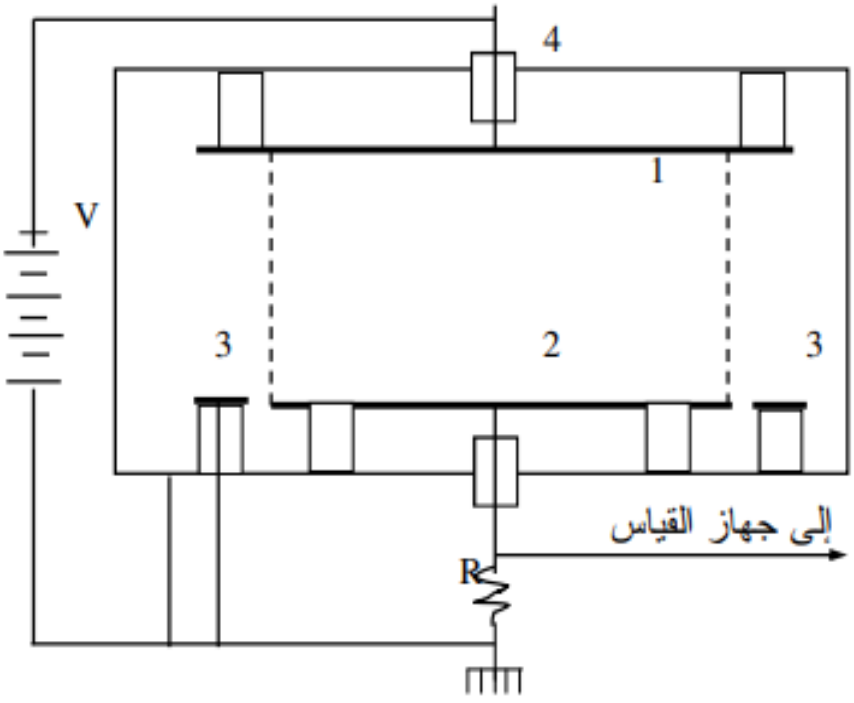
يقوم مبدأ عمل الكواشف الغازية على تجميع الشحنات الكهربائية (الإلكترونية والأيونية) الناتجة عن تأين ذرات أو جزيئات الغاز عند مرور الإشعاعات المؤينة فيه. وبقياس الشحنة الكهربائية الناتجة أو التيار الناتج عنها يمكن الكشف عن مرور الإشعاعات في الغاز. وتنقسم الكواشف الغازية إلى ثلاثة أنواع رئيسة هي:

- غرفة التأين
- العدادات التناسبية
- عدادات غايغر – ميولر.

1 غرفة التأين The ionization chamber

هي عبارة عن كاشف غازي (gas detector) للإشعاعات المؤينة. ويقوم عملها على تجميع الأزواج الإلكترونية – الأيونية الناتجة عن هذه الإشعاعات في شكل تيار كهربي وقياس هذا التيار أو جهد النبضات الناتجة عنه. وتتكون غرفة التأين عموما من قطبين فلزيين موصلين بطرفي منبع جهد عال. وقد يتخذ القطبان أشكالا مختلفة، ولكن في معظم الأحيان يكون القطبان على شكل ألواح مستوية. ويوضع القطبان داخل إناء مفرغ من الهواء الجوي ويملأ بالغاز المطلوب حتى ضغط معين. ويتوقف ضغط الغاز والأبعاد الهندسية للقطبين عموما على نوع الجسيمات المطلوب الكشف عنها وعلى طاقاتها. ويستخدم في بعض غرف التأين الهواء الجوي العادي. ويبين شكل (٦) رسما تخطيطيا

لغرفة تأين ذات قطبين مستويين، موصلة بمنبع الجهد العالي اللازم لتغذية أقطابها. ويعرف القطب المتصل بجهاز قياس التيار بالمجمع أو المصعد أو الأنود (The anode). ويختلف الجهد الواقع على هذا القطب باختلاف التيار المار فيه. أما القطب الآخر فيقع عادة تحت تأثير جهد عال (جهد المنبع) ويعرف بقطب الجهد العالي. يثبت القطبان باستخدام مواد عازلة كهربيا في الإناء الخارجي للغرفة. ويستخدم في العديد من غرف التأين حلقتان تعرفان بالحلقتين الحارستين (guard rings). ويمكن تحقيق الحلقتين الحارستين بفصل الجزأين الطرفيين من القطب المجمع عن القطب نفسه، بحيث لا تكون المسافة الفاصلة كبيرة. ويجب أن يكون جهد الحلقة الحارسة القريبة من المجمع قريبا من جهد القطب المجمع. والغرض من هاتين الحلقتين الحارستين هو تشكيل المجال الكهربي بالقرب من أطراف القطب المجمع، بحيث تكون خطوط قوى المجال الكهربي بين قطب الجهد العالي والقطب المجمع عند الطرفين خطوطا مستقيمة وموازية للخطوط التي في الوسط. ويؤدي ذلك إلى تحديد حجم الغرفة التي تجمع منها الشحنات الكهربية تحديدا دقيقا



شكل (٦): رسم تخطيطي لغرفة تأين ذي قطبين مستويين

1- قطب الجهد العالي
2- المجمع (الأنود)
3- حلقة حراسة
4- عازل

ويعرف هذا الحجم (والمبين في الشكل ٦ بين الخطين المتقطعين) بالحجم الفعال أو الحجم الحساس للغرفة.

وعند مرور الإشعاعات بين قطبي الغرفة تؤدي هذه الإشعاعات إلى تأيين الغاز ويتم تجميع الشحنات الكهربائية الناتجة عن التأيين داخل الحجم الفعال على المجمع (حيث أن الأيونات والإلكترونات المتكونة خارج هذا الحجم تتجمع على الحلقات الحارسة وتمر مباشرة إلى الأرض). وعند إهمال الانتشار وإعادة الالتحام يكون التيار الناتج عن تجميع الشحنات من الحجم الفعال على المجمع هو:

$$I_S = e \int N_0(\tau)\, dt \qquad ١٨$$

حيث $N_0(\tau)$ هو عدد الأزواج الناتجة في وحدة الحجم في الثانية الواحدة. ويؤخذ التكامل بالنسبة للحجم الفعال كله. وهذه العلاقة صحيحة إذا كان $N_0(\tau)$ ثابتا بالنسبة للزمن (أي أن عدد الجسيمات التي تدخل الغرفة ثابتا بالنسبة للزمن). وتعني هذه العلاقة أن الشحنات التي تتكون نتيجة التأين في الحجم الفعال يتم تجميعها بالكامل على المجمع ويعرف التيار في هذه الحالة باسم تيار التشبع I_S (saturation current).

ويمكن إهمال كل من تيار الانتشار وإعادة الالتحام عندما تكون شدة المجال بين الأقطاب (أي فرق الجهد بينها) كبيرة . عندئذ تصبح المعادلة ١٨ صحيحة. أما إذا كان فرق الجهد صغيرا أو كان الغاز المستخدم من الغازات الهالوجينية أو الأكسجين أو بخار الماء فإن إعادة الالتحام تلعب دورا مهما وخصوصا بالنسبة للغازات الهالوجينية. لذلك، فإنه يجب أن يوضع التيار المفقود نتيجة لإعادة الالتحام أو نتيجة للالتصاق في الاعتبار. وبالنسبة لغرف التأين ذات الأقطاب المستوية فإنه يمكن حساب التيار المفقود $(\Delta I_s)_r$ بسبب إعادة الالتحام من العلاقة التالية:

$$(\Delta I_s)_r = - I_S (\alpha N_0 (\tau) d^2) / \sigma v_+ v_- \qquad ١٩$$

حيث I_S هو تيار التشبع، d هي المسافة بين القطبين و v_+ ، v_- هما سرعتا الانسياق لكل من الأيونات والإلكترونات بالترتيب.

أما بالنسبة للانتشار فيمكن أن يؤدي إلى فقد نسبة أخرى من التيار وذلك لأن الانتشار يمكن أن يحدث في أي اتجاه. ويمكن تحديد قيمة الجزء المفقود $(\Delta I_S)_{dif}$ بسبب الانتشار من العلاقة:

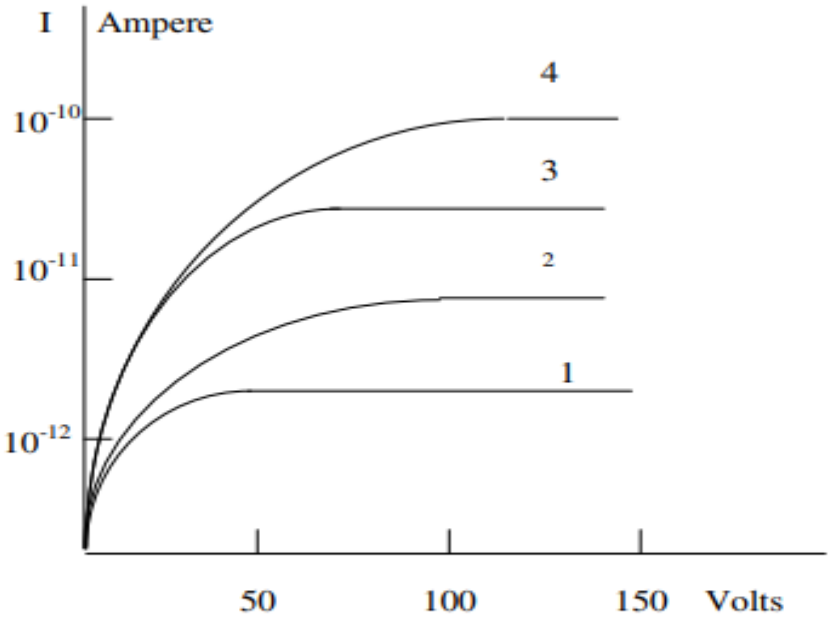
$$(\Delta I_S)_{dif} = - I_s (\varepsilon K T / e V) \qquad ٢٠$$

حيث: K ثابت بلتسمان، T درجة الحرارة المطلقة، V فرق الجهد بين القطبين، $\varepsilon\varepsilon$ عبارة عن النسب بين الطاقة المتوسطة للأيونات في حالة وجود المجال وبدونه. ويوضح شكل (٧) العلاقة بيت التيار المتجمع I وفرق الجهد V بين القطبين. وتعرف هذه العلاقة باسم المميزة الفولت – أمبيرية لغرفة التأين. ويعتمد شكل هذه المميزة على الأبعاد الهندسية للغرفة وعلى نوع الغاز المستخدم وضغطه ونوع الإشعاعات المارة في الغرفة وشدتها (أي كثافتها). ويتضح تأثير هذه العوامل من شكل (٧) الخاص بغرفة تأين أسطوانية الشكل والذي يوضح المميزة الفولت امبيرية لنوعين من الغاز عند شدتين مختلفتين لإشعاعات جاما. وفي حالة البروتونات والجسيمات المشحونة الثقيلة تلعب إعادة الالتحام دورا أكثر لأن التأين النوعي لهذه الجسيمات كبير للغاية، وبالتالي لا يحدث التشبع إلا عند جهود أعلى.

خصائص غرفة التأين

تستخدم جميع غرف التأين عند قيم الجهود التي تحقق تيار التشبع وهو ما يعرف بالعتبة(plateau). ونظرا لبساطتها وسهولة تشغيلها فإنه يمكن تصميم غرف بأشكال وأحجام مختلفة واستخدامها لقياس جميع أنواع الإشعاعات، بما في ذلك إشعاعات جاما والنيوترونات. وعموما يمكن استخدام غرف التأين لقياس القيمة المتوسطة للتيار الناتج عن عدد من الجسيمات أو لقياس نبضة التيار (أو الجهد) الناتج عن مرور جسيم واحد. ويعرف هذا النظام الأخير لتشغيل غرفة التأين بالنظام النبضي،

وهو غالبا ما يستخدم في قياس الشدة الإشعاعية الضعيفة أو عند قيـــاس طاقة الجسيمات أو الإشعاعات. وعموما، يمكن استخدام غازات مختلفة



شكل (٧): المميزة الفولت أمبيرية لغرفة التأين
1- هليوم وكثافة إشعاعات صغيرة 2- هواء وكثافة صغيرة
3- هليوم وكثافة إشعاعات كبيرة 4- هواء وكثافة كبيرة

داخل الغرفة. لكن بالنسبة للغرف النبضية يفضـــل اســـتخدام الغـــازات الخاملة تحت ضغوط معينة، وذلك لضمان تجميع الإلكترونات وتكـــوين النبضة بسرعة وفي أقصر زمن ممكن، وذلك حتى تتم عملية التســـجيل خلال زمن قصير وتصبح الغرفة جاهزة لاستقبال جسيم آخر وتسجيله.

وعند تصميم غرفة التأين للأغراض المختلفة يجب توجيه عناية خاصة إلى نوعية العازلات المستخدمة لعزل الأقطاب عن بعضها وعن جسم الغرفة وخاصة العازل المستخدم لتثبيت وعزل المجمع. فيجب أن

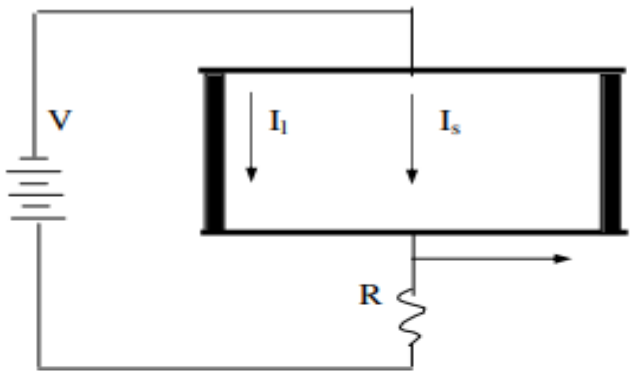
تكون مادة العازل ذات مقاومة عالية جدا. ويرجع السبب في ذلك إلى أن التيار الناتج عن مرور الجسيم يكون صغيرا للغاية. فإذا كانت مقاومة العازل بين القطبين غير كافية فإنه يمكن أن يتسرب بين القطبين تيار يعرف باسم تيار التسرب (leakage current) قيمته هي:

$$I_l = V / R_c$$

حيث: V جهد المنبع، R_C مقاومة العازل (شكل ٨). فإذا كانت مقاومة العازل في حدود 10^{13} أوم وفرق الجهد بين القطبين 100 فولت يمر تيار تسرب I_l في العازل مقداره:

$$I_l = 100 / 10^{13} = 10 \quad \text{pico-Ampere}$$

وهذا تيار كبير جدا بالنسبة للتيار الناتج عن الجسيم النووي I_s . لذلك، يجب أن يكون العازل المستخدم ذا مقاومة عالية، بحيث لا تقل عن $10^{16} - 10^{17}$ أوم.



شكل (٨)
تيار التسرب I_l في غرفة التأين

ويمكن أن يزداد تيار التسرب حتى مع استخدام عازل ذي مقاومة عالية وذلك خلال سطح العازل بسبب امتصاص السطح لبخار الماء أو لأي شوائب أخرى. لذا ،يجب المحافظة على سطح العازل نظيفا وجافا وخاليا تماما من أية خدوش مهما كانت صغيرة.

استخدام غرف التأين للكشف عن الإشعاعات المختلفة

يمكن تصميم غرف تأين للكشف عن الأنواع المختلفة من الإشعاعات المؤينة. ويتوقف حجم الغرفة ومواصفاتها وضغط الغاز

بداخلها على نوع الإشعاعات المطلوب الكشف عنها وعلى طاقة هذه الإشعاعات. لذا، فإنه يمكن تقسيم غرف التأين من حيث نوع الإشعاعات إلى الآتي:

أ- غرف التأين لجسيمات ألفا والجسيمات المشحونة الثقيلة

حيث أن القدرة الاختراقية لجسيمات ألفا والجسيمات المشحونة الثقيلة الأخرى صغيرة، فإن هذه الجسيمات تمتص بالكامل في جدار الغرفة ولا تمر إلى داخلها. لذلك، فإنه يجب عمل نافذة رقيقة في جدار الغرفة تسمح بدخول هذه الجسيمات من خلالها. وتصنع النافذة عموما من مادة خفيفة كالبريليوم أو المواد العضوية الخفيفة، وتكون في شكل غشاء رقيق جدا (أقل من 1 ميللي غرام/سم^2) حتى لا يمتص الغشاء جزءا كبيرا من طاقة الجسيمات، على أن يتحمل هذا الغشاء فرق الضغط الواقع عليه والناتج عن اختلاف ضغط الغاز داخل الغرفة والضغط الجوي خارجها.

ويستخدم هذا النوع من الغرف للكشف عن جسيمات ألفا، خاصة الناتجة عن تلوث أسطح الأجهزة والمعدات بالمواد المصدرة لجسيمات ألفا. وتتميز هذه الغرف بحساسيتها حيث يمكنها الكشف عن التلوث الضعيف الذي لا يزيد نشاطه الإشعاعي على جسيم واحد في الدقيقة.

مثال:

غرفة تأين غازية تدريجها الأصغر يتراوح بين صفر، 500 جسيم/الدقيقة. فإذا علمت أن نافذتها تمتص 20 % من طاقات جسيمات ألفا وإذا كانت طاقة هذه الجسيمات 5 ميغا إلكترون فولت، أحسب مقدار التيار الناتج عنها عندما يكون المؤشر في منتصف التدريج.

الحل:

عندا يكون المؤشر في منتصف التدريج يكون عدد جسيمات ألفا هو 500 ÷ 2 = 250 جسيما في الدقيقة.

مقدار الطاقة المفقودة في النافذة من كل جسيم هو:

$$\Delta E = 5 \times 20 / 100 = 1 \quad MeV$$

.: مقدار الطاقة المفقودة في تأيين الغاز لكل جسيم هو:

$$E_I = 5 - 1 = 4 \quad MeV$$

.: مقدار شدة التيار I الناتج هو عبارة عن الشحنة المتولدة مقسومة على زمن تولدها (1 دقيقة = 60 ثانية، أي أن:

$$I = dQ/dt$$

$$= 250 \times 4x10^{6} \times 1.6x10^{-19} / 35 \times 60$$

$$= 7.6 \times 10^{-14} \quad Ampere \quad = 7.6 \times 10^{-2} \quad picoAmpere$$

ب- غرف التأين لجسيمات بيتا

من المعروف أن قدرة جسيمات بيتا على الاختراق كبيرة حيث يصل مداها في الهواء الجوي إلى عدة أمتار، (حوالي 5 متر) عندما يغطي طيفها مدي طاقة يبدأ من الصفر وحتى حوالي 1 ميغا إلكترون فولت. لذلك، فإن ضغط الغاز داخل الغرفة يجب أن يكون كبيرا حتى تتوقف هذه الجسيمات بالكامل داخل الغرفة. وللسبب نفسه فإنه تستخدم نوافذ ذات سمك أكبر لتتحمل فرق الضغط داخل الغرفة وخارجها.

ج- غرف التأين لإشعاعات جاما

نظرا للقدرة الاختراقية الفائقة لإشعاعات جاما فإنه لا يلزم وجود نافذة لغرف التأين الخاصة بالكشف عن هذه الإشعاعات. ونظرا لصغر احتمال حدوث كل من التأثير الكهروضوئي وتأثير كومبتون أو إنتاج الأزواج داخل الغاز فإن السطح الداخلي للغرفة يبطن بطبقة رقيقة من الرصاص (لكبر عدده الذري)، وذلك ليزيد من احتمال حدوث أي من هذه العمليات الثلاثة في الرصاص وانطلاق الإلكترون إلى داخل الغاز للقيام بالتأيين. إلا أن سمك هذه الطبقة يجب أن يكون صغيرا وإلا امتصت الإلكترونات المنبعثة من العمليات الثلاثة فيه. وجدير بالذكر أن جزءا قليلا من إشعاعات جاما هو الذي يؤدي إلى انطلاق هذه

الإلكترونات. أما الجزء الآخر فيمر من الغرفة دون أن يترك أي أثر ولا يسجل فيها. لذلك، تتميز جميع أنواع كواشف إشعاعات جاما بمعامل مهم يعرف باسم الكفاءة الذاتية للكاشف.

الكفاءة الذاتية للكاشف The detector intrinsic efficiency

هي عبارة عن نسبة عدد الإشعاعات المسجلة في الكاشف إلى العدد الكلي للإشعاعات الساقطة عليه. وتتناسب كفاءة غرفة التأين الخاصة بالكشف عن إشعاعات جاما تناسبا عكسيا مع طاقة هذه الإشعاعات. كذلك، تتوقف كفاءة الكاشف على حجم الغرفة وعلى نوع الغاز المستخدم فيها وضغطه، وعلى نوع المادة المبطنة للغرفة.

وتتراوح الكفاءة الذاتية لغرف التأين لإشعاعات جاما بين عدة أجزاء من مائة ألف إلى عدة أجزاء من المائة.

د- غرف التأين للنيوترونات

عند مرور النيوترونات في المادة فإنه لا ينتج عنها أي تأين. لذا فإنه من الضروري إيجاد وسيلة لتوليد الجسيمات المشحونة بفعل النيوترونات، حيث تؤدي هذه الجسيمات المشحونة إلى عملية التأين. ولهذا الغرض يوضع داخل الكاشف النيوتروني مادة من المواد التي يمكن أن ينطلق منها بروتونات أو جسيمات ألفا نتيجة حدوث تفاعلات نووية مختلفة بينه وبين النيوترونات الساقطة. لذلك، يستخدم في العديد من غرف التأين الخاصة بالكشف عن النيوترونات غاز ثالث فلوريد البور BF_3 . فعند سقوط النيوترونات على هذا الغاز يتفاعل بعضها مع البور وينتج عن ذلك انطلاق جسيمات ألفا طبقا للتفاعل التالي:

$$^{1}_{0}n + {}^{10}_{5}B \longrightarrow {}^{7}_{3}Li + {}^{4}_{2}\alpha$$

ويقوم جسيم ألفا بتأيين ذرات أو جزيئات الغاز. وجدير بالذكر أن كفاءة الكاشف النيوتروني تكون صغيرة وتتوقف على عوامل كثيرة منها طاقة النيوترونات وكثافة الغاز وحجم الغرفة. ولا تستخدم نوافذ في

الكواشف النيوترونية بسبب قدرة النيوترونات الفائقة على اختراق جدار الغرفة.

غرف التأين النبضية pulse-type ionization chamber

تستخدم غرف التأين النبضية لدراسة كل جسيم على حدة، أي عند تعاقب الجسيمات والإشعاعات الساقطة الواحد تلو الآخر بفارق زمني يسمح بالانتهاء من تسجيل الجسيم السابق. لذلك، يجب أن يكون زمن استمرار النبضة الكهربية (pulse-duration) الناتجة عن الجسيم صغيرا جدا، وذلك للتمييز بين الجسيمات المتتابعة. ويعتمد زمن استمرار النبضة على ثابت الزمن RC للغرفة ولجهاز القياس، وعلى المسافة بين القطبين. ومن الواضح أن زمن استمرار النبضة وجهدها يعتمدان اعتمادا كبيرا على مكان حدوث التأين بالنسبة للمجمع، أي على وضع واتجاه أثر الجسيم في الغرفة. فإذا كان الأثر قريبا من المجمع فهذا يعني وصول الإلكترونات بسرعة إلى هذا القطب وبالتالي عدم فقد أي منها أثناء الانتقال، مما يؤدي إلى ظهور نبضة جهد عالية على المخرج. أما إذا مر جسيم آخر بالطاقة نفسها بعيدا عن المجمع فإن الإلكترونات الناتجة عن طول أثره تستغرق وقتا طويلا للوصول إلى المجمع ويضيع جزءا منها بسبب التصادمات مع جزيئات الغاز، مما يؤدي إلى إضعاف التيار الكهربائي وبالتالي نبضة الجهد الخارجة. وبالإضافة إلى ذلك، فإن جهد النبضة وزمن استمرارها يتوقفان على زمن وصول كل من الإلكترونات إلى المجمع والأيونات إلى قطب الجهد العالي. ولما كانت حركة الإلكترونات سريعة (حيث تبلغ سرعتها في الغرفة حوالي 10^{-6} م/الثانية)، وحركة الأيونات بطيئة (حيث تبلغ سرعتها حوالي 10^{3} م/الثانية) فإن الجهد الناتج من المركبة الإلكترونية يصل إلى أقصى قيمة له خلال زمن قصير (في حدود 10^{-6} ثانية). أما الجهد الناتج عن المركبة الأيونية فيصل إلى أقصى قيمة له خلال زمن كبير (حوالي 10^{-3} ثانية). وبالنسبة للغرفة ذات الأقطاب المستوية يمكن

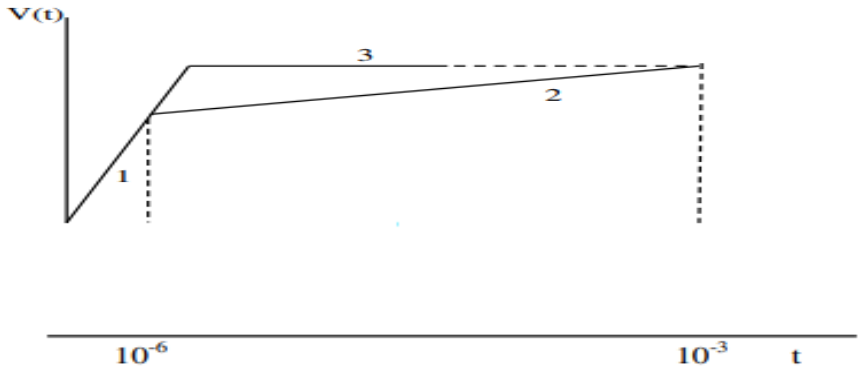
إثبات أن جهد المركبة الإلكترونية أو الأيونية كدالة من الزمن t يمكن تحديده من العلاقة:

$$V(t) = n e v t / C d$$

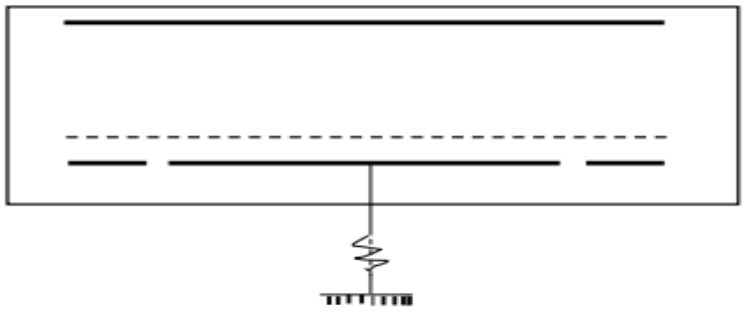
حيث n عدد الإلكترونات أو الأيونات المتكونة، v السرعة الانسياقية للإلكترونات أو الأيونات C السعة الداخلية للغرفة، d المسافة بين القطبين. ويبين شكل (٩) كيفية تغير جهد كل من المركبة الأيونية والمركبة الإلكترونية لغرفة التأين كدالة من الزمن.

وتعكس هذه العلاقة اختلاف جهد النبضة باختلاف السرعات الانسياقية للإلكترونات والأيونات. لذلك، تعتبر غرفة التأين من هذا النوع بطيئة. ويمكن عمل أنواع أخرى سريعة، وذلك باستخدام شبكة فلزية تثبت بين المجمع وقطب الجهد العالي، وتكون أقرب إلى المجمع (شكل ١٠). ويكون جهد هذه الشبكة واقعا بين الصفر (جهد المجمع) والجهد العالي V ويؤدي إدخال هذه الشبكة إلى خفض السعة C بين مسار الجسيم والقطب المجمع. وبالتالي، تصبح العلاقة بين جهد المركبة الإلكترونية وبين الزمن كالمبين بالمنحنى (3) شكل (٩)

وهكذا يجب أن تحتوي غرف التأين النبضية على شبكة، ويجب أن تملأ الغرف بغاز من النوع الذي لا تتكون فيه أيونات سالبة. لذلك، يفضل استخدام الغازات الخاملة في هذا النوع من الغرف. كذلك، يجب



شكل ٩
تغير جهد كل من المركبة الإلكترونية (1) والأيونية (2) كدالة من الزمن t
وتغير جهد المركبة الإلكترونية (3) كدالة من الزمن بعد وضع الشبكة الفلزية



شكل ١٠
الشبكة الفلزية في غرفة التأين

أن يكون فرق الجهد بين القطبين كبيرا (عند نهاية العتبة)
وذلك كي تكون السرعة الانسياقية للإلكترونات ثابتة ولا تعتمد على فرق الجهد بين القطبين. ويستخدم غاز الأرجون في معظم هذه الغرف. ويضاف إليه عادة نسبة صغيرة من غاز ثاني أكسيد الكربون (حوالي5%)، وذلك لضمان بقاء السرعة الانسياقية ثابتة وعدم زيادتها بزيادة فرق الجهد بين القطبين.

وتجدر الإشارة إلى أن غرف التأين النبضية لا تستخدم عموما للكشف عن جسيمات بيتا وذلك بسبب صغر التأين النوعي S لهذه

الجسيمات، مما يؤدي إلى إنتاج عدد قليل من الإلكترونات نتيجة جسيم بيتا واحد، وبالتالي يكون التيار الناتج ضعيفا ويصعب تكبيره وتسجيله.

القدرة التحليلية للطاقة Energy resolving power

من أهم خصائص غرف التأين النبضية الخاصية المعروفة باسم القدرة التحليلية للطاقة (energy resolving power). فعند سقوط عدد جسيمات ألفا ذات طاقة واحدة على نافذة الغرفة فإن هذه الجسيمات تعبر النافذة إلى داخل الغرفة باختلاف طفيف في طاقاتها، وذلك بسبب حدوث تبعثر في طاقة الجسيمات المختلفة. وفضلا عن ذلك فإنه حتى في حالة دخول هذه الإشعاعات (مثل إشعاعات جاما) إلى الغرفة بالطاقة نفسها فإن كل فوتون يطلق إلكترونا أو زوجا إلكترونيا بوزترونيا يكون بدوره عددا مختلفا من الأزواج الإلكترونية الأيونية، وذلك لأن عملية التأين عملية إحصائية بحتة. كذلك، فإنه عند انتقال الإلكترونات إلى المجمع يمكن أن يضيع بعضها بسبب التصادمات مع ذرات الغاز ومع الأيونات الموجبة، وبالتالي فإن الجسيمات ذات الطاقة الواحدة يمكن أن تنتج نبضات كهربية يختلف تيارها (وبالتالي جهدها) اختلافا طفيفا. ويقال أنه حدث توزع للطاقة. لذلك، فإنه عند تسجيل عدد كبير من الجسيمات ذات طاقة واحدة E_0 يحدث توزع فى طاقاتها ويظهر طيفها (spectrum) على صورة قمة كالمبينة في شكل ١١ . وتعرف القيمة ΔE باسم العرض الكامل عند منتصف الارتفاع full width at half-maximum (FWHM). وبمعرفة قيمة التوزع في الطاقة ΔE وطاقة الجسيمات الساقطة E_0 تحدد القدرة التحليلية r للكاشف، كنسبة مئوية، كالآتي:

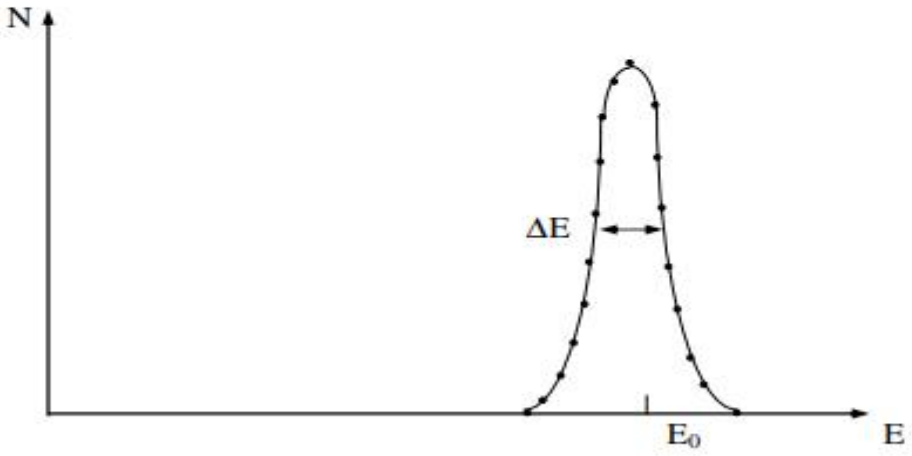
$$r = \Delta E / E_0 \times 100\% \qquad ٢١$$

وتعتمد قيمة التبعثر ΔE عموما، على طاقة الجسيمات الساقطة حيث تزداد بزيادتها كما تعتمد ΔE على عوامل أخرى كثيرة مثل سمك النافذة وضغط الغاز وحجم الغرفة وغيره. لذلك، تتفاوت القدرات التحليلية للغرف المختلفة. وتتراوح القدرة التحليلية للطاقة لغرف التأين بين حوالي 0.3 % ، 7 % وذلك تبعا للحجم وشكل النافذة وفرق الجهد والسعة الداخلية وغيره . ومعرفة القدرة التحليلية للكاشف أمر مهم جدا. فعند وجود جسيمات ذات طاقات مختلفة فإنه يمكن فصل هذه الطاقات

عن بعضها باستخدام الكاشف المعين إذا كان الفرق في الطاقة أكبر من ΔE. أما إذا كان الفرق في الطاقة أقل من ΔE فإنه لا يمكن فصل هذه الطاقات عن بعضها وتتداخل قممها.

٢ - العدادات التناسبية The proportional counters

عند زيادة فرق الجهد بين قطبي غرفة التأين إلى قيم عالية يبدأ التيار في الزيادة السريعة فوق قيم التشبع I_S . ويعود السبب في ذلك إلى



شكل ١١
توزع طاقة جسيمات ذات طاقة واحدة

أن الإلكترونات الناتجة عن التأين والواقعة تحت تأثير فرق الجهد تكتسب طاقة حركية تتناسب مع مقدار فرق الجهد الذي تجتازه. وعند زيادة فرق الجهد تزيد الطاقة التي تكتسبها هذه الإلكترونات فتصبح (الإلكترونات) قادرة على تأيين ذرات جديدة للغاز، وبالتالي تكوين مجموعة ثانوية من الأزواج الإلكترونية – الأيونية، تنضم إلى المجموعة الأولية التي نتجت بفعل الجسيم النووي. وتستمر إلكترونات كلتا المجموعتين في الحركة بتأثير الجهد وبالتالي تكتسب طاقة جديدة فتؤدي

إلى مرحلة جديدة من التأين الثانوي. وهكذا، فإن الإلكترونات الناتجة من التأين الأولي بفعل الجسيم النووي يتبعها عدة مراحل تأين ثانوي تؤدي إلى مضاعفة عدد لإلكترونات. وهذه المراحل المتتابعة من التأين الثانوي الناتج عن الجهد الكبير تختلف اختلافا تاما عن مفهوم التأين الثانوي الناتج عن جسيمات بيتا ذات الطاقة العالية والذي يحدث دون النظر لشدة المجال. وينتج عن تتابع التأين تكاثر هائل لعدد الإلكترونات. وبالإضافة إلى ذلك فعند تصادم الإلكترونات المعجلة بجزيئات الغاز أو عند حدوث إعادة التحام بين الأعداد الهائلة من الإلكترونات والأيونات تنطلق فوتونات (أشعة سينية) نتيجة لإثارة هذه الجزيئات عند التصادم. ويمكن أن تؤدي هذه الفوتونات إلى تحرير عدد آخر من الإلكترونات من سطح قطب الجهد العالي أو من جزيئات الغاز التي يكون جهد تأينها صغيرا (في حالة وجود خليط من الغازات). وبذلك، يمكن أن تشترك الفوتونات في عملية التأين الثانوي. وبالتالي تنتشر عملية التأين في الحجم الكلي للغاز، ويحدث ما يشبه التفريغ الكهربائي للغاز (gas discharge).

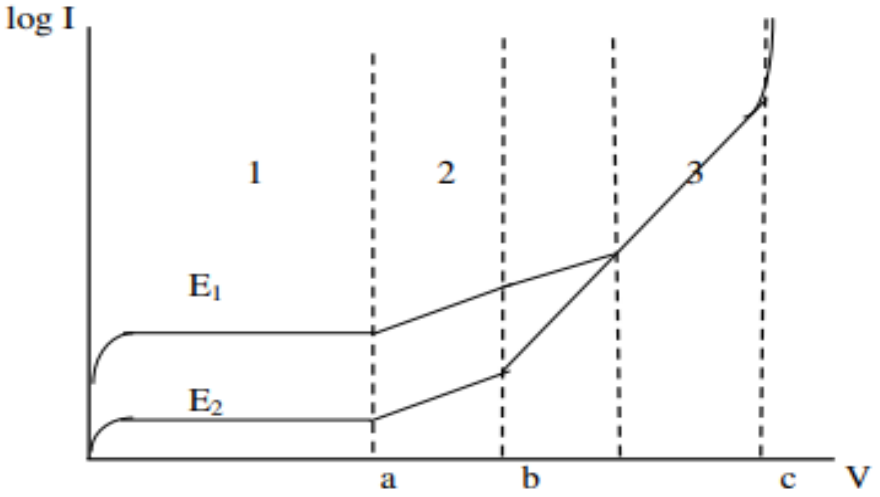
فإذا كان احتمال تكوين إلكترون كهروضوئي بواسطة الإلكترون الواحد هو γ وكان عدد الإلكترونات الثانوية الناتجة عن تصادم إلكترون واحد بالذرات n ، يكون $n\gamma$ عبارة عن عدد الإلكترونات الكهروضوئية الناتجة عن n إلكترون ثانوي. ثم يتضاعف هذا العدد بفعل التصادمات مكونا $n^2\gamma$ إلكترونا ثانويا. وهذا العدد الأخير يؤدي بدوره إلى تكوين $n^2\gamma^2$ إلكترون كهروضوئي. وبجع جميع عناصر هذه المتوالية الهندسية وقسمته على عدد الإلكترونات الابتدائية يمكن إيجاد معامل التضاعف M للعداد التناسبي وهو:

$$M = n/(1 - n\gamma) \qquad ٢٢$$

ويبين معامل التضاعف M عدد مرات تضاعف الإلكترونات الابتدائية (أي الناتجة عن الجسيم النووي ذاته). فإذا كان مقدار $1 >> n\gamma$ يصبح معامل تضاعف العداد مساويا $M = n$. ويكون هذا التضاعف ناتجا عن التأين الثانوي فقط، ولا تلعب الفوتونات دورا ملحوظا في التأين، وبالتالي يمكن إهمالها واعتبار مقدار γ مساويا للصفر. ويسمى العداد في هذه الحالة بالعداد التناسبي (proportional counter) نظرا لأن

العدد الكلي للإلكترونات الثانوية يتناسب مع عدد الإلكترونات الابتدائية الناتجة عن الجسيم النووي.

وهكذا، فإنه عند زيادة فرق الجهد بين القطبين فيما بعد عتبة التشبع (النقطة a على الشكل ١٢) لغرفة التأين يبدأ العداد في العمل كعداد تناسبي. ويبين شكل (١٢) منطقة الجهود التي يتحقق عندها تشغيل العداد في المنطقة التناسبية وهي المنطقة 2. وفي هذه المنطقة



شكل ١٢
العلاقة بين الجهد والتيار في العدادات
1- منطقة غرفة التأين
2- منطقة العداد التناسبي
3- منطقة عداد غايغر- ميولر

يزداد التيار زيادة كبيرة (من 1 إلى 1000 مرة) حسب مقدار الجهد المطبق V . وعلى الرغم من زيادة التيار فإنه يستمر متناسبا مع عدد الأزواج الإلكترونية الأيونية الناتجة عن الجسيم النووي، وبالتالي متناسبا مع طاقة هذا الجسيم. فعند دخول جسيمين ذوي طاقتين مختلفتين بحيث تكون $E_2 < E_1$ (شكل ١٢) ينتج عنهما تياران مختلفان، وبالتالي جهدان

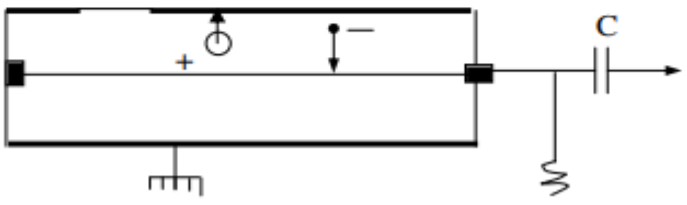
مختلفان، سواء في منطقة غرفة التأين أو في منطقة العداد التناسبي، مما يمكن من فصل هاتين الطاقتين. وفي نهاية منطقة العداد التناسبي يصبح من الصعب تمييز الطاقات المختلفة للجسيمات.

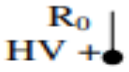
ويمكن من حيث المبدأ أن تكون العدادات التناسبية مستوية الأقطاب ولكنها تجهز على شكل اسطوانة (شكل ١٣) حيث يقوم السلك المحوري الرفيع بدور المجمع (الأنود). لذلك، فهو يوصل بالقطب الموجب لمنبع الجهد العالي. أما جسم الأسطوانة فيوصل بالأرض (أي بالقطب السالب لمنبع الجهد العالي)، وتتجمع عليه الأيونات الموجبة. وفي حالة وجود نافذة يمكن أن تكون هذه النافذة على الجدار الأسطواني للعداد أو في قاعه. أما السعة C فالغرض منها منع وصول الجهد المستمر من منبع الجهد إلى جهاز القياس.

وبالنسبة للعداد الأسطواني يمكن إيجاد شدة المجال الكهربائي E في أية نقطة بداخله تبعد مسافة r من محور الأسطوانة، وذلك باستخدام العلاقة المعروفة التالية:

$$E = V / r \ \ln(b/a) \qquad ٢٣$$

حيث: V هي جهد المجمع (الأنود)، b هو نصف القطر الداخلي للأسطوانة، a هو نصف قطر السلك المحوري. فإذا كان جهد السلك 1000 فولت، b = 1سم، a = 0.01 سم تصل شدة المجال على مسافة 0.01سم من السلك إلى حوالي 6000 فولت/سم. لذلك، نجد أن التأين الثانوي يحدث أساسا بالقرب من سلك الأنود. أما إذا تكونت الإلكترونات الابتدائية بعيدا عن المجمع فإنها تتحرك أولا بفعل المجال في اتجاه المجمع ثم تبدأ مراحل التأين الثانوي عند اقترابها منه (في حدود 0.1سم من مركزه).





شكل (١٣): العداد التناسبي

شكل نبضات العداد التناسبي

Pulse shape of the proportional counter

تستخدم العدادات التناسبية، عموما، في النظام النبضي وليس في نظام التيار المستمر. وتنتج النبضة في العداد التناسبي عن المركبة الأيونية أساسا وليس عن المركبة الإلكترونية للتيار. ويرجع السبب في ذلك إلى تكون سحابة أيونية (ناتجة عن التأين) بالقرب من المجمع (الأنود). فعند وصول الإلكترونات السريعة إلى الأنود تكون الأيونات الموجبة ما زالت بالقرب منه فتعادل بذلك أثر الإلكترونات على جهد الأنود. ويمكن تحديد قيمة الجهد الناتج عن المركبة الإلكترونية للتيار وذلك باستخدام العلاقة النظرية التالية:

$$V' / V_{\infty} = 1' / a \ln (b/a) \qquad ٢٤$$

حيث V' جهد النبضة الناتج عن المركبة الإلكترونية بعد مرور وقت كاف من بدئها، V_{∞} هو الجهد الكلي للنبضة، 1 هو متوسط المسار الحر للإلكترونات. فعند استخدام عداد تناسبي بالأبعاد السابقة نفسها وعندما يكون الضغط داخل العداد مساويا 0.5 ضغط جوي تكون 1 في حدود 2.5×10^{-3}سم. عندئذ تصبح:

$$V' / V_{\infty} = 0.05$$

أي أن الجهد الناتج عن المركبة الإلكترونية يشكل حوالي 5 % من الجهد الكلي للنبضة.

وحيث أن التأين الثانوي يحدث أساسا بالقرب من الأنود فإنه عندما يكون معامل التضاعف M كبيرا لا يعتمد جهد النبض على مكان مرور الجسيم النووي في العداد. ويمكن إيجاد كيفية تغير النبضة كدالة من الزمن طبقا للعلاقة النظرية التالية:

$$V^{+}(t) = [M N_0 e / 2C_0 \ln(b/a)] \ln(1+ 2 \mu^{+} V / p a^2 \ln(b/a)) \quad ٢٥$$

حيث N_0 عدد الأزواج الابتدائية الناتجة عن الجسيم النووي نفسه، M معامل التضاعف للعداد، e شحنة الإلكترون، C_0 سعته الداخلية، μ^{+} حركية الأيونات ، p الضغط داخل العداد. لذلك، يزداد جهد النبضة أولا بطريقة خطية مع الزمن، ثم يقل معدل الزيادة مع الزمن بحيث تصبح العلاقة لوغاريتمية، إلى أن يصل الجهد إلى أقصى مقدار له وهو:

$$V^{+}_{max} = M N_0 e / C_0$$

عند زمن t مقداره:

$$t = (b^2 - a^2) P \ln (b/a) / 2 \mu^{+} V \quad ٢٦$$

ويبين الشكل (١٤) كيفية تغير نبضة جهد الخرج كدالة من الزمن لعداد تناسبي بالابعاد المذكورة سلفا. عند ضغط مقداره 0.05 ضغط جوي وجهد أنودي V = 1500 فولت. ويلاحظ أن معدل نمو جهد النبضة يكون سريعا في البداية، ثم يقل هذا المعدل وتزداد النبضة ببطئ إلى أن يصل جهدها إلى أقصى قيمة له. ويمكن أن تستمر النبضة عند هذه القيمة لفترة طويلة (ربما تصل إلى حوالي 1 ميللي ثانية) وخلال هذا الزمن يكون العداد غير مستعد لاستقبال أي جسيم آخر أو تسجيله.

ويمكن خفض زمن استمرار النبضة بشكل ملحوظ وذلك بتشكيل النبضة باستخدام دارات التشكيل المختلفة. وتستخدم عادة لهذا الغرض الدارة التفاضلية (differentiation circuit) التي تتكون من مقاومة ومكثف عند مخرج العداد أو في مدخل المكبر. وتبين المنحنيات المتقطعة على الشكل(١٤) كيفية تشكيل النبضة باستخدام دارات تفاضلية بثابت زمني (RC) مختلف. ويلاحظ أنه كلما انخفض ثابت الزمن للدارة التفاضلية قل زمن استمرار النبضة وانخفض جهدها في الوقت نفسه.

وتجدر الإشارة إن جهد النبضات الناتجة عن الجسيمات نفسها والطاقات نفسها في العداد التناسبي تتراوح ضمن حدود معينة ΔV. ويؤدي هذا بدوره إلى تفاوت في تحديد طاقات الجسيمات مقداره ΔE .

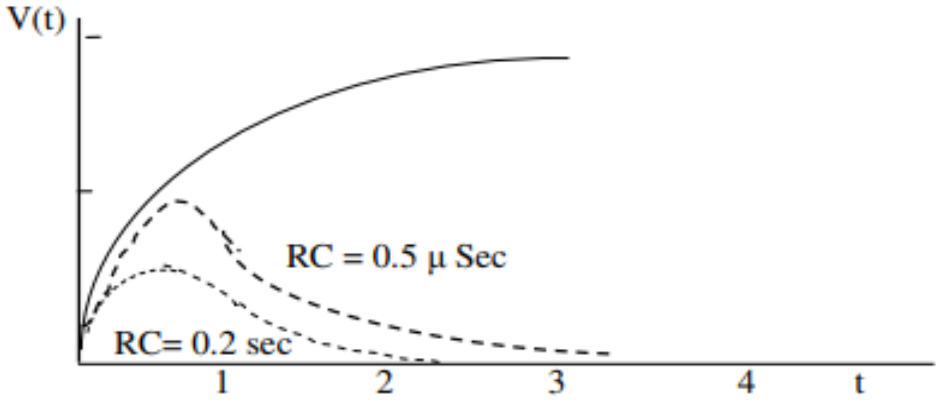
ويرجع السبب في ذلك لما سبق ذكره بالنسبة لغرفة التأين وكذلك لعـــدة أسباب أخرى أهمها ما يلي:

أ- حدوث اختلاف في عدد الإلكترونات الثانوية لخضوعها لقوانين الاحتمالات.

ب- عدم تجانس سلك المجمع حيث يمكن أن يختلف نصـــف قطره اختلافا طفيفا من مكان لآخر.

ج- اختلاف المجال في منتصف العداد وعند أطرافـــه (فـــي حالة عدم وجود حلقات حارسة).

لذلك، فإن القدرة التحليلية للطاقات للعداد التناسبي تكون أسوأ من مثيلتها بالنسبة لغرفة التأين. ويبلغ مقدار القدرة التحليلية للطاقة للعدادات التناسبية حوالي 10 – 30 %.



شكل (١٤)

تشكيل النبضة باستخدام دارات تفاضلية بثابت زمني (RC) مختلف

زمن التأخير The delay time

يجب التنويه بحدوث تأخير زمني بين لحظة دخول الجسيم للعداد وخروج نبضة الجهد على المخرج. وهذا التأخير ناتج من زمن مـــرور الإلكترونات الأولية من مكان تكونها داخل العداد إلى أن تقتـــرب مـــن

المجمع. وبالتالي، يعتمد زمن التأخير (delay time)على مكان مرور الجسيم النووي ويمكن حساب أكبر مقدار له من نصف القطر الداخلي للاسطوانة والسرعة الانسياقية للإلكترونات كالتالي:

$$t_d = b / v^-$$

ومن أهم عيوب العدادات التناسبية اعتماد معامل التضاعف M على الجهد مما يؤدي إلى اختلاف جهد النبضة الخارجة عند حدوث تغير طفيف في جهد المنبع. لذلك، فإنه يجب استخدام منبع جهد عال ذي استقرارية عالية (highly stabilized).

٣ - عدادات غايغر – ميولر Geiger – Muller counters

عند زيادة الجهد بين قطبي العداد التناسبي إلى ما بعد منطقة التناسب (فيما بعد النقطة b شكل ١٢) يزداد معامل التضاعف M زيادة هائلة وبالتالي يزداد التيار زيادة طارئة (شكل ١٢). ويرجع السبب في ذلك إلى زيادة احتمال انطلاق الفوتونات فوق البنفسجية عند تصادم الإلكترونات بجزيئات الغاز وتكوين إلكترونات كهروضوئية (أي زيادة قيمة الاحتمال γ). وعند هذه الجهود العالية تصبح هذه الفوتونات هي المسؤول الأساسي عن الإلكترونات الثانوية. وينتشر التأين الثانوي في جميع أنحاء العداد، وبالتالي يصل العداد إلى حالة التفريغ الكهربائي، وينتج عن ذلك تيار كبير للغاية دون النظر لعدد الإلكترونات الأولية. ويعرف العداد عند هذه الجهود باسم عداد غايغر – ميولر (وهما مكتشفاه).

وبالرجوع إلى العلاقة ٢٢ يلاحظ أن هذا الأمر يتحقق عندما تصبح قيمة $\gamma n = 1$. عندئذ يصبح معامل التضاعف M عبارة عن ما لانهاية، أي أن:

$$M = n / (1-1) = \infty$$

وفي هذه الحالة فإن جهد النبضة لم يعد يتوقف على عدد الإلكترونات الأولية الناتجة عن الجسيم النووي. إذ أنه يكفي تكون زوج إلكتروني – أيوني لبدء عملية التفريغ وظهور جهد النبضة. وبالتالي

يلاحظ أن جهد النبضة لم يعد يتوقف على طاقة الجسيم النووي المسبب لها. لذلك، لا يستخدم عداد غايغر– ميولر لتحديد طاقة الجسيمات النووية، وإنما فقط لتسجيل عدد هذه الجسيمات دون النظر لطاقاتها.

وبمجرد بدء التأين والتفريغ الكهربي لا يتوقف مرور التيار داخل العداد ذاتيا وإنما يستمر حتى في حالة عدم وصول جسيمات نووية جديدة. لذلك، فإنه يجب إيقاف عملية التفريغ داخل العداد ليكون جاهزا لاستقبال جسيم جديد وتسجيله. ويوجد نوعان من عدادات غايغر – ميولر يختلفان باختلاف طريقة إيقاف التفريغ وهما عدادات ذات إطفاء خارجي والأخر ذات إطفاء ذاتي.

عدادات غايغر ذات الإطفاء الخارجي

Non – self quenching G.M counters

عندما يملأ العداد بغاز خامل (مثل الأرجون) تؤدي الفوتونات فوق البنفسجية إلى انطلاق الإلكترونات الكهروضوئية من المصعد (الكاثود الذي تمثله الاسطوانة الخارجية) وليس من ذرات الأرجون. وتتحرك جميع الإلكترونات في اتجاه المجمع (شكل ١٣) الذي تتكون حوله سحابة أيونية كثيفة تتحرك بدورها في اتجاه المهبط. وعند تحرك هذه السحابة إلى المهبط يبدأ التيار في المرور ويؤدي إلى ظهور نبضة الجهد على المقاومة R_0 ، وعند وصول هذه السحابة الأيونية إلى المهبط تنتج فوتونات فوق بنفسجية جديدة وإلكترونات ثانوية فيستمر التيار في المرور ولا يتوقف. وهكذا، يستمر مرور التيار طالما بقي الجهد V عاليا ولم يتم تخفيضه بأي وسيلة خارجية. ولتخفيض مقدار الجهد يمكن اختيار قيمة R_0 كبيرة للغاية (في حدود $10^{8} - 10^{9}$ أوم). فعند تحرك السحابة الأيونية بعيدا عن المجمع ينخفض جهده بما يعادل الجهد المستهلك على المقاومة R_0 I . أي أن مقدار جهد المجمع (الأنود) عند تحرك السحابة الأيونية يصبح $V_a = V - IR_0$ ،حيث I تيار السحابة الأيونية. فإذا كانت قيمة R_0 كبيرة ينخفض جهد المجمع، بحيث يصبح أقل من الجهد اللازم لاستمرار التفريغ (أقل من V_b شكل ١٢). لذلك فإنه عند وصول السحابة الأيونية للمهبط يكون الجهد أقل من الحد اللازم لاستمرار التفريغ وبالتالي يطفأ العداد. فإذا كان زمن انتقال الأيونات

داخل العداد 200 ميكروثانية وسعه الداخلية في حدود 10 بيكوفارد يجب أن تكون قيمة R_0 في حدود $10x4^{8}$ أوم. وبعد أن يطفأ العداد يكون جهد المجمع أقل من الجهد اللازم لتشغيله في منطقة غايغر، فيبدأ هذا الجهد في الزيادة من جديد إلى أن يصل إلى القيمة الأصلية V بعد زمن كبير بالمقارنة بثابت الزمن R_0 C_0 (بعد حوالي 10^{-3} ثانية). وخلال هذا الوقت الذي يستعيد فيه العداد جهده على المجمع يكون العداد غير مستعد لاستقبال جسيمات جديدة. ولو دخل جسيم إلى العداد خلال هذا الزمن فإنه يمكن أن يسجل ولكن تكون النبضة الناتجة ضعيفة للغاية بحيث لا يحس بها الجهاز الإلكتروني التالي. وتعرف هذه الفترة الزمنية باسم فترة الاسترجاع (recovery time). ويلاحظ أن أهم عيوب هذا النوع من العدادات هو كبر فترة الاسترجاع (حوالي 10^{-3} ثانية).

عدادات غايغر ذات الإطفاء الذاتي

Self – quenching G.M counters

يتميز هذا النوع من العدادات بعدم وجود مقاومة كبيرة لخفض جهد المجمع (الأنود) وإنما تستخدم مقاومة صغيرة. بذلك، يبقى الجهد ثابتا على الأنود ولا ينخفض إلى ما دون حد جهد غايغر. ولإحداث الإطفاء في هذا النوع من العدادات يملأ العداد بخليط من غاز الأرجون (حوالي 90%) وبخار مركب متعدد الذرات مثل الكحول أو الأسيتون (حوالي 10%). وعند دخول الجسيم النووي يحدث التأين الابتدائي ثم تتبعه مجموعة التأينات الثانوية بالقرب من الأنود وتنطلق الفوتونات فوق البنفسجية التي تؤدي إلى انطلاق الإلكترونات الكهروضوئية بالأسلوب نفسه المتبع في عدادات غايغر السابقة. ولكن يحدث اختلاف في هذه العدادات، يرجع أساسا إلى قابلية بخار الكحول أو الأسيتون العالية لامتصاص الفوتونات فوق البنفسجية. بذلك، تمتص هذه الفوتونات في الغاز ولا تصل إلى المهبط. وبذلك تكون الإلكترونات الكهروضوئية صادر من جزيئات بخار الكحول وليس من ذرات الأرجون أو ذرات مادة المهبط (الكاثود) الفلزية. ونظرا للقابلية العالية لامتصاص الفوتونات في جزيئات الكحول وتأينها فإن هذه الفوتونات لا تبتعد كثيرا عن الأنود وينحصر التفريغ الكهربي بالقرب منه. وهكذا،

تتحرك السحابة الأيونية في اتجاه المهبط مكونة بذلك النبضة الكهربائية التي لا تتأثر بالمركبة الإلكترونية. وتتكون الأيونات الموجبة التي تصل إلى المهبط كليا من أيونات جزيئات الكحول أو الأسيتون وذلك لامتصاص الفوتونات بواسطة هذه الجزيئات، وكذلك لأنه عند تحرك أيون أرجون موجب في اتجاه المهبط فإنه يكتسب إلكترونا عند اصطدامه بجزيء الكحول المتعادل الذي بدوره يتحول إلى أيون موجب (لأن طاقة ارتباط الإلكترون بذرة الأرجون أعلى من طاقة ارتباط الإلكترون بجزيء الكحول). وعند وصول أيونات الكحول الموجبة إلى المهبط فإنها لا تؤدي إلى انبعاث إلكترونات ثانوية من مادة المهبط، وبالتالي يحدث الإطفاء ذاتيا. وهكذا، يمكن تلخيص دور جزيئات الغاز المتعددة الذرات مثل بخار الكحول أو الأسيتون في الآتي:

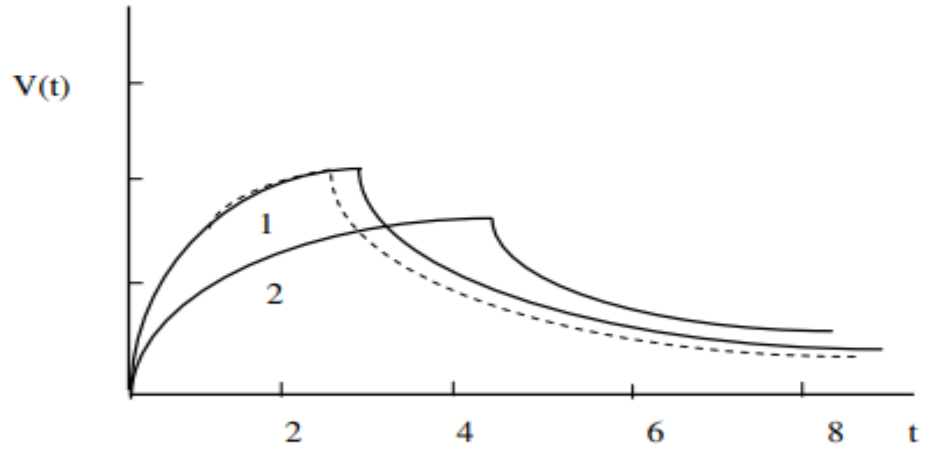
1- منع وصول الفوتونات إلى المهبط، وبالتالي منع انطلاق الإلكترونات الكهروضوئية منه.
2- منع وصول أيونات الأرجون الموجبة إلى المهبط، وبالتالي منع انبعاث الإلكترونات الثانوية منه.

شكل النبضة والزمن الميت وزمن الاسترجاع

تتكون نبضة التيار الناتجة على مخرج عداد غايغر ذي الإطفاء الذاتي من المركبة الأيونية فقط. وتتحرك السحابة الأيونية في اتجاه المهبط مكونة شكلا أسطوانيا رفيعا في أية لحظة. ويستعرض شكل ١٥ الشكل التجريبي للنبضة من العداد ذي الإطفاء الذاتي (الخط المتصل 1)، وكذلك الشكل النظري الناتج عن المركبة الأيونية. ويعتمد زمن امتداد النبضة على الأبعاد الهندسية للعداد. كما يعتمد شكلها على مكان حدوث التأين الابتدائي بالنسبة للمصعد (للأنود). فكلما بعد أثر الجسيم النووي عن المصعد زاد الامتداد الزمني للنبضة وقلت القيمة القصوى للتيار الناتج عنها (الخط المتصل 2).

الزمن الميت

أثناء عملية التضاعف الإلكتروني وانتقال السحابة الأيونية من حول المصعد (الأنود) إلى المهبط (الكاثود) يكون العداد غير حساس لاستقبال جسيم نووي جديد، نظرا لانخفاض شدة المجال الكهربائي بين القطبين في هذا الوقت. وبمجرد وصول السحابة الأيونية للمهبط فإنه يسترجع جهده بسرعة وتعود شدة المجال بين القطبين إلى قيمتها الأصلية. ويعرف الزمن بين لحظة دخول الجسيم النووي ووصول الجهد على المصعد إلى عتبة غايغر (النقطة b شكل ١٢ بالزمن الميت للعداد (The dead time). وخلال هذا الزمن يكون العداد غير حساس لتسجيل أي جسيم آخر.



شكل (١٥)

(1) الشكل التجريبي للنبضة من العداد ذي الإطفاء الذاتي.
(2) شكل النبضة عند ابتعاد أثر الجسيم النووي عن المصعد

زمن الاسترجاع The recovery time

تعرف الفترة الزمنية بين وصول الجهد إلى عتبة غايغر ووصوله إلى القيمة القصوى بزمن الاسترجاع (the recovery time). وتعتبر هذه الفترة صغيرة بالنسبة للعدادات ذات الإطفاء الذاتي (حوالي 5×10^{-6} ثانية، وذلك بسبب صغر قيمة المقاومة R_0. وخلال زمن الاسترجاع يستطيع العداد تسجيل الجسيم النووي ولكن يكون تيار (أو جهد) النبضة أقل.

وعموما، تختلف عدادات غايغر باختلاف الغرض المخصصة له. فتوجد منها أنواع ذات نوافذ وأخرى بدونها، وذلك تبعا لنوع الجسيمات أو الإشعاعات المطلوب الكشف عنها. وهناك أنواع يستخدم فيها غاز ثالث فلوريد البور BF_3 أو يعمل فيها نافذة من مادة البور وذلك لاستخدامها للكشف عن النيوترونات.

الكشف عن الإشعاع عن طريق الإثارة التي يحدثها داخل المواد:

بالرغم من أن كواشف الغاز تعطي نتائج مرضية إلا أنها تعاني من بعض العيوب في كثير من التطبيقات. وذلك لأن كثافة الغازات المنخفضة بصورة عامة تجعل تفاعل هذه الأجهزة مع الإشعاع غير كاف للكشف عنه خصوصاً عند استخدام هذه الأجهزة للكشف عن أشعة γ أو الإشعاع ذي الطاقات العالية. إلا أنه يمكن تحسين أداء تلك الأجهزة إذا استخدمت هذه الأجهزة بحيث تكون ذات حجوم كبيرة وإذا أمكن أن تعمل عند ضغط مرتفع. ولكن هناك مشكلة عويصة تواجه هذه الأجهزة والتي تتمثل في استجابتها الزمنية المحدودة والناتجة عن السرعة المحدودة التي تتحرك بها الأيونات المتكوّنة داخل الغاز. وتؤدي الاستجابة الزمنية المحدودة لهذه الأجهزة والتي تكون في حدود ميللي ثانية إلى زمن خمول ملحوظ حيث تنعدم حساسية الجهاز خلال تلك الفترة الزمنية لجسيمات الإشعاع الداخلة إليه. كما تؤدي تلك السرعة المحدودة للأيونات الى زمن صعود بطيء للنبضات الناتجة عن الجهاز مما يؤدي إلى قدرة محدودة لهذه الأجهزة في الكشف عن الإشعاع وإلى تطبيقات محدودة لها.

ومن هنا تتضح أهمية استخدام المادة الصلبة الأكبر كثافة من الغازات وذلك للتغلّب على العيوب السابقة. حيث تعمل الكثافة الذرية العالية لهذه المواد على زيادة احتمال تفاعل الإشعاع مع المادة ومن ثم الكشف عنه بسهولة. كما ويمكن بناء

كواشف تستجيب بسرعة للإشعاع ويتم توليد نبضات بسرعات كبيرة وبزمن صعود سريع جداً.

وهناك عدّة أنواع من الكواشف التي تبنى على مبدأ المادة الكثيفة والتي نجملها في نوعين رئيسيين هما:

الكاشفات الوامضة Scintillation Counters وكواشف المادة الصلبة او كواشف أشباه الموصلات Semiconductor Detectors.

أولاً: الكاشفات الوامضة:

يعتبر الكشف عن الإشعاع عن طريق وميض الضوء الذي تنتجه بعض المواد عند سقوط الإشعاع عليها من أقدم الطرق المعروفة للكشف عن الإشعاع. ويعتمد المبدأ العام لذلك على تفاعل الإشعاع الساقط على مادة وامضة Fluorescent مناسبة مع هذه المادة. وتسمى المادة الوامضة هنا بالوامض Scintillator أو الفوسفورس Phosphor. وتنقسم الوامضات إلى نوعين:

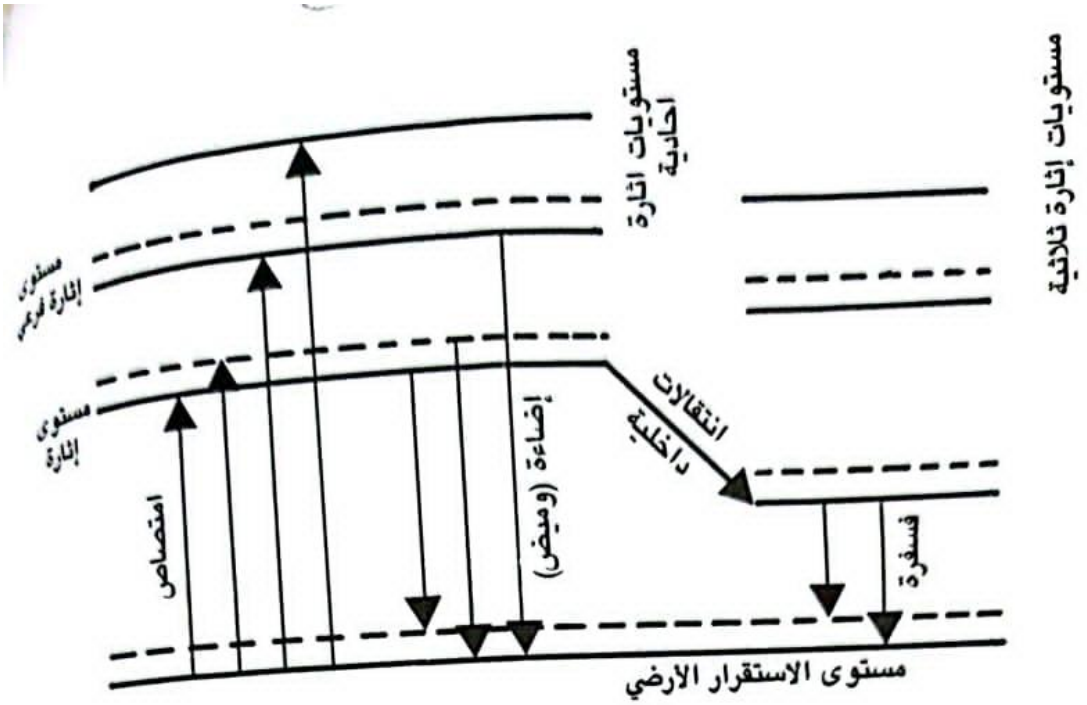
I ـ بلورات غير عضوية مثل بلورات الهاليدات القلوية وأشهرها يوديد الصوديوم (NaI).

II ـ مواد عضوية سائلة أو بلاستيكية.

تمتاز المواد غير العضوية بأن كمية الضوء الناتجة عنها كبيرة وخطية (أي تتناسب مع طاقة وشدّة الإشعاع الساقط عليها). بينما يتمثّل عيبها في أن زمن استجابتها للإشعاع أقل من مثيلتها المواد العضوية. وبالتالي تمتاز المواد العضوية بسرعة زمن استجابتها Response time (الذي يصل إلى نانو ثانية). بينما يتضح عيبها في أن كمية الضوء الناتجة عنها أقل من مثيلتها الناتجة عن المواد غير العضوية.

تستخدم المواد غير العضوية للكشف عن أشعة γ وذلك لأن عددها الذري Z كبير بينما تستخدم المواد العضوية للكشف عن أشعة β والنيوترونات السريعة.

عند سقوط الإشعاع على مادة ما فإنه يعمل على إثارتها. ويبيّن شكل رقم ١٦ الانتقالات الناتجة عن إثارة جزيء عضوي. فعند سقوط الإشعاع على المادة تمتص طاقته وتثار المادة أي ترتفع الجزيئات إلى مستويات طاقة أعلى من مستوى طاقة



شكل رقم ١٦ الانتقالات الناتجة عن إثارة جزيء عضوي.

الاستقرار الأرضي. ويشار إلى تفاعل الإثارة هذا بتفاعل الامتصاص كما يتضح من الشكل. ثم تعود الجزيئات المثارة إلى مستويات إثارة أقل أو إلى مستوى الاستقرار الأرضي نفسه. فإذا ما عادت الجزيئات المثارة إلى مستوى الاستقرار الأرضي مباشرة فإنها تطلق فرق الطاقة على شكل إشعاع ضوئي مرئي. ويسمى هذا التفاعل بتفاعل الوميض أو الإضاءة Process of Fluorescence (انظر الشكل). قد يحدث أن تتم انتقالات داخلية بين مستويات الإثارة المختلفة ثم يتبع ذلك عودة الجزيئات المثارة إلى مستوى الاستقرار الأرضي. وهنا ينبعث ضوء ذو طول موجي أطول من مثيله الناتج عن تفاعل الإضاءة. ويسمى هذا التفاعل بتفاعل الفسفرة Phosphorescence. وينطلق هذا التفاعل بعد فترة زمنية أطول من الفترة الزمنية التي ينطلق بعدها تفاعل الإضاءة.

قد ينطلق تفاعل وميض متأخّر Delayed Fluorescence وهذا التفاعل يمثّل تفاعل الوميض (الإضاءة) السابق ولكنه ينطلق بعد فترة زمنية أطول من تلك التي ينطلق بعدها تفاعل الوميض.

عند اختيار وامض مناسب للكشف عن الإشعاع يجب أن يتمتع هذا الوامض بمقدرة كبيرة على تحويل طاقة الإشعاع الساقط إلى إضاءة لحظية Prompt Fluorescence. أي يجب أن ينطلق تفاعل الوميض بينما يقل احتمال الإضاءة المتأخّرة والفسفرة.

كما ويجب أن يكون الوامض شفافاً بالنسبة للضوء الصادر عنه وذا كثافة عالية ويتمتّع باستقرار طبيعي وميكانيكي مناسب.

وسوف نتحدث فيما يلي عن هذه الوامضات بالتفصيل. ولنبدأ الحديث بالوامضات العضوية.

I ـ الوامضات العضوية Organic Scintillators

بيّنا فيما سبق أن تفاعل الإضاءة الناتج في المواد العضوية يحدث عندما تتم الانتقالات بين مستويات الطاقة المختلفة للجزيء الواحد. ولا يعتمد هذا التفاعل على الحالة الفيزيائية للمادة كونها صلبة أم سائلة أم غازية. وهذا بخلاف المواد غير العضوية التي يجب أن تأخذ تركيباً بلورياً منتظماً ليحدث هذا التفاعل. يتضح من الشكل ١٦ أنه عندما تثار المادة العضوية بامتصاصها الطاقة من الاشعاع (مثلاً) فإن الجزيئات ترتفع إلى مستويات الإثارة المبيّنة. ثم بمرور الوقت يعود الجزيء إلى مستوى الاستقرار الأرضي وذلك إما عن طريق الوميض الآني Prompt fluorescence أو تفاعلات الفسفرة .

ومما تجدر ملاحظته أنه لا تعود الجزيئات المثارة كلها إلى مستويات الاستقرار عن طريق إطلاق الضوء ولكن بعض هذه الانتقالات تنتج عنها حرارة بدلاً من إنتاج إضاءة. وتسمى تفاعلات العودة de-excitation إلى مستوى الاستقرار التي لا ينتج عنها ضوء بتفاعلات الإطفاء quenching. وتعمل الشوائب الموجودة في الوامضات العضوية (كغاز الأكسجين في الوامضات السائلة) كمراكز إطفاء. ولهذا يجب التخلّص من تلك الشوائب.

ويمكن تمييز الوامض الجيّد بمقدرته على تحويل طاقة الإشعاع الساقط عليه إلى ضوء مرئي. ولهذا يمكن تعريف كفاءة الوميض Scintillation Efficiency على أنها النسبة بين طاقة الإشعاع الساقط المتحوّلة إلى ضوء مرئي وبين طاقة الإشعاع الكلي الساقط.

وتحضّر الوامضات العضوية على عدة صور وتأخذ أشكالاً عدة وهي:

1 - البلورات العضوية النقية:

هناك مادتان تتمتعان بهذه الميزة هما (الانثراسين) الذي يتمتع بأعلى كفاءة

إضاءة لأي وامض عضوي. (والاستلبين) Stilbene. وهاتان المادتان هشتان ومن الصعب الحصول على بلورات كبيرة منهما.

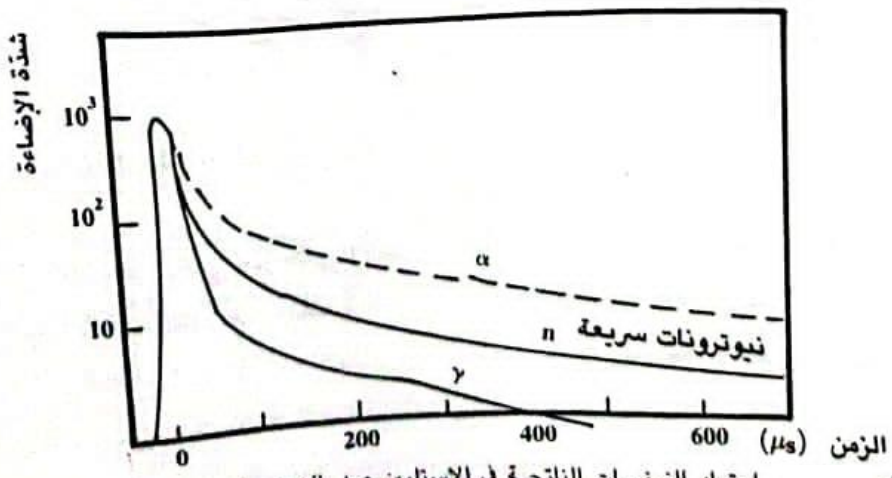
التمييز باستخدام شكل النبضة: Pulse shape discrimination:

تتمتّع معظم الوامضات العضوية بوميض آني لضوء الإيماض المرئي. وفي كثير من الحالات تظهر أيضاً مركبة ذات زمن تحلل طويل ناتجة عن الوميض المتأخر. وبالتالي يأخذ الشكل العام لمنحنى الإضاءة شكلاً أسياً لتحلُّلين أحدهما يمثّل المركبة السريعة والآخر البطيئة للوميض. ويبلغ زمن التحلّل decay time للمركبة السريعة عدة ناتو ثانية بينما يبلغ هذا الزمن للمركبة البطيئة Slow عدة مئات من النانو ثانية وقد وجد أيضاً أن المركبة البطيئة تعتمد على طبيعة الإشعاع المعرّض له الكاشف.

وهذه النتيجة المهمة تجعل من الممكن التفريق بين جسيمات الإشعاع المختلفة التي يمتص منها الكاشف الكمية نفسها من الطاقة. ويبيّن شكل رقم ١٧ اعتماد النبضات الناتجة من الاستلبين على الزمن عند تعرّضه لأنواع مختلفة من الإشعاع. لاحظ اختلاف زمن التحلّل عند التعرّض لإشعاعات α، γ والنيوترونات. وبالتالي يمكن التفريق بين أنواع الإشعاعات المختلفة وهذا ما يسمى بمبدأ التمييز باستخدام شكل النبضة. وهكذا فإنه يمكن التخلّص من أشعة γ المصاحبة للنيوترونات عن طريق استخدام الوامضات العضوية.

II ـ الوامضات غير العضوية Inorganic Scintillators

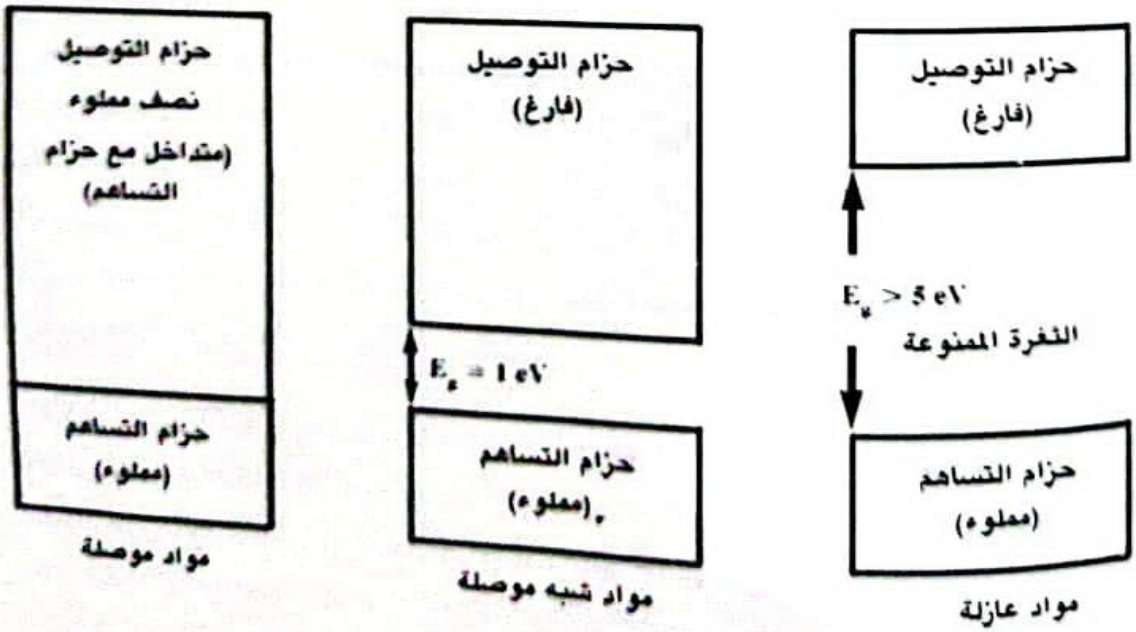
تنقسم المواد من حيث توصيلها للكهرباء إلى أقسام ثلاثة: مواد عازلة ومواد شبه موصلة ومواد موصلة. ويتم ذلك بناءً على التركيب الإلكتروني لها. توجد الإلكترونات



شكل رقم ١٧ اعتماد النبضات الناتجة في الاستلبين على الزمن عند تعرّضه لأنواع مختلفة من الإشعاع.

في الذرة في مدارات ثابتة كل مدار له طاقة معيّنة. وعند اقتراب الذرات من بعضها البعض لتكوين بلورة من مادة صلبة فإن طاقة الوضع للإلكترونات تأخذ قيماً مستمرة.

وقد وجد أن الإلكترونات تترتب في أحزمة طاقة معيّنة مسموح بها. انظر كواشف أشباه المواصلات. وتوجد ثلاثة أحزمة للطاقة أدناها هو حزام التساهم Valence Band حيث توجد فيه الإلكترونات مقيدة إلى تركيبة Lattice معيّنة في البلورة. وهذا الحزام يكون مملوءاً بالإلكترونات غالباً. والحزام الثاني للطاقة هو حزام التوصيل Conduction Band حيث تحتله الإلكترونات الحرة الحركة والتي يمكنها الانتقال داخل البلورة. توجد بين هذين الحزامين ثغرة ممنوعة Forbidden Gap لا يمكن أن يوجد فيها أي إلكترون. يبيّن شكل رقم ١٨ التركيب الحزامي للمواد المختلفة حيث يتضح كيف يتم تصنيف المواد من حيث توصيلها للكهرباء والحرارة. بناءً على قيمة (سمك) الثغرة الممنوعة يتم تصنيف المواد من حيث درجة توصيلها للكهرباء. في حالة المواد الموصلة للكهرباء (كالنحاس) تبلغ قيمة الحزام الممنوع صفراً بل هناك تداخلاً بين حزامي التوصيل والتساهم وينعدم الحزام الممنوع. وبذلك فأن معظم الإلكترونات الموجودة تصبح حرة الحركة. وبالتالي تصبح المادة موصلة للكهرباء. أما في المواد العازلة فإن قيمة الحزام الممنوع تزيد عن 5 إلكترون فولت.



التركيب الحزامي للمواد المختلفة

شكل رقم ١٨

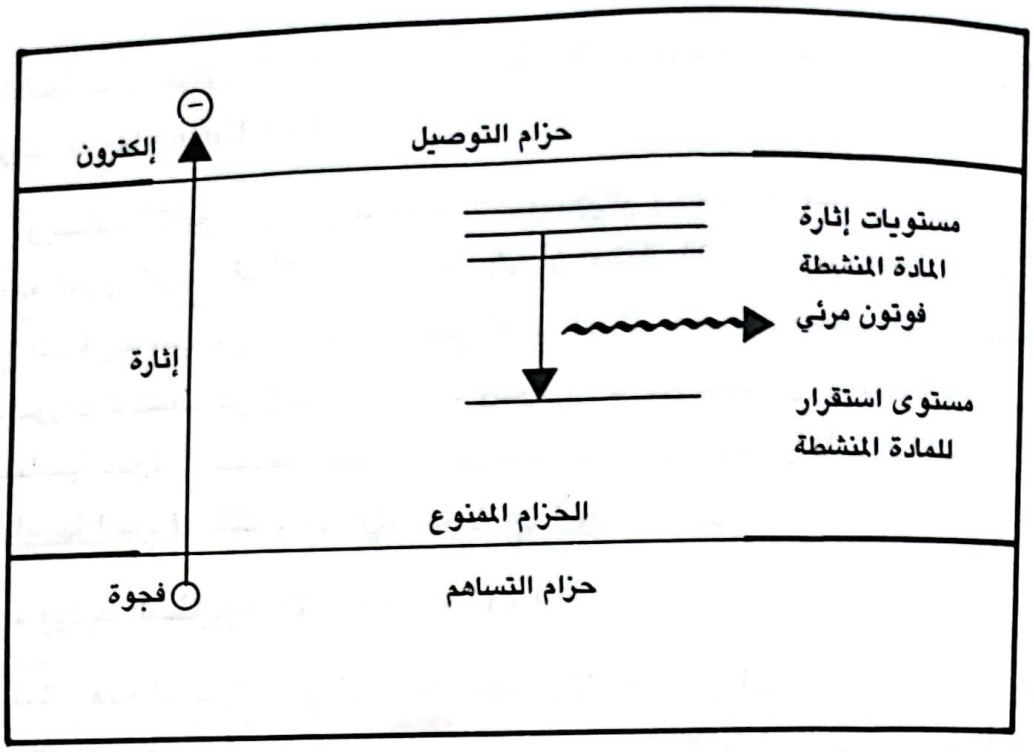
وحيث إن توصيل المواد للكهرباء يعتمد على عدد الإلكترونات الحرة الموجودة في حزام التوصيل فينبغي أن تزوّد إلكترونات التساهم بطاقة كافية لقفز حاجز الثغرة ومن ثم الدخول إلى حزام التوصيل. حيث يمكنها الحركة بسهولة هناك ومن ثم يتمّ التوصيل الكهربي.

أما في المواد شبه الموصلة Semi Conductors فإن قيمة الحزام العازل تبلغ حوالى إلكترون فولت واحد. وبالتالي يمكن إثارة إلكترونات التساهم بسهولة «عن طريق التسخين البسيط مثلاً» أو عند ارتفاع درجة حرارة البلورة. فتدخل إلى حزام التوصيل وتصبح المادة موصلة. ومن أشهر المواد شبه الموصلة المستخدمة في الكواشف مادتي الجرمانيوم والسيليكون.

لنفترض الآن أنه تم امتصاص كمية معيّنة من الطاقة بواسطة البلورة فإن ذلك ينتج عن ارتفاع إلكترون من حزام التساهم إلى حزام التوصيل. فإذا ما عاد الإلكترون إلى حزامه الأصلي فإن فرق الطاقة يظهر على شكل إشعاع فوتون ذي طول موجي معيّن (طاقة معيّنة). وقد وجد أنه في حالة البلورات النقية يقل احتمال مثل هذا التفاعل. وهناك مشكلة أخرى إذ إن طاقة الفوتون الناتج عن الانتقال بين الحزامين تكون من الكبر بحيث لا يمكن رؤيته بل يقع في المدى غير المنظور للطيف الكهرومغناطيسي.

ولزيادة احتمال إشعاع فوتون مرئي يمكن إضافة شوائب بكمية صغيرة إلى البلورة تسمى منشطات Activators. وتختار أمثال هذه المواد بحيث تقع مستويات طاقتها داخل الحزام الممنوع للبلورات النقية. ويبيّن شكل رقم ١٩ مثل هذا الترتيب. يعود الإلكترون المثار ثانية إلى حزام التساهم للبلورة ماراً بمستويات الإثارة للمنشِّط. ومن ثم يفقد طاقته على شكل فوتون يقع في المدى المرئي للطيف الكهرومغناطيسي بادئاً بذلك تفاعل الإيماض.

عند تعرّض البلورة للإشعاع تعمل الطاقة الممتصة من الإشعاع على رفع الإلكترونات من حزام التساهم إلى حزام التوصيل تاركة خلفها فجوة (hole) بينما ينتج إلكترون في حزام التوصيل وبذلك يتم خلق ما يسمى بزوج الإلكترون - فجوة. ويتم خلق الكثير من هذه الأزواج Electron-hole pairs عند تعرّض البلورة للإشعاع. وهكذا يتحرك الفراغ ليؤيّن المادة المنشطة ويتحرك الالكترون ليقابل هذا



شكل رقم ١٩ تركيب احزمة الطاقة لوامض بلوري منشّط.

الأيون وبذلك يحتل بعضاً من مستويات إثارة المنشط (انظر الشكل). وعندما تعود هذه المستويات المثارة إلى مستوى الاستقرار فإنها تومض بالضوء المرئي. وتقع أنصاف أعمار هذه المستويات المثارة في حدود 10^{-7} ثانية. وبذلك يحدد زمن التحلل Decay time لهذه المستويات الخواص الزمنية لتلك الكواشف. وهناك العديد من الوامضات غير العضوية نجملها فيما يلي:

1 ـ وامضات الهاليدات القلوية: Alkali Halide Scintillators:

أ ـ يوديد الصوديوم NaI (Tl):

تتمتّع هذه البلورات بمقدرة كبيرة على تحويل الإشعاع إلى ضوء وهي هنا تفوق أي مادة وامضة عند تعرّضها للإلكترونات الابتدائية والثانوية. واستجابتها للإلكترونات ولأشعة γ خطية لمدى كبير من الطاقة. كما وتعتبر مادة وامضة قياسية Standard بالنسبة للقياسات الاسبكتروسكوبية لأشعة γ. ويمكن تحضير بلورات يوديد الصوديوم على هيئة عدة أشكال وبحجوم مختلفة. وعيبها يتمثّل في بطء النبضات الناتجة عنها بالمقارنة مع بلورات البلاستيك. إذ يبلغ زمن تحلل النبضات

الناتجة عنها حوالى 230 نانو ثانية. وبـالتالي لا تستخـدم في القياسـات التي تحتاج توقيتاً سريعاً Fast Timing.

ويضاف الثاليوم إلى بلورات يوديد الصوديوم ليكون منشطاً مناسباً وايضـاً لكون عدده الذري كبيراً. وقد أشرنا فيما سبق إلى أن احتمال التفاعل الكهروضوئي لاشعة γ مع المادة يتناسب مع $Z^{4.5}$ فإنه تتضح أهمية إضافة هذه المادة عندما تستخدم هذه البلـورات للكشف عن إشعاع γ. كمـا ونـود أن نشـير هنـا إلى أن لهـذه البلـورات حساسية كبيرة لامتصاص بخار الماء ويسبب هـذا الامتصاص فقـدانها للكثـير من خواصها الجيدة. لذلك يجب عزلها جيداً عن الهواء الجوي.

ب ـ يوديد السيزيوم Cs I (Tl)، Cs I (Na):

تمتاز هذه البلـورات بأن لهـا أعلى معـامل لامتصـاص أشعة γ/ وحـدة حجوم. وبـذلك فهي تفـوق أي وامض عضوي آخـر من حيث كفاءة قيـاسها. وهـذه الميـزة تجعلها ذات شأن كبير في أبحاث الفضاء حيث يشكل عـاملا الحجم والـوزن ميزات محددة. وتمتاز أيضاً بأنها أكثر صلابة من يوديد الصوديوم وتتمتّـع بإمكـانية الـلي والتشكيل على هيئـة عدة أشكـال. أما البلـورة المنشّطة بـالثاليـوم CsI (Tl) فتتمتّع بميزة مهمة وهي أن زمن تحلل النبضات الناتجة منها يختلف باختلاف نوع الإشعاع (α، β أو γ) المعرّضة له البلورة. وبالتالي يمكن التمييز بين هذه الإشعاعات بناءً على شكل النبضـة Pulse shaped iscrimination. أما بلورات CsI(Na) فتتمتع بكفاءة عالية لإنتاج الضوء تقترب من كفاءة يوديد الصوديوم. بالإضافة إلى أنها أقل حساسية لبخار الماء من بلورات يوديد الصوديوم.

حـ ـ يوديد الليثيوم LiI (Eu):

تستخدم هذه البلورات للكشف عن النيوتـرونات وذلـك لاحتوائهـا على الليثيـوم. فإذا ما تمّت تغذيتها بالنظير Li^6 فإنه يمكنها الكشف عن النيوتـرونات البطيئـة وذلك من خلال التفاعل $Li^6(n, \alpha) H^3$.

2 ـ وامضات أخرى:

أ ـ كبريتات الزنك ZnS (Ag):

تتمتّع هذه البلورات بكفاءة وميض عالية بالمقارنـة مع يـوديد الصـوديوم ولكنهـا

تحضّر فقط على صورة مسحوق ولذلك تستخدم في قياسات أشعة α أو الأيونات الأخرى الثقيلة.

ب ـ فلوريد الكالسيوم $Ca F_2 (Eu)$:

تمثّل هذه البلورات وامضاً عضوياً خاملاً وغير حساس للماء وبذلك يمكن استخدامها للقياس في ظروف جوية سيئة.

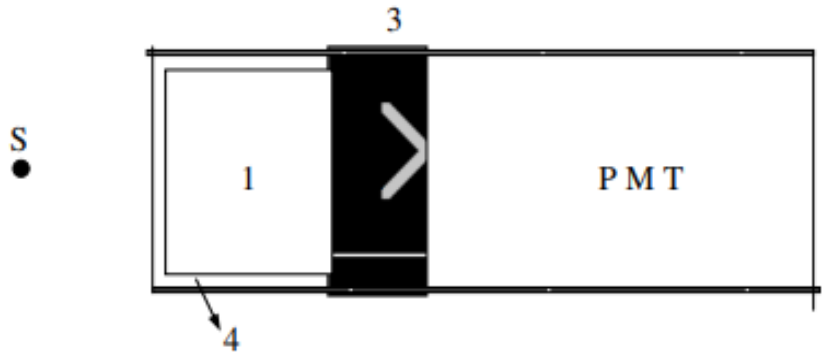
مكونات الكاشف الوميضي

عند سقوط الجسيمات المشحونة أو الإشعاعات السينية أو إشعاعات جاما على مواد معينة مثل يوديد الصوديوم NaI أو يوديد السيزيوم CsI أو الأنثراسين، أو الاستلبين أو غيرها، ينتج عن ذلك وميض ضوئي. وتعرف هذه المواد باسم المواد الوميضية (scintillators) ولقد استخدمت هذه الظاهرة للكشف عن الإشعاعات المؤينة بجميع أنواعها ولتحديد طاقاتها.

ويتكون الكاشف الوميضي (شكل ٢٠) من عدة أجزاء أساسية هي: المادة الوميضية وأنبوب توصيل الضوء (light pipe) والعاكس الضوئي (light reflector)، وأنبوب التضاعف الفوتوني (photomultiplier tube) . فعند سقوط الإشعاعات أو الجسيمات النووية على المادة تصدر هذه المادة ومضة ضوئية. وتنتقل الومضة الضوئية عبر أنبوب توصيل الضوء إلى المهبط (الكاثود) الضوئي (potocathode) لأنبوب التضاعف الفوتوني.

أما دور العاكس الضوئي فهو يقوم بعكس الضوء الواقع عليه وإعادته إلى المهبط الضوئي للأنبوب حتى لا يضيع جزء من الضوء الناتج عن الجسيم. وعند سقوط الضوء على المهبط الضوئي تنطلق منه إلكترونات تبعا لظاهرة الانبعاث الكهروضوئي، ثم يتضاعف عدد الإلكترونات تضاعفا فائقا داخل أنبوب التضاعف الفوتوني. وتصل الإلكترونات في النهاية إلى مجمع (أنود) أنبوب التضاعف منتجة بذلك نبضة كهربية على مخرج الأنبوب. وهكذا، يمكن تلخيص عملية الكشف باستخدام الكواشف الوميضية في ستة مراحل مرتبة كالآتي:

1- امتصاص طاقة الجسيم النووي داخل المادة الوميضية مما يؤدي إلى إثارة أو تأين هذه المادة.
2- تحول الطاقة الممتصة في المادة إلى ضوء خلال العملية الوميضية.
3- انتقال الفوتونات الضوئية إلى المهبط الضوئي لأنبوب التضاعف.



شكل ٢٠ الكاشف الوميضي

1- المادة الوميضية 2- أنبوب توصيل الضوء
3- الغلاف الخارجي 4- العاكس الضوئي
PMT – أنبوب التضاعف S – المصدر المشع

4- امتصاص المهبط لطاقة الفوتونات الضوئية وانبعاث إلكترونات منه.
5- تضاعف عدد الإلكترونات داخل أنبوب التضاعف الفوتوني.
6- تجميع هذه الإلكترونات عند مصعد الأنبوب وتكوّن شحنة كهربائية كبيرة.

وترتبط الشحنة الكهربية Q المتجمعة على أنود الأنبوب بطاقة الجسيم الساقط E بالعلاقة التالية:

$$Q = eMn_{ph} = e\,MC\,T\,F\,S\,E \qquad ٢٧$$

حيث e شحنة الإلكترون، M معامل التضاعف في الأنبوب، n_{ph} عدد الإلكترونات الصادر من المهبط الضوئي، C هي كفاءة المادة الوميضية (أي نسبة الفوتونات الضوئية التي تخرج منها إلى الفوتونات المتكونة)، F هي شفافية أنبوب التوصيل، S حساسية المهبط الضوئي (أي عدد الإلكترونات الصادرة منه لكل إلكترون فولت من طاقة الفوتونات الساقطة). وتعتبر جميع المعاملات ثابتة للكاشف الواحد عند الجهد

الواحد. لذلك، يتضح أن الشحنة الكهربية المتكونة على مخرج أنبـــوب التضاعف تتناسب طرديا مع طاقة الجسيم الساقط.

أنواع المواد الوميضية Types of scintillators

يستخدم في الوقت الحالي عدد كبير مـــن المـــواد الوميضـــية. وتختلف خصائص هذه المواد اختلافا كبيرا. ويبين جدول (١) بعض أسماء المواد الوميضية شائعة الاستخدام وخصائصها.

ويجب أن تتوفر في المادة الوميضية الجيدة الخصائص التالية:

1- كفاءة عالية في تحويـــل طاقـــة الجســـيم النووي إلى طاقة ضوئية.
2- شفافية تامة للمادة بالنسبة للإشعاعات الصادرة منها.
3- صغر زمن التفكك.

جدول (١): خصائص بعض المواد الوميضية

اسم المادة الوميضية	كثافتها ($غم/سم^3$)	طول موجة الضوء المنبعث (انجستروم)	زمن التفكك بالثانية τ
بللورة الأنثراسين (مادة عضوية)	1.25	4400	$10x2.7^{-8}$
بللورة الاستيلبين(مادة عضوية)	1.15	4100	$10x5-3^{-9}$
يوديد صوديوم مزود بالتاليوم NaI(TI)	3.67	4100	$10x2.5^{-7}$
كبريتيد خارصين مزود بالفضة Zn S(Ag)	4.10	4500	10^{-5}

وبمجرد دخول الإشعاعات النووية إلى المادة الوميضـــية تثـــار المادة وتبدأ في إصدار الفوتونات الضوئية. ويتغير عدد الفوتونات كدالة من الزمن طبقا للعلاقة التالية:

$$n = n_0 (1 - e^{-t})$$

حيث: n عدد الفوتونات الصادرة بعد زمن مقداره t من لحظة دخول الإشعاعات النووية، n_0 العدد الكلي للفوتونات الصادرة. أما τ فهو عبارة عن الزمن اللازم لإصدار $(1-e^{-1})$ من الفوتونات أي 63 % منها. ويعرف هذا الزمن باسم زمن التفكك.

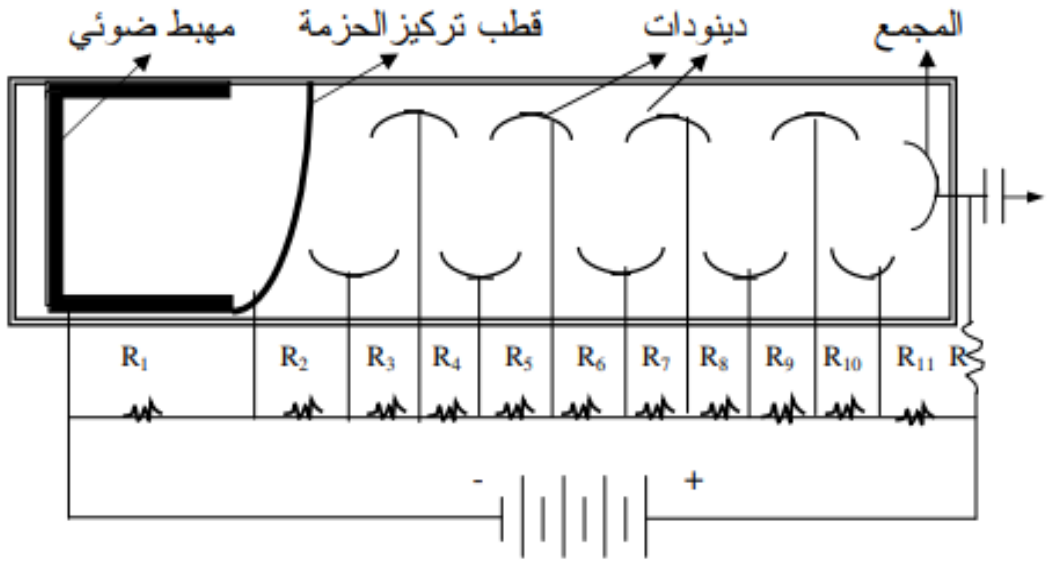
أما الخصائص الأخرى للمادة الوميضية كالكثافة والشكل والحجم وحالة المادة فتختلف باختلاف الغرض من الكاشف والجسيمات النووية وطاقاتها.

وتوضع المادة الوميضية عادة داخل حافظة محكمة القفل، وذلك لحمايتها من الصدمات ومنع وصول الضوء إليها ومنعها من التميع بواسطة الرطوبة الجوية. وتغطى المادة الوميضية (من جميع الجوانب عدا الجانب المتصل بالأنبوب الضوئي) بطبقة رقيقة من أكسيد المغنيسيوم (MgO) تعمل كعاكس للضوء. أما الجانب المتصل بالأنبوب الضوئي فيغطى بطبقة متجانسة السمك من الزجاج النقي، وذلك لوصول الضوء إلى المهبط الضوئي. وعند استخدام المادة الوميضية للكشف عن الجسيمات المشحونة الثقيلة أو جسيمات بيتا يجب عمل نافذة في الحافظة من ورقة رقيقة من الألمونيوم، وذلك لمنع وصول الضوء من الخارج، وفي الوقت نفسه للسماح بمرور هذه الجسيمات.

أنبوب التضاعف الفوتوني
The photomultiplier tubs (PMT)

أنبوب التضاعف الفوتوني عبارة عن أنبوب زجاجي مفرغ من الهواء تفريغا جيدا ويحتوي على أربعة عناصر رئيسة هي المهبط (الكاثود) الضوئي، وقطب تركيز الحزمة الإلكترونية، ومجوعة أقطاب تعرف بالدينودات (dynodes) ، والقطب المجمع (الأنود). ويبين شكل (٢١) رسما تخطيطيا لأنبوب التضاعف الفوتوني. ويقوم المهبط بإصدار إلكترونات عندما يسقط الضوء المنبعث من المادة الوميضية (ظاهرة الانبعاث الكهروضوئي). لذلك، يصنع المهبط من مادة شبه شفافة مغطاة من الداخل بطبقة رقيقة من مادة كهروضوئية. وعند انطلاق الإلكترونات من المهبط يتم توجيهها وتركيزها بواسطة قطب

تركيز الحزمة الإلكترونية الذي يعمل كعدسة مجمعة بحيث تصل الإلكترونات الخارجة من المهبط إلى الدينود الأول. وتقوم الدينودات بمضاعفة عدد الإلكترونات. فعند سقوط إلكترون بطاقة كبيرة (عدة عشرات إلكترون فولت) فإن ذلك يؤدي إلى انبعاث ثانوي من الدينود. وبذلك، يتضاعف عدد الإلكترونات على الدينود الأول ويتجه هذا العدد المتضاعف إلى الدينود الثاني. فإذا كانت طاقة الإلكترونات عند وصولها للدينود الثاني كبيرة يحدث الانبعاث الثانوي عليه ويتضاعف عددها من جديد. وهكذا، تستمر عملية التضاعف على كل دينود. وفي النهاية يتم تجميع هذا العدد الهائل من الإلكترونات بعد التضاعف على المجمع (الأنود) فتظهر عليه نبضة كهربية سالبة (لأن شحنة الإلكترونات سالبة). ولكي تتحرك الإلكترونات الصادرة من المهبط الضوئي إلى الدينود الأول، فالثاني، فالثالث، ...، فالمجمع فإنه يجب أن يتزايد الجهد الموجب لهذه الأقطاب بالتتابع. ويتم تحقيق ذلك باستخدام منبع جهد عال V ومقسم للجهد مكون من عدة مقاومات (من R_1 إلى R_{11}على الشكل) بحيث يكون جهد المجمع مساويا لقيمة V ثم يتناقص الجهد بالتدريج إلى أن يصبح مساويا للصفر على المهبط. (تجدر الإشارة إلى أنه يمكن



شكل ٢١ : أنبوب التضاعف الفوتوني

تحقيق النتيجة نفسها إذا كان جهد المجمع مساويا للصفر ثم يتناقص الجهد حتى يصبح مساويا (V-) على المهبط. أي أنه يتم تغذية المهبط بمنبع جهد سالب بدلا من تغذية المجمع بمنبع جهد موجب).

وهكذا، ينتج تضاعف عدد الإلكترونات على الدينودات بسبب ظاهرة الانبعاث الثانوي. فإذا كان معامل الانبعاث الثانوي على الدينود الأول δ_1 وعلى الثاني δ_2 وعلى الأخير δ_n يكون معامل التضاعف الكلي لأنبوب هو:

$$M = \delta_1 \ \delta_2 \ldots\ldots\ldots \delta_n \qquad ٢٨$$

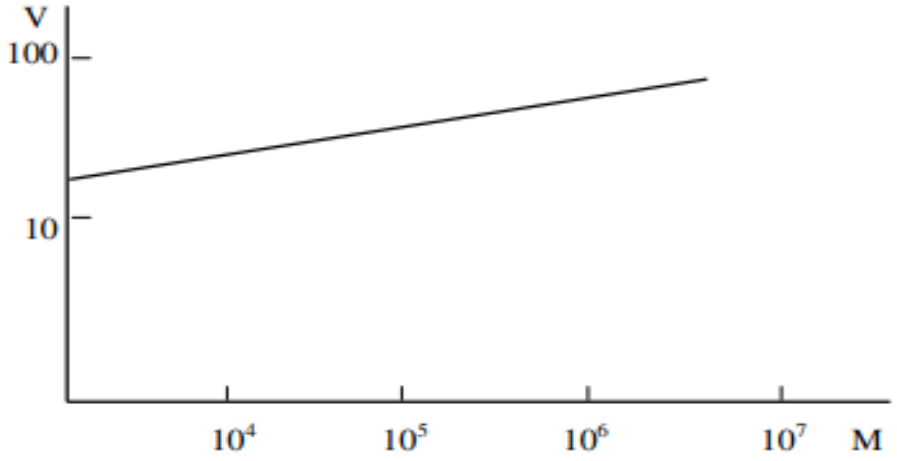
علما بأن معامل الانبعاث الثانوي للدينود هو نسبة عدد الإلكترونات الصادرة منه إلى عدد الإلكترونات الساقطة عليه. فإذا كان عدد الدينودات في الأنبوب عشرة وكان معامل التضاعف المطلوب هو 10^6 فيجب أن يكون معامل الانبعاث الثانوي علىكل دينود في حدود 3.95 أي أن :

$$\delta_1 = \delta_2 = \ldots \delta_n = 3.95$$

ويعتمد معامل الانبعاث الثانوي δ كل دينود على طاقة الإلكترونات الساقطة عليه، حيث يزداد بزيادة الطاقة. ولما كانت الطاقة التي تكسبها الإلكترونات عند التحرك من دينود إلى آخر تتناسب طرديا مع فرق الجهد بين الدينودين، فإن معامل الانبعاث يتناسب بالتالي طرديا مع فرق الجهد بين الدينودين. لذا فإن معامل التضاعف في أنبوب التضاعف الفوتوني يعتمد اعتمادا كبيرا على مقدار الجهد V . ويوضح شكل (٢٢) كيفية تغير معامل التضاعف كدالة من فرق الجهد في العديد من أنابيب التضاعف. وعموما، فإنه يمكن التعبير عن معامل التضاعف رياضيا بالعلاقة التالية عند ثبوت عدد الدينودات:

$$M = K E^I$$

حيث: K ثابت يعتمد على نوع الأنبوب، E شدة المجال الكهربائي بين كل دينودين، I عدد يساوي 5 تقريبا.



شكل (٢٢)
تغير معامل التضاعف كدالة من فرق الجهد في أنبوب التضاعف الفوتوني

وهكذا، يلاحظ أن أنبوب التضاعف الفوتوني يؤدي إلى تكبير النبضة الكهربائية الناتجة عن الجسيم النووي في حدود تتراوح بين حوالي 10^3 ، 10^7 مرة تبعا لقيمة الجهد المستخدم لتغذية الأنبوب. وتعتبر هذه القيمة العالية لمعامل التكبير (التضاعف) من أهم مزايا الكواشف الوميضية بالمقارنة بالكواشف الغازية حيث يمكن الاستغناء عن المكبرات (المضخمات) الإلكترونية المستخدمة مع غرف التأين والعداد التناسبي أو استخدام مكبرات ذات معامل منخفض للتكبير.

القدرة التحليلية للطاقة الزمن للكواشف الوميضية
Energy and time resolution of the scintillation detectors

عند ثبوت الجهد في أنبوب التضاعف عند قيمة معينة تكون قيمة معامل التضاعف ثابتة. وعندئذ يجب أن يتناسب اتساع نبضة التيار (أي القيمة القصوى للتيار) مع طاقة الجسيم النووي تناسبا طرديا. ومع ذلك فإنه يلاحظ أن اتساع نبضة التيار الناتجة عن الأنود تختلف اختلافا

طفيفا للجسيمات نفسها ذات الطاقة الواحدة. ويرجع هذا الاختلاف الطفيف في القيمة القصوى للتيار وبالتالي في القيمة القصوى لجهد النبضة إلى الآتي:

1- اختلاف عدد الفوتونات التي تصل للمهبط الضوئي من المادة الوميضية بسبب امتصاص بعضها في المادة .

2- اختلاف التضاعف داخل الأنبوب اختلافا طفيفا وخاصة على الدينود الأول وذلك لأن معامل الانبعاث الثانوي يعتمد على زاوية سقوط الإلكترون على الدينود فضلا عن أن عملية الانبعاث الثانوي تعتبر عملية إحصائية بحتة.

لذلك، فإنه عند الكشف عن جسيمات ذات طاقة واحدة E يحدث توزع في طاقتها مقداره ΔE ، ويمكن إيجاد القدرة التحليلية r للكاشف الوميضي بالأسلوب نفسه المتبع للكواشف الأخرى، وهي:

$$r = (\Delta E / E) \times 100\ \%$$

وتجدر الإشارة إلى أن زيادة القدرة التحليلية يعني انخفاض قيمة r . فمثلا، إذا كانت $r = 0.25\ \%$ فيقال أن هذا الجهاز ذو قدرة تحليلية عالية، وأما إذا كانت $r = 2.5\ \%$ فيقال أن الجهاز ذو قدرة تحليلية أقل. ويمكن زيادة القدرة التحليلية للكواشف الوميضية وذلك باستخدام مادة وميضية عالية الشفافية، وتوجيه عناية خاصة إلى أنبوب توصيل الضوء، وعدم ترك أي فقاعات هوائية بين المادة الوميضية وأنبوب التوصيل الضوئي أو بين هذا الأنبوب وأنبوب التضاعف الفوتوني، حتى لا يتشتت الضوء على هذه الفقاعات، مما يؤدي إلى حدوث توزع كبير في عدد الفوتونات التي تصل المهبط. كذلك، فإنه لتقليل التوزع الناتج عن أنبوب التضاعف الفوتوني، وبالتالي لرفع تركيز الإلكترونات وزيادة حساسية المهبط الضوئي وزيادة معامل التضاعف لكل دينود على حدة، وخاصة الدينود الأول، حيث يكون عدد الإلكترونات ما زال قليلا وإمكانية التوزع كبيرة. لذلك، فإنه يفضل استخدام الجهود العالية التي

تحقق معامل تضاعف كبير، بشرط ألا يتجاوز الجهد المطبق الحد الأقصى للجهد المسموح به على الأنبوب المعين لتلاشي حدوث شرارة كهربية بين الدينودات، وبالتالي لتلاشي تلف الأنبوب كله. كذلك، فإنه يفضل أن يكون فرق الجهد بين الدينود الأول وماقبله أعلى بعدة مرات من فرق الجهد بين أي دينودين تاليين.

وتتراوح القدرة التحليلية، عموما، للكواشف الوميضية بين 2 %، 20 % وذلك تبعا لحجم المادة الوميضية، حيث تنخفض القدرة التحليلية للطاقة بزيادة حجم البلورة (المادة الوميضية).

أما القدرة التحليلية الزمنية (time resolution) فهي عبارة عن الفاصل الزمني بين جسيمين متتابعين بحيث يسجلان منفصلين عن بعضهما البعض زمنيا. وأهم العوامل التي تحدد القدرة التحليلية الزمنية للكواشف الوميضية هي زمن التفكك للمادة الوميضية وزمن التأخير الناتج عن انتقال الإلكترونات في أنبوب التضاعف الفوتوني. ويتراوح هذا الزمن الأخير بين 10^{-8} ، 10^{-7} ثانية تبعا لنوع وحجم الأنبوب والجهد المستخدم حيث يتناسب هذا الزمن عكسيا مع الجذر التربيعي للجهد المستخدم .

كذلك، تجدر الإشارة إلى أنه يحدث اختلاف في زمن الانتقال، وذلك بسبب مرور الإلكترونات في مسارات مختلفة عند انتقالها بين الدينودات، إلا أن هذا الاختلاف لا يتجاوز عادة 7×10^{-10} ثانية.

استخدام الكواشف الوميضية

تستخدم الكواشف الوميضية للكشف عن جميع أنواع الإشعاعات المؤينة وتسجيلها بالأسلوب النبضي وتحديد طاقاتها. ولهذا الغرض يستخدم كاشف وميضي مكون من مادة وميضية مناسبة للنوع المعين من الإشعاعات وأنبوب تضاعف فوتوني. ويوصل مخرج الأنبوب وهو المجمع (الأنود)، أو الدينود الأخير السابق مباشرة للمجمع بدارة إلكترونية تعرف باسم التابع الباعثي أو المكبر الأولي (preamplifier).

ويجب تجميع هذه الدارة على قاعدة الأنبوب مباشرة لمنع فقد نسبة من التيار عند سحبه لمسيفات بعيدة. كذلك، يتم تجميع دارة مقسم الجهد (potential - divider) ، اللازم لتوزيع الجهد على الدينودات المختلفة على هذه القاعدة نفسها. وتؤخذ نبضات الجهد الخارجة من التابع الباعثي أو المكبر الأولي لعد عددها أو لتحليل طاقاتها في أجهزة أخرى. ويتم تغذية أنبوب التضاعف بمنبع جهد عال ذي استقرارية عالية.

وتجدر الإشارة إلى أنه يؤخذ أحيانا مخرجان من أنبوب التضاعف، الأول من المجمع (الأنود)، ويكون تياره سالبا نظرا لأنه ناتج عن وصول الإلكترونات السالبة للمجمع. ويؤخذ المخرج الآخر من أحد الدينودات الأخيرة ويكون تياره موجبا نظرا لأنه ناتج عن خروج عدد من الإلكترونات من هذا الدينود أكبر من العدد الذي يصله من الدينود السابق له. ويكون عادة جهد النبضة الموجبة من الدينود أصغر من جهد النبضة السالبة من المجمع.

أ- استخدام الكواشف الوميضية للكشف عن جسيمات ألفا والجسيمات المشحونة الثقيلة

للكشف عن جسيمات ألفا والجسيمات المشحونة الثقيلة الأخرى بواسطة الكواشف الوميضية يفضل استخدام بلورة وميضية من كبريتيد الخارصين المنشط بالفضة ZnS(Ag) . وتتميز هذه البلورة بكفاءة عالية لتحويل طاقة جسيمات ألفا والجسيمات المشحونة الثقيلة الأخرى إلى طاقة ضوئية. ومن الجانب الآخر فإن أهم عيوب هذه البلورة هو ضعف شفافيتها. إلا أنه نظرا لصغر مدى الجسيمات المشحونة الثقيلة فإنه يستخدم سمك صغير من هذه المادة (حوالي 1 مم) مما يجعل ضعف الشفافية غير ذي أهمية. ويمكن ترسيب مادة كبريتيد الخارصين مباشرة على زجاج أنبوب التضاعف الفوتوني، دون الحاجة لأنبوب توصيل الضوء.

ب- استخدام الكواشف الوميضية للكشف عن إشعاعات جاما والإشعاعات السينية

للكشف عن إشعاعات جاما أو الأشعة السينية باستخدام الكواشف الوميضية تستخدم، عموما، بلورة يوديد الصوديوم المنشطة بالثاليوم NaI(Tl) كمادة وميضية. ويفضل استخدام هذا النوع من البلورات مع الأشعة السينية وإشعاعات جاما بسبب كفاءتها العالية نظرا لكبر كثافتها وكبر العدد الذري للثاليوم واليود. وتعتمد كفاء الكاشف على كل من سمك البلورة وطاقة الإشعاعات. فعند الطاقة المعينة تزداد الكفاءة كلما زاد سمك البلورة. وأما بالنسبة للسمك المعين فتقل الكفاءة بالنسبة لكل من الأثر الكهروضوئي وأثر كومبتون بزيادة الطاقة وتزداد الكفاءة بالنسبة لإنتاج الأزواج كلما زادت الطاقة .
وعموما، فإن كفاءة الكواشف الوميضية بالنسبة لإشعاعات جاما تعتبر أعلى من كفاءة العدادات الغازية لهذا النوع من الإشعاعات بحوالي عدة عشرات أو حتى عدة مئات من المرات.

ج- استخدام الكواشف الوميضية للكشف عن جسيمات بيتا

على الرغم من أن جميع أنوع المواد الوميضية تعتبر حساسة بالنسبة لجسيمات بيتا بدرجات متفاوتة، إلا أنه يفضل دائما استخدام المواد الوميضية العضوية للكشف عن هذه الجسيمات. ويرجع السبب في ذلك إلى الآتي:

1- صعوبة استخدام بلورة يوديد الصوديوم المنشطة بالثاليوم NaI(Tl) للكشف عن الإلكترونات نظرا لضرورة عزل هذه البلورة عن الهواء الجوي بواسطة حافظة محكمة القفل حتى لا تتميع، وبالتالي صعوبة عمل النافذة.
2- يعتبر الوزن الذري الكبير لبلورة يوديد الصوديوم من أهم عيوبها بالنسبة للكشف عن جسيمات بيتا حيث ينتج عنه نسبة عالية من تشتت هذه الجسيمات للخلف (backscattering) في مادة البلورة.

د- استخدام الكواشف الوميضية للكشف عن النيوترونات

يوجد في الوقت الحالي عدة مواد وميضية للكشف عن النيوترونات. ويتم الكشف عنها خلال الجسيمات المشحونة الناتجة عن تفاعل النيوترونات مع المادة الوميضية. وبالنسبة للنيوترونات الحرارية تستخدم أي من مادتي الليثيوم Li أو البور B ، حيث تتفاعل النيوترونات الحرارية مع أي من هاتين المادتين مع انبعاث جسيمات ألفا بطاقة كبيرة. كما أن المقطع العرضي لهذه التفاعلات يعتبر كبيرا، مما يؤدي إلى زيادة كفاءة الكاشف.

لذلك، تستخدم عادة بلورة يوديد الليثيوم المنشطة بالثاليوم LiI(Tl) للكشف عن النيوترونات الحرارية. وتتميز هذه البلورة بخواص مشابهة لخواص بلورة يوديد الصوديوم. وفي بعض الكواشف النيوترونية الأخرى تستخدم بلورة مكونة من خليط من مركبات الليثيوم أو البور مع كبريتيد الخارصين.

أما بالنسبة للنيوترونات السريعة فإنه يفضل الكشف عنها باستخدام البروتونات المرتدة عند تشتت هذه النيوترونات على الهيدروجين. ولهذا الغرض تجهز البلورة في شكل خليط من حبيبات كبريتيد الخارصين ZnS والشمع لاحتوائه على نسبة عالية من الهيدروجين. وتعتبر هذه البلورة من أنسب البلورات للكشف عن النيوترونات السريعة.

وتوجد عدة أنواع من كواشف النيوترونات السريعة التي تعتمد أساسا في عملها على التفاعل (n , γ) . ويستخدم لهذا الغرض عدة مواد ذات مقاطع عرضية عالية لهذا النوع من التفاعل مثل الإنديوم والذهب حيث تحدث بينها وبين النيوترونات السريعة التفاعلات التالية:

$$^{115}_{49}In + n \longrightarrow {}^{116}_{49}In + \gamma$$

$$^{197}_{79}Au + n \longrightarrow {}^{198}_{79}Au + \gamma$$

وتعتبر المواد الناتجة عن التفاعل وهي الإنديوم ^{116}In والذهب ^{198}Au مصادر مشعة لجسيمات بيتا. وبقياس النشاط الإشعاعي لهذه المصادر يمكن الكشف عن النيوترونات السريعة وتحديد عددها.

الكواشف شبه الموصلة

The semiconductor (solid state) detectors

حدث في السنوات الأخيرة تحول كبير من الكواشف الغازية والوميضية إلى الكواشف المجهزة من أشباه الموصلات خاصة في مجال البحوث النووية عند الطاقات المنخفضة. ويرجع السبب في ذلك إلى المزايا العديدة التي تتمتع بها الكواشف شبه الموصلة التي سيرد ذكرها. وهناك تشابه كبير بين عمل الكواشف المجهزة من أشباه الموصلات وعمل غرفة التأين. ففي غرفة التأين تؤين الإشعاعات جزيئات الغاز مكونة بذلك أزواجا إلكترونية أيونية، يتم تجميعها والحصول بالتالي على نبضة جهد كهربائية. أما في الكواشف المجهزة من أشباه الموصلات فتؤين الإشعاعات ذرات المادة الصلبة شبه الموصلة مثل السليكون أو الجرمانيوم، مكونة بذلك أزواجا إلكترونية – ثقبية، يمكن تجميعها والحصول عليها ، بالتالي، منها على نبضة كهربائية. وتبلغ القيمة المتوسطة للطاقة اللازمة لتكوين زوج إلكتروني – ثقبي في مادة السيليكون أو الجرمانيوم حوالي 3 إلكترون فولت، (في حين أن هذه القيمة حوالي 35 إ.ف في الهواء). لذلك، فإن الشحنة المتكونة عن الجسيم النووي نفسه في السيليكون أو الجرمانيوم تبلغ تقريبا عشرة أضعاف الشحنة المتكونة في الهواء مما يؤدي بدوره إلى قدرة تحليلية فائقة للكواشف المجهزة من أشباه الموصلات، وبالتالي إلى دقة تحديد طاقة الجسيمات النووية. ونظرا لأن مدى الجسيمات النووية في المواد الصلبة أقل بكثير منه في الغازات فإنه يمكن استخدام كواشف من مواد صلبة بأعماق صغيرة. ويؤدي هذا بدوره إلى صغر الزمن اللازم لتجميع الشحنات الكهربائية، وبالتالي إلى قدرة تحليلية زمنية عالية بالنسبة لهذا النوع من الكواشف.

ثنائي الملتقى الثقبي الإلكتروني

The P-N junction diode

تتميز ذرات المواد رباعية التكافؤ مثل السيليكون والجرمانيوم بوجود أربعة إلكترونات في المدار الخارجي. وعندما تكون مادة

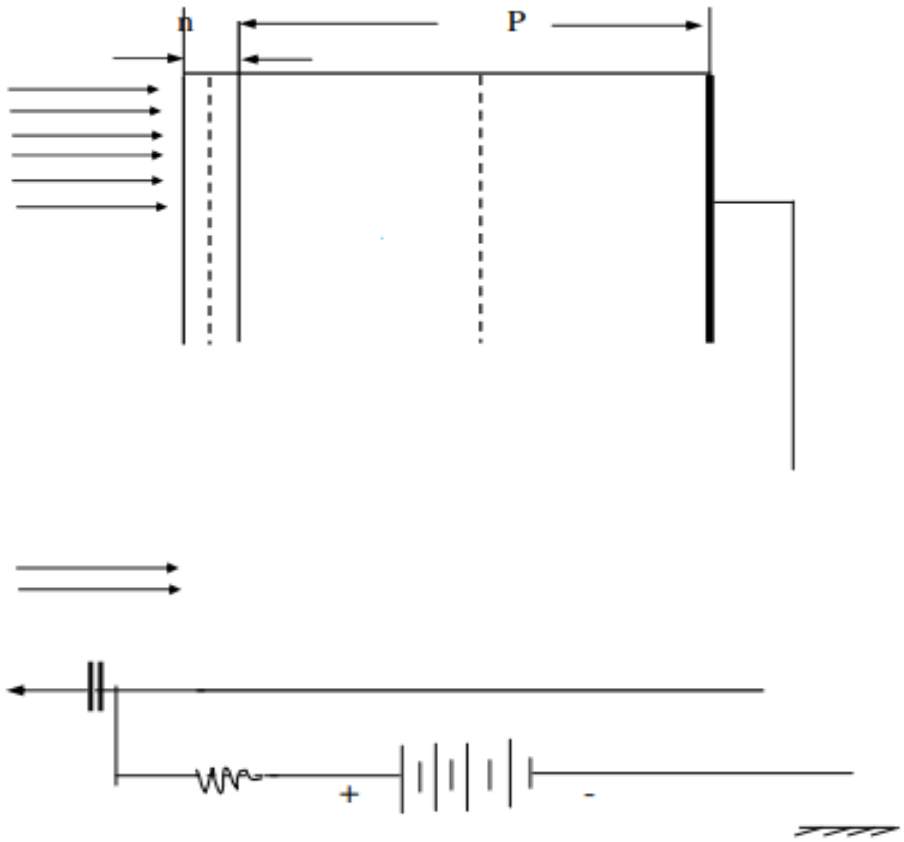
السيليكون أو الجرمانيوم في حالة متبلورة تنتظم ذرات المادة في نظام هندسي بحيث ترتبط كل ذرة مع أربع ذرات متجاورة بواسطة إلكترونات التكافؤ الأربعة. لذلك، فإنه عند درجة حرارة الصفر المطلق يكون كل إلكترون من إلكترونات التكافؤ الأربعة مرتبطا في الوقت نفسه بذرتين، هما الذرة الأم والذرة المجاورة. ولا توجد، بذلك، أية إلكترونات حرة في المادة. لذلك تكون المادة عازلة تماما. ولتحرير أحد الإلكترونات الأربعة المرتبطة بالذرتين في البلورة يجب منحه طاقة تصل إلى حوالي 0.72 إ.ف في حالة الجرمانيوم وحوالي 1.12 إ.ف في حالة السليكون. وعند وجود البلورة في درجة حرارة الغرفة أي 25 °م (298° كلفين) تكتسب بعض إلكترونات التكافؤ في المادة هذه القيمة المطلوبة من الطاقة، فتتحرر هذه الإلكترونات وتصبح حرة تاركة في مكانها ثقبا موجبا. وهكذا، يتكون زوج إلكتروني _ثقبي يؤدي إلى التوصيل الكهربائي للمادة. ولكن عدد الأزواج الإلكترونية الثقبية في المادة يكون قليلا للغاية ولا يتجاوز زوجا واحدا لكل 10^{11} ذرة للجرمانيوم وزوجا واحدا لكل 10^{13} ذرة سليكون. لذلك، تكون التوصيلة الكهربائية للمادة النقية شبه الموصلة صغير، أي أن مقاومتها تكون عالية. وتجدر الإشارة إلى أن مقاومة السليكون تكون أعلى عادة بحوالي مائة مرة من مقاومة الجرمانيوم، عند درجة حرارة الغرفة نظرا لأن عدد الأزواج الإلكترونية الثقبية المتكونة في حالة السليكون تكون أقل منها في حالة الجرمانيوم. وتسمى الأزواج الناتجة عن المادة النقية بحاملات الشحنة الذاتية.

ولزيادة عدد الحاملات الحرة وبالتالي زيادة توصيلية البلورة يمكن إضافة نسبة صغيرة للغاية من شوائب خماسية التكافؤ إلى مادة السليكون أو الجرمانيوم النقي. فعند إضافة نسبة من ذرات خماسية التكافؤ مثل الفسفور P (أو الزرنيخ As) إلى السليكون (أو الجرمانيوم) النقي ترتبط ذرة الفسفور (أو الزرنيخ) في البلورة بأربعة إلكترونات مع أربع من ذرات السليكون مكونة بذلك الروابط التساهمية الأربعة المطلوبة، ويبقى الإلكترون الخامس غير مرتبط مع أية ذرة فيصبح إلكترونا حرا ويشترك في التوصيل الكهربائي. وتعرف الذرات خماسية التكافؤ في هذه الحالة بالذرات الواهبة (doner) ، حيث أنها وهبت

إلكترونا حرا للبلورة. وتسمى المادة شبه الموصلة في هذه الحالة بالمادة الإلكترونية (n-type-material) لأن الإلكترونات تكون هي الحاملات الغالبية للشحنة، أما الثقوب فلا يوجد منها إلا الذاتية وتعرف عندئذ بالحاملات الأقلية.

كذلك، يمكن زيادة التوصيل الكهربائي للمادة وذلك بغرس شوائب من مواد ثلاثية التكافؤ كالبور B أو الجاليوم Ga. فعند تكوّن البلورة ذات الشوائب ترتبط ذرة البور بإلكتروناتها التكافؤية الثلاثة مع ثلاث ذرات سليكون مجاورة مكونة بذلك ثلاث روابط تساهمية. ولتكوين الرابطة الرابعة تستأثر ذرة البور بأحد الإلكترونات من إحدى ذرات السليكون المجاورة. وبذلك، يتكون في ذرة السليكون المجاورة ثقب موجب الشحنة. وتسمى ذرات المادة الثلاثية التكافؤ في هذه الحالة بالذرات المتقبلة (acceptor) حيث أنها تستقبل إلكترونا من كل ذرة مجاورة مكونة بذلك ثقب. وتعرف المادة شبه الموصلة في هذه الحالة بالمادة ثقبية التوصيل (p-type material) حيث أن الثقوب تمثل الحاملات الغالبية في هذه المادة، أما الإلكترونات فلا يوجد منها إلا الذاتية وهي بذلك تمثل الحاملات الأقلية.

وتضاف الشوائب عموما بنسب صغيرة جدا (حوالي ذرة واحدة لكل مليون ذرة سليكون أو جرمانيوم نقي). وعند إضافة الشوائب الخماسية إلى جزء من المادة النقية والشوائب الثلاثية إلى الجزء الآخر من نفس القطعة من المادة النقية يتكون ما يعرف باسم ثنائي الوصلة أو ثنائي الملتقى (The P-N junction diode) كالمبين في شكل (٢٣). وعند الملتقى تنتقل إلكترونات التوصيل الحرة من المادة الإلكترونية إلى المادة الثقبية (بظاهرة الانتشار) تاركة خلفها الأيونات الموجبة. كما تنتقل الثقوب الموجبة (بالظاهرة نفسها) من المنطقة الثقبية إلى المنطقة



شكل (٢٣)
ثنائي الوصلة (الكواشف شبه الموصلة)

الإلكترونية، تاركة خلفها الأيونات السالبة. وبذلك، تتكون على جانبي الملتقى منطقة تعرف باسم منطقة الاستنفاد (The depletion layer) تكون خالية تماما من الشحنات الكهربائية الحرة (سواء الإلكترونات أو الثقوب). وتعتبر هذه المنطقة عازلة تماما ويتكون فيها مجال كهربائي شدته E ناتج عن الأيونات الموجب والسالبة غير القابلة للحركة لارتباط كل منها بأربعة روابط تساهمية مع أربعة ذرات مجاورة. وفي حالة عدم توصيل جهد كهربائي بطرفي الثنائي يتراوح عرض منطقة الملتقى بين 10^{-3}، 10^{-5} سم، وذلك تبعا لنسب تركيز الشوائب. فكلما زاد تركيز الشوائب قل العرض والعكس صحيح. وعند توصيل جهد مباشر (أي القطب الموجب لمنبع الجهد بالمادة الثقبية والقطب السالب بالمادة الإلكترونية) بين طرفي الثنائي يقل عرض هذه المنطقة ويصبح مساويا للصفر عند حوالي 0.5 فولت، ويمر عندئذ، تيار كبير يعرف بالتيار المباشر. أما عند توصيل جهد عكسي بطرفي الثنائي (أي عكس اتجاه القطبية) يزداد عرض هذه المنطقة. ويمر تيار صغير جدا يعرف بالتيار العكسي للثنائي. ولا يعتمد التيار العكسي على قيمة الجهد العكسي وإنما تكون قيمته ثابتة (طالما كان الجهد العكسي أعلى من حوالي 0.5 فولت)، وإنما يعتمد التيار العكسي على درجة الحرارة، حيث أنه ناتج عن الإلكترونات والثقوب الذاتية الناتجة عن المادة شبه الموصلة النقية. لذلك، يكون التيار العكسي في حالة الجرمانيوم أعلى بكثير منه في حالة السليكون. ويتم توصيل الجهد المباشر، كما ذكر، بتوصيل القطب

الموجب لمنبع الجهد بالمادة الثقبية والقطب السالب بالمادة الإلكترونية، أما الجهد العكسي، فهو كالمبين في شكل (٢٣) حيث يوصل القطب الموجب بالمادة الإلكترونية والقطب السالب بالمادة الثقبية.

كواشف السليكون The silicon detectors

كاشف السليكون عبارة عن ثنائي ملتقى ثقبي إلكتروني. ويكون عرض المادة الإلكترونية أقل من 1 ميكرومتر حتى لا تفقد الإشعاعات الساقطة جزءا كبيرا من طاقاتها فيه. ونظرا لصغر عرض المادة الإلكترونية يجب أن يكون تركيز الشوائب الخماسية فيها عاليا. وأما المادة الثقبية فيمكن أن تمتد لعمق يصل إلى عدة ملليمترات. ويمكن إيجاد عرض منطقة الملتقى d عند تحييز الكاشف بجهد عكسي (أي توصيله بجهد عكسي) من العلاقة التالية:

$$d = d_n + d_p \qquad ٢٩$$

حيث:

$$d_p = \varepsilon (V)^{1/2} / 2\pi e N_P \quad , \quad d_n = \varepsilon (V)^{1/2} / 2\pi e N_n$$

وحيث: V هي جهد التحييز العكسي، ε ثابت العزل للمادة، e شحنة الإلكترون أو الثقب، N_n هي كثافة الإلكترونات في المنطقة الإلكترونية (أي عدد الإلكترونات الحرة لوحدة الحجم)، N_p هي كثافة الثقوب في المنطقة الثقبية.

وتعتبر منطقة الاستنفاد هي المنطقة الحساسة للكاشف. ويتناسب عدد الأزواج الإلكترونية الثقبية الناتج في هذه المنطقة عن الجسيم النووي الساقط تناسبا طرديا مع الطاقة التي يفقدها هذا الجسيم في هذه المنطقة. ويتم سحب هذه الأزواج وتجميعها تحت تأثير المجال الكهربائي لمنطقة الاستنفاد، حيث تتجه الإلكترونات الناتجة إلى المنطقة الإلكترونية وتتجه الثقوب إلى المنطقة الثقبية، مما يؤدي إلى مرور تيار كهربائي وظهور نبضة كهربائية على مخرج الكاشف.

وفي حالة اجتياز الجسيم النووي لمنطقة الاستنفاد ودخوله إلى المنطقة الثقبية فإنه يولد، كذلك، أزواجا إلكترونية ثقبية في هذه المنطقة. إلا أن هذه المنطقة لا تحتوي إلا على عدد قليل جدا من الإلكترونات الحرة وعدد كبير جدا من الثقوب. لذلك، تتحرك الثقوب كعادتها في هذه المنطقة ولكن الإلكترونات المتولدة يمكن أن تعيد اتحادها مع العدد الكبير من الثقوب فيضيع جزء كبير من التيار. وبالتالي لا تتناسب الشحنة المتجمعة مع الطاقة التي يفقدها الجسيم في هذه المنطقة. كذلك الأمر بالنسبة للمنطقة الإلكترونية. فعند مرور الجسيم النووي بها تتولد الأزواج الإلكترونية الثقبية. ولما كانت الثقوب في هذه المنطقة عبارة عن أقلية والإلكترونات هي الغالبية فإنه يمكن أن تعيد الثقوب المتكونة اتحادها مع الإلكترونات، وبالتالي يُفقد عدد كبير من هذه الثقوب ويضيع جزء من التيار. لذلك، يجب أن يكون عرض المنطقة الإلكترونية صغيرا للغاية، وأن يكون عرض منطقة الاستنفاد كافيا بحيث يتوقف الجسيم النووي قبل الوصول إلى نهايتها، وذلك للمحافظة على التناسب بين طاقة الجسيم النووي وعدد الأزواج الإلكترونية الثقبية المتجمعة، أي بين طاقة الجسيم والنبضة الكهربائية الناتجة على مخرج الكاشف.

ويعتمد الزمن اللازم لتجميع الأزواج الإلكترونية الثقبية على عدة عوامل، مثل عرض منطقة الاستنفاد وبالتالي على الجهد العكسي، وعلى كثافة الشوائب. وتتحرك كل من الثقوب والإلكترونات تحت تأثير المجال الكهربائي لمنطقة الاستنفاد، وكذلك بفعل الحركة الحرارية العشوائية. فالسرعة الانسياقية تحت تأثير المجال E عبارة عن:

$$v = \mu\mu E$$

وهي تختلف لكل من الثقوب والإلكترونات لاختلاف الحركية μ لكل منهما. والسرعةالانسياقية لأي من الثقوب والإلكترونات v لا تتعدى 10^{7} سم/ثانية مهما زاد الجهد. فإذا كان عرض منطقة الاستنفاد حوالي 0.1 سم فإن الزمن اللازم لتجميع الشحنة هو 10^{-8} ثانية، وهذا هو الحد الأدنى لزمن تجميع الشحنة. وعموما، يتوقف زمن نمو التيار من الصفر إلى أقصى قيمة له على عدة عوامل مثل السعة الداخلية للثنائي

(للكاشف) ومقاومته الداخلية. ويتراوح هذا الزمن الأخير بين 3×10^{-9} إلى 10^{-7} ثانية للكواشف شبه الموصلة المختلفة.

ويستخدم هذا النوع من الكواشف المجهز أساسا من مادة السليكون للكشف عن الجسيمات المشحونة الثقيلة كالبروتونات وجسيمات ألفا. وعموما، لا تستخدم مادة الجرمانيوم في هذا النوع من الكواشف نظرا لأن مقدار التيار العكسي الناتج عن الحاملات الأقلية في الجرمانيوم كبير ويقترب من التيار الناتج عن الجسيم النووي. وعند استعمال الجرمانيوم في تجهيز مثل هذه الكواشف فإنه يجب خفض حرارته إلى حوالي 77° كلفين (أي حوالي 196 تحت الصفر المئوي) حتى لا يتكون عدد كبير من الحاملات الذاتية، وبالتالي حتى يمكن إهمال قيمة التيار العكسي بالنسبة للتيار الناتج عن الجسيم النووي.

كواشف الجرمانيوم – ليثيوم

Germanium -lithium detectors

للكشف عن جسيمات بيتا وإشعاعات جاما فإنه يفضل استخدام مادة الجرمانيوم نظرا لكثافتها العالية وكبر عددها الذري. كذلك، يجب أن يكون عرض المنطقة الحساسة (منطقة الاستنفاد) كبير نسبيا (من 1–3مم) حتى تتوقف خلالها جسيمات بيتا أو الإلكترونات الناتجة عن الأثر الكهروضوئي لإشعاعات جاما. ولهذا الغرض يتم غرس ذرات الليثيوم في مادة الجرمانيوم، وذلك لزيادة مقاومة المادة شبه الموصلة. فعند غرس ذرات الليثيوم في مادة الجرمانيوم من النوع الثقبي يقل عدد الثقوب الغالبية فيها، وبذلك تصبح توصيليتها قريبة من توصيلية المادة النقية، مما يؤدي بدوره إلى زيادة عرض منطقة الاستنفاد حتى عند الجهود العكسية الصغيرة. ويتم غرس ذرات الليثيوم بطرق تكنولوجية مختلفة باستخدام جهود معينة ودرجات حرارة محددة لفترات زمنية طويلة (حوالي عشرة أيام متصلة لإعداد 2 سم من الجرمانيوم المغروس بالليثيوم).

وتجدر الإشارة إلى أن زيادة حجم المنطقة الحساسة (منطقة الاستنفاد) تؤدي بالتالي إلى زيادة التيار العكسي. وحيث أن هذا التيار

يعتمد أساسا على درجة حرارة المادة شبه الموصلة فإنه يجب خفض قيمتها، وذلك بتبريد كاشف الجرمانيوم حتى درجات حرارة منخفضة (حوالي –196 ْم). بالإضافة إلى ذلك، فإنه عند ترك الجرمانيوم المغروس بالليثيوم عند درجة حرارة الغرفة، فإنه حتى في حالة عدم توصيل الجهد العكسي إليه يمكن أن يحدث انسياق لذرات الليثيوم فتتحرك نحو السطح. وبالتالي، تفقد هذه الذرات من الجرمانيوم بفعل حركنها الحرارية ويتلف الكاشف في الحال. وتعتبر هذه المشكلة في غاية الخطورة بالنسبة للكواشف المجهزة من الجرمانيوم عنها بالنسبة لتلك المجهزة من السليكون. ولهذا يجب المحافظة على الكاشف باستمرار تحت درجة حرارة منخفضة (196م تحت الصفر) أي تحت تأثير حرارة النيتروجين السائل. كذلك، فإنه من المفضل الإبقاء على الكاشف تحت تأثير جهد عكسي مع التبريد بشرط ألا يتغير هذا الجهد العكسي تغيرا مفاجئا بالزيادة أو النقص.

كواشف الجرمانيوم عالية النقاء

The hyper pure germanium detector

بسبب سرعة تلف كواشف الجرمانيوم ليثيوم بمجرد نفاذ النيتروجين السائل من وارتفاع درجة حرارته قرب درجة حرارة الغرفة وبعد أن تمكن العلماء من تحضير أحجام مختلفة من بلورات الجرمانيوم عالية النقاء وبالتالي من زيادة مقاومة الجرمانيوم المحيز عكسيا لخفض التيار العكسي، حلت كواشف الجرمانيوم عالية النقاء محل كواشف الجرمانيوم ليثيوم. ولم تعد درجة الحرارة المنخفضة (أي درجة حرارة النيتروجين السائل) مطلوبة إلا قبل توصيل جهد التحييز العكسي للكاشف. أي قبل تشغيل الكاشف بعدد محدود من الساعات.

أهم مزايا الكواشف شبه الموصلة

تتميز الكواشف المجهزة من أشباه الموصلات بالمقارنة بالكواشف الغازية والوميضية بعدة مزايا أهمها ما يلي:

أ- قدرة تحليلية فائقة للطاقة حيث تصل القدرة التحليلية لكواشف الجرمانيوم ليثيوم إلى حوالي 1.7 ك.إ.ف بالنسبة لإشعاعات جاما ذات الطاقة 1332 ك.إ.ف والصادرة من نظير الكوبالت60 الذي يعتبر بمثابة معيار لهذه الخاصية. أما كواشف الجسيمات المشحونة الثقيلة والمجهزة من السليكون فتصل قدراتها التحليلية إلى حوالي 0.3 % . وهذا أفضل بكثير من القدرة التحليلية لغرفة التأين (وهي أفضل الأجهزة الغازية من حيث قدرتها على فصل الطاقات المختلف) ومن القدرة التحليلية للكواشف الوميضية. ويرجع السبب في ذلك إلى زيادة عدد الأزواج الإلكترونية الثقبية بحوالي عشر مرات عن الأزواج الإلكترونية الأيونية الناتجة في غرفة التأين مما يؤدي إلى نقص التراوح الإحصائي النسبي في عدد الأزواج. كذلك، فإنه نتيجة لصغر حجم المنطقة الحساسة للكاشف شبه الموصل فإن التراوح الناتج عن احتمال فقد بعض الأزواج ينخفض انخفضا ملموسا.

ب- وجود علاقة خطية بين طاقة الجسيم النووي واتساع النبضة الكهربائية (أي أقصى ارتفاع لها) الناتجة عنه، وذلك ضمن مدى عريض من الطاقات طالما كان عرض المنطقة الحساسة كافيا.

ج- قصر زمن النبضة الكهربية الناتجة عن الجسيم بسبب صغر حجم المنطقة الحساسة. ويؤدي ذلك إلى إمكانية عد وتحليل معدل عال للجسيمات يصل إلى حوالي 10^6 جسيم/ثانية.

د- إمكانية تغيير عرض المنطقة الحساسة وذلك بتغيير الجهد العكسي.

هـ- إمكانية فصل الأنواع المختلفة من الجسيمات المشحونة الثقيلة عن بعضها. فعندما تحتوي الجسيمات الساقطة على البروتونات وجسيمات ألفا مثلا، يمكن اختيار جهد عكسي صغير (في حدود عدد فولتات)، بحيث لا يزيد عرض المنطقة الحساسة عن مدى جسيمات ألفا. ولكن

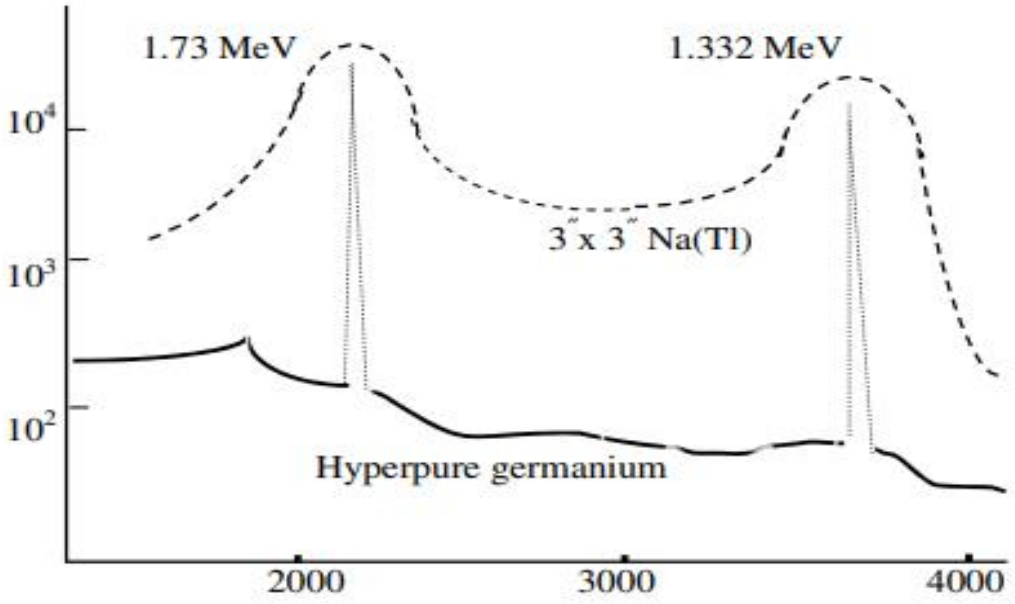
البروتونات تمر من هذا العرض دون أن تفقد جزءا ملموسا من طاقها، فيتم بذلك تسجيل جسيمات ألفا دون البروتونات.

و- صغر حجم الكاشف وسهولة التعامل به.

ز- عدم الحساسية بالنسبة لتغير المجال المغناطيسي.

ح- إمكانية إعداد الكاشف على أشكال هندسية مختلفة كالكواشف ذات الثقب المحوري (annular detectors)، وذلك لإجراء القياسات عند الزوايا القريبة من 180°.

ويمكن المقارنة بين القدرة التحليلية للكواشف المجهزة من أشباه الموصلات والكواشف الوميضية بالنظر إلى شكل (٢٤)حيث يظهر طيف إشعاعات جاما الصادرة من نظير الكوبالت 60 (والذي يشع إشعاعات جاما بطاقتين هما 1173 ك.إ.ف ، 1332 ك.إ.ف) باستخدام كاشف جرمانيومي وآخر وميضي. ويتضح من هذا الشكل القدرة



شكل (٢٤)
المقارنة بين القدرة التحليلية لكواشف

التحليلية العالية للكواشف المجهزة من أشباه الموصلات بالمقارنة بالكواشف الوميضية.

ومن جهة أخرى توجد للكواشف المجهزة من أشباه الموصلات بعض العيوب الأساسية. وتتلخص هذه العيوب في الآتي:

أ- عدم القدرة على استخدامها للكشف عن الجسيمات ذات المدى الطويل أي عند الطاقات العالية.

ب- قصر عمر الكاشف نسبيا بسبب حدوث تغيرات في تركيب المادة وخاصة عند السطح، وكذلك لحدوث تلف إشعاعي لها (radiation damage) نتيجة تعرضها لإشعاعات كثيفة، خاصة النيوترونات.

ج- ضرورة التبريد وعدم إمكانية التشغيل عند درجات الحرارة المرتفعة.

د- زيادة زمن النبضة بالنسبة للكواشف ذات الأحجام الكبيرة.