الباب الخامس

الكواشف الإشعاعية

Radiation Detectors

1- تقديم.

2- الكواشف الغازية.

3- كواشف أشباه الموصلات.

4- الكواشف الوميضية.

* * *

1- تقديم

للكواشف الإشعاعية وظائف مهمة:

- تقدير حدود الأمان الإشعاعي radiation safety للأفراد والأماكن.

- للدراسات الأكاديمية والتطبيقية المختلفة كالتفاعلات النووية والدراسات البيئية مثلا.

- تشارك كجزء مهم من وحدات التصوير النووي المستخدمة للأغراض التشخيصية وفي الوحدات العلاجية.

سينصب اهتمامنا هنا على الاستخدام في وحدات التصوير النووي.

بصفة عامة، تشتمل وحدة القياس المتكاملة على ثلاث عمليات أساسية: **الكشف – المعالجة الإلكترونية – عرض النتائج**. ينصب تركيزنا في هذا الباب على البند الأول ونرجئ حديثنا عن البندين الآخرين إلى الباب التالي، غير أننا بهدف استكمال الموضوع نشير هنا في كلمات مختصرة إلى كل من العمليات الثلاث قبل الولوج في عمليات الكشف تفصيلًا .

1-1 الكشف Detection

حيث تتفاعل الإشعاعات الساقطة (جسيمات أو فوتونات) مع مادة الكشاف (غازية – سائلة – صلبة) عندما تمر خلالها فتنتقل طاقتها أو جزء منها إلى ذرات أو إلى جزيئات المادة فتحدث عمليات تأين أو استثارة لها. في حالة فوتونات جاما تقوم الإلكترونات الناتجة من التأثيرات المختلفة (التأثير الكهروضوئي – تأثير كمبتون – إنتاج الزوج) بعمليات التأين والاستثارة. يحدث التأين عندما تكون طاقة الشعاع الساقط كافية لإخراج إلكترون مداري (أو أكثر) من بعض ذرات أو جزيئات الوسط الذي يتحرك فيه الشعاع لينتج زوجًا أيونيًّا ion pair، وتحدث الاستثارة عندما يضطرب الترتيب الإلكتروني لتتغير الذرة أو الجزيء من الحالة الأرضية إلى الحالة المستثارة. تتضمن عملية الكشف الإشعاعي كل من العمليتين غير أن التأين هو العملية الأساسية السائدة، ومن هنا جاءت التسمية: **الإشعاعات المؤينة** ioizing radiation.

الكواشف أنواع، يتوقف ذلك على:

نوع الإشعاعات المراد الكشف عنها (جسيمات مشحونة ، فوتونات جاما ، فوتونات أشعة سينية ، نيوترونات) - طاقة الجسيمات أو الفوتونات - شدة الإشعاعات - شكل المصدر المشع.

أهم الإشعاعات التي كثيرًا ما نقابلها في مجال الطب النووي والتي يجب الكشف عنها هي أشعة جاما والأشعة السينية x rays (غالبًا ما تنتج الأشعة السينية بصورة غير مباشرة من خلال بعض التأثيرات مثل تأثير كمبتون) والنيوترونات وأشعة بيتا.

وأهم أنواع الكواشف:

الكواشف الغازية Gas-Filled Detectors:

تلك التي يعتمد عملها على تأين الغازات، ومن ثم على قياس التيار الكهربي الناتج عن الإلكترونات المحررة نتيجة عملية التأين، حيث تتوقف شدة هذا التيار على كثافة الإشعاع، ومن بين أنواع الكواشف الغازية: غرفة التأين ionization chamber، والعداد التناسبيproportional counter، وأنبوب (عداد) جيجر – مولر – Geiger. Mueller tube

الكواشف الوميضية Scintillation Detectors:

حيث يتم استثارة ذرات أو جزيئات الوسط (الصلب أو السائل) نتيجة انتقال الإشعاعات المارة خلاله وعند عودة هذه الذرات أو الجزيئات إلى حالة الاستقرار (الحالة الأرضية ground state) تنطلق الفوتونات (الوميض) والكواشف الوميضية هي الأكثر استخدامًا في أجهزة التصوير النووي، وسيأتي عنها الحديث تفصيلا.

هناك أيضا العديد من الأجهزة الشخصية لقياس الجرعة والمستخدمة لأغراض الأمان الإشعاعي وتبني فكرتها على بعض التأثيرات الفيزيائية أو الكيميائية، ومن أمثلة هذه الأجهزة **شارة الفيلم الحساس** film badge **ومقياس الجرعة الجيبي** pocket dosimeter.

2-1 المعالجة الإلكترونية

تتحول طاقة الإشعاعات المنبعثة من المواد المشعة (جسيمات أو فوتونات) من خلال بعض التأثيرات الفيزيائية (والتي سنعرض لها تفصيلًا) إلى إشارة (نبضة) كهربية electric signal، حيث يتم ذلك في الكشاف. غالبًا ما تكون تلك النبضة في صورتها الأولية صغيرة أو مشوهة فضلًا عن كونها غير مفيدة في حالتها «الخام» تلك ومن ثم يجب معالجتها إلكترونيًا، ويتم ذلك من خلال عمليات ثلاث:

التكبير amplification: فغالبًا ما تكون الإشارة الكهربية التي تم الحصول عليها ضعيفة، ومن ثم يلزم تكبيرها حتى يمكن قياسها.

التصنيف selection: في الكواشف الوميضية يمكن تصنيف النبضات من حيث ارتفاع النبضة (سعتها).

العد counting: حيث يتم حصر النبضات من الأحجام المختلفة خلال فترة زمنية، ومن ثم يمكن حساب معدل العد count rate.

سنعرض لهذه العمليات الثلاث تفصيلا من خلال معالجتنا لموضوع المركبات الإلكترونية لنظم الكشف عن الإشعاعات ، موضوعنا في الباب التالي:

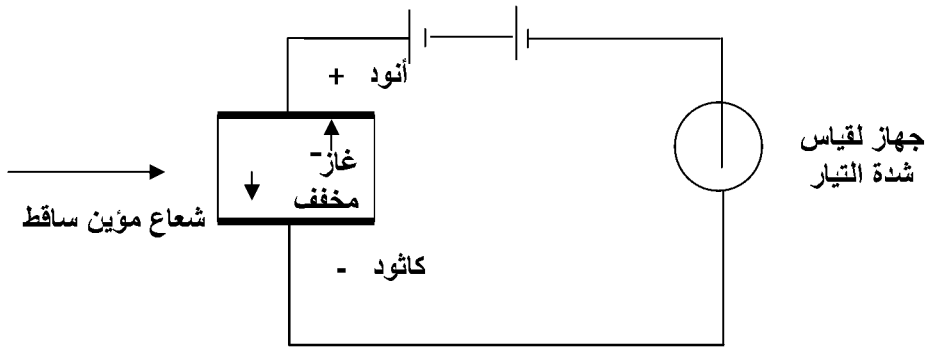
الكواشف Detectors

بالرغم من تفرد الكشاف الوميضي بأهمية خاصة في مجال الطب النووي، فإنه من المفيد أن نعرض ببعض التفصيل لباقي الأنواع حيث إنها مازالت تستخدم في بعض التطبيقات.

2 - الكواشف الغازية

خواص عامة:

يُسمى هذا النوع من الكواشف، كواشف التأين ioinzation detectors، يوضح الشكل (1 – 5) الأسس العامة التي تعمل بها هذه الكواشف، حيث ينحصر حجم من الغاز المخفف بين لوحين، electrodes. يُسمى اللوح المتصل بالطرف الموجب للمصدر أنود anode والذي يتصل بالطرف السالب كاثود cathode. يمكن استبدال هذان اللوحان



شكل (1-5). الكواشف الغازية، تجمع الشحنات الكهربية المحررة بواسطة الشعاع المؤين بواسطة اللوحين

بأشكال أخرى، بزوج من أسلاك أو بأسطوانتين متحدتي المركز، أو أسطوانة وسلك، وهكذا. الغاز بين اللوحين في الظروف العادية يكون عازلًا، ولكن بعد تأينه نتيجة مرور الشعاع المؤين الصادر من مصدر مشع تنطلق الإلكترونات متجهة نحو اللوح الموجب والأيونات الموجبة نحو اللوح السالب مما يتسبب في مرور تيار كهربي لحظي صغير.

1-2 غرفة التأين
Ionization Chamber

عبارة عن إناء يأخذ أشكالا وأحجاما مختلفة، في الغالب مملوء بالهواء الجوي وفي بعض الأحيان بأحد الغازات الخاملة rare gases، وذلك تحت ضغط يختلف باختلاف الغرض ويوجد داخل الغرفة لوحان معدنيان يتصلان بمصدر للجهد الكهربي (شكل (1-5))، وعند مرور الإشعاعات النووية إلى داخل الغرفة من خلال نافذة خاصة مغطاة بلوح رقيق من الميكا يحدث التأين وتنجذب الأيونات الموجبة نحو اللوح المعدني المتصل بالقطب السالب، وتنجذب الإلكترونات نحو اللوح المتصل بالقطب الموجب، ويؤدي ذلك إلى تولد تيار كهربي تتناسب شدته مع طاقة الإشعاعات أو الجسيمات الساقطة، ولاستخدام غرفة التأين بكفاءة يجب أن يكون فرق الجهد بين اللوحين من الكبر الذي يضمن جمع أغلب الإلكترونات والأيونات التي تولدت نتيجة التأين الإشعاعي.

ما هي قيمة التيار الذي يمكن أن يتولد في عملية كتلك؟ للإجابة على هذا نفترض أن جسيما طاقته مليون إلكترون فولت يخترق غرفة التأين، وأن طاقته كلها انتقلت إلى ذرات الغاز، وأن الطاقة اللازمة لتأين ذرة واحدة (لكي ينطلق منها إلكترون واحد) هي 33

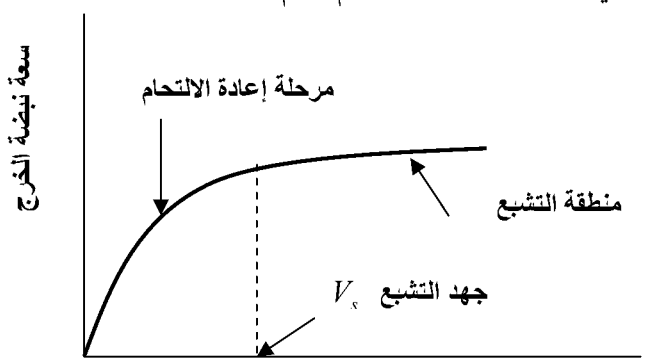
إلكترون فولت، فيكون إذن عدد الأيونات (والإلكترونات) المتكونة هو $30000 \approx 33 / 10^6$؛ ونظرًا لأن شحنة الإلكترون هي 1.6×10^{-19} كولوم، فإن الشحنة المتكونة من العملية السابقة تكون 4.8×10^{-15} كولوم وإذا افترضنا أنه اندفع نحو الغرفة ألف جسيم في الثانية الواحدة فإن الشحنة المتكونة في الثانية تكون 4.8×10^{-12} كولوم، ونظرًا لأن شدة التيار الكهربي عبارة عن المعدل الزمني لتغير الشحنة أو بعبارة أخرى عدد الشحنات التي تمر خلال وحدة الزمن (الثانية) فإن شدة التيار المتولد نتيجة مرور 1000 جسيم في الثانية تكون:

$$4.8\times10^{-12}\,\text{cou}/\text{sec} = 4.8\times10^{-12}\,\text{Amper}$$

وتلك قيمة صغيرة جدًّا لكي تقاس بدون خطأ ملحوظ فيجب أن تكبَر من خلال استخدام مكبر للتيار المستمر direct current amplifier، ويُستخدم جهاز حساس لقياس القيم الصغيرة لشدة التيار يُسمى إلكتروميتر electrometer.

من الأهمية بمكان التعرض بشيء من التفصيل للعلاقة بين شدة التيار المتولد وفرق الجهد على لوحي الغرفة:

بزيادة فرق الجهد بين لوحي غرفة التأين التي تتعرض لجسيمات أو إشعاعات نووية من مصدر ثابت الشدة يتزايد تيار التأين في البداية بصورة خطية تقريبا، (أي تمثل العلاقة بين شدة التيار وفرق الجهد في هذا المدى بخط مستقيم)، ثم



شكل (2-5). العلاقة بين فرق الجهد على لوحي الكشاف وشدة التيار

يصير التزايد أبطأ وبعد ذلك تصل العلاقة إلى حالة من التشبع saturation (شكل (5-2)).

يرجع السلوك الخطي في البداية إلى أن الإلكترونات المحررة والأيونات المتكونة بفعل التأين، لم يكن قد اكتمل تجميعها بواسطة اللوحين؛ ولذلك زيادة فرق الجهد تؤدي إلى تجميع المزيد منها. أما التباطؤ الذي يحدث في نمو التيار فسببه أنه في هذا المدى من فرق الجهد تكون هناك فرصة لبعض الإلكترونات التي حررت أن تعاود التحامها مرة أخرى مع الأيونات الموجبة لتكوين ذرات متعادلة مرة أخرى recombination. لكن بزيادة فرق الجهد تبدأ الإلكترونات والأيونات بالاندفاع بصورة أسرع نحو اللوحين فتقل فرصة إعادة الالتحام مرة أخرى، وهكذا حتى يصل التيار إلى حالة التشبع حيث تكون كل الإلكترونات والأيونات التي تكونت نتيجة مرور الجسيم أو الإشعاع النووي قد تم تجميعها.

منطقة التشبع saturation region تلك هي منطقة عمل (استخدام) غرفة التأين ionization chamber operation region، حيث تُعتبر منطقة استقرار لا تؤدي التغيرات الطفيفة في فرق الجهد على اللوحين إلى تغير ملحوظ في شدة التيار وفرق الجهد الذي تبدأ عنده منطقة التشبع يُسمى جهد التشبع saturation voltage V_s. يُفضل أن يكون جهد التشغيل أعلى من جهد التشبع للتأكد من تجميع جل الشحنات المحررة. تتراوح قيمة جهد التشبع داخل المدى $50-300volt$، يتوقف ذلك على طريقة تصميم الكشاف.

إذا ما استخدمنا جهازًا لقياس شدة التيار، كما هو الحال في الشكل (5-1)، فإن هذا النوع من أجهزة القياس غير حساس للتجاوب مع الجسيمات فرادى، ولكن يتجاوب مع التأثير المجمع لمجموعة من الجسيمات ليعطي قراءة تتناسب مع عدد الجسيمات التي تصل إلى غرفة التأين كل ثانية ومع الطاقة المفقودة؛ ولذلك يكون مثل هذا الكشاف مناسبًا لرصد فيض من الجسيمات وليس جسيما منفصلا. يُشار لهذا النوع من الكشافات بالنظم الغير نبضية non-pulsive.

عند استخدام غرفة التأين للكشف عن جسيمات ألفا يجب عمل نافذة الغرفة من غشاء رقيق جدا حتى يمكن اختراقه؛ ذلك لأن مداها صغير كما يجب أن يكون ضغط الغاز داخل الغرفة منخفضًا، ويستخدم هذا النوع من الكواشف في عمليات المسح في حالة التلوث الإشعاعي الضعيف؛ أما بالنسبة لجسيمات بيتا فمداها كبير (يصل إلى عدة أمتار في الهواء)

ومن ثَم يجب أن يكون ضغط الغاز داخل الغرفة مرتفعا حتى تتوقف جميع الجسيمات داخل الغرفة، وهذا يؤدي بالضرورة أن يكون غشاء النافذة أكبر سمكًا حتى يتحمل الزيادة في الضغط.

في حالة استخدام غرفة التأين للكشف عن فوتونات جاما، فإنه نظرًا لضعف احتمال حدوث التأثيرات التي تسببها أشعة جاما عند تفاعلها مع المادة في حالة الغازات (التأثير الكهروضوئي – تأثير كمبتون – تكوين الزوج) يجب أن يبطن جدار الغرفة من الداخل بمادة ذات عدد ذري كبير، حيث يزيد احتمال حدوث تلك التأثيرات عند سقوط فوتونات جاما على أسطح الجدر الداخلية للغرفة ومن ثَم تنطلق الإلكترونات التي تحدث التأين.

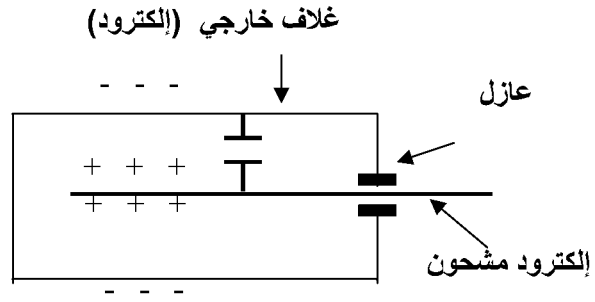
في الطب النووي، تستخدم غرفة التأين ملحقا بها إلكتروميتر كجهازين؛ أحدهما **جهاز المسح الإشعاعي** survey meter، والآخر **جهاز معايرة الجرعة** dose calibrator:

جهاز المسح هو جهاز صغير محمول portable يعمل ببطارية تتكون غرفة تأينه من أسطوانة خارجية تعمل كإلكترود والإلكترود الآخر عبارة عن سلك يمتد على محور تلك الأسطوانة. تقاس شدة التيار على لوحة أمامية وعادة ما يعاير الجهاز ليقرأ معدل التعرض exposure rate (R/hr, mR/hr) (الباب التاسع).

جهاز معايرة الجرعة هو أساسًا أحد أنواع غرف التأين الذي يستخدم في الطب النووي في اختبار كميات كبيرة نسبيًّا (في المدى m Ci) من المواد المشعة المصدرة لأشعة جاما حيث يُستخدم في قياس أو التحقق من نشاط مستحلبات مولدات الأنوية generator eluates – فحص عينة قبل أن يتناولها المريض – فحص الجرعات بعد تصنيعها وقبل إرسالها للمستخدم، وعموما يُستخدم جهاز معايرة الجرعة للتعامل مع الكميات التي تكون الكبر على استخدام كشاف NaI(TI) الوميضي.

2-2 مقياس الجرعة الجيبي
Pocket Dosimeter

يقوم مقياس الجرعة الجيبي بتسجيل الشحنة الكلية خلال فترة زمنية. يوضح الشكل (3-5) الأسس التي يعمل بها المقياس حيث يكون أحد الإلكترودين قضيب مركزي رفيع والإلكترود الآخر هو غلاف غرفة التأين، وهما معزولان كهربيًّا ويعملان كمكثف. يُشحن المكثف أولًا إلى جهد معين V وذلك بتوصيل القضيب المركزي بوحدة شحن منفصلة.



شكل (3-5) رسم تخطيطي للمقياس الجيبي

إذا كانت C هي سعة المكثف بين إلكترودي الشحن تكون الشحنة المخزونة على المكثف $Q = V \times C$. عند تعرض الغرفة للإشعاع يتأين الغاز، وتتكون شحنة مقدارها ΔQ تجمع بواسطة الإلكترودين. هذه الشحنة تؤدي إلى تفريغ في شحنة المكثف (معادلة بعض شحنته). بقياس التغير في فرق الجهد على لوحي المكثف يمكن حساب كمية الشحنة التي تجمعت نتيجة التأين، $\Delta Q = \Delta V \times C$.

يُستخدم مقياس الجرعة الجيبي في الطب النووي لرصد المستوى الإشعاعي في مكان العمل؛ وذلك بغرض الأمان الشخصي وهو جهاز صغير الحجم، قطره في حدود 1.5 cm وطوله حوالي 10 cm، يمكن تثبيته في جيب القميص. يبرز من إحدى نهايتيه طرفان متصلان بالإلكترودين يمكن توصيل المقياس من خلالهما بوحدة الشحن المنفصلة. يتسبب فرق الجهد على المكثف في تحريك مؤشر دقيق على تدريج يمكن رؤيته من خلال نافذة خاصة في غرفة التأين، وقراءة هذا التدريج معايرة لتدل على التعرض عادة بوحدات الرنتجن R أو mR وللمقياس القدرة على قراءة تعرض يصغر حتى 10 mR وذلك بدقة تصل حتى 20%.

بالرغم من ضعف حساسية مقياس الجرعة الجيبي لفوتونات جاما والأشعة السينية، فإن ذلك لا يقلل من أهميته في أداء وظيفته المذكورة.

3-2 استخدام غرفة التأين للكشف عن النيوترونات

نظرًا لأن النيوترونات لا تحدث تغيرًا يذكر بصورة مباشرة فإن غرفة التأين المملوءة بالغاز الخامل أو الهواء لا تصلح للكشف عنها، ومن ثم يضاف غاز آخر يمكن تشعيعه (أي جعل نواته نشطة إشعاعيًّا) عند قذفه بالنيوترونات، وشدة النشاط الإشعاعي الناتج من هذه العملية يكون دالة في عدد (وطاقة) النيوترونات التي تخترق الغرفة.

يتم ذلك بإضافة نسبة معينة من غاز ثالث فلوريد البورن BF_3 (أو تغطية الجدران بطبقة من البورن) وعند سقوط النيوترونات على نواة البورن يحدث التفاعل النووي الآتي:

$$ {}^{1}_{0}n \quad + \quad {}^{10}_{5}B \quad \rightarrow {}^{7}_{3}Li \; + \; \alpha $$

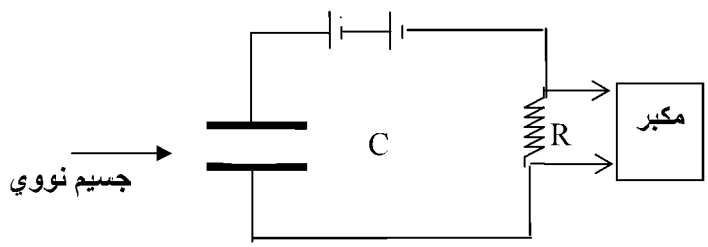
وجسيمات ألفا α المنطلقة لها قدرة على إحداث التأين، ومن ثم تقاس شدة النشاط الإشعاعي النيوتروني بهذه الطريقة الغير مباشرة.

4-2 النظام النبضي Pulsive system

يُستخدم النظام النبضي لرصد جسيمات مفردة، كل على حدة. تنطلق الجسيمات النووية من المصدر المشع في تتابع، ولكي يتم رصدها كلها يجب أن يكون زمن استمرار النبضة pluse duration من الصغر الذي يسمح برصد وتسجيل النبضة قبل أن تصل إلى الكشاف النبضة اللاحقة، أي أن زمن استمرار النبضة أقصر من الزمن بين تتابع جسيمين.

عند استخدام غرفة التأين الموضحة في الشكل (1-5) فإننا بصدد نظام غير نبضي (تراكمي)، غير أنه إذا وُصلت بدائرة كهربية كالتي تظهر في الشكل (4-5) فإنه يمكن استخدامها في رصد وصول جسيمات فرادى.

تجمع الإلكترونات الحرة بواسطة اللوح الموجب في زمن يقدر بالميكرو ثانية، $(1\mu\sec = 10^{-6}\ \sec)$ وتتحرك الأيونات الموجبة ببطء نحو اللوح السالب لتأخذ زمنا يقدر بالملي ثانية $(1m\sec = 10^{-3}\ \sec)$ للوصول إليه .



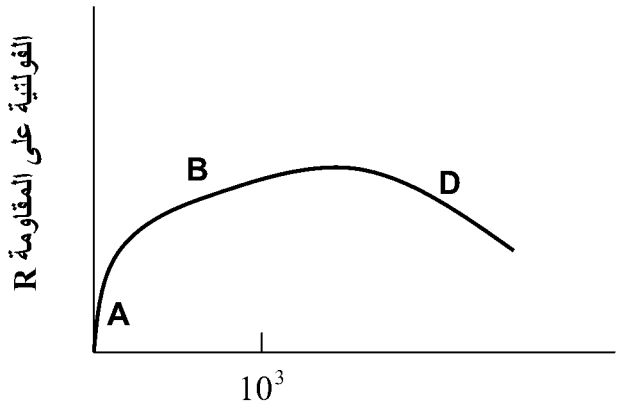
شكل (4-5) غرفة التأين مع دائرة كهربية لرصد جسيمات نووية فرادى

وبمرور الجسيم في غرفة التأين تتولد تلك الشحنات التي تؤدي إلى تولد تيار ينتهي بانتهاء أثر الجسيم وبمرور هذا التيار في المقاومة R تتولد نبضة كهربية وفرق الجهد على هذه المقاومة V يتناسب مع شدة التيار I (V = IR) ومن ثم يرتفع فرق الجهد (الفولتية) الناتج عن مرور جسيم واحد ثم ينخفض مرة أخرى تبعا لمرور التيار في المقاومة وتختار R لتكون قيمتها كبيرة جدًّا (في حدود $10^9\ \Omega$)، ومن ثم يؤدي مرور القدر اليسير من التيار إلى تولد نبضة ذات فرق جهد مناسب القيمة يمكن قياسه.

يعتمد زمن استمرار النبضة الناتجة عن التأين الذي يحدثه جسيم نووي على عناصر الدائرة الكهربية الملحقة بالكشاف (سعة المكثف وقيمة المقاومة، شكل (4-5)) وعلى المسافة بين اللوحين، وكذلك على الموضع الذي يحدث فيه التأين داخل الغرفة.

لوحي غرفة التأين (شكل (4-5)) يعملان كمكثف capacitor، لتكن سعته C. الشحنة المتولدة نتيجة مرور الجسيم تفرغ في المقاومة R بثابت زمني time constant (زمن يصف اضمحلال (تفريغ) للشحنة المتراكمة على لوحي المكثف) يساوي حاصل ضرب السعة والمقاومة، RC (إذا كانت المقاومة بالأوم ohm والسعة بالفاراد farad كانت RC بالثانية).

إذا كان زمن الاضمحلال RC كبيرًا نسبيًّا فإن نبضة فرق الجهد المتكونة تأخذ الشكل (5-5) حيث يرجع الارتفاع السريع في النبضة (الجزء A) إلى تجمع الإلكترونات السريعة، بينما يرجع الارتفاع البطيء (الجزء B) إلى تجمع الأيونات البطيئة. أما الانخفاض الأسي البطيء slow exponential (أي الموصوف بدالة أسية) والممثل بالجزء D من المنحى فيرجع إلى تفريغ شحنة المكثف (اللوحين) خلال المقاومة R وذلك بثابت التفريغ الزمني RC.



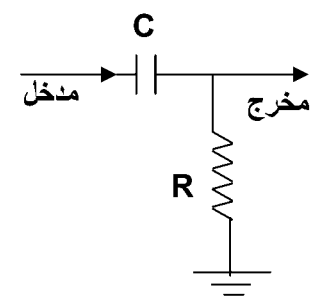
شكل(4-5) شكل نبضة صادرة من غرفة تأين قبل التخلص من المركبة البطيئة للنبضة

النبضة في صورتها تلك تعاني كثيرا من العيوب:

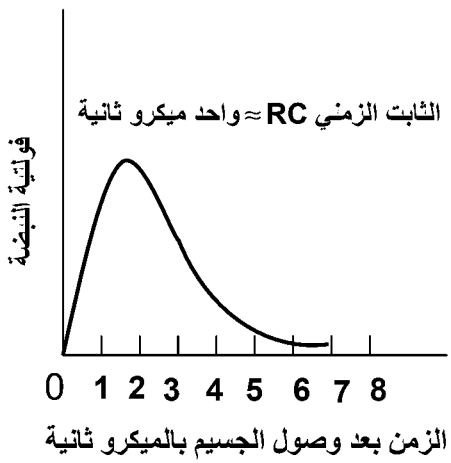
أولًا: طول العمر الزمني لدورة النبضة (شكل (4-5)) يجعل غرفة التأين وكذلك المكبر النبضي pulsive amplifier غير مستعدين لاستقبال جسيم آخر خلال تلك الفترة الزمنية التي تستغرقها تلك النبضة، وذلك ما يُعبر عنه بالقول بأن القدرة التحليلية الزمنية لهذا النظام طويلة long resolving time، وهذا بدوره يؤدي إلى عدم القدرة على رصد جسيمات تالية، مما يؤدي إلى انخفاض معدل العد.

ثانيًا: يؤدي الطول العمري للنبضة إلى إتاحة الفرصة عند تكبيرها لالتقاط بعض التشوهات الكهربية electrical noise حيث تؤثر تلك التشوهات على المعلومات الخاصة بطاقة الجسيم التي تحملها النبضة، وهذا بدوره يؤدي إلى قصور في القدرة التحليلية للطاقة resolving energy الخاصة بنظام التكبير.

يصمم المكبر amplifier الملحق بالكشاف بطريقة يمكن معها التخلص من أجزاء النبضة التي تنمو ببطء (نتيجة تراكم الأيونات (الجزء B من الشكل (4-5)) وبهذا يكون كل من المكبر والكشاف قد تهيأ خلال بضع ميكرونات من الثواني microseconds لرصد جسيم آخر، ومن ثم يمكن التوصل لمعدل أعلى للعد. فضلا عن ذلك يؤدي التخلص من الجزء البطيء من النبضة إلى التخلص من الجزء الأكبر من التشوهات الإلكترونية التي تصاحبها.



شكل (5-5) دائرة تفاضلية



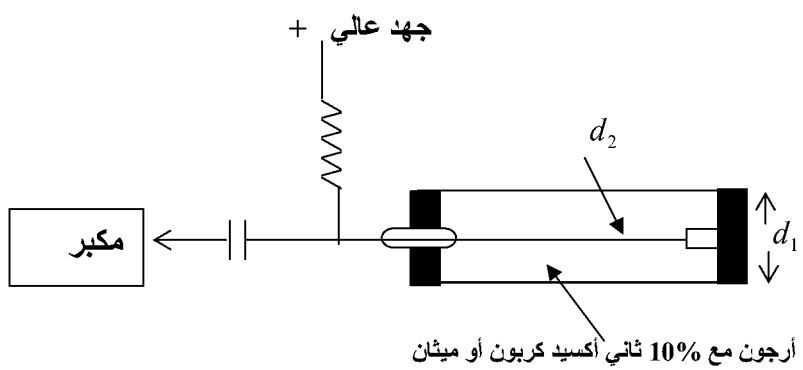
شكل (5-6) النبضة المفاضلة

النبضة الخام التي تم الحصول عليها آنفا (الشكل (4-5)) يتم تفاضلها باستخدام دائرة تفاضلية differentiating circuit بسيطة كتلك الموضحة في شكل (5-5) للتخلص من الجزء البطيء فيها لنحصل على النبضة التي تظهر في الشكل (5-6) ومن ثَم يمكن تكبيرها ثم تسجيلها بواسطة دائرة عد electronic counting circuit. نتناول الدوائر التفاضلية ودورها في تشكيل النبضة تفصيلًا في الباب التالي.

5-2 الكشاف (العداد[1]) التناسبي
Proportional Counter

قبل التطورات التي حدثت في العدادات الوميضية والتي أدت إلى شيوع استخدامها في أجهزة الطب النووي كان العداد التناسبي وعداد جيجر الأكثر استخدامًا. المكونات الأساسية لهذه العائلة من العدادات لا تختلف كثيرًا عن مكونات غرفة التأين، فهي في مجملها عبارة عن إناء محكم مملوء بالغاز وبه لوحان two electrodes لتجميع الأيونات والإلكترونات المتكونة، غير أن التصميم التفصيلي يختلف من أنبوب لآخر طبقا للغرض.

يستخدم العداد التناسبي في رصد جسيمات بيتا وفوتونات جاما غير أنه استبدل على نطاق واسع بكشافات أشباه الموصلات semi conductor counters لرصد فوتونات جاما، ولكن من المفيد أن نعرض له باختصار في طريق تناولنا لعداد جيجر الذي يعتبر امتداد



شكل (7-5) رسم تخطيطي للعداد التناسبي

(1) عندما نتحدث عن جسيمات يمكن رصدها فرادى، فإنه يمكن استخدام المرادف (عداد) مع كلمة (كشاف).

امتداد له حيث مازال الأخير مستخدما في عمليات المسح النووي.

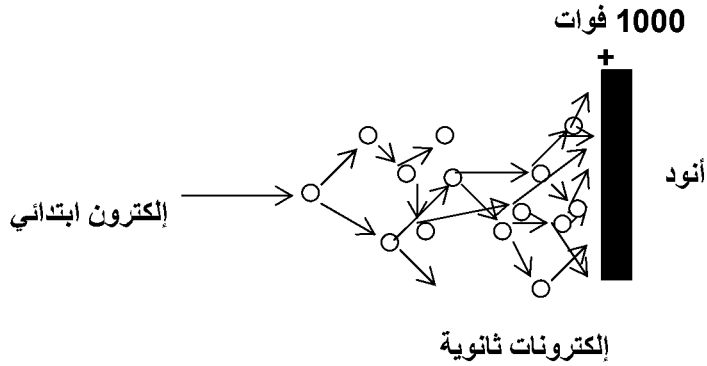
من حيث المبدأ، يمكن للعدادات التناسبية أن تكون مستوية الأقطاب كغرف التأين، ولكن من الأنسب والأكفأ أن تأخذ شكلًا أسطوانيًّا. يوضح شكل (7-5) شكلًا نمطيًّا للعداد التناسبي، حيث يتكون من غرفة أسطوانية الشكل مملوءة بالغاز يكون الأنود فيه عبارة عن سلك رفيع (نصف قطره في حدود 0.001 مم) وفي هذه الحالة يكون المجال الكهربي E على مسافة r قريبة من هذا السلك كبيرا جدا حيث:

$$E = \frac{V}{r \ln(d_1 / d_2)} \quad \frac{volts}{m}$$

d_1 هو قطر الكشاف (الأسطوانة) و d_2 قطر السلك (الأنود).

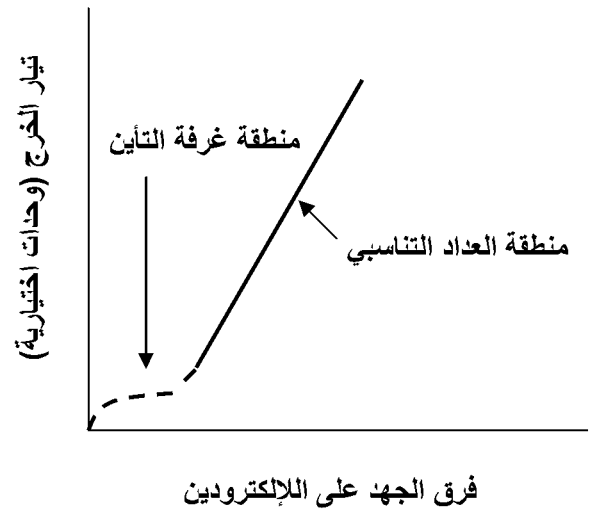
يتم تشغيل الكشاف التناسبي عند فرق جهد أعلى من منطقة التشبع لغرفة التأين ولعظم المجال الكهربي قريبًا من السلك، كما أسلفنا تعجل الإلكترونات الابتدائية، تلك الناتجة عن الجسيم (الشعاع) النووي وتصير قادرة على إحداث مزيد من التأين، ومن ثم إنتاج مجموعات من الإلكترونات الثانوية والتي تقوم بدورها في إحداث مزيد من التأين، وهكذا تستمر عملية التضاعف الأيوني هذه، مما يؤدي إلى حدوث شلال من الأيونات avalanche of ionization (شكل (8-5)) في منطقة قريبة من السلك وتسمى هذه العملية بالتكبير الغازي للشحنات gas amplification of charges ويُسمى المعامل الذي يزيد به التأين بمعامل التكبير gas amplification factor.

يسمى هذا العداد بالتناسبي؛ لأن العدد الكلي للإلكترونات الثانوية يتناسب مع proportional to عدد الإلكترونات الابتدائية الناتجة عن الجسيم (الشعاع) النووي. ويزداد التيار زيادة كبيرة كدالة في فرق الجهد (قد يتضاعف إلى 10000 مرة شكل (9-5)) ويظل المنحنى المميز للعداد (منحنى التيار- فرق الجهد I-V characteristic curve) متوقفا على طاقة الجسيم (الشعاع) النووي، بمعنى أنه إذا اخترق العداد جسيمان أحدهما



شكل (8-5) رسم تخطيطي لشلال من الأيونات

طاقته أعلى من طاقة الآخر يقع المنحنى الخاص بالجسيم ذي الطاقة الأعلى فوق المنحنى الخاص بالجسيم ذي الطاقة الأقل.



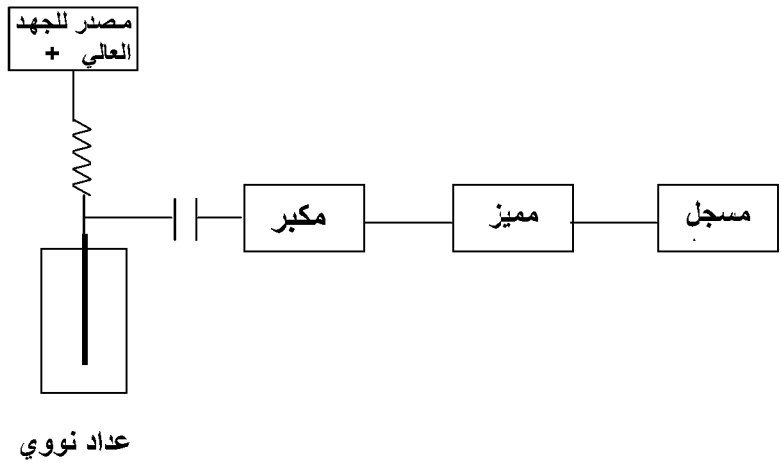
شكل (9-5). علاقة فرق الجهد بالتيار في العداد التناسبي تتزايد الشحنة الناتجة بصورة كبيرة بسبب التكبير الغازي الناتج عن الإلكترونات الثانوية

يعتمد حجم النبضة الناتجة على عدد الإلكترونات الابتدائية، تلك الناتجة عن تأثير الجسيم (الشعاع) النووي، والتي يتم تعجيلها متسببة في حدوث شلال الأيونات، وكذلك يعتمد على معامل التضاعف الغازي gas multiplication factor الذي بدوره يعتمد على الجهد العالي high voltage V الواقع على الأنود (السلك) ولحفظ هذا المعامل ثابتًا يجب

الاستعانة بمصدر مستقر للجهد العالي، وذلك حتى يتسنى قياس طاقة الجسيم المطلوب رصده بدقة.

فضلًا عن ميزة كبر حجم النبضة التي يتمتع بها العداد التناسبي، والتي تؤدي إلى إمكانية رصد وعد النبضات المنفردة فإنه أيضا يمكن استخدامه للتمييز بين نبضتين ناتجتين عن جسمين مختلفي الطاقة. مع هذا يظل الكشاف غير حساس لرصد فوتونات جاما والأشعة السينية، مما يحد من استخدامه في مجال الطب النووي.

بالطبع لا يمكن للعداد بمفرده أن ينجز مهمته، لابد من مجموعة من الأجهزة المعاونة لإتمام ذلك. يوضح الشكل (10-5) مجموعة الأجهزة المعاونة



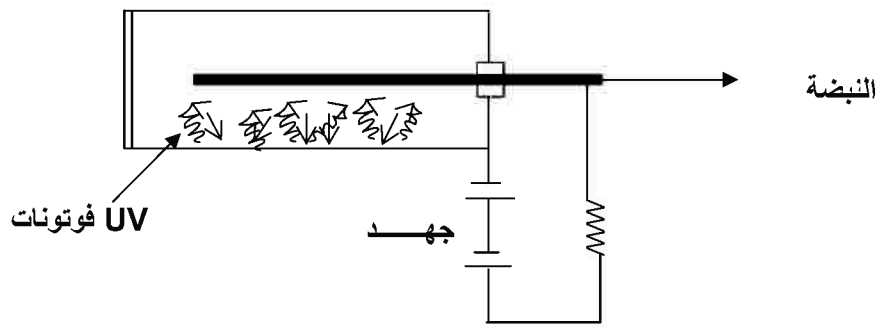
شكل (10-5) رسم لمجموعة الأجهزة المعاونة لعداد نووي

هذه؛ فهناك وحدة الجهد العالي high power supply التي تمد الأنود بالجهد العالي المستقر اللازم لتعجيل الإلكترونات، وهناك أيضا المكبر amplifier الذي يقوم بتكبير النبضة حتى يمكن قياسها يلي ذلك المميز discriminator الذي يقرر أي النبضات يمكن أن تمر وأيها ترفض، حيث يضبط ليسمح بمرور النبضات التي تزيد عن جهد (فولتية) معين، ومن ثم يمكن رفض النبضات الصغيرة التي هي في واقع الأمر عبارة عن تشوهات إلكترونية electronic noise وليست نبضات حقيقية ناتجة عن مرور الجسيم أو الأشعة النووية ثم يأتي في النهاية المسجل electronic register الذي يقوم بتسجيل النبضات.

6-2 عداد جريجر – مولر
Geiger – Muller Counter

لا تختلف المكونات الأساسية لعداد (أنبوب) جيجر (مشهور باسم جيجر فقط) عن مكونات العداد التناسبي أو غرفة التأين غير أنه يختلف اختلافًا أساسيًّا في أدائه حيث تزيد حساسية أنبوب جيجر في الكشف عن الإشعاعات النووية كثيرًا وذلك مرجعه فرق للجهد الهائل الذي يعمل عنده.

عند الاستمرار في زيادة فرق الجهد بين إلكترودى العداد إلى قيمة أعلى من تلك التي تقابل جهد التشبع للعداد التناسبي يلاحظ زيادة هائلة في تيار الأنبوب، فثمة تأثير آخر بدأ مفعوله. الزيادة الكبير في فرق الجهد أكسبت الإلكترونات طاقة حركة كبيرة تتسبب في تأين الذرات المتعادلة، وترك هذه الأيونات في حالة مستثارة excited state والتي لا تلبث أن تعود إلى حالتها المستقرة (الحالة الأرضية) مطلقة فوتونات ذات طلقة عالية، غالبا ما تكون في منطقة الطيف فوق البنفسجي UV. هذه الفوتونات تقوم بدورها بإنتاج إلكترونات فوتونية photoelectrons عند سقوطها على أسطح المهبط



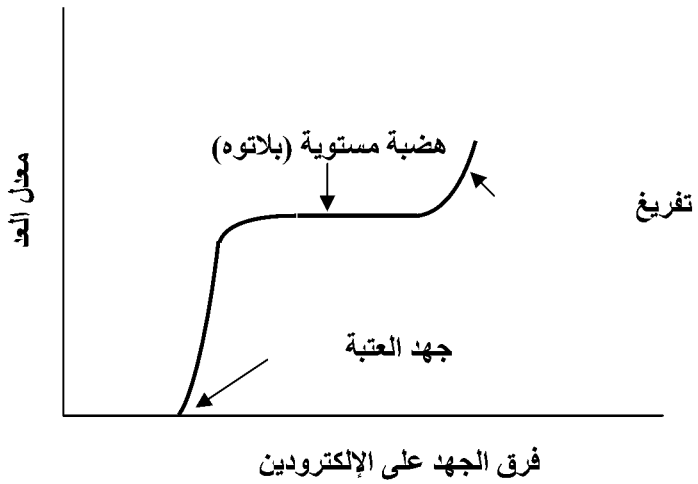
شكل (11-5) رسم تخطيطي لعداد جيجر

والمصعد وذلك نتيجة للتأثير الكهروضوئي photoelectric effect. تسارع هذه الإلكترونات الفوتونية نحو المصعد، وتسبب في إنتاج المزيد من الفوتونات التي تقوم بدورها في إنتاج مزيد من الإلكترونات الفوتونية وهكذا، ومن ثم يتوفر لدينا المزيد من الإلكترونات الحرة بسبب الفوتونات التي تملأ الأنبوب إلى حدوث ما يُسمى شلال التأين avalanche ionization، مما يجعل الوسط جيد التوصيل للكهرباء وتنهار مقاومة الغاز، وحينئذ يصل التيار إلى قيمة قصوى ثابتة تقريبا بغض النظر عن التأين الابتدائي الناتج عن الجسيمات

(الأشعة) المؤينة، وبالتالي لم يعد جهد النبضة متوقفًا على طاقة الجسيم، ومن ثم ليس لعداد جيجر دور في تحليل طاقة الجسيمات النووية واقتصر دوره على عدهم.

بمجرد حدوث التأين ثم بدء التفريغ الكهربي يستمر مرور التيار، ولا يتوقف من ذاته، إنما يستمر حتى مع عدم وصول جسيمات نووية جديدة، ومن ثم وجب البحث عن وسيلة لإطفائه حتى يتأهل لرصد جسيم قادم، وبدون ذلك لا يشعر العداد بأي جسيم آخر يأتي بعد الجسيم الذي تسبب في عملية التفريغ الأولى.

بتفحص المنحنى المميز لعداد جيجر (العلاقة بين فرق الجهد على إلكترودي العداد ومعدل العد – الشكل (12-5)) نجد أن هناك قيمة دنيا لفرق الجهد، جهد العتبة threshold voltage لحدوث شلال التأين. عند قيم أقل لا يحدث شلال التأين لأن الإلكترونات ليست لديها الطاقة الكافية للاصطدام بقوة بالأنود، ومن ثَم تنطلق فوتونات .uv



شكل (12-5) المنحنى المميز لعداد جيجر

هناك وسيلتان لإتمام عملية الانطفاء:

الأولى: وسيلة إلكترونية وهي وسيلة خارجية، استخدمت أولًا، وذلك عن طريق دائرة كهربية يتم بواسطتها خفض فرق الجهد بين القطبين آليًّا فتتوقف عملية إنتاج الأيونات في الحال ويُجمع ما تبقى من الأيونات بما تبقى من الجهد بعد الخفض. بعد إتمام عملية الانطفاء تعمل الدائرة الكهربية في الحال على رفع فرق الجهد مرة أخرى إلى منطقة تشغيل الأنبوب

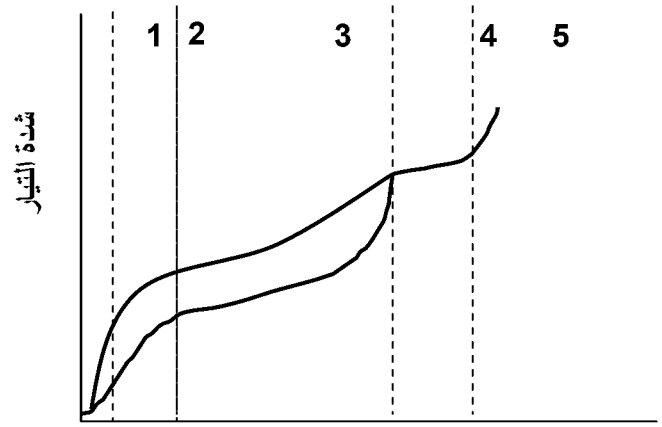
لتسجل النبضة التالية وهكذا. بالطبع تتوقف دقة الرصد على مدى الحصول على أقصر فترة زمنية يمكن خلالها للدائرة الكهربية العودة إلى فرق الجهد اللازم للتشغيل.

الثانية: وسيلة كيميائية، حيث يُخلط الغاز ببعض المواد العضوية مثل الكحول الأثيلي الذي تمتص جزيئاته فوتونات UV الناتجة من عمليات التصادم، مما يؤدي إلى حدوث عملية الانطفاء وعملية امتصاص الفوتونات هذه تستغرق ما بين 50 إلى 150 ميكروثانية، فإذا ما دخل جسيم آخر حدثت عملية التفريغ مرة أخرى في منطقة التشغيل ورُصدت نبضة (عدة) يعقب ذلك عملية انطفاء وهكذا. أي تعمل المادة العضوية المضافة مكان الدائرة الكهربية المذكورة آنفا. بيد أن امتصاص جزيئات المادة العضوية لفوتونات UV يؤدي إلى تكسيرها وبالتالي إلى استهلاك جزء منها في كل مرة يتم فيها رصد جسيم وفي المتوسط يتم استهلاك الأنبوب بعد ألف مليون إلى عشرة آلاف مليون عدة – يتوقف ذلك على تصميم الأنبوب وعلى حسن الاستخدام.

جدير بالتذكرة أن الحال يختلف بالنسبة للنظام النبضي الذاتي، فبعد أن يعطى الجسيم النووي المراد رصده طاقته إلى الوسط في حالة غرفة التأين أو العداد التناسبي وتتولد نبضة، ثم تختفي ذاتيًّا، ذلك لأن التيار الكهربي يسري فقط بسبب حدوث التأين الناتج عن الجسيم النووي، ثم يختفي التيار ولا يظهر مرة أخرى إلا بدخول جسيم جديد إلى العداد وحدوث تأين جديد.

بالرغم من بعض العيوب التي تشوب عداد جيجر كالبطء وضعف الكفاءة لارتباط ذلك بآلية الانطفاء فضلًا عن عدم القدرة على تحليل طاقة الجسيمات، فإنه يتميز بنبضة كبيرة قد لا تحتاج إلى تكبير وأن سعره منخفض نسبيًّا وسهل التناول، ويُعتبر الوسيلة الرئيسة للمسح الإشعاعي للمعامل والمستشفيات ومناطق التلوث الإشعاعي.

بعد استعراضنا لبعض الأنواع المختلفة للكواشف الغازية نجد من المفيد تلخيص العمليات المختلفة التي تظهر كدالة في فرق الجهد على لوحي الكشاف، وكذلك المدى الذي يعمل فيه كل نوع من هذه الكواشف الغازية (شكل (13-5)):



شكل (13-5) شدة التيار كدالة في فرق الجهد للكواشف الغازية

المنطقة 1: وهي منطقة الجهد المنخفض، وتسمى منطقة إعادة الالتحام recombination region، حيث يتيح الجهد المنخفض الفرصة لحدوث عمليات إعادة الالتحام بين الإلكترونات والأيونات الموجبة التي انفصلت.

المنطقة 2: وتسمى منطقة التأين ionization region حيث يؤدي زيادة فرق الجهد إلى تجميع كل الإلكترونات والأيونات التي نتجت بفعل الجسيمات (الأشعة) النووية، وذلك بواسطة إلكترودي الكشاف، ومن ثَم لا تتاح فرصة لعملية إعادة الالتحام أن تحدث وعلى هذا كان التيار الناتج دالة في طاقة الجسيمات (الأشعة) المؤينة (كل من المنحنين في الشكل يقابل قيمة مختلفة للطاقة، أي أنه في المناطق الثلاث الأول يمكن التمييز بين الجسيمات طبقا لطاقتها)، ولكن التيار لا يعتمد تقريبا على فرق الجهد.

المنطقة 3: وهي منطقة عمل العداد التناسبي، حيث تكون في هذا المدى من الجهد، الإلكترونات والأيونات الابتدائية (الناتجة عن الجسيم النووي) ذات طاقة عالية تكفي عند تصادمها مع ذرات وجزيئات الغاز لإنتاج إلكترونات وأيونات ثانوية، ولذلك يكون التيار في هذه المرحلة دالة في كل من فرق الجهد وطاقة الجسيم النووي.

المنطقة 4: منطقة عمل عداد جيجر، حيث يكون التأثير الناتج عن فوتونات UV هو السائد، وفي هذه المرحلة لا يعتمد التيار على فرق الجهد ولا على طاقة الجسيم.

المنطقة 5: منطقة التوصيل (التفريغ) المستمر continuous discharge حيث يقوم المجال الكهربي الكبير الناتج عن بلوغ فرق الجهد قيمة عالية بتأيين الغاز مباشرة دون الحاجة إلى الجسيم المشع لإحداث ذلك، وتتولد نبضة تيار ضخمة قد تؤدي إلى إذابة الإلكترودين، ومن ثَم يجب عدم الاقتراب من هذه المنطقة عند التشغيل.

3- كواشف أشباه الموصلات
Semiconductor Detectors

تتزايد أهمية كواشف أشباه الموصلات في مجال الطب النووي بتزايد تطبيقاتها؛ نظرا لأن كثافة المادة الصلبة المصنوع منها شبه الموصل، تبلغ من 2000 - 5000 مرة أكثف من الغازات (الهواء)، فإن قدرتها على إيقاف stopping power الجسيمات النووية أعظم، كما أنها أكثر كفاءة في رصد فوتونات جاما والأشعة السينية.

عموما، أشباه الموصلات ليست جيدة التوصيل الكهربي، ولكن إذا سقطت عليها إشعاعات نووية تسببت في «تأين» (1) بعض ذراتها وتتحرر شحنة كهربية يمكن تجميعها باستخدام فرق جهد خارجي وتنتج نبضة تيار كهربي. لا يمكن تطبيق نفس الفكرة على الموصلات (كالمعادن)؛ لأنها تحتوي على إلكترونات حرة بالفعل ويمر التيار خلالها تحت تأثير فرق جهد دون ما تأثير من الإشعاع النووي (قد يذكرنا هذا بمنطقة التوصيل المستمر- المنطقة - 5 في حالة الكواشف الغازية). العوازل، أيضًا لا يمكن استخدامها؛ لأنها لا تقوم بتوصيل التيار حتى مع وجود الإشعاع النووي، أشباه الموصلات من الحالة الصلبة هي إذن التي يمكن استخدامها ككواشف نووية.

أهم المواد المستخدمة ككواشف أشباه موصلات، السيلكون (Si) silicon والجرمانيوم (Ge) germanium. نحتاج إلى 3.5 eV من الطاقة في حالة السيلكون و2.9 eV في حالة الجيرمانيوم لإحداث «تأين» واحد مقارنة لحوالي 33 eV في حالة الهواء، مما يجعلنا نحصل على نبضة أكبر بحوالي عشر مرات في حالة أشباه الموصلات مما يؤمن القدرة على رصد حدث إشعاعي مفرد individual radiation event (امتصاص أحد فوتونات جاما، مثلا). فضلا عن ذلك، يؤدي صغر قيمة طاقة التأين في حالة كشاف أشباه

---

(1) ليس تأينا بالمفهوم الدارج الذي مر بنا عند الحديث عن الغازات أو الحديث عن ذرة مفردة ولكن بمعنى تكوين زوج إلكترون - فجوة electron – hole pair في حالة أشباه الموصلات.

الموصلات إلى عظم القدرة التحليلية للطاقة energy resolution . القدرة التحليلية للطاقة لكشاف أشباه الموصلات أكبر 20 مرة من القدرة التحليلية لبلورة NaI (Tl) المستخدمة في الكشافات الوميضية (تحتاج بلورة NaI (Tl) إلى 30 - 50 eV لتكوين زوج أيوني). تتمتع أشباه الموصلات أيضا بزمن تجاوب response time قصير جدًّا، مما يجعل القدرة التحليلية الزمنية time resolution عالية أيضًا، وهذا بدوره يمكن الكشاف من رصد أحداث تأتي في تتابع سريع فترتفع كفاءة الرصد. يمكن تصنيع كشاف أشباه الموصلات في حجم صغير، يمكن إدخاله داخل الجسم إذا تطلب الأمر، ذلك فضلا عن انخفاض سعره.

بالرغم من العديد من الميزات التي ذكرنا، يرتبط كشاف أشباه الموصلات ببعض المثالب التي تحد من استخدامه في مجال الطب النووي:

- يتواجد داخل شبه الموصل قدر من الإلكترونات مصدرها تأثير حراري thermally induced electrons، حتى عند درجة حرارة الغرفة. ينتج عن هذه الإلكترونات تيار تشويه noise current يتداخل مع التيار الناتج عن الأشعة المؤينة. للحد من تأثير هذه التشوهات على النبضة الحقيقية المراد رصدها يجب تشغيل الكشاف عند درجات حرارة منخفضة.

- تتواجد بعض الشوائب داخل أشباه الموصلات حتى في بعض بلورات السليكون والجرمانيوم عالية النقاء. تُعتبر هذه الشوائب مركز لقنص الإلكترونات electron traps المحررة بتأثير الأشعة المؤينة مما يضعف النبضة.

4- الكواشف الوميضية
Scintillation Detectors

العدادات الغازية ليست شديدة الحساسية لفوتونات أشعة x وأشعة جاما، حيث ينخفض احتمال إنتاج إلكترونات بفعل الفوتونات، مما يحد من استخدامها في مجال الطب النووي، فجاءت العدادات الوميضية لتسد هذا الثغرة. تتمتع الكشافات الوميضية بالخواص التي تجعل منها الكشاف الأفضل في مجال الطب النووي، معدل عد مرتفع وكفاءة عالية في رصد فوتونات جاما.

تبنى فكرة هذا النوع من العدادات على الخاصية الوميضية التي تتميز بها بعض السوائل والمواد الصلبة، فعند سقوط الإشعاعات المؤينة على هذه المواد تستثار ذراتها، وعند عودة هذه الذرات إلى حالتها المستقرة تتخلص المادة من طاقة الاستثارة هذه، وهناك صور مختلفة يتم بها ذلك؛ فإذا تم عن طريق انبعاث فوتونات وكانت الأطوال الموجية التي تصاحبها تقع في مدى الضوء المرئي، سُميت تلك الانبعاثات ومضات scintillations وسُميت تلك المادة بمادة وميضية. برصد هذه الومضات (الفوتونات) التي تنبعث من المادة الوميضية يمكن تقدير الشدة الإشعاعية للمواد المشعة التي تصدر تلك الأشعة المؤينة، والمواد التي تتميز بالخاصية الوميضية قد تكون:

- بلورات عضوية مثل: Anthracene وStilbene.

- مواد عضوية سائلة مثل: Xylene وToluene.

- محاليل صلبة solid solutions لمواد عضوية وتسمى الوميضات البلاستكية plastic scintillators.

- بللورات غير عضوية تحتوي على عناصر (مراكز) نشطة، مثل:(Zn S (Ag ، Cs I (Ti)، Na I (Ti)، LiI (Cu) حيث تمثل ذرات العناصر المكتوبة بين القوسين المراكز النشطة التي تتعرض للاستثارة بواسطة الإشعاعات المؤينة، ومن ثم لها القدرة على إصدار الفوتونات (الومضات).

أكثر المواد الوميضية استخداما في الطب النووي للكشف عن أشعة جاما هي بلورات أيوديد الصديوم المحتوي على ذرات الثاليوم كمنشط Na I (Tl) وذلك للعديد من الميزات:

- الكثافة العالية (لارتفاع نسبة اليود في تكوينها، 85%) والكبر النسبي للعدد الذري (العدد الذري لليود 53) لها يرفع من كفاءتها في امتصاص أشعة جاما.

- الكفاءة العالية في تحويل فوتونات جاما الممتصة إلى انبعاث وميضي.

– شفافيتها التي تسمح بمرور الفوتونات المنبعثة، ومن ثم يمكن رصدها باستخدام أنبوب التضاعف الفوتوني photomultiplier (PM) tube (والذي سيأتي تفصيل الكلام عنه).

– قصر الزمن الذي تستغرقه عملية الانبعاث الفوتوني (أقل من ميكروثانية) مما يرفع من القدرة التحليلية Resolution Power للعداد.

– الطول الموجي للفوتونات المنبعثة ($3300 - 5000 A^o$) يناسب حساسية أنابيب التضاعف الفوتوني المتاحة، مما يسهل عملية رصد الومضات.

– يمكن إنماء (تصنيع) بلورة مفردة single crystal نقية وكبيرة (يصل قطرها إلى حوالي 25 سم)، مما يقلل من الانعكاسات الداخلية التي تظهر في حالة الأسطح المتعددة عند استخدام عدة بلورات بدلا من بلورة واحدة، كما أن الحجم الأكبر للبلورة يتيح مجالا أكبر للرصد.

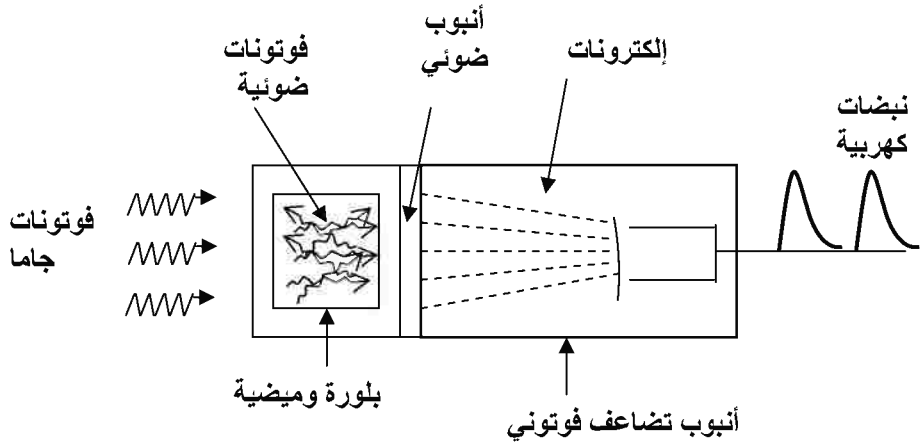
لهذه الأسباب مجتمعة تكون بلورات أيوديد الصديوم، حتى وقتنا هذا، أنسب المواد الوميضية لرصد فوتونات جاما المنبعثة من المصادر المشعة الأكثر استخداما في مجال الطب النووي، ذلك من حيث الكفاءة والقدرة التحليلية.

تشمل عملية الكشف باستخدام العداد الوميضي ثلاث خطوات أساسية:

– تسقط الفوتونات الصادر من المادة المشعة على بلورة أيوديد الصوديوم فتستثار ذرات المراكز النشطة فيها، وعند عودة هذه الذرات إلى حالة الاستقرار تنبعث فوتونات في المدى المرئي من الموجات الكهرومغناطيسية (فوتونات ضوئية).

– تسقط الفوتونات الضوئية على سطح المهبط في أنبوب التضاعف الفوتوني فتنطلق إلكترونات ضوئية photo electrons تتضاعف كثيرا داخل أنبوب PM.

– تجمع هذه الإلكترونات لتكون النبضة عند مخرج الأنبوب output، وهذه النبضة تعالج إلكترونيا لإتمام عملية العد.



شكل (14-5) . شكل تخطيطي لتتابع خطوات رصد أشعة جاما باستخدام عداد وميضي.

هذه الخطوات الثلاث والتي سنتناول بعضها تفصيلا فيما هو آت تظهر موضحة في شكل (14-5).

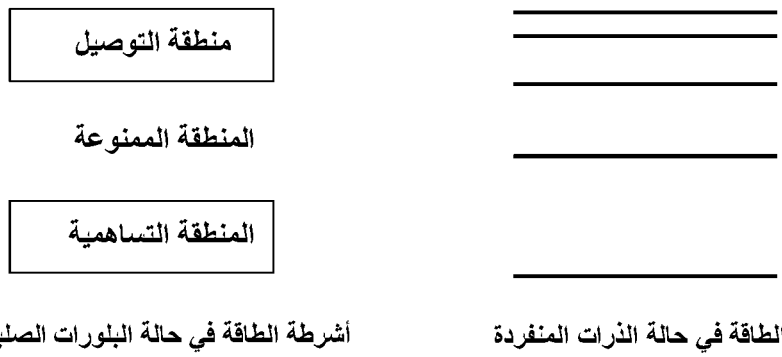
يتكون الكشاف الوميضي من أجزاء رئيسة هي المادة الوميضية (في هذه الحالة بلورة أيوديد الصوديوم) حيث يبطن الغلاف الذي يحتويها بعاكس ضوئي يعيد الشارد من الفوتونات ليسقط على مهبط أنبوب التضاعف وأنبوب توصيل ضوئي light pipe ينتقل خلاله نبضة الضوء من المادة الوميضية إلى مهبط أنبوب التضاعف الفوتوني، ثم أنبوب التضاعف الفوتوني (شكل (14-5)).

1-4 ديناميكية الامتصاص والانبعاث في البلورة الوميضية

Interactions in Sintillation Crystals

في التركيب البلوري تترابط الذرات فيما بينها لتكون وحدات متماثلة في الأبعاد الثلاثة، والذرات في ترابطها هذا تترتب بحيث تكون فيما بينها مستويات للطاقة تختلف عن تلك التي تميز مستويات الطاقة في الذرات المنفردة، وطبقًا لما يسمى في علم فيزياء الجوامد بنظرية الشريط Band Theory تكون هناك ثلاث مناطق (أشرطة) للطاقة: المنطقة التساهمية

valance band، المنطقة الممنوعة forbidden gap، ومنطقة التوصيل conduction band (شكل (15-5)). تتواجد الإلكترونات قبل عملية الاستثارة في المنطقة التساهمية



شكل (15-5). تمثيل الطاقة في حالة الذرات المنفردة وفي حالة البلورة الصلبة

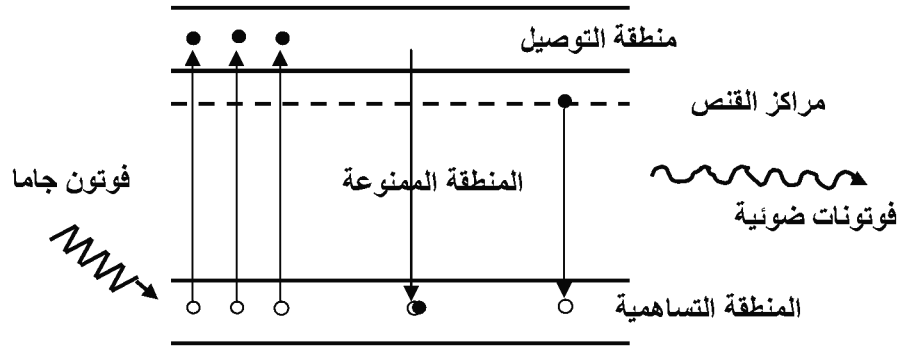
وسمك المنطقة الممنوعة يمثل الطاقة اللازم توافرها لإلكترون لكي ينتقل إلى منطقة التوصيل حيث يشارك في عملية التوصيل الكهربي والمنطقة الممنوعة تبقى شاغرة من الإلكترونات في حالة البلورات النقية.

تختلف الجوامد من حيث التوصيل الكهربي طبقًا لسمك المنطقة الممنوعة؛ ففي حالة المعادن جيدة التوصيل لا تكاد أن تتواجد هذه المنطقة وفي حالة العوازل insulators تكون كبيرة جدًّا، أما في حالة أشباه الموصلات semiconductors تكون قيمتها بين الاثنتين، وتساوي حينئذ بضعًا قليلًا من الإلكترون فولت (eV)، ففي حالة السيلكون مثلا يكون سمك المنطقة الممنوعة 1.12 eV.

بالرغم من أن البلورة الوميضية يمكن استخدامها للكشف عن أي من الإشعاعات المؤينة إلا أنه سيقتصر نقاشنا هنا على فوتونات جاما؛ ذلك لأهمية هذا الطرح في موضوع التصوير النووي، محور اهتمامنا في هذه الدراسة.

يمثل شكل (16-5) رسمًا تخطيطيًّا لتفاعل الفوتونات مع البلورة الوميضية حيث تتفاعل interact فوتونات أشعة جاما المنطلقة من المادة المشعة التي تنتشر في العضو البشري مع

إلكترونات البلورة الوميضية وذلك إما من خلال تـأثير كمبتـون، أو التـأثير الكهروضـوئي



شكل (16-5) تفاعل فوتونات جاما مع بللورة NaI(Ti)

(راجع الباب الرابع)؛ فينتج عن هذا التفاعل (التصادم) بين الفوتونات ذات الطاقـة العاليـة وبعض إلكترونات البلورة انطلاق إلكترونات سريعـة وفوتونـات ذات طاقـة أقـل، وتلـك بدورها تتفاعل مع إلكترونات البلورة، حيث تستثار ذراتها فتقفز الإلكترونـات مـن المنطقـة التساهمية إلى منطقة التوصيل، حيث تصير حرة التحرك بين الذرات.

خلال هذه العمليات المتتابعة للتأثير الكهروضـوئي وتـشتت كمبتـون يتحـول الفوتـون الواحد من فوتونات جاما إلى فوتونات كثيرة من الفوتونـات الـضوئية. يتناسـب عـدد هـذه الفوتونات الضوئية مع طاقة فوتون جاما الممتص، ذلك بفـرض أن هـذا الأخـير يكـون قـد امتُص تماما داخل البلورة. إذا تمكن جزء من طاقة فوتون جاما من الهروب، كما يحـدث ذلـك في تشتت كمبتون، يتكون عدد أقل من الفوتونات الضوئية والنبضة الضوئية المتكونـة تحمـل طاقة أقل من طاقة فوتون جاما. هذا الجزء الهارب من الطاقة هو المسئول عـن ظهـور منطقـة كمبتـون compton region في طيـف أشـعة جامـا gamma spectrum (البـاب السادس شكل (17-6)).

لا تلبث هذه الإلكترونات التي قفزت إلى منطقة التوصيل أن تعود لتتحد مـع الفراغـات التي تكونت في المنطقة التساهمية نتيجة عملية الامتصاص، وعلى إثر ذلـك تنطلـق فوتونـات ضوئية بطاقة تساوي عرض المنطقة الممنوعة (الفرق ما بين موضـع الإلكـترون قبـل العـودة ليتحد مع الفراغ وموضع الفراغ، أي بين الحالة المستثارة والحالـة الأرضـية)، إذا وقـع فـرق

الطاقة في المدى المرئي من الأشعة الكهرومغناطيسية. وقد يتبدد فرق الطاقة بين الحالتين، المستثارة والأرضية، في صورة أخرى كالحرارة مثلا.

بالرغم من أن بلورة أيوديد الصوديوم النقية يمكنها إصدار الوميض من خلال الديناميكية التي ذكرنا للتو، فإن كمية الضوء الذي ينبعث منها في حالتها النقية تلك يكون ضعيفا للغاية، ولكن إذا أُضيفت كمية صغيرة من الثاليوم thallium (يُضاف حوالي 5% من الثاليوم أثناء عملية تحضير (إنماء) البلورة) تغير التركيب البلوري وتخلقت مستويات للطاقة داخل المنطقة الممنوعة تعمل كمواقع قنص trapping sites. هذه الكمية الضئيلة من الشوائب التي أُضيفت ترفع من كفاءة البلورة كمصدر للوميض بصورة كبيرة؛ ولذلك يُشار إلى الثاليوم كمنشط activator وإلى مراكز القنص هذه بمراكز التنشيط activation centers، وتُسمى البلورة في هذه الحالة بلورة أيوديد الصوديوم المُنَشطة بالثاليوم thallium - activated sodium iodide ((NaI (Tl)).

بعض الإلكترونات التي انتقلت من المنطقة التساهمية إلى منطقة التوصيل في البلورة المنشطة بالثاليوم تُقتنص بواسطة مراكز اقتناص trapping centers. الموضع النسبي في مستويات الطاقة لشوائب الثاليوم في بللورة NaI يقع أسفل منطقة التوصيل (شكل -5)) (16. لا تلبث هذه الإلكترونات أن تتحد مع فجوات في المنطقة التساهمية معطية طاقتها على صورة فوتونات ضوئية light photons (أي يقع طولها الموجي في منطقة الضوء المرئي) وفي حالة NaI (Tl) تتمركز الأطوال الموجية لهذه الفوتونات عند $4050A^{o}$. هذا الطول الموجي يقابل طاقة مقدارها 3 eV لكل فوتون، $\nu = c/\lambda$,$E = h\nu$ (راجع الباب الأول).

جدير بالذكر أنه ليس كل الطاقة الممتصة من فوتونات أشعة جاما الصادرة من المادة المشعة والساقطة على بلورة NaI (Tl) تظهر على هيئة فوتونات ضوئية، فقط نسبة تتراوح بين 10 إلى 13 ٪ يحدث لها ذلك. يهرب من هذه النسبة حوالي 30٪ قبل أن يصل إلى أنبوب التضاعف الفوتوني، ومع هذا فإنه على سبيل المثال يتمكن أحد فوتونات جاما ذو الطاقة 140 KeV من إنتاج عدة آلاف من الفوتونات الضوئية التي يمكن استخدامها في عمليات الرصد والتصوير النووي. غير أنه يجب التأكيد على أن قيمة النبضة الناتجة output pulse

تتناسب تقريبًا مع طاقة الجسيم أو الشعاع الساقط على البلورة، ومن ثَم يمكن استخدام بلورة NaI(Tl) لقياس الطاقة بجانب دورها في عملية الكشف والرصد.

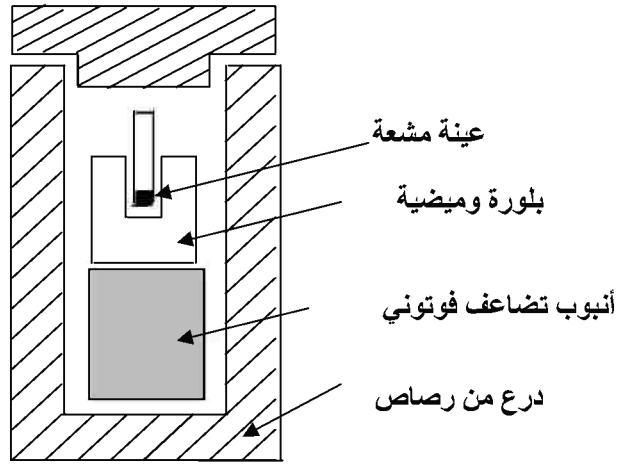
2-4 أنواع الكواشف الوميضية

سبق أن ذكرنا أن المادة الوميضية قد تكون سائلة أو بلورة صلبة، بيد أن البلورة الصلبة أنسب في الاستخدام وأعلى كفاءة إذا ما توفر لها حماية كافية من الضوء والماء (الرطوبة) والمواد الكيميائية. تتم تلك الحماية بتغليف أسطح البلورة، ما عدا ذلك الوجه الذي يقابل أنبوب التضاعف الفوتوني، بوعاء محكم من صحائف الألمونيوم الرقيقة المغطى من الداخل بعاكس جيد للضوء من أكسيد الماغنيسيوم.

هناك تصميمان للعدادات الوميضية، العداد البئري well counter والعداد الجساس probe counter . يستخدم النوع الأول لفحص العينات فقط in vitro measurements بينما يستخدم النوع الثاني في القياسات التي تشمل الجسم بكامله أو عضوًا من in vivo measurements، وغالبا ما يكون هذا النوع من العدادات جزء من جهاز مسح وتصوير نووي. والأجهزة الأساسية المعاونة لكل من النوعين واحدة، فأنبوب التضاعف الفوتوني وأجهزة معالجة النبضة إلكترونيًا وأجهزة عرض النتائج يجب توافرها في الحالتين.

العداد البئري Well Counter:

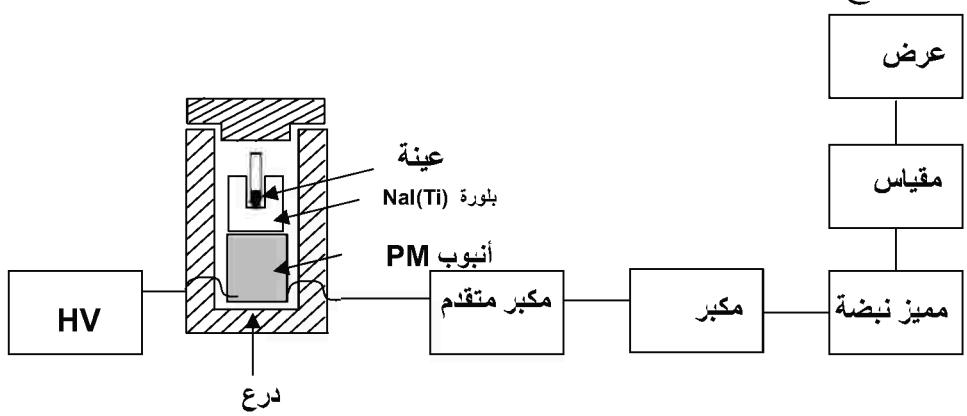
صمم هذا العداد خصيصا لعمليات الرصد الحساسة للمواد المشعة، حيث يستخدم لفحص العينات فقط. تحتوي البلورة على تجويف لإدخال أنبوب الاختبار الذي يحتوي على العينة كما يتضح من شكل (17-5)، وهذا النوع من التصميم يمكن من رصد أغلب الإشعاعات التي تصدر من العينة حيث تحيط البلورة بالعينة من كل جوانبها إلا من جانب واحد. بهذا العداد يمكن رصد جرعة ضئيلة، قد تصل لأقل من $0.0001\mu C$ من I^{131} في عملية فحص رتيبة.



شكل (17-5) عداد وميضي بئري

نظرًا لأن وظيفة هذا الطراز من العدادات الوميضية هو فحص العينات، فإنه يبقى ثابتا في موضع واحد ومن ثم يمكن إحاطته بدروع سميكة من قطع الرصاص. هذا التصميم من العدادات يحتاج إلى رعاية خاصة في نظافته فهو معرض للتلوث بالمواد المشعة المستخدمة وهذا بدوره يؤثر على قياسات تالية غير أن هذه المشكلة تكون أقل حدة بالنسبة للمواد المشعة قصيرة العمر مثل Co^{60} و Cs^{137}.

يوضح الشكل (16-5) شكلًا تخطيطيًّا للأجهزة المعاونة للعداد الوميضي البئري (والتي سيأتي عن عناصرها تفصيل) حيث تظهر وحدة التقويم التي تمد أنبوب التضاعف الفوتوني بالجهد العالي HV power supply ومكبر النبضة المتقدم – peramplifier والذي يليه المكبر amplifier ثم محلل النبضة pulse height analyzer ثم يلي ذلك وسيلة لقياس الخرج كمقياس معدل العد مثلا، وأخيرًا أجهزة العرض display.



شكل (18-5) شكل تخطيطي للأجهزة المعاونة للعداد الوميضي البئري

العداد الجساس Probe Counter:

يستخدم هذا الصنف من العدادات للقياسات الخاصة بكامل الجسم أو بعضو معين فيه in-vivo measurements، ويتم ذلك بعد الحقن بالعقار المشع أو بتناوله أو استنشاقه. وقد يُثبت العداد فوق عضو معين لإجراء قياس واحد (وليس مسحًا) كما في حالة الغدة الدرقية thyroid uptake حيث تقوم الغدة الدرقية باستخلاص اليود المشع I^{131} أو I^{132}.

الأجهزة المعاونة للعداد الجساس لا تختلف كثيرًا عن تلك الملحقة بالعداد البئري، فهناك بلورة NaI (Ti) يليها أنبوب التضاعف الفوتوني PMT، ثم باقي الأجهزة المعاونة، ويغلف أنبوب التضاعف الفوتوني بمادة تعمل كدرع ضد المغناطيسية magnetic shielding، فإن وجود أي مجال مغناطيسي قريب يؤدي إلى انحراف الإلكترونات أثناء رحلتها من لوح وآخر داخل أنبوب التضاعف مما يؤثر على خرج output الأنبوب. ويغلف العداد بدروع من الرصاص، لكن سمكها في هذه الحالة أقل من السمك في حالة العداد البئري، وذلك حتى لا تمثل دروع الرصاص ثقلًا كبيرًا يعوق عملية المسح كما يُركب عند مقدم العداد قناة أسطوانية داخل غلاف الرصاص تسمى الموجه collimator تعمل على حصر «رؤية» العداد في اتجاه معين، وطريقة تصميم هذا الموجه لها شأن كبير في أداء وظيفته وسيأتي عن ذلك تفصيل في مكان لاحق.

المراجع:

- Paul N. Goodwin and Dandamudi V. Rao, An introdution to the Physics of Nuclear Medicine, Charles C Thomas Publisher, Springfield, Illinois, USA.
- Edmund Kim, Nuclear Diagnostic Imaging, Practical Clinical Applications, Thomas P. Haynie, 1987.
- Kapoor, S. S. and Kamamurthy, V. S., Nuclear Radiation Detectors, Wiley Eastern Limited, New Delhi, 1993.
- Glenn F. Knoll, Radiation Detectors and Measurements, third Ed.John Wiley&Sons, Inc. NY, 2000.