

الباب الرابع

تفاعل الإشعاعات مع المادة

Interaction of Radiation with Matter

- 1- تقديم.
- 2- تفاعل الجسيمات المشحونة مع المادة.
- 3- تفاعل الفوتونات عالية الطاقة مع المادة.
- 4- التشتت المتطابق.
- 5- التفاعلات النووية الفوتونية.
- 6- توهين شعاع من فوتونات عالية الطاقة.

* * *

obeikandi.com

1- تقديم

لكل الإشعاعات النووية شكل ما من أشكال الطاقة؛ إما أن تكون ملازمة لها وجزءاً من طبيعتها inherent، كما في حالة الإشعاعات الكهرومغناطيسية (فوتونات)، أو أن تكون في صورة طاقة حركية كما في حالة الجسيمات المتحركة. عند مرور الإشعاعات سواءً كانت فوتونات أو جسيمات في وسط ما تنتقل طاقتها (أو جزء منها) إلى الذرات المكونة لهذا الوسط عبر آليات محددة. تمثل فهم الأسس التي تُبنى عليها عملية امتصاص (انتقال) الطاقة أهمية، ليس فقط لأن عملية رصد الفوتونات أو الجسيمات التي تمر خلال الوسط تُبنى عليها، ولكن أيضاً لأن لعملية الامتصاص تأثير حيوي biological effect على الوسط.

تنتقل طاقة الإشعاعات إلى ذرات الوسط عبر آليتين أساسيتين، التأين ionization والاستثارة excitation. في العملية الأولى يترك إلكترون (أو أكثر) ذرة الوسط مخلفاً أيوناً موجباً، وفي الثانية تُترك ذرة الوسط في حالة مستثارة (غير مستقرة). في النهاية، تتخلص الذرة من طاقة الاستثارة تلك عن طريق انبعاث فوتونات أو حرارة.

نعني بالإشعاعات النووية هنا فوتونات جاما والجسيمات المشحونة، ولا نقصد الجسيمات المعجلة أو النيوترونات (وإن كانت تدخل في مفهوم الإشعاعات النووية)؛ ذلك لأن تطبيقاتها المباشرة في مجال الطب النووي محدودة.

2- تفاعل الجسيمات المشحونة مع المادة

في معالجتنا لموضوع تفاعل الجسيمات المشحونة مع المادة، نقسم الجسيمات المشحونة إلى جسيمات ثقيلة وإلكترونات والمقصود بالجسيمات الثقيلة هنا، تلك الجسيمات الأكبر من الإلكترون، ومن ثم نقصد جسيمات مثل: البروتونات والديوترونات ^2H وجسيمات ألفا.

القوى الكهروإستاتيكية electrostatic forces هي إحدى القوى الأساسية التي تؤثر بها الجسيمات المشحونة فيما بينها، وتُسمى أيضاً قوى كولوم coulomb force. إذا كان لدينا شحنتان q و q' والمسافة بينها r ، فإن قوة كولوم:

$$F = qq'/r^2$$

(1) لا نقصد هنا بالطبع تفاعلاً كيميائياً ولكن نقصد بالمصطلح «تفاعل» التأثير المتبادل للقوى والمجالات.

وعلى هذا تتناسب قوى كولوم بين شحنتين عكسياً مع مربع المسافة بينهما، وهي قوى تنافر إذا كانت الشحنتان من نفس النوع، وقوى تجاذب إذا كانتا مختلفتين. إذن عند مرور جسيم مشحون في وسط ما فإن القوة المتبادلة بين الشحنة والكترونات وأنوية الوسط تتناسب عكسياً مع مربع المسافة بينهما، وتزداد التفاعلات التي تحدث بين الجسيم المشحون، وبين ذرات الوسط لوحدة الأطوال من المسار interactions per unit length في الأوساط الأثقف.

1-2 آليات التفاعل

Interaction Mechanisms

يتم «التصادم» بين الجسيمات المشحونة التي تخترق وسطاً ما وذرات هذا الوسط عبر قوى كهربية وليس تصادمًا ميكانيكيًا تتلامس فيه الأجسام المتصادمة كما يتبادر، إذن المقصود هنا بالتصادم هو تأثير الجسيم المشحون على إلكترونات وأنوية ذرات الوسط عبر هذه القوى، وهذا ما نشير إليه أيضا بتفاعل interaction الجسيمات المشحونة مع الوسط.

عند مرور الجسيم المشحون قريبا من إحدى ذرات الوسط فإنه يؤثر بقوة على إلكتروناتها المدارية، فإذا كانت هذه القوة من الكبر بحيث تجعل إلكترونا مدارياً يترك ذرته حدث التأين. يفقد الجسيم المشحون طاقته (أو جزء منها) عبر هذا التصادم. جزء من الطاقة المفقودة يُستنفد في التغلب على طاقة الربط للإلكترون المداري حتى يترك الذرة التي ينتمي إليها والجزء الباقي يذهب كطاقة حركة ينطلق بها هذا الإلكترون. التأين الذي يشمل إلكترونات مدارية داخلية inner-shell electrons يؤدي إلى انبعاث أشعة x أو إلكترونات Auger. غير أن هذا التأثير ضعيف، فغالباً ما يحدث التأين من خلال الإلكترونات الخارجية outer-shell electrons. إذا كان الإلكترون الناتج من عملية التأين ذو طاقة عالية قد يتمكن من إحداث تأين آخر (ثانوي) secondary ionization تنتج عنه إلكترونات ثانوية ذات طاقة عالية تُسمى: أشعة دلتا δ .

التأين هو الآلية الرئيسة التي تُبنى عليها نظريات كثير من كواشف الأشعة radiation detectors وهو أيضاً المسئول الرئيس عن كثير من التأثيرات الحيوية للإشعاعات، ولهذا تُسمى الجسيمات المشحونة عالية الطاقة بالإشعاعات المؤينة ionizing radiations.

إذا كان التصادم (التفاعل) بين الجسيم المشحون وذرات الوسط أقل حدة، انتقل إلكترون مداري إلى مستوى أعلى للطاقة داخل الذرة من غير أن يتركها، أي حدث للذرة استثارة excitation وفي هذه الحالة تكون الطاقة المفقودة أقل من تلك التي تضمنتها عملية التأين والطاقة المنتقلة إلى الوسط خلال الاستثارة عادةً ما تستنفد في زيادة الطاقة التذبذبية لجزيئات الوسط molecular vibrations والتي تؤدي إلى انبعاث حرارة أو إلى انبعاث (فوتونات) أشعة دون الحمراء Infrared (IR) أو ضوء مرئي visible أو أشعة فوق البنفسجية ultraviolet (UV).

هناك نوع ثالث من آليات التفاعل (التصادم)، إذا ما استطاع الجسيم المشحون اختراق السحابة الإلكترونية التي تحيط بالنواة و«تصادم» مع النواة. بالنسبة للجسيمات المشحونة الثقيلة عالية الطاقة high-energy charged particles كجسيمات ألفا أو البروتونات قد يؤدي هذا التصادم إلى التغلب على المجال الكهربائي للنواة، ومن ثم حدوث تفاعل نووي قد ينتج عنه نواة مشعة. ولكن عمومًا، بالنسبة للجسيمات المشحونة التي لا تستطيع أن تخترق المجال الكهربائي للنواة، فإنها تنحرف تحت تأثير هذا المجال القوي وتتباطأ decelerated (عكس تعجل accelerated)، ومن ثم يفقد الجسيم طاقته وتظهر هذه الطاقة المفقودة على هيئة فوتونات (أشعة كهرومغناطيسية) تُسمى: الأشعة الكابحة ^(□) Bremsstrahlung. 2. يكون هذا النوع من التأثيرات أكثر وضوحًا وظهورًا في حالة تفاعل الإلكترونات مع الوسط، وسوف نتناوله تفصيلًا.

عملية فقد الطاقة في عمليتي التأين والاستثارة تُسمى: فقد تصادمي collisional losses، بينما الفقد الذي يتضمن «تصادم» الجسيم مع النواة وينتج عنه انطلاق الأشعة الكابحة Bremsstrahlung يُسمى: فقد إشعاعي losses radiation. في المدى من الطاقة الذي يستخدم في الطب النووي يسود الفقد التصادمي. يزيد الفقد الإشعاعي بزيادة طاقة الجسيم وكذلك زيادة الرقم الذري لمادة الوسط الذي يمر فيه.

(1) كلمة ألمانية من مقطعين Bremse والتي تعني بالإنجليزية: Brake أي: الكابحة، والمقطع الثاني strahlung والتي تعني بالإنجليزية: radiation أي: الإشعاع، وبالتالي تعني الكلمة كلها الإشعاعات الكابحة.

2-2 شكل مسار الشحنة داخل الوسط Charged - Particle Tracks

يخلف الجسيم المشحون أثناء مروره في الوسط وعلى طول مساره إلكترونات وذرات متأينة، ويبلغ طول مساره في الأنسجة اللينة وما مائلها في المتوسط في حدود $100\mu\text{m}$ ، وقد يطول هذا المسار جانبياً في أحيان قليلة إذا توفرت ظروف تولد أشعة دلتا.

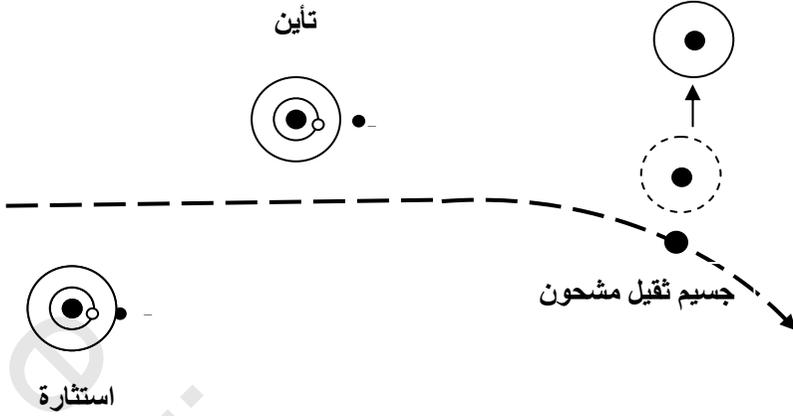
عندما يتصادم جسيم مشحون مع إلكترون مداري لا يتغير اتجاه مساره ويُفقد جزءاً يسيراً من طاقته. القيمة العظمى لنسبة الفقد عند تصادم جسيم ثقيل كتلته M مع جسيم خفيف كتلته m هي بالتقريب $(4m/M)$ ، وبالتالي تكون هذه النسبة في حدود 0.5% في حالة تصادم جسيم ألفا مع إلكترون $((4/(4 \times 1840))$). يفقد جسيم ألفا 35 eV عند مروره في الهواء في الظروف القياسية عند كل تأين، وبذلك يحدث عدد هائل من مثل هذه التفاعلات لجسيم ألفا طاقته 2 MeV حتى تُبطئ حركته، ويتمكن من التقاط إلكترونين من الوسط متحولاً إلى ذرة هيليوم.

شكل المسار الذي يأخذه جسيم ثقيل مشحون أثناء حركته خلال وسط ما يتوقف على نوع التفاعل (شكل 1-4). لا ينحرف الجسيم عن مساره أثناء عمليتي الاستثارة (a) والتأين (b)، بينما إذا اقترب الجسيم قريباً كافياً من نواة ذرة من ذرات الوسط انحرف عن مساره، وكذلك تنتقل ذرة الوسط من مكانها وقد يصاحب ذلك حدوث تأين أيضاً.

فضلاً عن حدوث عمليات التأين والاستثارة التي يحدثها مرور الجسيم الثقيل المشحون في الوسط، قد تحدث بضع تصادمات مع النواة ينتج على إثرها انبعاث فوتونات الإشعاعات الكابحة Bremsstrahlung .

نتيجة لما تقدم من نقاش، يأخذ الجسيم الثقيل المشحون عموماً مساراً مستقيماً متصلاً، ويظل يتباطأ بصفة مستمرة من خلال العديد من التصادمات حتى تتعادل شحنته ويتوقف.

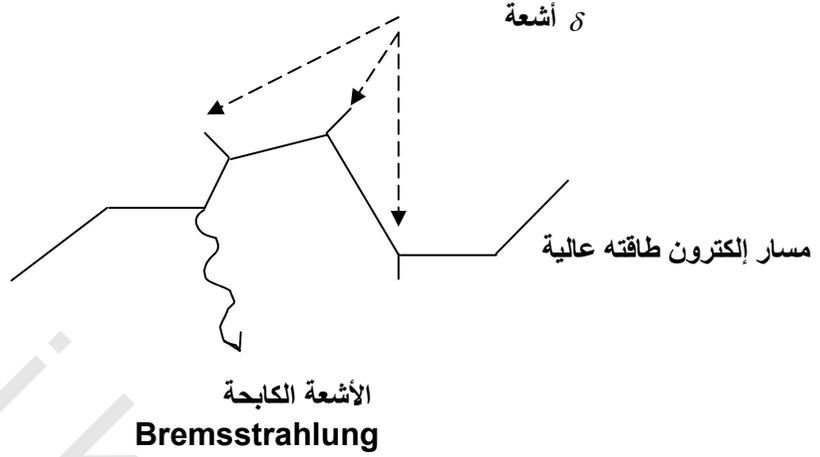
الإلكترونات هي أهم أنواع الجسيمات المشحونة التي تقابلنا في مجال الطب النووي. تنطلق الإلكترونات عالية الطاقة $\text{high-energy electrons}$ من خلال كثير من عمليات الاضمحلال النووي مثل اضمحلال β ، التحول الداخلي، وتأثير Auger. أيضاً تتولد نتيجة تفاعل فوتونات أشعة جاما وأشعة X مع المادة.



شكل (4-1) مسار جسيم ثقيل مشحون في وسط ما

يختلف الإلكترون في مسار تمامًا عن الجسيم الثقيل المشحون. ثمة فروق في عملية فقد الطاقة للإلكترونات مقارنة بالجسيمات المشحونة الثقيلة تؤدي إلى ذلك الاختلاف، منها أن كمية الفقد في الطاقة في كل مرة يتفاعل فيها الإلكترون أكبر؛ ذلك لأن كتلة الإلكترون الساقط وكتلة الإلكترون المداري الذي ينتمي إلى ذرة الوسط واحدة، وهذا السبب يجعل مسار الإلكترون متعرجاً لأن التساوي في الكتلة يؤدي إلى انحراف زاوي أكبر عند التفاعل (التصادم).

فضلاً عن تصادم الإلكترون مع الإلكترونات المدارية لذرات الوسط، فإنه قد يتصادم مع الأنوية، ومن ثم ينحرف بزوايا كبيرة ويحدث تغيير في سرعته محدثاً انبعاث فوتونات الإشعاعات الكابحة Bremsstrahlung. الشكل (4-2) يوضح الفروق الأساسية بين مسارات الجسيمات المشحونة الثقيلة ومسارات الإلكترونات في الوسط .



شكل (2-4) مسار جسيم ألفا و مسار إلكترون في وسط. مسار ألفا مستقيم، قصير وسميك، بينما يكون مسار الإلكترون متعرجاً وأطول كثيراً.

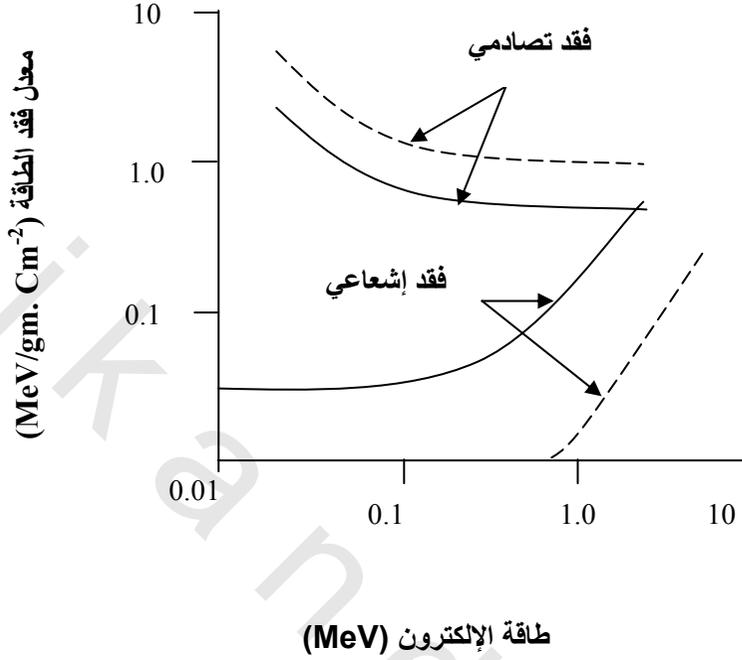
ثمة فرق آخر بين الإلكترونات والجسيمات الثقيلة مرده الفرق في الكتلة. لنفس القيمة من طاقة الحركة، تتحرك الإلكترونات أسرع كثيراً، فعلى سبيل المثال يتحرك جسيم ألفا الذي طاقته 4 Mev بسرعة تساوي 10% من سرعة الضوء بينما يتحرك إلكترون طاقته 1 Mev فقط بسرعة تساوي 90% من سرعة الضوء، وعلى هذا يمضي الإلكترون فترة أقل بجوار ذرات الوسط مما يجد من فرص التفاعل، ومن ثم فقد (انتقال) الطاقة، مما يؤدي إلى كثافة تأين ionization density أقل.

2-3 فقد الطاقة على طول مسار الجسيم المشحون.

Energy Deposition Along a Charged Particle Track

المعدل الطولي الذي يفقد به الجسيم المشحون طاقته (كمية الطاقة المفقودة لوحدة الأطوال $\Delta E / \Delta x$) يحدد المسافة التي يقطعها في الوسط حتى يتوقف، وكذلك يحدد كثافة التأين على طول المسار. يتوقف كل من معدل الفقد وكثافة التأين على نوع الجسيم المشحون

وطاقته، وكذلك على تركيب الوسط وكثافته. يوضح شكل (3-4) كل من معدل الفقد التصادمي (التأين والاستثارة) ومعدل الفقد الإشعاعي (Bremsstrahlung) للإلكترون في كل من الماء والرصاص.



شكل (3-4) معدل الفقد التصادمي، ومعدل الفقد الإشعاعي للإلكترون في كل من الماء (----) والرصاص () كدالة في الطاقة. لاحظ أن تدرج الإحداثيات هو لوغاريتم-لوغاريتم log-log.

كدالة في طاقته، وذلك في المدى 0.01 – 10 Mev. لاحظ أن العلاقة في الشكل صيغت لمعدل الفقد لوحدة الكثافة من مادة الوسط، ذلك لمعايرة معدل الفقد بالنسبة للكثافة normalize for density:

$$\Delta E / \Delta x (\text{MeV} / \text{g.cm}^{-2}) = \frac{\Delta E / \Delta x (\text{MeV} / \text{cm})}{\rho (\text{g} / \text{cm}^3)}$$

يتضح من الشكل أن معدل الفقد التصادمي للإلكترون (ΔE / Δx)_{coll} يتناقص

بزيادة طاقته، ذلك مرده تأثير زيادة السرعة الذي ذكرناه من قبل حيث لا يمكن الإلكترون قريباً من ذرات الوسط طويلاً. كذلك يتناقص $(\Delta E / \Delta x)_{\text{coll}}$ بزيادة العدد الذري لمادة الوسط (قارن بين الماء والرصاص في الشكل)؛ ذلك لأنه في الأوساط ذات الأعداد الذرية العالية تُحجب الإلكترونات الداخلية عن التفاعل بواسطة طبقات من الإلكترونات الخارجية، وعلى هذا كانت الأوساط الأخف تعمل كدروع أنسب لمصادر الإلكترونات.

من ناحية أخرى، يتزايد معدل الفقد الإشعاعي للإلكترون $(\Delta E / \Delta x)_{\text{rad}}$ بزيادة طاقته، وكذلك بزيادة العدد الذري للوسط الممتص للأسباب التي ذُكرت من قبل في تفسير حدوث الإشعاعات الكابحة **Bremsstrahlung**.

يُعبّر عن معدل الفقد الكلي (أي الذي يشمل كل من الفقد التصادمي والإشعاعي) **total energy loss rate**، S_t ، $(\Delta E / \Delta x)_{\text{total}}$ بوحدة MeV/cm، وهذا المعدل يُسمى أيضاً قدرة الإيقاف الخطي **linear stopping power**. ثمة كمية أخرى ذات صلة، معامل الانتقال الخطي **Linear Energy Transfer (LET) L**، وهو معامل يشير إلى الطاقة المفقودة موضعياً على طول المسار، وهو يختلف عن معدل الفقد الكلي بأنه لا يشمل الفقد الإشعاعي؛ ذلك لأن الفقد الناتج عن إنتاج فوتونات **Bremsstrahlung** يحدث بعيداً عن المسار الرئيس (عد إلى الشكل (2-4)). على كل، بالنسبة لمدى الطاقة المستخدم في الطب النووي يكون الفقد الإشعاعي صغيراً، ومن ثم تكون الكميتان S_t و L متساويتان تقريباً.

4-2 التآين النوعي

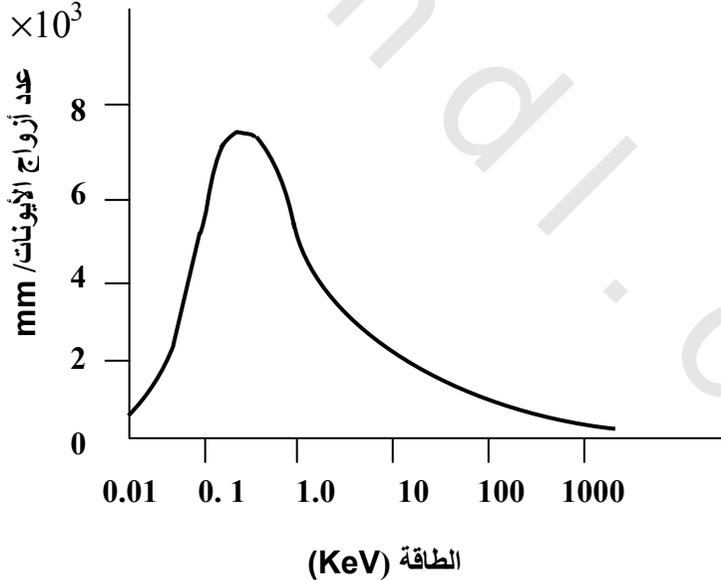
Specific Ionization (SI)

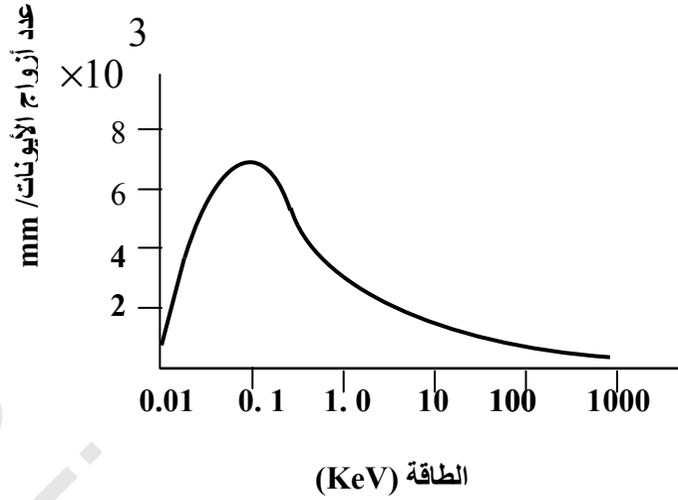
التآين النوعي هو العدد الكلي للتأينات (ابتدائي وثنائي) لوحدة الأطوال على مسار الجسيم المشحون. النسبة بين معامل الانتقال الخطي L والتآين النوعي SI تمثل متوسط الطاقة اللازمة لكل تآين **average energy per ionization**، W :

$$W = LET/SI$$

لقد قيست W للعديد من الغازات ووجد أن قيمة تقع في مدى ضيق، 25 – 35 ev لكل تأين، وغير معتمدة تقريباً على نوع الجسم أو طاقته. يجب التنبيه بأن متوسط الطاقة لكل تأين W ليست هي جهد التأين (I) ionization potential؛ فالأخير يمثل متوسط الطاقة اللازمة لإحداث تأين في مادة ما ومداهما للغازات 10 – 15 ev. الفرق بين الكميتين يأتي من الجزء المستنفد في الاستثارة. من الواضح أنه في حدود نصف طاقة الجسم تستنفد في ذلك. لقد وجدت نفس النسبة بين I و W في حالة ما إذا كان الوسط الذي يخترقه الجسم المشحون شبه موصل صلب.

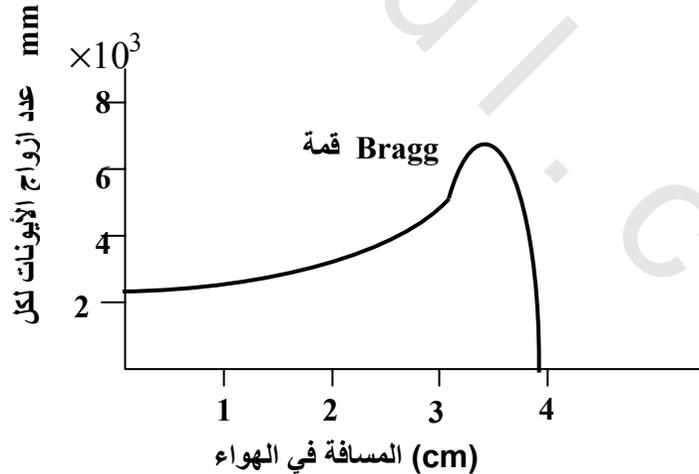
نظراً لأن W لا تعتمد بصورة محسوسة على نوع الجسم أو طاقته، يتناسب التأين النوعي مع معامل الانتقال الخطي على طول مسار الجسم المشحون. الأمر يستوجب إذن النظر بتمعن إلى سلوك التأين النوعي كدالة في طاقة الجسم. يوضح شكل (4-4) التأين النوعي الناتج عن مرور إلكترونات في الهواء كدالة في طاقتها. يتزايد التأين النوعي SI بزيادة طاقة الإلكترون في مدى الطاقات المنخفضة حتى قيمة معينة عاكسا حقيقة أن معدل فقد الطاقة يتزايد عندما تنخفض سرعة الإلكترون، ثم لا يلبث أن يتناقص التأين النوعي عند الطاقات العليا.





شكل (4-4) التأين النوعي للإلكترونات في الماء كدالة في طاقتها

التأين النوعي لجسيم ألفا أكبر بحوالي مائة مرة من التأين النوعي للإلكترونات لها نفس الطاقة، ذلك مرده إلى الشحنة الأكبر والسرعة الأقل حيث تتاح فرصة أطول للتفاعل مع ذرات الوسط ومن ثم انتقال الطاقة. زيادة التأين النوعي عندما تبطئ الجسيمات من سرعتها أدى إلى زيادة ملحوظة في التأين النوعي عند نهاية المسار، وهذا التأثير يبدو أكثر وضوحاً في حالة الجسيمات الثقيلة. يوضح شكل (4-5) التأين النوعي لجسيمات ألفا في الهواء كدالة



شكل (4-5) التأين النوعي للشحنات الثقيلة (جسيم ألفا) كدالة في طول المسار

في المسافة. يُشار إلى الزيادة الملحوظة في التآين النوعي قرب نهاية المسار بتأثير (قمة) براج Bragg effect (شكل (4-5)). الانخفاض المفاجئ في التآين النوعي وصولاً إلى الصفر عند نهاية المسار يأتي نتيجة تعادل الشحنات بعد التقاطها إلكترونات من الوسط، ومن ثم انعدام التفاعل. يتحرك جسيم ألفا، على سبيل المثال عدة سنتيمترات في الهواء وعدة ميكرونات في النسيج. نفس الزيادة تحدث في التآين النوعي للإلكترونات عند نهاية المسار، حيث تظهر قمة الزيادة في التآين النوعي عندما تنخفض طاقة الإلكترون إلى أقل من 1 KV (عد إلى الشكل (4-4) - لاحظ أن المحور الأفقي في هذا الشكل يمثل الطاقة وليس المسافة).

5-2 تفاعل جسيمات بيتا مع المادة

بالرغم من أننا تعرضنا لبعض تفاصيل تفاعل الإلكترونات مع المادة تحت عناوين سابقة في سياق تناولنا لتفاعل الجسيمات المشحونة مع المادة، ما زال هناك مزيد من التفاصيل تقترن بالتأثيرات المختلفة التي تصاحب تفاعل الإلكترونات (جسيمات بيتا) مع المادة.

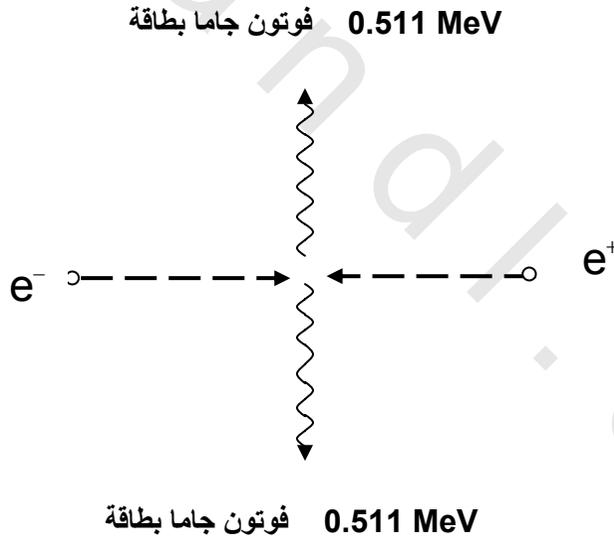
الإلكترونات هي أهم أنواع الجسيمات المشحونة التي تقابلنا في مجال الطب النووي. تنطلق الإلكترونات عالية الطاقة high-energy electrons من خلال كثير من عمليات الاضمحلال النووي مثل اضمحلال β ، التحول الداخلي، وتأثير Auger. أيضا تتولد نتيجة تفاعل فوتونات أشعة جاما وأشعة X مع المادة.

يتوقف معدل فقد الطاقة هنا أيضا على سرعة الجسيم، ولكن ثمة فروق في عملية فقد الطاقة للإلكترونات مقارنة بالجسيمات المشحونة الثقيلة منها أن كمية الفقد في الطاقة في كل مرة يتفاعل فيها جسيم بيتا أكبر؛ ذلك لأن كتلة الإلكترون الساقط وكتلة الإلكترون المداري الذي ينتمي إلى ذرة الوسط واحدة. ونفس السبب يجعل مسار الإلكترون متعرجاً لأن التساوي في الكتلة يؤدي إلى انحراف زاوي أكبر عند التفاعل (التصادم). مسار الجسيمات الثقيلة المشحونة يكون في الغالب مستقيماً.

كما أسلفنا، تفقد جسيمات بيتا (الإلكترونات) جزءاً من طاقتها من خلال إنتاج فوتونات الأشعة الكابحة Bremsstrahlung فعندما يقترب الإلكترون من نواة إحدى ذرات الوسط يتم تعجيله بقوة التجاذب بينها (بالنسبة للبيوزوترون يتم التنافر بينه وبين النواة بقوة كأنه تعجيل في اتجاه آخر)، وإذا ما زادت طاقة حركة الإلكترون إلى قيمة تزيد عن طاقة السكون له (أي m_0c^2) تحول هذا الفرق إلى فوتونات Bremsstrahlung. هذه العملية

تسري على الجسيمات المشحونة عموماً، لكنها أظهر في حالة الإلكترونات؛ لأن طاقة السكون للإلكترون صغيرة نسبياً، $m_{e_0}c^2 = 0.511\text{MeV}$. أيضاً، تتناسب كثافة الفوتونات الكابحة Bremsstrahlung المنطلقة طردياً مع كل من مربع العدد الذري لمادة الوسط Z ، وكذلك مع مربع العدد الذري لمادة الجسم Z وتتناسب عكسياً مع مربع كتلة الجسم M أي تتناسب مع $(zZ/M)^2$ وعلى هذا تكون الإلكترونات أكثر الجسيمات المشحونة قدرة على إنتاج الإشعاعات الكابحة Bremsstrahlung؛ ذلك لصغر كتلتها بالرغم من صغر شحنتها. كما يتضح من علاقة التناسب السابقة أيضاً أن الأوساط الأثقل أكثر قدرة على إنتاج تلك الأشعة.

ولأن كثافة فوتونات Bremsstrahlung تعتمد على Z^2 ، فإن المواد الكثيفة لا تُعتبر دروع مناسبة لمصادر جسيمات بيتا، فبالرغم من كونها لا تتمكن جسيمات بيتا من الهرب فإن فوتونات Bremsstrahlung قد تستطيع، وعلى هذا لا يُعتبر الرصاص درعاً مناسباً لمصادر بيتا، بينما الزجاج والبلاستيك أنسب؛ فهما يستطيعان امتصاص جسيمات بيتا وما قد ينتج عنها من فوتونات الأشعة الكابحة.



شكل (4-6): فناء الإلكترون والبوزيترون لينتج فوتونان في اتجاهين متضادين كل بطاقة

0.511MeV

تأثير آخر لجسيمات بيتا مع الوسط، يأتي نتيجة لفناء البوزوترون مع الإلكترون. تذكر أننا نقصد بجسيمات بيتا الموجب منها (البوزوترونات) والسالب (الإلكترونات). إذا انطلق بوزوترون إلى داخل وسط ما فإنه يتفاعل مع ذرات الوسط محدثاً تأينا واستثارة، تماماً كما يفعل الإلكترون، غير أنه عندما يتباطأ لا يتجول هكذا حرّاً كما يفعل الإلكترون؛ ولكنه يتحد مع إلكترون حر داخل الوسط فيفنيا $annihilate$ وينتج عن ذلك فوتونان كل بطاقة 0.511MeV (تذكر أن $m_{e0}c^2 = 0.511\text{MeV}$) ينطلقان آتياً في اتجاهين متضادين، الزاوية بين اتجاهيهما 180° (الشكل (4-6)). يتحرك البوزوترون فقط بضع ملليمترات في الأنسجة قبل أن يحدث الفناء، وهذا بالضرورة يؤدي إلى تحديد موقع الحدث بدقة إذا ما توفر وجود كشافين في اتجاهين متضادين لرصد الحدث آتياً، وتلك هي الفكرة الأساسية وراء الكاميرة البوزوترونية، ذلك ما سوف نتحدث عنه تفصيلاً بإذن الله في موضوع التصوير النووي.

2-6 تأثير Cerenkov

تأثير آخر يصاحب حركة الجسيم المشحون في المادة، تأثير Cerenkov. يظهر هذا التأثير عندما يتحرك الجسيم المشحون في وسط ما بسرعة أكبر من سرعة الضوء في هذا الوسط، وهنا قد يبدو أن في الأمر لبسا، وقبل أن نستمر في شرح هذا التأثير لابد من تجلية هذا اللبس. الحقيقية التي تقول: إنه لا يمكن لجسيم أن يتحرك بسرعة أكبر من سرعة الضوء، أو أن تنتقل كمية فيزيائية بسرعة أكبر من سرعة الضوء. يُقصد هنا «أكبر من سرعة الضوء في الفراغ، $c \approx 3 \times 10^8 \text{ m}$ وليس سرعة الضوء في المادة»، فمثلاً يتحرك جسيم بيتا الذي طاقته 1 MeV في محلول مائي بسرعة $v \approx 0.8c$ بينما تكون سرعة الضوء في هذا المحلول (الذي معامل انكساره $n \approx 1.33$) هو $c' \approx 0.7c$ (تذكر أن العلاقة بين سرعة الضوء في وسط ما c' وسرعة الضوء في الفراغ c هي $n = c/c'$ حيث n هو معامل انكسار مادة هذا الوسط).

تحت هذه الظروف، تحرك الجسيم بسرعة أكبر من سرعة الضوء في الوسط، تتخلق موجة "صدمة" كهرومغناطيسية $electromagnetic \ shock \ wave$ مثل ما يحدث في حالة الموجات الميكانيكية فعندما يتحرك جسم (كالطائرة مثلاً) بسرعة أكبر من سرعة الصوت تتولد موجة صدمة ميكانيكية. موجة الصدمة الكهرومغناطيسية تلك تُسمى أشعة

Cerenkov وتظهر على هيئة فوتونات ضوئية light photons (أي أشعة كهر ومغناطيسية يقع أطوالها الموجية في مدى الضوء المرئي)، وغالبًا ما تتولد نتيجة تأثير جسيمات بيتا عالية الطاقة ويُستدل بها على وجودها وهي المسئولة عن الضوء الأزرق الذي يظهر حول قلب المفاعل النووي أثناء تشغيله.

3- تفاعل الفوتونات عالية الطاقة مع المادة

Interaction of High Energy Photon with Matter

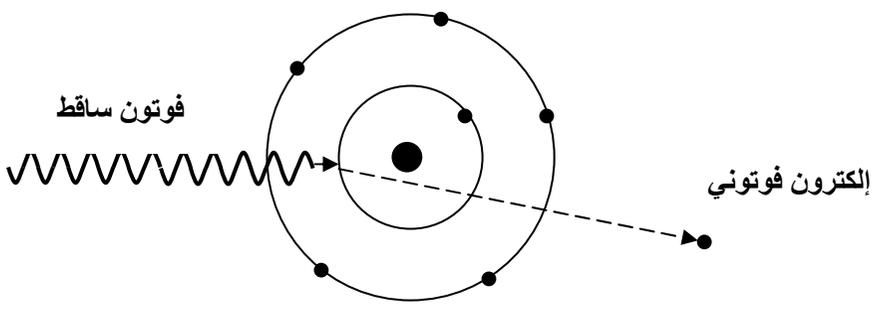
تفقد الفوتونات عالية الطاقة (أشعة جاما، أشعة X، الأشعة الكابحية bremsstrahlung) طاقتها عند مرورها في الوسط من خلال آليات معقدة، حيث تتأثر الفوتونات بالمجالات الكهر ومغناطيسية للإلكترونات أنوية ذرات الوسط، وهذا بدوره يستوجب في الغالب معالجة كمية في إطار النظرية النسبية، لكننا من منظور عملي ننظر إلى التأثير المباشر لعملية التفاعل بين الفوتونات والوسط والذي يؤدي إلى امتصاص absorption أو توهين attenuation شعاع الفوتونات الساقط. من هذا المنظور، نتناول أهم آليات تفاعل الفوتونات عالية الطاقة مع المادة، ذلك في مجال الطب النووي.

3-1 التأثير الكهروضوئي

The Photoelectric Effect

التأثير الكهروضوئي هو عملية امتصاص ذرية absorption atomic، حيث تمتص فيها طاقة الفوتون الساقط كاملة بواسطة أحد الإلكترونات المدارية، يختفي على إثر ذلك الفوتون، وينطلق إلكترون من الذرة الممتصة، وتسمى هذه الإلكترونات بالإلكترونات الفوتونية photoelectrons (شكل (4-6)).

تعالج كتب الفيزياء ظاهرة التأثير (الانبعاث) الكهروضوئي معالجة تفصيلية من خلال تكميم quantizing طاقة الإشعاعات الكهر ومغناطيسية، كما تعالج الجوانب العملية المرتبطة بشدة شعاع الفوتونات الساقط وتردده وعلاقة ذلك بشدة التيار الفوتوني الناتج، وليس من أهدافنا هنا الخوض في هذه التفاصيل، لكننا نقدم وصفًا مبسطًا للظاهرة ونتناول الجوانب ذات العلاقة بالطب النووي، وذلك في هذا الموضوع ومواقع أخرى.



شكل (4-6). التأثير الكهروضوئي

لكي تنطلق الإلكترونات الفوتونية من ذرات الوسط لا بد وأن تكون طاقة الفوتون الساقط $h\nu$ (حيث ν هي تردده و h هي ثابت بلانك) أكبر من طاقة الربط للإلكترون E_b electron's binding energy وما يزيد عن هذه الطاقة يظهر كطاقة حركة E_k ينطلق بها الإلكترون :

$$E_k = h\nu - E_b \quad (4 - 1)$$

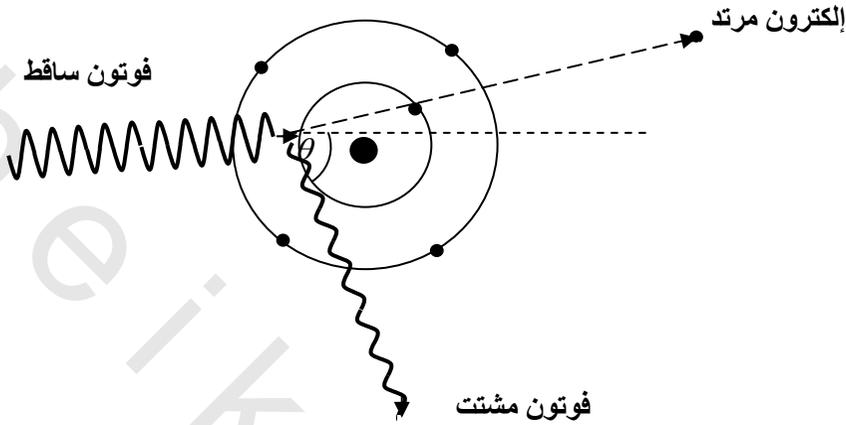
إذا كانت طاقة الفوتون كبيرة فإنه من الأرجح أن ينطلق الإلكترون من المستوى K . يتبع ذلك أن يهبط إلكترون من مستوى أعلى ليملاً المكان الشاغر الذي تركه الإلكترون الفوتوني الذي انطلق تاركاً الذرة، فينتج عن ذلك انبعاث لأشعة x المميزة x - characteristic rays (أو إلكترون Auger). تُقدر طاقة أشعة x المميزة في المواد الخفيفة ذات الوزن الذري المنخفض $low-Z$ elements بضع من KeV ، وعلى هذا تمثل طاقة الربط جزءاً يسيراً في عملية التأثير الكهروضوئي في الأنسجة الحية، لكن في العناصر الأثقل مثل اليود والرصاص تقع طاقة الربط في المدى $20 - 100 KeV$ وعلى هذا فهي تمثل نسبة عالية من طاقة الفوتون الممتصة.

2-3 تشتت كومبتون (تأثير كومبتون)

Compton Scattering (Effect)

يمكن تفسير تشتت كومبتون على أنه عملية «تصادم» بين فوتون وإلكترون في مدار خارجي ضعيف الارتباط بالنواة؛ ولأن طاقة الفوتون الساقط في تشتت كومبتون تفوق كثيراً طاقة الربط تبدو عملية التصادم كأنها تحدث بين فوتون وإلكترون حر (شكل (4-7)).

في تشتت كمبتون، لا يختفي الفوتون الساقط، لكنه يتشتت بزاوية θ معطيا جزءاً من طاقته إلى الإلكترون ضعيف الارتباط، فينطلق هذا الأخير تاركاً الذرة (شكل (4-7)). هذا الإلكترون يُسمى الإلكترون المرتد (recoil electron).



شكل (4-7). رسم تخطيطي لتشتت كمبتون . جزء من طاقة الفوتون ينتقل إلى إلكترون من المدارات الخارجية ويتشتت الفوتون (بطاقة أقل) في اتجاه يعمل زاوية θ

من خلال قانوني حفظ الطاقة conservation of energy وحفظ كمية الحركة conservation of momentum، ومن خلال قوانين النظرية النسبية الخاصة يمكن إثبات ارتباط طاقة الفوتون المشتت E_{sc} بزاوية التشتت θ :

$$E_{sc} = \frac{E_{in}}{\left(1 + \frac{E_{in}}{m_0 c^2}\right)(1 - \cos \theta)} \quad (4 - 2)$$

حيث E_{in} هي طاقة الفوتون الساقط ، $m_0 c^2$ هي طاقة السكون للإلكترون ، c هي سرعة الضوء ، m_0 هي كتلة السكون للإلكترون.

نظراً لأن فرق الطاقة للفوتون الساقط والفوتون المشتت تنتقل إلى الإلكترون المرتد فإن طاقته E_{re} تكون:

$$E_{re} = E_{in} - E_{sc} \quad (4 - 3)$$

يتضح من المعادلتين السابقتين أن الطاقة التي تنتقل إلى الإلكترون المرتد لا تتوقف على كثافة مادة الوسط الممتص ولا على الرقم الذري لمادته، ولا على أي خاصية أخرى من خواص المادة الممتصة (ذلك بالطبع عند إهمال طاقة الربط E_0)، فعملياً يُعتبر تشتت كمبتون تفاعلاً بين فوتون وإلكترون electron–photon interaction.

يمتد مدى الطاقة التي تنتقل من الفوتون الساقط إلى الإلكترون E_{re} من الصفر تقريباً، وذلك عندما تكون $\theta = 0$ (المعادلة (4-2))، وهذا ما يُسمى التشتت الخاطف grazing scattering إلى قيمة قصوى E_{re}^{max} تحدث عندما $\theta = \pi$ وهذا ما يُسمى التشتت الخلفي back scattering، وحينئذ تكون طاقة الفوتون المشتت في أدنى قيمة لها. الطاقة الدنيا للفوتون المشتت يمكن حسابها إذن من المعادلة (4-2)، وذلك بوضع $\theta = \pi$ وبالتالي

$$\cos = -1 \quad \therefore E_{sc}^{min} = E_{in} / (1 + 2E_{in} / m_0 c^2) \quad (4 - 4)$$

من المعادلة (4 - 3)، إذن:

$$E_{re}^{max} = E_{in} - E_{sc}^{min}$$

بالتعويض من المعادلة (4 - 4) في التعبير الأخير:

$$\begin{aligned} E_{re}^{max} &= E_{in} - \frac{E_{in}}{(1 + 2E_{in} / m_0 c^2)} \\ &= E_{in} - \frac{E_{in}}{(1 + 2E_{in} / 0.511)} \end{aligned}$$

حيث $m_0 c^2 = 0.511 \text{ MeV}$ ، وبالتالي تعتبر وحدات كل الطاقات التي تظهر في المعادلة هي MeV، وبإعادة ترتيب المعادلة السابقة، تأخذ الشكل:

$$E_{re}^{max} = \frac{E_{in}^2}{(1 + 0.2555)} \quad (4 - 5)$$

طاقة التشتت الخلفي E_{sc}^{min} (وبالتالي القيمة القصوى لطاقة الإلكترون المرتد E_{re}^{max}) لها قيم مميزة characteristic vaues تعتمد على طاقة الفوتون الساقط.

هذه القيم ذات أهمية عند معالجة موضوع أطيف أشعة جاما puse-hight spectroscopy، حيث تمثل إحدى مركبات هذه الأطيف (الباب السادس). القائمة (4-1) تحتوي على قيم الكميتين E_{re}^{max} و E_{sc}^{min} لفوتونات جاما وفوتونات أشعة X التي تنبعث من بعض النظائر المستخدمة في الطب النووي.

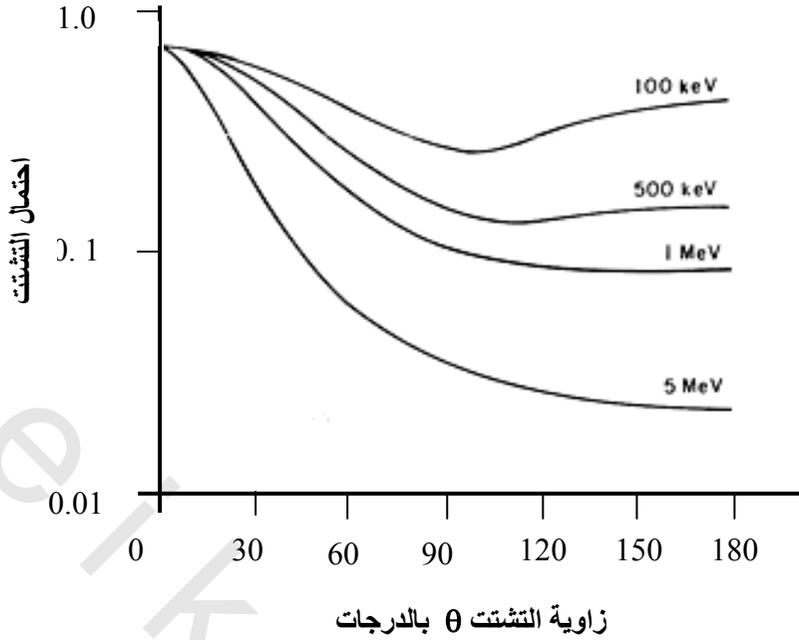
القائمة (4-1) طاقة الفوتونات المشتتة والإلكترون المرتد في حالة تشتت كمبتون الخلفي ($\theta = \pi$)

النظير المشع	طاقة الفوتون الساقط (KeV)	E_{sc}^{min} (KeV)	E_{re}^{max} (KeV)
^{125}I	27.5	24.8	3.3
^{133}Xe	81.0	62.0	19.0
^{99m}Tc	140.0	91.0	49.0
^{133}I	364.0	150.0	214.0

المصدر: J.A. Sorenson and M. E. Phelps, Physics in Nuclear Medicine,

Grune&Stratton, NY 1980.

توضح بيانات هذه القائمة أنه في حالة ما إذا كانت طاقة الفوتونات الساقطة منخفضة نسبياً (كما في حالة ^{125}I) تكون طاقة الإلكترون المرتد (حتى في حالة التشتت الخلفي) منخفضة، وعلى هذا يكون التغير في طاقة الفوتونات المشتتة قليلاً. هذه الحقيقة تمثل أهمية عند التعاطي مع طرق تمييز النبضات technique discrimination للتخلص من الجزء الخاص بتشتت كمبتون من طيف أشعة جاما (الباب السادس).



شكل (4-8) التوزيع الزاوي لتشتت ديمبتون عند طاقات مختلفة للفوتون الساقط. لاحظ أن تدرج الإحداثيات هو شبه لوغاريتم semi log

أما عن مدى اعتماد احتمال التشتت على زاوية التشتت (التوزيع الزاوي لفوتونات كمبتون angular distribution) فيوضحه (الشكل (4-8))، ذلك لقيم مختلفة لطاقة فوتونات جاما الساقطة. عند الطاقات المنخفضة نسبياً (10 - 100 keV)، تتساوى احتمالات التشتت في الاتجاه الأمامي forward scattering ($\theta < \pi/2$) مع احتمالات التشتت في الاتجاه الخلفي backward scattering ($\theta > \pi/2$)، وتبلغ قيمة احتمال التشتت أداها عند $\theta = \pi/2$ ، وكلما زادت طاقة الفوتونات الساقطة ($\geq 0.5\text{MeV}$) كلما زاد احتمال التشتت الأمامي.

3-3 إنتاج الزوج Pair Production

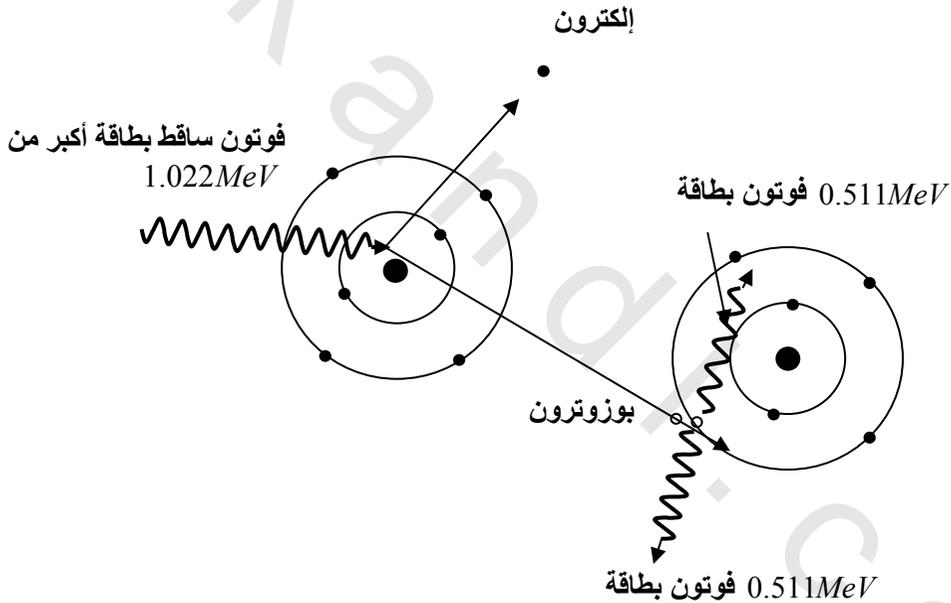
عندما يمر فوتون ذو طاقة عالية قريباً من النواة فإنه يفنى ليتولد زوج: إلكترون - بوزوترون electro - positron pair (شكل (4-10)). الطاقة المكافئة لكتلة

الإلكترون أو البوزوترون هي $m_0c^2 = 0.511\text{MeV}$ وبالتالي يكون الحد الأدنى لطاقة الفوتون الساقط لكي يتخلق الزوج $2m_0c^2 = 2 \times 0.511 = 1.022\text{ MeV}$. طاقة الفوتون التي تزيد عن هذه القيمة تذهب كطاقة حركة لكل من الإلكترون والبوزوترون، T_{e^+} و T_{e^-} :

$$E_\gamma = 2m_0c^2 + T_{e^-} + T_{e^+}$$

حيث E_γ هي طاقة الفوتون الساقط.

لا يلبث البوزوترون المنطلق أن يتحد مع أحد إلكترونات الوسط لفينيا ويتخلق فوتونان كل بطاقة 0.511MeV ، ينطلقان في اتجاهين متضادين (بينهما 180 درجة - الشكل 4-9)



شكل (4-9) إنتاج الزوج وفناء إلكترون وبوزوترون

هناك تأثيران آخران لتفاعل الفوتونات عالية الطاقة مع المادة، ولكنها أقل أهمية بكثير عند الحديث عن الطب النووي، ومن ثم نشير إليهما عابراً:

4- التشتت المتطابق

Coherent (Rayleigh) Scattering

هو تشتت يحدث بين الفوتون والذرة ككل، ونظرًا لعظم كتلة الذرة (مقارنة بالإلكترون المرتد في حالة تشتت كمبتون، مثلاً) فإن مقدار الطاقة المفقودة (المتصدة) كطاقة ارتداد تكون ضئيلة، وعلى هذا يتشتت الفوتون بدون فقد في طاقة تقريباً. ومن هنا جاءت التسمية coherent، ويكون هذا النوع من التشتت ذا بال فقط عند الطاقات المنخفضة ($\leq 50 \text{ KeV}$) ولا يكون له تأثير إلا عند إجراء بعض القياسات الدقيقة مثل المسح X-ray CT، ولكن وكما أسلفنا لعدم كونه وسيلة فعالة لانتقال (فقد) الطاقة فإنه أثره ضعيف في مجال الطب النووي.

5- التفاعلات النووية الفوتونية

Photonuclear Reactions

يُنظر إلى هذا التأثير كوسيلة لإنتاج النظائر المشعة، ويتطلب حدًا أدنى من الطاقة يساوي 2MeV ولا يكون ذا أثر لكثير من العناصر إلا إذا زادت طاقة الفوتون عن حوالي 10MeV . حتى عند هذه الطاقات العالية يظل احتمال حدوث تفاعل نووي أقل من حدوث تشتت كمبتون أو إنتاج الزوج، وعلى هذا لا يمثل التفاعل النووي الفوتوني أهمية في عمليات التوهين التي تحدث لشعاع الفوتونات photon beam attenuation.

6- توهين \square شعاع من فوتونات عالية الطاقة

Attenuation of High-Energy Photons

عند سقوط شعاع من فوتونات جاما على وسط فإنها تتفاعل مع ذرات الوسط من خلال الآليات التي سبق تناوؤها بالتفصيل في مجال الطب النووي. من بين آليات تفاعل الفوتونات عالية الطاقة مع المادة يكون التأثير الكهروضوئي، تشتت كمبتون، وإنتاج الزوج هي الأهم. تؤدي هذه التفاعلات إلى توهين attenuation أو إضعاف لشعاع الفوتونات. يختلف التوهين الذي يحدث لشعاع الفوتونات عن ذلك الذي يحدث لشعاع من جسيمات

(1) من وهن، أي: ضعف.

ألفا أو بيتا. يكون التفاعل في حالة فوتونات جاما أضعف، ومن ثم تحترق مسافات أكبر داخل الوسط مقارنة بتلك التي تقطعها جسيمات ألفا أو بيتا.

عادة ما يتم انتقال الطاقة من الفوتونات إلى الوسط في سلسلة من التفاعلات المتتابعة، ينتج خلالها فوتونات مشتتة وإلكترونات عالية الطاقة. إلى هذه الإلكترونات عالية الطاقة تعود عملية انتقال (صب) الطاقة إلى الوسط deposition of energy in matter. عمليات التأين والاستثارة التي تحدثها هذه الإلكترونات هي التي تؤسس لآليات الكشف عن الفوتونات photon detection. هي أيضا المسؤولة عن التأثيرات الإشعاعية الحيوية radiobiologic effects التي تحدث في النسيج الحي.

1-6 معامل الوهن

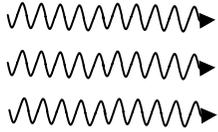
Attenuation Coefficient

عند مرور شعاع من فوتونات جاما بوسط ما فإن احتمال تفاعل الفوتونات مع مكونات الوسط تتوقف على طاقة الفوتونات وتركيب الوسط وعلى سمك المادة الممتصة التي يمر بها. التوصل إلى علاقة تصف الاعتماد على السمك أمر يسير، والحال ليس كذلك بالنسبة للاعتماد على الطاقة وعلى طبيعة الوسط الممتص.

لنعتبر أولاً اعتماد التوهين على سمك مادة الوسط، ومن ثم نستبعد تأثير العاملين الآخرين، طاقة الفوتونات الساقطة وتركيب الوسط. يُستبعد العامل الأول باستخدام شعاع وحيد الطاقة monoenergetic beam من فوتونات جاما ويُستبعد العامل الثاني مؤقتاً، باستخدام وسط يتكون من عنصر واحد، عدده الذري Z .

لنفترض شعاعاً من فوتونات جاما شدته I_0 (وحدات الشدة $photons/cm^2 \cdot sec$) يسقط على وسط ماص سمكه Δx (الشكل (10-4)). يتفاعل جزء من هذه الفوتونات مع ذرات الوسط عن طريق التأثير الكهروضوئي فتختفي، ويتفاعل البعض الآخر عن طريق تأثير كمبتون فتشتت وتخرج من سياق الشعاع، ويتفاعل جزء ثالث عن طريق تكوين الزوج فتختفي، أما الفوتونات الباقية التي تمكنت من اختراق الوسط دون ما امتصاص أو تشتت يمكن رصدها بواسطة كشاف مناسب.

فوتونات وحيدة الطاقة

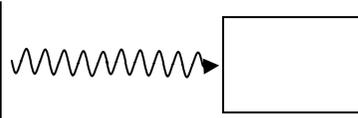


وسط ماص



dx

كشّاف



شكل (4-10) قياس نفاذية شعاع من فوتونات جاما خلال وسط ما

إذا انخفضت شدة الشعاع بمقدار dl عند مرورها في سمك من الوسط dx فإن نسبة

الانخفاض في شدة الشعاع $\frac{dl}{I}$ تتناسب خطياً مع السمك dx ، أي أن:

$$-\frac{dl}{I} \propto dx$$

الإشارة السالبة تشير إلى النقص في الشدة، إذن:

$$-\frac{dl}{I} = \mu_1 dx \quad (4-6)$$

ثابت التناسب μ_1 يُسمى معامل الوهن الخطي μ_1 linear attenuation coefficient؛

ذلك لأننا افترضنا أن $-\frac{dl}{I} \propto dx$ ، أي تناسباً خطياً (dx مرفوعة للأس 1) وهذا

عملياً مقبول إذا كانت نسبة النقص في الشدة صغيرة (أقل من 10%). يتضح من العلاقة

السابقة أن الكمية μ_1 لها أبعاد (وحدات) مقلوب السمك، أي m^{-1} (ما زالت بعض

المراجع والبيانات تستخدم cm^{-1}).

بتكامل المعادلة (4-6)

$$I = I_0 e^{-\mu_1 x} \quad (4-7)$$

حيث I_0 هي شدة الشعاع الساقط، I هي الشدة عند أي موضع x داخل الوسط.

تقرر هذه العلاقة أن شدة شعاع الفوتونات يتناقص أسياً مع سمك المادة الممتصة.

يتناسب معامل الوهن الخطي μ_1 خطياً مع كثافة الوسط ρ . يمكن فك هذا الارتباط بالقسمة على الكثافة لنحصل على كمية جديدة تُسمى معامل الوهن الكتلي mass attenuation coefficient μ_m :

$$\mu_m = \mu_1 / \rho \quad (4 - 8)$$

وحدات هذه الكمية m^2 / kg (أو cm^2 / g). يعتمد معامل الوهن الكتلي على العدد الذري للمادة الممتصة Z ، وكذلك على طاقة الفوتون E ويؤكد هذا الارتباط أحياناً بكتابة $\mu_m(Z, E)$.

من الممكن قياس كل من μ_m و μ_1 لأوساط مختلفة باستخدام شعاع فوتونات أحادي الطاقة من خلال تجربة كتلك الموضحة في شكل (4-19). غير أن أغلب البيانات المتداولة عبارة عن حسابات نظرية مبنية على أسس الفيزياء الذرية والنوية، وغالباً ما تكون هذه البيانات للكمية μ_m ، لعدم اعتمادها على حالة الوسط (كثافته) وبالطبع يمكن الحصول على قيم μ_1 من خلال العلاقة (4-8).

يمكن أيضاً حساب معامل الوهن لوسط خليط من عناصر $\mu_m(\text{mix})$:

$$\mu_m(\text{mix}) = f_1\mu_{m1} + f_2\mu_{m2} + f_3\mu_{m3} + \dots \quad (4 - 9)$$

حيث f_1 و f_2 و.... هي نسب الكتلة fractions by weight لتواجد العناصر 1 و 2 و.... في الخليط وأن μ_{m1} و μ_{m2} و.... هي معاملات الوهن الكتلي للعناصر التي تكون الخليط، فمثلاً:

$$\mu_m(\text{H}_2\text{O}) = (2/18)\mu_{mH} + (16/18)\mu_{mO}$$

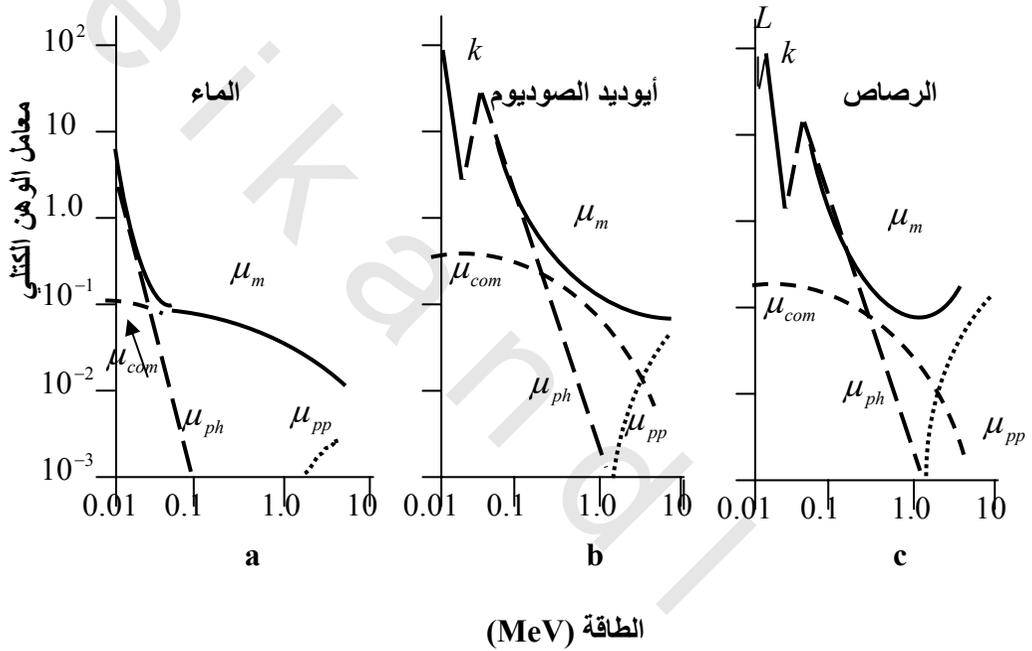
يشمل معامل الوهن μ_m ثلاث مركبات أساسية μ_{ph} ، μ_{com} و μ_{pp} ، تقابل الآليات الثلاث الأساسية لتفاعل الفوتونات عالية الطاقة مع المادة، التأثير الكهروضوئي، تشتت كمبتول وإنتاج الزوج، على الترتيب:

$$\mu_m = \mu_{ph} + \mu_{com} + \mu_{pp} \quad (4 - 10)$$

فمثلاً μ_{ph} هو معامل التوهين الكتلي للوسط في غياب تشتت كمبتون وإنتاج الزوج. يجب التأكيد على أن μ_m هو نتيجة لعملية الامتصاص والتشتت؛ ولذلك أشرنا إليه

بمعامل الوهن **attenuation coefficient** وليس بمعامل الامتصاص **absorption coefficient**.

القيم النسبية للمعاملات μ_{ph} ، μ_{com} و μ_{pp} تتوقف على العدد الذري لمادة الوسط Z وعلى طاقة الفوتونات الساقطة E . الأشكال الثلاثة (4-11a)، (4-11b) و(4-11c)، تشير إلى تغير μ_m ومركباتها الثلاث كدالة في طاقة الفوتونات الساقطة لثلاث مواد ذات أهمية في الطب النووي، الماء (المكون الأساس للأنسجة)، NaI(Tl) (البلورة الومضية التي تستخدم ككشاف وميض في مجال التصوير النووي) والرصاص (الذي



شكل (4-11). معامل الوهن الكتلي μ_m للماء (a) ولأيوديد الصوديوم (b) وللرصاص (c) ومركباته الثلاثة كدالة في طاقة الفوتونات الساقطة

يستخدم كدروع للحماية من الإشعاعات النووية). بتفحص الأشكال الثلاثة يمكن التوصل للنتائج الآتية:

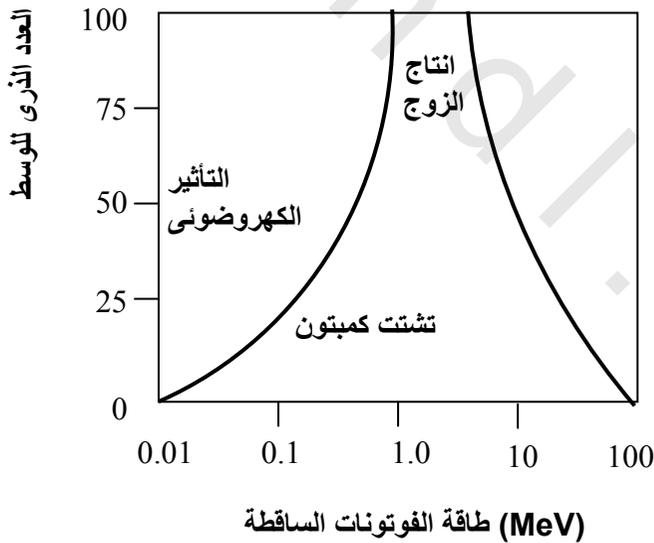
- تتناقص مركبة التأثير الكهروضوئي μ_{ph} سريعاً مع زيادة طاقة الفوتونات الساقطة

وتتزايد سريعاً مع العدد الذري Z للوسط الممتص، $(\mu_{ph} \approx (\frac{Z}{E})^3)$ وعلى هذا

يسود التأثير الكهروضوئي عند الطاقات المنخفضة للعناصر الثقيلة. تتزايد μ_{ph} بشكل واضح حول قيم الطاقة التي تقابل طاقة الربط للإلكترونات المدارية (يبدو ذلك واضحاً في حالة إلكترونات المستوى K في الشكل الخاص بأيوديد الصوديوم (الشكل (4-11b))، كما يظهر أيضاً في حالة المستوى K، و L في حالة الرصاص (الشكل (4-11c)). الزيادة الواضحة في حالة إلكترونات المستوى K تُسمى حافة الامتصاص **absorption K edge**، وكذلك بالنسبة للمستوى L.

- تتناقص مركبة كمبتون μ_{com} مع زيادة طاقة الفوتونات الساقطة ببطء ومع زيادة العدد الذري أيضاً. هذا التغير مع كل من E و Z من البطء بحيث يمكننا افتراض أنها لا تكاد تعتمد عليها.

- مركبة إنتاج الزوج μ_{pp} تبقى مساوية للصفر حتى تصل طاقة الفوتون الساقط إلى طاقة العتبة **threshold energy**، والتي تساوي 1.02MeV ، بعدها تتزايد مع طاقة الفوتونات الساقطة وخطياً مع العدد الذري ($\mu_{pp} \approx Z \text{ Log}E$) وعلى هذا يسود إنتاج الزوج عند الطاقات العالية في الأوساط ذات الأعداد الذرية العالية.



شكل (4-12) التفاعلات الأكثر احتمالاً كدالة في طاقة الفوتونات الساقطة لأوساط ذات أعداد ذرية

مختلفة

يلخص الشكل (12-4) أي التفاعلات يسود (أي الأكثر احتمالاً) كدالة في طاقة الفوتونات الساقطة لأوساط ذات أعداد ذرية مختلفة. يتضح من الشكل أن تشتت كمبتون هو التفاعل السائد لقيم $Z \leq 20$. لاحظ أن ذلك يقابل مادة أنسجة الجسم، الماء هو المكون الرئيس لأنسجة الجسم وأن عدد الذري $Z = 18$.

في المعالجة السابقة افترضنا أن سمك الوسط الذي ينتقل خلاله شعاع الفوتونات صغيراً، مما يجد من احتمالات تفاعلات الفوتونات خلال الوسط، وعلى هذا أمكن افتراض علاقة

خطية بين $-\frac{dI}{I}$ و Δx مما ترتب عليه الحصول على علاقة رياضية بسيطة (المعادلة 4-4))

(7) تعبر عن نفاذ شعاع الفوتونات خلال الوسط. أما إذا كان الوسط سميكاً *thick absorber* صار الأمر أكثر تعقيداً، فعملية التفاعل بين الفوتونات وذرات الوسط لم تعد تتوقف على السمك فقط، ولكن تتوقف أيضاً على الترتيب الهندسي *geometric arrangement*، أي على الوضع النسبي لكل من مصدر الفوتونات والوسط المتص والكشاف، حيث تتوقف كمية الفوتونات التي يسجلها الكشاف على ما قد يتشتت من الفوتونات التي تنطلق من المصدر على أجسام مجاورة، ثم تترد إلى الكشاف، وحينئذ قد لا يكون المسجل من الفوتونات ليس كله نافذاً خلال الوسط. بالطبع يتوقف هذا على ما إذا كانت حزمة الفوتونات الساقطة ضيقة *narrow* أو عريضة *broad*.

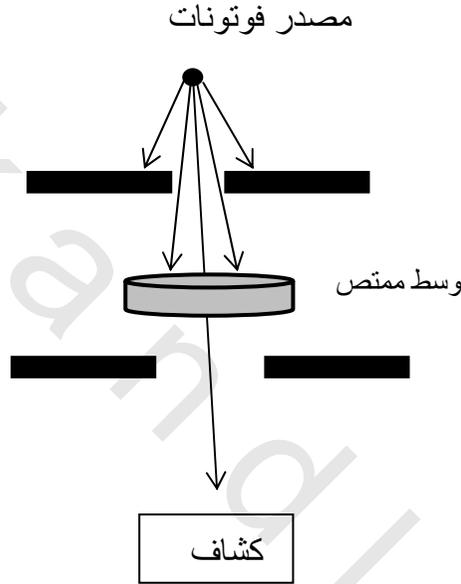
يُسمى الترتيب الذي يقلل من تسجيل الفوتونات المشتتة على أجسام مجاورها وجعلها في حدها الأدنى ترتيب الحزمة الضيقة *narrow beam geometry* ويسمى أيضاً الترتيب الجيد *good geometry* (الشكل (13-4))، كما يُسمى الترتيب الذي يؤدي إلى تسجيل نسبة عالية من التشتت ترتيب الحزمة العريضة *broad beam geometry* ويُسمى أيضاً الترتيب الضعيف *poor geometry*.

يتطلب تحقيق ترتيب الحزمة الضيقة استخدام حائل من مادة جيدة الامتصاص للفوتونات (مثل الرصاص) ذي فتحة ضيقة أمام المصدر، يُسمى موجه المصدر *source collimator* وآخر أمام الكشاف، يُسمى موجه الكشاف *detector collimator* (الشكل (13-4)).

إذا ما تحققت ظروف ترتيب الحزمة الضيقة أمكن التخلص من التعقيدات التي يدخلها تسجيل الفوتونات المشتتة، ومن ثم أمكن وصف نفاذ شعاع الفوتونات بالمعادلة البسيطة (4-7)،

$$I(x) = I_0 e^{-\mu_1 x} \quad (4-11)$$

حيث تمثل $I(x)$ شدة الشعاع beam intensity النافذ خلال سمك من المادة الممتصة مقداره x وأن μ_1 هو معامل الوهن الخطي.



الشكل (4-13) ترتيب الحزمة الضيقة للحد من رصد الفوتونات المشتتة على أجسام قريبة

المعادلة السابقة تشبه، في الشكل، المعادلة التي تصف اضمحلال أنوية المشعة (المعادلة (4-2))، ذلك باستبدال معامل الوهن μ_1 بثابت الاضمحلال λ واستبدال السمك x بالزمن t . من خلال هذا التشابه يمكن التوصل إلى بعض الكميات الفيزيائية التي يمكن استخدامها في إجراء حسابات كمية quantitative evaluation لعملية التوهين. هذه الكميات هي السمك النصفى Half-Value Thickness (HVT)، السمك العشري Mean Free Path (TVT) Tenth-Value Thickness، متوسط المسار الحر

(MFP)، ومعامل النفاذ Transmission factor:

السلك النصفى (HVT):

السلك من الوسط الذى ينخفض بشدة الشعاع إلى النصف. أنه يقابل العمر النصفى عند الحديث عن اضمحلال الأنوية المشعة. من المعادلة (4-11):

$$I/I_0 = \frac{1}{2} = e^{-\mu_1 x_{1/2}}$$
$$\therefore -\frac{x_{1/2}}{\mu_1} = \ln \frac{1}{2} = -0.693$$
$$\therefore x_{1/2} = \text{HVT} = 0.693 / \mu_1 \quad (4 - 12)$$

أو:

$$\mu_1 = 0.693 / \text{HVT} \quad (4 - 13)$$

السلك العشرى (TVT):

للحماية من بعض الإشعاعات ذات الطاقات العالية، لابد من استخدام سلك أكبر من مواد التدرع ومن منطلق متطلبات الأمان النووي، من المفيد طرح مفهوم السلك العشرى، إنه السلك الذى يؤدي إلى خفض شدة الشعاع إلى العشر:

$$I/I_0 = \frac{1}{10} = e^{-\mu_1 x_{1/10}}$$
$$\therefore -\frac{x_{1/10}}{\mu_1} = \ln \frac{1}{10} = -2.30$$
$$\therefore x_{1/10} = \text{TVT} = 2.30 / \mu_1 \quad (4 - 14)$$

أو:

$$\mu_1 = 2.30 / \text{TVT} \quad (4 - 15)$$

من المعادلتين (4-13) و(4-15) نحصل على:

$$\text{TVT} = 3.32 / \text{HVT} \quad (4 - 16)$$

القائمة (2-4): قيم السمك النصفى في الماء والسمك العشري في الرصاص عند طاقات مختلفة.

النظير	طاقة الفوتون (KeV)	HVT في الماء (cm)	TVT في الرصاص (mm)
^{125}I	27.5	1.7	0.06
^{133}Xe	81	4.3	1.0
^{99m}Tc	140	4.6	0.9
^{131}I	364	6.3	7.7
فوتون فناء	511	7.1	13.5
^{60}Co	1330	11.2	36.2

المصدر: J.A. Sorenson and M. E. Phelps, Physics in Nuclear Medicine, Grune&Stratton, NY 1980.

تتضمن القائمة (2-4) قيم السمك النصفى في الماء والسمك العشري في الرصاص لفوتونات تصدر من نظائر عدة (وبالتالي ذات طاقات مختلفة)، وذلك في حالة تحقق ظروف الحصول على حزمة ضيقة. تمثل هذه النظائر أهمية في مجال الطب النووي. جدير بالملاحظة أننا نخص الماء والرصاص فيما نورد من بيانات باهتمامنا؛ فالماء هو المكون الأساس للنسيج الحي، والرصاص هو مادة التدرع الأكثر استخدامًا، فعلى سبيل المثال يكفي سمك من الرصاص أقل من 1mm للانخفاض بشدة شعاع من الفوتونات طاقته 140 KeV إلى العشر.

متوسط المسار الحر (MFP):

يُعرف متوسط المسار الحر X_m بأنه المسافة المتوسطة التي يقطعها الفوتون في الوسط قبل حدوث تفاعل بينه وبين مادة الوسط وهو يقابل متوسط العمر النصفى في حالة اضمحلال الأنوية المشعة، ولذلك يمكن التعبير عنه باستخدام صيغة تشبه التعبير (11-2):

$$X_m = 1/\mu \quad (4-17)$$

وباستخدام التعبير (4-13) يكون:

$$X_m = 1.44HVT \quad (4-18)$$

تتضمن القائمة (4-3) مقارنة بين متوسط المسار الحر للفوتون في الماء ومدى الإلكترون في الماء وجسيمات ألفا في الهواء وذلك في مدى من الطاقة، 10MeV - 1. بالرغم من اختلاف مفهوم المسار الحر ومفهوم المدى واختلاف آلية التفاعل في حالة الفوتونات والجسيمات المشحونة، فإن النتائج التي تتضمنها القائمة تشير إلى أن الفوتونات هي الأكثر نفاذاً، ومن أجل هذا يشار إليها أحيانا بالإشعاعات النافذة penetrating radiation.

القائمة (4-3): قيم المسار الحر للفوتونات في الماء مقارنة بمدى الإلكترونات في الماء وجسيمات ألفا في الهواء، عند طاقات مختلفة.

مدى جسيمات ألفا في الهواء (cm)	مدى الإلكترون في الماء (cm)	المسار الحر للفوتون في الماء (cm)	طاقة الفوتون أو الجسيم (MeV)
----	0.00016	0.20	0.01
0.1	0.014	5.95	0.1
0.5	0.40	14.14	1
10.3	5.20	45.05	10

المصدر: J.A. Sorenson and M. E. Phelps, Physics in Nuclear Medicine, Grune&Stratton, NY 1980

معامل النفاذ Transmission factor:

ويمثل نسبة النفاذ خلال سمك معين من وسط ما ومن ثم يمكن التعبير عنه باستخدام المعادلة (4-7):

$$I(x)/I_0 = e^{-\mu_1 x} \quad (4-19)$$

ويمكن حسابه باستخدام المعلومات الواردة في القائمة (2-4):

فعلى سبيل المثال لحساب معامل النفاذ لشعاع وحيد الطاقة من الفوتونات، طاقته 140 KeV (أي فوتونات صادرة من النظير الأكثر استخداما في الطب النووي ^{99m}Tc) خلال سمك من النسيج الرخو مقداره 10cm.

من القائمة نجد أنه عند 140 KeV تكون $\text{HVT} = 4.6 \text{ cm}$ في الماء (النسيج الرخو). من المعادلة (13-4):

$$\mu_1 = 0.693 / \text{HVT} = 0.693 / 4.6 = 0.151 \text{cm}^{-1}$$

$$\frac{I(10)}{I(0)} = e^{-0.151 \times 10} = 0.22$$

وهكذا تكون نفاذية فوتونات طاقتها 140 KeV تساوي 22% بعد مرورها من سمك من النسيج الرخو مقداره 10cm.

المراجع:

- Ghoneim N. A. et al, Gamma Ray Interaction on Some Glasses Containing Chrommium, Proc. Th eInternational Symposium on Applications and Technology of Ionizing Radiations, Riyadh, 12-17 1982.
- Leroy F. Booth, Neutor Interactions and Neutron Activation Analysis, in Nuclera Medicine, Robert E. Henkin, Mosby, St. Louis,
- James A. Sorenson and Michael E. Phelps, Physics in Nuclear Medicine, Grune & Stratton, NY (1980).

* * *