المملكة العربية الســـعودية
جامعة الملك ســـــعود
اللجنة الدائمة للوقاية من الإشعاعات

مبادئ الإشـــعاعات
المؤينة و الوقاية منها

إعداد
أ.د. محمـــد فاروق أحمـــد
أ.د. أحمد بن محمد السريع

8

1428هـ
2007 م

سلسلة من النشرات المتخصصة تصدرها اللجنة الدائمة للوقاية من الاشعاعات بجامعة الملك سعود – المملكة العربية السعودية

مقدمة

الحمد لله والصلاة والسلام على **رسول الله** وعلى آله وصحبه ومن دعا بدعوته الى يوم الدين ... وبعد ،،،

فقد انتشر استخدام الإشعاعات المؤينة في العديد من المجالات الصناعية والزراعية والطبية والبحثية وغيرها، ورغم الفوائد الجمة لهذه الإشعاعات إلا أنها قد تسبب أضراراً وخيمة على الإنسان والبيئة، إذا لم يتم التعامل معها بحرص شديد وبطرق آمنة، وقد تتفوق الفوائد والمنافع كثيراً على الأضرار بالنسبة للمجتمع ككل، واحيانا قد تتفوق الأضرار على الفوائد حال الاستخدام غير الآمن لهذه الإشعاعات.

وبالنسبة للعاملين بالإشعاعات المؤينة فإنهم معرضون للضرر أكثر من غيرهم ولا يستفيدون من المنافع، إلا أنه يمكن خفض الضرر على هؤلاء العاملين المهنيين بالإشعاعات المؤينة إلى حدود مقبولة عند تعرفهم على هذه الإشعاعات وخصائصها وأسلوب التداول الآمن نسبياً لها، حتى لو كان هؤلاء العاملون من غير المتخصصين في مجال التقنيات والعلوم النووية.

وقد تم إعداد هذا الكتيب بطريقة مبسطة بحيث يسهل فهمه لغير المتخصصين في مجال العلوم النووية، ويستطيع القارئ من خلاله أن يتعرف على طبيعة الإشعاعات المؤينة ومصادرها، وكيفية تفاعلها مع المادة وآثارها البيولوجية وطرق الكشف عنها، ويشتمل الكتيب على بعض المعلومات عن الأخطار الإشعاعية، وكيفية قياس جرعاتها والوقاية منها، كذلك، يتعرض الكتيب باختصار شديد إلى بعض الاستخدامات التطبيقية للإشعاعات المؤينة.

وقد توخينا في عرض موضوعات الكتيب سهولة العبارة ووضوح المعنى وتجنب البراهين العلمية المعقدة، ونأمل أن نكون قد قدمنا للقارئ من خلاله ما يعينه على استيعاب بعض المفاهيم الأساسية لهذا الفرع من فروع المعرفة. ويود المؤلفان أن يعبرا عن شكرهما الجزيل **للفيزيائي/**

عـاطف يوسـف محمـد، مسـؤول الحمايـة الإشـعاعية بجامعـة الملـك سـعود، في مراجعة وإخراج هذا الكتيب في صورته الحالية .

ونود ان نذكر القاريء بأن هذا هو الاصدار الثامن من سلسلة إصدارات اللجنة وهي سلسلة من النشرات المتخصصة التي تصدرها اللجنة الدائمة للوقاية من الإشعاعات بجامعة الملك سـعود ، رغبة من اللجنة في نشر العلم والمعرفة في هذا المجال المهم والحيوي الذي يعاني ندرة في التخصص العلمي والتقني .

نسأل الله أن يجعل فيه نفعاً وفائدة للقارئ . . . والله من وراء القصد ،،،

المؤلفان

الرياض

جمادى الاول

مقدمة الطبعة الثانية

الحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على سيد المرسلين وعلى آله وصحبه وسلم إلى يوم الدين . . . . وبعد ،،،

فقدت نفذت الطبعة الأولى من هذا الإصدار منذ ما يقارب عام كامل تقريبا، وذلك نظرا للإقبال الكبير على الكتاب، ويرجع السبب إلى أهمية الموضوع المطروح بالنسبة للخاصة والعامة من الناس، من حيث خطورة الإشعاعات المؤينة والآثار البيولوجية والوراثية على الانسان والمترتبة على تلك التعرضات، كما أن سهولة وبساطة عرض الموضوع ساهمت بشكل كبير في سرعة انتشار ونفاذ الطبعة الأولى.

وقد حرصنا في الطبعة الثانية أن تكون منقحة حيث اشتملت على ثلاثة مواضيع جدد ذات أهمية للعاملين في مجال الإشعاعات المؤينة بصفة خاصة، والمهتمين بالعلوم النووية بصفة عامة، كما حرصنا على عدم الإستفاضه في طرح المواضيع وعرض أقل ما يكفي لتوصيل المعلومة المطلوبة بيسر وسهولة مع تجنب البراهين والإثباتات العلمية، كما توخينا الحرص في تجنب الأخطاء العلمية والمطبعية قدر الإمكان، ولكن يبقى العمل البشري دائما مفتقد الكمال كما هي سنة الله في خلقه.

ولا يفوت المؤلفان أن يكررا شكرهما الكبير **للفيزيائي/ عاطف يوسف محمد، مسؤول الحماية الإشعاعية بجامعة الملك سعود،** في مراجعة هذا الكتيب وإخراجه في صورته الحالية.

نسأل الله أن يجعل فيه النفع والفائدة لكل مهتم . . . . . .

والله من وراء القصد ،،،

المحتويات

الموضوع	الصفحة
الباب الأول: الإشعاعات المؤينة، خصائصها ومصادرها	
1-1 الذرة والنواة.....	9
1-1 النظائر	12
1-3 طاقة الترابط للنواة	14
1-4 النشاط الإشعاعي	15
1-5 تفكك ألفا	15
1-6 تفكك بيتا	17
1-7 إشعاعات جاما	21
1-8 النيوترونات ومصادرها	23
1-9 قانون التفكك الإشعاعي	26
1-10 ثابت التفكك وعمر النصف البيولوجي والفعال.....	28
1-11 وحدات قياس الشدة الإشعاعية	30
1-12 النشاط الإشعاعي النوعي	31
1-13 السلاسل الإشعاعية الطبيعية	31
1-14 النشاط الإشعاعي الصنعي	35
1-15 الأشعة السينية	36
1-16 بعض المضاعفات والاجزاء الهامة لجميع الوحدات ...	41
الباب الثاني: تفاعل الإشعاعات مع المادة	
2-1 مقدمة	42
2-2 انتقال الطاقة من الجسيمات المشحونة الثقيلة للمادة	42
2-3 تفاعل الجسيمات المشحونة الخفيفة مع المادة	44
2-4 تفاعل إشعاعات جاما والاشعة السينية مع المادة	46

2-5 تفاعل النيوترونات مع المادة 50

الموضوع الصفحة

الباب الثالث: كواشف الإشعاعات وأجهزة قياس
الجرعات الإشعاعية
3-1 مقدمة 58
3-2 الكواشف الغازية 58
غرفة التأين 59
العداد التناسبي 61
عداد غايغر – ميولر 63
3-3 الكواشف الوميضية 63
أنبوب التضاعف الفوتوني 64
3-4 الكشف عن الإشعاعات باستخدام الأفلام الحساسة 65
3-5 أجهزة قياس الجرعات الشخصية 66
شارة الفيلم الحساس 67
مقياس الجرعة بالوميض الحراري 68
مقياس الجرعة الجيبي 69
3-6 أجهزة المسح الإشعاعي 70
3-7 أجهزة رصد التلوث الإشعاعي 72

الباب الرابع: بعض تقنيات القياسات الاشعاعية
4-1 مقدمة 74
4-2 الاوضاع الهندسية الجيدة والرديئة..... 74
4-3 الزاوية المجسمة..... 75
4-4 الكفائة الذاتية للكاشف 78
4-5 العلاقة بين معدل العد C والنشاط الاشعاعي A للمصدر 79

4-6 العوامل المؤثرة على دقة القياسات الاشعاعية..... 80
4-7 تصحيح الزمن الميت..... 83
4-8 التراوحات الاحصائية في القياسات الاشعاعية..... 84

الباب الخامس: وحدات قياس الجرعات الإشعاعية

5-1 مقدمة 89
5-2 معدل سيولة الجسيمات 89
5-3 معدل سيولة الطاقة 91
5-4 التعرض 92
الرنتجن 92
5-4 الجرعة الممتصة 93
6-4 الكيرما 94

الموضوع **الصفحة**

5-7 السيما 95
5-8 التكافؤ بين الرنتجن والراد 95
5-9 المعامل المرجح للإشعاع 95
5-10 الجرعة المكافئة 97
5-11 العامل المرجح للنسيج 97
5-12 الجرعة الفعالة 99
5-13 الجرعة الفعالة الجماعية 99
5-14 الجرعة الفعالة الملازمة 99

الباب السادس : التأثيرات البيولوجية للإشعاعات المؤينة

6-1 مقدمة 101
6-2 تفاعل الإشعاعات مع الخلية الحية 102
6-3 التأثيرات الذاتية للإشعاعات المؤينة..... 103

الباب السابع : حساب الجرعات الإشعاعية

7-1 حساب الجرعات من المصادر المشعة النقطية 112
7-2 حساب الجرعات الفعالة من بواعث بيتا النقطية الرقيقة... 113
7- 3 حساب الجرعات من مصادر جاما النقطية الخارجية 114
7-4 حساب الجرعات من مصادر الميوترونات النقطية 116
7-5 قانون التربيع العكسي للتعرض الخارجي 117
7-6 حساب جرعات التعرض الداخلي 118
7-7 الحد السنوي للاندخال 120
7-8 التركيز المشتق للهواء 121

الباب الثامن : الدورع الاشعاعية

8-1 دروع مصادر جسيمات الفا 122
8-2 دروع مصادر جسيمات بيتا 122
8-3 دروع اشعاعات جاما والاشعة السينية 124
8-4 دروع مصادر النيترونات 129

الباب التاسع : التعرضات الإشعاعية وحدود الجرعات

9-1 مقدمة 132
9-2 الجرعات الإشعاعية الطبيعية الناتجة عن البيئة..... 132
9-3 الجرعات الناتجة عن المصادر الإشعاعية الصنعية.... 136
9-4 الحدود القصوى المسموح بها من جرعات الإشعاع... 141
9-5 توصيات اللجنة الدولية رقم 26 لعام 1977 142
9-6 توصيات اللجنة الدولية رقم 60 لعام 1991 144

الموضوع **الصفحة**

9-7 الأخطار الإشعاعية..... 147
9-8 زمن التعرض 147

9-9 المسافة 147
9-10 الدروع الواقية 148

الباب العاشر: الاستخدامات التطبيقية للإشعاعات والنظائر المشعة

10-1 مقدمة 149
10-2 بعض الاستخدامات في مجال الزراعة والأغذية... 149
10-2- 1 - التغييرات الوراثية للمحاصيل 150
10-2- 2- مقاومة الحشرات والآفات بالإشعاع 150
10-2- 3- استخدام النظائر المشعة لتحديد طرق
أزمنة التسميد 151
10-2-4- حفظ الأغذية بالإشعاع 152
10-3 - بعض استخدامات الإشعاعات والنظائر
المشعة في الصناعة 155
أ - استخدام النظائر المشعة لتتبع الأثر 155
ب- التصوير الإشعاعي بإشعاعات جاما 155
ج- التصوير الإشعاعي بالنيوترونات 156
د- استخدام الإشعاعات في عمليات لحام وقطع
الفلزات السميكة..... 156
هـ - استخدام الإشعاعات في صناعات
المطاط وفي لحامة..... 156
و - استخدام الإشعاعات في الصناعات الكيميائية
وصناعة الاخشاب والطلاء..... 122

الموضوع **الصفحة**

ل - استخدام الإشعاعات في الصناعات
البترولية والتعدين 157
م - استخدام النظائر المشعة في صناعة

البطاريات الكهربائية النووية 157

10-4 - بعض استخدامات الإشعاعات والنظائر
المشعة في الطب..... 158
أ- استخدام الإشعاعات لإنتاج اللقاحات المختلفة..... 159
ب- استخدام الإشعاعات والنظائر المشعة في اتشخيص ... 159
ج - استخدام الإشعاعات في العلاج..... 160
ح - استخدام الإشعاعات في تعقيم الادوية الطبية..... 161
10-5 ــ بعض الإستخدامات التطبيقية الأخرى للإشعاع .. 161
** - المراجع 163

البـاب الأول

الإشعاعات المؤينة ـ خصائصها ومصادرها

1-1 الذرة والنواة The atom and the nucleus

يتكون العنصر من وحدات متشابهة ومتناهية الصغر تسمى ذرات. وتختلف العناصر باختلاف ذراتها. وتتركب ذرة العنصر من جسم مركزي صغير الحجم يعرف بالنواة nucleus ، يدور حولها عدد من الإلكترونات. وتتمركز كتلة الذرة في النواة الصغيرة التي يبلغ نصف قطرها حوالي 10^{-13} سم في حين يصل نصف قطر الذرة إلى حوالي 10^{-8}سم، وتتركب النواة بدورها من نوعين من الجسيمات المتناهية الصغر تعرف بالبروتونات والنيوترونات، ويطلق علي كليهما اسم النيوكلونات.

الإلكترون The electron

عبارة عن جسيم صغير جداً تبلغ كتلته وهو ساكن 9.11×10^{-28} جم ويحمل شحنة كهربائية سالبة مقدارها 1.6×10^{-19} كولوم.

البروتون The Proton

جسيم صغير تبلغ كتلة السكون له 1.675×10^{-24} جم، أي أنه أكبر من الإلكترون بحوالي 1839 مرة، ويحمل شحنة كهربائية مساوية تماماً لشحنة الإلكترون ولكنها موجبة.

النيوترون Neutron

عبارة عن جسيم متعادل الشحنة (أي لا يحمل شحنة كهربائية)، وكتلة السكون له مساوية تقريباً لكتلة البروتون، وغالباً ما يعتبر النيوترون عبارة عن اتحاد بروتون وإلكترون، حيث أن النيوترون الحر (أي خارج النواة) يعيش في المتوسط **15.2** دقيقة ثم يتفكك تلقائياً إلى بروتون وإلكترون.

والذرة متعادلة كهربياً حيث أن عدد البروتونات الموجبة في النواة يساوي عدد الإلكترونات السالبة التي تدور حولها، وتدور الإلكترونات في مدارات **Orbits** مختلفة حول النواة. ويتسع كل مدار لعدد معين من الإلكترونات فيتسع أقرب مدار للنواة (ويعرف بالمدار أو القشرة **K**) لإلكترونين، في حين يتسع المدار الثاني، المعروف بالمدار L لثمانية إلكترونات، والثالث والمعروف بالمدار **M** لثمانية عشر إلكتروناً، والرابع والمعروف بالمدار N لاثنين وثلاثين إلكتروناً، وهكذا.

ورغم أن المادة (خاصة الصلبة) تبدو مصمتة إلا أنها، في الحقيقة، تعتبر فراغاً، ولكن قدرة العين البشرية (وأجهزة التكبير البصرية الحديثة) غير قادرة على تمييز هذا الفراغ. ولفهم هذه الحقيقة سنفترض، جدلاً، وجود جهاز قادر على تكبير الذرة عشرة ملايين مليون مرة، عندئذ سوف يبدو قطر النواة، التي تحمل كل كتلة الذرة تقريباً في حدود 1 سم، أي في حجم حبة العنب المتوسطة المستديرة، في حين يكون أقرب مدار للنواة (المدار K) الذي يتسع للإلكترونين فقط، على بعد عشرات الكيلومترات من النواة، ويكون أبعد مدار (وهو المدار السابع) على بعد مئات بل آلاف الكيلومترات من النواة. بذلك، تشبه الذرة في تركيبها المجموعة الشمسية، حيث تحتل الشمس مركز المجموعة، وتدور الكواكب التسع التابعة لها في مدارات يبلغ نصف قطر أصغرها (وهو مدار عطارد) **58** مليون كم تقريباً. بهذا الأسلوب من التشبيه يمكن فهم الذرة كفراغ حقيقي.

ويبين شكل (1-1) رسماً تخطيطياً لذرتي الهليوم والصوديوم، حيث تحتوي النواة على كل من البروتونات والنيوترونات وتدور الإلكترونات في المدارات الخارجية، علماً بأن نسب الأبعاد المبينة على الشكل لا تمثل النسب الواقعية.

العدد الكتلي The mass number

العدد الكتلي للذرة هو عبارة عن مجموع عددي البروتونات والنيوترونات في النواة، ويبين هذا العدد كتلة الذرة التقريبية، وهو عبارة عن عدد صحيح ويرمز له بالحرف **A** .

ذرة هليوم **ذرة صوديوم**

شكل (1-1)

العدد الذري **The atomic number**

هو عبارة عن عدد البروتونات في الذرة المعينة، ويرمز له بالرمز Z ويرمز لذرات العناصر عادة بالحرف الأول من اسمها اللاتيني (أو حرفين أحياناً الأول كبير والثاني صغير) ثم يكتب العدد الذري في الجانب الأيسر لأسفل والعدد الكتلي في الجانب الأيسر لأعلى. أي أنه يرمز على سبيل المثال لذرة الهيدروجين بالرمز ${}_1^1H$ حيث أن عددها الذري = **1** . أما ذرة الهليوم فيرمز لها بالرمز ${}_2^4He$ حيث أن عددها الذري = **2** ، وعددها الكتلي = 4، إذ تتكون نواة الهليوم (جسيم ألفا) من بروتونين ونيوترونين. كذلك، يرمز لذرة اليورانيوم بالرمز ${}_{92}^{238}U$ ، حيث أن عددها الذري **92** والكتلي **238**، إذ تحتوي نواة اليورانيوم على **92** بروتونا و**146** نيوترونا.

2-1 النظائر The isotopes

تحتوي نواة العنصر الواحد على نفس العدد من البروتونات، إلا أنها يمكن أن تحتوي على أعداد مختلفة من النيوترونات ويعني هذا أن العدد الذري للعنصر الواحد لا يتغير في حين يتغير عدده الكتلي. ويقال في هذه الحالة أن للعنصر الواحد عدة نظائر. فمثلاً، للهيدروجين ثلاثة نظائر هي:

1- هيدروجين ${}_1^1H$ وتتكون نواته من بروتون واحد ولا تحتوي على نيوترونات **(A=1 ,Z=1)**، ويدور حول النواة إلكترون واحد.
2- ديتيريوم ${}_1^2H$ وتتكون نواته من بروتون ونيوترون **(A=2, Z=1)** ويدور حول النواة إلكترون واحد.
3- تريتيوم ${}_1^3H$ وتتكون نواته من بروتون ونيوترونين **(A=3, Z=1)** ويدور حول النواة إلكترون واحد.

وعموماً، يوجد لكل عنصر عدد من النظائر قد تصل أحياناً إلى أكثر من خمسين نظيراً للعنصر الواحد . وتكون نوى بعض هذه النظائر

مستقرة ولا تتفكك، في حين تكون نوى النظائر الأخرى قابلة للتفكك. وبذلك، تكون هذه النوى الأخيرة نشطة إشعاعياً **Radioactive** وتصدر إشعاعات في شكل جسيمات ألفا أو بيتا أو إشعاعات جاما.

ويوجد العنصر في الطبيعة في شكل خليط من بعض نظائره. وهناك نظائر لا توجد، عموماً، في الطبيعة وإنما يمكن إنتاجها صناعياً باستخدام المفاعلات أو المعجلات النووية.

وتجدر الإشارة إلى أن نظائر العنصر الواحد تتحد في جميع خواصها الكيميائية، حيث أن العدد الذري للعنصر هو الذي يحدد خواصه الكيميائية. لذا، فإنه لا يمكن فصل النظائر عن بعضها بالطرق الكيميائية وإنما يتم فصلها بطرق أخرى.

وحدة الكتلة الذرية (و. ك. ذ) Atomic mass unit

تستخدم وحدة خاصة لقياس كتل النوى والذرات تعرف باسم وحدة الكتلة الذرية . وقد اشتقت هذه الوحدة على أساس اعتبار أن كتلة نظير الكربون **12**($_{6}^{12}C$) مساوية **12** وحدة تماماً. أي أن وحدة الكتلة الذرية عبارة عن **12/1** من كتلة ذرة الكربون 12، أي ما يساوي **1.6555×10^{-24}** جرام.

وبالقياس على ذلك تكون كتلة نظير الهيدروجين $_{1}^{1}H$ هي **1.007825** و.ك.ذ، وكتلة البروتون هي **1.007277** و.ك.ذ، وكتلة النيوترون هي **1.008665** و.ك.ذ، وكتلة الإلكترون هي **0.000549** و.ك.ذ.

الوحدات الذرية للطاقة (الإلكترون فولت) eV Units

في المجالات الذرية والنووية تستخدم وحدة خاصة لقياس الطاقة تعرف باسم الإلكترون فولت **(eV)**. وترتبط هذه الوحدة بوحدة الطاقة المعروفة بالجول في النظام المعياري العالمي بالعلاقة التالية:

$$1\ eV = 1.6\times10^{-19}\ Joul$$

وتوجد لوحدة الإلكترون فولت عدة مضاعفات أهمها:

(1kev) كيلو إلكترون فولت ك.أ.ف = 10^3 إلكترون فولت = 1.6×10^{-16} جول.

(1Mev) ميغا إلكترون فولت م.أ.ف = 10^6 إلكترون فولت = 1.6×10^{-13} جول.

وحيث أن الطاقة والكتلة متكافئتان وفقاً لمبدأ أينشتين، فإنه يمكن التعبير عن وحدة الكتلة الذرية بوحدة الإلكترون فولت، حيث أن:

1 و.ك.ذ = **931** ميغا إلكترون فولت.

3-1 طاقة الترابط للنواة Nuclear binding energy

تحتوي نواة الذرة على عدد معين من البروتونات الموجبة الشحنة. وتتولد بين هذه البروتونات قوى تنافر كهروساكنة تتناسب تناسباً عكسياً مع مربع المسافة بين البروتونات. ولما كانت المسافات بين البروتونات في النواة صغيرة للغاية فإنه من المتوقع أن تكون قوى التنافر كبيرة للغاية، بحيث يجب أن تتفكك النواة بسرعة . وحيث أن النواة لا تتفكك إلى مكوناتها من البروتونات، فإن هذا يعني أن هناك قوى أخرى جاذبة أقوى من قوى التنافر المذكورة، وهذه القوى الجاذبة هي ما يعرف بالقوى النووية، وهي تؤثر بين البروتونات بعضها البعض والنيوترونات بعضها البعض، وكذلك بين كل من البروتونات والنيوترونات، طالما كانت هذه الجسيمات على مسافة صغيرة من بعضها (أقل من 2×10^{-13}سم) وقد ثبت أن القوى النووية بين البروتونات والنيوترونات أو البروتونات بين بعضها البعض أو النيوترونات بين بعضها البعض متكافئة. لذا، فإنه من الناحية النووية (وليس من ناحية الشحنة) يمكن اعتبار كل من البروتون والنيوترون بمثابة جسيم واحد يطلق عليهما اسم نيوكلون **Nucleon**.

وتؤدي هذه القوى النووية إلى ترابط مكونات النواة من بروتونات ونيوترونات وعدم تفككها . ونتيجة لترابط مكونات النواة تقل الكتلة الفعلية للنواة عن مجموع كتل النيوكلونات المكونة لها، وهذا الفرق بين الكتلة الفعلية للنواة وكتل مكوناتها هو بمثابة كتلة ترابط النواة ويسمى نقص الكتلة. وبضرب هذا الفرق في الكتلة (Δm) في مربع سرعة الضوء يمكن تحديد
طاقة ترابط النواة بيسر وهي:

$$B = ((NM_n + ZM_p) - M)\ c^2 \qquad (1-1)$$

حيث M الكتلة الفعلية للنواة، **Mn .Mp**، كتلتا البروتون والنيوترون بالتتابع ، **N , Z** عدد البروتونات والنيوترونات بالتتابع، c سرعة الضوء في الفراغ . وعند التعبير عن فرق الكتلة **Δm** بوحدة الكتلة الذرية (و.ك.ذ) وتحويل هذا الفرق إلى طاقة، فإنه يسهل تحديد طاقة الترابط **B** للنواة بوحدة ميغا إلكترون فولت (م.إ.ف) من العلاقة:

$$B = \Delta m \times 931 \quad (Mev) \qquad (2\text{-}1)$$

وطاقة الترابط المتوسطة للنيكولون الواحد **F** هي عبارة عن طاقة الترابط للنواة **B** مقسومة على عدد النيوكلونات **A**. ويزداد تماسك النواة كلما كانت طاقة الترابط للنيوكلون كبيرة ويقل تماسكها كلما كانت هذه القيمة صغيرة. وأكثر النوى ترابطاً هو النوى ذات العدد الذري المتوسط وأقلها ترابطاً النوى ذات العدد الذري الصغير جداً أو الكبير جداً.

4-1 النشاط الإشعاعي Radioactivity

تتميز العديد من النظائر، سواء الطبيعية أو الصنعية، (أي المجهزة باستخدام المعجلات أو المفاعلات النووية) بخاصية تعرف باسم النشاط الإشعاعي. والنشاط الإشعاعي عبارة عن تفكك (اضمحلال) نواة النظير تلقائياً إلى نواة أصغر (أو نواة ذات قيمة أقل للطاقة) مع إصدار

جسيمات نووية مثل جسيمات ألفا أو بيتا (أو إشعاعات جاما). وتعرف النظائر التي يحدث لها هذا التفكك بالنظائر المشعة **Radioactive Isotopes** ، تمييزاً لها عن تلك النظائر المستقرة **Stable Isotopes** التي لا تتعرض للتفكك . وتحدث عملية التفكك في النظائر المشعة، سواءً كانت في صورة نقية أو تدخل ضمن مركبات كيميائية أو إحيائية، ولا تعتمد عملية التفكك على أي من الظروف
الطبيعية مثل الحرارة أو حالة النظير أو غيرها.

5-1 تفكك ألفا ∝ - decay

تتميز نوى العناصر الثقيلة (الأثقل من الرصاص) وبعض نوى العناصر الأرضية النادرة بانخفاض قيمة طاقة الترابط للنيوكلون. لذا، فإن هذه النوى غير مستقرة عموماً، وتتفكك إلى نوى أخف وأكثر استقراراً، وينتج عن ذلك إصدار جسيمات ألفا أو بيتا، مع إصدار إشعاعات جاما في العديد من الحالات. فمثلاً، تتفكك نواة اليورانيوم **238** ($^{238}_{92}U$) إلى نواة الثوريوم **234** ($^{234}_{90}Th$) الأخف، وينطلق نتيجة لذلك جسيم ألفا الذي هو عبارة عن نواة ذرة الهليوم. وتمثل عملية التفكك هذه بالمعادلة التالية:

$$^{238}_{92}U \longrightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{}_{}\alpha$$

كذلك، تتفكك نواة البولونيوم **218** ($^{218}_{84}Po$) إلى نواة الرصاص **214** مع إصدار جسيم ألفا، أي أن:

$$^{218}_{84}Po \longrightarrow {}^{214}_{82}Pb + \alpha$$

النواة الأم **The parent nucleus**

هي النواة الأصلية النشطة إشعاعياً التي تتفكك مثل نواة اليورانيوم 238 أو البولونيوم 218 في المثالين السابقين.

النواة الوليدة **The daughter nucleus**

هي النواة الناتجة عن التفكك مثل نواتا الثوريوم **234** والرصاص **214** في المثالين السابقين، ولحدوث تفكك ألفا لنظير معين يجب أن تكون كتلة نواة هذا النظير الأم Mp أكبر من مجموع كتلتي كل من النواة الوليدة M_d وجسيم ألفا M_α ، أي يجب أن يتحقق الشرط:

$$\mathbf{Mp - (M_d + M_\alpha) > 0}$$

ويلاحظ أن هذا الشرط يتحقق بالنسبة للعديد من النظائر الأثقل من الرصاص. لذا ، يلاحظ أن معظم النظائر الأثقل من الرصاص نشطة إشعاعياً بالنسبة لإصدار جسيمات ألفا.

طاقة جسيمات ألفا

تكون طاقة جسيمات ألفا الصادرة عن نفس النظير متساوية ومساوية تقريباً للمقدار:

$$\{Mp - (M_d + M_\alpha)\}\, C^2$$

لذلك، تعتبر جسيمات ألفا بصمة من بصمات النظير، فبقياس طاقة جسيمات ألفا يمكن تحديد هوية النظير المشع لها .

جسيمات ألفا **α - Particles**

هي عبارة عن نواة ذرة الهليوم **4** المكونة من بروتونين ونيوترونين. وهي بذلك عبارة عن جسيمات مشحونة موجبة الشحنة، تبلغ شحنتها ضعف شحنة البروتون. لذا، فإنه يمكن التحكم في مسارها باستخدام مجالات كهربائية أو مغناطيسية، كما يمكن تعجيلها (أي

تسريعها) باستخدام المعجلات النووية إلى قيم عالية للطاقة. وتنتمي هذه الجسيمات إلى مجموعة الجسيمات النووية المشحونة الثقيلة.

6-1 تفكك بيتا β- decay

كي تكون نواة نظير معين مستقرة يجب أن تكون النسبة بين عدد النيوترونات وعدد البروتونات في هذه النواة (أي N/Z) نسبة معينة. وتتراوح هذه النسبة بين 1 للنظائر الخفيفة وتزداد حتى تصل إلى حوالي 1.6 بالنسبة للنظائر الثقيلة. فمثلاً، يلاحظ أن نواة نظير الكربون 12 ($_6^{12}C$) مستقرة حيث أن نسبة النيوترونات إلى البروتونات هي **N / Z = 6/6 =1**، وتعتبر هذه النواة من النوى الخفيفة. أما نواة نظير الكربون 14 ($_6^{14}C$) فهي نواة غير مستقرة حيث أن هذه النسبة تصبح **N / Z = 6/8 = 1.33** . كذلك، يلاحظ أن نواة نظير السيزيوم – 133 مستقرة لأن النسبة تكون **55/78 = 1.42** ، في حين أن نواة السيزيوم **137** غير مستقرة لأن النسبة تصبح **55/82 = 1.49** . ويوضح شكل **1-2** منحنى الاستقرار بالنسبة لتفكك بيتا. وهذا المنحنى عبارة عن العلاقة بين عدد النيوترونات وعدد البروتونات بالنسبة للنظائر المستقرة.

منحنى الاستقرار بالنسبة لتفكك بيتا

شكل (1-2)

فإذا كانت النسبة بين عدد النيوترونات وعدد البروتونات للنظير المعين واقعة على منحنى الاستقرار كان النظير مستقراً بالنسبة لتفكك بيتا، وينقسم تفكك بيتا إلى ثلاثة أنواع هي:

أ – التفكك الإلكتروني (تفكك بيتا السالب) The electron decay

إذا زادت نسبة النيوترونات إلى البروتونات عن القيمة المحددة من منحنى الاستقرار (شكل 1-2) بالنسبة للنظير ذي العدد الكتلي المعين، فإن هذا يعني أن النواة تحاول أن تصل إلى حالة الاستقرار، وذلك عن طريق تحول نيوترون (أو أكثر) داخل النواة إلى بروتون، ونتيجة لتحول النيوترون المتعادل إلى بروتون موجب الشحنة ينطلق إلكترون سالب الشحنة خارجاً من النواة يطلق عليه اسم جسيم بيتا سالب. وقد ثبت أنه أثناء عملية التحول هذه ينطلق جسيم آخر من النواة يعرف بالنيوترينو المضاد $\bar{\nu}$. أي أن عملية التفكك الإلكتروني هي عبارة عن تحول نيوترون داخل النواة إلى بروتون وانطلاق إلكترون (جسيم بيتا) ونيوترينو مضاد. ويمثل هذا التفكك بالمعادلة التالية:

$$ {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{-}e + \bar{\nu} $$

ويحدث هذا النوع من التفكك في عدة مئات من النظائر غير المستقرة (المشعة)، حيث تتكون نواة عنصر جديد نتيجة لزيادة عدد البروتونات في النواة الوليدة بمقدار بروتون واحد. فمثلاً، عند تفكك نواة الكربون 14 تتكون نواة عنصر جديد هو النيتروجين **14**، نتيجة تحول أحد النيوترونات في النواة إلى بروتون وينطلق كل من جسيم بيتا والنيوترينو المضاد خارجين من النواة. ويمثل هذا التفكك بالمعادلة التالية:

$$ {}^{14}_{6}C \longrightarrow {}^{14}_{7}N + e + \bar{\nu} $$

كذلك، يعتبر الكوبلت **60** من النظائر المشعة لجسيمات بيتا مع تحوله إلى النيكل **60** طبقاً للمعادلة التالية:

$$ {}^{60}_{27}Co \rightarrow {}^{60}_{28}Ni + e + \bar{\nu} $$

ويتفكك السيزيوم **137** إلى الباريوم **137** مع انطلاق جسيمات بيتا السالبة طبقاً للمعادلة:

$$^{137}_{55}Cs \rightarrow {}^{137}_{56}Ba + \bar{e} + \bar{\nu}$$

وهكذا.

ب – التفكك البوزتروني (تفكك بيتا الموجب) The positron decay

إذا قلت نسبة النيوترونات إلى البروتونات عن تلك النسبة المحددة من منحنى الاستقرار **(2-1)** للنظير ذي العدد الكتلي المعين، تعيد النواة استقرارها عن طريق تحول أحد البروتونات فيها إلى نيوترون، وينطلق نتيجة لهذا التحول جسيم موجب الشحنة يعرف باسم البوزترون وجسيم آخر يعرف بالنيوترينو. فعملية التفكك البوزتروني هي عبارة عن تحول أحد بروتونات النواة إلى نيوترون وانطلاق بوزترون (جسيم بيتا موجب، ونيوترينو ν نتيجة لهذا التحول). ويمثل هذا التفكك بالمعادلة التالية :

$$^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{+}e + \nu$$

وتوجد عدة مئات من النظائر التي يحدث فيها هذا النوع من التفكك، حيث يقل العدد الذري للنواة الوليدة بمقدار واحد، أي يتكون نظير عنصر جديد. ومن أمثلة هذا النوع من التفكك، تفكك الصوديوم 22، الذي يتفكك إلى نيون 22 مصدراً البوزيترون والنيوترينو طبقاً للمعادلة :

$$Na^{22}_{11} \rightarrow Ne + \bar{e}^{22}_{10} + \nu \quad +$$

ج – الأسر الإلكتروني The electron caputre

عندما تكون نسبة النيترونات إلى البروتونات قليلة، يمكن أن تتحول النواة بأسلوب آخر، حيث تأسر النواة الأم أحد الإلكترونات الذرية من المدارات القريبة منها، ثم يتحد هذا الإلكترون مع أحد بروتونات النواة، فيتحول هذا البروتون إلى نيوترون دون انطلاق أي من جسيمات بيتا خارج النواة، ولكن ينطلق النيوترينو. ويمثل الأسر الإلكتروني بالمعادلة التالية:

$$ {}^{1}_{1}P + e^{-} \rightarrow {}^{1}_{0}n + \nu $$

وتجدر الإشارة إلى أن النوى القابلة للتفكك البوزتروني يمكن أن يحدث لها أسر إلكتروني.

جسيمات بيتا **β- particles**

تنقسم جسيمات بيتا إلى نوعين: هما جسيمات بيتا السالبة (الإلكترونات) وجسيمات بيتا الموجبة (البوزترونات)، والبوزترون هو عبارة عن جسيم مساو في كتلته للإلكترون، ولكن شحنته موجبة. ولما كانت هذه الجسيمات مشحونة فإنه يمكن التحكم في مسارها باستخدام المجالات الكهربائية أو المغناطيسية، كما يمكن تعجيلها إلى طاقات عالية، وتنتمي جسيمات بيتا إلى فئة الجسيمات المشحونة الخفيفة.

النيوترينو **The neutrino**

هو عبارة عن جسيم ذي كتلة سكون مساوية للصفر تقريباً ولا يحمل أي شحنة.

طاقة جسيمات بيتا

إن الشرط الأساسي لحدوث أي نوع من أنواع تفكك بيتا هو أن تكون كتلة النواة الأم أكبر من مجموع كتل النواة الوليدة وجسيم بيتا،

ويكون الفرق بين كتلة النواة الأم ومجموع الكتل الناتجة هو عبارة عن الطاقة التي ينطلق بها كل من جسيم بيتا والنيوترينو (أو النيوترينو المضاد)، وتتوزع هذه الطاقة بين كل من جسيم بيتا والنيوترينو (أو النيوترينو المضاد) بطريقة عشوائية. لذلك، فإن طاقة جسيمات بيتا الصادرة عن نفس النظير تتخذ قيماً مختلفة، تبدأ من الصفر ولكنها لا تتجاوز قيمة الطاقة الكلية الناتجة عن التفكك، بذلك فإن قياس طاقة جسيمات بيتا لا يدل عن هوية المصدر الذي يصدرها.

7-1 اشعاعات جاما Gamma radiation

في أغلب الأحيان تكون النوى الوليدة الناتجة عن تفكك ألفا أو تفكك بيتا في حالة مثارة **Excited states** . ويعني هذا أن طاقة النواة تكون أعلى من طاقتها في الحالة المستقرة (الأرضية)، ولا تستطيع النواة أن تعيش في هذه الحالة المثارة طويلاً، ولكنها سرعان ما تنتقل إلى حالة أقل إثارة أو إلى الحالة الأرضية، وتتخلص من الطاقة الزائدة عن طريق إصدار إشعاعات كهرومغنطيسية، تعرف باسم إشعاعات جاما. كذلك، يمكن إثارة النوى المستقرة بطرق مختلفة كالتفاعلات النووية مثلاً، حيث تعود هذه النوى المثارة من جديد إلى حالتها الأرضية بعد إصدارها للطاقة الزائدة في شكل إشعاعات جاما.

وإشعاعات جاما عبارة عن فوتونات (موجات كهرومغنطيسية) كالفوتونات الضوئية، ولكن ترددها عال جداً (أي أنها ذات طاقة عالية جداً) بالمقارنة بالإشعاعات الضوئية. ولما كانت هذه الإشعاعات ليست أجساماً مادية ولا تحمل أي شحنة كهربائية فإنه لا يمكن التحكم في مسارها أو تعجيلها باستخدام المجالات الكهربائية أو المغنطيسية . ويوجد العديد من مصادر إشعاعات جاما. فمثلاً يعتبر كل من الكوبلت 60 والسيزيوم 137من مصادر إشعاعات جاما، حيث تتفكك هذه النظائر أولاً عن طريق تفكك بيتا السالب، فتتكون نظائر النيكل 60 والباريوم 137 بالترتيب، في حالات مثارة مما ينتج عنه إصدار إشعاعات جاما عند

تحول هذه النظائر الأخيرة من الحالة المثارة إلى الحالة الأرضية. ويبين شكل (1-3) كيفية تحول نظير الكوبلت 60 إلى نظير النيكل 60 في حالة مثارة بطاقة إثارة مقدارها 2.505 ميغا إلكترون فولت. وتنتقل نواة النيكل 60 من هذه الحالة المثارة إلى حالة أقل إثارة ذات طاقة الإثارة الأقل وهي 1.332 ميغا إلكترون فولت

شكل (1–3)

فينبعث نتيجة لذلك إشعاع جاما حاملاً فرق الطاقة بين الحالتين، أي حاملاً طاقة مقدارها 2.505 – 1.332 = 1.173 ميغا إلكترون فولت. ثم تنتقل نواة النيكل من هذه الحالة المثارة الأخيرة إلى الحالة المستقرة (الأرضية)، فينطلق فوتون جاما آخر حاملاً فرق الطاقة بين الحالتين أي 1.332 – صفر = 1.332 ميغا إلكترون فولت. وبصفة عامة تكون

طاقة الفوتون المنطلق $E\gamma$ نتيجة انتقال النواة من حالة مثارة بطاقة E_i إلى حالة أقل إثارة بطاقة E_f هي:

$$E\gamma = E_i - E_f$$

وهناك نظائر مشعة تطلق فوتونات جاما مباشرة، دون حدوث تفكك ألفا أو بيتا. ومن هذه النظائر نظير التكنيشيوم 99م (^{99m}Tc) حيث ينتج هذا النظير عن تفكك نظير المولبدنيوم 99 من خلال تفكك بيتا، ويتكون التكنيسيوم 99م في حالة مثارة، إلا أنها شبه مستقرة، حيث يبلغ العمر النصفي لهذه الحالة **6** ساعات. وبالتالي، يعتبر نظير التتكنيشيوم 99م نظيراً مشعاً لفوتونات جاما. ولهذا النظير استخدامات متعددة وواسعة في تشخيص العديد من الأمراض وانسداد وضيق الشرايين والجلطات وغيرها، من خلال حقنه في المريض وتتبع سريان النظير في الأوعية الدموية والأعضاء

المختلفة للمريض.

فوتونات جاما

تجدر الإشارة إلى أن كل نظير مشع يصدر فوتوناته بطاقة واحدة أو بقيم محددة للطاقة. فكما تبين في المثالين السابقين يصدر السيزيوم 137 فوتونات جاما بطاقة واحدة مقدارها 0.662 م إ ف، في حين يصدر الكوبلت 60 فوتونات جاما بطاقتين محددتين هما 1.173، 1.332 م إ ف. وبالتالي، فإنه بقياس طاقة أو طاقات الفوتونات المنبعثة من نظير معين يسهل تحديد هوية هذا النظير مباشرة، وبالتالي، يقال أن إشعاعات جاما الصادرة عن نظير ما هي بمثابة بصمة لهذا النظير.

1- 8 النيوترونات ومصادرها

النيوترونات هي كما عرفنا جسيمات متعادلة الشحنة. لذا، فهي لا تتأثر بالمجالات الكهربائية أو المغنطيسية. وعموماً، فإنه لا توجد في الطبيعة أي نظائر مشعة للنيوترونات، ولكنه يمكن إنتاج نظير اصطناعي يستخدم كمصدر للنيوترونات وهو نظير الكاليفورنيوم 252 الذي يصدر الميكروجرام الواحد منه حوالي 2 مليون نيوترون في الثانية. وتتراوح طاقة النيوترونات المنطلقة من هذا النظير بين حوالي 0.1 ، 7 م. إ. ف، وتوجد عدة مصادر أخرى للنيوترونات أهمها:

أ- مصدر الراديوم – بريليوم Ra – Be Source

وهو عبارة عن خليط من كل من نظير الراديوم 226 والبريليوم 09 فالراديوم 226 نشط إشعاعياً ويصدر جسيمات ألفا. وعند تصادم جسيم ألفا مع نواة البريليوم 9 يحدث تفاعل نووي ينتج عنه تكون نواة كربون وينطلق نيوترون طبقاً للتفاعل التالي:

$$\propto + {}^{9}_{4}\mathrm{Be} \rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

وعند خلط جرام واحد من الراديوم مع عدة جرامات من البريليوم، يمكن الحصول على مصدر نيوترونات يعطي حوالي 10^{7} نيوترون في الثانية. وتتراوح طاقة النيوترونات المنطلقة منه بين حوالي 1-10 م.إ.ف.

إلا أن هذا النوع من المصادر النيوترونية لم يعد متداولاً نظراً لأن الراديوم 226 يصدر من خلال نويداته الوليدة مثل الرصاص 214 والبولونيوم 214 كميات كبيرة من إشعاعات جاما، وقد حل محل هذا المصدر حالياً مصادر الأميريشيوم 241- بريليوم 9 .

ب - مصدر الأميريشيوم – بريليوم Am-241- Be-9

يحضر هذا المصدر بطحن كمية محددة من نظير الأميريشيوم 241 مع عدد محدود من الجرامات من البريليوم 9 المسحوق، حيث يصدر الأميريشيوم جسيمات ألفا التي تتفاعل مع نوى البريليوم فتصدر النيوترونات بنفس المعادلة السابقة، ويتميز الأميريشيوم 241 على الراديوم 226 بأنه لا يصدر سوى كمية ضئيلة من إشعاعات جاما وبطاقة صغيرة هي 59.5 ك.إ.ف ف. ويعطي هذا المصدر نفس المردود النيوتروني لمصدر الراديوم بريليوم وبمدى طاقات نيترونية يغطي نفس المدى من 1 حتى حوالي 10 م.إ.ف.

ج – مصدر النيوترونات الفوتوني The photoneutron Source

يستخدم في هذا النوع من المصادر النيوترونية أحد مصادر إشعاعات جاما بدلاً من مصدر جسيمات ألفا. وعند سقوط فوتون جاما على نواة البريليوم ينتج عن ذلك تكون جسيمين من جسيمات ألفا وانطلاق نيوترون طبقاً للتفاعل:

$$\gamma + {}^{9}_{4}\mathrm{Be} \rightarrow 2\ {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

ولكي يحدث هذا التفاعل يجب ألا تقل طاقة فوتون جاما عن 1.67 ميغا إلكترون فولت. لذا، فإنه يمكن استخدام مصدر الصوديوم 24 الذي يصدر إشعاعات جاما بطاقة مقدارها 2.76 ميغا إلكترون فولت. وبوضع الصوديوم 24 مع البريليوم 9 يمكن الحصول على مصدر نيوتروني يتميز عن المصادر السابقة بأن طاقة النيوترونات تتخذ قيمة واحدة بدلاً من طيف الطاقة المستمر من المصادر السابقة.

د – معجلات الجسيمات المشحونة

يمكن الحصول على نيوترونات ذات طاقة محددة، وذلك بقذف بعض النوى الخفيفة بالجسيمات المشحونة كالبروتونات أو الديوترونات المعجلة حتى طاقة معينة. ومن أمثلة هذه التفاعلات ما يلي:

$$^{2}_{1}H + ^{9}_{4}Be \rightarrow ^{10}_{5}B + ^{1}_{0}n + 4.35\ MeV$$

$$^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{3}_{2}He + ^{1}_{0}n + 3.29\ MeV$$

$$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n + 17.6\ MeV$$

وعموماً يستخدم التفاعل الثالث لعمل مولدات النيوترونات **Neutron generators** التي انتشر استخدامها خاصة في التطبيقات الصناعية المتعددة، حيث يتم تعجيل الديوترونات حتى طاقة مقدارها 150 كيلو إلكترون فولت ويقذف بها هدف من التريتيوم (النظير الثالث للهيدروجين)، فتنطلق النيوترونات، ويمكن الحصول على عدد من النيوترونات يصل إلى حوالي 10^{11} نيوترون في الثانية بطاقة ثابتة هي 14.1 م. إ. ف من هذا المولد.

هـ المفاعلات النووية Nuclear reactors

تعتبر المفاعلات النووية أكبر مصادر النيوترونات على الإطلاق حيث يمكن أن تتراوح كثافة التدفق النيتروني داخل المفاعل ما بين 10^{13} حتى 10^{19} نيوترون/ ثانية. سم^2 . وتنتج النيوترونات داخل المفاعلات عن انشطار نوى اليورانيوم. فعند انشطار نواة اليورانيوم تتكون نواتين أصغر وينطلق نتيجة لهذا الانشطار عدد محدود من النيوترونات. وعند اصطدام هذه النيوترونات المنطلقة بنوى يورانيوم أخرى فإنها يمكن أن تؤدي إلى انشطارها وانطلاق عدد آخر من النيوترونات. وهكذا، يحدث

ما يعرف بالتفاعل المتسلسل **Chain reaction** ، حيث تبدأ نواة واحدة بالانشطار تؤدي إلى خروج عدد معين من النيوترونات وليكن هذا العدد اثنين، ويؤدي هذان النيوترونان إلى انشطار نواتين جديدتين، فيصبح عدد النيوترونات المنطلقة 4 تؤدي بدورها إلى انشطار 4 نوى جديدة، فيزداد عدد النيوترونات المنطلقة إلى ثمانية. وهكذا، إلى أن يصل عدد النيوترونات إلى حد معين يجب ألا يتخطاه وإلا انفجر المفاعل.

9-1 قانون التفكك الإشعاعي The radioactive decay law

يعتبر التفكك الإشعاعي مع إصدار جسيم ألفا أو بيتا أو فوتون جاما عملية إحصائية بحتة . ويرجع السبب في ذلك إلى أنه لا يمكن معرفة الوقت الذي تتفكك فيه نواة معينة. فعند وجود نواة واحدة غير مستقرة فإنه يمكن أن تتفكك هذه النواة في الحال أو خلال ثانية أو بعد ساعة أو يوم أو عدة ملايين من السنوات. ولكن عند وجود عدد كبير جداً من نوى النظير النشطة فإنه يمكن معرفة عدد النوى التي تخضع للتفكك، وعلاقة هذا العدد مع الزمن. فعند وجود عدد معين من النوى النشطة، وليكن N_o في لحظة معينة من الزمن، فإنه يمكن تحديد عدد النوى المتبقية N دون تفكك خلال زمن مقداره t ، وذلك من العلاقة التالية:

$$N = N_o e^{-\lambda t} \qquad (3\text{-}1)$$

ويعرف هذا القانون باسم القانون الأسي للتفكك الإشعاعي.

ثابت التفكك الإشعاعي The decay constant

يعرف المعامل λ في العلاقة (3-1) باسم ثابت التفكك الإشعاعي. وهو عبارة عن احتمال تفكك نواة واحدة معينة في ثانية واحدة. ووحدة قياس هذا المعامل هي مقلوب الثانية أي (1/ثانية)، حيث أنها تعبر عن احتمال تفكك النواة في الثانية.

الشدة الإشعاعية أو النشاط الإشعاعي The activity

في معظم الأحيان يكون المطلوب هو معرفة عدد النوى التي تتفكك في الثانية الواحدة، وليس عدد النوى الباقية دون تفكك والمحددة بالعلاقة (1-3). ويسمى عدد النوى التي تتفكك في الثانية الواحدة من عينة مشعة باسم الشدة الإشعاعية للعينة أو النشاط الإشعاعي للعينة. ويرمز للشدة الإشعاعية في لحظة إعداد العينة بالرمز A_o ، وبمرور الوقت تتناقص الشدة الإشعاعية A للعينة تبعاً للعلاقة:

$$A = A_o e^{-\lambda t} \qquad (4\text{-}1)$$

وتحسب الشدة الإشعاعية (النشاط الإشعاعي) للعينة من واقع عدد الذرات المشعة الموجودة من هذه العينة. فإذا كان N_o عدد الذرات المشعة الموجودة في العينة في لحظة معينة وكان λ هو ثابت التفكك لهذا النظير (أي احتمال أن تتفكك نواة ذرة واحدة من هذا النظير في الثانية) يكون احتمال تفكك العدد N_o من الذرات في الثانية الواحدة هو النشاط الإشعاعي A_o (أو الشدة الإشعاعية للعينة) ، أي عدد التفككات التي تحدث في العينة في الثانية الواحدة، أي أن:

$$A_o = N_o \lambda \qquad (5\text{-}1)$$

عمر النصف (العمر النصفي) Half-life ($T_{1/2}$)

عمر النصف $T_{1/2}$ للنظير المعين هو عبارة عن الفترة الزمنية التي تنخفض خلالها الشدة الإشعاعية للعينة المجهزة من هذا النظير إلى النصف. وبمعنى آخر فإن عمر النصف هو الزمن اللازم لتفكك نصف عدد النوى الموجودة في العينة. ويرتبط عمر النصف بثابت التفكك λ لهذا النظير بالعلاقة:

$$T_{1/2} = 0.693 / \lambda \qquad (6\text{-}1)$$

وعند حساب قيمة λ من العلاقة (1-6) لاستخدامها في حساب النشاط الإشعاعي للعينة بالعلاقة (1-5)، يجب الانتباه إلى ضرورة أن يتم التعبير عن عمر النصف $T_{1/2}$ بالثانية، ذلك لأن النشاط الإشعاعي يحسب دائماً منسوباً للثانية.ويختلف العمر النصفي باختلاف النظير المشع. فهناك نظائر لا يتعدى عمرها النصفي جزء من **الميكروثانية**، وأخرى يزيد عمرها النصفي على **10^{10} سنة**. إلا أن العمر النصفي لكل نظير مشع هو مقدار ثابت لا يتغير إطلاقاً ويعتبر بصمة من بصمات هذا النظير.

ولإيضاح معنى العمر النصفي نفرض أن لدينا مصدراً من الكوبلت 60، الذي يبلغ عمره النصفي 5.27 سنة. ونفرض أن الشدة الإشعاعية للمصدر عند التجهيز كانت 10 كورى. بعد مرور فترة زمنية مقدارها 5.27 سنة تنقص الشدة الإشعاعية لهذا المصدر إلى النصف، أي تصبح 5 كورى. وبعد مرور 5.27 سنة أخرى تتناقص شدته إلى النصف مرة أخرى وتصبح 2.5 كورى، ثم بعد مرور 5.27 سنة أخرى تتناقص إلى النصف مرة أخرى وتصبح 1.25 كورى، وهكذا.

1- 10 ثابت التفكك وعمر النصف البيولوجي والفعال:

في بعض الأحيان، تدخل النويدات المشعة داخل جسم الإنسان من خلال عدد من المسالك مثل ابتلاع الطعام والشراب الملوث بالنويدات المشعة، أو استنشاق الهواء الملوث، أو بسبب حقن النويدات المشعة في الأوردة لتشخيص مرض المريض في عمليات الطب النووي، أو لعلاجه، أو حتى من خلال الخدوش الموجودة في الجلد الذي يتلوث بالنويدات المشعة.

ويعرف هذا النوع من التعرض "بالتعرض الداخلى" للإشعاع، وقد يكون أكثر خطورة من التعرض الخارجي (عندما تكون المادة المشعة موجودة خارج الجسم). ويرجع السبب في ذلك إلى أن جسيمات ألفا الخارجية تمتص في طبقة رقيقة من الهواء أو في طبقة الجلد الميت

على أسوأ تقدير. أما عند اندخال بواعث ألفا وبيتا للجسم (أي دخولها عفويا)، تودع هذه الجسيمات طاقتها بالكامل في منطقة ضيقة حول نقطة الانبعاث (خاصة جسيمات ألفا).

عمر النصف البيولوجي وثابت التفكك البيولوجي:

عند اندخال أية مادة للجسم من خلال أي مسلك من مسالك الاندخال فإن الجسم ي يتخلص من جزء منها بطرق الإخراج البيولوجي المختلفة (وهي البراز والبول والعرق والتنفس). وبالتالي فإنه عند اندخال كمية معينة من مادة ما (مشعة أو غير مشعة) للجسم فإنها تتناقص داخلة بفعل عمليات الإخراج.

وتتميز كل مادة تدخل الجسم البشري بعمر نصفي بيولوجي T_b. ويعرف عمر النصف البيولوجي للمادة في جسم الإنسان بأنه الفترة الزمنية التي يتخلص خلالها الجسم، نتيجة عمليات الإخراج البيولوجية، من نصف الكمية التي دخلته ويبقى نصفها الآخر داخل الجسم. كذلك، يرتبط عمر النصف البيولوجي مع ثابت التناقص البيولوجي λ_b بعلاقة تتخذ الصورة نفسها التي تتخذها العلاقة بين عمر النصف الفيزيائي T_p وثابت التفكك الفيزيائي λ_p ، وهي:

$$\lambda_b = 0.693 / T_b$$

عمر النصف الفعال T_e وثابت التفكك الفعال λ_e

عند اندخال مادة مشعة في الجسم فإنه نشاطها الإشعاعي يتناقص بوسيلتين، هما التفكك الفيزيائي والإخراج البيولوجي. وثابت التفكك الفعال T_e هو عبارة عن الفترة الزمنية اللازمة لانخفاض النشاط الإشعاعي داخل الجسم بفعل كل من التفكك الفيزيائي والإخراج الأحيائي. ويرتبط ثابت التفكك الفعال λ_e بعمر النصفي الفعال بذات العلاقة:

$$\lambda_e = 0.693 / T_e$$

وثابت التفكك الفعال λe هو حاصل جمع كل من ثابت التفكك البيولوجي λ_b وثابت التفكك الفيزيائي λ_p ، أي أن:

$$\lambda_e = \lambda_p + \lambda_b$$

وبالتعويض عن هذه الثوابت يتبين إن:

$$0.693/T_e = (0.693/T_b) + (0.693/T_p)$$

وباستخدام العلاقة بين ثابت التفكك الفعال الذي سيرمز له بالرمز λ (للتيسير) والعمر النصفي الفعال، الذي سيرمز له اختصارا بالحرف T، يتخذ قانون التفكك الإشعاعي الصيغة التالية:

$$A = A_o\, e^{-(0.693\ t/\ T)}$$

1-11 وحدات قياس الشدة الإشعاعية (النشاط الإشعاعي)

كانت الوحدة الأساسية لقياس الشدة الإشعاعية للعينة هي الكورى **Curie (Ci)** وأجزاؤه، وهي الميللي كورى **mCi** ، والميكروكورى **µCi**. والكورى وحدة كبيرة، حيث أن العينة التي تبلغ شدتها 1 كورى هي تلك العينة التي يحدث فيها $\mathbf{3.7 \times 10^{10}}$ تفككا في الثانية في الجيل الأول من تفككها إذا كانت العينة من النوع الذي يتميز بالتفكك المتتابع، ويبين الجدول التالي العلاقة بين بعض أجزاء الكوري ووحدة النظام المعياري العالمي المعروفة بالبكرل.

1 كورى	$= 3.7 \times 10^{10}$	تفكك في الثانية أو بكرل
1 ميللي كورى	$= 3.7 \times 10^{7}$	تفكك في الثانية أو بكرل
1 ميكروكورى	$= 3.7 \times 10^{4}$	تفكك في الثانية أو بكرل

وتستخدم الآن الوحدة المعيارية الدولية لقياس الشدة الإشعاعية في النظام المعياري الدولي وهذه الوحدة هي البكرل **bequerel** . والبكرل الواحد عبارة عن تفكك واحد في الثانية. ونظراً لصغر هذه الوحدة تستخدم في كثير من الأحيان مضاعفاتها وهي:

الكيلو بكرل والميغا بكرل والغيغا بكرل وهي:

1 كيلوبكرل = 10^3 بكرل

1 ميغا بكرل = 10^6 بكرل

1غيغا بكرل = 10^9 بكرل

1-12 النشاط الإشعاعي النوعي The specific activity

في بعض الأحيان، يلزم معرفة النشاط الإشعاعي لنظير معين (أو لعدة نظائر) في وحدة الكتلة من المادة أو في وحدة الحجم منها، أو على وحدة المساحة السطحية أو في وحدة الطول من خط سريان سائل مشع. في هذه الحالات يسمى النشاط الإشعاعي بالنشاط الإشعاعي النوعي أي المنسوب لوحدة الكتلة أو الحجم أو المساحة أو الطول. ويعبر عن النشاط الإشعاعي النوعي بوحدتي البكرل أو الكورى (تبعاً للنظام المستخدم) أو مضاعفاتهما أو أجزائهما منسوبة إلى وحدة الكتلة أو الحجم أو المساحة أو الطول. فعندما يقال أن النشاط الإشعاعي لعينة ملوثة هو 100 بكرل/كجم، فإن هذا يعني أن كل 1 كجم من هذه العينة يحدث فيه 100 تفكك في الثانية. وعندما يقال أن هواء المختبر ملوث باليود المشع مثلاً بواقع 150 بكرل/م^3، فإن هذا يعني أن كل متر مكعب من هذا الهواء يحدث فيه 150 تفككا في الثانية الواحدة. وعندما يقال أن التلوث السطحي لطاولة بلغ 270 بكرل/م^2 بالتكنيشيوم 99م، فإن هذا يعني أن كل متر مربع من سطح الطاولة يحدث فيه 270 تفككا للتكنيشيوم 99 م في الثانية الواحدة.

1-13 السلاسل الإشعاعية الطبيعية Natural radioactive series

تتميز جميع النوى ذات العدد الذري الأكبر من 82 بالنشاط الإشعاعي. ويرجع السبب في ذلك إلى زيادة عدد البروتونات في النواة، مما يجعل قوى التنافر الكهروساكن كبيرة. ويؤدي هذا التنافر إلى تفكك بعض النوى مع إصدار جسيمات ألفا، ونتيجة لإصدار هذه الجسيمات تزداد نسبة النيوترونات إلى البروتونات في النوى الوليدة، مما يؤدي إلى تفككها مع إصدار جسيمات بيتا، فتصل النسبة إلى نسبة الاستقرار، ولكنها تكون غير مستقرة بالنسبة لإصدار جسيمات ألفا وهكذا، تستمر السلسلة إلى أن تصل في النهاية إلى نواة مستقرة غالباً ما تكون هي نواة الرصاص.

وتوجد في الطبيعة **ثلاث مجموعات** تعرف بسلاسل الإشعاع الطبيعية

وهي سلسلة **الثوريوم**، وسلسلة **اليورانيوم – راديوم**، وسلسلة الأكتينيوم. وهناك سلسلة رابعة هي سلسلة النبتونيوم ولكنها لا توجد في الطبيعة حالياً، حيث أن العمر النصفي لأطول عناصرها عمراً هو **$2,2\times10^{6}$** سنة، وهذا أصغر بكثير من عمر الكون الذي يقدر بحوالي **$5-4\times10^{9}$** سنة، أي أنها تحولت إلى نوى مستقرة هي نوى البسموت منذ مئات الملايين من السنين. ويبين الجدول التالي (جدول 1-2) أهم خصائص هذه السلاسل ، كما يبين شكلا (1-4)، (1-5) مخططي تفكك سلسلتي **الثوريوم واليورانيوم.** بالإضافة إلى السلاسل الإشعاعية الطبيعية توجد في الطبيعة بعض النظائر المشعة الأخرى مثل البوتاسيوم **40** والساماريوم **147** وغيرها، وتتميز جميعها بأعمار نصفية أكبر من **10^{9}** سنة، وتتفكك جميعاً بإصدار جسيمات بيتا.

جدول (1- 2)

اسم السلسلة	عنصر نهاية السلسلة	النواة الأطول عمراً في السلسلة وعمرها النصفي	
الثوريوم	الرصاص 208	الثوريوم 232	1.41×10^{10} سنة
اليورانيوم	الرصاص 206	اليورانيوم 238	4.47×10^{9} سنة
الأكتينيوم	الرصاص 207	اليورانيوم 235	8.04×10^{8} سنة
النبتونيوم	فسموت 209	النبتونيوم 237	2.2×10^{6} سنة

مخطط تفكك سلسلة الثوريوم

شكل 1-4

شكل 1-5

14-1 النشاط الإشعاعي الصنعي The artificial radioactivity

بالإضافة إلى النظائر المشعة الطبيعية تمكن العلماء من إنتاج ما يزيد على أكثر من ألف وثلاثمائة نظير نشط إشعاعياً. وتنتج هذه النظائر الأخيرة بقذف النظائر المستقرة بأنواع مختلفة من الجسيمات النووية مثل جسيمات ألفا والبروتونات والنيوترونات وإشعاعات جاما، وتستخدم لهذا الغرض المفاعلات النووية كمصدر للنيوترونات أو المعجلات كمصدر للجسيمات المشحونة الثقيلة، وكذلك كمصدر لإشعاعات جاما أو النيوترونات السريعة.

فمثلاً، فإنه لإنتاج نظير الكوبلت 60 المشع، تحضر عينة من الكوبلت 59 المستقر. وتعرض هذه العينة للنيوترونات في مفاعل نووي (أي يتم تشعيع العينة بالنيوترونات). وعند اصطدام النيوترون بنواة الكوبلت 59 قد يمتص النيوترون داخل النواة وتتكون نواة الكوبلت 60، وينطلق فوتون (إشعاع جاما) طبقاً للتفاعل التالي:

$$^{1}_{0}n + {}^{59}_{27}Co \rightarrow {}^{60}_{27}Co + \gamma$$

ويعرف هذا التفاعل باسم الأسر النيوتروني، والكوبلت 60 نظير مشع، يستخدم كمصدر لجسيمات بيتا، وكذلك كمصدر لإشعاعات جاما، ويستخدم في العديد من التطبيقات الطبية والصناعية وغيرها.

كذلك، يتم إنتاج مادة البلوتونيوم داخل المفاعلات بكميات كبيرة باستخدام تفاعل الأسر النيوتروني. فعند اصطدام النيوترون باليورانيوم 238 يمكن أن تمتص نواة اليورانيوم هذا النيوترون مكونة بذلك نظيراً جديداً هو اليورانيوم 239، الذي يتفكك بدوره مع إصدار جسيم بيتا، إلى النبتونيوم 239، ثم يتفكك هذا الأخير مع إصدار جسيم بيتا إلى البلوتونيوم 239 وذلك بالآتي:

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{238}_{92}U \rightarrow {}^{239}_{92}U + \gamma $$

$$ {}^{239}_{92}U \xrightarrow{\beta^-} {}^{39}_{93}Np \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}_{94}Pu $$

كذلك، يمكن إنتاج المئات من النظائر المشعة بقذف النظائر المستقرة
بالجسيمات المشحونة والمعجلة حتى طاقات معينة في المعجلات النووية. فمثلاً، يمكن إنتاج الصوديوم 22 المشع بقذف الفلور 19 المستقر بجسيمات ألفا، أو بقذف الماغنسيوم 24 المستقر بالديوترونات طبقاً للتفاعلات التالية:

$$ {}^{4}_{2}\alpha + {}^{19}_{9}F \rightarrow {}^{22}_{11}Na + {}^{1}_{0}n $$

$$ {}^{2}_{1}H + {}^{24}_{12}Mg \rightarrow {}^{22}_{11}Na + {}^{4}_{2}\alpha $$

وهكذا، يمكن إنتاج الصوديوم 22 المشع، الذي يعتبر مصدراً للبوزترونات وإشعاعات جاما.

15-1 الأشعة السينية X - rays

الأشعة السينية هي موجات كهرومغنطيسية تشبه موجات الضوء المرئي أو إشعاعات جاما، إلا أنها لا ترى مثل إشعاعات جاما. وتختلف

الأشعة السينية عن هذه الموجات بشريحة ترددداتها (أو شريحة أطوال موجاتها). وتتراوح أطوال موجات الأشعة السينية بين حوالي 1×10^{-17} هيرتز وحتى حوالي 3×10^{-20} هيرتز. وعموماً، تتداخل شريحة ترددات الأشعة السينية مع ترددات أشعة جاما تداخلاً عريضاً، حيث تبدأ شريحة إشعاعات جاما عند تردد يبلغ حوالي 1×10^{18} هيرتز وحتى ما يزيد على 1×10^{23} هيرتز، وأهم ما يميز الأشعة السينية عن إشعاعات جاما رغم تداخلهما من حيث التردد وبالتالي الطاقة، هو أن أشعة جاما تصدر من نواة الذرة عند انتقال النواة من حالة مثارة إلى حالة أقل إثارة أو إلى الحالة الأرضية، أما الأشعة السينية فهي لا تصدر على الإطلاق من النواة، وإنما تصدر إما عن إعادة ترتيب الإلكترونات بين مدارات الذرة، أو عند حدوث انكباح شديد (أي تناقص شديد في سرعة الجسيمات المشحونة الخفيفة مثل الإلكترونات، بسبب تأثر هذه الإلكترونات بمجال كهربائي شديد يفرمل حركتها، ولذلك، يوجد نوعان من الأشعة السينية هما الأشعة السينية المميزة للعنصر والأشعة السينية الانكباحية.

الأشعة السينية المميزة للعنصر Characteristic x - rays

ينطلق هذا النوع من الأشعة السينية عند انتقال الإلكترونات من مدارات ذرية ذات طاقة أعلى إلى مدارات ذات مستوى طاقة أقل. فعند وجود فراغ إلكتروني (لأي سبب من الأسباب) في مدار ذي طاقة أقل ينتقل أحد الإلكترونات من مدار ذي طاقة أعلى ليشغل هذا الفراغ في المدار الأدنى، وبالتالي ينطلق في نفس اللحظة فوتون أشعة سينية (موجة كهرمغنطيسية) حاملاً فرق طاقتي الإلكترون في المدارين، وحيث أن طاقات الإلكترونات في المدارات الذرية محددة وثابتة للعنصر الواحد ومختلفة من عنصر لآخر، فإنه تتخذ فوتونات الأشعة السينية المنطلقة نتيجة لهذا الانتقال قيماً محددة وثابتة للطاقة بالنسبة للعنصر الواحد، وتختلف هذه القيم باختلاف العنصر. وهكذا، ينطلق عند إثارة إلكترونات ذرات العنصر بأية وسيلة من وسائل الإثارة أشعة سينية بخطوط طيفية

محددة وثابتة الطاقة لهذا العنصر تميزه عن غيره من العناصر. لذلك، يطلق على هذه الأشعة اسم الأشعة السينية المميزة، التي تعتبر بصمة من بصمات العنصر. لذلك ، يستخدم هذا النوع من الأشعة في عمليات التحليل الكمي والكيفي للعناصر.

الأشعة السينية الانكباحية Bremsstrahlung x-rays

ذكر أن الأشعة السينية الانكباحية تتولد عند حدوث فرملة شديدة للإلكترون، أو لأي جسيم مشحون خفيف وسريع بصفة عامة نتيجة تأثره بمجال كهربائي كابح شديد للإلكترونات أو للنوى، فالطاقة التي يفقدها الإلكترون أو الجسيم المشحون الخفيف بسبب التناقص الشديد في سرعته تنطلق في صورة موجة كهرمغنطيسية تحمل فرق طاقتي الإلكترون قبل وبعد الفرملة .

ومن أمثلة الأشعة السينية الانكباحية تلك الأشعة التي يتم توليدها في أنابيب الأشعة السينية المستخدمة لأغراض التشخيص أو العلاج الطبي أو للأغراض الصناعية المختلفة. وعموماً، يتم توليد هذه الأشعة بتسريع الإلكترونات حتى طاقة كبيرة نسبياً بواسطة فرق جهد بين المهبط الذي تنبعث عنده الإلكترونات والمصعد الموجب الذي تتجه نحوه هذه الإلكترونات، وهناك أنابيب تعمل بفروق جهد مختلفة تتراوح بين عدد قليل من الكيلوفولت وحتى عدة مئات من الكيلوفولت، وبالتالي تكتسب الإلكترونات طاقات تساوي نفس مقدار فرق الجهد . وتقاس الطاقة التي يكتسبها الإلكترون بوحدة الإلكترون فولت أو مضاعفاتها . وعند اصطدام الإلكترونات السريعة مع مادة المصعد تنكبح الإلكترونات . وتعتمد كثافة الأشعة السينية المنطلقة على طاقة الإلكترونات وعلى نوع مادة المهبط. ويتميز طيف الأشعة السينية بأنه طيف مستمر ، أي أن طاقة فوتونات الأشعة السينية تتراوح بين الصفر وبين أقصى قيمة لطاقة الإلكترونات المعجلة، ويبين شكل (1-6) طيف الأشعة السينية حيث يظهر فيه توزع

طاقات الأشعة الانكباحية كما يظهر خطان مميزان للعنصر المصنوع منه المصعد (أي خطان للأشعة المميزة).

وتجدر الإشارة إلى أن نسبة الطاقة المفقودة من الإلكترونات لا تتحول بكاملها إلى فوتونات أشعة سينية وإنما يتحول جزء غير كبير منها فقط يتراوح بين حوالي **1، 10%** تبعاً لنوع المادة ولطاقة الإلكترونات في حين تضيع باقي الطاقة وتتحول إلى طاقة حرارية تؤدي إلى تسخين المصعد الذي يجب تبريده حتى لا ينصهر.

طاقة الفوتونات (ك.إ.ف)

شكل (1-6)

أطيـــاف الأشـــعة الســـينية لجهـــود تشـــغيل مختلفـــة

1-16 بعض المضاعفات والأجزاء الهامة لجميع الوحدات

الأجزاء	الرمز	المعامل
1 deci	1 d	1×10^{-1}
1centi	1 c	1×10^{-2}
1 milli	1 m	1×10^{-3}
1 micro	1 μ	1×10^{-6}
1 nano	1 n	1×10^{-9}
1 pico	1 p	1×10^{-12}
1 femto	1 f	1×10^{-15}
المضاعف		
1 Deco	1 D	1×10^{1}
1 Hekto	1 H	1×10^{2}
1 Kilo	1 K	1×10^{3}
1 Mega	1 M	1×10^{6}
1 Gega	1 G	1×10^{9}
1 Tera	1 T	1×10^{12}
1 Exa	1 E	1×10^{15}

الباب الثاني

تفاعل الإشعاعات مع المادة
Interaction of radiation with matter

2-1 مقدمة

ليس المقصود من هذا الباب التعرف على التفاعلات النووية، التي يمكن أن تحدثها الإشعاعات في المادة، ولكن المقصود هو التعرف على قدرة هذه الإشعاعات على النفاذ خلال المادة أو قدرة المادة على امتصاص أو إيقاف النوع المعين من الإشعاعات.

ومن هذا المنطلق تقسم الإشعاعات المؤينة إلى أربعة أنواع هي:

1- **الجسيمات المشحونة الثقيلة:** وتشمل جسيمات ألفا والديوترونات والبروتونات وغيرها من الأيونات.
2- **الجسيمات المشحونة الخفيفة:** وهي جسيمات بيتا (الإلكترونات والبوزيترونات) وما شابهها .
3- **الإشعاعات الكهرومغنطيسية:** وهي إشعاعات جاما والأشعة السينية.
4- **النيوترونات.**

2-2 انتقال الطاقة من الجسيمات المشحونة الثقيلة للمادة

عند سقوط الجسيمات المشحونة الثقيلة على المادة تنتقل طاقة هذه الجسيمات إلى المادة بالتدريج، ويحدث هذا الانتقال نتيجة التصادمات اللامرنة بين الجسيمات الساقطة والإلكترونات المدارية لذرات المادة. ففي كل تصادم ينتقل جزء من طاقة الجسيم الساقط إلى أحد الإلكترونات. فإذا كانت الطاقة المنتقلة صغيرة نتج عن ذلك انتقال الإلكترون من مداره

إلى مدار ذي طاقة أعلى، ويقال أن الذرة أصبحت مثارة. أما إذا كانت الطاقة المنتقلة كبيرة فإن الإلكترون ينطلق تاركاً الذرة مما يؤدي إلى تأينها، أي تكون ذرة ينقصها إلكترون وتعرف بالأيون ويرحل الإلكترون بعيداً عن ذرته الأم ، وهكذا تفقد الجسيمات الثقيلة طاقتها عن طريق إثارة أو تأيين ذرات المادة. فعند دخول جسيم ألفا مثلاً إلى المادة تتناقص طاقته وبالتالي تقل سرعته بالتدريج. وقبل أن يتوقف جسيم ألفا يتبادل الإلكترونات مع المادة فيتحول إلى ذرة هليوم متعادلة. ونتيجة لتأيين المادة يتكون عدد من الأزواج الإلكترونية – الأيونية، ويمكن حساب عدد هذه الأزواج عند معرفة طاقة الجسيمات الساقطة ومتوسط الطاقة اللازمة لتكوين زوج إلكتروني – أيوني واحد . وتعتمد قيمة الطاقة المتوسطة اللازمة لتكوين الزوج على نوع المادة ولكنها لا تعتمد على طاقة الجسيمات، وهي تساوي حوالي 33 إلكترون فولت بالنسبة للهواء في الظروف العادية ، أي عند الضغط الجوي المعياري وعند درجة حرارة الغرفة، وهذا يعني أن الجسيمات الساقطة تتعرض لعدد كبير جداً من التصادمات قبل أن تتوقف. فمثلاً، عند سقوط جسيم ألفا بطاقة مقدارها 5 ميغا إلكترون فولت فإنه يتعرض لعدد من التصادمات اللامرنة يزيد على 5000000÷ 33 = 150000 تصادم. وينتج عن هذه التصادمات تكوين عدد من الأزواج الإلكترونية الأيونية مقداره 150000 زوج. وإذا كانت طاقة جسيمات ألفا ضعف هذه القيمة زاد عدد الأزواج إلى الضعف كذلك. وبمعنى آخر، فإن عدد الأزواج المتكونة يتناسب مع طاقة الجسيمات الساقطة عند توقف هذه الجسيمات داخل المادة.

مدى الجسيمات الثقيلة في المادة The range

مدى الجسيم في المادة هو عبارة عن المسافة المستقيمة التي يقطعها الجسيم في المادة إلى أن يتوقف تماماً. ويعتمد مدى الجسيمات الثقيلة في أي مادة على نوع المادة وعلى طاقة هذه الجسيمات، ويقل

المدى كلما زادت كثافة المادة، ويزيد كلما زادت طاقة الجسيمات. وعموماً، فإن مدى الجسيمات الثقيلة صغير، حيث يبلغ مدى جسيمات ألفا بطاقة 5 ميغا إلكترون فولت في الهواء حوالي 3.5 – 4سم، في حين لا يزيد مدى هذه الجسيمات في النسيج البشري على حوالي 40 ميكرون، أي أقل من سماكة طبقة الجلد السطحية الميتة. أي أن قدرة الجسيمات الثقيلة على الاختراق تعتبر صغيرة . لذا، فإن هذه الجسيمات لا تحتاج إلى حواجز سميكة للوقاية منها.

2-3 تفاعل الجسيمات المشحونة الخفيفة مع المادة:

تنتمي جسيمات بيتا إلى فئة الجسيمات المشحونة الخفيفة. وتقل كتلة جسيمات بيتا عن كتلة جسيم ألفا بحوالي 7360 مرة. لذلك، تكون سرعة جسيمات بيتا أعلى من سرعة جسيمات ألفا بالطاقة نفسها بحوالي 86 مرة. لهذا السبب، تقترب سرعة جسيمات بيتا بطاقة حوالي 1 (م إ ف) من سرعة الضوء التي تبلغ 3×10^{8} م/ث.

عند السرعات القريبة من سرعة الضوء ونظرا لصغر كتلة جسيم بيتا فإنه نتيجة قوى كولوم المتولدة بين هذه الجسيمات وبين الإلكترونات المدارية والنوي تحدث لجسيمات بيتا فرملة (أي انكباح أو تسارع سالب). ويؤدي ذلك التسارع السالب إلى تولد موجة كهرمغنطيسية تعرف بأشعة الانكباح (أو الأشعة السينية). لذلك، فإنه عند مرور جسيمات بيتا في المادة فإنها تنقل طاقتها إلى ذرات هذه المادة من خلال عملية التأيين والإثارة، جنبا إلى جنب مع عملية إنتاج أشعة الانكباح. وتعتمد نسبة الطاقة التي تفقدها جسيمات بيتا على التأيين والإثارة وتلك التي تفقدها على إصدار أشعة الانكباح على كل من طاقة هذه الجسيمات E وعلى العدد الذري Z للمادة التي تتفاعل معها هذه الجسيمات.

فعند الطاقات العالية E لجسيمات بيتا (أكثر من عدة م إ ف) وعند الأعداد الذرية Z الكبيرة للمادة المتفاعلة، تكون الآلية السائدة للتفاعل بين جسيمات بيتا والمادة هي إصدار أشعة الانكباح. أما عند الطاقات المنخفضة لهذه الجسيمات (عدة عشرات أو مئات الكيلو إلكترون فولط)

وعند الأعداد الذرية القليلة للمادة المتفاعلة تكون الآلية الرئيسة للتفاعل هي التأيين والإثارة. وعند الطاقات المتوسطة (حوالي 1 م إ ف) والأعداد الذرية المتوسطة تسهم كل من الآليتين بنسب متقاربة في انتقال الطاقة من الجسيمات للمادة.

ومن الخصائص الأخرى التي تميز تفاعل جسيمات بيتا عن تفاعل جسيمات ألفا مع المادة أن مسار جسيمات بيتا في المادة مسار منكسر نظرا لخف جسيم بيتا، بخلاف مسارات جسيمات ألفا التي تكون دائما خطا مستقيما.

إن السرعة الكبيرة لجسيمات بيتا تجعل زمن التفاعل الذي يتحدد كزمن وجود هذا الجسيم بالقرب من إلكترون مداري، زمنا صغيرا جدا، بحيث يكون زمن التفاعل محدودا للغاية. لهذا السبب، فإن مدى جسيمات بيتا أكبر كثيرا من مدى جسيمات ألفا، حيث يتراوح هذا المدى عند طاقة تبلغ حوالي 1 (م إ ف) في الهواء، عند الظروف المعيارية للضغط ودرجة الحرارة، بين 4-5 متر، في حين يبلغ مدى هذه الجسيمات في الماء أو جسم الإنسان حوالي 6-8 مم، وفي الألمنيوم حوالي 2- 3 مم.

وقد تبين أنه عند سقوط حزمة متوازية من هذه الجسيمات على مادة ما فإنه يتناقص عدد هذه الجسيمات كما تتناقص طاقاتها، كلما زاد عمق تغلغلها داخل المادة، وذلك بخلاف جسيمات ألفا التي تتناقص طاقتها دون عددها. ويعود السبب في ذلك إلى:

أ- طيف جسيمات بيتا مستمر، بحيث أن الجسيمات منخفضة الطاقة تفقد طاقاتها خلال طبقة رقيقة من المادة، في حين تستطيع الجسيمات عالية الطاقة أن تخترق لمسافات أبعد.

ب- انحراف نسبة كبيرة من جسيمات بيتا عن اتجاهها الأصلي بسبب تساوي كتل الجسيمات المتفاعلة.

ونتيجة لذلك، يتناقص عدد هذه الجسيمات N كدالة من مسافة التغلغل x عن العدد الساقط في الحزمة المتوازية N_o ، وفقا للقانون الأسي التالي:

$$N = N_o \, e^{-\mu x}$$

ويعرف المعامل μ بمعامل التوهين الخطي، ووحدة قياسه هي (1/سم)

4-2 تفاعل إشعاعات جاما والأشعة السينية مع المادة:

- عند سقوط حزمة من الأشعة السينية أو إشعاعات جاما على مادة ما، يمكن أن تتفاعل فوتونات الحزمة مع ذرات المادة، بصفة أساسية، من خلال آلية من ثلاث آليات، هي:

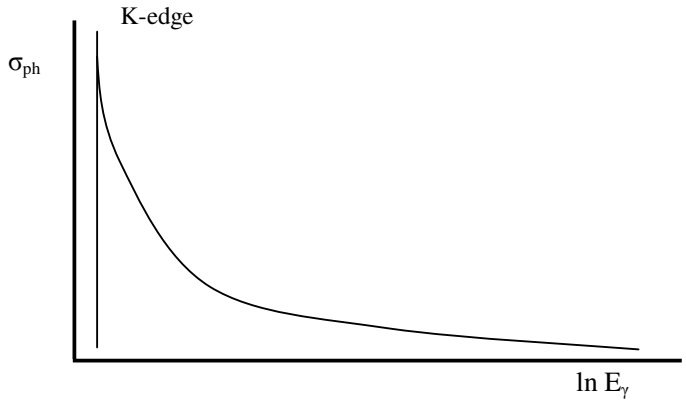
- الظاهرة الكهرضوئية (The photo-electric effect).
- استطارة (تشتت) كمبتون (Compton scattering or effect).
- إنتاج الأزواج (pair production).

2-4-1 الظاهرة الكهرضوئية:

تحدث هذه الظاهرة عندما يقترب أحد الفوتونات الساقطة من أحد الإلكترونات شديدة الترابط بنواة الذرة (أي من أحد إلكترونات القشرة K بصفة أساسية أو القشرة L بصفة أقل). ونتيجة للتفاعل بين المركبة الكهربائية لموجة الفوتون والمجال الكهربائي لهذا الإلكترون، يفنى الفوتون تماما (أي ينعدم من الوجود) ويمنح طاقته لهذا الإلكترون، فينطلق الإلكترون حاملا طاقة الفوتون بالكامل، باستثناء جزء منها، يستنفذ في فك الترابط بين الإلكترون وذرته الأم. ويعرف الإلكترون المنطلق، عندئذ بالإلكترون الكهرضوئي (photo-electron)، الذي تحدد طاقته E_e بدلالة طاقة الفوتون E_γ وطاقة ترابط الإلكترون B بالعلاقة:

$$E_e = E_\gamma - B$$

ويعتمد المقطع العرضي σ_{ph} (يقرأ سيجما) للظاهرة الكهرضوئية اعتمادا شديدا على العدد الذري Z للمادة المتفاعلة، حيث يتناسب هذا المقطع مع Z مرفوعة للأس 4 أو 5. والمقطع العرضي σ لأية عملية نووية، عموما، هو احتمال حدوث هذه العملية عندما يسقط جسيم واحد، عموديا، على مساحة 1 سم^{1} تحتوي على ذرة واحدة كهدف. ويقاس المقطع العرضي بوحدة البارن الذي يعبر عن المساحات النووية (حيث أن 1 بارن = 1×10^{-24} سم). يعتمد المقطع العرضي للظاهرة الكهرضوئية اعتمادا شديدا على طاقة الفوتون الساقط E_γ، حيث يكون هذا المقطع (الاحتمال) كبيرا جدا عند الطاقات المنخفضة (عشرات الكيلوإلكترون فولط)، ويتناقص تناقصا سريعا بزيادة الطاقة بصورة تكاد تكون أسية. ويبين شكل (2-1) كيفية تغير المقطع العرضي للظاهرة الكهرضوئية بتغير طاقة الفوتون الساقط.

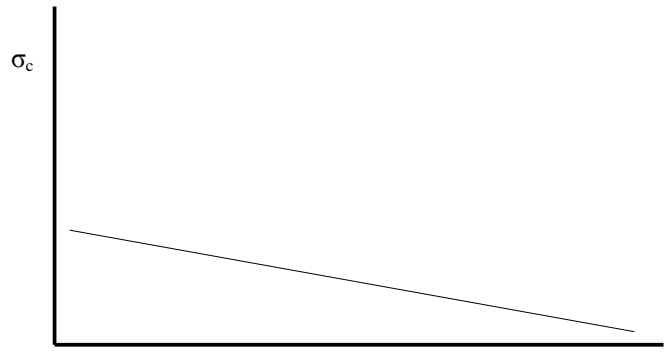


شكل (2–1): كيفية اعتماد المقطع العرضي للظاهرة الكهرضوئية على طاقة الفوتونات

2–4–2 استطارة (تشتت) كمبتون:

تحدث هذه الظاهرة عندما يقترب أحد الفوتونات الساقطة على المادة من أحد الإلكترونات الحرة أو ضعيفة الترابط بنواة الذرة (أي أحد إلكترونات القشرات البعيدة عن النواة). ونتيجة للتفاعل بين المركبة الكهربائية لموجة الفوتون والمجال الكهربائي لهذا الإلكترون، ينحرف الفوتون عن مساره الأصلي، ويقال أنه استطار (أي تشتت أو انحرف عن مساره). وتنخفض طاقة الفوتون بدرجة أكبر كلما زادت زاوية انحرافه، ويمنح فرق طاقتي الفوتون قبل الانحراف وبعده للإلكترون الذي حدث عليه التشتت، فينطلق هذا الإلكترون المعروف باسم إلكترون كمبتون، حاملا فرق الطاقتين. بذلك، يقال أن استطارة كمبتون تنتج فوتونا منحرفا عن المسار الأصلي بطاقة أقل، وإلكترون كمبتون يحمل فرق طاقتي الفوتون قبل وبعد التشتت.

ويعتمد المقطع العرضي σ_C لتشتت كمبتون بدوره على كل من العدد الذري Z للمادة المتفاعلة وعلى طاقة طاقة الفوتون E_γ. إلا أن اعتماد هذا المقطع على Z يعتبر ضعيفا، نسبيا، بالمقارنة بالمقطع العرضي للظاهرة الكهرضوئية . فالمقطع العرضي لتشتت كمبتون يعتمد اعتمادا خطيا على Z . كذلك، يعتمد المقطع العرضي لتشتت كمبتون على طاقة الفوتون الساقط اعتمادا بطيئا، نسبيا، بالمقارنة بالمقطع العرضي للظاهرة الكهرضوئية. ويبين شكل (2-2) كيفية تغير المقطع العرضي لتشتت كمبتون بتغير طاقة الفوتون.



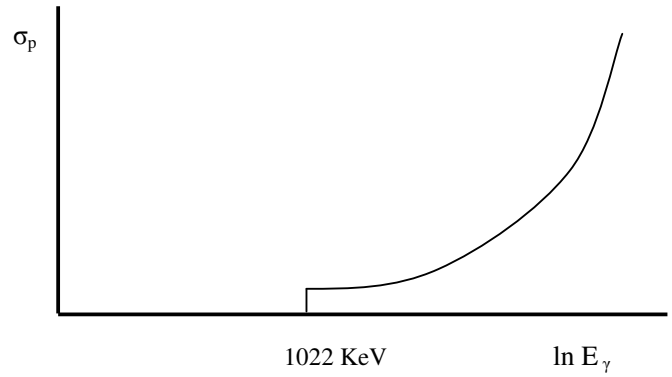
$\ln E_\gamma$

شكل (2-2): كيفية تغير المقطع العرضي لتشتت كمبتون بتغيرطاقة الفوتون

2-4-3 إنتاج الأزواج

- تحدث هذه الظاهرة عندما يقترب أحد الفوتونات الساقطة على المادة من نواة ذرة، شريطة ألا تقل طاقة هذا الفوتون عن 1022 (ك إ ف). ونتيجة للتفاعل بين المركبة الكهربائية لموجة الفوتون الساقط والمجال الكهربائي الشديد لنواة الذرة، يفنى الفوتون الساقط، تماما، وينبعث من النواة زوج مكون من جسيم بيتا سالب (إلكترون) وجسيم بيتا موجب (بوزترون). ويستهلك مقدار الطاقة المبين وهو 1022 (ك إ ف) لتكوين كتلتي الإلكترون والبوزترون من العدم. لذلك، لا يحدث إنتاج الأزواج إلا إذا زادت طاقة الفوتون الساقط عن هذا المقدار. وعند زيادة طاقة الفوتون الساقط عن 1022 (ك إ ف) تتوزع الطاقة الزائدة، بالتساوي، كطاقة حركية بين كل من الإلكترون والبوزترون.

ويعتمد المقطع العرضي σ_p لإنتاج الأزواج بدوره على كل من طاقة الفوتون E_γ. وعلى العدد الذري Z، حيث يعتمد على Z^2. ويبين شكل (2-3) كيفية تغير المقطع العرضي لإنتاج الأزواج بتغير طاقة الفوتون.



شكل (2-5): اعتماد المقطع العرضي لإنتاج الأزواج على طاقة الفوتون

ونتيجة لانطلاق الإلكترونات الكهرضوئية أو إلكترونات كمبتون أو أزواج الإلكترونات والبوزترونات بسبب أي من العمليات الثلاثة لتفاعل فوتونات الأشعة السينية أو إشعاعات جاما مع المادة تقوم هذه الجسيمات المشحونة بتأيين ذرات المادة بالأسلوب نفسه الذي تم عرضه في فقرات سابقة. لذلك، توصف إشعاعات جاما والأشعة السينية بالإشعاعات المؤينة بطريقة غير مباشرة.

2-4-4 المقطع العرضي الكلي σ ومعامل التوهين الخطي:

المقطع العرضي الكلي σ لتفاعل إشعاعات جاما أو الأشعة السينية مع المادة هو مجموع المقاطع للعمليات الثلاثة (الكهرضوئية وكمبتون وإنتاج الأزواج)، أي أن:

$$\sigma = \sigma_{ph} + \sigma_c + \sigma_p$$

وحدة قياس المقطع العرضي الكلي σ هي بارن، شأنه في ذلك شأن المقاطع الجزئية σ_{ph}، σ_c، σ_p، لكل عملية على حدة.

أما معامل التوهين الخطي μ لمادة ما فهو احتمال أن يتفاعل فوتون وحيد ساقط بطاقة معينة مع أي من الذرات الموجودة في وحدة الحجوم (أي 1 سم^3، بمساحة 1 سم^2 وعمق 1 سم) من هذه المادة، بأي من العمليات الثلاثة. ويرتبط معامل التوهين الخطي بالمقطع العرضي الكلي σ وعدد الذرات n في وحدة الحجوم بالعلاقة التالية:

$$\mu = n \sigma$$

ووحدة قياس معامل التوهين الخطي μ هي (1/سم) أي سم$^{-1}$. ويعتمد معامل التوهين الخطي μ اعتمادا شديدا على العدد الذري Z للمادة المتفاعلة، خاصة عند الطاقات المنخفضة، حيث تسود الظاهرة الكهرضوئية التي تعتمد على Z مرفوعة للأس 4 أو 5، ثم عند الطاقات العالية حيث تسود عملية إنتاج الأزواج. أما عند الطاقات المتوسطة، حيث تسود استطارة كمبتون فإن معامل التوهين الخطي μ يعتمد اعتمادا خطيا على العدد الذري Z.

2-4-6 معامل التوهين الكتلي:

يستخدم بدلا من معامل التوهين الخطي μ كمية فيزيائية أخرى يطلق عليها معامل التوهين الكتلي μ_m. ويعرف معامل التوهين الكتلي على أنه يساوي معامل التوهين الخطي μ مقسوما على كثافة المادة الموهِّنة ρ، أي أن:

$$\mu_m = \mu / \rho$$

ووحدة قياس معامل التوهين الكتلي μ_m هي (سم^2/جم).

2-4-7 القانون الأسي للتوهين:

توهين حزمة الفوتونات يعني تناقص عدد هذه الفوتونات بواسطة درع أو حاجز محدد السمك من مادة معينة، دون أن تتناقص طاقة هذه الفوتونات. فعندما تسقط حزمة ضيقة ومتوازية تتضمن عددا مقداره N_o من فوتونات ذات طاقة معينة على درع أو حاجز تبلغ سماكته x سم، فإن عددا من هذه الفوتونات يفنى بفعل التفاعل مع ذرات مادة الحاجز أو الدرع من خلال الظاهرة الكهرضوئية أو إنتاج الأزواج. كذلك، تنحرف نسبة أخرى من الفوتونات الساقطة عن مسارها بفعل استطارة كمبتون، فلا تستمر في مسارها المستقيم، وبالتالي تضيع من الحزمة. ويمكن إيجاد عدد الفوتونات N التي تخترق الدرع أو الحاجز دون تفاعل من العلاقة الأسية التالية:

$$N = N_o e^{-\mu x}$$

ويطبق قانون التوهين الأسي عند توفر شرطان ضروريان هما:

أ- أن تكون حزمة الفوتونات ضيقة ومتوازية ووحيدة الطاقة.

ب- أن تكون سماكة الدرع صغيرة، بحيث لا يمكن حدوث تشتت متعدد للفوتون نفسه داخل الدرع أو الحاجز.

وعند تطبيق قانون التوهين السابق باستخدام معامل التوهين الخطي μ فإنه يجب أن يستخدم معه السمك الطولي x بوحدة سم، حتى يكون حاصل الضرب μ x الموجود في أس الأساس e عديم الوحدة. أما عند استخدام معامل التوهين الكتلي (ووحدته سم^2/جم) فإنه يجب استخدام السمك الكتلي x_m ، للتعبير عن سماكة الجدار أو الدرع، بدلا من السمك الطولي x للسبب نفسه. ويسهل الحصول على السمك الكتلي x_m كحاصل ضرب كل من السمك الطولي x في كثافة مادة الدرع أو الجدار ρ، أي بالعلاقة التالية:

$$x_m = x \rho$$

إن التوهين الأسي لإشعاعات جاما أو الأشعة السينية يجعل مفهوم مدى فوتونات هذه الإشعاعات غير وارد على الإطلاق. ويعود السبب في ذلك إلى أن نسبة من فوتونات الأشعة السينية أو إشعاعات جاما سوف تخترق الحاجز أو الدرع دون تفاعل، فتخرج منه بالطاقة نفسها مهما زادت سماكة هذا الدرع. فعلى سبيل المثال، فإنه عند عمل درع حول مصدر جاما مثل الكوبلت60 تبلغ سماكته أكثر من 2 متر، فإن نسبة من فوتونات جاما المنطلقة من المصدر سوف تخترق الدرع دون أي نوع من التفاعل.

2-4-8 طبقة السمك النصفي (HVL):

طبقة السمك النصفي (The half value layer HVL) من مادة معينة هي سماكة الطبقة التي توهن عدد فوتونات الحزمة المتوازية من إشعاعات جاما أو الأشعة السنية وحيدة الطاقة إلى نصف قيمتها الأصلية. فإذا كان عدد فوتونات الحزمة هو N_o في حالة غياب الدرع أو الحاجز، يكون عددها في وجود هذا الدرع هو $N = (1/2) N_o$. ويرتبط مقدار طبقة السمك النصفي (HVL) التي يرمز لها كذلك، بالرمز ($x_{1/2}$) ترتبط بمعامل التوهين الخطي بالعلاقة التالية:

$$HVL = \ln 2 / \mu = 0.693 / \mu$$

ووحدة قياس طبقة السمك النصفي هي (سم) عند استخدام السماكة الخطية ومعامل التوهين الخطي، في حين تكون الوحدة هي (جم/سم^2) عند استخدام السماكة الكتلية ومعامل التوهين الكتلي.

2-4-9 طبقة السمك العشري (TVL):

طبقة السمك العُشري (Tenth value layer TVL) من مادة ما هي سمك الطبقة التي توهن عدد فوتونات الحزمة المتوازية من الأشعة إلى جزء من عشرة أجزاء من قيمتها الأصلية، أي أن: $N = N_o$ (1/10). ويرتبط مقدار طبقة السمك العشري (TVL) بطبقة السمك النصفي (HVL) بالعلاقة:

$$TVL = 3.32\ HVL$$

2-4-10 معامل امتصاص الطاقة μ_a:

يعبر معامل امتصاص الطاقة عن حصة الطاقة التي امتصت من الأشعة السينية أو إشعاعات جاما في حجم معين من المادة المتفاعلة. ويستخدم هذا المعامل لحساب الكيرما من إشعاعات جاما أو الأشعة السينية في المادة المتفاعلة. وهنا تجدر الإشارة، إلى أن بعض المراجع تستخدم، معامل التوهين الخطي أو الكتلي للتعبير عن الطاقة الممتصة في المادة، وهذا استخدام خاطئ.

2-5 تفاعل النيوترونات مع المادة:

- نظرا لكون النيوترونات جسيمات متعادلة الشحنة، فإنها لا تتفاعل كهربائيا مع الإلكترونات المدارية للذرات ولا مع شحنة النواة، وإنما تتفاعل بفعل القوى النووية بين النيوترون الساقط والنواة نفسها. فعندما يقترب النيوترون من سطح نواة ما، يمكن أن تحدث تفاعلات نووية متعددة بينهما، إلا أن أهم هذه التفاعلات من وجهة نظر الحماية من الإشعاع هي:

أ- **التشتت المرن**: ويقصد به تشتت النيوترون على النواة واحرافه عن مساره الأصلي، مع فقد جزء من طاقته الحركية ومنحها كطاقة حركية لهذه النواة دون أن تتغير الطاقة الداخلية لها.

ب- **الأسر النوتروني:** وخلاله تأثر النواة النيوترون المتفاعل معها وينطلق فوتون جاما فوريا وتتكون في الغالبية العظمى من الحالات نواة مشعة.

2-5-1 تهدئة النيوترونات:

تهدئة النيوترونات تعني تحويل النيوترونات السريعة التي تشغل مدى الطاقة من حوالي 100 كيلو إلكترون فولط وحتى عدة ميجا إلكترون فولط إلى نيوترونات حرارية (أي تبلغ طاقتها في المتوسط حوالي 0.025 إلكترون فولط) أو إلى نيوترونات بطيئة (أي عدة آحاد أو عشرات الإلكترون فولت). ويعتبر التشتت المرن هو المساهم الرئيس في فقد النيوترون السريع طاقته، وخفض سرعته. فعندما يتصادم النيوترون مع نواة ساكنة، فإنه وفقا لقوانين انحفاظ الطاقة والزخم، يفقد هذا النيوترون جزءا من طاقته يعادل نسبة كتلته إلى مجموع كتلته وكتلة النواة الهدف تقريبا. بذلك، فإنه عندما يتصادم نيوترون مع نواة نظير خفيف كالهيدروجين مثلا (أي على البروتون ذي العدد الكتلي الذي يساوي العدد الكتلي للنيوترون وكلاهما يساوي 1) فإن هذا النيوترون يفقد في المتوسط حوالي 63 % من طاقته في التصادم الواحد.

ويحتاج النيوترون السريع الذي تبلغ طاقته 2 (م إ ف) إلى حوالي 18 تصادما مع نوى الهيدروجين ليفقد كل طاقته تقريبا، ويتحول إلى ما يعرف بالنيوترون الحراري (thermal neutron) الذي تبلغ طاقته حوالي 0.025 إلكترون فولط. لذلك، يعتبر نظير الهيدروجين1 من أفضل المواد المستخدمة لتهدئة النيوترونات خلال التصادمات المرنة. ولا يستخدم الهيدروجين في صورته الغازية لصغر عدد ذرات الهيدروجين في وحدة الحجم، وإنما يستخدم في صورة سائلة كالماء أو في صورة صلبة كالشمع أو البلاستيك. وعند استخدام الماء الخفيف

(العادي) للتهدئة فإنه يكفي استخدام طبقة من الماء تبلغ حوالي 20- 25 سم لتحويل النيوترون السريع إلى آخر حراري.

2-5-2 الأسر النيوتروني:

عندما يقترب النيوترون الحراري أو البطيئ بشدة من سطح نواة نظير ما، يمكن أن تأسر هذه النواة النيوترون مكونة بذلك نظير آخر، وينطلق في ذات اللحظة فوتون فوري. ومن الأمثلة على ذلك تفاعل الأسر النيوتروني على الكاميوم 114، حيث يتكون نظير الكادميوم115 وينطلق الفوتون وفقا للتفاعل:

$$ {}^{1}_{o}n \; + \; {}^{114}_{47}Cd \; \rightarrow \; {}^{115}_{47}Cd \; + \; \gamma $$

2-5-3 انتقال الطاقة من النيوترونات لجسم الإنسان:

بالنسبة للنيوترونات السريعة، فإنها يمكن أن تنقل كامل طاقتها إلى جسم الإنسان من خلال التصادمات المرنة مع نوى الهيدروجين. فطاقة النيوترون السريع تنتقل بالكامل بعد حوالي 18 تصادما إلى نوى ذرات الهيدروجين (أي إلى البروتونات) الذي يعتبر المكون الرئيس والسائد في جسم الإنسان، حيث يحتوي كل كيلو جرام واحد من جسم الإنسان على حوالي 6×10^{25} ذرة هيدروجين. وعندما تكتسب البروتونات طاقات النيوترونات تقوم هذه البروتونات المشحونة بتأيين ذرات أو جزيئات خلايا الجسم البشري. لذلك، يقال أن النيوترونات تنتمي للإشعاعات المؤينة رغم أنها تحدث التأيين بطريقة غير مباشرة.

وعندما تصبح النيترونات حرارية بفعل التهدئة، يلعب تفاعل الأسر النيوتروني للنيوترونات الحرارية والبطيئة في نوى بعض الذرات متوسطة الكتلة الموجودة في جسم الإنسان (كالبوتاسيوم والصوديوم والكالسيوم وغيرها) الدور الوحيد لانتقال الطاقة لجسم الإنسان وانطلاق فوتونات جاما الفورية، لحظة الأسر، وربما تتكون بعض النويدات المشعة داخل جسم الإنسان، وهي النويدات التي تسهم إسهاما محدودا في إيداع الجرعة الإشعاعية في جسم الإنسان.

الباب الثالث

كواشف الإشعاعات وأجهزة قياس الجرعات الإشعاعية

3- 1 مقدمة

يقوم مبدأ الكشف عن الإشعاعات المؤينة على استخدام ظاهرة تأيين أو إثارة ذرات أو جزئيات مادة الكاشف عند سقوط هذه الإشعاعات عليها. فعند سقوط الجسيمات الثقيلة على المادة يتكون عدد من الأزواج الإلكترونية – الأيونية في المادة. ويتناسب عدد هذه الأزواج مع طاقة الجسيمات الساقطة. وعند تجميع الإلكترونات أو الأيونات الناتجة عن التأين وقياس الشحنة الكهربائية الناتجة عن هذه الأزواج (أو التيار الكهربائي الناتج) يمكن معرفة عدد هذه الجسيمات وطاقتها. وفي حالة إثارة الذرات يمكن أن ينتج عن هذه الإثارة انطلاق ضوء مرئي يمكن تسجيله بسهولة، وبالتالي يمكن الكشف عن الجسيم الذي أحدث هذه الإثارة.

وهناك أنواع أخرى من الكواشف تقوم أساساً على قياس التغيرات الكيميائية التي تحدثها الإشعاعات عند سقوطها على بعض المركبات الكيميائية. كذلك، توجد أنواع أخرى من الكواشف تستخدم للكشف عن النيوترونات، وذلك بقياس النشاط الإشعاعي المتكون في بعض المواد نتيجة تشعيعها (تعريضها) بالنيوترونات. وعموماً، يتوقف نوع الكاشف المستخدم على عدة عوامل أهمها:

1 - نوع الإشعاعات المطلوب الكشف عنها.
2 - كثافة هذه الإشعاعات.
3 - طاقة الإشعاعات.

3-2 الكواشف الغازية The gas detectors

ورد في الباب الثاني أنه عند سقوط الإشعاعات على المادة ينتج عن ذلك تأيين ذرات أو جزيئات الغاز وتكوين عدد من الأزواج الإلكترونية – الأيونية. ويتناسب هذا العدد مع الطاقة الممتصة داخل الغاز . وعند تجميع الشحنة الكهربائية الناتجة عن كل من الإلكترونات السالبة أو الأيونات الموجبة وقياسها أو قياس التيار الناتج عنهما يمكن معرفة طاقة الإشعاعات الساقطة وعددها. وتقوم الكواشف الغازية على قياس التيار الكهربائي للإلكترونات والأيونات الناتجة عن مرور الإشعاعات في حيز معين من الغاز، وتنقسم هذه الكواشف إلى عدة أنواع هي:

غرفة التأين The ionization chamber

غرفة التأين (شكل 3-1) هي عبارة عن إناء يمكن أن يتخذ أشكالاً وأحجاماً مختلفة، ويملأ الإناء بأحد الغازات الخاملة أو بالهواء الجوي تحت ضغط معين (حسب نوع الغرفة). ويوجد بداخل الغرفة قطبان فلزيان يوصلان بقطبي مصدر جهد (بطارية)، وعند مرور الإشعاعات في الغاز تتكون الأزواج الإلكترونية – الأيونية، وعند وجود فرق جهد بين القطبين تجذب الإلكترونات السالبة في اتجاه القطب الموجب (المصعد أو الأنود)، وتجذب الأيونات الموجبة في اتجاه القطب السالب (المهبط أو الكاثود). ويؤدي سريان تلك الشحنات الكهربائية إلى مرور تيار كهربائي يتناسب مع عدد الإشعاعات الساقطة وطاقتها، فعند دخول بروتون ذو طاقة 1 ميغا إلكترون فولت إلى الغرفة، وفي حالة توقف هذا البروتون بالكامل داخل الغاز يتكون عدد من الأزواج الإلكترونية الأيونية مقداره:

$$1000000 \div 33 = 30000 \text{ زوج}$$

وحيث أن شحنة الإلكترون = **1.6 ×10^{-19}** كولوم تكون الشحنة الناتجة عن أي نوع منهما هي 30000×1.6 ×10^{-19} = 4.8 × 10^{-15} كولوم، وإذا كان عدد البروتونات التي تدخل في الثانية الواحدة عبارة عن ألف

بروتون تكون الشحنة الناتجة هي :

4.8×10^{-15} ×1000 = 4.8×10^{-12} كولوم،

وبالتالي تكون شدة التيار المار هي:

4.8× 10^{-12} كولوم/ 1 ثانية = 4.8× 10^{-12} أمبير

شكل 3–1

وعموماً، يكون التيار الناتج في غرفة التأين صغيراً للغاية (حوالي 10^{-12} أمبير). لذا، يجب قياسه باستخدام جهاز قياس شديد الحساسية، لذلك، تستخدم دارة إلكترونية بمعامل تكبير ضخم للتيار تعرف باسم مكبر التيار المستمر **Direct current amplifier.**

وعموماً، تعتمد الأبعاد الهندسية للغرفة ونوع الغاز المستخدم فيها وضغطه على نوع الإشعاعات المطلوب الكشف عنها وكثافتها وطاقتها، وكذلك على الغرض المخصصة له الغرفة. كذلك، يتم عمل نافذة من مادة ذي عدد ذري صغير (كالبريليوم مثلاً) يكون سمكها رقيقاً جداً، وذلك في الغرف المخصصة للكشف عن الجسيمات المشحونة حتى لا تفقد هذه الجسيمات جزءاً كبيراً من طاقتها في جدار الغرفة. أما بالنسبة للغرف المخصصة للكشف عن إشعاعات جاما أو النيوترونات فإنه لا تستخدم أي نافذة في جدران الغرفة نظراً للقدرة الاختراقية العالية لهذه الأنواع من الإشعاعات، بل على العكس تبطن الغرفة من الداخل بطبقة رقيقة من الرصاص لزيادة احتمال تفاعل إشعاعات جاما معها، وبالتالي زيادة احتمال تسجيل الفوتونات.

غرفة التأين للنيوترونات

حيث أن النيوترونات لاتأين ذرات أو جزيئات الغاز فإنه يضاف للغاز نسبة معينة من غاز ثالث فلوريد البورون BF_3 . وعند سقوط النيوترون
على نواة البورون يحدث التفاعل النووي التالي:

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

وينطلق جسيم ألفا حاملاً قيمة معينة من الطاقة فيقوم هذا الجسيم بتأيين ذرات أو جزيئات الغاز وبهذا الأسلوب يتم تسجيل النيوترون .

العداد التناسبي The proportional counter

عند زيادة فرق الجهد بين المصعد والمهبط (الأنود والكاثود) فوق قيمة معينة (تختلف لكل غرفة) يتضاعف التيار الكهربائي للغرفة،

ويرجع السبب في ذلك إلى أن الإلكترونات الأولية الناتجة عن تأيين الجسيم النووي الساقط علي الغاز لذراته تكتسب الإلكترونات المتكونة طاقة حركية كبيرة عند زيادة فرق الجهد. فتصبح هذه الإلكترونات الابتدائية قادرة على تأيين ذرات جديدة من ذرات الغاز قبل وصولها إلى المصعد (الأنود). وهكذا، يمكن عند هذه الجهود العالية أن تحدث عدة مراحل من التأيين المتتابع (شكل 3-2) بحيث يتضاعف عدد الإلكترونات التي تصل إلى المصعد. فإذا كان عدد الإلكترونات الأولية الناتج عن الجسيم النووي هو N_o يمكن أن يتضاعف هذا العدد عند الجهود العالية، بحيث يصبح $M \quad N_o$ ، حيث M معامل التضاعف، ويتراوح هذا المعامل بين **1، 10**^{3} وذلك حسب قيمة فرق الجهد بين المصعد والمهبط.

شكل 3–2

ويلاحظ في هذا العدَّاد أن عدد الإلكترونات التي تصل للأنود يتناسب مع عدد الإلكترونات الأولية N_o ، أي مع طاقة الجسيم النووي. لذا، يعرف هذا العداد بالعدَّاد التناسبي. أما كلمة عداد فترجع إلى أن هذا الكاشف يسجل الإشعاعات واحدة تلو الأخرى، أي أنه يقوم بعدها. فعند دخول الجسيم النووي إلى العداد يؤدي هذا الجسيم إلى تأيين ذرات الغاز، ثم تضاعف عدد الأيونات والإلكترونات، وتتجمع الإلكترونات على المصعد، مما يؤدي إلى ظهور نبضة كهربائية على المصعد، وهذا يعني مرور جسيم واحد. وفي هذا الأمر يختلف العداد التاسبي عن غرفة التأين التيارية التي تقيس متوسط التيار الناتج عن عدد من الجسيمات. ولكن تجدر الإشارة إلى أنه يمكن عمل غرف تأين نبضية وذلك لعد الإشعاعات واحدة تلو الآخرى، وعندئذ يلزم توصيل الغرفة بمضخم نبضات ذات معامل تكبير كبير، كما يجب أن يكون هناك فاصل زمني بين الجسيم والجسيم الذي يليه حتى يمكن فصل النبضات عن بعضها.

عداد غايغر – ميولر Geiger – Muller counter

عند زيادة فرق الجهد بين المصعد والمهبط إلى ما فوق المنطقة التناسبية، يزداد معامل التضاعف M ، ويصل إلى قيمة كبيرة للغاية، بحيث أنه عند تكوّن إلكترون واحد داخل العداد فإنه يؤدي إلى حدوث تفريغ كهربائي داخل العدّاد. وعندئذ لا يتناسب عدد الإلكترونات التي تصل للمصعد مع عدد الإلكترونات الأولية، أي أنه لا يوجد تناسب بين طاقة الجسيم النووي والنبضة الكهربائية على مصعد العدّاد.

وهكذا، يستخدم عداد غايغر – ميولر لعد الجسيمات النووية دون إمكانية تحديد طاقتها. ويفضل استخدام هذا العداد نظراً لكبر النبضة الكهربية الناتجة عنه، حيث أنه يمكن الاستغناء عن الدارة الإلكترونية التي تستخدم عند مخرج العداد التناسبي لتكبير النبضات.

وعموماً، يكون كل من العداد التناسبي وعداد غايغر – ميولر على شكل أنبوب أسطواني فلزي. ويكون المصعد عبارة عن سلك رفيع جداً موضوع بطول محور الأنبوب الأسطواني، ويكون المهبط عبارة عن جسم هذا الأنبوب. وتملأ هذه العدادات بخليط معين من الغازات يمكن أن يختلف باختلاف الغرض من العداد ونوعه.

3-3 الكواشف الوميضية Scintillation detectors

عند سقوط الإشعاعات المؤينة، كالجسيمات المشحونة الثقيلة وجسيمات بيتا وإشعاعات جاما على بعض المواد تثار ذرات أو جزيئات هذه المواد، ثم تعود الذرات المثارة إلى حالتها المستقرة. وعند عودة الذرة المثارة إلى الحالة المستقرة ينطلق وميض ضوئي (فوتون ضوئي). وتعرف مثل هذه المواد (بالمواد الوميضية). وللكشف عن الإشعاعات المؤينة باستخدام المواد الوميضية يتم اختيار المواد الوميضية السريعة، أي التي ينطلق وميضها خلال زمن لا يتجاوز ميكروثانية واحدة (ميكروثانية = 10^{-6} ثانية) من لحظة الإثارة،فعند سقوط فوتون جاما بطاقة مقدارها **1.5** ميغا إلكترون فولت، يمكن أن يحدث هذا الفوتون انطلاق إلكترون بأحد العمليات الثالثة (راجع الباب الثاني) . فلو حدث الأثر الكهروضوئي داخل المادة الوميضية ينطلق إلكترون حاملاً كل طاقة الفوتون، أي طاقة مقدارها 1.5 ميغا إلكترون فولت ويقوم هذا الإلكترون بهذه الطاقة بإثارة حوالي 15000 ذرة من ذرات المادة الوميضية قبل أن يتوقف، وينتج عن ذلك ومضة ضوئية مكونة من هذا العدد من الفوتونات الضوئية (وليس فوتون جاما)، ويتم الكشف عن هذه الومضة باستخدام أنبوب التضاعف الفوتوني.

أنبوب التضاعف الفوتوني The photomultipller tube, PMT

هي عبارة عن أنبوب زجاجي مفرغ تفريغاً جيداً من الهواء، وتحتوي على مهبط (كاثود) كهروضوئي **Photoelectric cathode** . فعند سقوط الضوء الناتج من المادة الوميضية على هذا المهبط ينطلق منه عدد من الإلكترونات، يتناسب مع عدد الفوتونات الضوئية الساقطة عليه. وتحتوي الأنبوب على عدة أقطاب (دينودات **Dynodes**) الغرض منها مضاعفة عدد الإلكترونات الخارجة من المهبط. فعندما يكون جهد الدينود الأول موجباً بالنسبة للمهبط تتجه الإلكترونات الخارجة من هذا المهبط إلى الدينود الأول. وإذا كان جهد هذا الدينود عالياً تكتسب الإلكترونات طاقة كافية، بحيث تصبح قادرة على تحرير عدد آخر من الإلكترونات عند تصادمها مع الدينود. وبذلك، يتضاعف عدد الإلكترونات . كذلك، فإنه إذا كان جهد الدينود الثاني أعلى من جهد الأول، يمكن أن يتضاعف عليه عدد الإلكترونات مرة أخرى. وهكذا، يستمر تضاعف الإلكترونات على الدينودات إلى أن يتم تجميعها على القطب الأخير للأنبوب المسمى بالمصعد . وبذلك ، تتجمع على المصعد شحنة إلكترونية تتناسب مع عدد الفوتونات الواقعة على المهبط (الكاثود) أي مع طاقة الجسيم النووي الساقط على المادة الوميضية.

وتجدر الإشارة إلى أن معامل التضاعف في الأنبوب يتزايد بمعدل سريع جداً بزيادة فرق الجهد بين الدينودات.

وتستخدم مادة يوديد الصوديوم **NaI (TI)** المزودة بعنصر الثاليوم الثقيل في شكل متبلور كمادة وميضية للكشف عن إشعاعات جاما. ويترواح حجم البلورات المستخدمة لهذا الغرض بين أقل من نصف بوصة للقطر، وأقل من نصف بوصة للارتفاع وبين أكثر من عشر بوصات لكل من القطر والارتفاع تبعاً لطاقة إشعاعات جاما والكفاءة المطلوبة للكاشف. أما بالنسبة للجسيمات الثقيلة فتستخدم طبقة رقيقة من كبريتيد الخارصين **ZnS** كمادة وميضية.

أما بالنسبة للكشف عن النيوترونات باستخدام الكواشف الوميضية فتستخدم بللورة تحتوي على خليط من كبريتيد الخارصين والبرافين (لاحتواء البرافين على نسبة عالية من الهيدروجين). وعند اصطدام النيوترون بالهيدروجين ينطلق البروتون الذي يسجل في الكاشف الوميضي من نوع كبريتيد الخارصين، فتنطلق الومضة الضوئية التي يسجلها أنبوب التضاعف الفوتوني

3-4 الكشف عن الإشعاعات باستخدام الأفلام الحساسة

عند مرور الإشعاعات المؤينة خلال أفلام التصوير الحساسة المعروف **The photo-emulsion films** فإنها تؤين المادة المستحلبة الحساسة
(وهي بروميد الفضة) بنفس الأسلوب الذي يحدث نتيجة وقوع الضوء على هذه الأفلام. والفيلم الحساس عبارة عن شريحة رقيقة من مادة بلاستيكية شفافة تغطي من أحد الأوجه أو من الوجهين بطبقة رقيقة من مستحلب بروميد الفضة، وعند مرور الإشعاعات أو الضوء في هذا الفيلم تتكون حبيبات صغيرة من الفضة الفلزية نتيجة كسر الإشعاعات للرابطة بين البروم والفضة. وعند معالجة الفيلم بأحماض الإظهار والتثبيت، تظهر حبيبات سوداء من الفضة الفلزية على الفيلم في الأماكن التي تعرضت للإشعاع أو الضوء، وهنا تجدر الإشارة إلى أنه للحصول على نتائج صحيحة يجب اختيار التركيز المناسب لأحماض الإظهار والتثبيت، وكذلك اختيار درجة الحرارة المناسبة للمعالجة . وللكشف عن الإشعاعات المؤينة تستخدم أفلام حساسة مقاس 30×40 مم موضوعة داخل غلاف أسود محكم لعدم تعرضها للضوء. وبعد تعرض الفيلم للإشعاعات ومعالجته يتم عده بواسطة جهاز قياس العتامة Denistometr ، لقياس العتامة (الاسوداد) المتكونة، ومن العتامة المتكونة يتم تحديد كمية الإشعاعات وذلك بواسطة منحنيات خاصة للمعايرة يتم تجهيزها

بتعريض عدد من الأفلام لجرعات إشعاعية محددة ومعلومة ورسم العلاقة بين درجة العتامة والجرعة الممتصة (شكل 3-3) .

شكل 3–3

3–5 أجهزة قياس الجرعات الشخصية Personal dosimeters

يوضع جميع العاملين بالإشعاعات أو المواد المشعة تحت الرقابة الإشعاعية. وتتم هذه الرقابة عموماً بأسلوبين هما:

أ – إجراء المسح الإشعاعي للمناطق أو المختبرات التي يتوفر فيها نوع من الإشعاعات أو المواد المشعة، وذلك بغرض تحديد المستويات الإشعاعية السائدة فيها، وبالتالي تحديد أقصى زمن لوجود العاملين في هذه الأماكن. ويستخدم هذا الأسلوب عادة في المناطق المسماة بالمناطق الخاضعة للإشراف التي تخضع عادة لقيود رقابية أقل صرامة.

ب – قياس الجرعة الشخصية التي يتعرض لها الشخص المعين وذلك باستخدام أجهزة قياس الجرعات الشخصية، بغرض تحديد وتدوين الجرعة التي يتعرض لها هذا العامل واقعياً. ويعتبر هذا الأسلوب

ملزماً بالنسبة لجميع العاملين في المناطق المعروفة باسم المناطق المراقبة **controlled areas** وعموماً، تنقسم أجهزة قياس الجرعات الشخصية إلى عدة أنواع منها ما يلي :

شارة الفيلم الحساس The film badge

كان الفيلم الحساس من أكثر الوسائل انتشاراً كمقياس للجرعة الشخصية. ويتكون هذا المقياس من فيلم حساس يوضع داخل حافظة خاصة من البلاستيك تعرف بشارة الفيلم الحساس. ويختلف نوع الفيلم المستخدم باختلاف الغرض المخصص له. ويستخدم الآن في بعض دول العالم أفلام **Radiation monitor** خاصة بالكشف عن الإشعاعات، وهي عبارة عن شريحة رقيقة من البلاستيك مغطاة من كلا الوجهين بالمستحلب الحساس، بحيث يكون المستحلب على أحد الأوجه شديد الحساسية للإشعاعات، في حين يكون من النوع ضعيف الحساسية على الوجه الآخر. والغرض من ذلك هو امكانية قياس الجرعات الممتصة في مدى واسع. فالمستحلب شديد الحساسية يمكّن من قياس الجرعات الفعالة التي تتراوح بين **50** ميكروسيفرت، **50** ميللي سيفرت. أما إذا زادت الجرعة عن **50** ميللي سيفرت، فإن هذا يؤدي إلى نزع طبقة المستحلب شديد الحساسية من الفيلم عند معالجته كيمائياً (أي عند تظهيره وتثبيته) في شكل قشرة رقيقة وتبقى طبقة المستحلب ضعيف الحساسية. وبذلك، يمكن قياس الجرعات الفعالة التي تتراوح بين **50** ميللي سيفرت وحوالي 10 سيفرت. ويستخدم أحياناً زوج من الأفلام بدلاً من استخدام فيلم واحد.

أما الحافظة (شكل 3-4) فهي عبارة عن علبة رقيقة من البلاستيك تحتوي على عدة فتحات ونوافذ وذلك لإمكان تثبيت عدة قطع بلاستيكية أو فلزية تعمل بمثابة المرشحات للكشف عن نوع الجسيمات وطاقاتها. فيتم الكشف عن أشعة بيتا في جزء الفيلم الواقع تحت الفتحة الموجودة في العلبة. وأما إشعاعات جاما فتقاس تحت النافذة المثبت فيها قطعة من الرصاص. وأما النيوترونات البطيئة فيتم قياسها بمعرفة الفرق في

العتامة بين الجزأين الموجودين تحت النافذة المكونة من الرصاص والكادميوم والنافذة المكونة من الرصاص فقط. فالنيوترونات تتفاعل مع الكادميوم وتمتص فيه، وينتج عن ذلك إشعاعات جاما تزيد من عتامة هذا الجزء من الفيلم.

وتعتبر هذه الوسيلة أحد الوسيلتين المعترف بهما رسمياً في قياس الجرعة الشخصية.

شكل (3-4) أ – الفيلم الحساس ب –الحافظة ذات النوافذ والغطاء

مقياس الجرعة بالوميض الحراري The thermoluminscent dosimeter TLD

هو جهاز يتكون من مادة لا فلزية متبلورة من فلوريد الليثيوم (LiF) أو فلوريد الكالسيوم (CaF) . وعند سقوط الإشعاعات على مثل هذه المواد، المعروفة بالمواد الوماضة حرارياً ، تنتقل طاقة الإشعاعات إلى إلكترونات البللورة، فتنتقل هذه الإلكترونات إلى شريحة أعلى للطاقة، وتبقى الإلكترونات في هذه الشريحة طالما أن درجة حرارة المادة في حدود معينة. وعند تسخين المادة إلى درجة عالية (حوالي 300م) تعود الإلكترونات إلى الشريحة الأصلية، وينتج عن ذلك انبعاث الطاقة في شكل ضوء مرئي. وتتناسب كمية الضوء الصادر عند تسخين

المادة مع كمية الطاقة الممتصة من الإشعاعات . لذا، فإنه عند قياس كمية الضوء الصادر – عند تسخين المادة – يمكن تحديد الجرعة الإشعاعية الممتصة في المادة. ويمكن استخدام المادة من جديد بعد تبريدها. وتقاس كمية الضوء بواسطة جهاز خاص يحتوي على أنبوب التضاعف الفوتوني الذي يقيس كمية الضوء الصادر من المقياس المستخدم.

ويعتبر مقياس الجرعة بالوميض الحراري حالياً هو الوسيلة الأكثر انتشاراً المعترف بها لقياس الجرعة الشخصية ، إلا أن من أهم عيوبه ضياع البيانات بعد تسخين المقياس ، ويمكن حفظ تسجيل هذه البيانات بالكمبيوتر آليا.

مقياس الجرعة الجيبي The pocket dosimeter

مقياس الجرعة الجيبي هو عبارة عن وسيلة لقياس التعرض الشخصي (بالرنتجن). ويشبه هذا المقياس (شكل 3-5) قلم الحبر من حيث الشكل والحجم. ويتكون الجهاز من غرفة تأين أسطوانية صغيرة تحتوي على قطبين أحدهما مثبت والآخر متحرك. ويصنع القطب المتحرك من خيط رفيع من مادة الكوارتز، ويثبت أحد طرفي هذا الخيط، وعند شحن القطبين بشحنة كهربية من نفس النوع يتنافر القطبان فيبتعد الطرف المتحرك للقطب بعيداً عن القطب الآخر الثابت.

شكل 3–5

وعند سقوط الإشعاعات داخل غرفة التأين، خاصة إشعاعات جاما أو الأشعة السينية فإنها تؤدي إلى تأيين الغاز داخل الغرفة. ونتيجة للشحنة المتكونة من التأيين تقل الشحنة على كل من القطبين فتقل قوة التنافر بينهما مما يؤدي إلى تحرك خيط الكوارتز الرفيع مقترباً من وضعه الطبيعي.

ولقراءة قيمة التعرض في أي وقت تُصنع أحد قواعد الأسطوانة من الزجاج وذلك للسماح بدخول الضوء، وتصنع القاعدة الأخرى من مادة شفافة يوجد عليها تدريج يحدد قيمة التعرض، ويركب على التدريج عدسة مكبرة لتكبيره وتحديد القراءة بدقة. ويتم قراءة التعرض بتوجيه المقياس نحو الضوء والنظر من خلال العدسة فيظهر ظل خيط الكوارتز فوق التدريج. وبذلك يمكن تحديد التعرض مباشرة وفي أي وقت. ولإعادة الجهاز لوضع الصفر يتم شحنه باستخدام مصدر جهد (بطارية) إلى أن يصبح خيط الكوارتز أبعد ما يمكن عن الخيط الثابت (أي في وضع الصفر).

ويعتبر مقياس الجرعة الجيبي وسيلة مكملة لقياس الجرعة الشخصية إلى جانب الوسيلتين الأساسيتين السابقتين. وأهم مزية للمقياس الجيبي هي أن العامل بالإشعاع يستطيع في أي لحظة النظر إلى المقياس ومعرفة الجرعة التي تعرض إليها، بعكس الوسيلتين السابقتين اللتين تتطلبان عمليات عد تتم مرة كل شهر أو شهرين وبواسطة متخصصين وأجهزة خاصة، خارج موقع العمل.

6-3 أجهزة المسح الإشعاعي The radiation survey meters

يتكون جهاز المسح الإشعاعي، عموماً، من كاشف ودارة إلكترونية لتكبير التيار أو الجهد، وجهاز لقياس شدة التيار الناتج عن الإشعاعات أو عدد النبضات الجهدية (أي عدد هذه الإشعاعات) في وحدة الزمن.

وتزود بعض أجهزة المسح الإشعاعي التي تعمل بالنظام النبضي بجهاز صوتي يصدر صوتاً كلما تم تسجيل نبضة فيه. وبالتالي، يمكن التنبه إلى زيادة كثافة الإشعاعات صوتياً، ودون الحاجة للنظر إلى قراءة الجهاز بين وقت وآخر.

وبالنسبة للإشعاعات السينية وإشعاعات جاما يفضل استخدام كاشف في شكل غرفة تأين أو عدادات غازية.

أما بالنسبة لأجهزة المسح الإشعاعي لجسيمات بيتا وألفا فإنه من المفضل استخدام العداد التناسبي أو عداد غايغر ككاشف ، في حين يستخدم كاشف تناسبي (أو عداد غايغر) مزود بطبقة رقيقة من البورون أو مملوء بغاز ثالث فلوريد البورون، وذلك لإجراء المسح الإشعاعي للنيوترونات البطيئة والحرارية.

أما بالنسبة للنيوترونات السريعة فإنه تستخدم العدادات التناسبية المزودة بطبقة رقيقة من مادة غنية بالهيدروجين مثل شمع البرافين.

وللبحث عن مصدر مفقود لأشعة جاما فإنه يفضل استخدام الكواشف الوميضية نظراً لكفاءتها الكبيرة التي تزيد آلاف المرات على كفاءة الكواشف والعدادات الغازية، وبذلك تتميز هذه الكواشف بحساسية عالية للغاية.

إلا أن أهم عيوب هذه الكواشف بالنسبة لاستخدامها في أجهزة المسح الإشعاعي هي أنها تتصف بمنحنى استجابة رديء للطاقة.

كذلك، يجب الإشارة إلى أنه عند إجراء مسح إشعاعي حول جهاز يتضمن مصدراً للترددات العالية مثل المعجلات الخطية أو الرادارات أو

غيرها، فإنه يحظر استخدام أي جهاز مسح يتضمن عداد غايغر – ميولر ككاشف، لأن هذا العداد شديد الحساسية لهذه الترددات ويعطي انحرافاً كاملاً بمجرد الاقتراب من أي مصدر يصدر هذه الترددات رغم عدم وجود أية إشعاعات مؤينة.

وتوجد أنواع عديدة من أجهزة المسح الإشعاعي تقوم جميعها بتحديد معدل التعرض ويبين شكل (3-6) نوعاً من هذه الأجهزة.

ومن أهم خصائص جهاز المسح الإشعاعي منحنى استجابته للطاقة. ومنحنى الاستجابة هو منحنى يبين العلاقة بين قيمة معدل الجرعة التي يقرأها الجهاز من إشعاعات معينة (إشعاعات جاما أو أشعة سينية أو غيرها) وبين طاقة هذه الإشعاعات.

فبفرض وجود مجال إشعاعي يتساوى فيه معدل الجرعة من الإشعاعات عند جميع الطاقات المختلفة لهذه الإشعاعات فإنه بسبب عدم ثبات الاستجابة لغالبية أجهزة المسح الإشعاعي لن يسجل الجهاز معدلاً متساوياً إلا في مدى ضيق من الطاقات، بينما يسجل عادة قيماً أقل لمعدل الجرعة عند انخفاض الطاقة عن حد معين أو زيادتها على حد معين.

ولثبات الاستجابة في مدى عريض نسبياً من الطاقات يتم وضع مرشحات خاصة حول الكاشف.

إلا أنه تجدر الإشارة إلى أن غرف التأين (خاصة ذات التيار المستمر) تتميز بمنحنى استجابة عريض بالمقارنة بالكواشف الأخرى.

لذلك ، تفضل هذه الغرف لمعايرة معدلات الجرعات الإشعاعية في المجالات الإشعاعية متغيرة الطاقة من إشعاعات جاما.

شكل 3–6

7-3 أجهزة رصد التلوث الإشعاعي Contamination monitors

تجدر الإشارة إلى أن أجهزة المسح الإشعاعي تستخدم لقياس الجرعة أو معدلها في وجود تدفق (أي مجال إشعاعي) من جسيمات بيتا أو إشعاعات جاما أو الأشعة السينية أو النيوترونات. أما عند وجود تلوث إشعاعي بالمادة المشعة ذاتها على سطح أو معدة أو على الأيدي والملابس، أو عند وجود تلوث بمادة مشعة في الهواء أو الماء أو الطعام أو التربة أو غيرها، فإن جهاز المسح الإشعاعي لا يصلح، على الإطلاق، سواء للكشف عن هذا التلوث أو لتحديد مكوناته ومستوياته.

ولقياس تلوث الأسطح، عموماً، بما في ذلك تلوث الأيدي والملابس وأسطح المعدات والطاولات والأرضيات وغيرها، تستخدم أجهزة خاصة تعرف باسم "أجهزة رصد التلوث السطحي. ومن حيث المبدأ لا تختلف مكونات هذا الجهاز عن جهاز المسح الإشعاعي إلا من حيث أن أجهزة رصد التلوث تستخدم كواشف مخصصة لقياس جسيمات ألفا أو بيتا فقط، أي أنها تستخدم كواشف ذوات نوافذ رقيقة للغاية بمساحة سطح كبيرة للنافذة، وذلك للسماح بمرور جسيمات ألفا أو بيتا خلال هذه النافذة إلى داخل الكاشف بحيث تسجل فيه.

وهكذا، فإنه عند الحاجة للكشف عن وجود تلوث سطحي بأي مادة مشعة (عدا التكنشيوم 99م) فإنه يتم الكشف عن ذلك التلوث باستخدام الكاشف ذي النافذة الرقيقة لتسجيل جسيمات ألفا وبيتا. فإشعاعات جاما والنيوترونات لها قدرة رهيبة على اختراق سماكات كبيرة من المادة وبالتالي فإنه لا يمكن الجزم بأن هذه الإشعاعات صادرة من السطح، بل قد تكون صادرة من عمق كبير من داخل الكبسولة محكمة الإغلاق المحتوية على المادة. لذلك، فإنه حتى للكشف عن تلوث بمادة تصدر نيوترونات (كمصادر الأمبريشيوم – بريليوم أو الكاليفورنيوم 252) أو إشعاعات جاما (كالسيزيوم 137 مثلاً) فإنه يتم استخدام كواشف جسيمات

ألفا أو بيتا التي تصدر عن نفس هذه المصادر مع النيوترونات أو مع إشعاعات جاما.

وهكذا، تستخدم أجهزة رصد التلوث للكشف عن التلوث السطحي عموماً وتحديد مقداره. وتجدر الإشارة إلى أن جميع أجهزة رصد التلوث تعمل بالنظام النبضي، وتقوم بعد عدد النبضات المسجلة في الكاشف في وحدة الزمن من خلال النافذة الرقيقة.

أما عند قياس تلوث الهواء أو المواد الممتدة كالأغذية والمياه والتربة وغيرها، فإنه يلزم لذلك استخدام تقنيات القياسات النووية الدقيقة بما فيها القياسات الطيفية التي لا يتسع هذا الكتيب لسردها.

ومن المؤسف أنه يلاحظ في بعض المختبرات التي تستخدم مواد مشعة مفتوحة كاليود المشع وغيرها أن العاملين في هذه المختبرات يحرصون على توفير جهاز مسح إشعاعي، رغم أن المهم هو توفير جهاز رصد إشعاعي لرصد تلوث الأسطح أو الأيدي. وقد يلزم الأمر في بعض الأحيان توفر جهاز رصد تلوث الهواء، خاصة إذا كانت المادة المشعة من النوع المتطاير كاليود. إن المخاطر التي قد تنجم عن تلوث محدود للأسطح أو الأيدي أو الهواء أكبر بكثير من المخاطر الناجمة عن الإشعاعات المنطلقة من هذه المواد والتي لا يستطيع جهاز المسح الإشعاعي الكشف عنها.

الباب الرابع

بعض تقنيات القياسات الإشعاعية

4-1 مقدمة:

سوف يتم، في هذا الباب، التعرف على قليل من تقنيات القياسات الإشعاعية، وقياسات الجرعات، مع عرض بعض العوامل المؤثرة في دقة هذه القياسات. وبالنسبة للقياسات الإشعاعية الطيفية، سوف يقتصر الحديث على حالة وحيدة عندما يكون المصدر المشع خارج الكاشف. عندئذ، يكون هناك وضعان هندسيان (Geometrical configuration)، يوصف أولهما بالوضع الهندسي الجيد (Good geometrical configuration) ويوصف الآخر بالوضع الهندسي الرديء (Bad geometrical configuration). والعوامل التي تحدد نوع الوضع هي الأبعاد الهندسية لأي من المصدر المشع والكاشف المستخدم والمسافة بينهما.

4-2 الأوضاع الهندسية الجيدة والرديئة:

يعرف الوضع الهندسي الجيد على أنه ذلك الوضع الذي تكون فيه المسافة بين مركزي المصدر المشع والكاشف المستخدم كبيرة جدا ويكون المصدر نقطيا والكاشف صغير نسبيا، بحيث يمكن اعتبار حزمةالأشعة الواصلة للكاشف متوازية. وبالنسبة للأوضاع الواقعية، فإنه يمكن اعتبار الوضع الهندسي الجيد، بدرجة مقبولة من التقريب، على أنه ذلك الوضع الذي تكون فيه المسافة بين مركزي المصدر والكاشف أكبر من البعد الأكبر لأي من المصدر أو الكاشف بما لا يقل عن عشرة أضعاف.

ومن خصائص الوضع الهندسي الجيد، أنه يمكن حساب الزاوية المجسمة Ω (شكل 4-1 أ) التي يرى الكاشف من خلالها المصدر، بدقة عالية. فضلا عن ذلك، فإنه بالنسبة لقياسات إشعاعات جاما والنيوترونات، تكون الكفاءة الذاتية ε للكاشف في الوضع الهندسي الجيد، وللطاقة المحددة، ثابتة ولا تتغير بتغير وضع المصدر المشع بالنسبة للكاشف الأمر الذي لا يتحقق في الوضع الهندسي الردئي.

وبالنسبة للمصادر المشعة الباعثة لإشعاعات جاما أو النيوترونات، والتي تتميز بنشاط إشعاعي محدود (حتى مئات البكرل)

فإنه يستحيل، من وجهة النظر الواقعية، تنفيذ قياساتها الطيفية في وضع هندسي جيد، نظرا لأن عدد الفوتونات أو النيوترونات المنبعثة من المصدر والتي تتجه نحو الكاشف يكون محدودا، الأمر الذي يتطلب إجراء القياس لفترة طويلة للغاية لا تتلاءم مع الأزمنة المتاحة للقياس، فضلا عن أنه قد يقل معدل العد من المصدر كثيرا عن معدل العد من الخلفية الإشعاعية الموجودة طبيعيا في المكان. في مثل هذه الحالات يتم اللجوء إلى الوضع الهندسي الرديء، بتقريب المصدر المشع من الكاشف. ويبين شكل (4-1) بعض الأوضاع الهندسية العملية المستخدمة في العديد من القياسات الإشعاعية.

4-3 الزاوية المجسمة: Ω The solid angle

عند وجود مصدر مشع، مجهز في صورة نقطة مادية صغيرة، بحيث يمكن أن يطلق عليه مصطلح مصدر نقطي، ويبلغ نشاطه الإشعاعي A بكرل، في وضع هندسي جيد (شكل 4-1أ)، فإنه نظرا لأن المصادر المشعة تصدر إشعاعاتها في جميع الاتجاهات بشكل متجانس (أي بدرجة الاحتمال نفسها)، فإن الإشعاعات التي تصل إلى السطح الحساس من الكاشف هي حصة صغيرة فقط. وتقدر هذه الحصة، بناءً على التوزع المتجانس للجسيمات أو الإشعاعات المنبعثة من المصدر، على أنها تساوي النسبة بين مساحة السطح الحساس للكاشف S إلى مساحة سطح الكرة التي يوجد المصدر في مركزها ويوجد الكاشف على سطحها وموازيا لهذا السطح. فإذا كان نصف قطر هذه الكرة هو R م (وهي المسافة بين مركز الكرة وسطحها)، يكون عنصر الزاوية المجسمة Ω ،التي يرى الكاشف من خلالها المصدر، هو:

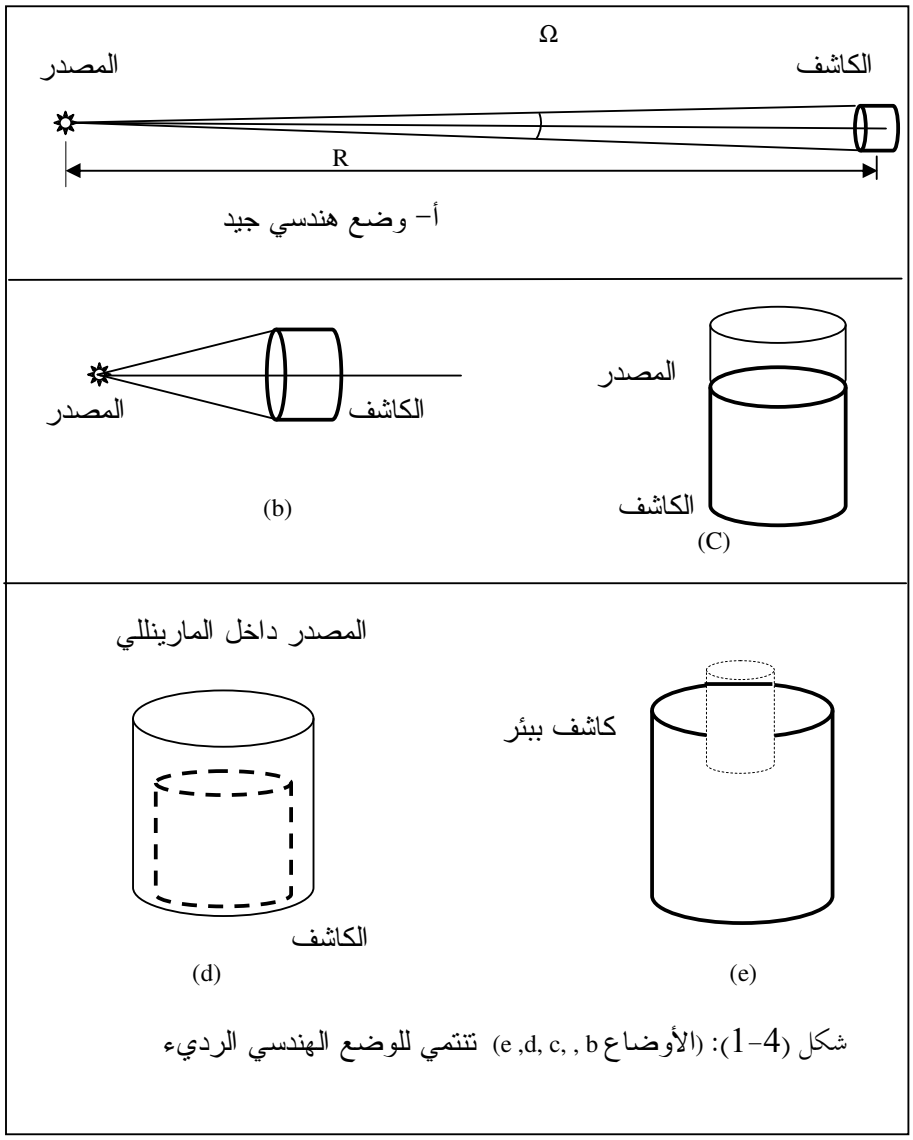
$$\Omega = \pi r^2 / 4\pi R^2 = r^2 / 4R^2$$

ولزيادة الإيضاح، نفرض أن لدينا مصدر كوبلت 60، نشاطه الإشعاعي 2 ميكروكيوري (أي يصدر 74000 جسيم بيتا/ثانية، في جميع الاتجاهات، كما يصدر 74000 فوتون جاما/ثانية بطاقة 1173 ك إ ف، وكذلك يصدر 7400 فوتون جاما/ثانية، بطاقة أخرى مقدارها 1332 ك إ ف)، ونفرض أن هذا المصدر موضوع على مسافة 50 سم

من كاشف دائري المقطع الحساس ونصف قطر هذا المقطع 2 سم. بذلك تكون الزاوية المجسمة التي يرى بها المصدر الكاشف هي:

$$\Omega = \pi \times (2)^2 / 4 \times \pi \times (50)^2 = 4 \times 10^{-4}$$

ومقدار هذه الراوية يعني أنه كلما خرج من المصدر 10000 جسيم أو فوتون فإنه يسقط من هذا العدد 4 جسيمات فقط على الكاشف. بذلك، فإن عدد جسيمات بيتا أو عدد فوتونات جاما N (لكل نوع من قيمتي الطاقة) التي تصل من المصدر المذكور في هذا الوضع الهندسي للكاشف في الثانية، يسهل



شكل (4-1): (الأوضاع e ,d, c, , b) تنتمي للوضع الهندسي الرديء

تحديده بضرب عدد الجسيمات أو الفوتونات المنبعثة من المصدر في الثانية في عنصر الزاوية المجسمة Ω . أي أن عدد جسيمات بيتا أو فوتونات جاما N من أي من النوعين، التي تصل الكاشف من المصدر في الثانية، بفرض إهمال الامتصاص في الهواء هو:

$$N = 74000 \times 4 \times 10^{-4} = 29.6 \text{ particles or photons}$$

هناك عامل آخر يلعب دورا هاما في قياس النشاط الإشعاعي لمصدر ما من مصادر جاما. فعند تفكك مصدر ما كالسيزيوم137، على سبيل المثال، الذي يتفكك من خلال تفكك بيتا للباريوم137 المثار، فإن هذا الباريوم المثار يتكون في الحالة المثارة الأولى في 85 % من حالات التفكك فقط. والتاليى فإن عدد فوتونات جاما الصادرة من هذا الباريوم تمثل 85 % من عدد تفككات بيتا. ويطلق على النسبة 85 % (أو الكسر 0.85) اسم المعامل **f** ، وهو يبين نسبة عدد فوتونات جاما المنطلقة بطاقة معينة لكل 100 تفكك من تفككات النظير الأم. ويطلق على هذا المعامل في بعض المراجع مصطلح نسبة التفرع أو الوفرة، وكلاهما تسميتان خاطئتان نظرا لكونهما يعبران عن مفاهيم فيزيائية مختلفة تماما عن مفهوم المعامل **f**.

ويمكن إيضاح مفهوم المعامل **f**، في مثال كالآتي: إذا علمت أن المعامل (أو الكسر) للفوتونات ذات الطاقة 662 (ك إ ف)، المنطلقة عن تفكك السيزيزم137 للباريوم137 هو ، وكان لديك مصدر من السيزيوم نشاطه الإشعاعي ا ميكرو كيوري، ما هو عدد فوتونات جاما بالطاقة المذكورة، المنطلقة من هذا المصدر في الثانية. ويكون عدد هذه الفوتونات N هو:

$$N = f A = 0.85 \times 37000 = 31450 \quad \text{photons}$$

وبفرض أن هذا المصدر موجود، بالنسبة للكاشف، في الوضع الهندسي نفسه المحدد في الفقرة السابقة (أي على مسافة 50 سم من الكاشف الذي يبلغ نصف قطر سطحه الحساس 2 سم)، يكون عدد فوتونات جاما بطاقة 662 (ك إ ف)، التي تصل الكاشف من المصدر هو:

$N = \Omega\ f\ A = 4 \times 10^{-4} \times 0.85 \times 37000 = 12.58$ photons

4-4 الكفاءة الذاتية للكاشف:

تجدر الإشارة إلى أن كفاءة الكاشف المستخدم لقياس جسيمات ألفا تساوي 100 %، أي أن يسجل جميع جسيمات ألفا التي تستطيع الدخول داخله. وبالنسبة لكواشف بيتا، فقد تتراوح كفاءة الكاشف بين أقل من 75 وحتى أكثر من95 % بسبب امتصاص بعض هذه الجسيمات ضعيفة الطاقة في الهواء بين المصدر والكاشف وفي نافذة الكاشف نفسه.

أما بالنسبة للإشعاعات غير مباشرة التأيين (وهي النيوترونات وإشعاعات جاما والأشعة السينية)، فإنها نظرا لقدرتها العالية على اختراق مادة الكاشف دون أن تتفاعل معها، وبالتالي، دون أن تفقد أي جزء من طاقتها، فإن نسبة من هذه الإشعاعات أو الجسيمات الساقطة على الكاشف هي التي تسجل فيه، بينما تمر النسبة الأخرى دون تفاعل وبكامل بطاقتها. لذلك وجب تعريف الكفاءة الذاتية للكاشف.

وتعرف الكفاءة الذاتية للكاشف ε للإشعاعات غير مباشرة التأيين على أنها نسبة عدد الفوتونات (أو النيوترونات) التي يسجلها الكاشف في فترة زمنية محددة (أو في الثانية) إلى عدد الفوتونات (أو النيوترونات) التي تسقط على سطحه الحساس في الفترة نفسها (أو في الثانية)، أي أن:

$$\varepsilon = \frac{\text{number of photons detected in the detector per second}}{\text{number of photons impinging on the detector per second}}$$

وبالنسبة لكواشف الفوتونات هناك ثلاث كفاءات ذاتية متنوعة هي الكفاءة الذاتية للظاهرة الكهرضوئية ε_{ph} والكفاءة الذاتية لتشتت كمبتون ε_c ، والكفاءة الذاتية للقمة الكاملة ε_f\. وجميع هذه الكفاءات الذاتية الثلاثة تعتمد على طاقة الفوتونات اعتمادا شديدا وعلى أبعاد الكاشف المستخدم،

وحتى على طبيعة المصدر ذاته ووضعه بالنسبة للكاشف. لذلك، فإن مقدار أي من الكفاءات الذاتية الذي يحدد عند طاقة معينة لا يصلح للطاقات الأخرى ولا لكواشف بأبعاد أخرى أو من نوع آخر، ولا لأوضاع أخرى.

4-5 العلاقة بين معدل العد c والنشاط الإشعاعي A للمصدر:

معدل العد C لأي نظام للعد الإشعاعي هو عبارة عن عدد الفوتونات أو الجسيمات التي يسجلها هذا النظام في الثانية. وباستخدام تعريف الكفاءة الذاتية السابق، وحيث أن بسط الطرف الأيمن من المعادلة يمثل معدل العد، والمقام يمثل المقدار $\Omega\ f\ A$ الذي يمثل عدد الفوتونات أو الجسيمات التي تصل السطح الحساس للكاشف في الثانية، تكون العلاقة بين معدل العد C والنشاط الإشعاعي A بالبكرل للمصدر هي:

$$C = \varepsilon\ \Omega\ f\ A$$

ولا تستخدم هذه العلاقة الأخيرة إلا في الأوضاع الهندسية الجيدة حيث يسهل حساب مقدار عنصر الزاوية المجسمة بدقة، أما بالنسبة للأوضاع الهندسية الرديئة فإن هذه العلاقة غير صالحة للتطبيق، بسبب عدم الدقة الكبير في حساب عنصر الزاوية المجسمة Ω ، وكذلك في قيمة الكفاءة الذاتية ε للكاشف المستخدم في الوضع الهندسي الرديء. لهذا السبب تستخدم علاقة للوضع الهندسي الرديء التي تأخذ في الحسبان حاصل ضرب كل من عنصر الزاوية المجسمة Ω والكفاءة الذاتية ε في الوضع الرديء، ويطلق على حاصل الضرب هذا اسم الكفاءة الشاملة للكاشف في الوضع الهندسي المحدد، ويرمز لها بالرمز η . وتكون صورة العلاقة الجديدة بين معدل العد والنشاط الإشعاعي للمصدر في الوضع الهندسي الرديء هي:

$$C = \eta\ f\ A$$

وعند استخدام هذه العلاقة الأخيرة بين معدل العد والنشاط الإشعاعي، يجب أن تعين الكفاءة الشاملة η للوضع المستخدم ذاته، بطريقة تجريبية باستخدام مصادر معيارية تتضمن عددا من القمم

الكهرضوئية بطاقات تغطي مدى الطاقات المطلوبة بخطوات صغيرة. وعند الحاجة لتعيين أي نشاط إشعاعي لمصدر مجهول باستخدام الكفاءة المحددة تجريبيا، يجب أن يكون المصدر المجهول بالحجم نفسه والشكل نفسه، وفي ذات الوضع الهندسي للمصدر المعياري المستخدم لمعايرة الكفاءة.

4-6 العوامل المؤثرة على دقة القياسات الإشعاعية:

هناك عوامل كثيرة، قد تؤدي إلى عدم دقة النتائج المتحصلة في القياسات الإشعاعية المطلقة والنسبية. ومن بين هذه العوامل طبيعة وشكل المصدر المشع ذاته الخاضع للقياس، ونوع الإشعاعات أو الجسيمات المنبعثة منه، ونوع الوسط الموجود بين المصدر والكاشف، والكاشف المستخدم ذاته، والمعدات والمواد المحيطة بكل من المصدر والكاشف، حتى بعيدا عن مسار حزمة الأشعة بين المصدر والكاشف.

4-6-1 تأثيرات المصدر ذاته:

من العوامل المؤثرة في دقة القياس الامتصاص الداخلي لنسبة من الجسيمات أو الإشعاعات المنبعثة من المصدر في ذات هذا المصدر. فحجم المصدر وأسلوب تحضيره للنوع المعين من الجسيمات أو الفوتونات المطلوب قياسها تؤثر على دقة النتائج المتحصلة. فقد يكون المصدر في صورة جسم صلب ممتد الحجم نسبيا، أو طبقة رقيقة مرسبة على قرص فلزي أو غيرهما، مما يمثل فرقا جوهريا في نسبة الجسيمات أو الإشعاعات الممتصة فيه. وبالنسبة لقياسات إشعاعات جاما خاصة متوسطة وعالية الطاقة، وكذلك بالنسبة للنيوترونات، فإن تأثير سماكة طبقة المصدر محدود نسبيا، بينما يكون هذا التأثير كبيرا جدا بالنسبة للجسيمات المشحونة، خاصة جسيمات ألفا. وفي جميع الحالات، يجب أن يؤخذ **معامل الامتصاص الذاتي (Self absorption factor f_a)** للمصدر ذاته في الحسبان، حيث أنه يمكن أن يتخذ قيما أقل من الواحد الصحيح، وبالتالي، يخفض مقدار النشاط الإشعاعي المقيس للمصدر عن مقداره الحقيقي. لهذا الغرض، يجب أن تكون مصادر الجسيمات

المشحونة، خاصة جسيمات ألفا رقيقة جدا (بحيث لا تتجاوز عددا قليلا من الميكروجرام/سم^2).

ومن التأثيرات الهامة الأخرى التي تعزى للمصدر عملية **التشتت الخلفي على دعامة المصدر**. فبالنسبة لجميع مصادر الجسيمات المشحونة، يتم دائما تحضير المصدر في صورة طبقة رقيقة مرسبة على دعامة أو شريحة أو قرص فلزي. ويمكن أن تؤدي هذه الدعامة إلى تشتت الجسيمات المشحونة وارتدادها للخلف، خاصة جسيمات بيتا. ففي هذه العملية، فإن بعض الجسيمات المتجهة من طبقة المصدر نحو الدعامة يمكن أن ترتد أي تنعكس للخلف (بزاوية قريبة من 180 درجة)، فتصل للكاشف وتسجل فيه، في حين أن اتجاه انطلاقها الأصلي كان بعيدا عن الكاشف. ويعتمد **معامل الارتداد الخلفي (backscattering factor f_b)** اعتمادا شديدا على ثلاثة عوامل هي: العدد الذري Z لمادة الدعامة، وسماكتها X ، وطاقة الجسيمات E. وفي جميع الحالات يزيد معامل الارتداد الخلفي f_b بزيادة أي منها بمعدل سريع. لهذا السبب، يجب أن تصنع دعامة المصدر، خاصة بالنسبة لمصادر جسيمات بيتا، من مادة منخفضة العدد الذري، وأن تكون سماكتها صغيرة بقدر المستطاع، حيث أن الارتداد الخلفي يمكن أن يزيد النتيجة بمقدار يصل إلى 80 % من قيمتها الحقيقية، ما لم تؤخذ العوامل المذكورة في الحسبان.

4-6-2 تأثيرات الوسط بين المصدر والكاشف:

في بعض الأحيان يلعب الوسط المادي الموجود بين المصدر والكاشف دورا ملموسا في دقة النتائج التجريبية. فعادة، يكون هذا الوسط هو الهواء الذي يتميز بكثافة منخفضة. بذلك، يكون دور الوسط مهملا حال قياس أشعة جاما والنيوترونات. أما في حالة الجسيمات المشحونة، فإن جميع هذه الجسيمات سوف تعاني فقدا في طاقاتها، وقد يمتص بعضها بالكامل خاصة الجسيمات منخفضة الطاقة، كما يمكن أن يتشتت بعض آخر منها على الهواء. ولتحاشي جميع هذه التأثيرات يجب تنفيذ قياسات الجسيمات المشحونة، خاصة جسيمات ألفا، في غرف مفرغة من الهواء.

ولاستعراض تأثير الوسط بين المصدر والكاشف، يجب أن نتذكر أن جسيمات ألفا بطاقة 5 (م إ ف) تفقد طاقتها بالكامل في طبقة من الهواء الجوي لا تتجاوز سماكتها 4 سم، كما أن جسيمات بيتا بطاقة حوالي 1 (م إ ف) تفقد كل طاقتها وتمتص تدريجيا، بحيث يتم امتصاصها بالكامل في طبقة من الهواء تبلغ حوالي 5 م.

4-6-3 تأثيرات الكاشف:

في غالبية القياسات الإشعاعية يكون المصدر موجودا خارج الكاشف، ويجب أن تخترق الإشعاعات أو الجسيمات جدار الكاشف حتى تسجل فيه. ويمكن أن تتفاعل بعض الجسيمات أو الفوتونات الساقطة على نافذة الكاشف، فتمتص أو تتشتت على مادة هذه النافذة، خاصة بالنسبة للجسيمات المشحونة والفوتونات منخفضة الطاقة. وسوف تؤدي هذه التفاعلات إلى خفض الكميات المقيسة من هذه الجسيمات أو الفوتونات عن المقدار الحقيقي لها.

4-7 تصحيح الزمن الميت:

يعرف الزمن الميت للكاشف على أنه الفترة الزمنية الصغرى بين وصول جسيمين متتابعين للكاشف بحيث يسجلان كحدثين منفصلين فيه. والأكثر أهمية من الزمن الميت للكاشف هو الزمن الميت الكلي لكل من الكاشف ونظام التسجيل المستخدم معه، والمتكون عادة من المكبر الأولي preamplifier والمكبر amplifier والمحول التماثلي الرقمي (Analogue to Digital Converter ADC)، والمحلل متعدد القنوات (Multi-Channel Analyzer MCA). ويجب أن يؤخذ الزمن الميت الكلي τ للنظام الكامل للعد في الحسبان.

ويؤدي الزمن الميت الكلي إلى خفض عدد النبضات المقيسة عمليا عن عددها الحقيقي، بنسبة تعتمد على معد العد المقيس. بل قد يؤدي هذا إلى توقف النظام تماما عن العمل عند معدلات العد المرتفعة، أو بمعنى أدق عندما تكون الفواصل الزمنية المتوسطة بين الجسيمات المتتابعة المسجلة في الكاشف أقل من الزمن الميت للنظام. لذلك فإنه

يجب، دائما، عمل تصحيح لمعدلات العد المقيسة للحصول على معدلات العد الحقيقية، بدلالة الزمن الميت للنظام المستخدم.

فإذا كان الزمن الميت للنظام المستخدم هو τ ثانية (أي أن النظام يبقى ميتا منذ لحظة بدء تسجيل النبضة السابقة لمدة τ ثانية)، وكان معدل العد المقيس عمليا هو C_m نبضة/ثانية، يكون النظام ميتا خلال هذه الثانية الواحدة لفترة يقدر امتدادها بالمقدار τC_m ثانية. فإذا كان حاصل الضرب τCm أكبر من 1 ثانية، فإن هذا يعني أن النظام سوف يتوقف عن العمل تماما، لأن إجمالي الزمن الميت في الثانية الواحدة أكبر من ثانية. أما إذا كان حاصل الضرب τC_m أقل من 1 صحيح فإنه يتم حساب معدل العد الفعلي C_{real} (نبضة/ثانية) بالعلاقة:

$$C_{real} = C_m / (1 - C_m \tau)$$

ولإيضاح دور الزمن الميت، نفرض أن هذا الزمن لنظام تسجيل هو 400 ميكروثانية، وأن معدل العد المقيس كان 30000 نبضة/دقيقة، عندئذ، يكون الزمن الميت الكلي في ثانية واحدة هو:

$$400 \times 10^{-6} \times (30000/60) = 0.2 \text{ sec}$$

وهذا يعني أن الزمن الميت للنظام كان 0.2 ثانية في الثانية، أي ما يمثل 20 % من الزمن الفعلي لتشغيل النظام في هذه الظروف، وأن الزمن الحي يمثل 80 % من الزمن الفعلي (سواء في ثانية أو في دقيقة). وبالتالي، يكون معدل العد الحقيقي هو:

8-4 التراوحات الإحصائية في القياسات الإشعاعية:

تنتمي عملية التفكك الإشعاعي إلى ما يعرف بالعمليات العشوائية، حيث أنه لا يمكن أن يتوقع أحد متى تتفكك نواة وحيدة. وتنعكس هذه العملية، بصفة واقعية، عند سماع أصوات النبضات المسجلة من عداد للإشعاع مزود بجهاز صوتي وموضوع في مجال إشعاعي منخفض نسبيا، حيث يلاحظ وجود فواصل زمنية شديدة التباين بين النبضات المتعاقبة. وتخضع جميع عمليات العد الإشعاعي للطبيعة العشوائية، ويتم وصفها بدقة بدلالة العلاقات الإحصائية والتوزعات الخاضعة لقوانينها.

وبالتالي، فإن جميع القياسات الإشعاعية تتضمن أخطاءً يطلق عليها الأخطاء الإحصائية، فضلا عن الأخطاء الأخرى المعروفة بالأخطاء النظامية. ومن التوزعات في قراءات الكميات التي تخضع للطبيعة العشوائية، ذلك التوزع المعروف باسم توزع غاوس (Gaussian distribution).

ووفقا لتوزع غاوس فإن الخطأ المعياري الإحصائي في قيمة متوسطة $\bar{n}$ لكمية تخضع للطبيعة العشوائية، خضعت لعدد N من القياسات وأعطت مجموعة متراوحة من القراءات n_i، يحدد بما يعرف باسم الانحراف المعياري (σ The standard deviation) للتوزع. ويعرف هذا الانحراف رياضيا كالآتي:

$$\sigma = [(1/N) \sum (n_i - \bar{n})^2]^{1/2}$$

ومن الناحية العملية يتم قياس الكمية الفيزيائية المعينة لمرة واحدة في كثير من الأحيان، وليس لعدة مرات. في هذه الحالة فإنه إذا كان عدد الأحداث المقيسة (عدد النبضات مثلا) هو m ، يكون الانحراف المعياري σ في هذا المقدار هو:

$$\sigma = (m)^{1/2}$$

بذلك، يسجل مقدار الكمية المقيسة في الصورة:

$$m \pm \sigma = m \pm (m)^{1/2}.$$

ويحسب الخطأ النسبي E % لهذا الانحراف المعياري بالعلاقة:

$$E\ \% = (\sigma / m) \times 100 = 100 / (m)^{1/2}\ \%$$

ومن هذه العلاقة يتبين أن القيمة المطلقة للانحراف المعياري تزيد بزياد مقدار القراءة، إلا أن الخطأ النسبي في هذه القراءة يقل بزيادة مقدار القراءة. ويعكس جدول (4- 1) الذي يبين كلا من الانحراف المعياري والخطأ النسبي لثلاثة مستويات ثقة هذه الحقيقة.

وللتعرف على مفهوم مستويات الثقة الأول والثاني والثالث، فإنه عند تكرار القياس ألف مرة للكمية الخاضعة للقياس نفسها، في الظروف ذاتها،

جدول (4-1)

مقدار القراءة	الانحراف المعياري σ	الخطأ النسبي % لمستويات الثقة		
		1 σ	2σ	3σ
1	1	100	200	300
4	2	50	100	150
16	4	25	50	75
25	5	20	40	60
100	10	10	20	30
400	20	5	15	20
1000	31.6	3.16	6.32	9.48
10000	100	1	2	3
100000	316	0.316	0.632	0.948

جدول (4-2)

مدى النتائج العملية في الألف قراءة	عدد مرات تكرار القراءات ضمن المدى
380 - 420 أي ما يقابل $(m \pm \sigma)$	680
360 – 380 أي بين $(m-\sigma)$ ، $(m-2\sigma)$	136
420 -440 أي بين $(m+\sigma)$ ، $(m+2\sigma)$	136
340- 360 أي بين $(m-2\sigma)$ ، $(m-3\sigma)$	23
440- 460 أي بين $(m+3\sigma)$، $(m+2\sigma)$]	23
أقل من 340	1
أكثر من 460	1
يتضمن مستوى الثقة المنخفض جميع القراءات الأعلى من $(m-1\sigma)$، أي الأعلى من 380، أو الأدنى من $(m+1\sigma)$، أي من 420. وجميع هذه القراءات هي 680 + 136 + 23 + 1 = 840 وهو ما يمثل 84 %، أو مستوى الثقة الأدنى.	

يتضمن مستوى الثقة المتوسط القراءات الأعلى من (m-2σ)، أي الأعلى من 360، أو الأدنى من (m+2σ)، أي من 440. وهذه القراءات هي 680 + 136 + 136+ 23 + 1 = 976 وهو ما يمثل 97.6 %، أو مستوى الثقة المتوسط.
يتضمن مستوى الثقة المرتفع القراءات الأعلى من (m-3σ)، أي الأعلى من 340، أو الأدنى من (m+3σ)، أي من 460. وهذه القراءات هي 680 + 136 + 136+ 23 + 23 + 1 = 999 وهو ما يمثل 99.9 %، أو مستوى الثقة المرتفع.

وللمدة الزمنية نفسها، مع استخدام عينة تتميز بالعمر النصفي الطويل كاليورانيوم 238 مثلا، لضمان بقاء النشاط الإشعاعي ثابتا على مدى فترة القياس الكلية، تكون نتائج القراءات الألف وفقا لقوانين الفيزياء الإحصائية وتراوحاتها موزعة كالمبين في جدول (4-2).

4-8-1 الانحراف المعياري في معدل العد:

إن عدد الأحداث (النبضات) المسجلة من مصدر ما، إما أن تسجل بواسطة معداد ليعطي عددا شاملا مقداره G نبضة خلال زمن القياس t_g المحدد، أو في قمة من قمم الطيف في المحلل متعدد القنوات (MCA). إلا أن النتيجة التي تستخدم عادة هي معدل العد الشامل في المعداد أو في القمة الكهرضوئية C_g، أي العدد المسجل في وحدة الزمن (وهي الثانية في النظام المعياري العالمي)، ويحسب هذا المعدل الشامل كالآتي:

$$C_g = (G / t_g)$$

وفي بعض الأحيان، خاصة في قياسات إشعاعات جاما والأشعة السينية، تكون هناك خلفية إشعاعية من هذه الإشعاعات، قد يساوي أو يزيد معدلها على معدل الإشعاعات الواصلة للكاشف من المصدر، الأمر الذي يمكن أن يولد خطأ كبيرا. لذلك، يجب أن يقاس عدد الإشعاعات المسجلة من الخلفية بمفردها B في غياب المصدر، وأن يحسب معدلها في مكان الكاشف، خلال فترة زمنية t_b طويلة جدا، لخفض التراوحات الإحصائية، وأن يطرح معدل الخلفية C_b من معدل العد الشامل C_g

للمصدر والخلفية، للحصول على معدل العد الصافي من المصدر فقط. ويحسب معدل العد من الخلفية بالعلاقة:

$$C_b = (B / t_b)$$

بذلك، يحسب معد العد الصافي C_{net} من المصدر بالعلاقة:

$$C_{net} = C_g - C_b = (G / t_g) - (B / t_b)$$

أما الانحراف المعياري σ في معدل العد الصافي C_{net} فيحسب من العلاقة:

$$\sigma_{net} = [G /(t_g)^2 + B /(t_b)^2]^{/2} \qquad (4\text{-}9)$$

الـبـاب الخـامــس

وحدات قياس الجرعات الإشعاعية
Units of radiation dosimetry

5- 1 مقدمة

عند سقوط كمية من الإشعاعات الضوئية أو الحرارية على مادة ما، تنتقل طاقة هذه الإشعاعات إلى المادة فتزداد درجة حرارتها. أما بالنسبة للكائنات الحية فلا ترتفع درجة الحرارة لقيام جسم الكائن بفقد هذه الطاقة عن طريق تبخير الماء من الجسم فتبقى حرارته ثابتة. ومع ذلك يحس الإنسان بالإشعاعات الضوئية والحرارية فيمكنه تفاديها بالابتعاد عن مصادرها.

أما بالنسبة للإشعاعات المؤينة فلا تحس بها الكائنات الحية لأنها غير مرئية ولا تسبب ارتفاعا مباشرا لدرجة الحرارة، ونظراً لقدرتها العالية على اختراق الجسم، ولأنها تفقد طاقتها عن طريق تأيين جزيئات الماء الموجودة في الجسم وليس في التسخين. فلو تعرض جسم الإنسان لكمية من الإشعاعات المؤينة فإنه لا يحس بها في حينه مهما زادت كميتها. لذا، فإنه لوقاية الكائنات الحية من هذه الإشعاعات، يجب الكشف عن وجودها وتحديد كمياتها في أماكن وجود تلك الكائنات . وهناك وحدات خاصة بقياس كمية الإشعاعات والجرعات الإشعاعية، ويختص هذا الباب بالتعرف على هذه الوحدات.

5-2 معدل سيولة الجسيمات (الفوتونات) ϕ The particle fluence rate

يعرف معدل سيولة الجسيمات (أو الفوتونات) ϕ ، عند نقطة معينة، على أنه عبارة عن عدد الجسيمات (الفوتونات) التي تسقط على وحدة المساحة في الثانية الواحدة، عند هذه النقطة. فإذا كان عدد

الجسيمات التي تسقط خلال t ثانية على مساحة مقدارها a متراً مربعاً هو N يكون معدل سيولة هذه الجسيمات هو:

$$\phi = N / a. t$$

ويقاس معدل سيولة الجسيمات في النظام المعياري العالمي بوحدة (جسيم/متر مربع. ثانية)، وتجدر الإشارة إلى أن مصطلح معدل سيولة الجسيمات يستخدم في بعض المراجع الأخرى ، خاصة القديمة منها، باسم آخر هو "كثافة تدفق الجسيمات "particle flux density".

ويسهل حساب معدل سيولة الجسيمات (أو كثافة تدفق الجسيمات) ϕ لمصدر مشع، على شكل نقطة مادية صغيرة نشاطه الإشعاعي S ، ويصدر S جسيم في الثانية، عند نقطة تبعد مسافة R متر من المصدر، وذلك بقسمة S على مساحة سطح الكرة التي يوجد المصدر في مركزها والنقطة المطلوبة على سطحها، أي أن:

$$\phi = S / 4 \pi R^2$$

وهنا ينبغي التنويه، إلى أن النشاط الإشعاعي لمصدر ما قد يكون S بكرل إلا أنه لا يصدر نفس العدد S من الجسيمات. فعلى سبيل المثال عندما يتفكك الكوبلت 60 إلى النيكل 60 مصدرا جسيم بيتا ينطلق جسيم بيتا لكل تفكك. بعد ذلك ينطلق من النيكل 60 فوتونان أحدهما بطاقة 1.173 م.إ.ف والآخر بطاقة 1.332 م.إ.ف، وذلك لكل تفكك. بذلك، يقال أن المعامل f لخطي جاما المنطلقين عن النيكل = 1 . والمعامل f هو المعامل الذي يحدد نسبة عدد فوتونات جاما ذات الطاقة المعينة المنطلقة لكل 100 بكرل من المصدر الأصلي. ولزيادة الإيضاح ينبغي التنويه إلى أن المعامل f بالنسبة لفوتونات جاما التي تنطلق بطاقة 662 ك. إ.ف من الباريوم 137 هو 0.85 وهذا يعني أنه عندما يتفكك السيزيوم 137 إلى الباريوم 137 فإن كل 100 تفكك تصدر 95 جسيم بيتا، ويتكون الباريوم الذي لا يصدر عنه سوى 85 فوتون جاما لكل 100 تفكك من السيزيوم.

وهكذا، فإنه إذا كان المصدر من النوع الذي يشع أنواعاً مختلفة من الإشعاعات، أو إشعاعات من نفس النوع ولكن بطاقات مختلفة فإنه يجب تعيين معدل سيولة الجسيمات (كثافة تدفق الجسيمات) لكل نوع أو لكل طاقة. ويكون معدل السيولة الإجمالي للجسيمات هو حاصل جمع جميع هذه المعدلات، ولتبيان ذلك نضرب المثال التالي: بفرض أنه يوجد لديك مصدر نقطي صغير من السيزيوم 137 نشاطه الإشعاعي 37000 بكرل (أي 1 ميكرو كورى). ما هو معدل سيولة الجسيمات والفوتونات من هذا المصدر على مسافة 50 سم منه. وبتطبيق العلاقة السابقة الخاصة بمعدل سيولة الجسيمات يكون هذا المعدل بالنسبة لجسيمات بيتا هو:

$$\phi(\beta) = S\ f\ /\ 4\pi R^2$$
$$= 37000 / 4 \times 3.14 \times (0.5)^2$$
$$= 11186 \quad \text{particles} / m^2 . \text{sec}$$

أما معدل السيولة لفوتونات جاما فإنه يحسب بنفس الأسلوب، ولكن ينبغي أن يؤخذ المعامل f في الحسبان لتحديد عدد الفوتونات المنبعثة من المصدر في كل ثانية، وبالتالي يكون معدل سيولة الفوتونات هو:

$$\phi(\gamma) = S.\ f\ /\ 4\pi R^2$$
$$= 37000 \times 0.85 / 4 \times 3.14 \times (0.5)^2$$
$$= 10016 \quad \text{photons} / m^2 . \text{Sec}$$

3-5 معدل سيولة الطاقة φ The energy fluence rate

هي كمية الطاقة التي تسقط على وحدة المساحة مع الجسيمات (أو الفوتونات) في الثانية الواحدة. ويستخدم في بعض المراجع، خاصة القديمة، مصطلح آخر للتعبير عن هذه الكمية هو "كثافة تدفق الطاقة Energy flux density" . ووحدة قياس معدل سيولة الطاقة φ في النظام المعياري العالمي هي (واط/م2) أو (جول/ثانية. م^2).

ويمكن إيجاد معدل سيولة الطاقة φ بسهولة عند معرفة معدل سيولة الجسيمات (الفوتونات). فإذا كانت طاقة الجسيمات E ثابتة يحسب معدل

سيولة الطاقة φ لهذه الجسيمات من العلاقة:

$$\varphi = E \phi$$

أما عند اختلاف طاقة الجسيمات فينبغي حساب معدل سيولة الطاقة بتجميع جميع طاقات الجسيمات الساقطة على وحدة المساحات في الثانية.

وبذلك، يكون معدل سيولة الطاقة في المثال الوارد في البند السابق (2-5) بالنسبة للفوتونات التي تتميز بطاقة ثابتة مقدارها 0.662 م.إ.ف هو:

$$\begin{aligned} \varphi &= E \phi \\ &= 0.662 \times 10016 \\ &= 6631 \quad \text{MeV / m}^2 \text{ . sec} \\ &= 1.06 \times 10^{-9} \quad \text{watt/ m}^2 \end{aligned}$$

أما بالنسبة لمعدل سيولة الطاقة لجسيمات بيتا فإنه يصعب إيجاده بهذه الطريقة لتفاوت طاقات جسيمات بيتا، ولإيجاد معدل السيولة، عندئذ، فإنه يجب تجميع جميع طاقاتها. كما أنه يمكن إيجاد معدل السيولة لها عند معرفة القيمة المتوسطة لطاقة هذه الجسيمات E_{av} ، وذلك بنفس الأسلوب المتبع في المثال السابق.

4-5 التعرض x The exposure

يستخدم مصطلح التعرض في الوقاية من الإشعاع بمعنيين مختلفين. المعنى الأول ذو طابع عام ويقصد به التعرض للإشعاعات المؤينة، ومنه التعرض المهني والطبي وغيرهما. أما المعنى الآخر فهو يعبر عن كمية فيزيائية محددة. وبهذا المفهوم الأخير، فإن التعرض

تاريخياً هو "تعرض الهواء الجاف في الظروف المعيارية (أي عند الضغط ودرجة الحرارة المعيارية) لكمية من الأشعة السينية أو إشعاعات جاما منخفضة الطاقة (حتى 3 م.إ.ف).

ويقاس التعرض بكمية الشحنة الكهربائية (الموجبة أو السالبة) الناتجة

عن تأيين وحدة الحجوم من الهواء الجوي الجاف في الظروف المعيارية فإذا كانت الشحنة المتكونة في وحدة الحجوم هي Q كولوم وكتلة هذه الوحدة هي m كجم يكون التعرض هو:

$$X = Q / m \qquad \text{Coulomb / kg air}$$

الرنتجن (R) The Roentgen

الرنتجن هو وحدة قياس التعرض في النظام القديم، إلا أنه ما زال متداولاً حتى الآن حيث يستخدم للتعبير عن تعرض الهواء الجاف في الظروف المعيارية من الأشعة السينية وإسعاعات جاما منخفضة الطاقة. وقد عرف الرنتجن، تاريخياً، بأنه كمية الإشعاعات السينية التي تؤدي إلى إنتاج شحنة كهربائية (سالبة أو موجبة) مقدارها وحدة واحدة كهرساكنة (lesu) في ا سم ^{3} من الهواء الجاف عند الظروف المعيارية.

وعند التحول للنظام المعياري العالمي يتضح أن الرنتجن الواحد هو تعرض الهواء الجاف لكمية من الأشعة السنية أو إشعاعات جاما منخفضة الطاقة تؤدي إلى توليد شحنة كهربائية مقدارها **2.58×10^{-4}** كولوم في كجم واحد من هذا الهواء أي أن:

0

5-5 الجرعة الممتصة The absorbed dose

الجرعة الممتصة D هي خارج قسمة عنصر الطاقة ΔE ، المودعة من أي نوع من الإشعاعات المؤينة، سواء من الإشعاعات

مباشرة التأيين مثل جسيمات ألفا وبيتا، أو من الإشعاعات غير مباشرة التأيين مثل إشعاعات جاما والأشعة السينية والنيوترونات، في عنصر من المادة (أية مادة بما فيها الهواء) مقداره Δm ، أي أن:

$$D = \Delta E / \Delta m$$

وهكذا، يتضح أن مصطلح الجرعة الممتصة يستخدم لأي نوع من الإشعاعات عندما تودع طاقتها في أي نوع من الأجسام المادية، بما فيها جسم الإنسان . ووحدة قياس الجرعة الممتصة في النظام المعياري العالمي هي غراي "Gray – Gy" . والغراي الواحد يعني امتصاص طاقة من الإشعاعات مقدارها 1 جول في كل 1 كجم من المادة.

وكانت الوحدة القديمة لقياس الجرعة الممتصة هي "راد radiation absorbed dose rad" . والراد الواحد هو امتصاص طاقة مقدارها **100** إرج في كل **1** جم من المادة. وعند التحويل من نظام سم. جرام. ثانية إلى النظام المعياري العالمي يتضح أن الجراي (Gy) أكبر من الراد بمائة مرة،

أي أن: 1 جراي = 100 راد

ويعرف معدل الجرعة الممتصة D_o على أنه الجرعة الممتصة في وحدة الزمن، أي أنه يساوي حاصل قسمة الجرعة الممتصة D على الزمن t الذي تم خلاله امتصاص الجرعة، أي أن:

$$D_o = D / t$$

ورغم أن الثانية هي وحدة قياس الزمن في النظام المعياري العالمي إلا أنه يفضل للأغراض العملية احتساب الزمن بالساعة. لذلك، يقاس معدل الجرعة عادة بوحدة غراي/ساعة في النظام المعياري ، أو راد/ساعة في النظام القديم.

6-5 الكيرما The Kerma

يستخدم مصطلح الكيرما للتعبير عن انتقال الطاقة من الجسيمات أو الإشعاعات المؤينة تأييناً غير مباشر، مثل النيوترونات وإشعاعات جاما والأشعة السينية، إلى المادة، وبالنسبة للنيوترونات وإشعاعات جاما والأشعة السينية تنتقل طاقة هذه الجسيمات أو الإشعاعات إلى النواة، أو إلى الإلكترونات في عمليات تفاعل جاما مع المادة في صورة طاقة حركية، فإذا كانت الطاقة الحركية المنتقلة إلى نوى أو إلكترونات المادة هي ΔE_{tr} في كتلة مقدارها Δm ، تكون الكيرما K هي:

$$K = \Delta E_{tr} / \Delta m$$

وبالتالي، تكون وحدات قياس الكيرما هي نفس وحدات قياس الجرعة الممتصة. ويعرف معدل الكيرما K بدلالة معدل سيولة النيوترونات أو فوتونات جاما والمعامل الكتلي لانتقال الطاقة (μ_{tr} / ρ) ، حيث μ_{tr} المعامل الخطي لانتقال الطاقة، ρ هي كثافة المادة التي تنتقل إليها هذه الطاقة. كذلك، تجدر الإشارة إلى أن المعامل الخطي لانتقال الطاقة μ_{tr} يختلف أحياناً في مقداره عن المعامل الخطي للتوهين μ . فمعامل التوهين يعني معامل لحساب تناقص عدد الجسيمات أو الفوتونات دون النظر لانتقال طاقتها. أما معامل انتقال الطاقة μ_{tr} فهو معامل لحساب تناقص طاقة الجسيمات الساقطة وليس عددها فقط. وعلى هذا الأساس فإن معدل الكيرما K هو:

$$K = \phi (\mu_{tr} / p)$$

7-5 السيما C The Cema

يستخدم مصطلح السيما للتعبير عن الجرعة الممتصة من الجسيمات مباشرة التأيين مثل جسيمات ألفا وبيتا. وتعرف السيما على أنها خارج قسمة كمية الطاقة ΔE_c المنتقلة من الجسيمات المشحونة الساقطة إلى المادة على كتلة هذه المادة Δm ، أي أن:

$$C = \Delta E_c / \Delta m$$

وتقاس السيما بنفس وحدات قياس الجرعة الممتصة.

8-5 التكافؤ بين الرنتجن والراد

لقد تبين أن تعرضا مقداره **1** رنتجن للهواء يكافئ انتقال طاقة للهواء تعادل 87 إرجا لكل جرام. وعند تعرض جسم الإنسان بدلاً من الهواء تبين أن تعرضاً للهواء مقداره 1 رنتجن يولد في جسم الإنسان 96 إرجا لكل جرام من جسم الإنسان.

ولما كان الراد الواحد يساوي 100 إرج لكل جرام فإنه يتضح أن:

1 رنتجن في الهواء يكافئ **0.87** راد أي **0.0087** غراي
1 رنتجن للإنسان يكافئ **0.96** راد أي **0.0096** غراي

ولغرض التقريب فقد جرى العرف على اعتبار أن:

1 رنتجن يكافئ **1** راد للإنسان **= 0.01** غراي

9-5 العامل المرجح للإشعاع W_R The radiation weighting factor

في نشرتها رقم 60 لعام **1991** استخدمت اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية مصطلحاً بديلاً لمصطلح عامل النوعية الذي كان مستخدماً قبل ذلك، لأسباب محددة منها تحديد الضرر الواقع على الإنسان بصورة أدق، والحساب الدقيق للجرعة المتوسطة المودعة في العضو أو النسيج البشري، وليس في نقطة معينة.

فمن المعروف أنه عند تساوي الجرعة الممتصة في نسيج أو عضو معين من الجسم يختلف الضرر الواقع على هذا النسيج أو العضو اختلافاً شديداً باختلاف نوع الإشعاعات التي انتقلت منها الطاقة. فعلى سبيل المثال تبين أن الضرر الذي يقع في عضو بشري معين من جرعة ممتصة محددة من النيوترونات السريعة يزيد على الضرر الواقع في نفس العضو وعن نفس مقدار الجرعة الممتصة من إشعاعات جاما

بحوالي عشرين ضعفاً. ولحساب الضرر الواقع استخدم لفترة طويلة مصطلح أطلق عليه معامل النوعية لاحتساب الضرر عن النوع المعين من الإشعاعات، وبعد أن تبين علمياً عدم دقة هذا المعامل وعدم تعبيره على الواقع استخدم المصطلح الجديد وهو عامل الإشعاع المرجح الذي اختلف لحد ما من حيث المفهوم والمقدار عن عامل النوعية. ويبين جدول (4-1) قيم العاملات المرجحة لبعض أنواع الإشعاعات المؤينة .

جدول (5-1) : العامل المرجح لبعض أنواع الإشعاع

نوع الإشعاعات	مدى الطاقة	مقدار العامل المرجح W_R
فوتونات	سينية وجاما بطاقات مختلفة	1
جسيمات بيتا وميونات	جميع الطاقات	1
نيوترونات	أقل من 10 ك.إ.ف من 10 حتى 100 ك.إ.ف من 100 ك.إ.ف حتى 2 م.إ.ف من 2 م.إ.ف حتى 20 م.إ.ف أعلى من 20 م.إ.ف	5 10 20 10 5
بروتونات ، جسيمات ألفا ونواتج انشطار ونوى خفيفة	أكبر من 2 م أ ف	20

5-10 لجرعة المكافئة H_{TR} لعضو أو نسيج

The equivalent dose in tissue

تعرف الجرعة المكافئة H_{TR} في عضو أو نسيج T من نوع معين من الإشعاعات R بأنها حاصل ضرب الجرعة الممتصة D_{TR} في هذا العضو أو النسيج من النوع المعين من الإشعاعات R في عامل الإشعاع المرجح لهذا النوع من الإشعاعات، أي أن:

$$H_{TR} = D_{TR} * W_R$$

وعندما يتكون المجال الإشعاعي من أنواع مختلفة من الإشعاعات أو من نيوترونات بطاقات مختلفة تصبح الجرعة المكافئة الكلية في هذا العضو من كافة أنواع الإشعاعات أو الطاقات هي:

$$H_T = \sum_R D_{TR} * W_R$$

حيث يتم الجمع بالنسبة لأنواع الإشعاعات R المختلفة أو للطاقات المختلفة للنيوترونات.

وتقاس الجرعة المكافئة في العضو أو النسيج في النظام المعياري العالمي بوحدة أطلق عليها اسم " سيفرت **Sv Seivert** " وذلك عندما تكون الجرعة الممتصة معبراً عنها بوحدة غراي. وعند التعبير عن الجرعة الممتصة بوحدة راد القديمة تستخدم وحدة أخرى قديمة للجرعة المكافئة هي "رم rem" man equivalent roentgen . ومن العلاقة بين الغراي والراد يتبين أن السيفرت والرم يرتبطان معاً بنفس العلاقة وهي:

اسيفرت = 100 رم

ويبقى تعريف معدل الجرعة المكافئة $\dot{H}_{TR}$ أو $\dot{H}_T$ على أنه حاصل قسمة الجرعة المكافئة على الفترة الزمنية t التي أودعت خلالها هذه الجرعة، ويقاس بالسيفرت /ساعة أو (بالرم/ ساعة في النظام القديم).

11-5 العامل المرجح للنسيج W_T The Tissue weighting factor

تبين أنه عند تعرض جميع أعضاء الجسم البشري لنفس مقدار الجرعة المكافئة، فإن احتمال ظهور الأضرار العشوائية، وأهمها

السرطان القاتل في هذه الأعضاء يختلف باختلاف العضو. فعلى سبيل المثال تبين أن احتمال ظهور السرطان في القولون أو المعدة يزيد على احتمال ظهوره في الصدر أو الكبد بحوالي **2.4** مرة.

وهكذا، يتبين أن هناك أعضاء وأنسجة بشرية أكثر تعرضاً للإصابة بالسرطان بالنسبة للأنسجة الأخرى رغم تساوي الجرعات المكافئة فيها. لذا، اختارت اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية اسم "العامل المرجح للنسيج W_T" الذي يمثل احتمال إصابة هذا العضو بالسرطان القاتل عندما يكون الاحتمال الإجمالي للإصابة بالسرطان هو واحد صحيح، وهكذا يمثل العامل المرجح W_T للنسيج أو العضو الإسهام النسبي لذلك النسيج أو العضو في الضرر السرطاني الكلي للجسم عند تشعيع كافة أعضاء الجسم البشري بمجال إشعاعي متجانس. ويبين جدول (5-2) قيم العوامل المرجحة للأنسجة والأعضاء البشرية.

جدول (5-2) : قيم العامل المرجح للنسيج أو العضو البشري

العضو	العامل المرجح W_T
الغدد التناسلية	0.20
النخاع العظمي الأحمر	0.12
القولون	0.12
الرئتين	0.12
المعدة	0.12
المثانة	0.05
الصدر	0.05
الكبد	0.05
الإثنى عشر	0.05
الغدد الدرقية	0.05
الجلد	0.01
سطح العظام	0.01

باقي الأعضاء	0.05
كامل الجسم	1.00

12-5 الجرعة الفعالة (E) The effective dose

تعرف الجرعة الفعالة E للجسم كله على أنها مجموع الجرعات المكافئة الموزونة لعامل الإشعاع المرجح مضروبة في عامل النسيج المرجح لجميع أعضاء وأنسجة الجسم، أي أن:

$$E = \Sigma_T \ W_T \ H_T$$

حيث H_T الجرعة المكافئة في العضو أو النسيج T ، W_T العامل المرجح للنسيج ويتم الجمع لجميع أعضاء وأنسجة الجسم.

وكما ذكر فإن الجرعة الفعالة E في الجسم تعتبر بمثابة مقياس لاحتمال إصابة الجسم بالأمراض العشوائية كالسرطان القاتل نتيجة التعرض للإشعاع، وتقاس الجرعة الفعالة بنفس وحدات قياس الجرعة المكافئة، أي بالسيفرت SV في النظام المعياري الدولي والرم في النظام القديم.

13-5 الجرعة الفعالة الجماعية The collective effective dose

هي الجرعة الفعالة التي تتكبدها مجموعة من البشر. وعند تساوي الجرعات الفعالة لجميع أعضاء المجموعة تكون الجرعة الفعالة الجماعية هو حاصل ضرب الجرعة الفعالة للفرد الواحد في عدد أفراد المجموعة. وتقاس الجرعة الفعالة الجماعية بوحدة فرد0سيفرت في النظام المعياري العالمي وبوحدة فرد0رم في النظام القديم.

14-5 لجرعة الفعالة الملازمة The committed dose

يقصد بالجرعة الملازمة تلك الجرعة التي تنتج عند اندخال (أي دخول) مادة مشعة داخل جسم الإنسان، سواء عن طريق البلع أو الحقن أو التنفس أو الجروح أو المسام . وبذلك، فإن مصطلح ملازمة يعني الجرعة التي سوف تلازم الإنسان مدى حياته حتى بعد التخلص من المادة المشعة سواء بعمليات الإخراج الطبيعي أو التناقص الفيزيائي. وعموماً، تنقسم الجرعة الملازمة إلى جرعة ممتصة وأخرى مكافئة في عضو أو نسيج وثالثة فعالة بالنسبة لكامل الجسم، وتقاس الجرعات الملازمة المختلفة بنفس الوحدات التي تقاس بها الجرعات من الإشعاعات الخارجية التي يكون مصدرها خارج الجسم البشري .

الـبـاب الـسـادس

التأثيرات البيولوجية للإشعاعات المؤينة
Biological effects of ionizing radiation

6-1 مقدمة

تنتقل الطاقة من الإشعاعات المؤينة إلى جسم الكائن الحي وتؤدي إلى تأيين ذرات الخلايا. فالجسيمات المشحونة الثقيلة وجسيمات بيتا تؤين ذرات الخلايا مباشرة عند المرور فيها. وتنتقل طاقة إشعاعات جاما أو الأشعة السينية إلى الإلكترونات الموجودة في ذرات الخلية، وتقوم هذه الإلكترونات بالتأيين. أما طاقة النيوترونات فتنتقل إلى بروتونات ذرات الهيدروجين عن طريق التصادم المرن، ثم تقوم هذه البروتونات بتأيين ذرات الخلايا. كذلك، يمكن أن تمتص النيوترونات (خاصة الحرارية) فيؤدي ذلك إلى تكوين نظائر مشعة داخل الجسم، وتؤدي الإشعاعات المنطلقة من هذه النظائر إلى تأيين ذرات الخلايا.

وسواء كانت الإشعاعات المؤينة صادرة عن مصدر موجود خارج الجسم أو عن تلوث الجسم من الداخل بالمواد المشعة، فإن ذلك يؤدي إلى تأثيرات بيولوجية في الجسم، يمكن أن تظهر فيما بعد في شكل أعراض إكلينيكية Clinical Symptoms . وتعتمد خطورة هذه الأعراض والفترة الزمنية اللازمة لظهورها على كمية الإشعاعات الممتصة وعلى معدل امتصاصها .

وتنقسم التأثيرات البيولوجية للإشعاعات المؤينة في الكائنات الحية إلى نوعين هما:

أ - التأثيرات الذاتية: هي التأثيرات التي تظهر أعراضها في نفس الكائن الذي تعرض للإشعاعات المؤينة.

ب – التأثيرات الوراثية: هي التأثيرات التي تظهر أعراضها في ذرية الكائن المتعرض للإشعاعات المؤينة نتيجة تلف أعضائه التناسلية.

6- 2 تفاعل الإشعاعات مع الخلية الحية

عند سقوط الإشعاعات على الخلية الحية تتأين بعض مكونات الخلية، خاصة جزيئات الماء، الذي يمثل الجزء الأكبر من أي خلية. ويؤدي تأين جزيئات الماء إلى حدوث تغييرات كيميائية تؤدي بدورها إلى إحداث تغيير في تركيب ووظيفة الخلية أي إلى إتلافها. ويتم ذلك من خلال عدة مراحل هي:

أ – المرحلة الفيزيائية The physical stage

وتتم خلال زمن قصير للغاية (حوالي 10^{-16} ثانية) من لحظة دخول الإشعاع للخلية. وخلال هذه المرحلة تنتقل الطاقة من الإشعاع إلى جزيء الماء، ويحدث التأيين، أي:

$$H_2O + \text{إشعاع} \rightarrow (H_2O)^+ + e^-$$

ب – المرحلة الفيزيوكيميائية The physico – chemical stage

وتتم هذه المرحلة خلال زمن قصير (حوالي ميكروثانية) بعد حدوث التأين. وخلال هذا الزمن تتفاعل الأيونات الموجبة والإلكترونات السالبة، التي تكونت نتيجة التأين مع جزيئات الماء الأخرى فينتج عن هذه التفاعلات عدة مركبات جديدة. فعلى سبيل المثال، يمكن أن يتحلل أيون الماء الموجب إلى أيون هيدروجين موجب وهيدروكسيد كالآتي:

$$(H_2O)^+ \rightarrow OH + H^+$$

أما الإلكترون فيمكن أن يتحد مع جزيء ماء مكوناً بذلك أيون ماء سالب، أي:

$$H_2O + e^- \rightarrow (H_2O)^-$$

ثم يتحلل هذا الأيون السالب مكوناً هيدروجين وأيون هيدروكسيد سالب، أي :

$$(H_2O)^- \rightarrow (OH)^+ + H$$

كذلك، يمكن أن يتحد الهيدروكسيد مع بعضه مكوناً فوق أكسيد الهيدروجين (ماء الأكسجين)، أي:

$$OH + OH \rightarrow H_2O_2$$

ج – المراحل الكيميائية The chemical stage

يتميز كل من الهيدروجين **H** والهيدروكسيد **OH** بنشاطهما الكيميائي الشديد. كذلك، يعتبر فوق أكسيد الهيدروجين H_2O_2 عاملاً مؤكسداً قوياً. وعند تكوّن هذه المركبات في الخلية تتفاعل مع المركبات العضوية الأخرى في الخلية مثل الكروموسومات، فتؤدي إلى تكسير تراكيبها السلسلية الطويلة. وتستغرق هذه المرحلة عدة ثوان.

د – المرحلة البيولوجية The biological stage

ويتراوح زمن هذه المرحلة بين عدة دقائق وعدة عشرات من السنوات وتبدأ في هذه المرحلة ظهور تأثيرات التغييرات الكيميائية التي حدثت في الخلية وبعض هذه التأثيرات هي:

1- موت الخلية الحية.
2- منع أو تأخر انقسام الخلية أو زيادة معدل نموها وانقسامها.
3- حدوث تغييرات مستديمة في الخلية تنتقل وراثياً عند انقسام الخلية.

3-6 التأثيرات الذاتية للإشعاعات The somatic effects of radiation

هـي تلـك التـأثيرات التـي تحـدث فـي نفـس الكـائن الـذي تعـرض للإشعاعات وتنقسم إلى نوعين:

أ – التـأثيرات المبكـرة: هـي التـأثيرات التـي تحـدث خـلال فتـرة تتراوح بين عدة ساعات وعدة أسابيع من وقت التعرض لجرعة كبيرة من الإشعاعات المؤينـة. وتحدث هذه التـأثيرات نتيجـة موت عدد كبير من خلايا الجسم أو نتيجة منـع أو تـأخر انقسـامها. وتعود التأثيرات المبكرة الرئيسة إلى تلف خلايا النخاع العظمي أو الخلايا المعوية تبعاً للجرعة الممتصة.

وتجدر الإشارة إلى أنه لا يوجد حد فاصل بين الجرعات الإشعاعية المميتة والجرعات غير المميتة. ولكن يمكن القول أنـه إذا كانـت الجرعـة أقل من **1.5** سيفرت يكون احتمال الوفاة المبكرة (أي فـي خـلال **10-15** يوماً من التعرض) محدودا. أما إذا زادت الجرعة عن حوالي 8 سيفرت يكون احتمال الوفاة المبكرة كبيراً.

الجرعة المميتة LD_{50}^{30} **Lethal Dose**

هي تلك الجرعة التي يتكبدها شخص من خلال فترة قصيرة (دقائق او سـاعات أو أيـام قليلـة) والتـي تـؤدي إلـى وفـاة نصـف المتعرضـين لهـا (**50%** منهم) خلال **ثلاثين** يوماً من التعرض. وتصل قيمـة هذه الجرعـة في الإنسان إلى حوالي **4** سيفرت.

ومـن أهـم الأمـراض المبكـرة الناتجـة عـن التعـرض للجرعـات الكبيرة ما يلي :

(1) المرض الإشعاعي The radiation sickness

وينـتج عـن الجرعـات التـي تصـل إلـى حـوالي **1** سيفرت أو تزيـد، ومن أهم أعراضه الشعور بالغثيان وحدوث القيء. ويظهـر هذا المـرض عادة بعد

عدة ساعات من التعرض، ويعود سببه إلى تلف الخلايا المبطنة للأمعاء. ويزيد احتمال الشفاء كلما قلت الجرعة ويقل بزيادتها.

(2) نقص كرات الدم البيضاء

إذا كانت الجرعة الإشعاعية التي تعرض لها الإنسان في حدود **3-10** سيفرت تحدث الوفاة عادة بسبب التعرض للعدوى الثانوية **Secondary infection** ، حيث أن مثل هذه الجرعات تؤدي إلى استنزاف كرات الدم البيضاء، وهي المسؤولة عن وقاية الجسم من العدوى. لذا، تعرف هذه المنطقة من الجرعات بمنطقة الموت بالعدوى، وعند التعرض لمثل هذه الجرعات يمكن زيادة فرص الشفاء وذلك بعزل المريض ووضعه في جو كامل التعقيم ونقل النخاع إليه لتنشيط عملية إنتاج كرات الدم البيضاء. إلا أنه ينبغي الإشارة إلى خبرة علاج المتعرضين في حادث تشرنوبل التي أكدت كبر احتمال الشفاء لكل من يوضع في جو شبه كامل التعقيم، في حين لم يثبت نقل نخاع العظام جدواه في الحفاظ على الأرواح.

(3) الالتهابات المعوية

إذا زادت الجرعة الإشعاعية عن حوالي **10** سيفرت ينخفض الزمن المحتمل لبقاء الإنسان علي قيد الحياة إلى حوالي **3-5** أيام، ويبقى هذا الزمن في نفس هذه الحدود حتى قيم عالية جداً من الجرعات. ويرجع سبب المرض في هذه الحالة إلى حدوث استنزاف وحشي للخلايا المعوية، وخاصة الخلايا المبطنة للأمعاء، فتهاجمها البكتريا بوحشية. لذا، يعرف هذه المدى من الجرعات بحدود الوفاة الناتجة عن الالتهابات المعوية Gestrointestinal death.

(4) إصابة الجهاز العصبي المركزي (CNS)

أثبتت التجارب على الحيوانات (حيث لا توجد نتائج عن الإنسان) أنه إذا زادت الجرعة إلى حدود عالية، تظهر بعض الأعراض التي تدل على حدوث بعض التلف في الجهاز العصبي المركزي. كما ثبت أن الوفاة الناتجة عن مثل هذه الجرعات العالية لا تتم في الحال حتى بالنسبة للحيوانات التي تعرضت لما يزيد على **500 سيفرت**.

(5) احمرار الجلد Erethema

الجلد معرض للإشعاعات المؤينة أكثر من أي نسيج آخر خصوصاً بالنسبة للإشعاعات السينية وجسيمات بيتا ذات الطاقة المنخفضة (لأن قدرتها على الاختراق صغيرة). لذا، فإنه عند تعرض الجلد البشري لجرعة في حدود **3** سيفرت من هذه الإشعاعات والجسيمات يصاب الإنسان بمرض احمرار الجلد، وعند زيادة الجرعة عن هذه الحدود يمكن أن تظهر أعراض أخرى كالحروق والتقيحات.

وتجدر الإشارة إلى أن مناسيب الجرعات الإشعاعية التي يمكن أن يتعرض لها العاملون في المحطات النووية أو في المصانع والمستشفيات التي تستخدم الإشعاعات والمواد المشعة لأغراض تطبيقية، تكون عادة أقل بكثير من تلك المناسيب الإشعاعية المؤدية للوفاة المبكرة، ولكن يمكن الحصول على الجرعات الخطرة نتيجة وقوع حادث نووي.

ومع ذلك فإن الجرعات الصغيرة التي يمكن أن يحصل عليها العاملون أثناء عمليات التشغيل العادي يمكن أن تؤدي إلى تأثيرات ضارة على المدى البعيد، وهذا ما يعرف بالتأثيرات المتأخرة.

ب – التأثيرات المتأخرة The late effects

(1) الإصابة بالسرطان

أصبح الآن معلوماً أن فنيي الأشعة بالمستشفيت أو المرضى الذين تم علاجهم أو تشخيص أمراضهم بجرعات كبيرة من الإشعاعات المؤينة

معرضون للإصابة ببعض أنواع السرطان أكثر من غيرهم ممن لم يتعرضوا لهذه الإشعاعات، وقد أثبتت الدراسات الحديثة على المجموعات البشرية التي تعرضت للإشعاعات المؤينة (دون الجرعات الخطيرة التي تؤدي للتأثيرات المبكرة) الناتجة عن التفجيرات النووية، أو البشر الذين تم علاجهم بالإشعاعات أو عمال مناجم اليورانيوم الذين يتعرضون لمعدلات مزادة من الإشعاعات المؤينة ، أو العاملون المهنيون في المجالات النووية والإشعاعية، إلى تأكيد قدرة الإشعاعات على استحثاث تكوين السرطان.

والسرطان هو عبارة عن تكاثر الخلايا في العضو المعين بمعدل أكبر من المعدل الطبيعي. ويعتقد البعض أنه ناتج عن تلف جهاز التحكم في الخلية، مما يؤدي إلى انقسامها بمعدل سريع. وتحمل الخلايا الوليدة نفس الصفة فتنقسم بدورها بنفس هذا المعدل السريع، مما يؤدي إلى تكوين نسيج سرطاني يضر بالأنسجة العادية في العضو المعين. وتقدير فرص احتمال الإصابة بالسرطان بسبب التعرض للإشعاعات عملية معقدة للغاية نظراً لعدم إمكانية فصل السرطان الناتج عن الإشعاعات المؤنية عن مثيلة الناتج ذاتياً.

ونتيجة للبحوث العلمية المكثفة التي يقوم بها المختصون في مجال البيولوجيا والفيزياء الإشعاعية، وللدراسات التي تقوم بها اللجنة العلمية للأمم المتحدة (UNSCEAR) واللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية (ICRP) وعدد من اللجان العلمية الوطنية في اليابان والولايات المتحدة وأوربا، تمخضت هذه البحوث والدراسات عن العديد من النتائج التي أوضحت أن السرطانات الجامدة لا تظهر سوى بعد مدة من التعرض للإشعاع المؤين تتراوح بين حوالي **10، 30** سنة في حين أنه بالنسبة للوكيميا الدم (سرطان الدم) فإنها تظهر خلال فترة تتراوح بين حوالي **5، 12** سنة وباحتمالية أكبر بعد حوالي **6-8** سنوات من تاريخ التعرض.

ونتيجة لبحوث ودراسات العلماء واللجان المتخصصة أصدرت اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية نشرتها الهامة رقم **60** في يناير عام **1991** تبين فيها معدلات الإصابة بالسرطانات المختلفة كدالة من جرعات التعرض الإشعاعي. وقد غيرت هذه النشرة الكثير من الحدود والقيود على التعامل مع الإشعاعات المؤينة. فحتى صدور هذه النشرة كان معامل الخطورة للإصابة بالسرطانات المختلفة هو حوالي **1.05×10^{-2}** لكل فرد سيفرت للرجال، وحوالي **1.55×10^{-2}** لكل فرد سيفرت بالنسبة للنساء ، نظراً لسرطان الثدي المنتشر بين النساء بسبب التعرض للإشعاع (بخلاف سرطان الثدي الطبيعي)، ولفهم مغزى هذه الأرقام، فإنه بفرض تعرض **1000** شخص سواء من الرجال أو النساء لجرعة إشعاعية مقدارها **1** سيفرت لكل فرد تكون الجرعة الجماعية هي **1000** فرد سيفرت. وبضرب الجرعة الجماعية في معامل الخطورة يتم تحديد عدد الحالات السرطانية التي تظهر بين هذه المجموعة بسبب التعرض لهذه الجرعة.

وباستخدام معاملات الخطورة المذكورة في الفقرة السابقة لكل من الرجال والنساء يتبين أن من بين هؤلاء الألف فرد يموت في المتوسط **10.5** فرد (أي 11 فرد) من بين الرجال، **15.5** فرد (أي **16** فرد) من بين النساء . أي بقيمة 13.5 حالة سرطانية للجنسين ومنذ عام **1991** تغيرت معاملات الخطورة تغيراً جذرياً. وأعطت اللجان العلمية المختلفة في العالم بما في ذلك اللجنة العلمية للأمم المتحدة واللجنة الأمريكية واللجنة اليابانية وغيرها قيماً متقاربة لمعامل الخطورة يعرضها جدول (1-5).

وتجدر الإشارة إلى أن قيم معامل الخطورة التي حصلت عليها اللجان المختلفة تتفاوت فيما بينها تبعاً للنماذج المستخدمة في التقويم وتبعاً للمجموعات البشرية المتعرضة. إلا أنه يلاحظ أن جميع القيم تتراوح بين حوالي **4×10^{-2}** لكل فرد سيفرت وحتى **11×10^{-2}** لكل فرد سيفرت وبقيمة متوسطة تتراوح بين **5×10^{-2}** ، **7×10^{-2}** لكلا الجنسين. وبفرض

أن القيمة المتوسطة لمعامل الخطورة هي $\mathbf{6\times10^{-2}}$ يصبح العدد المقضي عليهم بالسرطان من بين الألف شخص هو 60 شخصاً وليس 13 شخصاً في المتوسط كما كان يعتقد قبل ذلك.

ويبين (شكل 5-1) العلاقة بين الجرعة المكافئة (بالرم) واحتمال الإصابة بإحدى الآثار المتأخرة طبقاً لبيانات الدراسات المختلفة.

شكل (6-1)

العلاقة بين احتمال الاصابة والجرعة المكافئة

(2) عتامة عدسة العين The cataract

من بين التأثيرات المتأخرة الناتجة عن الإشعاعات تكوّن عتامة في عدسة العين وهو المرض المعروف بالكتراكت، ويحدث هذا المرض إذا تجاوزت الجرعة المكافئة حداً معيناً مقداره **15** سيفرت. لذا، يجب ألا تزيد الجرعة المكافئة التي تتعرض لها العين طوال الحياة عن هذه القيمة.

جدول (6-1) : قيم معامل الخطورة للإصابة بالسرطان القاتل المتحصلة من بعض اللجان العلمية الوطنية والدولية

م	**الدولة أو اللجنة**	معامل الخطورة مضروب في 100		عدد الوفيات السرطانية لكل 1000 فرد سيفرت	
		النموذج الضربي	النموذج الجمعي	النموذج الضربي	النموذج الجمعي

1	**اللجنة العلمية للأمم المتحدة عام 1988**	7.07	4.53	70.7	45.3
2	**لجنـــــة BEIRS 1990**	8.85	غير محدد	88.5	غير محدد
3	اللجنة اليابانية	10.7	غير محدد	107	غير محدد
4	معهد الصحة الوطني **NIH**	10.0	غير محدد	100	غير محدد
5	**اللجنة العلمية للأمم المتحدة عام 1977**	2.5	2.5	25	25
6	**لجنة BEIR الثالثة عام 1980**	1.6	4.0	16	40
7	**المجلس الطبي البريطاني للبحوث**	1.3	غير محدد	13	غير محدد

(3) قصر العمر

أثبتت نتائج التجارب على الحيوانات أن متوسط العمر ينخفض قليلاً بالتعرض للإشعاعات، كما أوضحت الإحصائيات الخاصة بالمجموعات
البشرية التي تعرضت لجرعات من الإشعاعات، أن جرعة مكافئة مقدارها
سيفرت واحد تؤدي إلى قصر عمر الإنسان بما لا يتجاوز سنة واحدة.

4-6 التأثيرات الوراثية للإشعاعاتالمؤينة

The hereditary effects of ionizing radiation

تنتج التأثيرات الوراثية للإشعاعات عن تلف الخلايا التناسلية ويؤدي هذا التلف إلى مجموعة تغيرات تعرف باسم التغيرات الوراثية Genetic mutations وتحدث هذه التغيرات في المادة التي تحمل الصفات الوراثية في الخلية.

وتجدر الإشارة إلى أن التغيرات الوراثية الناتجة ذاتياً (أي التي تحدث دون التعرض للإشعاعات) هي المسؤولة عن الجزء الأكبر من الخمسمائة مرض التي يعاني منها العالم. كذلك، فإنه لا يمكن التمييز بين التغيرات الناتجة ذاتياً وتلك الناتجة عن الإشعاعات، لكن المؤكد هو أن الإشعاعات تؤدي إلى زيادة معدل حدوث هذه التغيرات، وبالتالي زيادة نسبة المرضى وراثياً في الأجيال التالية. ونتيجة للإحصائيات قدرت اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية (**ICRP**) احتمال حدوث ولادات مشوهة وراثياً في حدود الجيلين الأول والثاني للشخص المتعرض للإشعاع، من أي من الوالدين بواقع عشرة أطفال لكل مليون إذا كانت الجرعة المكافئة لا تتجاوز ميللي سيفرت واحد. كما قدرت عدد الولادات المشوهة على مدى جميع الأجيال للمتعرض بواقع **15-20** طفل لكل مليون عند نفس قيمة التعرض. وحيث أن متوسط سن الإنجاب هو **30** عاماً، لذا فإن الجرعة التي يتعرض لها الإنسان قبل الإنجاب هي التي تعتبر ضارة وراثياً. لذلك، ينصح عموماً بإنجاب الأطفال قبل التعرض لجرعات إشعاعية ذات قيمة محسوسة.

6-5 التأثيرات على الأجنة قبل الولادة

من المعروف أن نمو الثدييات في أرحام أمهاتهن ينقسم إلى ثلاث مراحل: الأولى منذ بدء الحمل حتى استقرار الجنين بجدار الرحم. وتمتد هذه المرحلة طوال الأسبوعين الأولين من لحظة الحمل في المتوسط عند البشر. وتمتد المرحلة الثانية من الأسبوع الثالث وحتى الثامن وهي الفترة الرئيسة لتكوّن الجنين ونمو أعضائه، حيث ينمو خلال هذه المرحلة حوالي **90%** من البنى الأساسية التي يبلغ عددها ما يزيد على **4500**

بنية. وتمتد المرحلة الثالثة من حوالي الأسبوع التاسع وحتى الولادة ، وخلالها تكتمل البنى القليلة المتبقية وتستمر البنى التي تكونت خلال المرحلة الثانية في النمو.

وفي كل مرحلة يكون للإشعاعات المؤينة تأثيرات محددة على المضغة أو الجنين. ففي المرحلة الأولى أكدت الدراسات والأبحاث على الحيوانات الثديية أن الإشعاعات تؤدي إلى قتل الجنين في الرحم، وأنه خلال هذه المرحلة يكون للجنين حساسية شديدة للموت بالإشعاعات، وخلال المرحلة الثانية فإن الخطر الرئيس للإشعاعات هو احتمال حدوث تشوهات لأعضاء وأنسجة الجنين، الأمر الذي قد يؤدي إلى وفاته قبل الولادة مباشرة أو بعدها. وأما في المرحلة الثالثة، فإن معدل الخطر من تأثيرات الإشعاع على الجنين يقل ولكنه لا ينتهي، ويتمثل أكبر المخاطر في هذه المرحلة في تلف الجهاز العصبي المركزي الذي يبدو أنه يمكن أن يحدث عند التعرض للإشعاعات في بداية المرحلة الثالثة.

وقد توصلت إحدى الدراسات إلى أن **30** فرداً من بين **1600** جنيناً قد تعرضوا في أرحام أمهاتهم قبل الميلاد (خلال تفجيري هيروشيما ونجازاكي باليابان) يعتبرون من المتخلفين عقلياً بدرجة كبيرة لدرجة أنهم لا يستطيعون رعاية أنفسهم أو إجراء أبسط العمليات الحسابية . كذلك توصلت الدراسة إلى أن الأجنة التي كانت في أرحام أمهاتهم وتراوحت أعمارها بين ثمانية وخمسة عشر أسبوعاً عند التفجيرين قد تأثرت تأثراً شديداً. وتقدر اللجنة العلمية للأمم المتحدة أن أربعة من كل عشرة أجنة حصلت على جرعة قيمتها سيفرت واحد تعاني من تخلف عقلي شديد، وأن الأجنة التي تراوحت أعمارها بين **16**، **25** أسبوعاً حدثت لها أعراض تلف، إلا أنه بمعدل أقل.

الـبـاب الـسـابـع

حسـاب الجرعات الإشـعاعية

7-1 حساب الجرعات من المصادر المشعة النقطية:

يسهل حساب الجرعات الفعالة من المصادر المشعة النقطية السافرة، الموجودة خارج جسم الإنسان، والباعثة لجسيمات بيتا أو النيوترونات أو إشعاعات جاما، بدقة مقبولة، وذلك باستخدام علاقات بسيطة بين كل من النشاط الإشعاعي A للمصدر، ونوع الإشعاعات، وطاقاتها E، والمسافة المحددة d بين المصدر المشع والنقطة المعنية.

أما بالنسبة لمصادر جسيمات ألفا فإن الجرعة الخارجية لا تمثل صعوبة على الإطلاق، نظرا لأن هذه الجسيمات المنبعثة من معظم مصادرها الطبيعية تمتص في طبقة من الهواء تبلغ سماكتها حوالي 4 سم في الظروف المعيارية للضغط ودرجة الحرارة. وحتى عند اقتراب الإنسان لمسافة أقل من 4 سم من هذه المصادر فإن هذه الجسيمات تفقد طاقتها بالكامل في طبقة رقيقة جدا من طبقة الجلد الميت، وبالتالي، فإنها لا تودع أية طاقة في النسيج الحي.

ورغم عدم وجود مخاطر لبواعث جسيمات ألفا، طالما كانت خارج الجسم، إلا أنها تعتبر من أخطر المصادر على الإطلاق عند اندخال النويدات المصدرة لهذه الجسيمات داخل الجسم البشري بأية وسيلة من وسائل الاندخال (البلع أو الاستنشاق أو الجروح أو غيرها)، وذلك بسبب الانتقال الخطي العالي للطاقة من هذه الجسيمات، وبالتالي بسبب التأيين النوعي الفائق لها والمعامل المرجح العالي لها.

7-2 حساب الجرعات الفعالة من بواعث بيتا النقطية الرقيقة:

بالنسبة لبواعث جسيمات بيتا ذات الأبعاد الهندسية الصغيرة، بحيث يمكن اعتبارها مصادر نقطية، والرقيقة جدا بحيث يمكن اهمال الامتصاص الذاتي لجسيمات بيتا داخلها، فإنه يمكن حساب معدل الجرعة

الفعالة $\dot{E}$ (بوحدة ميكروسيفرت/ساعة µSv/h)، بدقة عالية، باستخدام العلاقة التالية:

$$\dot{E}\ (\mu Sv/h) = (5\ A\ E_{av}) / d^2$$

حيث E_{av} هي الطاقة المتوسطة لجسيمات بيتا المنبعثة من المصدر (معبرا عنها بوحدة م إ ف MeV)، A هو النشاط الإشعاعي للمصدر، معبرا عنها بوحدة ميغابكرل (MBq)، d هي المسافة بين المصدر المشع والنقطة المعنية (بالمتر).

وإذا لم تكن الطاقة المتوسطة E_{av} لطيف جسيمات بيتا من النويدة المعينة معلومة، فإنه يمكن حساب مقدارها بصورة تقريبية بدلالة الطاقة القصوى E_{max} لطيف هذه النويدة من العلاقة التالية:

$$E_{av} = E_{max} /$$

وعند استخدام العلاقة السابقة لحساب الجرعة الفعالة من بواعث جسيمات بيتا، يجب أن تكون المسافة d بين المصدر المشع والنقطة المعنية محدودة (لا تزيد على 2 متر)، حتى يمكن إهمال امتصاص جسيمات بيتا أو جزء من طاقاتها في طبقة الهواء بين المصدر والنقطة، خاصة إذا كانت الطاقة المتوسطة لهذه الجسيمات صغيرة نسبيا.

وعندما تكون الطاقة المتوسطة E_{av} لجسيمات بيتا صغيرة نسبيا، فإنه يجب أن يؤخذ في الحسبان امتصاص جزء من طاقة هذه الجسيمات في كل من المصدر ذاته وفي الهواء وفي نافذة الكاشف المستخدم لقياس الجرعة. عندئذ يجب أن تطرح نسبة الطاقة الممتصة في هذه العناصر الثلاث (كنسبة من معدل الجرعة الفعالة) من مقدار المعدل المتحصل عليه من العلاقة السابقة.

7-3 حساب الجرعات من مصادر جاما النقطية الخارجية:

بالنسبة لمصادر إشعاعات جاما صغيرة الحجم (أي التي يمكن اعتبارها مصادر نقطية، ويمكن اهمال الامتصاص الذاتي داخلها)، فإنه يمكن حساب معدل الجرعة الفعالة $\dot{E}$ (بوحدة ميكروسيفرت/ساعة

(μSv/h)) الناتجة عند نقطة معينة موجودة على مسافة d (بالمتر)، من مركز المصدر السافر الذي يصدر إشعاعات جاما بطاقة وحيدة (أي يصدر خطا واحدا من خطوط إشعاعات جاما)، بدقة عالية، باستخدام العلاقة التالية:

$$\dot{E}\ (\mu Sv/h) = (0.142\ A\ f\ E) / d^2$$

حيث A هو النشاط الإشعاعي للمصدر (بوحدة ميغابكرل)، E هي طاقة فوتونات جاما (بالميغا إلكترون فولط)، f هو المعامل الذي يمثل النسبة بين عدد فوتونات جاما ذات الطاقة E المحددة، لكل مائة تفكك من تفككات ألفا أو بيتا السابقة مباشرة لانبعاث فوتونات جاما.

أما إذا كان المصدر من النوع الذي يصدر أكثر من خط من خطوط إشعاعات جاما، (أي فوتونات بطاقات محددة متنوعة E_i ، فإنه يتم حساب معدل الجرعة الفعالة $\dot{E}$ لهذا المصدر السافر، باستخدام العلاقة التالية:

$$\dot{E}\ (\mu Sv/h) = 0.142\ A \sum_i (f_i\ E_i) / d^2$$

حيث يؤخذ الجمع $\sum_i$ بالنسبة لجميع خطوط إشعاعات جاما E_i ، ويمثل الناتج $f_i\ E_i$ حاصل ضرب المعامل f_i لكل خط من الخطوط المنبعثة في طاقته E_i .

كذلك، يمكن حساب معدل الجرعة الفعالة $\dot{E}$ من أي مصدر سافر من مصادر جاما النقطية بطريقة أسرع، عند معرفة ما يسمى بمعامل (أو ثابت) جاما النوعي Γ لهذا المصدر . ويعرف ثابت (أو معامل) جاما النوعي Γ لنويدة معينة، في النظام المعياري العالمي (SI)، بأنه معدل الجرعة الفعالة $\dot{E}$ (بوحدة ميكروسيفرت/ساعة) من مصدر من هذه النويدة، يبلغ نشاطه الإشعاعي 1 ميغابكرل، على مسافة 1 متر من مركز هذا المصدر. وعندما يكون معامل جاما النوعيΓ للنويدة المعينة معلوما، فإنه يسهل حساب معدل الجرعة الفعالة $\dot{E}$ لأي مصدر يتضمن هذه النويدة دون غيرها، باستخدام العلاقة التالية:

$$\dot{E}\ (\mu Sv/h) = \Gamma\ A\ / d^2$$

وبمقارنة هذه العلاقة الأخيرة بالعلاقتين السابقتين لحساب معدل الجرعة الفعالة من بواعث جاما وحيدة الخط ومتعددة الخطوط، يتبين أن معامل جاما النوعي، بالنسبة للنويدة التي تصدر خطا واحدا من خطوط إشعاعات جاما يتعين بالعلاقة التالية:

$$\Gamma = 0.142\ f\ E$$

بينما يتبين أن معامل جاما النوعي للنويدة التي تصدر خطوطا متعددة من خطوط إشعاعات جاما يتحدد بالعلاقة البسيطة التالية:

$$\Gamma = 0.142 \sum_i (f_i\ E_i)$$

وهنا ينبغي الإشارة إلى أن وحدة معامل جاما النوعي Γ في النظام المعياري العالمي (SI) هي (ميكروسيفرت.متر^2/ساعة.ميغابكرل).

أما في النظام التقليدي للوحدات، فإن معامل جاما النوعي يعرف على أنه معدل الجرعة (بوحدة رنتجن/ساعة) على مسافة 1 متر من مصدر سافر يبلغ نشاطه الإشعاعي 1 كيوري. بذلك، تكون وحدة قياس معامل جاما النوعي في النظام التقليدي هي (رنتجن.متر^2/ساعة. كيوري). وحيث أن النظامين مازالا مستخدمين فإنه ينبغي تعين العلاقة بينهما من واقع تعريفهما، حيث يتبين أن العلاقة بينهما تتحدد بسهولة من الصيغة التالية:

$$\Gamma(\mu Sv.m^2/h.MBq) = \Gamma(R.m^2/h.Curie) / 3.7$$

ويستعرض جدول (7-1) قيم معامل جاما النوعي لبعض النويدات واسعة الاستخدام في النظامين المعياري العالمي والتقليدي.

جدول (7−1): معامل جاما النوعي لبعض النويدات

النويدة المشعة	معامل جاما النوعي للنظامين	
	($\mu Sv.m^2/h.MBq$)	($R.m^2/h.Curie$)
سيزيوم137	0.087	0.325
كوبلت60	0.356	1.32

ذهب198	0.062	0.23
يود131	0.0595	0.22
إيريديوم192	0.13	0.48
راديوم226	0.223	0.825
صوديوم24	0.497	1.84

7-4 حساب الجرعات من مصادر النيوترونات النقطية:

ينبغي الإشارة إلى أن جميع مصادر النيوترونات المستخدمة للتطبيقات الصناعية المتنوعة (عدا عمليات التشعيع بالنيوترونات الحرارية) تصدر نيوترونات سريعة بطيف مستمر للطاقة يتراوح بين عدة مئات من الإلكترون فولط وحوالي 7-9 ميغا إلكترون فولت. أما مولدات النيوترونات المستخدمة في التطبيقات المتنوعة فتستخدم نيوترونات سريعة ولكن أحادية الطاقة. وفي معظم الحالات، تصدر هذه المولدات نيوتروناتها من خلال التفاعل (ديوترون، نيوترون) على التريتيوم منتجة النيوترونات بطاقة وحيدة مقدارها 14.1 ميغا إلكترون فولط.

ويمكن اعتبار مصادر النيوترونات ذات التوزع النيوتروني المتجانس في جميع الاتجاهات بمثابة مصادر نقطية، نظرا لصغر حجمها، وللاختراقية العالية للنيوترونات. وبالتالي، يمكن حساب معدل الجرعة الفعالة $\dot{E}$ (بوحدة ميكروسيفرت/ساعة) بدلالة المردود النيوتروني N بوحدة نيوترون في الثانية (أي عدد النيوترونات التي تنبعث من المصدر بشكل متجانس في جميع الاتجاهات في الثانية الواحدة)، وكذلك بدلالة المسافة بين مركز المصدر والنقطة المعنية d (بالمتر)، ومعامل تحويل النيوترون السريع الواحد C إلى جرعة فعالة، بالعلاقة التالية:

$$\dot{E}\ (\mu Sv/h) = (0.08\ C\ N) / d^2$$

ويبين جدول (7-2) مقادير معاملات التحويل النيوتروني C إلى جرعة فعالة $\dot{E}$ (بوحدة ميكروسيفرت/ساعة)عند بعض طاقات النيوترونات.

جدول (7–2): معاملات تحويل النيوترون لجرعة فعالة لبعض الطاقات

طاقة النيوترون	المعامل C	طاقة النيوترون	المعامل C
1 ك إ ف	3.74×10^{-6}	1 م إ ف	1.32×10^{-4}
10 ك إ ف	3.56×10^{-6}	5 م إ ف	1.56×10^{-4}
100 ك إ ف	2.17×10^{-6}	10 م إ ف	1.47×10^{-4}
500 ك إ ف	9.25×10^{-5}		

7–5 قانون التربيع العكسي للتعرض الخارجي:

يطبق قانون التربيع العكسي على جميع مصادر جاما والنيوترونات السريعة. أما بالنسبة لمصادر بيتا، فإن تطبيق هذا القانون قاصر على المسافات الصغيرة فقط، بسبب حدوث امتصاص لبعض جسيمات بيتا منخفضة الطاقة، أو لانخفاض طاقتها.

وينص قانون التربيع العكسي على أن معدل الجرعة الفعالة $\dot{E}$ من مصدر نقطي، الناتج عند مسافة معينة من هذا المصدر d، تتناسب تناسبا عكسيا مع مربع هذه المسافة. وهذا يعني أنه عندما تزيد المسافة d بين النقطة والمصدر للضعف فإن الجرعة الفعالة الناتجة عن هذا المصدر تنخفض في النقطة الجديدة للربع (أي تنخفض أربع مرات)، وعندما تتضاعف المسافة ثلاثة أضعاف تنخفض الجرعة 9 مرات (لأن $3^2 = 9$). وعند التعبير عن ذلك بالأسلوب الرياضي، فإنه عندما تكون هناك نقطتان تبعدان عن المصدر نفسه بمسافتين d_1 ، d_2 يرتبط معدلا الجرعتين $\dot{E}_1$ ، E_2 في هاتين النقطتين بالترتيب، بالعلاقة العكسية التالية:

$$\dot{E}_1 \, d_1^{\,2} = E_2 \, d_2^{\,2}$$

7–6 حساب جرعات التعرض الداخلي:

عند اندخال كمية من النشاط الإشعاعي من نويدة معينة إلى الجسم البشري، سواء عن طريق البلع أو التنفس أو من خلال الجروح التي قد توجد على الجلد، فإن التعرض الناتج عن هذا الاندخال يعرف باسم

التعرض الداخلي، وتوصف الجرعة الفعالة لكامل الجسم أو المكافئة في عضو أو نسيج معين من الجسم، عندئذ، بالجرعة الملازمة (Committed dose). وعند ابتلاع أو استنشاق أي عنصر أو مركب، سواءً كان مشعا أو غير مشع، داخل الجسم فإنه يسلك داخل الجسم سلوكا ومسارات متنوعة، تعتمد على العادات العذائية للإنسان الذي اندخل إليه العنصر أو المركب وعلى مسلك دخوله الجسم (بالبلع أو الاستنشاق أو من خلال الجروح)، وعلى الخصائص الأيضية للعنصر أو المركب الكيميائي، وعلى درجة ذوبانه في الماء.

إن أبسط وأدق أسلوب لتقدير الجرعة الفعالة الملازمة E (بالسيفرت) التي تنتج عن اندخال كمية من النشاط الإشعاعي A من نويدة مشعة معينة (بوحدة بكرل) داخل الجسم البشري، هو حساب هذه الجرعة بالعلاقة التالية:

$$E\,(Sv) = C\,A$$

حيث C هو معامل تحويل اندخال 1 بكرل إلى جرعة فعالة ملازمة بالأسلوب المحدد للاندخال. وعند اندخال عدد من النويدات المشعة المختلفة تحسب الجرعة الفعالة الملازمة الكلية من هذه النويدات من العلاقة التالية:

$$E\,(Sv) = \sum_i C_i A_i$$

حيث، C_i هو معامل تحويل اندخال بكرل واحد من النويدة i بأسلوب الاندخال المحدد، A_i مقدار النشاط الإشعاعي المندخل بوحدة بكرل من النويدة ذاتها. ويتم الجمع بجميع أنواع النويدات التي اندخلت.

,تجدر الإشارة، مرة أخرى، إلى أن معامل تحويل الاندخال إلى جرعة فعالة يعتمد اعتمادا شديدا على مسلك الاندخال (بلع أو تنفس أو جروح)، كما يعتمد على الصيغة الكيميائية والفيزيائية للمادة المندخلة، وعلى قابلية هذه المادة للذوبان في الماء وسرعة هذا الذوبان، كما يعتمد على عمر الشخص عند اندخال المادة المشعة. لهذا السبب أوردت كل من اللجنة العلمية للأمم المتحدة حول تأثيرات الإشعاعات المؤينة واللجنة الدولية للحماية الإشعاعية قيم هذه المعاملات لجميع النظائر المشعة لحالتي البلع والاستنشاق كل على حدة، ولمراحل عمرية مختلفة

للمتعرضين داخليا، هي أقل من سنة واحدة، ومن 1حتى2 سنة، ومن 2 حتى 7، ومن 7 حتى17 سنة، ثم للبالغين. والمعاملات الواردة في هذه الجداول تأخذ في الحسبان الجرعة الفعالة الملازمة التي سوف يتكبدها المتعرض للاندخال حتى يبلغ سن السبعين سنة. ومما سبق يتبين أن المعاملات تتزايد من حيث المقدار بانخفاض العمر عند الاندخال، أي أن الانخال يمثل خطورة أكبر لصغار السن.

وأحد المراجع الذي يورد هذه المعاملات لجميع النظائر المشعة هو المرجع الصادر عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية عام 1996م بعنوان "معايير الأمان الأساسية للوقاية من الإشعاعات المؤينة ولأمان المصادر المشعة.

7-7 الحد السنوي للاندخال The Annual Limit on Intake ALI:

يعرّف هذا الحد على أنه مقدار الاندخال (سواء بالبلع أو الاستنشاق أو من خلال الجروح أوغيره) من نويدة مشعة معينة، في سنة كاملة، بواسطة شخص مرجعي (أي شخص تبلغ كتلته 70 كجم)، الذي ينتج جرعة فعالة ملازمة تساوي الحد السنوي للتعرض المهني (أي حاليا 20 مللي سيفرت). ويتم التعبير عن الحد السنوي للاندخال بوحدات بكرل،

ويمكن تعيين الحد السنوي للاندخال ALI_i بيسر من نويدة i معينة (بالبكرل) ، بدلالة الحد السنوي للجرعة الفعالة للعاملين (وهو في الوقت الحالي 20×10^{-3} سيفرت) وباستخدام معامل تحويل الاندخال C_i من هذه النويدة إلى جرعة فعالة، بأسلوب الاندخال المعين (بوحدة سيفرت/بكرل)، وفقا للعلاقة التالية:

$$ALI_i\ (Bq) = 20x10^{-3} / C_i$$

وينبغي إعادة الإشارة، من جديد، إلى أن اندخال حد سنوي واحد (1 ALI) بأي مسلك من مسالك الاندخال، خلال السنة، يعني الحصول على جرعة فعالة تساوي 20 مللي سيفرت خلال هذه السنة.

7-8 التركيز المشتق للهواء:

The Derived Air Concentration (DAC)

يعرف التركيز المشتق للهواء على أنه القيمة القصوى لتركيز نويدة مشعة معينة ومنفردة في الهواء (بوحدة بكرل/متر مكعب)، في أماكن العمل، الذي يؤدي استنشاقه بواسطة الإنسان المرجعي خلال ساعات العمل السنوية (ومقدارها 2000 ساعة/سنة) إلى إيداع جرعة فعالة ملازمة، في هذا الإنسان، تساوي الحد السنوي للجرعة الفعالة (أي 20 مللي سيفرت).

ويتم اشتقاق التركيز المشتق للهواء DAC من نويدة معينة i بدلالة حجم كمية الهواء التي يستنشقها الإنسان المرجعي خلال ساعات العمل السنوية (ومقدارها 2000 ساعة/سنة)، حيث يستنشق هذا الإنسان خلال كل ساعة من العمل بالجهد المعتدل 1.25 متر مكعب من الهواء، أي 2500 متر مكعب من الهواء خلال ساعات العمل السنوية. بذلك، يتم تحديد التركيز المشتق للهواء (بوحدة بكرل/متر مكعب) بالعلاقة التالية:

$$(DAC)_I\ (Bq/m^3) = (ALI)_I / 2500$$

وينبغي الإشارة إلى أن استنشاق 2000 داك . ساعة بواسطة أي من العاملين المهنيين في سنة واحدة يعني حصول هذا العامل على جرعة فعالة ملازمة عن طريق الاستنشاق، خلال هذه السنة، مقدارها 20 مللي سيفرت.

الباب الثامن

الدروع الإشعاعية

8-1 دروع مصادر جسيمات ألفا:

سبق الإشارة أن جسيمات ألفا المنبعثة من جميع مصادرها الطبيعية تمتص في طبقة رقيقة من الهواء (لا تزيد سماكتها على 4 سم بالنسبة لجسيمات ألفا بطاقة 5 م إ ف). لذلك، فإن جميع مصادر ألفا، الموجودة خارج الجسم البشري، لا تحتاج لعمل أي درع من الدروع حولها للوقاية من أخطارها.

8-2 دروع مصادر جسيمات بيتا:

بدراسة خصائص جسيمات بيتا، يتبين أنه لعمل درع ملائم لمصادر هذه الجسيمات فإنه يجب استخدام المواد الصلبة الخفيفة، أي التي تتميز بأعداد ذرية Z صغيرة، حيث أن استخدام المواد ذات الأعداد الذرية الكبيرة تنتج كميات كبيرة من فوتونات الأشعة السينية عالية الاختراق والخطيرة. فنسبة طاقة جسيمات بيتا f المتحولة إلى أشعة سينية تتحدد بدلالة كل من الطاقة القصوى E_{max} لهذه الجسيمات (بوحدة م إ ف) والعدد الذري للمادة المتفاعلة Z من العلاقة التالية:

$$f = 0.035 \ Z \ Emax \ \%$$

ورغم أن جسيمات بيتا تتميز بطيف مستمر للطاقة، إلا أن مدى هذه الجسيمات الكتلي في مادة ما يمكن حسابه، بسهولة، بدلالة الطاقة القصوى لطيف هذه الجسيمات E_{max} بوحدة (م إ ف). ويتحدد مقدار المدى الكتلي R_m (بوحدة جم/سم^2) لجسيمات بيتا من مصدر هذه الجسيمات بطاقة قصوى مقدارها E_{max} ، بدلالة كل من المدى الخطي R (أي السماكة الخطية الكافية لإيقاف هذه الجسيمات بوحدة سم) وكثافة المادة ρ. بوحدة (جم/سم^3) بالعلاقة التالية:

$$R_m = R . \rho$$

وعندما تتراوح الطاقة القصوى لجسيمات بيتا بين صفر، 2.5 (م إ ف)، فإنه يمكن حساب المدى الكتلي R_m (بوحدة جم/سم^2) بدقة عالية، بدلالة الطاقة القصوى للطيف E_{max} بالعلاقة التالية:

$$R_m\ (gm/cm^2) = 0.412\ E_{max}\ (1.265 - 0.0954\ \ln E_{max})$$

أما للأطياف التي تزيد طاقتها القصوى على 2.5 (م إ ف)، فإن هذه المعادلة الأخيرة لا تصلح لحساب المدى الكتلي، ويجب أن تستخدم علاقة أخرى تتخذ الصورة التالية:

$$R_m\ (gm/cm^2) = 0.53\ E_{max} - o.106$$

كذلك، يجب الإشارة إلى أن السماكة الكتلية R_m لدرع جسيمات بيتا التي تكفي لامتصاص الجسيمات المنبعثة من مصدر (نظير) معين محدود النشاط الإشعاعي يصلح، في الوقت ذاته، لامتصاص جميع الجسيمات من ذات المصدر (النظير)، مهما زاد النشاط الإشعاعي لهذا المصدر. بمعنى آخر، فإن مقدار سماكة الدرع المخصص للوقاية من جسيمات بيتا لا يعتمد على الإطلاق على مقدار النشاط الإشعاعي للمصدر، وإنما يعتمد مقدار السماكة على نوع النظير المشع (أي على الطاقة القصوى لطيف النظير). ولا ينطبق هذا المبدأ، على الإطلاق، على أي من مصادر جاما أو النيوترونات، حيث يعتبر النشاط الإشعاعي للمصدر هو أحد أهم العوامل المؤثرة في مقدار السماكة.

ونظرا لأن جسيمات بيتا تفقد جزءا من طاقاتها في صورة إشعاعات الانكباح (أي الأشعة السينية)، فإنه يجب أن تحاط دروع مصادر بيتا، التي تصنع من مادة صلبة منخفضة العدد الذري، من جميع الجهات، بدرع آخر مصنوع من مادة عالية العدد الذري كالرصاص أو غيره، وذلك لامتصاص الأشعة السينية (الانكباحية) المتولدة عن تفاعل هذه الجسيمات مع الدرع المصنوع من المادة ذات العدد الذري المنخفض. وسوف يتم تناول هذا النوع من الدروع الخاصة بالأشعة االسينية وإشعاعات جاما في الفقرة التالية.

8-3 دروع إشعاعات جاما والأشعة السينية:

تعرضنا في فقرات سابقة لتعريف معامل التوهين الخطي μ لمادة معينة عند طاقة محددة من طاقات إشعاعات جاما، وكذلك لمعامل امتصاص الطاقة μ_a. وقد استخدم معامل التوهين الخطي μ في علاقة التوهين الأسي لإشعاعات جاما أو الأشعة السينية، التي تعبر عن تناقص عدد الفوتونات أسّيا مع زيادة سماكة المادة المتفاعلة وفقا للعلاقة التالية:

$$N = N_o e^{-\mu x}$$

حيث N_o هو عدد الفوتونات التي تصل النقطة المحددة من المصدر المعين، في غياب الدرع. أما N فتعبر عن عدد الفوتونات التي تصل النقطة نفسها من المصدر ذاته في وجود الدرع، في حين تعبر x عن سماكة الدرع.

وقانون التوهين الأسي (أي التناقص الأسي) لعدد الفوتونات بزيادة سماكة المادة الممتصة لا يصلح إلا عند توفر شرطين أساسيين هما:

أ- أن تكون حزمة الفوتونات حزمة ضيقة جدا ومتوازية ووحيدة الطاقة (أي أن لجميع الفوتونات الطاقة نفسها)،

ب- أن تكون سماكة مادة التوهين محدودة للغاية (أي أن الدرع رقيق جدا).

أما لحساب معدل الجرعة الفعالة $\dot{E}$، الناتج في نقطة معينة بعد مرور الحزمة خلال الدرع، فإنه يجب استخدام المعامل الكتلي لامتصاص الطاقة μ_a، وليس معامل التوهين الخطي μ. بذلك، تكون العلاقة بين معدل الجرعة $\dot{E}$ في وجود الدرع الذي تبلغ سماكته x بين المصدر والنقطة المعنية، وبين معدل الجرعة $\dot{E}_0$ في حالة عدم وجود ذلك الدرع في النقطة نفسها هي:

$$\dot{E} = \dot{E}_0 e^{-\mu_a x}$$

ووفقا لهذه العلاقة الأسية الأخيرة، فإنه إذا طلب، على سبيل المثال، خفض معدل جرعة ناتج عن مصدر كوبلت60 في نقطة معينة بمقدار 16 ضعفا، باستخدام عنصر الرصاص الذي يبلغ سمكه النصفي لأشعة جاما من هذا النظير 1.25 سم، فإنه يلزم استخدام عدد من طبقات السمك النصفي يبلغ 4 طبقات (لأن $16 = 2^4$). وبذلك تكون سماكة الرصاص المطلوبة هي:

$$4 \times 1.25 = 5 \text{ سم.}$$

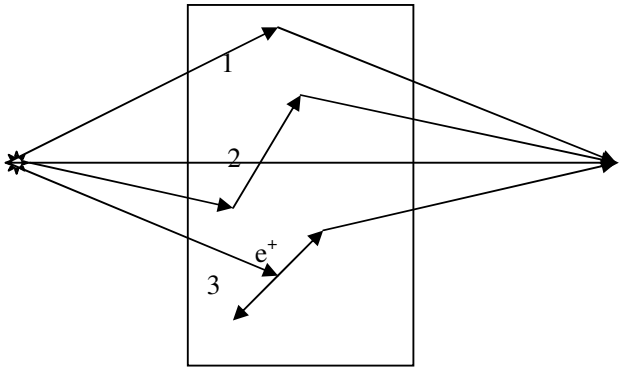
وأما إذا طلب حفض معدل الجرعة بمقدار 1024 مرة، فيكون عدد طبقات السمك النصفي المطلوبة هو ($1024 = 2^{10}$) أي 10 طبقات، وتكون سماكة الرصاص اللازم عندئذ هي:

$$10 \times 1.25 = 12.5 \text{ سم}$$

وأما في جميع الحالات التي تكون فيها حزمة الفوتونات واسعة أو غير متوازية، أو تكون سماكة الدرع كبيرة نسبيا (وهذه هي الظروف العملية في جميع الحالات تقريبا)، تصبح العلاقتين السابقتين غير صالحتين للتطبيق بسبب ما يعرف باسم التراكم (Build-up) الذي ينتج عن تراكم الفوتونات في النقطة المعنية بسبب بعض العوامل التي سوف يتم إيضاحها فيما يلي.

ينتج التراكم عن نمطين وحيدين من أنماط تفاعل الفوتونات مع المادة وهما: تشتت كمبتون وإنتاج الأزواج، بينما لا يؤدي التأثير الكهرضوئي إلى حدوث أي نوع من التراكم. فنتيجة لاستطارة كمبتون فإن بعض الفوتونات التي تنبعث من المصدر في اتجاه بعيد عن النقطة المعنية، والتي يحدث لها استطارة (تشتت) على الدرع يمكن أن تتجه نحو النقطة المعنية فتزيد عدد الفوتونات الواصلة إليها (أنظر الفوتون 1 على الشكل 8-1). فضلا عن ذلك، فإنه عندما يكون الدرع سميكا يمكن أن يحدث للفوتون الواحد أكثر من تشتت متتابع من تشتات كمبتون، وهي الظاهرة المعروفة باسم التشتت المتعدد (multiple scattering)، وهو ما يمثله الفوتون 2 على الشكل (8-1). أما في إنتاج الأزواج فإن الطاقة قد لا تنتقل بالكامل لمادة الدرع. ويعود ذلك إلى أن أحد الفوتونين الناتجين عن فناء البوزترون مع إلكترون من إلكترونات المادة قد يصل

إلى النقطة المعنية فيزيد عدد الفوتونات الواصلة إليها، وبالتالي، يزيد معدل الجرعة فيها (وهذا مايمثله الفوتون 3 على شكل 8-1).



شكل (8–1)

وعموما، يعرف معامل التراكم (Build-up factor B) على أنه النسبة بين العدد الكلي للفوتونات $\mathbf{I_t}$ التي تصل النقطة المعنية، في وجود الدرع بين المصدر وهذه النقطة، سواءً بشكل مباشر من المصدر $\mathbf{I_d}$ ، أو بسبب التشتت أو إنتاج الأزواج $\mathbf{I_s}$ في الدرع، إلى عدد الفوتونات $\mathbf{I_d}$ التي تصل النقطة المعنية ذاتها من المصدر مباشرة، أي أن:

$$B = I_t / I_d = (I_s + I_d) / I_d$$

ويعتمد معامل التراكم B اعتمادا كبيرا على كل من طاقة الفوتونات، والعدد الذري لمادة الدرع، وكذلك على سماكة الدرع x. ويمكن أن يتراوح مقدار هذا المعامل بين الواحد الصحيح (في الحالة المثالية عندما لا يوجد تراكم، أي عندما تكون حزمة الأشعة ضيقة جدا ومتوازية، وتكون سماكة الدرع صغيرة)، وبين عدة عشرات أو مئات أو حتى عدة آلاف في الظروف الواقعية (أي عند الطاقات العالية لإشعاعات جاما وانطلاق حزمة الأشعة في جميع الاتجاهات وللماد عالية العدد الذري وللسماكات الكبيرة). ويؤدي هذا الأمر إلى عدم صلاحية العلاقتين

الأسيتين للتوهين أو لتناقص المعدل الجرعة الفعالة، لحساب سماكة الدرع، حيث أنهما ستعطيان سماكات أقل من اللازمة للوقاية من المصادر المقصودة. لهذا السبب يجب أن يؤخذ معامل التراكم في الحسبان عند حساب سماكات دروع إشعاعات جاما والأشعة السينية. ويتم هذا الأمر بإدخال هذا المعامل ضمن معادلة التوهين أو الامتصاص. بذلك، تكون الصيغة الواجب اتباعها لحساب السماكة الصحيحة للدرع هي العلاقة التالية:

$$\dot{E} = \dot{E}_0 \; B\, e^{-\mu a\, x}$$

وينبغي الإشارة إلى أن السماكة الكافية لخفض معدل الجرعة في النقطة المعنية للقيمة اللازمة، تعتمد اعتمادا أساسيا على النشاط الإشعاعي للمصدر المشع. فزيادة النشاط الإشعاعي للمصدر تستلزم زيادة سماكة الدرع لخفض معل الجرعة خارجه للمقدار المطلوب.

ويبين جدول (8-1) قيم معامل التوهين الخطي μ لبعض المواد المستخدمة في عمل دروع إشعاعات جاما والأشعة السينية، عند طاقات محددة لإشعاعات جاما، كما يبين قيم طبقة السمك النصفي من هذه المواد عند الطاقات نفسها.

جدول (8–1): قيم معامل التوهين الخطي وطبقة السمك النصفي لبعض المواد

طاقة فوتونات جاما (م إ ف)	مقدار معامل التوهين الخطي وطبقة السمك النصفي					
	خرسانة مسلحة		فولاذ		رصاص	
	μ سم$^{-1}$	$X_{1/2}$ سم	μ سم$^{-1}$	$X_{1/2}$ سم	μ سم$^{-1}$	$X_{1/2}$ سم
0.01	58.0	0.012	1330	0.0005	1340	0.0005
0.1	0.4	1.75	2.60	0.27	58	0.012
1.0	0.15	4.62	0.47	1.47	0.65	1.10
10.0	0.054	12.8	0.23	3.01	0.54	1.28

8–4 دروع مصادر النيوترونات:

عند الحديث عن تفاعل النيوترونات السريعة مع المادة ورد أن المواد ذات الأعداد الذرية الصغيرة، وخاصة الهيدروجين، تعتبر من أفضل المهدئات للنيوترونات السريعة. فهذه النيوترنات التي تبلغ طاقاتها عدة ميغا إلكترون فولط تحتاج حوالي 18 تصادما مع البروتونات (نوى الهيدروجين) حتى تفقد طاقاتها بالكامل وتتحول إلى نيوترونات حرارية بطاقة 0.025 إلكترون فولط. وبالنسب للمواد الخفيفة الغنية بالهيدروجين، مثل شمع البرافين أو البلاستيك أو الماء أو غيرها، فإن السماكة المطلوبة لتهدئة النيوترونات السريعة وتحويلها إلى نيوتروات حرارية تتراوح بين حوالي 20 – 25 سم. وبالتالي، تكفي مثل هذه السماكات لامتصاص طاقة النيوترونات السريعة بشكل كامل.

ويتمثل أحد أهم مبادئ تدريع مصادر النيوترونات في تهدئة النيوترونات السريعة المنبعثة من هذه المصادر أو من مولدات النيوترونات الحرارية والبطيئة، ثم يتم بعد ذلك امتصاص تلك النيوترونات الحرارية والبطيئة بواسطة مادة ذات معامل أسر (امتصاص) كبير لهذه النيوترونات، ثم يتم بعد ذلك وضع طبقة من مادة عالية العدد الذري (ثقيلة) كالرصاص، لامتصاص فوتونات جاما الفورية المنبعثة نتيجة الأسر النيوتروني للنيوترونات الحرارية أو البطيئة.

وهناك بعض العناصر مثل الكادميوم (Cadmium) والبور(Boron) وغيرها، التي تتميز بمقطع عرضي كبير جدا لامتصاص النيوترونات الحرارية أو البطيئة. لذلك، فإنه بعد إحاطة المصدر أو المولد النيوتروني بالطبقة الكافية السماكة (20- 25 سم) من المادة منخفضة العدد الذري كالشمع أو الماء أو غيرها، يتم إحاطة هذه المادة المهدئة بطبقة رقيقة من فلز الكادميوم بسماكة تبلغ حوالي 1 مم، لامتصاص أغلبية النيوترونات الحرارية. ولامتصاص فوتونات جاما المنبعثة عن الأسر النيوتروني في الكادميوم، يتم إحاطة هذا الكادميوم بطبقة أخرى من مادة عالية العدد الذري كالرصاص.

بذلك يتكون الدرع المثالي للنيوترونات السريعة من ثلاث طبقات متعاقبة من مواد مختلفة، وبسماكات مختلفة هي: حوالي (20- 25 سم) من الشمع أو البلاستك أو الماء، تحاط بشريحة سمكها حوالي 1 مم من

الكادميوم الذي يحاط بعد ذلك بطبقة من الرصاص أو أية مادة أخرى عالية العدد الذري.

كذلك، يمكن عمل درع لمصادر أو مولدات النيوترونات السريعة من طبقة واحدة من مادة منخفضة العدد الذري، كالشمع أو البلاستك أو الماء. ويعود ذلك إلى قابلية نوى الهيدروجين لامتصاص النيوترونات الحرارية، وتكون نظير الديتيريوم (نظير الهيدروجين) غير المشع. والمطلب الوحيد لعمل الدرع الملائم من مادة خفيفة دون استخدام الكادميوم والرصاص هو أن تكون سماكة المادة الخفيفة كافية لامتصاص الغالبية العظمى من النيوترونات المهدأة (أي الحرارية). ومن أمثلة هذه الدروع النيوترونية الهاوتزر النيوتروني نصف الكروي، الذي يصنع من الشمع، ويوضع مصدر أو مولد النيوترونات في مركزه. ولمثل هذا الدرع يلزم أن تكون سماكة الشمع أو الماء حوالي 40- 120 سم من الشمع أو الماء، تبعا للمردود النيوتروني للمصدر.

وفي حالة الحوادث المرتبطة بمصادر النيوترونات يستطيع الإنسان أن يستخدم أية مواد طبيعية خفيفة موجودة ومتاحة في البيئة، لعمل درع ملائم لمصادر النيوترونات، بما في ذلك أكياس من الماء أو الرمال، أو حتى قطع من الخشب.

الـبـاب الـتـاسع

التعرضات الإشعاعية وحدود الجرعات

Radiation exposures and dose limits

9-1 مقدمة

يتعرض الإنسان وجميع الكائنات الأخرى على سطح الأرض إلى جرعات من الإشعاعات المؤينة والمواد المشعة الموجودة طبيعياً في البيئة منذ أن خلق المولى عز وجل الأرض ومن عليها. ومنذ النصف الثاني من القرن العشرين انتشرت في البيئة بعض المواد المشعة من صنع الإنسان بدأت تزيد من معدل تعرضه للإشعاعات المؤينة. ويلقى هذا الباب بعض الضوء باختصار شديد على مصادر هذه التعرضات.

9-2 الجرعات الإشعاعية الطبيعية الناتجة عن البيئة

يتعرض الإنسان منذ نشأته إلى جرعات إشعاعية معينة صادرة عن البيئة التي يعيش فيها، ومصادر هذه الجرعات هي:

أ – الأشعة الكونية Cosmic rays

تصل إلى الأرض كمية معينة من الإشعاعات قادمة من الفضاء الخارجي ومن الشمس. وتحتوي هذه الأشعة على أنواع مختلفة من الإشعاعات المؤينة. وعند دخول هذه الإشعاعات إلى الغلاف الجوي للأرض تتفاعل مع المواد المكون منها هذا الغلاف ، فتتغير محتوياتها وتضعف كمياتها التي تصل إلى سطح الأرض. لذا ، يعتبر الغلاف الجوي حاجزاً واقياً من تلك الإشعاعات.

وتتغير الجرعة الإشعاعية التي يتعرض لها الإنسان من الأشعة الكونية بتغير المكان والارتفاع. فمثلاً تصل الجرعة المكافئة عند سطح

البحر في منطقة خط الاستواء إلى حوالي **0.23** مللي سيفرت في السنة في حين تصل هذه الجرعة إلى حوالي **0.56** مللي سيفرت عند ارتفاع **3** كم عن سطح البحر. كذلك، تصل الجرعة الناتجة عن الأشعة الكونية في الجزر البريطانية عند سطح البحر إلى حوالي **0.5** مللي سيفرت في السنة. وبالإضافة إلى التأثير المباشر للأشعة الكونية على البشر فإنها تؤدي إلى إنتاج بعض المواد المشعة في الغلاف الجوي، نتيجة تفاعلها مع مكونات هذا الغلاف. فعند اختراقها للغلاف الجوي تتفاعل النيوترونات الكونية مع النيتروجين –14 الموجود في الغلاف فيتكون الكربون –14 المشع، ذو العمر النصفي **5568** سنة طبقاً للتفاعل:

$$^{1}_{0}n + ^{14}_{7}N \rightarrow ^{14}_{6}C + p$$

وينتشر الكربون 14 المتكون في الغلاف الجوي حتى يصل إلى سطح الأرض، فيدخل في تركيب جميع المواد الحية الموجودة على الأرض. كذلك، تتكون بعض النظائر المشعة الأخرى كالكالسيوم 41 الذي يبلغ عمره النصفي $\mathbf{1.00 \times 10^{5}}$ سنة، والكلور 36 (الذي يبلغ عمره النصفي $\mathbf{1.1 \times 10^{5}}$ سنة) وغيرهما.

وتقدر اللجنة العلمية للأمم المتحدة حول تأثيرات الإشعاعات الذرية أن الفرد يتعرض في المتوسط على المستوى العالمي لجرعة سنوية مقدارها **0.36** مللي سيفرت من الأشعة الكونية. أما الفرد الذي يعيش على ارتفاع **2000** متر من سطح البحر فيتعرض لجرعة أكبر بما يزيد على الضعف. وعند ارتفاع حوالي **10**كم، وهو ارتفاع الطيران الدولي يزيد معدل الجرعة من الأشعة الكونية بحوالي **100 - 150** ضعفاً، وعند ارتفاع **15** كم وهو ارتفاع الطيران الأسرع من الصوت، يزيد معدل الجرعة بأكثر من مائتي ضعف على معدلها عند سطح البحر،

فسبحانه الذي سخر لنا هذا الغلاف الجوي ليحمينا من تأثيرات هذه الأشعة الخطرة.

ب – الإشعاعات الصادرة من التربة

تحتوي القشرة الخارجية للكرة الأرضية على كميات ضئيلة من اليورانيوم 238 واليورانيوم235 والتوريوم232 المشعة ونواتجها الوليدة، فضلاً عن البوتاسيوم 40 والروبيديوم 87 . ويختلف تركيز هذه النظائر في التربة باختلاف نوعها، حيث يزداد تركيزها في الصخور الجرانيتية في حين يقل في الصخور الرملية. ففي الجزر البريطانية على سبيل المثال، تتراوح معدلات الجرعات الإشعاعية، الناتجة عن التربة، بين **0.3 – 0.6** مللي سيفرت في السنة، تبعاً لنوع التربة، وتتكون إشعاعات التربة أساساً من إشعاعات جاما الصادرة عند تفكك نظائر سلاسل اليورانيوم – راديوم والثوريوم والأكتينيوم، فضلا عن البوتاسيوم **40** المشع .

وتقدر اللجنة العلمية للأمم المتحدة أن سكان العالم يحصلون في المتوسط على جرعة فعالة سنوية تقدر بحوالي **0.41** مللي سيفرت/سنة، لكل فرد من إشعاعات جاما المنطلقة من الأرض طبيعياً. وهذا المعدل يزيد قليلاً عن متوسط ما يتلقاه الفرد الذي يعيش عند مستوى سطح البحر من الأشعة الكونية.

وتجدر الإشارة، إلى أن هذا المعدل يختلف اختلافاً واسعاً تبعًاً لنوع التربة التي يعيش عليها الإنسان. ففي البرازيل، على سبيل المثال، يتراوح معدل الجرعة السنوي من الأشعة الأرضية في شوارع مدينة جوارأباري بين حوالي **8** ، **15** مللي سيفرت/سنة.

وعلى الشاطئ الجنوبي الغربي من الهند يتراوح معدل التعرض السنوي من الأشعة الأرضية في بعض الأماكن بين **3.8** حتى **17** مللي سيفرت/سنة، وفي منطقة رامسار في إيران، حيث توجد ينابيع غنية

بالراديوم، قد يصل معدل التعرض السنوي في بعض هذه الأماكن إلى ما يقرب من **400** مللي سيفرت/سنة.

ج – غاز الرادون Radon Gas

إن المساهم الأكبر في تعرض البشر طبيعياً للإشعاعات المؤنية هو غاز الرادون المنبثق من التربة بسبب تفكك سلسلتي اليورانيوم والتوريوم. والرادون هو غاز عديم اللون والطعم والرائحة تصل كثافته إلى حوالي ثمانية أضعاف كثافة الهواء، ورغم أنه خامل كيميائياً، إلا أنه يتميز بالنشاط الإشعاعي. ويوجد للرادون ثلاثة نظائر هي: الرادون 222 الذي ينتج عن تفكك سلسلة اليورانيوم 238 ، وتحديدا عن تفكك الراديوم226، والرادون 220 الذي ينتج عن تفكك سلسلة التوريوم 232 ، وتحديدا عن الراديوم 224 والرادون 219 الذي ينتج عن تفكك اليورانيوم 235، وتحديدا عن تفكك الراديوم 223. إلا أن أخطر هذه النظائر على الإطلاق والذي يعتبر المساهم الأعظم في الجرعة البشرية هو الرادون 222 الذي يمثل حوالي **95%** من مخاطر جميع نظائر الرادون.

ويساهم غاز الرادون بمفرده بأكثر من نصف الجرعة الطبيعية التي يتعرض لها البشر على سطح البسيطة. وتقدر اللجنة العلمية للأمم المتحدة أن الفرد يتعرض في المتوسط إلى **1.2** مللي سيفرت سنوياً بسبب دخول غاز الرادون من الجو إلى رئتيه. وعموماً، يتفاوت هذا المقدار تفاوتاً كبيراً تبعاً لنوع التربة التي يعيش عليها الإنسان ونوع المواد التي يصنع منها منزله ودرجة تركيز المواد المشعة الطبيعية في التربة وفي جدران منزله، فضلاً عن العادات المتبعة للمعيشة وتهوية المنزل.

ويزيد تركيز غاز الرادون في الأماكن وداخل المباني زيادة كبيرة على تركيزه خارجها. ويتغلغل غاز الرادون إلى المباني (خاصة الطوابق

السفلية) من الأرض فضلاً عن الكمية المتصاعدة من مواد الجدران والأسقف. ويزداد تركيز الرادون في المطابخ والحمامات التي تستخدم مواقد الغاز والمياه الجوفية الغنية بالراديوم أو الرادون.

وفي المناطق معتدلة المناخ قد لا يمثل الرادون مشاكل كبيرة نظراً لتوفر إمكانية التهوية الجيدة والمستمرة للمباني لخفض تركيز الرادون داخلها. أما في المناطق شديدة البرودة كدول الشمال في الشتاء مثلاً حيث تنقص التهوية حفاظاً على الطاقة ، يمثل غاز الرادون مخاطر جسيمة، حيث يمكن أن تصل تراكيزه في هواء المبنى سيئ التهوية إلى عدة آلاف من البكرل لكل متر مكعب، بل ربما يصل التركيز إلى عشرات الآلاف بكرل/م^3، في حين أن التركيز في الهواء الطلق يتراوح بين عدد قليل من البكرل/م^3 وعدد قليل جدا من عشرات البكرل/م^3 تبعاً لنوع التربة.

د- الإشعاعات الموجودة في جسم الإنسان

يحتوي جسم الإنسان على كميات ضئيلة من النظائر المشعة كالكربون14 والبوتاسيوم 40 (عمره النصفي 1.27×10^9 سنة). والبوتاسيوم 40 موجود في الطبيعة بنسب ضئيلة جداً مع البوتاسيوم 39 المستقر، بالإضافة إلى ذلك، تدخل الغازات المشعة مثل الرادون إلى الإنسان عن طريق التنفس، وفضلاً عن ذلك، تدخل بعض المواد المشعة إلى جسم الإنسان مع الغذاء الذي يحتوي عادة على كميات ضئيلة من المواد المشعة.

وعموماً، تختلف الجرعة المكافئة من الإشعاعات الطبيعية باختلاف المكان وارتفاعه فوق مستوى سطح البحر، وطبيعة التربة ونوع الغذاء وطبيعة المسكن وعوامل أخرى كثيرة.

ويستعرض جدول (9-1) تقديرات اللجنة العلمية للأمم المتحدة حول تأثيرات الإشعاعات الذرية الخاصة بالقيم المتوسطة التي يتعرض

لها الفرد على مستوى العالم من مصادر الإشعاعات الموجودة طبيعياً في البيئة .

9-3 الجرعات الناتجة عن المصادر الإشعاعية الصنعية

تمكن الإنسان من صنع أجهزة الأشعة السينية وتوليد الطاقة من الذرة، فضلا عن إنتاج عدد كبير للغاية من النظائر المشعة بطريقة صنعية. بذلك، أضاف الإنسان مصادر جديدة للتعرض الإشعاعي شملت هذه الأجهزة والعديد من النظائر المشعة التي أنتجها بنفسه، والتي يزيد عددها على أكثر من 1300 نظير مشع، يستخدم بعض منها في التطبيقات الطبية والصناعية والبحثية وغيرها.

جدول (9-1): المعدل المتوسطة السنوي للفرد
من مصادر التعرض الطبيعي

المصدر	المعدل السنوي للجرعة الفعالة للفرد (ملي سيفرت/سنة)
الأشعة الكونية	0.36
الإشعاعات الأرضية (خارجياً)	0.41
غاز الرادون (عبر الرئتين)	1.20
المواد المشعة الموجودة طبيعياً في جسم الإنسان وفي الأغذية والهواء	0.43
المجموع من المصادر الطبيعية	2.40

وأهم مصادر التعرض الإشعاعي الصنعية للإنسان ما يلي:

أ – الأشعة التشخصيية Diagnostic radiology

تعتبر الأشعة التشخيصية حالياً هي المسؤولة عن إيداع أكبر جرعة في البشر. فعلى مستوى العالم يتم إجراء حوالي **1500** مليون فحص سنوي بالأشعة السينية وتتراوح الجرعة للفحص الواحد (في حالة عدم تكرار الصورة أي للقطة واحدة) بين **0.2** وحتى حوالي **10** ملي سيفرت، وذلك في الدول الذي يخضع فيها التشخيص بالأشعة السينية لمراقبة كيانات وطنية متخصصة. أما في الدول التي تغيب فيها الرقابة على الممارسات التشخيصية فقد أظهرت الدراسات أن الجرعة قد تزيد على **4-5** أضعاف الجرعة في الدول المتقدمة لنفس الفحص، وذلك لغياب اختبارات الجودة على الأجهزة، ولاستخدام تقنيات قديمة وأفلام تصوير ضعيفة الحساسية، ولتكرار الصورة أكثر من مرة، ويبين جدول (6-2) متوسط الجرعة للفحص الواحد على بعض الأعضاء بالأشعة السينية، في بعض الدول المتقدمة التي وفرت هذه البيانات للجنة العلمية للأمم المتحدة.

جدول (6–2): متوسط الجرعة للفحص الواحد

على بعض الأعضاء في بعض الدول

العضو	الجرعة بالملي سيفرت للقطة الواحدة في:				
	امريكا	اليابان	إيطاليا	فرنسا	الصين
الجمجمة	0.13	0.09	0.22	1.4	–
الصدر	0.07	0.05	0.18	0.28	0.21
البطن	0.56	0.29	1.90	2.60	4.50
الجهاز البولي	1.60	0.70	7.10	10.40	–
الحوض والفخذ	0.6	0.25	3.20	1.6	–

وقد أضاف هذا الاستخدام جرعة فعالة جماعية للعالم ، فالأشعة التشخيصية هي المساهم الأعظم في إيداع الجرعات الجماعية للبشر. ومن المتوقع أن يزيد إسهامها في المستقبل لتطور الخدمات الطبية في

دول العالم النامية دون وجود رقابة وطنية على الجرعات المودعة . وفضلا عن استخدام الأشعة السينية التشخيصية انتشر في السنوات الأخيرة استخدام تقنيات الطب النووي كوسيلة تشخيصية فعالة للكثير من الأمراض . وخلال هذه التقنيات يحقن المريض بكمية من المادة المشعة ويتم تتبع سريان هذه المادة في جسم المريض بواسطة مصورة جاما للكشف عن موضع المرض وطبيعته. ورغم أن تقنيات الطب النووي انتشرت في كثير من المستشفيات إلا إن الأشعة السينية التشخيصية مازالت هي المساهم الأعظم في التعرض البشري من المصادر الصنعية.

ب – العلاج بالإشـــعاع أو بالمواد المشـــعة

يوجد في الوقت الحالي، في العالم، نحو **18000** جهاز أشعة تستخدم لعلاج بعض الأورام السرطانية لقتل خلايا الورم. فضلاً عن ذلك، اتسع استخدام تقنيات العلاج بحقن بعض المواد المشعة داخل الجسم البشري مثل حقن اليود 131 لعلاج الغدد الدرقية وغيرها ، واستخدام الفسفور 32 المشع في علاج لوكيميا الدم، إلا أن تقدير الجرعات الناجمة عن هذه الممارسات على مستوى العالم لم يتم بعد بصورة مرضية نظراً للتفاوت الشديد في تقديرات الجرعات المترتبة على هذه الممارسات حتى بين الدول المتقدمة ولعدم توفر السجلات الدقيقة لها.

إلا أن اللجنة العلمية للأمم المتحدة ترى أن الجرعات التي تودعها ممارسات العلاج بالإشعاع ضئيلة، بالمقارنة بالجرعات التي تودعها ممارسات التشخيص الإشعاعي.

ج – التفجيرات النووية وتســاقط الغبار الذري

نتج عن تجارب التفجيرات النووية في الجو، خاصة عن تلك السلسلتين الكثيفتين من التفجيرات التي تمت بين عامي 1954 ، 1958 للأولى، ثم بين عامي 1961، 1962 للثانية، انطلاق كميات هائلة من

المواد المشعة ونواتج الانشطار للبيئة، تركز معظمها على سطح الأرض في نصف الكرة الشمالي. ورغم انطلاق المئات من النظائر المشعة إلى البيئة من جراء التفجيرات النووية إلا أن أشد هذه النظائر خطورة على الإنسان هي السيزيوم 137 والاسترونشيوم 90 والزركونيوم 95 والكربون 14 والبلوتونيوم 239، وذلك لأعمارها النصفية الطويلة، ولإمكانية وسهولة وصولها للإنسان وتركزها في بعض أنسجته وأعضائه

وتقدر اللجنة العلمية للأمم المتحدة أن تلازم الجرعة الفعالة الجماعية الذي وصل فعلاً للبشر أو سيصل خلال مئات السنين التالية من جراء تلك التفجيرات يبلغ حوالي **30** مليون فرد0سيفرت، (وصل منها حوالي **15%** حتى عام 2000م) . ويترتب على هذه الجرعة، باستخدام معامل خطورة مقداره 6×10^{-2} لكل فرد0سيفرت، حوالي مليون وثمانمائة ألف حالة سرطان إضافية بين سكان العالم.

د – الطاقة النووية Nuclear Power

بدأ إنتاج الطاقة الكهربائية والحرارية من المفاعلات النووية منذ أواخر الخمسينيات من القرن العشرين. ويوجد في الوقت الحالي حوالي 450 مفاعل نووي في دول العالم تنتج حوالي **17%** من الطاقة الكهربائية المنتجة في العالم. وتعتمد بعض الدول اعتماداً هائلاً على الطاقة المولدة من المفاعلات النووية، مثل فرنسا التي تمثل الطاقة النووية **75%** من إجمالي الطاقة الكهربائية المولدة فيها. وتوجد الآن مفاعلات نووية لتوليد الطاقة في حوالي 31 دولة.

وتسهم الطاقة النووية من خلال تشغيل المفاعلات النووية وإنتاج الوقود النووي واستخراجه من المناجم ومعالجته وإعادة معالجته والتخلص من نفاياته بجرعات إشعاعية يتكبدها البشر جميعاً على سطح الأرض. وتقدر اللجنة العلمية للأمم المتحدة أن تلازم الجرعة الفعالة الجماعية الناتج عن الطاقة النووية وتشغيل المفاعلات ودورة الوقود تبلغ حوالي **800** فرد.سيفرت لكل سنة على مستوى العالم.

هـ – الحوادث النووية Nuclear Accedent

تحدث بعض الحوادث النووية عن الطاقة النووية وعن استخدامات المصادر المشعة في التطبيقات الطبية والصناعية وغيرها. ومن أشهر هذه الحوادث حادث مفاعل تشرنوبل بأكرانيا الذي تمخض عن **31** قتيلاً فضلاً عن **600000** فرد.سيفرت من تلازم الجرعة الفعالة على مستوى نصف الكرة الشمالي وخاصة أوربا، مما سيسفر عن حوالي 36000 حالة سرطان إضافي على مدى التاريخ. وهناك العشرات من الحوادث الأخرى مثل حادث مفاعل ثرى مايل أيلاند في الولايات المتحدة الأمريكية.

كذلك، وقع في العالم عدد من حوادث سقوط أقمار صناعية وغرق غواصات نووية وحوادث مصانع معالجة الوقود في كل من المملكة المتحدة واليابان وروسيا وغيرها. كما وقعت العشرات بل المئات من الحوادث مع المصادر الصغيرة المستخدمة في التطبيقات الطبية والصناعية والبحثية أزهقت عشرات الأرواح وأودعت تلازماً محدوداً من الجرعات الفعالة في المدن التي وقعت فيها هذه الحوادث.

ويبين جدول (9-3) : نسب إسهام التعرضات الإشعاعية من المصادر الطبيعية والصنعية في الجرعات الجماعية للعالم. وتجدر الإشارة إلى أن بعض هذه المصادر تودع جرعاتها في الإنسان بصفة سنوية، في حين أن البعض الآخر يمثل تلازماً للجرعة على مدى الحياة.

جدول (9–3): الجرعة الجماعية السنوية وتلازم الجرعة الجماعية من بعض مصادر الإشعاعات الطبيعية والصنعية

المصدر	الجرعة الجماعية سنوياً

	بوحدة فرد0 سيفرت
الخلفية الإشعاعية الطبيعية	12 ميلون
التشخيص الطبي	5 مليون
إنتاج القوى النووية	1000
المصدر	تلازم الجرعة الجماعية بوحدة فرد 0سيفرت
التساقط النووي عن تفجيرات الأسلحة النووية	5 مليون
الحوادث النووية	600 ألف

9-4 الحدود القصوى المسموح بها من الجرعات الإشعاعية

Maximum Permissible Doses (MPD)

أ – اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية (ICRP)

تأسست هذه اللجنة منذ عام 1928 بجهود العلماء من بعض الدول (وليس الدول) عندما استشعر هؤلاء العلماء مخاطر الإشعاعات المؤينة. وحتى الآن تعتبر هذه اللجنة هي الهيئة الدولية المسؤولة عن تحديد القيم القصوى للجرعات الإشعاعية التي يسمح بالتعرض لها، وعن إصدار التوصيات الخاصة بكيفية تداول ونقل وتخزين المواد المشعة، وكيفية التخلص الآمن من النفايات المشعة، وتصدر هذه اللجنة توصياتها بشأن الوقاية من أخطار الإشعاعات المؤينة بطريقة شبه دورية، وتجدر الإشارة إلى أن معظم القوانين والتشريعات التي تسنها الدول بخصوص التعامل مع الإشعاعات ومصادرها تنبثق أساساً عن توصيات هذه اللجنة.

ومن باكورة أعمال وأهم توصيات هذه اللجنة بشأن الفترات الزمنية لتعرض العاملين ما يأتي:

1- عدم زيادة ساعات العمل للعاملين في الأماكن التي تحتوي على مواد مشعة أو إشعاعات مؤينة على 7 ساعات في اليوم

2- عدم زيادة أيام العمل على خمسة أيام في الأسبوع.

3- يجب ألا تقل الإجازة السنوية للعاملين بالإشعاعات أو المواد المشعة عن شهر في السنة.

4- يجب قضاء العطل والإجازات بعيداً عن أماكن العمل التي تتضمن مصادر مشعة.

ب – الحد الأقصى للجرعة المسموح بها MPD

أصدرت اللجنة الدولي للوقاية الإشعاعية عام 1956 توصياتها بشأن الحد الأقصى للجرعة الإشعاعية المسموح بها.

وأطلق على هذا الحد، عندئذ، اسم الجرعة القُصوى المسموح بها، وهذا الحد هو:

5 رم في السنة أي 50 مللي سيفرت/سنة

أو 1 مللي سيفرت في الأسبوع

9-5 توصيات اللجنة الدولية (ICRP) رقم 26 لعام 1977م

في نشرتها السادسة والعشرين قامت اللجنة الدولية بتقسيم التأثيرات البيولوجية للإشعاعات المؤينة إلى نوعين رئيسين هما:

أ- التأثيرات العشوائية The stochastic effects

هي تلك التأثيرات التي يتناسب احتمال حدوثها مع قيمة الجرعة دون النظر إلى مقدارها، أي أنه لا توجد عتبة معينة يحدث بعدها

المرض ولا يحدث قبلها، وإنما يمكن أن يحدث المرض من أي جرعة مهما قلت، ولكن يزيد احتمال حدوث المرض بزيادة الجرعة، ولا تعتمد حدة المرض على مقدار الجرعة . وتنتمي جميع أنواع السرطانات والأمراض الوراثية إلى تلك التأثيرات اللاعتبية.

ب- التأثيرات الحتمية The deterministic effects

هي تلك التأثيرات التي لا تحدث إلا بعد أن تتجاوز قيمة الجرعة عتبة (حد) معين ، وبعد تجاوز هذه العتبة يحدث التأثير بصورة حتمية .

ومن الأمراض التي تنتمي إلى هذا النوع من التأثيرات المرض الإشعاعي ومرض الكتراكت (عتامة عدسة العين) وأمراض الأوعية الدموية. فهذه الأمراض لا تظهر في الشخص المتعرض للإشعاع إلا بعد أن تتجاوز الجرعة حداً معيناً.

توصيات للجنة (ICRP) لعام 1977

كانت توصيات اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية الصادرة بنشرتها رقم 26 لسنة 1977 ما يلي:

أ – لن يتم إقرار نظام معين للتعرض الإشعاعي، ما لم ينتج عن ذلك فوائد محددة .

ب– يجب أن يبقى التعرض عند أقل حد معقول، وأن تؤخذ في الحسبان الظروف الاقتصادية والاجتماعية لكل دولة .وهذا هو المبدأ المعروف باسم **"ALARA** أي أقل ما يعقل إنجازه **As Low as Reasonably Acheivable** "

ج – يجب ألا تتجاوز الجرعة المكافئة الحدود التي أوصت بها اللجنة،

حتى لا يحدث أي من التأثيرات الحتمية ، وحتى يكون احتمال

حدوث التأثيرات العشوائية أقل ما يعقل إنجازه.

ولخفض احتمال حدوث التأثيرات، يجب ألا تزيد الجرعة المكافئة عن **5 رم** في السنة، وذلك إذا كان الجسم يتعرض لمجال إشعاعي منتظم. أما إذا كانت أعضاء الجسم المختلفة تتعرض لقيم متفاوتة من الإشعاعات، فيجب أن يؤخذ في الاعتبار ما يعرف باسم المعامل الوزني Weighting factor W_T للعضو المعين (ليس الوزن الحقيقي وإنما احتمال حدوث الضرر فيه). وهذا المعامل هو عبارة عن نسبة هذا العضو إلى الجسم ككل من حيث احتمال حدوث الضرر. فإذا كانت الجرعة المكافئة السنوية للجسم ككل هي $\mathbf{D_o}$ ، فإنه يجب ألا تتجاوز الجرعات المكافئة للأعضاء المختلفة هذه القيمة، أي أن مجموع الجرعات المكافئة السنوية للأعضاء يجب أن تكون ضمن حدود الجرعة المكافئة للجسم ككل أو أقل منها:

$$\Sigma W_T \times D < D_o$$

ملاحظة هامة: لم تعد صفة مكافئة بهذا المفهوم متداولة منذ عام 1991م

ويبين جدول (9– 4): قيم المعامل الوزني والجرعة المكافئة للجسم ككل ولبعض الأعضاء.

جدول (9–4)

اسم العضو البشري	قيمة المعامل الوزني	الجرعة المكافئة السنوية (مللي سيفرت)
الجسم ككل	1	50
الأطراف (الأيدي والأرجل)	0.25	200
الثدي	0.15	330

النخاع العظمي	0.12	410
الرئة	0.12	410

9-6 توصيات اللجنة الدولية(ICRP) رقم 60 في يناير 1991

بعد أن تبين للجنة العلمية للأمم المتحدة المعنية بتأثيرات الإشعاعات الذرية وللجان العلمية الوطنية المختلفة عدم الدقة الكبير في معامل الخطورة الذي كان معمولاً به، وأن تقديرات الإصابة بالسرطان المستحث بالإشعاع يزيد بحوالي **5 أضعاف** عن التقديرات السابقة، وبعد أن تبين وجود خلل في بعض المفاهيم المطبقة مثل معامل النوعية والجرعة المكافئة وغيرهما، أصدرت اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية توصياتها الشهيرة، التي غيرت الكثير من المصطلحات والمفاهيم ووضعت حدوداً جديدة للتعرضات الإشعاعية التي ينبغي عدم تجاوزها، سواءً بالنسبة للعاملين المهنيين بالإشعاع والمواد المشعة أو بالنسبة لعامة البشر، أما بالنسبة للتعرضات الطبية وهي تلك التعرضات التي يتكبدها المرضى خلال تشخيص مرضهم أو علاجهم بالإشعاع، أو التي يتكبدها تطوعياً مساعدو المرضى الذين يعاونوهم أثناء التشخيص أو العلاج فقد وضعت قيود (وليس حدود)على هذه الجرعات الطبية، وهناك فرق كبير بين الحد والقيد، فالحد قيمة لا يجوز تجاوزها إطلاقاً، أما القيد المفروض على التعرضات الطبية فهي قيمة يجوز تجاوزها عند الضرورة بشرط أن يخضع من يتجاوزها للمساءلة عن مبررات تجاوزها أمام لجنة مراجعة أخلاقية وطنية **ethetical review committee** تحددها الدولة، على أن يحاسب كل طبيب يتعدى القيود الموضوعة دون قبول تبريره لهذا التجاوز من قبل هذه اللجنة، والحدود الجديدة التي أوصت بها اللجنة هي :

أ – حدود التعرض المهني

التعـرض المهنـي هـو ذلـك التعـرض الـذي يتكبـده العـاملون بالإشعاعات المؤينة أو المواد المشعة كجزء من عملهم الدائم أو المؤقت، وبسبب هذا العمل نتيجة لأوضاع أقرتها الجهة الرقابية المسؤولة عن الوقاية من الإشعاع في الدولة وتخضع لمراقبة المستخدم . وتجدر الإشارة إلى أن تعرض جميع الأطباء والفنيين الذين يقومون بممارسات تتضمن إشعاعات مؤينة أو مادة مشعة ينتمي إلى التعرض المهني (وليس الطبي)، ويجب على المرخص له بالممارسات والمصادر المشعة مراقبة حدود التعرض المهني وهي:

(1) جرعة فعالة متوسطة مقدارها **20 مللي سيفرت سنوياً**، ويجوز زيادة الجرعة الفعالة في سنة واحدة على حد **العشرين مللي سيفرت**، بشرط ألا تتجاوز **50 مللي سيفرت**، وبشرط ألا تتجاوز الجرعة الفعالة خلال أي خمس سنوات متعاقبة **100 مللي سيفرت** .

(2) جرعة مكافئة لعدسة العين مقدارها **150 مللي سيفرت في السنة**.

(3) جرعة مكافئة للأطراف (الأيدي والأقدام) أو الجلد مقدارها **500 مللي سيفرت/سنة**.

(4) حد التعرض المهني للمرأة الحامل هو **2 مللي سيفرت طوال فترة الحمل** إذا كان التعرض خارجياً. أما إذا كان التعرض داخلياً يصبح الحد هو **1 مللي سيفرت** طوال فترة الحمل. والسبب في الاختلاف بين الحدين هو أنه يجب ألا تتجاوز جرعة الجنين طوال فترة الحمل **1 مللي سيفرت**. وعند التعرض الخارجي تمتص نسبة من الإشعاع في جسم الحامل تقدر بحوالي **50%** وتصل النسبة الباقية للجنين ، أما في حالة التعرض الداخلي فتتوزع الجرعة بالتساوي بين الام والجنين

(5) بالنسبة للصبية الذين تتراوح أعمارهم بين السادسة عشر والثامنة عشر الذين تقتضي دراستهم أو تدريبهم التعرض للإشعاع يجب ألا يتجاوز تعرضهم الآتي:

أ - جرعة فعالةى مقدارها **6 مللي سيفرت/سنة** .

ب - جرعة مكافئة للأطراف أو الجلد مقدارها **150مللي سيفرت/سنة.**

(6) لا يجوز تكليف من تقل أعمارهم عن ستة عشر عاماً بأعمال تتضمن أي تعرض إشعاعي.

(7) لا يجوز السماح لأي فرد يقل عمره عن **18 عاماً** بالعمل في مناطق مراقبة ما لم يخضع لإشراف مباشر ولأغراض التدريب فقط.

ب – حدود التعرض لعامة البشر

تعرض عامة البشر هو ذلك التعرض الذي يتكبده أي فرد من عامة البشر من مصادر الإشعاع باستثناء التعرض المهني أو الطبي. ويجب على المرخص له بممارسات بمصادر مشعة أن يتخذ كافة الإجراءات التي تحقق الالتزام بحدود تعرض عامة البشر من جراء ممارساته. وحدود التعرض لعامة البشر هي:

(1) الحد السنوي للجرعة الفعالة لعامة البشر هو **1 مللي** سيفرت/سنة، ويجوز أن يزيد الحد لسنة ما عن **1 مللي** سيفرت بشرط ألا تتجاوز الجرعة الفعالة لأية خمس سنوات متعاقبة **5 مللي سيفرت**.

(2) الحد السنوي للجرعة المكافئة لعدسة العين لعامة البشر هو **15 مللي سيفرت/سنة**، والحد السنوي للجلد هو **50 مللي سيفرت/سنة** .

(3) الحد السنوي لاندخال المواد المشعة بالنسبة لعموم البشر يمثل **جزءا من عشرين جزءاً** من الحد السنوي للاندخال للعاملين المهنيين.

9-7 الأخطار الإشعاعية

أ – الأخطار الإشعاعية الخارجية

هي تلك الأخطار الناجمة عن مصادر مشعة أو أجهزة موجودة

خارج جسم الإنسان.

ب – الأخطار الإشعاعية الداخلية

هي تلك الأخطار الناجمة عن اندخال (دخول) المواد المشعة داخل جسم الإنسان سواء عن طريق التنفس أو البلع أو الحقن أو الجروح أو المسام، وتختلف أساليب الوقاية من الأخطار الخارجية عن الأساليب المتبعة
للوقاية من الأخطار الداخلية، وتخضع الأخطار الخارجية لثلاثة عوامل هي: زمن التعرض، والمسافة، والحواجز الواقية.

9-8 زمن التعرض

من المعروف أن الجرعة المتراكمة في الإنسان تتناسب طردياً مع الزمن أي أن $D = D_o \times t$ ، حيث D هي الجرعة المتراكمة ، D_o هو معدل الجرعة، t هو زمن التعرض. لذلك، فإن أبسط أساليب الوقاية من الأخطار الخارجية هو قضاء اقل فترة زمنية ممكنة في الأماكن التي توجد فيها الإشعاعات المؤينة.

9-9 المسافة

ورد في الباب الرابع أن معدل سيولة الجسيمات أو الإشعاعات الصادرة عن مصدر مشع في شكل نقطة يتناسب تناسباً عكسياً مع مربع المسافة. ولما كان معدل الجرعة يتناسب تناسباً طردياً مع معدل سيولة الجسيمات أو الإشعاعات، فإنه يتضح أن معدل الجرعة يتناسب تناسباً عكسياً مع مربع المسافة أي أن:

$$D_1 \times R_1^2 = D_2 \times R_2^2$$

وهذا ما يعرف بقانون التربيع العكسي حيث D_1 معدل الجرعة عند مسافة R_1 من المصدر، D_2 معدلها عند مسافة مقدارها R_2 من نفس المصدر.

9- 10 الدروع (الحواجز) الواقية The shlelds

تعتبر الحواجز الواقية من أهم وسائل الوقاية من الأخطار الخارجية. ففي بعض الأحيان تكون شدة المصدر كبيرة، بحيث لا يمكن الاقتراب منه حتى لمسافة مئات الأمتار . لذلك، توضع المصادر المشعة عادة داخل دروع واقية. ويتوقف نوع مادة الدرع وسمك جداره على نوع الإشعاعات وطاقاتها، وعلى شدة المصدر، وكذلك على معدل الجرعة المطلوبة خارج هذا الدرع.

الباب العاشر

الاستخدامات التطبيقية للإشعاعات والنظائر المشعة

Application of radiation and radioactive isotopes

10-1 مقدمة

مع تطور علم الفيزياء النووية اتسعت مجالات الاستخدامات التطبيقية للإشعاعات والنظائر المشعة. وشملت هذه الاستخدامات مجالات شتى كالزراعة والصناعة والطب والتعدين. كما امتدت مجالات استخدام الإشعاعات والنظائر المشعة لتشمل عدة نواح أخرى كالكشف عن الجريمة ودراسة البيئة وتحديد أعمار الأثريات وغيرها. ويعرض هذا الباب بعض هذه الاستخدامات خاصة في مجال الزراعة والصناعة والطب.

10-2 بعض استخدامات الإشعاعات والنظائر المشعة في الزراعة والأغذية

تستخدم الإشعاعات المؤينة والنظائر المشعة، في وقتنا الحالي، استخداماً واسعاً في عدة مجالات زراعية بغرض زيادة الدخل الزراعي، وفي عمليات حفظ المحاصيل الزراعية. وأهم مجالات استخدام الإشعاعات المؤينة في الزراعة ما يلي:

1- زيادة إنتاجية الأرض.
2- استنباط أنواع جديدة من المحاصيل الغذائية ذات نسبة عالية من البروتين.
3- إنتاج محاصيل ذات مقاومة عالية للأمراض وللتقلبات الجوية.
4- تحديد أماكن مصادر المياه واستخدامها بكفاءة عالية.
5- تحديد كيفية امتصاص النباتات للأسمدة والكيماويات المخصبة.

6- مقاومة الحشرات والآفات النباتية والحيوانية.
7- منع أو تقليل التالف الناتج عن تخزين المحاصيل.
8- زيادة إنتاجية الألبان واللحوم في الحيوانات والطيور .

10-2-1 التغييرات الوراثية للمحاصيل Crop Mutations

خلال الثلاثين عاماً السابقة تم إجراء آلاف التجارب على البذور والنباتات بغرض إحداث بعض التغيرات في خصائصها، وذلك بتشعيعها بالإشعاعات المؤينة مثل إشعاعات جاما والنيوترونات والجسيمات المشحونة. كما أجريت العديد من التجارب لاختيار البذور ذات المواصفات المعينة، لإعادة غرسها والحصول بالتالي على نوعية أفضل إنتاجاً دون ما إتلاف للبذرة، وعند اختيار الجرعات الإشعاعية المناسبة للتعرض يمكن أن تتغير بعض الخصائص الوراثية مما يؤدي إلى زيادة الإنتاج، أو إلى اختصار الزمن اللازم لاحتمال نمو النبات، أو إلى استنباط أنواع جديدة ذات مقاومة عالية للأمراض وللتقلبات الجوية. ففي بعض الدول أمكن زيادة إنتاجية وحدة المساحة من الأرز والشعير والذرة والقمح والبقول والشوفان، وفي بعض الأماكن أمكن إنتاج نوع جديد من الأرز يحتوي على نسبة مضاعفة من البروتين.

10-2-2 مقاومة الحشرات والآفات بالإشعاع

يعتبر وجود بعض أنواع الحشرات نافعاً وذلك بغرض المحافظة على التوازن الطبيعي . وعلى الرغم من ذلك فهناك أنواع كثيرة من الحشرات تتجاوز أضرارها منافعها، وتشكل خطورة كبيرة على حياة البشر والنباتات وعلى الموارد الاقتصادية. وتشكل الكميات المفقودة من الإنتاج الزراعي العالمي بسبب الحشرات والآفات الزراعية أكثر من **10%** من الإنتاج الكلي، أي ما يعادل إنتاج دولة مثل الولايات المتحدة الأمريكية، وعلى الرغم من تطور المبيدات الكيميائية لمقاومة الآفات

والحشرات إلا أنه قد ثبت أن فعاليتها ليست كافية فضلا عن مضارها، **وذلك لعدة أسباب أهمها :**

أ – تولد مناعة لدى بعض الآفات والحشرات ضد هذه المبيدات.
ب– تترك معظم المبيدات بقايا المواد السامة على المحاصيل، مما يشكل خطورة على حياة البشر والكائنات الأخرى.
ج – تلوث البيئة بسموم المبيدات.

لذا، فقد انتشرت عملية استخدام الإشعاعات لمقاومة الآفات خلال السنوات الأخيرة، وقد أثبتت نجاحاً كبيراً في بعض الميادين، وتتمثل هذه العملية في تعقيم ذكور الحشرات بأعداد كبيرة وذلك بتعريضها لجرعات إشعاعية عالية من إشعاعات جاما، ثم يتم إطلاق هذه الذكور بعد التعقيم لتنافس الذكور غير المعقمة على الإناث الموجودة في المنطقة الموبوءة.

وعند تقابل الذكور المعقمة مع الإناث لا تحدث عملية التناسل، وبتكرار إطلاق أعداد كبيرة من الذكور المعقمة تقل كمية الحشرات في المنطقة الموبوءة بسرعة كبيرة، وقد نجحت العديد من التجارب في القضاء على ذبابة الفاكهة في جزيرة كابري بإيطاليا، وعلى ذبابة الدودة اللولبية في الولايات المتحدة، وهي ذبابة تضع بيضها على جروح الحيوانات فتؤدي إلى قتلها، وأدت هذه الطريقة إلى توفير عدة عشرات بل ومئات الملايين من الدولارات في العديد من دول العالم. وقد شاركت الوكالة الدولية للطاقة الذرية مع دول إفريقية في عدة مشاريع للقضاء على ذبابة تسي تسي التي تستوطن جنوب الصحراء الإفريقية وتؤدي عند لدغها إلى نوع من الشلل يصيب الإنسان أو الحيوان وهو المرض المعروف بمرض النوم.

10-2-3 استخدام النظائر المشعة لتحديد طرق وأزمنة التسميد

يعتبر استخدام الأسمدة للنباتات أحد العوامل الهامة في زيادة المحصول. ومن العوامل الهامة في هذا الشأن استفادة النبات العضوي

من السماد المعين. ولقد استخدمت النظائر المشعة والتقنيات النووية لإجراء دراسات بيولوجية وتحديد أنسب الأماكن لوضع السماد، والكميات اللازمة، ووقت التسميد. فاستخدام السماد بطريقة عفوية يمكن أن يؤدي إلى نتيجة عكسية وهي إتلاف النبات فضلاً عن الخسارة المادية بسبب شراء كميات تزيد عن حاجة النبات.

وتتلخص الطريقة في إضافة بعض النظائر المشعة والقابلة للذوبان في الماء إلى السماد، وعند متابعة النشاط الإشعاعي للنظائر التي يمتصها النبات مع السماد يمكن تحديد كمية السماد الممتص وبالتالي الكمية اللازمة منه للنبات وأنسب الأماكن التي يوضع فيها ليحقق أكبر قدر من الامتصاص.

10-2-4 حفظ الأغذية بالإشعاع Food preservation by radiation

تبلغ نسبة التلف الناتج عن تخزين المواد الغذائية ما بين **25-30%** من الإنتاج العالمي، وتعتبر هذه النسبة عالية، خاصة في عالم مهدد بالجوع. وترتفع نسبة التلف في الدول النامية عنها في الدول المتطورة، وقد ثبت أنه يمكن إطالة مدة تخزين المنتجات الغذائية دون تلف عند تعريض هذه المنتجات لجرعات إشعاعية معينة دون حدوث أي أضرار أو آثار جانبية، سواء للبشر أو الحيوانات الذين يتناولون تلك الأغذية. فقد تم إجراء التجارب على أكثر من **180000** فأر يتم تغذيتها بالكامل بأغذية محفوظة بالإشعاعات بجرعات إشعاعية تصل إلى أكثر من **2.5** ميغاراد، ولم تظهر عليها أية أعراض مرضية، وقد أثبتت التجارب أنه يمكن زيادة مدة التخزين للعديد من المنتوجات الغذائية ، كالبصل والبطاطس والبقول والحبوب والفاكهة والمعلبات سواء السمكية أو غيرها، لمدد تتراوح بين عدة **أسابيع وعدة شهور**. ويعرض شكل (10-1) صورة لمجموعتين من الفاصوليا مخزنتين في نفس الظروف، إحداها (اليمنى) لم تُعرض للإشعاعات، والثاني (اليسرى) تم تعريضها لجرعة صغيرة من إشعاعات جاما. كما يبين شكل (10-2) صورة لموز

مخزن في نفس الظروف لنفس المدة الزمنية، حيث يلاحظ التلف على المجموعة العليا التي لم تتعرض للإشعاع في حين قل التلف في المجموعة الثانية التي تعرضت لجرعة مقدارها **15** كيلوراد، وانعدم التلف تقريباً في المجموعة الثالثة التي تعرضت لجرعة مقدارها **25** كيلوراد.

شـــكل (10-1)

شـــكل (10- 2)

10-3 بعض استخدامات الإشعاعات والنظائر المشعة في الصناعة

تستخدم الآن المصادر المشعة والإشعاعات المؤينة في عدة مجالات صناعية مختلفة، وذلك بغرض تحسين نوعية المنتجات الصناعية أو إجراء فحوص الجودة على المنتجات دون تحطيم العينة. ويمكن القول، أنه لا توجد في الوقت الحالي صناعة كبيرة إلا وتقوم في جزء من أجزاءها على استخدام الإشعاعات والمصادر المشعة. وبعض هذه الاستخدامات ما يلي:

أ- استخدام النظائر المشعة لتتبع الأثر Radioisotopes as Tracer

وتتمثل هذه العملية في إضافة كمية صغيرة من نظير مشع ملائم إلى مادة يراد تتبع أثرها، وبمتابعة أثر النظير المشع يسهل متابعة انتشار المادة. وتستخدم هذه الطريقة في عدة عمليات صناعية كالتهوية لدراسة معدل السريان، وكفاءة الترشيح، وفي عملية خلط السوائل والمساحيق والغازات. كما تستخدم هذه العملية في اختبار سريان السوائل في خطوط الأنابيب وفي الكشف عن تسرب السوائل أو الغازات من هذه الخطوط وعن وجود أية فقاعات غازية، وفي تحديد نوعية اللحام في الفلزات فضلاً عن عدة تطبيقات أخرى.

ب- التصوير الإشعاعي بإشعاعات جاما Gamma radiography

يستخدم التصوير بالأشعة السينية في عدة مجالات صناعية كطريقة أساسية لإجراء اختبارات الجودة على المنتجات الصناعية دون إتلافها، ولكنه ونظراً للقدرة الاختراقية الصغيرة للأشعة السينية، ولكبر حجم الجهاز الذي يصدر هذه الإشعاعات، فقد حلت محلها إشعاعات جاما، حيث يمكن عمل مصدر من الإيريديوم 192 أو الكوبلت60 أو السيزيوم 137 المشعة لا يزيد حجم أي منها عن **2×2×4**مم^3 ويمكن استخدامه بكفاءة أعلى كثيراً من كفاءة الأشعة السينية لاختبار الأنابيب الطويلة

واللحامات والخزانات الفلزية وأوعية الضغط العالي وغيرها ، حيث أصبحت هذه الطريقة هي الطريقة المعتمدة لاختبار الأنابيب المستخدمة لخطوط أنابيب الزيت أو الغاز، وللخزانات والمفاعلات الكيمائية وجميع أوعية الضغط العالي الفلزية.

ج- التصوير الإشعاعي بالنيوترونات Neutron Radiography

من أهم عيوب التصوير بأشعة جاما أو الأشعة السينية أن هذه الإشعاعات تمتص بمعدل أكبر كلما زادت كثافة المادة، لأن هذه الإشعاعات تتفاعل أساساً مع الإلكترونات. أما بالنسبة للنيوترونات فيتوقف معامل امتصاصها على نوع العنصر، فبعض العناصر الخفيفة تمتص النيوترونات البطيئة بشدة. لذا، يستخدم التصوير النيوتروني للكشف عن وجود أي كميات صغيرة من المواد ذات الكثافة المنخفضة داخل مادة عالية الكثافة.

د- استخدام الإشعاعات في عمليات لحام وقطع الفلزات السميكة

تستخدم في الوقت الحالي الإلكترونات المعجلة على المعجلات النووية في لحام وقطع الفلزات ذات السمك الكبير. وتتميز هذه الطريقة عن غيرها بتجانس اللحام داخل الفلز وعلى سطحه، حيث أن الوسائل التقليدية للحام يمكن استخدامها لإجراء اللحام السطحي فقط. أما الإلكترونات ذات الطاقة العالية فتتغلغل إلى الداخل وتفقد طاقتها مما يؤدي في النهاية إلى تسخين الفلز من الداخل وتنفيذ اللحام المتجانس.

هـ- استخدام الإشعاعات في صناعات المطاط وفي لحامه

ثبت أن تعرض المطاط لإشعاعات جاما يكسبه خصائص جديدة ويغير من مرونته ويسهل من عمليات تشكيله، وتستخدم حالياً إشعاعات جاما في صناعة الكوابل المعزولة بالمطاط وفي لحام شرائح المطاط

بعضها ببعض، وبالمواد الأخرى. ويتميز المطاط المتعرض للإشعاعات بمقاومة أعلى للكهرباء مما أدى إلى صغر سمك العازلات بين الأسلاك.

و- استخدام الإشعاعات في الصناعات الكيميائية وصناعة الأخشاب والطلاء

وجدت الإشعاعات المؤينة، خاصة إشعاعات جاما، العديد من التطبيقات في مجال الصناعات الكيميائية. فقد ثبت أن هذه الإشعاعات تعتبر عاملاً مساعداً لإتمام العديد من التفاعلات الكيميائية على مستوى إنتاجي. وقد تم تحويل العديد من خطوط طلاء الفلزات والسيارات في الولايات المتحدة من الطرق التقليدية إلى الطرق الحديثة باستخدام معجلات الإلكترونات للحصول على نوعية طلاء أفضل. كذلك، تستخدم الإلكترونات المعجلة وإشعاعات جاما في صناعات البلاستيك لإنتاج أنواع ذات مواصفات معينة وإنتاج أنواع من البلاستيك المخلوط بالأسمنت المسلح، للحصول على مواد ذات صلابة شديدة. كما تستخدم كل من إشعاعات جاما والإلكترونات في تحسين خصائص الخشب وإكسابه درجات معينة من القساوة وفي عمليات طلائه بحيث يصبح سطحه غير قابل للخدش ولا يتأثر بالحرق.

كذلك، انتشر استخدام الإشعاعات للحصول على نوعيات أفضل من الألياف الصناعية، وفي صناعة النسيج عموماً، حيث أمكن إنتاج العديد من الألياف التي لا تمتص الماء وتتميز بمقاومة عالية للحرارة وقدرة كبيرة على العزل الكهربائي.

ل - استخدام الإشعاعات في الصناعات البترولية والتعدين

تحتاج عمليات تكرير البترول إلى إضافة بعض الكيماويات التي تستخدم كعامل مساعد، وتتأثر هذه الكيماويات الوسيطة بمادة الفانيديوم الموجودة في الزيت الخام، وفي الوقت الحالي تستخدم عملية التحليل التنشيطي **Activation analysis** بالنيوترونات للتحقق من كفاءة

التكرير الأولى، كذلك تستخدم الإشعاعات في عمليات اكتشاف وسبر آبار البترول والمناجم والثروات الطبيعية الأخرى مثل الحديد والنحاس والنيكل والرصاص والزنك والفحم وغيره. كما تدخل الإشعاعات والطرق النووية في العديد من الصناعات الفلزية.

م- استخدام النظائر المشعة في صناعة البطاريات الكهربائية النووية

تستخدم الآن النظائر المشعة في عمل بطاريات كهربائية بقدرة كافية لتشغيل العديد من الأجهزة. وتتميز هذه البطاريات بعمر يصل لعشرات السنوات دون الحاجة إلى أي نوع من الصيانة. ويقوم مبدأ عمل هذه البطاريات على تحويل الطاقة الحرارية الناتجة عن تفكك النظير المشع إلى طاقة كهربائية، وتستخدم لهذا الغرض بعض النظائر المشعة ذات العمر النصفي الطويل مثل البلوتونيوم 238 والكوبلت 60 والسترونشيوم 90 وغيرها. وتستخدم هذه البطاريات في الوقت الحالي في الأقمار الصناعية ومحطات الأرصاد الجوية، كما تستخدم الآن بطارية لا يزيد وزنها على **30** جراماً كمصدر تغذية لجهاز تنظيم ضربات القلب، الذي يغرس في جسم الإنسان لتنظيم ضربات قلبه (شكل 10-3).

شـــكل (7 -3)

10-4 بعض استخدامات الإشعاعات والنظائر المشعة في الطب

حدث في السنوات الأخيرة تطور كبير في استخدام الإشعاعات والمصادر المشعة في الطب، سواء في مجال التشخيص أو العلاج. ويستخدم لهذه الأغراض أنواع مختلفة من المعجلات النووية كمصادر للإشعاعات
المختلفة مثل الإلكترونات وإشعاعات جاما والنيوترونات والأيونات الثقيلة. كما تستخدم النظائر المشعة مثل الكوبلت 60 واليود المشع والتكينسيوم وغيرها. كذلك، انتشر استخدام الطرق النووية كالتحليل التنشيطي بالنيوترونات وغيره في إجراء العديد من التحاليل الطبية الدقيقة بغرض التشخيص السليم للمرض. ولإيضاح مدى اتساع مجال استخدام الإشعاعات في النواحي الطبية يمكن استعراض بعض هذه المجالات فيما يلي :

أ- استخدام الإشعاعات لإنتاج اللقاحات المختلفة Vaccines production

تم في السنوات الأخيرة إنتاج العديد من اللقاحات الخاصة بوقاية الحيوانات من العديد من الأمراض الفتاكة. ويتلخص تأثير الإشعاعات على اللقاحات في تخفيض زمن المرحلة الطفيلية للنوع المعين من اللقاح، دون تخفيض قدرة هذا اللقاح على توليد المناعة عند الحيوانات المريضة. كذلك، تم حديثاً تطوير طريقة تبشر بنتائج طيبة لإنتاج لقاح ضد مرض الملاريا. وتتمثل هذه الطريقة في تشعيع البعوض حامل المرض بجرعة معينة من الإشعاعات، وعندئذ يسمح لهذا البعوض المشعع أن يعضّ

بعض المتطوعين فينتقل إليهم الميكروب، ولكنه يكون في حالة ضعيفة وغير قابل للتكاثر، فتتولد المناعة عند المتطوع. ولكن تجدر الإشارة إلى أن هذه الطريقة ما زالت في حاجة إلى المزيد من البحوث لإقرارها.

ب- استخدام الإشعاعات والنظائر المشعة في التشخيص

نتيجة لتطور إنتاج النظائر المشعة ذات الأعمار النصفية المختلفة، ولتطور الطرق والأجهزة النووية، أمكن في السنوات الأخيرة استخدام هذه

الطرق في تشخيص العديد من الأمراض مثل :

1) فحوص الغدد
2) الفحوص الكلوية
3) فحوص الأوعية الدموية وسريان الدم في أعضاء الجسم المختلفة
4) فحص القلب
5) الفحوص المعوية
6) الفحوص الرئوية
7) فحوص الكبد والبنكرياس
8) فحوص المخ، وغيرها كثير.

ويمكن استعراض مدى اتساع مجال استخدام المواد المشعة في الطب وذلك بذكر أنواع الفحوص والعلاجات التي تتم بصفة يومية في العديد من المستشفيات باستخدام اليود المشع. وأنواع هذه الفحوص والعلاجات هي :

1- فحص معدل امتصاص اليوم المشع.
2- فحص معدل استهلاك اليود.
3- فحص معدل تحول اليود في بلازما الدم.
4- فحص مدى استجابة مريض الغدد للعلاج.

5- فحص مدى الاستجابة للعلاج بأدوية الغدد.
6- فحص مدى الاستجابة للعلاج باليود المشع.

كذلك، تستخدم الطرق التحليلية النووية لإجراء العديد من الفحوص لقياس الهرمونات، والأنزيمات، والفيروسات، وبعض الأمصال البروتينية والمواد الأخرى في دم الإنسان وفي شتى أعضاء جسمه، دون تعرض المريض لأي جرعة من الإشعاعات، حيث تؤخذ العينة من المريض ثم يتم تحليلها إشعاعياً في المختبرات.

ج- استخدام الإشعاعات في العلاج Radiation therapy

تستخدم الإشعاعات والنظائر المشعة في علاج بعض الأمراض. فمثلاً، يستخدم اليود المشع في علاج بعض الأورام السرطانية في الغدد التي لا يمكن إزالتها جراحياً أو التي يتكرر نموها بعد الجراحة. وتتمثل عملية العلاج في هذه الحالة في شرب كمية من الماء تحتوي على جرعة معينة من اليود المشع. كما يستخدم كل من اليود المشع أو الفسفور المشع في علاج لوكيميا الدم، كذلك، تستخدم إشعاعات جاما والنيوترونات والأيونات الثقيلة في علاج بعض الأمراض السرطانية، أو في وقف نموها. كما تستخدم هذه الإشعاعات في مرحلة ما بعد إجراء الجراحات السرطانية.

ح- استخدام الإشعاعات في تعقيم الأدوات الطبية

Sterilizatin of medical products

تستخدم الإشعاعات استخداماً واسعاً وأساسياً لتعقيم العديد من الأدوات والمعدات الطبية التي يصعب تعقيمها بالبخار أو الحرارة، أو التي يمكن أن تتأثر نتيجة لتعقيمها بالغازات أو درجات الحرارة العالية أو الكيمياويات. وتستخدم لهذا الغرض إشعاعات جاما الصادرة من مصدر

كوبلت 60 أو من المعجلات الخطية. وللتعقيم بالإشعاعات عدة مزايا بالمقارنة بالتعقيم بالطرق التقليدية. وأهم هذه المزايا ما يلي:

1- قلة التكلفة بالنسبة لطرق التعقيم الأخرى كالبخار أو الحرارة.
2- تغلف الأدوات والمعدات المطلوب تعقيمها داخل غلاف محكم لا يدخل إليه الهواء أو الميكروبات، ثم تعرض المعدة داخل الغلاف لإشعاعات جاما فتخترق إشعاعات جاما الغلاف، وتتم عملية التعقيم والمعدة في الداخل، مما يؤدي إلى إمكانية زيادة مدة الحفظ دون فقد التعقيم طالما كان الغلاف محكماً.
3- إن التعقيم بالإشعاعات لا يؤدي إلى رفع درجة حرارة المعدة أو الأداة. لذا، فهو يعتبر تعقيم على البارد، وهذا يمكن من تعقيم جميع الأدوات والمواد الحساسة للحرارة مثل البلاستيك والمواد العضوية، ويعتبر التعقيم بالإشعاعات هو الطريقة الوحيدة والآمنة لتعقيم المواد العضوية.
4- يمكن إجراء التعقيم بالإشعاع بطرق آلية بسيطة حيث أن زمن التعرض هو العامل الوحيد في العملية.

10-5 بعض الاستخدامات التطبيقية الأخرى للإشعاع

فضلاً عن الاستخدامات المتعددة في مجال الزراعة والطب والصناعة تستخدم الإشعاعات والنظائر المشعة في العديد من المجالات الأخرى. فمثلاً، تستخدم في مجال دراسة البيئة وتلوثها. فقد انتشر استخدام التحليل التنشيطي النيوتروني أو تحليل الإشعاعات الناتجة عن قذف العينات بالبروتونات المعجلة إلى دراسة تلوث البيئة، ومعرفة مكونات هذا التلوث من المواد والعناصر، وتبلغ دقة تحديد عناصر التلوث بالطرق النووية إلى 10^{-12} جرام، وهي دقة لا يمكن تحقيقها باتباع أي من الأساليب الأخرى. وفي الوقت الحالي، أصبحت طريقة

التحليل بالتنشيط النيوتروني من أدق الطرق لتحديد تلوث البيئة بالعديد من المواد السامة كالزئبق وغيره، حيث يمكن اكتشاف وجود مثل هذه المواد مهما قلت نسبتها. كذلك، يستخدم علماء الآثار الطرق النووية لتحديد أعمار الأثريات المكتشفة ولعملية التأريخ عموماً، وذلك بقياس النشاط الإشعاعي الصادر عن الكربون 14، الذي يتكون أثناء حياة الكائن. كما تستخدم الطرق النووية للكشف عن الجرائم. فعلى سبيل المثال، يستخدم التحليل بالتنشيط النيوتروني في مضاهاة بقايا الدهان المتبقي على سيارة نتيجة حادث مع دهان السيارة التي قد تكون شاركت في الحادث ولاذ سائقها بالفرار.

وهناك العديد من الاستخدامات الأخرى للإشعاعات، كالبحث عن مصادر المياه الجوفية، وتحديد كمياتها واتجاه سريانها وسرعة هذا السريان، وكذلك في عدة مجالات أخرى لا يتسع هذا الكتيب لسردها.