وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة القادسية
كلية التربية
قسم الفيزياء

الأشعة المؤينة

مصادرها-تطبيقاتها الطبية

بحث مقدم الى مجلس قسم الفيزياء كجزء من متطلبات نيل درجة
بكالوريوس علوم في الفيزياء من قبل الطلبة

علي محمد عبد الكريم علي حسين جودة غسان سليم هادي

بأشراف
م.م.عباس عبد سويف البديري

١٤٤٠هـ ٢٠١٨م

بِسْمِ اللّهِ الرَّحمنِ الرَّحِيمِ

((يَرْفعِ اللّهُ الَّذِين آمَنُوا منْكُمْ وَالذِين أُوتُوا الْعلْمَ دَرَجَاتٍ واللّهُ بِما تَعمْلُون خَبِيرٌ))

صدق اللّه العلي العظيم

(المجادلة ايه ١١)

(***إهـــــــداء***)

نهدي هذا الجهد المتواضع الـــــــى :-

((الذين ارتوت بدمائهم ارض الرافدين الى كل من سقط مخضاً بدمه على تراب هذا الوطن))

إلى الذي قال بحقهما الباري عزوجل في محكم كتابه العزيز بسم الله الرحمن الرحيم ((ربك إلا تعبد إلا اياه وبالوالدين إحسان))

والـــــى الاستاذ عباس عبد سويف المحترم

الى كل الزملاء الذين شاركونا افراحنا واحزاننا في كل المواضع

الى القلب الذي صب اسراره في قلوبنا الى المشاعر والعواطف التي اقترنت مع عواطفنا .

شكر وتقدير

لابد لنا ونحن نخطو خطواتنا الاخيرة في الحياة الجامعية من وقفة نعود الى اعوام قضيناها في رحاب الجامعة مع اساتذتنا الكرام الذين قدموا لنا الكثير باذلين بذلك جهودا كبيرة في بناء جيل الغد لتبعث الامة من جديد وقبل ان نمضي نقدم اسمى آيات الشكر والامتنان والتقدير والمحبة الى الذين حملوا اقدس رسالة في الحياة الى الذين مهدوا لنا طريق العلم والمعرفة .

المحـــــــتويات

ت	اسم الموضوع	رقم الصفحة
١	الخلاصة	أ
٢	الفصل الاول (مقدمة عامة)	١
٣	الذرة والنواة	١
٤	الالكترون	١
٥	البروتون	١
٦	النيوترون	٢
٧	العدد الكتلي	٣
٨	العدد الذري	٣
٩	النظائر	٣
١٠	وحدة الكتلة الذرية	٤
١١	طاقة الترابط للنواة	٥
١٢	النواة الوليدة	٦
١٣	طاقة جسيمات الفا	٦
١٤	التفكك الالكتروني (تفكك بيتا السالب)	٧
١٥	جسيمات بيتا	٨
١٦	طاقة جسيمات بيتا	٨
١٧	اشعاعا جاما	٨
١٨	فوتونات جاما	١٠
١٩	قانون التفكك الاشعاعي	١٣
٢٠	ثابت التفكك الاشعاعي	١٣
٢١	الشدة الاشعاعية او النشاط الاشعاعي	١٣
٢٢	ثابت التفكك وعمر النصف البيولوجي الفعال	١٥
٢٣	عمر النصف البيولوجي وثابت التفكك البيولوجي	١٥
٢٤	عمر النصف الفعال (Te) وثابت التفكك الفعال	١٦

٢٥	وحدة قياس الشدة الاشعاعية (النشاط الاشعاعي)	١٦
٢٦	النشاط الاشعاعي النوعي	١٧
٢٧	السلاسل الاشعاعية الطبيعية	١٧
٢٨	النشاط الاشعاعي الصنعي	١٧
٢٩	الاشعة السينية	١٨
الفصـــــــل الثانـــــــي		
٣٠	استخدامات الاشعاعات والنظائر المشعة في الطب	١٩
٣١	استخدام الاشعاعات لانتاج اللقاحات المختلفة	١٩
٣٢	استخدام الاشعاعات والنظائر المشعة في التشخيص	٢٠
٣٣	استخدام الاشعاعات في العلاج	٢١
٣٤	استخدام الاشعاعات في تعقيم الادوات الطبية	٢١
الفصل الثالث		
٣٥	التاثيرات البيولوجية للاشعاعات المؤينة	٢٣
٣٦	الدروع الاشعاعية	٢٣
٣٧	دروع مصادر جسيمات الفا	٢٣
٣٨	دروع مصادر جسيمات بيتا	٢٤
٣٩	دروع اشعاعات جاما والاشعة السينية	٢٥
٤٠	المصـــــــــــادر	٣٠

الخـــــلاصة:

هي اشعاعات ذات طاقة عالية جدا تتسبب اثناء مرورها في الوسط المادي طرد الالكترونات من ذرات المادة وتحولها لأيونات، ولهذا السبب فهي ضاره جدا على صحة الانسان إذا ازدادت عن حدها ولهذا يفضل عدم الاسراف في الكشف الطبي من خلال اشعة اكس.

من امثلة الاشعة المؤينة اشعة اكس واشعة جاما وتعتبر اشعة جاما اشد خطورة من اشعه اكس بسبب احتوائها على طاقة عالية وقدرتها العالية على الاختراق في الاوساط المادية وقدرتها على الاضرار بصحه الانسان. ومن الأمثلة الأخرى عن الاشعاعات المؤينة الجسيمات المشحونة مثل جسيمات الفا (انوية ذرة الهليوم) وجسيمات بيتا لذلك يعطي العاملون في هذا المجال رعاية طبيه ووقاية عالية جدا من الاشعاع للحفاظ على صحتهم. تختلف قدرة نفاذية هذه الانواع عن بعضها البعض حيث ان الموجات الكهرومغناطيسية لها قدره عالية جدا علي النفاذ بالمقارنة بقدرة نفاذية اشعاع جسيمات الفا وبيتا حيث ان الموجات الكهرومغناطيسية تتكون من فوتونات ذات طاقه عالية جدا بينما جسيمات الفا وبيتا تتكون من الكترونات طاقتها اقل بالمقارنة بطاقة الفوتونات حيث ان الفا و بيتا يمكن ايقافها بواسطة ورقة سميكة من الورق او شريحه رقيقه من الالومنيوم بينما اشعة جاما لها قدره عالية علي اختراق الاجسام وتحتاج لإيقافها عدة سنتيمترات من الرصاص او عدة امتار من الماء للتقليل من خطورتها.

من خلال تلك المعلومات عن الاشعاع وانواعه واختلاف خطورته من نوع لأخر يمكن اعطاء فكرة مبسطه عن كيفية الوقاية من خطورته. حيث يمكن تقسيم العوامل المؤثرة الي ثلاث عوامل تختلف من حيث الأهمية هي (زمن التعرض، المسافة ، الدروع الواقية) يستخدم الاشعاع في مجالات عديدة يعتبر اهمها المجال الطبي حيث يستخدم في علاج الاورام ولكن بطاقات عالية حيث يعمل على تفتيت الخلايا المصابة بالسرطان ويعمل على توقف نموها وجرعات الاشعاع لها حدود بمعني ان ٩لكل نوع سرطان جرعه مناسبه. بحيث لا يتعدى حدوده ويؤثر سلبا على صحة المريض. ويستخدم ايضا من خلال اشعة اكس المنخفضة في تصوير الكسور في العظام. وفي مجال الصناعة يستخدم الاشعاع في تصوير انابيب البترول والكشف عن الثقوب لمنع التسريب. وفي مجال التجارة تستخدم الفيزياء الإشعاعية في الكشف عن المواد المشعة داخل الحاويات.

1- مقدمة عامة:

الإشعاعات المؤينة للوسط الذي تمر فيه، هي إشعاعات ذات طاقة عالية تعمل على تأيين الوسط الذي تمر فيه بسبب اصطدام الشعاع بذرات الوسط مما يؤدي إلى طرد بعض إلكترونات الذرات وتكوّن الأيونات في الوسط. من هذه الأشعة الجسيمات الأولية مثل الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات وأشعة ألفا التي هي عبارة عن نواة ذرة الهيليوم. كما توجد بين الأشعة الكهرومغناطيسية أنواع تتميز بطاقة عالية، فوق عدة (eV) مثل الأشعة السينية وأشعة غاما تتسبب في تأين الوسط الذي تمر فيه مثل الغازات والسوائل والمواد الصلبة، وأجسام الكائنات الحية. ولهذا فالإشعاعات المؤينة ضارة بالصحة إذا تعدت كميتها حدودا معينة.وهذا يحتم عدم الإسراف في الكشف الطبي بالأشعة السينية.

1-1 الذرة والنواة The atom and the nucleus

يتكون العنصر من وحدات متشابهة ومتناهيه الصغر تسمى الذرات وتختلف العناصر باختلاف ذراتها. وتتركب ذرة العنصر من جسم مركزي صغير الحجم يعرف بالنواة ، يدور حولها عدد من الالكترونات وتتمركز كتلة الذرة في النواة الصغيرة التي يبلغ نصف قطرها حوالي (10^{-13}cm).

1-2- الالكترون The electron

عبارة عن جسم صغير جدا تبلغ كتلته وهو ساكن (9.11×10^{-28})غم ويحمل شحنه كهربائيه سالبه مقدرها (1.6×10^{-19}) كولوم .

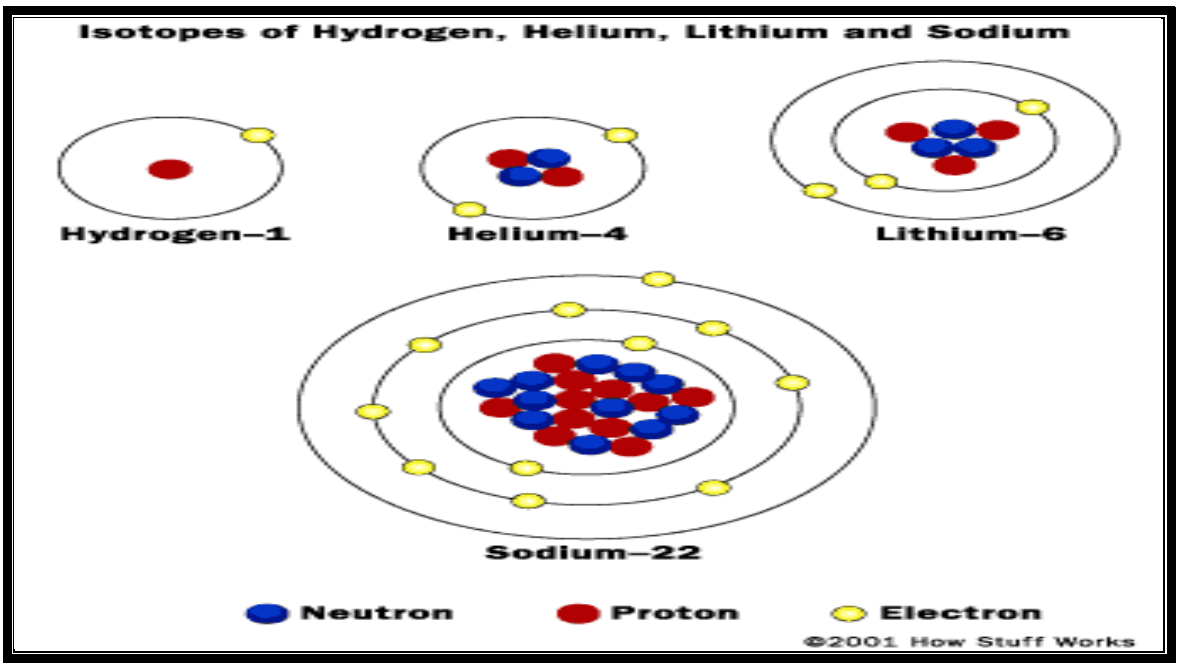
1-3-البروتون The proton

جسم صغير تبلغ كتلته السكون له (1.675×10^{-24}) غم ،اي انه اكبر من الالكترون بحوال 1839 مرة ويحمل شحنه كهربائيه مساويه تماما لشنه الالكترون ولكنها موجبه .

4-1- النيوترون Neutron

عباره عن جسم متعادل الشحنه (اي لايحمل شحنه كهربائيه) وكتلته السكون له مساويه تقريبا لكتله البروتون ،وغالبا ما يعتبر النيوترون عباره عن اتحاد بروتون والكترون ،حيث ان النيوترون الحر (اي خارج النواة) يعيش في المتوسط (15.2) دقيقه ثم يتفكك تلقائيا الى بروتون والكترون.

ورغم ان المادة الصلبه تبدو صلدة الانها في الحقيقة تعتبر فراغا ، ولكن قدرة العين البشريه و التكبير البصرية الحديثة غير قادره على تمييز هذا الفراغ و لفهم هذه الحقيقة سنفترض جدلا وجود جهاز قادر على تكبير الذرة بمقدارعشرة ملاين مرة عندئذ سوف يبدو قطر النواة، التي تحمل كل كتلة الذرة تقريبا في حدود (1سم) ، أي في حجم حبة العنب المتوسطة المستديرة ،في حين يكون أقرب مدار للنواة المدار (K) الذي يتسع لالكترونيين فقط على بعد عشرات الكيلومترات من النواة ويكون ابعد مدار وهو المدار السابع على بعد مئات بل الاف الكيلو مترات من النواة بذلك تشبه الذره في تركيبها المجموعه الشمسية حيث تحتل الشمس مركز المجموعه وتدور الكواكب التسع التابعه لها في مدارات يبلغ نصف القطر اصغرها وهو مدار عطارد (58) مليون كم تقريبا بهذا الاسلوب من التشبيه يمكن فهم الذرة كفراغ حقيقي ويبين الشكل (1-1) رسميا تخطيطا لعدد من الذرات ،حيث تحتوي النواة على كل من البروتونات والنيوترونات وتدور الالكترونات في مدارات خارجيه ،علما بان نسب الابعاد المبينه على الشكل لا تمثل النسب الواقعيه



الشكل (1-1) يبين التركيب الذري لعدد من الذرات(الهيليوم،الهايدروجين،الصوديوم،الليثيوم)

لذره متعادله كهربائيا حيث ان عدد البروتونات الموجبه في النواة يساوي عدد الالكترونات السالبه التي تدور حولها ،وتدور الالكترونات في مدارات Orbits مختلفة حول النواة و يتسع كل مدار لعدد معين من الاكترونات فيتسع اقرب مدار للنواة ويعرف بالمدار او القشرة (k) لالكترونين ،في حين يتسع المدار الثاني المعروف بالمدار(L) لثمانية الاكترونات و الثالث والمعروف بالمدار (M) لثمانية عشر الكترونا و الرابع و المعروف بالمدار (N)لاثنين و ثلاثين الكترونا ،وهكذا..

5-1 العدد الكتلي The mass number

العدد الكتلي للذرة هو عبارة عن مجموع عددي البروتونات و النيوترونات في النواة ، و يبين هذا العدد كتلة الذرة التقريبية ، وهو عبارة عن عدد صحيح و يرمز له بالحرف A.

6-1 العدد الذري The atomic number

هو عبارة عدد البروتونات في الذرة المعينة ، ويرمزله بالرمز(Z) و يرمز لذرات العناصرعادة بالحرف الاول من اسمها اللاتيني (او حرفين احيانا الاول كبير و الثاني صغير)ثم يكتب العدد الذري في الجانب الايسر لاسفل و العدد الكتلي في الجانب لاعلى . اي انه يرمز على سبيل المثال لذرة الهيدروجين بالرمز Hحيث ان عددها الذري=1 .اما الذرة الهيليوم فيرمز لهل بالرمز He حيث ان عددها الذري =2، عددها الكتلي =4، اذ تتكون نواة الهيليوم (جسيم الفا) من بروتونين و نيوترونين .كذلك ، يرمز لذرة اليورانيوم بالرمز U،حيث ان عددها الذري 92 وكتلي 238،اذ تحتوي نواة اليورانيوم على 92بروتونا و 146نيوترونا .

7-1 النظائر The isotopes

تحتوي نواة العنصر الواحد على نفس العدد من البروتونات ، الا انها يمكن ان تحتوي على اعداد مختلفة من النيوترونات و يعني هذا ان العدد الذري للعنصر الواحد لا يتغير في حين يتغير عدده الكتلي . و يقال في هذه الحالة ان للعنصر الواحد عدة نظائر . فمثلا للهيدروجين ثلاثة نظائر هي:-

1- هيدروجين H وتتكون نواته من بروتون واحد ولا يحتوي على نيوترونات (Z=1، A=1)، ويدور حول النواة الكترون واحد.

2- ديتيريوم H وتتكون نواته من بروتون و نيوترون (Z=1، A=2) ويدور حول النواة الكترون و احد.

3- تريتوم H وتتكون نواته من بروتون و نيوترونين (Z=1، A=3)ويدور حول النواة اكترون واحد.

وعموما ، يوجد لكل عنصر عدد من النظائر قد تصل احيانا الى اكثر من خمسين نظيرا للعنصر الواحد . وتكون بعض النوى هذه النظائر R الاخرى قابلة للتفكك . و بذلك ، تكون هذه النوى الاخيرة نشطة اشعاعيا Radioactive وتصدر اشعاعات في الشكل جسيمات الفا او بيتا او اشعاعات جاما .

ويوجد العنصر في الطبيعة في شكل خليط من البعض نظائره . وهنالك لا توجد ، عموما، في الطبيعة و انما يمكن انتاجها صناعيا باستخدام مفاعلات او المعجلات النووية .

والجدير بالاشارة الى ان نظائر العنصر الواحد تتحد في جميع خواصها الكيميائية ، لذا لا يمكن فصل النظائر عن بعضها بالطرق الكيميائية و انما يتم فصلها بطرق اخرى.

8-1 وحدة الكتلة الذرية (و. ك. ذ) Atomic mass unit

تستخدم وحدة خاصة لقياس كتل النوى و الذرات تعرف باسم وحدة الكتلة الذرية . وقد اشتقت هذه الوحدة على اساس اعتبار ان كتلة نظير الكربون $_6^{12}C$(12) مساوية 12 وحدة تماما . اي ان وحدة الكتلة الذرية عبارة عن 1\12 من كتلة الذرة كربون 12،اي ما يساوي (1.6555×10^{-24}) جرام وبالقياس على ذلك تكون كتلة نظير الهيدروجين $_1^1H$ (1.007825 و. ك. ذ) ، وكتلة البروتون هي (1.007277و. ك. ذ)،كتلة النيوترون هي(1 . 008665)و. ك. ذ ، و الكتلة الاكترون(0.00549)و. ك. ذ هي الواحدات الذريه للطاقه (للالكترون فولت).

في المجالات الذريه والنوويه تستخدم وحده خاصه لقياس الطاقه المعروفه بالجول في النظام المعياري العالمي وتوجد لوحده الالكترون فولت عدت مضاعفات اهمها :

(1kev) كيلو الكترون فولت ك. و .ف = 10 الكترون فولت =١٠ جول)

وحيث ان الطاقه والكتله متكافئتان وفقا لمبدا اينشتاين فانه يمكن التعبير عن وحده الكتله الذريه بوحده الالكترون فولت ،حيث ان :931 ميغا الكترون فولت=1 و.ك.ذ

9-1 طاقه الترابط للنواة Nuclear binding energy

تحتوي نواة الذرة على عدد معين من البروتونات موجبة الشحنة . تتولد بين هذه البروتونات قوى التنافر كهروساكنة تتناسب تناسبا عكسيا مع مربع المسافة بين البروتونات . و لما كانت المسافات بين البروتونات في النواة صغيرة للغاية فانه من المتوقع ان تكون قوى التنافر كبيرة للغاية ، بحيث يجب ان تتفكك النواة بسرعة . و حيث ان النواة لا تتفكك الى مكوناتها من البروتونات ، فان هذا يعني ان هناك قوى اخرى جاذبية اقوى من قوى التنافر المذكورة ، و هذه القوى الجاذبة هي ما يعرف بالقوى النووية ، و هي تؤثر بين البروتونات بعضها البعض و النيوترونات بعضها البعض ، و كذلك بين كل من البروتونات و النيوترونات ، طالما كانت هذه الجسيمات على المسافة صغيرة من بعضها (اقل من 2×10^{-13} سم) وقد ثبت ان القوى النووية بين البروتونات و النيوترونات او البروتونات بين بعضها البعض او النيوترونات بين بعضها البعض متكافئة . فانه من الناحية النووية (وليس من الناحية الشحنة) يمكن اعتبار كل من البروتون و النيوترون بمثابة جسيم واحد يطلق عليهما اسم نيوكلون Nucleon و تؤدي هذه القوى النووية الى ترابط المكونات النواة من بروتونات و نيوترونات و عدم تفككها . ونتيجة لترابط هذه مكونات النواة تقل الكتلة الفعلية للنواة عن مجموع كتل النيوكلونات المكونة لها ، وهذا الفرق بين الكتلة الفعلية للنواة ة كتل مكوناتها هو بمثابة كتلة ترابط النواة و يسمى نقص الكتلة . وبضرب هذا الفرق في الكتلة (-10) في مربع سرعة الضوء يمكن تحديد طاقة تربط النواة بيسر و هي :

$$\mathbf{B = ((NM_n + ZM_p) - M) C^2}$$

حيث M الكتلة الفعلية للنواة ،($\mathbf{M_p}$) و($\mathbf{M_n}$) كتلتا البروتون و النيوترون بالتتابع Z، N عدد البروتونات و النيوترونات بالتتابع ، c سرعة الضوء في الفراغ . وعند التعبير عن فرق الكتلة (Δm) بوحدة الكتلة الذرية (و. ك. ذ) و تحويل هذا الفرق الى الطاقة ، فانه يسهل تحديد طاقة الترابط B للنواة بوحدة ميغا الكترون فولت (م. ا .ف) من العلاقه التالية:

$$\mathbf{B = \Delta m \times 931 \quad (Mev)}$$

وطاقه الترابط المتوسطه للنيوكلون الواحد F هي عباره عن طاقه الترابط للنواه B مقسومه على عدد النيوكلونات .ويزداد تماسك النواة كلما كانت طاقة الترابط للنيوكلون كبيرة و يقل تماسكها كلما كانت هذه القيمة صغيرة . و اكثر النوى ترابطا هي النوى ذات العدد الذري المتوسط و اقلها ترابطا النوى ذات العدد الذري الصغير جدا او الكبير جدا النشاط الاشعائي Radioactivity

تتميز العديد من النظائر سوى الطبيعية او الصنعية (اي المجهزة باستخدام المعجلات او المفاعلات النووية)بخاصية تعرف باسم النشاط الاشعاعي و النشاط الاشعاعي عبارة عن تتفكك (الاضمحلال) نواة النظير تلقائيا الى نواة اصغر (او نواة ذات قيمة اقل للطاقة) مع اصدار

النواة الام

هي النواة الاصلية النشطة اشعاعيا التي تتفكك مثل النواة اليورانيوم 237 او البولونيوم 218 .

10-1 النواة الوليدة

هي النواة الناتجة عن التفكك مثل نواتا الثوريوم 234 الرصاص 213 ولحدوث تفكك الفا لنظير معين يجب ان تكون كتلة نواة هذا النظير الام M_P اكبر من مجموع كتلتي كل من الوليدة M_d وجسم الفا M_α ، اي يجب ان يتحقق الشرط

$$M_p - (M_d + M_\alpha) > 0$$

ويلاحظ ان هذا الشرط يتحقق بالنسبة بالعديد للنظائر الاثقل من الرصاص . لذا يلاحظ ان معظم النظائر الاثقل من الرصاص نشطة اشعاعيا بالنسبة لاصدار جسيمات الفا.

11-1 طاقة جسيمات الفا

تكون طاقة جسيمات الفا الصادرة عن نفس النظير متساوية و مساوية تقريبا للمقدار

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

لذلك تعتبر جسيمات الفا بصمة من بصمات النظير فبقياس طاقة جسيمات الفا يمكن تحديد النظير المشع لها .

جسيمات الفا

هي عبارة عن نواة ذرة الهيليوم 4 المكونة من بروتونين و نيوترونين وهي بذلك عبارة عن جسيمات مشحونة موجبة الشحنة ، تبلغ شحنتها ضعف شحنة البروتون . لذا فانه يمكن تحكم في مسارها باستخدام مجالات كهربائية او مغناطيسية كما يمكن تعجيلها (اي تسريعها) باستخدام معجلات النووية الى القيم عالية للطاقة و تنتمي هذا الجسيمات النووية المشحونة الثقيلة تفكك بيتا كي تكون نواة نظير معين مستقرة يجب ان تكون النسبة بين عدد النيوترونات و عدد البروتونات في هذه النواة اي (N/Z) نسبة معينه. وتتراوح هه النسبة بين 1 للنظائر الخفيفة وتزدد حتى تصل الى 1.6 بالنسبة للنظائر الثقيلة فمثلا يلاحظ ان نواة نظير الكاربون 12 ($_6^{12}C$)مستقرة حيث انت نسبة النيوترونات للبروتونات هي N/Z=6/6=1 وتعتبر هذه النواة من النوى الخفيفة . اما نواة نظير الكاربون 14 فهي نواة غير مستقرة حيث ان هذه النسبة تصبح N/Z=6/8=1.33 كذلك ، يلاحظ ان نواة نظير السيزيوم

133 مستقرة لان النسبة تكون 55/78=1.42 في حين ان نواة السيزيوم 137 غير مستقرة لان النسبة تصبح 55/82=1.49 .

12-1 التفكك الالكتروني (تفكك بيتا السالب)

اذا زادت نسبة النيوترونات الى البروتونات عن القيمة المحددة من منحنى الاستقرار بالنسبة للنضير ذي العدد الكتلي المعين فان هذا يعني ان النواة تحاول ان تصل الى حالة الاستقرار وذلك عن طريق تحول نيوترون (او اكثر) داخل النواة يعرف بالنيوترينو المضاد **v** . اي ان عملية تفكك الالكتروني هي عبارة عن تحول نيوترون داخل النواة الى بروتون وانطلاق الكترون (جسيم بيتا) ونيوترينو مضاد .ويمثل هذا التفكك بالمعادلة التاليه (10)

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

ويحدث هذا النوع من التفكك في عدت مئات من النظائر غير المستقرة (المشعة) حيث تتكون نواة عنصر جديد نتيجة لزيادة عدد البروتونات في النواة الوليدة بمقدار بروتون واحد فمثلا عند تفكك نواة الكاربون 14 تتكون نواة عنصر جديد هو النيتروجين 14 نتيجة تحول احد النيوترونات في النواة الى بروتون وينطلق كل من جسيم بيتا والنيوترينو المضاد خارجيين من النواة يمثل هذا التفكك بالمعادلة التالية .

$${}^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + e^{-} + v^{-}$$

كذلك يعتبر الكوبلت 60 من النظائر المشعة لجسيمات بيتا مع تحوله الى النيكل 60 عندما تكون نسبة النيوترونات و البروتونات قليلة ، يمكن ان تتحول النواة باسلوب اخر . حيث تاسر النواة الام احد الالكترونات الذرية من المدارات القريبة منها ، ثم يتحد هذا الالكترون مع احد بروتونات النواة ، فيتحول هذا البروتون الى نيوترون دون انطلاق اي من جسيمات بيتا خارج النواة ، ولكن ينطلق النيوترينو . ويمثل الاسر الالكتروني بالمعادلة التالية :

$${}^{60}_{27}Co \rightarrow {}^{60}_{28}Ni + e^{-} + v$$

و تجدر الاشارة الى ان النوى القابلة للتفكك البوزتروني يمكن ان يحدث لها اسر اكتروني .

13-1جسيمات بيتا

تنقسم جسيمات بيتا الى نوعين : هما جسيمات بيتا السالبة (الالكترونات) و جسيمات بيتا الموجبة (البوزترونات) ، و لكن شحنة موجبة . ولما كانت هذه الجسيمات مشحونة فانه يمكن التحكم في مسارها باستخدام المجالات الكهربائية او المغناطيسية ، كما يمكن تعجيلها الى طاقات عالية ، و تنتمي جسيمات بيتا الى فئة الجسيمات المشحونة الخفيفة .

النيوترينو

عبارة عن جسيم ذي كتلة سكون مساوية للصفر تقريبا و لا يحمل اي شحنة .

1-14 طاقة جسيمات بيتا

ان الشرط الاساسي لحدوث اي نوع من انواع تفكك بيتا هو ان تكون كتلة النواة الام اكبر من مجموع كتلة النواة الام و مجموع الكتل الناتجة هو عبارة عن الطاقة التي ينطلق بها كل من جسيم بيتا و النيوترينو (او النيوترينو المضاد) و تتوزع هذه الطاقة بين كل من جسيم بيتا و النيوترينو (او النيوترينو المضاد) بطريقة عشوائية . لذلك ، فان الطاقة الجسيمات بيتا الصادرة عن نفس النظير تتخذ قيما مختلفة ، تبدا من الصفر و لكنها لا تتجاوز قيمة الطاقة الكلية الناتجة عن التفكك ، بذلك فان قياس الطاقة جسيمات بيتا لا يدل عن هوية المصدر الذي يصدرها .

1-15 اشعاعات جاما

في اغلب الاحيان تكون النوى الوليدة الناتجة عن تفكك الفا او تفكك بيتا في حالة مثارة Excited states ويعني هذا ان طاقة النواة تكون اعلى من طاقتها في الحالة المستقرة (الارضية) ، ولا تستطيع النواة ان تعيش في هذه الحالة المثارة طويلا، ولكنها سرعان ما تنتقل الى الحالة اقل اثارة او الى الحالة (الارضية)، وتتخلص من الطاقة الزائدة عن طريق اصدار اشعاعات كهرومغناطيسية تعرف باسم اشعاعات جاما . كذلك يمكن اثارة النوى المستقرة بطرق مختلفة كالتفاعلات النووية مثلا ، حيث تعود هذه النوى المثارة من جديد الى حالتها الارضية بعد اصدارها للطاقة الزائدة في شكل اشعاعات جاما .

واشعاعات جاما عبارة عن فوتونات (موجات كهرومغناطيسية) كالفوتونات الضوئية ، ولكن ترددها عال جدا (اي انها ذات طاقة عالية جدا) مقارنة بالاشعاعات الضوئية . ولما كانت هذه الاشعاعات ليست اجساما مادية و لا تحمل اي شحنة كهربائية فانه لا يمكن التحكم بمسارها او تعجيلها باستخدام المجالات الكهربائية او مغناطيسية .ويوجد العديد من مصادر اشعاعات جاما . فمثلا يعتبر كل من الكوبلت 60 والسيزيوم 137 من مصادر اشعاعات جاما ، حيث تتفكك هذه النظائر اولا عن طريق تفكك بيتا السالب ، فتتكون نظائر النيكل60 والبريوم137 بالترتيب، في حالات مثارة مما ينتج عنه اصدار اشعاعات جاما عند تحول هذه النظائر الاخيرة من الحالة المثارة الى الحالة الأرضية. وتنتقل النواة النيكل 60 من الحالة المثارة الى الحالة اقل اثارة ذات الطاقة الاثارة الاقل وهي 1.332 ميغا الكترون فولت. فينبعث نتيجة لذلك اشعاع جاما حاملا فرق الطاقة بين الحالتين

(1.332 = 0 – 1.332) ثم تنتقل نواة النيكل من هذه الحالة المثارة الاخيرة الى الحالة المستقرة (الارضية) فينطلق فوتون جاما اخر حاملا فرق الطاقة بين الحالتين (1.332) وبصفة عامة تكون طاقة الفوتون المنطلق (E_γ) نتيجة انتقال النواة من الحالة مثارة بطاقة (E_i) الى الحالة اقل اثارة بطاقة (E_f)

$$\mathbf{E_\gamma = E_i - E_f}$$

وهنالك نظائر مشعة تطلق فوتونات جاما مباشرة، دون حدوث تفكك الفا او بيتا و من هذه النظائر نظير التكنيشيوم 99 حيث ينتج ها النظير عن تفكك نظير المولبدنيوم 99 من خلال تفكك بيتا، و يتكون التكنيسيوم 99 في الحالة مثارة ، الى انها شبه مستقرة ، حيث يبلغ العمر النصفي لهذه الحالة 6 ساعة . و بالتالي يعتبر نظير التتكنيشيوم 99 نظيرا مشعا لفوتونات جاما . و لهذا النظير استخدامات متعدد وواسعة في تشخيص العدد من الامراض و انسداد و ضيق الشرايين و الجلطات و غيرها، من خلال حقنه في المريض و تتبع سريان النظير في الاوعية الدموية و الاعضاء المختلفة للمريض

16-1 فوتونات جاما

تجدر الاشارة الى ان كل نظير مشع يصدر فوتوناته بطاقة واحدة او بقيم محددة بطاقة . فكما تبين في المثالين السابقين يصدر السيزيوم 137 فوتونات جاما بطاقة واحدة مقدارها 0.662 م ا ف ، في حين يصدر الكوبلت ٦٠فوتونات جاما بطاقتين محدودتين هما (1.332- 1.173) م ا ف . وبالتالي ، فانه بقياس طاقة او الطاقات الفوتونات المنبعثة من نظير معين يسهل تحديد هوية هذا النظير مباشرة ، وبالتالي يقال ان اشعاعات جاما الصادرة عن نظير ما وهي بمثابة بصمة لهذا النظير .

النيوترونات و مصادرها

النيوترونات هي كما عرفنا جسيمات متعادلة الشحنة . لذا، فهي لا تتأثر بالمجالات الكهربائية او المغناطيسية . وعموما ، فانه لا توجد في الطبيعة اي نظائر مشعة النيوترونات ، و لكنه يمكن انتاج نظير صناعي يستخدم كمصدر للنيوترونات وهو النظير الكاليفورنيوم 252 الذي يصدر الميكروجرام الواحد منه حوالي 2 مليون نيوترون في الثانية .وتتراوح طاقة النيوترونات المنطلقة منها ما بين (1.1 – 7)م ا ف وتوجد عدة مصادر اخرى للنيوترونات اهمها :

أ. مصدر الراديوم . بريليوم Ra – Be Source

وهو عباره خليط من كل من نضير الراديوم 226 والبريليون 9 فالراديون 226 نشط اشعاعيا ويصدر جسيمات الفا . وعند تصادم جسيم الفا مع نواة البرايليوم 9 يحدث تفاعل نووي ينتج عنه تكون نواة كربون ويطلق نيوترون واحد.

وعند خلط غرام واحد من الراديوم مع عدة جرامات من البريليوم يمكن الحصول على المصدر نيوترونات يعطي حوالي (10^{7}) نيوترون في الثانية . تتراوح طاقة النيوترونات المنطلقة منه بين حوالي (10-1) م ا ف .

الا ان هذا النوع من المصادر النيوترونية لم يعد متداولا نظرا الراديوم 226 يصدر من خلال نويداته الوليدة مثل الرصاص 214 و البولونيوم 214 كميات كبيرة من اشعاعات جاما ، وقد حل محل هذا المصدر حاليا مصادر الاميريشيوم 241 . و بريليوم 9 .

ب . مصدر الاميريشيوم . بريليوم Am-241- Be-9

يحضر هذا المصدر بطحن كمية محددة من النظير الاميريشيوم 241 مع العدد محدود من الجرامات من البريليوم 9 المسحوق ، حيث يصدر الأميريشيوم جسيمات الفا التي تتفاعل من النوى البريليوم فتصدر النيوترونات بنفس المعادلة السابقة ، و يتميز الاميريشيوم 241 على الراديوم 226 بانه لا يصدر سوى كمية ضئيلة من اشعاعات جاما و بطاقة صغيرة هي 59.5 ك ا ف . ويعطي هذا المصدر نفس المردود النيوتروني لمصدر الراديوم – بريليوم و بمدى طاقات نيترونية يغطي نفس المدى من 1 حتى حوالي 10 م ا ف.

ج . مصدر النيوترونات الفوتوني The photoneutron Source

يستخدم في هذا النوع من المصادر النيوترونية احد مصادر اشعاعات جاما بدلا من مصدر جسيمات الفا . و عند سقوط فوتون جاما على النواة البريليوم ينتج عن ذلك تكون جسيمين من جسيمات الفا وانطلاق نيوترون واحد ولكي يحدث التفاعل يجب الا تقل طاقة الفوتون جاما عن 1.67 ميغا ألكترون فولت لذا فأنه يمكن استخدام مصدر الصوديوم 24 الذي يصدر اشعاعات جاما بطاقة مقدارها 2.67 ميغا الكترون فولت . وبوضع الصوديوم 24 مع البريليوم 9 يمكن الحصول على مصدر نيوتروني يتميز عن المصادر السابقة بان طاقة النيوترونات تتخذ قيمه واحده بدل من طيف الطاقة المستمر من المصادر السابقة

د – معجلات الجسيمات المشحونة

يمكن الحصول على النيوترونات ذات طاقة محددة ، وذلك بقذف بعض النوى الخفيفة بالجسمات المشحونة كالبروتونات او الديوترونات المعجلة حتى طاقة معينة ومن هذه التفاعلات:

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

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

وعموما 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 الكترون فولت و يقذف بها هدف من التريتيوم (النظير الثالث للهيدروجين) ، فتنطلق النيوترونات ، و يمكن الحصول على عدد من النيوترونات يصل الى حوالي (10^{11}) نيوترون في الثانية بطاقة ثابتة هي 14.1 م ا ف من هذا المولد.

هـ – المفاعلات النووية Nuclear reactors

تعتبر المفاعلات النووية اكبر مصادر النيوترونات على الاطلاق حيث يمكن ان تتراوح كثافة التدفق النيتروني داخل المفاعل ما بين (10^{13}) حتى (10^{19}) نيوترون/ ثانية .سم٢). وينتج النيوترونات داخل المفاعلات عن انشطار نوى اليورانيوم . فعند انشطار نواة اليورانيوم تتكون نواتين اصغر و ينطلق نتيجة لهذا الانشطار عدد محدود من النيوترونات . وعند اصطدام هذه النيوترونات المنطلقة بنوى يورانيوم اخرى فانها يمكن ان تؤدي الى انشطارها و انطلاق عدد اخر من النيوترونات . هكذا، يحدث ما يعرف بالتفاعل المتسلسل (**Chain reaction**) ، حيث تبدا نواة واحدة بالانشطار تؤدي الى خروج عدد معين من النيوترونات و ليكن هذا العدد اثنين ، و يؤدي هذان النيوترونات الى انشطار نواتين جديدتين ، فيصبح عدد النيوترونات اربعة تؤدي بدورها الى انشطار اربع نوى جديدة، فيزداد عدد

النيوترونات المنطقة الى ثمانية .هكذا، الى ان يصل عدد من النيوترونات الحد معين يجب الا يتخطاه و الا انفجر المفاعل .

17-1 قانون التفكك الاشعاعي The radioactive decay law

يعتبر التفكك الاشعاعي مع اصدار جسيم الفا او بيتا او فوتون جاما عميلة احصائية بحتة . ويرجع السبب في ذلك الى انه لا يمكن معرفة الوقت الذي تفكك في النواة المعينة . فعند وجود نواة واحدة غير مستقرة فانه يمكن تفكك هذه النواة في الحال او خلال ثانية او بعد ساعة او يوم او عدة ملاين من السنوات . و لكن عند وجود عدد كبير جدا من النواة النظير النشطة فانه يمكن معرفة عدد النوى التي تخضع لتفكك، و علاقه هذا العدد من الزمن . فعند وجود عدد معين من النوى النشطة ، و ليكن (N_o) في لحظه معينة من الزمن ، فانه يمكن تحديد عدد النوى المتبقية (N) دون تفكك خلال الزمن مقداره (t) ، وذلك من العلاقة التالية

$$N = No\ e^{-\lambda t}$$

ويعرف هذا القانون الاسي للتفكك الاشعاعي

18-1ثابت التفكك الاشعاعي

يعرف المعامل (λ)في علاقة السابقة باسم ثابت التفكك الشعاعي . وهو عبارة عن احتمال تفكك نواة معينة في ثانية واحدة ووحدة قياس هذا العامل هي مقلوب الثانية اي (sec^{-1}) ، حيث انها تعبر عن احتمال تفكك النواة في الثانية

19-1 الشدة الشعاعية او النشاط الاشعاعي The activity

في معظم الاحيان يكون المطلوب هو معرفة عدد النوى التي تفكك في الثانية الواحدة ، وليس عدد النوى الباقية دون تفكك ويسمى عدد النوى التي تفكك في الثانية الواحدة من عينة المشعة باسم الشدة الاشعاعية للعينه او النشاط الاشعاعي للعينه . ويرمز للشدة الاشعاعية في لحظة اعداد العينة بالرمز (A_o) ، و بمرور الوقت تتناقص الشدة الاشعاعية (A) للعينة تبعا للعلاقة

$$A = Ao\ e^{-\lambda t}$$

وتحسب الشدة الاشعاعية (النشاط الاشعاعي) للعينة من واقع عدد الذرات المشعة الموجودة من هذه العينة . فاذا كان (N_o) عدد الذرات المشعة الموجودة في العينة لحظة معينة و كان (λ) هو ثابت التفكك لهذا النظير(اي احتمال ان تفكك النواة ذرة وحدة من هذا النظير في الثانية) يكون احتمال تفكك العدد(N_o) من الذرات في الثانية الواحدة هو النشاط الاشعاعي (A_o) (او الشدة الاشعاعية للعينة)، اي ان عدد التفككات التي تحدث في العينة في الثانية الواحدة ، اي ان :

$$Ao = No\ \lambda$$

ويحسب عمر النصف (العمر النصفي) من خلال العلاقة التالية:

$$T_{1/2} = 0.693 / \lambda$$

عمر النصف للنظير المعين هو عبارة عن الفترة الزمنية التي تنخفض خلالها الشدة الاشعاعية للعينة المجهزة من هذا النظير الى النصف . وبمعنى اخر فان عمر النصف هو الزمن اللازم لتفكك نصف عدد النوى الموجودة في العينة .

ولايضاح معنى العمر النصفي نفرض ان لدينا مصدرا من كوبلت 60، الذي يبلغ عمره النصفي 5.27 سنة . ونفرض ان الشدة الاشعاعية للمصدر عند التجهيز كانت ١٠ كورى. بعد مرور فترة زمنية مقدارها 5.27 سنة تنقص الشدة الاشعاعية لهذا المصدر الى النصف اي تصبح 5 كورى . وبعد مرور 5.27 سنة اخرى تتناقص شدته الى النصف مرة اخرى و تصبح 2.5 كورى ، ثم بعد مرور 5.27 سنة اخرى تتناقص الى النصف و تصبح 1.25 كورى وهكذا.

1-20ثابت التفكك و عمر النصف البيولوجي الفعال

في بعض الاحيان ، تدخل النويدات المشعة داخل الجسم الانسان من خلال عدد من المسالك مثل ابتلاع الطعام والشراب الملوث بالنويدات المشعة ، او استنشاق الهواء الملوث ، او السبب حقن النويدات المشعه في الاوردة لتشخيص مرض المريض في عمليات الطب النووي ،او علاجه او حتى من خلال الخدوش الموجوده في الجلد الذي يلوث بنويدات المشعه .

ويعرف هذا النوع من التعرف "بلتعرض الداخلي" للاشعاع ، وقد يكون اكثر خطورة من التعرض الخارجي (عندما تكون المادة المشعة موجودة خارج الجسم) . ويرجع السبب في ذلك الى ان جسيمات الفا الخارجية تمتص في طبقة رقيقة من الهواء او في طبقة الجليد الميت على اسوا تقدير . اما عن اندخال بواعث الفاوبيتا للجسم (اي دخولها عفويا) ، تودع هذه الجسيمات طاقتها بالكامل في منطقة ضيقة حول نقطة الانبعاث (خاصة جسيمات الفا).

1-21 عمر النصف البيولوجي وثابت التفكك البيولوجي :

عند اندخال اي مادة للجسم من خلال اي مسلك من المسالك الاندخال فان الجسم يتخلص من جزء منها بطرق الاخراج البيولوجي المختلفة (وهي البراز و البول و العرق و التنفس). وبالتالي فانه عند اندخال كمية معينة من مادة ما (مشعة او غير مشعة) للجسم فانها تتناقص داخله بالفعل العمليات الاخراج.

و تتميز كل مادة تدخل الجسم البشري بعمر النصفي بيولوجي (T_b). و يعرف عمر النصف البيولوجي للمادة في الجسم الانسان بانه الفترة الزمنية التي يتخلص خلالها الجسم، نتيجة عمليات الاخراج البيولوجية ، من نصف الكمية التي تدخله ويبقى نصفها الاخر داخل الجسم . كذلك، يرتبط عمر النصف البيولوجي مع ثابت التناقص البيولوجي (λ_b) بعلاقة تتخذ الصور نفسها التي تتخذ العلاقة بين عمر النصف الفيزيائي (T_p) وثابت التفكك الفيزيائي (λ_p) ، وهي :

$$\lambda_b = 0.693 / T_b$$

1-22 عمر النصف الفعال(Te) وثابت التفكك الفعال(λ_e)

عند اندخال مادة المشعة في الجسم فانه نشاطها الاشعاعي يتناقص بوسيلتين ، هما التفكك الفيزيائي و الاخراج البيولوجي . وثابت التفكك الفعال (T_e) هو عبارة عن الفترة الزمنية اللازمة لانخفاض النشاط الشعاعي داخل الجسم بفعل كل من التفكك الفيزيائي و الاخراج الاحيائي. و يرتبط ثابت التفكك الفعال (λ_e) بعمر النصفي الفعال بذات العلاقة :

$$\lambda_e = 0.693 / Te$$

وثابت التفكك الفعال (λ_e) هو حاصل جمع كل من ثابت التفكك البيولوجي(λ_b) وثابت التفكك الفيزيائي (λ_p) اي ان

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

وباستخدام العلاقة بين ثابت التفكك الفعال الذي سيرمز له بالرمز (l) (للتيسير) والعمر النصفي الفعال ، الذي سيرمز له اختصار بالحرف (T)، يتخذ قانون التفكك الاشعاعي الصيغة التالية:

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

23-1 وحدة قياس الشدة الاشعاعية (النشاط الاشعاعي)

كانت الوحدة الاساسية لقياس الشدة الاشعاعية للعينة هي الكورى (**Ci**) واجزاؤه ، وهي الميللي كورى (**mCi**) ، والميكروكورى (**μCi**) والكورى وحدة كبيرة حيث ان العينة التي تبلغ شتها 1 كورى هي تلك العينة التي يحدث فيها (3.7×10^{10}) تفككا في الثانية في الجيل الاول من تفككها اذا كانت العينة من النوع الذي يتميز بالتفكك المتتابع . وتستخدم الان الوحدة المعيارية الدولية لقياس الشدة الاشعاعية في النظام المعياري الولي وهذه الوحدة هي البكرل(**bequerel**). والبكرل الواحد عبارة عن تفكك واحد في الثانية .

24-1 النشاط الشعاعي النوعي The specific activity

في بعض الاحيان ، يلزم معرفة النشاط الاشعاعي لنظير معين (او لعدة نظائر) في وحدة الكتلة من المادة او في وحدة الحجم منها ، او على وحدة المساحة السطحية او في وحدة الطول من خط سريان سائل مشع . في هذه الحالات يسمى النشاط الاشعاعي بالنشاط الاشعاعي النوعي اي المنسوب لوحدة الكتلة او الحجم او المساحة او الطول . ويعبر عن النشاط الاشعاعي النوعي بوحدتي البيكرل او كوري (تبعا للنظام المستخدم) او مضاعفاتهما او جزائهما منسوبة الى ودة الكتلة او الحجم او المساحة او الطول .

25-1 السلاسل الاشعاعية الطبيعية Natural radioactive series

تتميز جميع النوى ذات العدد الذري الاكبر من 128 بالنشاط الشعاعي . ويرجع السبب ذلك الى زيادة عدد البروتونات في النواة ، مما يجعل قوى التنافر الكهروساكن كبيرة، ويؤدي هذا التنافر الى تفكك بعض النوى مع اصدار جسيمات الفا، ونتيجة لاصدار هذه الجسيمات تزداد نسبة النيوترونات الى البروتونات في النوى الوليدة ، مما يؤدي الى تفككها مع اصدار جسيمات بيتا، تفصل النسبة الى نسبة الاستقرار، ولكنها تكون ير مستقرة بالنسبة لاصدار جسيمات الفا و كذا. تستمر السلسة الى ان تصل في النهاية الى النواة مستقرة غالبا ما تكون هي نواة الرصاص.

26-1 النشاط الاشعاعي الصنعي The artificial radioactivity

بالاضافة الى النظائر المشعة الطبيعية تمكن العلماء من انتاج ما يزيد على اكثر من الف وثلاثمائة نظير نشط اشعاعيا . وتنتج هذه النظائر الاخيرة بقذف النظائر المستقرة بانواع مختلفة من الجسيمات النووية مثل جسيمات الا البروتونات و النيوترونات و اشعاعات جاما ، و تستخدم لهذا الغرض المفاعلات النووية كمصدر للنيوترونات او المعجلات كمصدر للجسيمات المشحونة الثقيلة، و كذلك كمصدر لاشعاعات جاما او النيوترونات السريعة.

1-27 الاشعة السنية

الاشعة السينية هي موجات كهرومغناطيسية تشبه موجات الضوء المرئي او اشعاعات جاما ، الا انها ترى مثل اشعاعات جاما. و تختلف الاشعة السينية عن هذه الموجات بشريحة ترددها (او شريحه اطوال موجاتها) وتتراوح اطوال موجات الاشعة السينية بين حوالي (1×10^{13}) هيرتز وحتى حوالي (1×10^{20}) هيرتز وعموما تتداخل شريحة ترددات الاشعة السينية مع ترددات اشعة غاما تداخلا عريضا ،حيث تبدا شريحة اشعاعات جاما عند تردد يبلغ حوالي (1×10^{18}) هيرتز وحتى ما يزيد على (1×10^{23}) هيرتز، واهم ما يميز الاشعة السينية عن اشعاعات غاما رغم تدخلهما من حيث التردد وبالتالي الطاقة هو ان اشعة غاما تصدر من نواة الذرة عند انتقال النواة من حالة مثارة الى حالة اقل اثارة او الى الحالة الارضية اما الاشعة السينية فهي لا تصدر على الاطلاق من النواة . وانما تصدر اما عن اعادة ترتيب الالكترونات بين مدارات الذرة او عند حدوث انكباح شديد (اي تناقص شديد في سرعة الجسيمات المشحونة الخفيفة مثل الالكترونات بسبب تاثر هذه الالكترونات بمجال كهربائي شديد يفرمل حركتها ولذلك يوجد نوعان من الاشعة السينية هما الاشعة السينية المميزة للعنصر والاشعة السينية الانكباحية.

الفصل الثاني

الاستخدامات التطبيقية للإشعاعات والنظائر المشعة

Application of radiation and radioactive isotopes

2-1 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.

2-2 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 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 :

١) فحوص الغدد

٢) الفحوص الكلوية

٣) فحوص الأوعية الدموية وسريان الدم في أعضاء الجسم المختلفة

٤) فحص القلب

٥) الفحوص المعوية

فحوص الكبد والبنكرياس وفحوص المخ وغيرها كذلك يمكن 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 هى:

١- فحص معدل امتصاص اليوم المشع.

٢- فحص معدل استهلاك اليود.

٣- فحص معدل تحول اليود في بلازما الدم.

٤- فحص مدى استجابة مريض الغدد للعلاج.

ج- استخدام الإشعاعات في العلاج Radiation therapy

تستخدم الإشعاعات والنظائر المشعة في علاج بعض الأمراض. فمثلا، 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 اشعاعات جاما الصادرة من مصدر كوبلت 60 أو من المعجلات الخطية. وللتعقيم بالإشعاعات عدة مزايا بالمقارنة بالتعقيم بالطرق التقليدية. وأهم هذه المزايا ما يلي:

١- قلة التكلفة بالنسبة لطرق التعقيم الأخرى كالبخار أو الحرارة.

٢- 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.

٣- 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 والأمنة لتعقيم المواد العضوية.

٤- يمكن إجراء التعقيم بالإشعاع بطرق ألية بسيطة حيث أن زمن التعرض هو العامل الوحيد في العملية.

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 الأثار الطرق النووية لتحديد أعمار الأثريات المكتشفة ولعملية التاريخ 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 الجوفيه، و تحديد كمياتها و اتجاه سريانها و سرعة هذا السريان، وكذلك في عدة مجالات أخرى لا يتسع هذا الكتيب لسردها.

الفصل الثالث

3-1- التأثيرات البيولوجية للإشعاعات المؤينة Biological effects of ionizing radiation

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 uale sò a su lasciss. Clinical Symptoms sis 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 للاشعاعات المؤينة.

3-2 الدروع الإشعاعية

3-2-1- دروع مصادر جسيمات الفا:

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 إف).

3-2-2 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 بيت f المتحولة إلى أشعة سينية a لهذه الجسيمات (بوحدة E_{max} تتحدد بدلالة كل من الطاقة القصوى والعدد الذريZ للمادة المتفاعلة من العلاقة التالية:

$$f = 0.035\ Z\ E_{max}\ \%$$

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 إف). ويتحدد مقدار المدى الكتلي و R (بوحدة جم/سم٢) 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 p. بوحدة (جم/سم ") بالعلاقة التالية:

$$R\ m = R\ .\rho$$

وعندما تتراوح الطاقة القصوى لجسيمات بيتا بين (0-2.5Mev)، فإنه يمكن حساب المدى الكتليRm (بوحدة جم/سم ") بدقة عالية، بدلالة الطاقة القصوى للطيف E_{max} بالعلاقة التالية:

$$R_m\ (gm/cm^2) = 0.53\ E_{max} - 0.106$$

أما للأطياف التي تزيد طاقتها القصوى على 2.5 (م إف)، فإن هذه المعادلة الأخيرة لا تصلح لحساب المدى الكتلي، ويجب أن تستخدم علاقة أخرى تتخذ الصورة التالية: Rin (gm/cm) = 0.53 Ema – o.106 كذلك، يجب الإشارة إلى أن السماكة الكتلية Rn لدرع جسيمات بيتا التي تكفي لامتصاص الجسيمات المنبعثة من مصدر (نظير) معين محدود النشاط الإشعاعي يصلح، في الوقت ذاته، لامتصاص جميع 3- 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 فى 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 أخر 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 السينية وإشعاعات جاما في الفقرة التالية.

3-3 دروع إشعاعات جاما والأشعة السينية:

تعرضنا في فقرات سابقة لتعريف معامل التوهين الخطي لما لمادة معينة عند طاقة محددة من طاقات إشعاعات جاما، وكذلك لمعامل امتصاص الطاقة ها. وقد استخدم

معامل التوهين الخطي لما في علاقة التوهين الأسي لإشعاعات جاما أو الأشعة السينية، التي تعبر عن تناقص عدد الفوتونات أسيا مع زيادة سماكة المادة المتفاعلة وفقا للعلاقة التالية.

حيث No 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 E، الناتج في نقطة معينة بعد لامتصاص الطاقة ها، وليس معامل التوهين الخطي الإ. بذلك، تكون العلاقة بين معدل الجرعة E في وجود الدرع الذي تبلغ سماكته X بين المصدر والنقطة المعنية، وبين معدل الجرعة E_0 في حالة عدم وجود ذلك الدرع في النقطة نفسها هي:

ووفقا لهذه العلاقة الأسية الأخيرة، فإنه إذا طلب، على سبيل المثال ، خفض معدل جرعة ناتج عن مصدر كوبلت 60 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 وبذلك تكون سماكة الرصاص المطلوبة هي:

4×1.25=5 cm

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

$1.25 \times 10 = 12.5cm$

وأما في جميع الحالات التي تكون فيها حزمة الفوتونات واسعة أو غير متوازية، أو تكون سماكة الدرع كبيرة نسبيا (وهذه هي الظروف 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 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) 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 وعموما، يعرف معامل التراكم (Build–up factor B) على أنه النسبة بين العدد الكلي للفوتونات التي تصل الى نقطة معنية، في وجود الدرع بين المصدر وهذه النقطة، سواء بشكل مباشر من المصدر أو بسبب التشتت أو إنتاج الأزواج Is في الدرع، إلى عدد الفوتونات 1d التي

تصل النقطة المعنية ذاتها من المصدر مباشرة، أي أن:

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

و يعتمد معامل التراكم B اعتمادا كبيرا على كل من طاقة X. الفوتونات، والعدد الذري لمادة الدرع، و كذالات على سماكة الدرع 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: X la Be Eo E 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.

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 نيوترونات حرارية تتراوح بين حوالي 20 – 25

سم. وبالتالي، تكفي مثل هذه السماكات لامتصاص طاقه النيوترونات السريعه بشكل كامل.

ويتمثل أحد أهم مبادى تدريع مصادر النيوترونات في تهدئة النيوترونات السريعة المنبعثة من هذه المصادر أو من مولدات النيوترونات الحرارية والبطينة، ثم يتم بعد ذلك امتصاص تلك النيوترونات الحرارية والبطينة 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.

(Cadmium) وهناك بعض العناصر مثل الكادميوم والبور (Boron) وغيرها، التي تتميز بمقطع عرضي كبير جدا لامتصاص النيوترونات الحرارية أو البطينة. لذلك، فإنه بعد إحاطة المصدر أو المولد النيوتروني بالطبقة الكافية السماكة (٢٠– ٢٥ سم) من المادة منخفضة العدد الذري كالشمع أو الماء أو غيرها، يتم إحاطة هذه المادة المهدئة بطبقة رقيقة من فلز الكادميوم بسماكة تبلغ حوالي ١ ملم، 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 ١ 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

النيوترونـات الحراريـة، وتكـون نظيـر الـديتيريوم (نظيـر الهيـدروجين) غيـر المشـبع. والمطلـب الوحيـد لعمـل الـدرع الملائـم مـن مـادة خفيفـة دون اسـتخدام الكـادميوم والرصـاص شـو. ان تكون سماكة المادة الخفيفـة كافيـة لامتصـاص الغالبيـة العظمـى من النيوترونـات المهدأة (أي الحراريـة). ومن أمثلـة هذه الدروع النيوترونيـة الهـاوتزر النيـوتروني نصـف الكـروي، الـذي يصـنع مـن الشـمع، ويوضـع مصـدر او مولـد النيوترونـات فـي مركـزه . ولمثـل هـذا الـدرع يلـزم ان تكـون سـماكة الشـمع أو المـاء حوالي 40– 120 سم من الشمع أو الماء، تبعا للمردود النيوتروني للمصدر.

وفـي حالـة الحـوادث المرتبطـة بمصـادر النيوترونـات يستطيع الإنسـان أن يستخدم أيـة مـواد طبيعيـة خفيفـة موجـودة ومتاحـة فـي البيئـة، لعمـل درع ملائـم لمصـادر النيوترونات، بما في ذلك أكياس من الماء أو الرمال، او حتى قطع من الخشب.

Reference:

[1] - احمد،احمد محمد السريع،٢٠٠٧،مبادى الاشعاعات المؤينة والوقاية منها ،ط٢،اللجنة الدائمة للوقاية من الاشعاعات،الرياض-السعودية.

[2] - AAPM, Code of Practice for Radiotherapy Accelerators. AAPMReport No. 47, Medical Physics, Vol. 21, No. 7, (1994).

[3] - Allisy A et al. Quantities and Units in use for Radiation Protection. ICRU News December: 5-9, (1991).

[4] -American National Standard. Personnel Dosimetry Performance Criteria for Testing, ANSI/HPS N13.11, Health Physics Society (2001).

[5]- Atomic Energy Control Board. Working Safely with Nuclear Gauges,
Canada, (2002).

[6] -Beatson Oncology Center, Glasgow, The radiobiological basis of the total body irradiation, The British Journal of Radiology, 70 (1997), 1204-1207.

[7] - Birght Dorschel et al. The physics of radiation protection. Nuclear Technology Publishing, (1995).

[8]- Blatt. Frank J. Modern Physics, McGraw Hill, Ch 15, Ch 14 (1992).

[9]- IAEA, Classification of Radioactive Waste, Safety Series No. 111-G-1.1, , Vienna (1994).

[10] - IAEA, Radiation protection in diagnostic radiology. Basic medical radiation safety training package, Vienna, (2001).

[11]- IAEA, Calibration of radiation protection monitoring instruments , IAEA Safety Reports Series, No. 16, Vienna (2000).