الباب الرابع
انحلال الإشعاعات النووية
وتأثيراتها البيولوجية

obeikandl.com

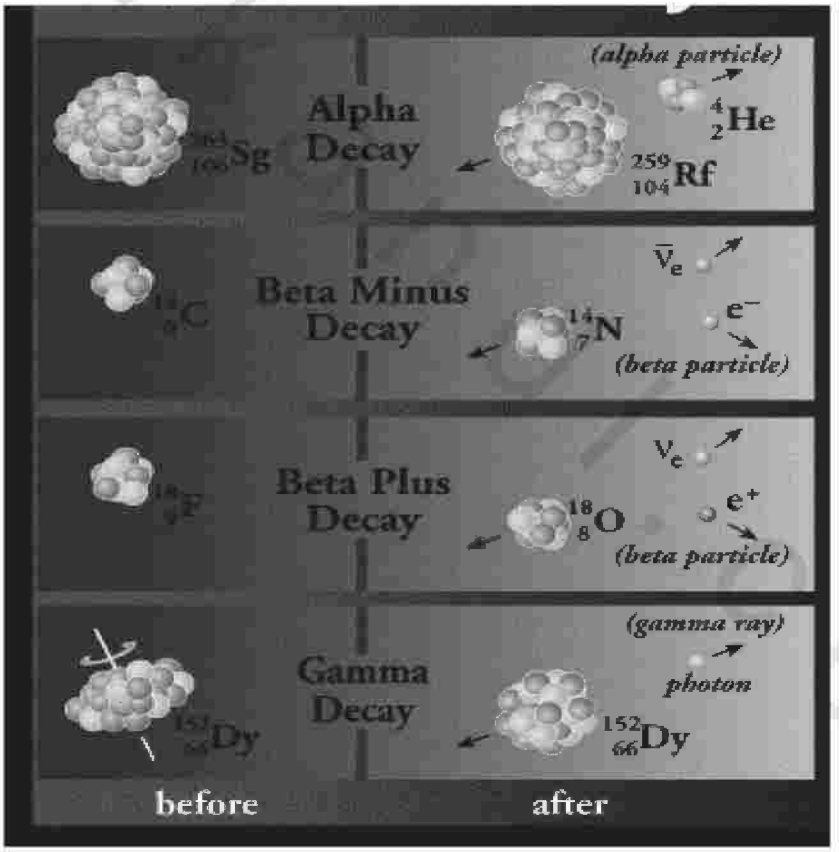
obeikandl.com

الباب الرابع

انحلال الإشعاعات النووية

Nuclear Radiations Decay

الانحلال الإشعاعي عبارة عن تفكك أو انحلال تلقائي لنواة النظير مع إصدار جسيمات نووية مثل جسيمات ألفا أو بيتا أو أشعة جاما. وتعرف النظائر التي يحدث فيها هذا الانحلال بالنظائر المشعة كما في شكل(١-٤) وعملية الانحلال تحدث في النظائر النقية أو التي تدخل ضمن مركبات كيميائية ولا تعتمد علي الظروف الطبيعية مثل الحرارة ...الخ.

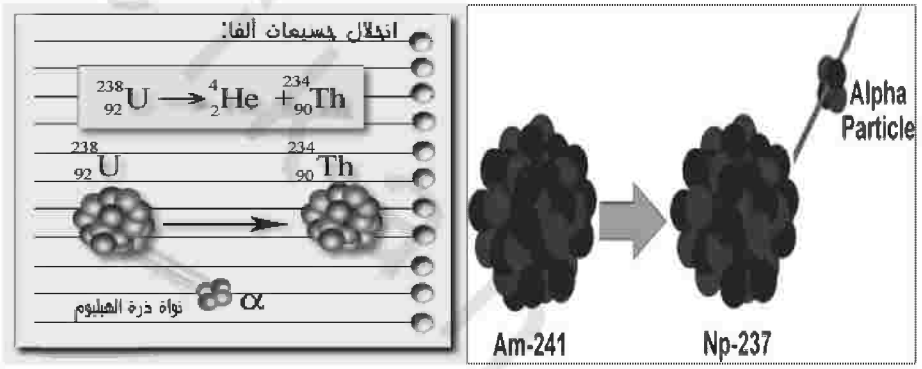


شكل (١-٤) يوضح انحلال الجسيمات النووية

٤-١ انحلال ألفا α Decay

تتميز أنويه العناصر الثقيلة (الأثقل من الرصاص) بانخفاض قيمة طاقة الترابط النووي لكل نيوكليون في النواة. لذلك فإن هذه الأنوية غير مستقرة، وتتحلل إلي أنويه أخف وأكثر استقراراً. ومثال علي ذلك تحلل اليورانيوم إلي ثوريوم وجسيم ألفا كما في شكل (٢-٤) وحسب التفاعل الآتي

$$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He(\alpha) \qquad (٤-١)$$



شكل (٢-٤) يوضح انحلال جسيم ألفا

وكذلك تحلل الأمريكيم المستخدم في أجهزة كشف الحريق إلي نابتينوم وجسيم ألفا وحسب التفاعل الآتي

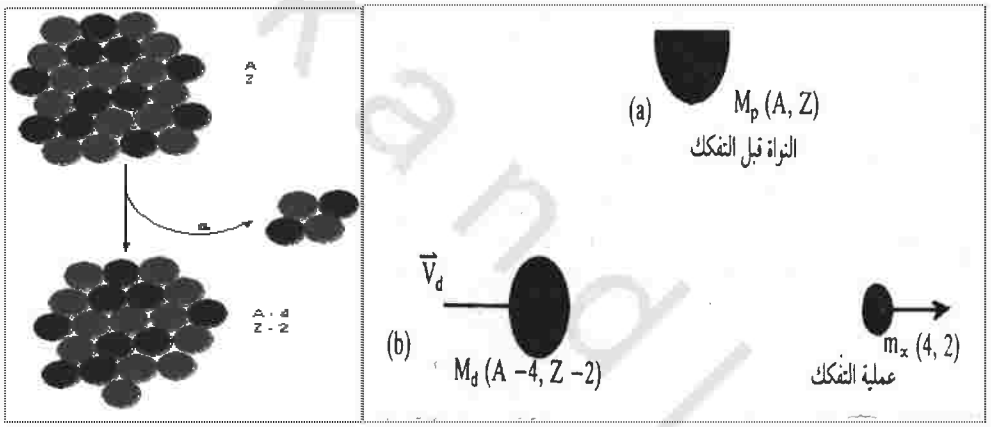
$$^{241}Am \rightarrow {}^{237}Np + {}^{4}_{2}He(\alpha) \qquad (٤-٢)$$

وانحلال ألفا صفة مميزة للأنوية الثقيلة بسبب تناقص طاقة الترابط النووي للنيوكلون الواحد مع تزايد العدد الكتلي A. وفي هذا النطاق من أعداد الكتلة يؤدي تناقص عدد النيوكلونات في النواة إلي تكون نواة أكثر استقراراً وترابطاً، ولكن الزيادة في الطاقة عند نقص العدد الكتلي بمقدار الوحدة أقل بكثير من طاقة ربط النيوكليون الواحد في النواة والتي يبلغ ($7.2MeV$)، ولذلك فإن انبعاث بروتون أو نيوترون الذي تبلغ طاقة ربط كل منهما خارج حدود النواة صفراً هو أمر

مستحيل. أما انبعاث نواة ألفا تكون أكثر فائدة من ناحية الطاقة، لأن انحلال ألفا ممكن أذا كان مجموع طاقتي ربط النيوكلونات في النواة الناتجة وفي جسيم ألفا أكبر من طاقة ربط نيوكلونات النواة الأصلية. بفرض أن النواة المشعة تسمي (النواة الأم وكتلتها M_P) والنواة الجديدة تسمي (النواة الأبنة وكتلتها M_D) وجسيم ألفا كتلته (m_α) وحسب المعادلات السابقة نستطيع نكتب معادلة الطاقة:

$$M_P(A,Z)C^2 = M_D(A-4,Z-2)C^2 + m_\alpha(4,2) + Q \quad (٤-٣)$$

حيث Q مجموع طاقة الحركة للنواة الابنة وجسيم إلفا ومن شكل (٣-٤) نستنتج:



شكل(٣-٤) انحلال جسيم ألفا قبل وبعد التفاعل

$$M_D V_D = m_\alpha v_\alpha \quad (٤-٤)$$

$$M_P C^2 = M_D C^2 + m_\alpha C^2 + Q \quad (٤-٥)$$

ويكتب قانون حفظ الطاقة علي الشكل التالي:

$$Q + \{M_P + M_D + m_\alpha\}C^2 + K_D + K_\alpha + \frac{1}{2}\{M_D V_D^2 + m_\alpha v_\alpha^2\} \quad (٤-٦)$$

بالتعويض من المعادلة (٤-٤) عن قيمة V_D في المعادلة (٤-٦) نحصل علي:

$$Q + \frac{1}{2}\{M_D(\frac{m_\alpha v_\alpha}{M_D})^2 + m_\alpha v_\alpha^2\} \quad (٤-٧)$$

$$Q = \frac{1}{2}\frac{m_\alpha^2 v_\alpha^2}{M_D} + \frac{1}{2}m_\alpha v_\alpha^2 \qquad (٤-٨)$$

$$Q = \frac{1}{2}m_\alpha v_\alpha^2\left(\frac{m_\alpha}{M_D} + 1\right) \qquad (٤-٩)$$

$$Q = K_\alpha\left(\frac{m_\alpha}{M_D} + 1\right) \qquad (٤-١٠)$$

حيث K_α هي طاقة الحركة لجسيم ألفا ويمكن تعيينها من المعادلة:

$$K_\alpha = Q/\left(\frac{m_\alpha}{M_D} + 1\right) \qquad (٤-١١)$$

$$K_\alpha = Q/\left(\frac{4}{A} + 1\right) \qquad (٤-١٢)$$

من المعادلات الأخيرة نستطيع أن نحسب نظرياً قيمة طاقة الحركة لجسيمات ألفا ثم نقارنها بالنتائج العملية. وبالنسبة للأنوية الثقيلة $A = 150$ تكون قيمة $\frac{m_\alpha}{M_D} + 1$ فيمكن إهمالها فتصبح قيمة طاقة الحركة مساوياً تقريباً لطاقة الترابط المطلوبة لعملية معاكسة لعملية الانحلال.

٤-٢ نظرية انحلال ألفا *Decay Theory*

أول من لاحظ وجود سلاسل في تحلل ألفا أي تحول العناصر من واحد إلي الأخر يكون أكثر استقراراً هو جايجر- نيتل(Geiger-Nuttall) في عام ١٩١١ م، وقد لاحظ أنه عند رسم العلاقة بين لوغاريتم ثابت الانحلال $Log\lambda$ ولوغاريتم المدى $LogR$ للأنوية الباعثة لجسيمات ألفا المتسلسلة حصل علي خط مستقيم تقريباً. ووجد أن الخطوط الثلاثة للسلاسل الإشعاعية المعروفة تكون متوازية مع بعضها وتمثل بالقاعدة:

$$Log\lambda = A\log R + B \qquad (٤-١٣)$$

حيث A هو الميل للخط المستقيم، B هي الجزء المقطوع من محور السينات. ومن المعروف أن المدى لجسيمات ألفا يتناسب مع الطاقة $R \propto E^{3/2}$ أي أن العلاقة السابقة تصبح كالأتي:

$$Log\alpha = A\log E + B \qquad (٤-١٤)$$

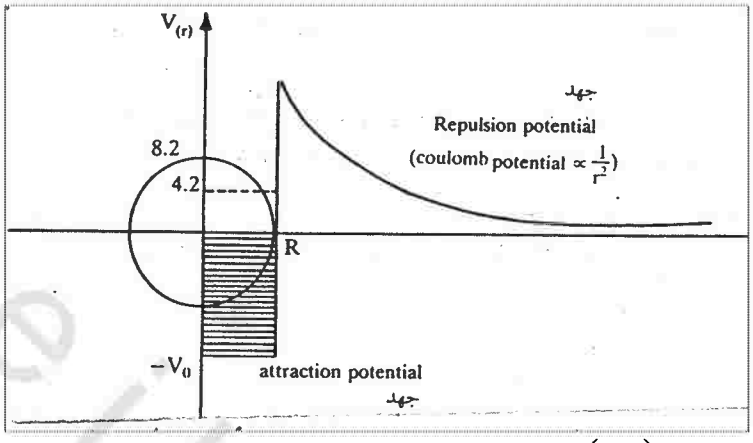
ومن هذه العلاقة نستنتج أن الأنوية التي لها عمر نصف طويل أي أن α صغيرة تبعث جسيمات ألفا بطاقة منخفضة والعكس صحيح. وهذه الملاحظة لم يكن لها تفسير في الميكانيكا الكلاسيكية ولا تفسر إلا عن طريق حاجز الجهد.

ولتفسير انحلال ألفا عن طريق اختراق حاجز الجهد النووي وهذا ينتج عن قوة التنافر الكولومية بين النواة الموجبة وبين نواة ألفا الموجبة وعندما تقترب المسافة بين النواتين تزيد قوة التنافر بينهما، ولكن التنافر لا يستمر في الزيادة عندما تصبح المسافة صفراً لأن ذلك يتعارض مع تفسير طاقة الترابط النووي والقوي النووية. ولذلك يجب أن توجد قوة جذب تعمل في المسافات الصغيرة داخل النواة وهذه القوي هي القوي النووية وبالتالي فإن الجهد النووي سيكون جهد جذب. ويمكن رسم الجهد النووي كما في شكل (٤-٤). ومنه نجد أن الجهد في المنطقة $r \propto R$ يكون جهد تنافر (جهد كولوم) ويعطي من:

$$V(r) = \frac{2Ze^2}{r^2}, V_r \propto R \qquad (٤-١٥)$$

أما في المنطقة $r \propto R$ يكون الجهد تقريباً:

$$V(r) \propto \propto V_0, V_r \propto R \qquad (٤-١٦)$$



شكل(٤-٤) يوضح شكل الجهد النووي لجسيمات ألفا

وبالتالي ستوجد منطقتان لكل منهما جهد مختلف ولكل منطقة دالة موجية معينة. ومن الملاحظات العملية وجد أن طاقة α المنبعثة من اليورانيوم تكون في حدود $4.2MeV$ بينما طول الحاجز الكولومي تقريباً هو $8.2MeV$. فكيف أذاً تم الانبعاث. وفي تجربة رذرفورد المعروفة عندما قذف نواة الذهب الموجبة بجسيمات ألفا وجد أن هناك احتمال للتأثر بين النواة وجسيمات ألفا ذات طاقة أقل من طاقة حاجز الجهد ويمكن تفسير ذلك بحل معادلة شرودنجر باستخدام V كما في معادلة (٤-١٦) وبعد الحل وإيجاد الدالة الموجية المصاحبة وجد احتمالاً للنفاذ وهي نفس حالة وجود جسيمات ألفا داخل النواة بدالة موجية مصاحبة معينة فإن مربع الموجة خارج النواة علي مربع السعة داخل النواة يعطي احتمال حدوث انبعاث جسيمات ألفا وهذا تفسير نظرية الكم لنظرية الانحلال. ونلاحظ أنه كلما زادت طاقة جسيمات ألفا فإن احتمال انبعاثها يكون عالياً والعكس صحيح وهذا يتفق مع معادلة (٤-١٤). وبعد انبعاث جسيمات ألفا من النواة تتحرك في المجال الكولومي للنواة سوف تتحرك إلي مسافات بعيدة حتى تصبح طاقتها هي طاقة الحركة الكلية.

ولمعرفة صحة هذه النظرية يجب حساب تغير احتمال وانبعاث جسيمات ألفا عن النواة في وحدة الزمن. وهذا المقدار هو عبارة عن ثابت الانحلال ▯ مع طاقة جسيمات ألفا المنبعثة ومقارنة النتيجة مع قاعدة جايجر- نيتل أي تغير ▯ مع الطاقة E. وبفرض أن جسيم ألفا (▯) يتذبذب داخل النواة وتضرب حاجز الجهد بتردد f، ولنفرض أن احتمال اختراق الحاجز هو P، وبالتالي يكون احتمال اختراق الحاجز في وحدة الزمن كما في شكل (٥-٤) هو:

$$Pf \square \square \qquad (٤-١٧)$$

و أن التردد يساوي الطول الموجي ▯ علي سرعة جسيمات ألفا داخل النواة v، فإن

$$f \square v/\square \qquad (٤-١٨)$$

وأن:

$$\square \square \frac{2\square}{K_0} \qquad (٤-١٩)$$

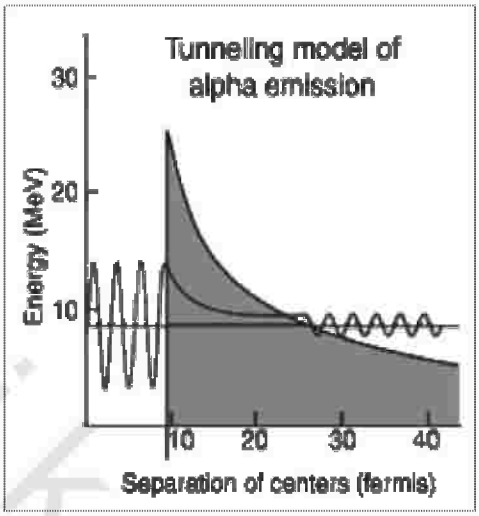
حيث K_0 المتجه الموجي لجسيمات ألفا. بالتعويض في المعادلة (٤-١٨) نحصل علي:

$$f \square \frac{vK_0}{2\square} \qquad (٤-٢٠)$$

واحتمال اختراق الحاجز بعد حل معادلة شرودنجر (ظاهرة النفق Tunnel effect) يمكن حسابه وتكون صورته علي النحو التالي:

$$P \square e^{\square\square \frac{\sqrt{2m}}{\hbar} \int_R^{r_1} (u \square E_\square)^{1/2} dr} \qquad (٤-٢١)$$

حيث m كتلة جسيمات ألفا والتكامل محسوب علي المنطقة التي يكون فيها الجهد (الحاجز الكولومي) أكبر من طاقة جسيمات ألفا وبالتقريب نحصل علي:



شكل (٤-٥) يوضح ظاهرة النفق لجسيمات ألفا

$$\lambda = \frac{v_\alpha}{r_0}\exp\{-\frac{8(Z-2)e^2}{\hbar v_\alpha}(\theta_0 - \sin\theta_0\cos\theta_0)\} \qquad (٤-٢٢)$$

حيث:

$$\theta_0 = \cos^{-1}\{\frac{m v_\alpha r_0}{4e^2(Z-2)}\}^{1/2} \qquad (٤-٢٣)$$

حيث r_0 هو نصف القطر المؤثر والذي يكون بعده الجهد الكولومي أقل من طاقة جسيمات ألفا، v_α هي سرعة جسيمات ألفا بالنسبة للنواة ، E_α هي طاقة التحلل وتعطي من:

$$E_\alpha = E\{\frac{1-m}{m_r}\} \qquad (٤-٢٤)$$

حيث m_r هي كتلة النواة الابنة ويمكن كتابتها علي الصورة:

$$\lambda = Ke^{-G} \qquad (٤-٢٥)$$

حيث $G = G(E_\alpha)$ وهي دالة الطاقة وهي شكل من أشكال جايجر- نيتل. وبصورة عامة فإن القيم المحسوبة نظرياً للطول الموجي λ تتفق مع القيم المعملية. وقد استعملت λ لقياس قيمة نصف العمر الزمني.

التفسير السابق كان في حالة الأنوية زوجية- زوجية أما بالنسبة للانوية زوجية- فردية أو الانوية فردية- فردية فتكون مناقشتها حسب نموذج قطرة السائل.

وكذلك يمكن تفسير حدود استقرار الأنوية الثقيلة بالنسبة لإنحلال ▫ بإستعمال نموذج القشور النووية. وأن الأنوية التي لها قشور بروتونية أو نيوترونية مقفلة تتمتع بدرجة خاصة من الترابط. ولذلك فبرغم أن طاقة الترابط النووي للنيوكليون الواحد في الأنوية المتوسطة والثقيلة تنخفض مع زيادة A، إلا أن هذا الانخفاض يأخذ في التناقص عند الاقتراب من التركيب السحري وتتزايد سرعته عند مرور A بعدد سحري من البروتونات أو النيوترونات. ونتيجة لذلك تبدو طاقة E_{α} أقل بدرجة ملموسة من قيمتها الصغرى التي يلاحظ عندها انحلال ▫، وإذا كانت النواة (A,Z) سحرية أو إذا كان العدد الكتلي للنواة أقل منة لنواة سحرية. وبالعكس تتزايد الطاقة E_{α} علي شكل طفرة للأنوية التي يزيد أعداد كتلها قيمة A للانوية السحرية، أي الطاقة تتعدي درجة الاستقرار الصغرى العملية بالنسبة لانحلال ▫.

وأن الأنوية النشطة في إشعاع ▫ تكون في نطاق أعداد الكتلة A ◻ 150 هي التي تحتوي نواها علي نيوترونين أو عدة نيوترونات زيادة علي العدد السحري 82. وتوجد بعض الأنوية عمر نصف انحلالها يزيد كثيراً عن العمر الجيولوجي للأرض لذلك تظهر في خليط طبيعي من نظائر العناصر $(^{152}Gd,^{144}Nd,^{140}Sm)$. والأنوية الأخرى تم الحصول عليها نتيجة لتفاعلات نووية. أن أكثر الأنوية المستقرة ثقلاً هو ^{209}Bi الذي تحتوي نواته علي العدد السحري 126 من النيوترونات. والعنصر الذي يسبق البزموت وهو الرصاص له عدد كتلي 82 وتحتوي أنويه كل نظائر الرصاص علي عدد سحري من البروتونات. أما نواة الرصاص ^{208}Pb فهي مزدوجي السحرية. وكل الأنوية الأكثر ثقلاً مشعةً. ولأن الأنوية

الناتجة بعد انحلال α تكون غنية بالنيوترونات فإن انحلال α يحدث بعد عدة إنحلالات من α. وهذا الانحلال لا يغير من عدد النيوكلونات في تركيب النواة ولا يمكن لأي نواة ذات عدد كتلي $A > 209$ أن تتحول الي نواة مستقرة إلا بعد عدد ما من إنحلالات α. وحيث أن عدد النيوكلونات يتغير أثناء انحلال α بأربع وحدات، فإنه من الممكن وجود أربع سلاسل انحلال مستقلة لكل منها ناتج نهائي. وأن ثلاثاً من هذه السلاسل ممثلة في الطبيعة وتسمي بالسلاسل المشعة الطبيعية.

٤-٣ انحلال بيتا β Decay

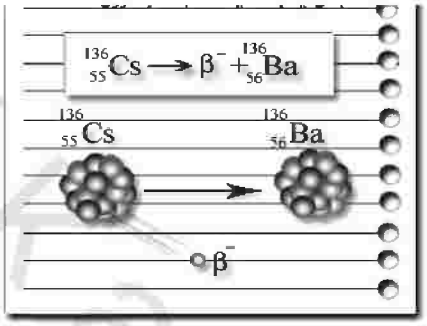
تحدث العمليات التي تؤدي لانطلاق جسيمات بيتا في الأنوية المشعة بسبب وجود فرق في النسبة بين البروتونات والنيوترونات ولا تملك النواة الطاقة اللازمة لطرد الأنوية لتعديل تلك النسبة فيتحول البروتون إلي نيوترون أو العكس لتعديل النسبة وإنقاص طاقة النواة للوصول إلي حالة الاستقرار. ومثال علي ذلك تحلل التريتيوم (الهيدروجين-٣) ينتج جسيمات بيتا وهي عبارة عن نيوترون يتحول إلى بروتون وإلكترون وجسيم ثالث يسمى مضاد النيوترينو antineutrino. وتطلق النواة في مضاد النيوترينو والإلكترون ولكن تحتفظ بالبروتون. ويسمى الإلكترون الناتج من هذا التحول بجسيم بيتا، وعلى هذا النحو فإن النواة تفقد نيوترون ولكن تكتسب بروتون. ويوجد ثلاث عمليات مختلفة يمكن للنواة من خلالها تغيير النسبة بين البروتونات والنيوترونات وهذه العمليات هي:

١- انحلال جسيم بيتا السالب (الإلكترون)

تحدث هذه العملية عندما تكون النواة تحتوي علي عدداً زائداً من النيوترونات وفيها يتحول النيوترون إلي بروتون داخل النواة ويخرج جسيم أولي يسمي ضديد النيوترينو $\bar{\nu}$ Anti neutrino كتلته الساكنة

تساوي صفر تقريباً. ونلاحظ أن العدد الذري يزيد بمقدار الوحدة بينما العدد الكتلي يبقي دون زيادة كما في المعادلة الآتية وشكل (٦-٤).

$$n \rightarrow p + \beta^{-}(e^{-}) + \bar{\nu}$$
$$^{136}_{55}Cs \rightarrow {}^{136}_{56}Ba + \beta^{-} + \bar{\nu} \qquad (4\text{-}26)$$



شكل(٦-٤) يوضح انحلال جسيمات بيتا السالبة.

وتحدث هذه العملية إذا كانت كتلة النواة الأم أكبر من مجموع كتلة كل من النواة الابنة وكتلة الإلكترون (جسيم بيتا السالب) وتكون طاقة التحلل هي:

$$E = \{M_{A,Z} - (M_{A,Z-1} + m_{e^-})\}C^2 \qquad (4\text{-}27)$$

حيث $M_{A,Z}$ هي كتلة النواة الأم، $M_{A,Z-1}$ كتلة النواة الابنة، m_e كتلة الإلكترون. ويمكن كتابة المعادلة السابقة بدلالة الكتل الذرية وذلك بطرح وإضافة كتلة Z أي أن:

$$E = \{2(M_{A,Z} - Z.m_e) - (M_{A,Z-1} - Z.m_e + m_e)\}C^2 \qquad (4\text{-}28)$$

حيث يمثل القوس الأول كتلة الذرة الأم، والقوس الثاني كتلة الذرة الابنة، ويمكن كتابة المعادلة علي الصورة الآتية:

$$E = \{M_{A,Z} - M_{A,Z-1}\}C^2 \qquad (4\text{-}29)$$

ويتضح من هذه المعادلة أن جسيمات بيتا تنطلق من النواة إذا كانت كتلة الذرة الأم أكبر من كتلة الذرة الابنة. ويتضح أن طاقة جسيم بيتا يجب

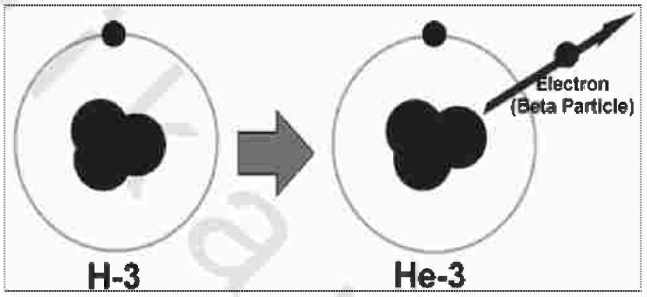
أن تساوي قيمة محددة من الطاقة. ولكن النتائج العملية تقول غير ذلك لأنه قد وجد أن طاقة جسيم بيتا الصادرة من نواة معينة تكون مستمرة وتتغير من الصفر وحتى أقصي قيمة لها E_{max} ويتناقص الطيف المستمر لجسيم بيتا السالب مع قانون حفظ كمية الحركة الخطية والزاوية. فإذا كانت النواة الأم ساكنة فيجب أن تصدر جسيمات بيتا السالبة والنواة الابنة باتجاهين متعاكسين بحيث يكون المجموع الإتجاهي لكمية الحركة صفر لأن كمية الحركة للنواة الأم تساوي صفر. ولكن النتائج المعملية لا تتفق مع ذلك وتصدر النواة الابنة جسيمات بيتا السالبة في اتجاهات مختلفة. وكذلك الحال مع كمية الحركة الزاوية فإذا كان العدد الكتلي A عدداً زوجياً فإن العزم الزاوي يكون مساوياً $\frac{1}{2}$ ولم يتغير العدد الكتلي فمن المستحيل المحافظة علي كمية الحركة الزاوية لأنها تساوي عدد صحيح قبل عملية الانحلال ولكنها تصبح كسراً بعد العملية.

ولقد أفترض باولي ١٩٣١م أن جسيماً ثالثاً يصدر خلال هذه العملية ولكن لا يمكن الكشف عنه بطريقة مباشرة لأن احتمال تفاعله مع المادة ضعيف جداً ويعرف هذا الجسيم باسم النيوترينو المضاد antineutrino وأفترض باولي ولتحقيق قوانين الحفظ عدة خصائص لهذا الجسيم أن كتله السكون له تساوي صفر وأن النيوترينو غير مشحون وأن العزم الزواي له يساوي $\frac{1}{2}$.

وعندما بدأ تفسير خروج النيوترينو المضاد في هذه العمليات تم تفسير الطيف المستمر لجسيمات بيتا السالبة حيث تكون طاقة التحلل مساوية لمجموع طاقة حركة الإلكترون وطاقة حركة النيوترينو المضاد. وبما أنه لا يوجد عدد لا نهائي من الطرق لتوزيع الطاقة بين الجسيمين فإن طاقة حركة الإلكترون يمكن أن تأخذ أية قيمة بين الصفر(عندما تكون طاقة حركة النيوترينو المضاد مساوية لطاقة

التحلل أي الطاقة العظمي (E_{max}) والقيمة العظمي للطاقة E_{max} (عندما تنعدم طاقة حركة النيوترينو المضاد) وتتم عملية الانحلال داخل النواة والتي تؤدي لانطلاق جسيم بيتا السالب النيوترينو المضاد. ومن أشهر الأمثلة علي ذلك تحول التريتيوم إلي هيليوم-٣ حسب المعادلة الآتية والشكل (٧-٤).

$$^{3}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He + e + \bar{\nu} \qquad (4\text{-}30)$$



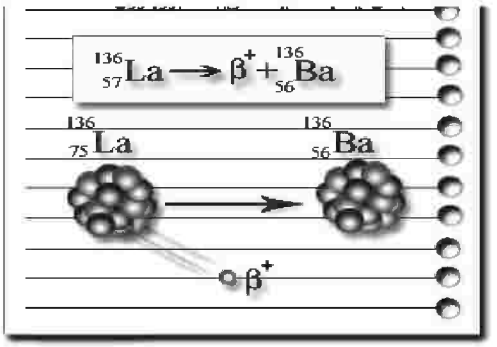
شكل(٧-٤) يوضح تحول التريتيوم الي هيليوم-٣

وتعتبر عملية انحلال بيتا السالبة أكثر عمليات انحلال بيتا شيوعاً

٢- انحلال جسيم بيتا الموجب (البوزيترون)

تحدث هذه العملية في الأنوية التي يكون فيها عدد البروتونات أكبر من عدد النيوترونات فيتحول البروتون إلي النيوترون داخل النواة ويخرج جسيم أولي يسمي النيوترينو (ν) *neutrino* كتلته الساكنة تساوي صفر تقريباً. ونلاحظ أن العدد الذري يقل بمقدار الوحدة ولا يتغير العدد الكتلي كما في المعادلة الآتية وشكل (٨-٤).

$$p \rightarrow n + \nu + (e^{+})$$
$$^{136}_{57}La \rightarrow {}^{136}_{56}Ba + \nu + \nu \qquad (4\text{-}31)$$



شكل(٨-٤) يوضح انحلال جسيمات بيتا الموجبة.

ولكن كتلة البروتون أصغر من كتلة النيوترون فإن هذه العملية لا يمكن أن تتم بصورة تلقائية وتحتاج إلي تزويد البروتون بالطاقة اللازم للعملية والتي يكون مصدرها النواة. ولكي تحدث هذه العملية يجب أن تكون كتلة النواة الأم أكبر من مجموع كتلة كل من النواة الابنة وكتلة والبوزيترون (جسيم بيتا الموجب) وتكون طاقة التحلل هي:

$$E = \{M_{A,Z} - (M_{A,Z-1} - m_e)\}C^2 \qquad (4\text{-}32)$$

حيث $M_{A,Z}$ هي كتلة النواة الأم، $M_{A,Z-1}$ كتلة النواة الابنة، m_e كتلة البوزيترون. ويمكن كتابة المعادلة السابقة بدلالة الكتل الذرية وذلك بطرح وإضافة كتلة Z أي أن:

$$E = \{(M_{A,Z} - Z.m_e) - (M_{A,Z-1} - Z.m_e - 2m_e)\}C^2 \qquad (4\text{-}33)$$

حيث يمثل القوس الأول كتلة الذرة الأم، والقوس الثاني يمثل كتلة الذرة الابنة، ويمكن كتابة المعادلة علي الصورة الآتية:

$$E = \{M_{A,Z} - M_{A,Z-1} - 2m_e\}C^2 \qquad (4\text{-}34)$$

ويكون شرط حدوث هذه العملية هو: $M_{A,Z} > M_{A,Z-1} + 2m_e$. وأن التحولات التي تحدث داخل النواة وتؤدي لانطلاق جسيمات بيتا الموجبة غير معروفة بصوره أكيدة ولكن يمكن تفسيرها علي أساس أن الطاقة المسببة لإثارة النواة أكبر من ضعف طاقة كتلة السكون للإلكترون $2m_eC^2$ فيمكن لجزء من هذه الطاقة مقداره $2m_eC^2$ أن يتحول لمادة حيث

ينتج زوج مكون من إلكترون وبوزيترون فينطلق البوزيترون من النواة كجسيم بيتا الموجب والإلكترون يتفاعل مع أحد البروتونات وينتج عن هذا التفاعل نيوترون ونيوترينو مثل:

$$p \rightarrow e^{+} + n + \nu \qquad (4\text{-}35)$$

ويمكن كتابة التحولات التي تحدث داخل النواة وتؤدي لخروج جسيم بيتا الموجب علي الصورة الآتية:

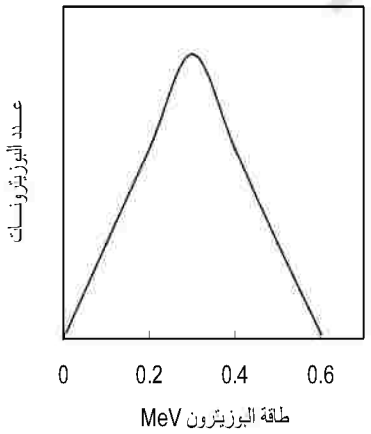
$$2m_e C^2 \rightarrow e^{-} + e^{+} \qquad (4\text{-}36)$$

$$(p + e^{-}) \rightarrow e^{+} + n + \nu + e^{-} \qquad (4\text{-}37)$$

ويعتبر الأكسجين من أشهر مصادر بيتا الموجبة حيث يتحلل كما في المعادلة التالية:

$${}^{14}_{8}O \rightarrow {}^{14}_{7}N + \beta^{+} + \nu \qquad (4\text{-}38)$$

ويبين شكل(٩-٤) طيف جسيمات بيتا الموجبة الصادرة من النحاس-٦٤.



شكل(٩-٤) طيف جسيم بيتا الموجب

ويتضح من هذا الشكل الاختلاف بين هذا الطيف وطيف جسيمات بيتا السالبة حيث يلاحظ النقص الكبير في عدد البوزيترونات عند الطاقة المنخفضة مقارنة مع عددها في حالة بيتا السالبة. ويمكن فهم ذلك الاختلاف في تأثير النواة علي كل من الإلكترونات والبوزيترونات. فنلاحظ أن النواة تؤثر بقوة جذب علي الإلكترون مما يسبب نقص في سرعته وبالتالي في طاقة حركته. وهذا يفسر وجود عدد كبير نسبياً من الإلكترونات بطاقة منخفضة. بينما يحدث العكس في حالة البوزيترون فنجد أن النواة تتنافر معه مما يؤدي إلي زيادة في سرعته وبالتالي في طاقة حركته وهذا يفسر النقص في عدد البوزيترونات ذات الطاقة المنخفضة بينما زيادة عددها في منطقة الطاقة العالية.

٣- الأسر الالكتروني

تحدث عملية الأسر الإلكتروني عندما تكون نسبة البروتونات في النواة كبيرة نسبياً وكانت طاقة التحلل أصغر من ضعف طاقة كتلة السكون للإلكترون وفي هذه الحالة لا يتحقق شرط انطلاق جسيمات بيتا الموجبة. ويمكن للنواة في هذه الحالة أن تأسر إلكترون ذري من أحد المدارات الداخلية والاحتمال الأكبر أن يكون إلكترون من مدار K الأقرب للنواة ويتفاعل مع أحد بروتونات النواة حيث يتحول إلي نيوترون والإتحاد معها وفي هذه الحالة لا تصدر النواة أياً من جسيمات بيتا مثل

$$p + e \rightarrow n + \nu$$

$$^{22}_{11}Na + e \rightarrow {}^{22}_{10}Ne + \nu \qquad (4\text{-}39)$$

وشرط حدوث هذه العملية أن يكون مجموع كتلة النواة الأم وكتلة الإلكترون أكبر من كتلة النواة الابنة. وينتج من هذه العملية نقص في العدد الذري وتكون طاقة التحلل هي:

$$E = \{(M_{A,Z} + m_e) - M_{A,Z-1}\}C^2 \qquad (4\text{-}40)$$

حيث $M_{A,Z}$ هي كتلة النواة الأم، $M_{A,Z-1}$ كتلة النواة الابنة، m_e كتلة الإلكترون. ويمكن كتابة المعادلة السابقة:

$$E = \{(M_{A,Z} - (M_{A,Z-1} + m_e)\}C^2 \qquad (4\text{-}41)$$

$$E = \{(M_{A,Z} - Z.m_e) - (M_{A,Z-1} + Z.m_e + m_e)\}C^2 \qquad (4\text{-}42)$$

$$E = \{M_{A,Z} - M_{A,Z-1}\}C^2 \qquad (4\text{-}43)$$

وتكون عملية اسر إلكترون عادة يتبعها خروج خطوط طيف للأشعة السينية المميزة للعنصر وذلك لأن الإلكترونات للمدارات الخارجية تنتقل لتشغل مكان الإلكترونات الداخلية التي دخلت في عملية الأسر الإلكتروني ونتيجة لتتابع انتقال الإلكترونات بين المدارات. وغالباً تصدر أشعة جاما من هذه العملية لأن النواة الابنة تكون في حالة إثارة وتنتقل للحالة الأرضية بخروج أشعة جاما.

٤-٤ انحلال جاما *Decay*

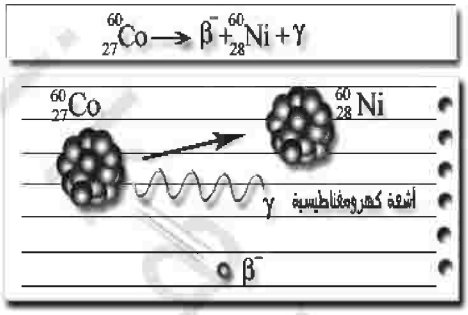
تكون النواة الابنة الناتجة من عمليات انحلال ألفا وبيتا في بعض الأحيان في حالة إثارة ويمكن لهذه النواة ان ترجع لحالتها المستقرة بالتخلص من الطاقة الزائدة عن طريق إشعاع فوتونات جاما . ولا تؤثر عملية خروج جاما علي العدد الذري ولا علي العدد الكتلي وتؤثر فقط علي الطاقة النسبية للنواة الأم. ويمكن أن تخرج أشعة جاما من النواة نتيجة للعمليات مختلفة هي:

١- إذا انتقلت النواة من مدار نووي لأخر وطاقته أقل (حسب نموذج القشور النووية) فإن فرق الطاقة بين المدارين يصدر علي صورة فوتونات أشعة جاما. ومثال علي ذلك نواة الباريوم تنتقل من مدار إلي أخر فتنطلق أشعة جاما بطاقة قدرها ٦٦٠ كيلو فولت أي أن:

$$^{137}B_a^{*} \rightarrow {}^{137}B_a + \gamma \qquad (4\text{-}44)$$

٢- عندما تتذبذب بعض الأنوية بتردد معين فإذا نقص تردد حركتها الاهتزازية أو توقفت عن الاهتزاز فإن فرق الطاقة بين الحالتين يصدر علي هيئة أشعة جاما ومثال علي ذلك انحلال بيتا من نواة الكوبلت-٦٠ لنواة نيكل-٦٠ في حالة إثارة وبتردد عالي كما في شكل(١٠-٤) أي أن:

$$^{60}_{27}Co \rightarrow {}^{60}_{28}Ni + \beta^{-} + \gamma^{0} + \bar{\nu} \qquad (4\text{-}45)$$



شكل (١٠-٤) يوضح خروج أشعة جاما

ثم تعود نواة النيكل لحالة الاستقرار بإصدار فوتونات جاما:

$$^{60}_{28}Ni^{*} \rightarrow {}^{60}_{28}Ni + \gamma \qquad (4\text{-}46)$$

٣ - إذا كان شكل النواة المثارة غير كروي فيكون لها القدرة علي الدوران وإذا توقفت عن الدوران أو نقصت سرعتها الزاوية فإنها تتخلص من بعض الطاقة بإصدار أشعة جاما. ومثال علي ذلك انحلال ألفا من نواة اليورانيوم من خلال التفاعل التالي:

$$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + \alpha \qquad (4\text{-}47)$$

ثم تعود نواة الثوريوم لحالة الاستقرار بإصدار فوتونات جاما:

$$^{234}_{90}Th^{*} \rightarrow {}^{234}_{90}Th + \gamma \qquad (4\text{-}48)$$

٤- عملية التحول الداخلي

يمكن للنواة أن تتخلص من الطاقة المسببة لأثارتها في بعض الأحيان دون إصدار أشعة جاما فتتحول الطاقة في هذه العملية لأحد

الإلكترونات الذرية القريبة منها والاحتمال الأكبر هو تحول أحد الكترونات المدار K خلال تفاعل كهرومغناطيسي يؤدي لانطلاق الإلكترون من الذرة وتكون الذرة بعد هذه العملية في حالة إثارة وكأنها حالة ظاهرة كهر وضوئية داخلية وتعود الذرة للحالة الأرضية بإصدار خطوط الأشعة السينية المميزة نتيجة تتابع انتقال الإلكترونات من المدارات الخارجية نحو الداخلية. وحيث أن طاقة الإثارة للنواة هي E^* قيمة محددة، فإن طاقة حركة إلكترونات التحول الداخلي E_e واحدة أيضاً في كل حالات انبعاث الإلكترون من قشرة معينة:

$$E_e^K = E^* - E_K \;\&\; E_e^L = E^* - E_L \qquad (4\text{-}49)$$

حيث $E_L, E_K, \ldots\ldots$ طاقات ربط الإلكترونات في القشور المناظرة بالذرة. ولذلك فإن طيف الطاقة لإلكترونات التحول الداخلي طيف خطي على خلاف الطيف المستمر للإلكترونات المنبعثة أثناء انحلال β. وإذا كانت طاقة الإثارة للنواة هي $E^* - E_K$ فإن فصل إلكترون K عن الذرة يكون مستحيلاً وتطرد إلكترونات التحول الداخلي من القشور الإلكترونية التالية فقط. وتستطيع النواة أن تطلق إلكترونات التحول الداخلي بجانب إمكانية إطلاق فوتونات جاما. أي أن النواة المثارة تعطي جزء من طاقتها لفوتونات جاما، والجزء الأخر فتعطيها للالكترونات الذرية. أي أن عودة النواة للحالة الأرضية لا يمنع حدوث عملية التحول الداخلي والعكس أيضا صحيح وتعود النواة لحالتها الأرضية في العادة من خلال العمليتين بنسب مختلفة. ويكون ثابت الانحلال للنواة β في هذه الحالة عبارة عن مجموع ثابت الانحلال للعمليتين.

$$\beta = \beta_\beta + \beta_{IC} \qquad (4\text{-}50)$$

حيث β_β, β_{IC} ثابت الانحلال لعملية التحول الداخلي وعملية انطلاق جاما.

ويعرف معامل التحول الداخلي α علي أنه النسبة بين احتمال صدور إلكترون من عملية التحول الداخلي واحتمال صدور فوتون من أشعة جاما أي أن:

$$\alpha = \frac{\lambda_{IC}}{\lambda_\gamma} = \alpha\,\lambda_\gamma(1+\alpha) \qquad (4\text{-}51)$$

ويمكن كتابة متوسط العمر الزمني للنواة الأم علي الصورة الأتي:

$$T_m = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_\gamma(1+\alpha)} \qquad (4\text{-}52)$$

٤-٥ إشعاع رونتجن وإلكترونات أوجي

عندما تحدث عملية التحول الداخلي تظل الذرة في حالة إثارة لوجود نقص إلكترون في أحد مداراتها ويملأ هذا المكان الخالي بإلكترون من المدارات الخارجية خلال فترة زمنية صغيرة. ولذلك فإنه في عملية التحول الداخلي ونتيجة خروج إلكترونات تصدر إشعاعات رونتجن المميزة أو ما يسمي بانبعاث إلكترونات أوجي نسبة إلي العالم الفرنسي الذي أكتشف هذه الظاهرة Augur's electrons . ويتم خروج هذه الإلكترونات عند حدوث عملية التحول الداخلي ويكون انبعاث الإلكترون الأكثر احتمالاً من المدار K وفي هذه الحالة تتساوي طاقة ربط الإلكترون المفقود E_K مع طاقة إثارة الذرة. ويتم انتقال إلكترون من المدار L ليحل محل إلكترون من المدار K وفي خلال هذه الفترة تبعث الذرة بكمات من رونتجن E_γ. ولكن انتقال إلكترون من المدار L إلي المدار K يمكن أن يتم بإطلاق كم رونتجن وإنما بقذف إلكتروناً أخر يكون في الغالب من المدار L وبالتالي طاقة حركته تساوي $E_K - 2E_L$ حيث $2E_L$ طاقة ربط إلكترونين في المدار L. وبعد انبعاث إلكترون أوجي تكون الذرة مزدوجة التأين في المدار L ونادر جداً ما يحدث في مدارات أخري. ويجب قبل تحرر الذرة الكامل من طاقة الإثارة حدوث انتقالات إلكترونية منخفضة الطاقة فيها وعملية ضم للإلكترونات

الناقصة إلي الذرة. عند تكون الفجوة في مدار K تبعث أخف الذرات غالباً بإلكترونات أوجي وليس بكمات رونتجن المميزة بينما تبعث الذرات التي لها $Z > 32$ بكمات رونتجن بصفة أساسية وباحتمال أقل إلكترونات أوجي.

٤-٦ وحدات قياس الجرعات الإشعاعية

١- التعرض Exposure

هي كمية الإشعاعات التي يتعرض لها جسم الكائن الحي و هو يصف مقدار الشحنة التي تشكلها الفوتونات في وحدة الكتلة من الهواء الجاف ووحدة قياس التعرض هي الروتنجن وتستخدم هذه الوحدة لقياس التعرض الناتج عن الأشعة السينية أو أشعة جاما التي لها طاقة منخفضة حتى ٣ ميجا إلكترون فولت والرونتجن يساوي $1R = 2.58 \times 10^{-4}$ كولوم/كجم.

٢- الجرعة الممتصة Absorbed Dose

هي كمية الطاقة التي امتصها الجسم من الإشعاعات و هي تصف الطاقة المنتقلة إلى منطقة بوحدة الكتلة من المادة. وبما أن الجرعة الممتصة تتغير بسرعة مع الموضع و خصوصا في وسط غير متجانس مثل جسم الإنسان فهي تعرف من أجل حجم عنصري و لكن يفترض بأن يكون هذا الحجم كبيرا إلى الذي يعطي متوسط إحصائي جيد عند نقطة ما. ووحدة قياس الجرعة الممتصة هي الراد (Rad) وهو عبارة عن انتقال كمية من الطاقة مقدارها ١٠٠ أرج لكل جم من المادة الممتصة عند مرور الإشعاعات فيها والراد يساوي $1Rad = 10^{-2}$ جول/كجم. وتبعاً للنظام الدولي SI قد استبدلت حديثا وحدة الراد بوحدة جديدة وهي الجراي (Gray) وهو الجرعة من الطاقة الممتصة مقدارها واحد جول لكل كجم من المادة ويساوي 1 Gray = 100 Rad.

٣- التأثير البيولوجي للإشعاع داخل جسم الإنسان

تختلف التأثيرات البيولوجية للإشعاعات داخل جسم الإنسان باختلاف نوع الإشعاعات وعلي سبيل المثال التأثير الناتج من جرعة قدرها واحد جراي من النيوترونات السريعة أكبر عشر مرات من نفس التأثير الناتج عن الجرعة نفسها من الأشعة السينية ولذلك أدخل تأثير سمي التأثير البيولوجي النسبي (RBE) وهو عبارة عن نسبة الجرعة الممتصة من أي نوع من أشعة جاما عند طاقة معينة إلي الجرعة الممتصة من أي نوع أخر من الإشعاعات بحيث يكون التأثير البيولوجي عنهما واحدا. ومثال علي ذلك:

١- التأثير الناتج عن جرعة قدرها ٠,٢ جراي من النيوترونات البطيئة يساوي نفس التأثير الناتج عن جرعة قدرها ١ جراي من أشعة جاما عند طاقة معين وتكون قيمة التأثير البيولوجي النسبي Relative Biological Effectiveness (RBE) للنيوترونات أقوي خمس مرات من تأثير أشعة جاما يساوي ($RBE = \frac{1}{0.2} = 5$)

4 - العامل الوزني للإشعاع
Radiation Weighting Factor (Wr)

و هو يصف التأثير البيولوجي لنوع معين من الأشعة و هو عبارة عن مقدار الجرعة الممتصة في عامل النوعية (Q) أ و في التأثير البيولوجي النسبي الذي يؤخذ بعين الاعتبار مقدرة الأشعة على إحداث الضرر البيولوجي و يعتمد عامل النوعية على متوسط التأثيرات البيولوجية النسبية علي الجسم كله عندما تؤثر الإشعاعات في نقط محددة من كل عضو بينما العامل الوزني للإشعاع فيكون هو الجرعة الممتصة المتوسطة في كل العضو. ويكون العامل الوزني للإشعاع في حالة جسيمات بيتا وأشعة جاما والأشعة السينية يساوي الواحد وفي حالة

البروتونات بطاقة حتى ٢ م.أ.ف يساوي ١٠ و في حالة جسيمات ألفا (α) يساوي ٢٠ وفي حالة النيوترونات السريعة ذات (١٠٠- ٢٠٠٠) تساوي ٢٠.

٥- الجرعة المكافئة Equivalent Dose (H)

في الوحدات الدولية SI تم استخدام الجرعة المكافئة للعضو وهو يحسب من ($H_T = \sum_R W_r D_{Tr}$) حيث (D_{Tr}) الجرعة الممتصة من نوع معين من الإشعاعات في العضو المعين. وعند جمع الجرعات المكافئة في العضو المعين من الإشعاعات المختلفة للحصول علي الجرعة المكافئة في العضو. وتقاس الجرعة المكافئة بالوحدات التالية:

١- الريم (Rem)

هي الوحدة القديمة لقياس الجرعة المكافئة في عضو حيث تكون الجرعة المكافئة بوحدة ريم وهي مجموع حاصل ضرب المعامل الوزني للإشعاع في الجرعة الممتصة بوحدة الراد.

٢- السيفرت(SV)Sievert

وهي الوحدة الحديثة في النظام الدولي فإذا كانت وحدة الجرعة الممتصة مقدرة بالجراي فإن الجرعة المكافئة تكون بالسيفرت

٦- معدل الجرعة Dose Rate (H)

هو عبارة عن قيمة الجرعة التي يحصل عليها العضو أو الإنسان في وحدة الزمن أي أن: معدل الجرعة = الجرعة/ الزمن ومثال علي ذلك إذا كان الجرعة التي يسمح بها للإنسان في مكان معين تساوي ٠,٥ ميلي سيفرت فالزمن المسموح به لهذا الإنسان خلال أسبوع إذا كان معدل الجرعة في هذا المكان يساوي ١٠٠ ميكروسيفرت/ساعة يساوي: الزمن = الجرعة/ معدل الجرعة $\frac{0.5 \times 10^{-3}}{100 \times 10^{-6}} = 5h$

٤-٧ التأثيرات البيولوجية للأشعة المختلفة

لم تعرف التأثيرات البيولوجية للأشعة المؤينة إلا بعد اكتشاف الأشعة السينية . فلقد حصلت عدة حوادث خطيرة نتيجة لاستخدام هذه الأشعة قبل الفهم الصحيح لمخاطرها على صحة الإنسان وحياته . فحتى عام ١٩٢٢م توفي حوالي مائة شخص من العاملين في هذا الحقل نتيجة لضرر الإشعاع البيولوجي . ولعل أشهر حادث في هذا الصدد هو ما جرى لعمال صناعة الساعات ذات العقارب والأرقام المضيئة . فلقد دأب هؤلاء العمال على جعل أطراف فرشاة الطلاء دقيقة بترطيبها بأفواههم . ولما كان هذا الطلاء يحتوي في تركيبه على عنصر الراديوم المشع فقد أخذ هذا العنصر بالتراكم في أجسادهم مع مرور الزمن مما أدى إلى زيادة الإصابة بمرض السرطان. ويمثل الإشعاع وبصورة دائمة خطرا أكيدا للأنظمة البيولوجية. وأن هذا الخطر يتناسب طردياً مع مقدار عدم علم العامل في حقول الإشعاع لطبيعة هذه الإشعاعات وكيفية تداولها واتقاء المخاطر الناجمة عنها . و يمكن تقليل الخطر إلى حدوده الدنيا المقبولة بالتزام التعاليم المناسبة ومراعاة قواعد وأساليب السلامة كما هو الأمر في أي مختبر كيميائي . ولما أصبح الكشف عن النشاط الإشعاعي - مهما صغر - ميسورا ، فان الخطر المتوقع لم يعد بالمشكلة المستعصية في الوقت الراهن وخاصة بالنسبة للمختبرات التي تتعامل مع مواد كيميائية مشعة والتي تم تصميمها بشكل ملائم وروعيت فيها مقاييس السلامة. ولقد وجد أن طاقة هذا الإشعاع اللازمة لأحداث تغيرات بيولوجية هي في الواقع قليلة . فعلى سبيل المثال أن كمية الإشعاع الكافية لقتل الثدييات لا تسبب إلا ارتفاعا طفيفا في درجة حرارة أجسامها لا يتجاوز ٠،٠١ درجة مئوية (واحد في المائة فقط من الدرجة المئوية) . من الجدير بالذكر أن هذا الارتفاع في درجة الحرارة ناتج عن تحول طاقة الإشعاع الى طاقة

حرارية وأنه أحد أعراض المرض المسمى بالمرض الإشعاعي وليس سببا له . كما أن طاقة الإشعاع هذه تنتشر خلال مرورها بالأعضاء الحية بنفس الطريقة التي تنتشر بها في أية مادة أخرى : أي بتأينها وتهييجها لذرات أو جزيئات المادة المارة بها .

وفي كائن حي يتسبب عن عملية التأين هذه تخريب مباشر جراء تكسر الروابط الكيميائية التي تربط ذرات الجزيئات ببعضها داخل نسيج الخلية الحية . أما التأثير المتبادل للإشعاع مع الماء سواء داخل أو خارج الخلايا الحية فانه يكون سببا في تكوين الجذور الحرة القادرة على القيام بتفاعلات كيميائية عديدة مما يؤدي إلى تخريب الخلايا عن طريق تفاعلات الأكسدة والاختزال بشكل خاص .

ويعتمد مقدار الضرر البيولوجي على عوامل عدة منها نوع الإشعاع (جسيمات ألفا أو بيتا السالبة والموجبة والإشعاعات الكهرومغناطيسية كالأشعة السينية وأشعة جاما ، و الالكترونات والنيوترونات ... مثلا) ومقدار طاقة هذا الإشعاع وسرعة دخوله الجسم الحي ونوع العضو المعرض لهذا الإشعاع (عين أو كبد أو عظم أو رئة ...) وأخيرا عمر النموذج المعرض للإشعاع ثم حالته الصحية إن كان بشرا. أما إذا كان التشعيع من مصدر خارجي أو من مصدر داخلي فتلك مسألة هامة . بالنسبة للتشعيع بمصدر خارجي تعتبر الأشعة السينية وأشعة جاما من أكثر الأشعة خطرا على الإنسان بسبب قدرتها الفائقة على الاختراق والنفوذ . من أمثلتها الأشعة السينية) المستخدمة في التصوير الإشعاعي ، وأشعة جاما التي لها نفس طبيعة الأشعة السينية. لا خطر من جسيمات ألفا إذا أتت من مصدر خارجي لأنها لا تستطيع النفاذ إلى طبقات الجلد السطحية غير الحساسة. لكنها تعتبر الأشعة الأشد خطرا فيما لو أصبحت مصدرا داخليا ثابتا للإشعاع ، أي إذا دخلت جسم الإنسان واستقرت في أحد أعضائه بشكل عنصر مشع أو مركب فيه عنصر مشع لهذه الدقائق . دقائق

ألفا هي نوى ذرات غاز الهيليوم النادر أي أنها ذرات هذا الغاز لكنها منزوعة الالكترونات الخارجية .

إن تعدد هذه العوامل وتشابكها يجعل الأمر صعبا في تحديد أية كمية من النشاط الإشعاعي تتسبب في إحداث حجم محدد من التأثيرات البيولوجية الضارة . إذ ليس هناك ثمة من علاقة خطية مباشرة بين الاثنين ، وعليه يصعب الاستنتاج العلمي الدقيق. وللعلم أن أي حزمة كثيفة من جسيمات ألفا تؤدي الى تحطيم جزيء الحامض النووي المعروف باسم (DNA) وهو أحد مكونات الخلايا الحية .ومن المعلوم أن النواة هي المركز الفعال لأي خلية . وعند دخول نوع آخر من الإشعاع مثل أشعة جاما فإنها لا تسبب أي تكسر أو تشوه إن مرت خلال كروموزوم كامل . والكروموزوم هو حامل العوامل الوراثية التي تتحدد بموجبها خصائص وصفات وملامح الوليد الجديد . وكل كروموزوم يتكون من حوالي ثلاثة بلايين جزيء من جزيئات الحامض النووي DNA

لكن أشعة جاما وجسيمات ألفا وبيتا تتسبب في ما يسمى بالتفكك الإشعاعي لماء الخلية الحية ونواتج هذا التفكك هي الأيونات والجذور الحرة والجزيئات الآتية (H O,OH,H) والتي قد تتفاعل مع الحامضين النوويين DNA و RNA إلى الحد الذي يؤدي إلى قتل الخلية بعد أن تعجز عن أداء وظائفها المعتادة بسبب التغير الطارئ على تركيبها الكيميائي . فالتركيب الكيميائي المحدد يؤدي وظيفة محددة بعينها . وطبيعي أنه كلما زاد الوزن الجزيئي لمركب معرض للإشعاع كلما زاد كمية الأجزاء المدمرة من هذا المركب . ولما كان الكروموزوم البشري يتكون من حوالي ثلاثة بلايين جزيء من جزيئات DNA فان جرعة إشعاعية كبيرة ستقتل كل خلية تعرضت لها.

٨-٤ تأثير الإشعاع علي الأعضاء المختلفة

يظهر تأثير الإشعاع التدميري على الخلايا الحية بأشكال مختلفة مثل النقص في معدل الانقسام الخلوي ولذلك فان الخلية لا تؤدي إلا عدد محدود من الانقسامات خلال فترة حياتها . ومنها التشوه الخلوي الذي يؤدي إلى اضطراب تسلسل التطور البيولوجي الطبيعي الذي يؤدي بدوره إلى ظهور نمط جديد في تطور مغاير للأصل كما في حالة تكون الخلايا السرطانية. والخلايا الأكثر حساسية للإشعاع هي تلك التي في طور الانقسام . وعليه فان الخطر الذي يصيب جنينا عمره يتراوح بين ٣ - ٧ أسابيع هو أكبر بمائة مرة من الخطر الذي تتعرض له الأم الحامل لهذا الجنين . كذلك الأجهزة والأعضاء والأنسجة التي تكون فيها معدلات تعويض الخلايا التالفة بطيئة فإنها تعتبر عالية الحساسية للإشعاع كالجلد والأعضاء التناسلية وكافة أعضاء تجويف البطن والعيون والأجزاء المسئولة عن تكوين الدم في الطحال ونخاع العظام وأنسجة الجهاز العصبي . وبشكل عام كلما كانت الخلايا عالية التخصص في أدائها النوعي كلما كان العضو الذي تنتمي إليه عاليا في سلم التطور، وبالتالي يصبح هذا العضو وخلاياه شديد الحساسية تجاه الإشعاع. ويمكن التمييز بين نوعين من الخلايا : نوع يساهم بشكل مباشر في وظائف الأعضاء كخلايا نخاع العظام والكبد وخلايا الجهاز العصبي . ونوع آخر يتعلق بعوامل الوراثة . أما النوع الأول من الخلايا فان خطر التدمير الإشعاعي يكون محصورا فيه فقط ، ويسمى هذا النوع من التأثير Somatic Effect بينما ينتقل التدمير الناجم عن تعرض النوع الثاني من الخلايا للإشعاع إلى الأجيال القادمة ، ويسمى هذا الصنف من التأثير GeneticEffect . ولم يظهر حتى اليوم أي دليل على أن للخلايا أو الكائنات الحية الأعلى أية مقاومة للإشعاع . ولكن بعض أنواع البكتيريا

أظهر قابلية على مقاومة الإشعاع بتقليل خطره أو بصده بالكامل اثر تعرضها لجرعات إشعاعية صغيرة لفترات زمنية طويلة. وأمكن تفسير هذه الظاهرة بتكون أجهزة حية شاذة عن سياق التطور العام لهذا النوع من البكتريا لها ردود أفعال مغايرة تجاه الإشعاع للأحياء الأصل قبل تشعيعها . كما لوحظ أنه يمكن زيادة فاعلية المقاومة للإشعاع لو عولج الكائن ببعض المركبات الكيميائية قبل تعرضه للإشعاع ، لأن هذه المركبات تلعب دور عوامل الصيانة المضادة للإشعاع . وأكثر هذه المركبات شهرة هي الثايولات الأمينية Aminothiols كمادة السستين Cysteine وهي حامض أميني طبيعي. كما يفسر الفعل الرادع لهذه المركبات باحتمال قدرتها على أن تلعب دور العامل اللاقط للجذور الحرة (بالتفاعل معها وتقييد حرية حركتها) الناتجة عن تفكك الماء تحت تأثير الإشعاع ، كجذور الهايدروكسايل(OH) Hydroxyl Radicals . وبالنظر للخصائص السمية لهذه المركبات فانه ولسوء الحظ لا يمكن استخدامها إلا بكميات صغيرة كمواد مضادة للإشعاع .

الجدول الرقم (٢) يبين تأثير أشعة جاما Gamma على مختلف الكائنات الحية من أحياء دقيقة مجهريه ونباتات وحيوانات. والبيان التالي يبين تأثير جرعات أشعة جاما بوحدة الراد Rad على الكائنات الحية مختلفة .

١- أحياء مجهريه دقيقة :

١- الإنزيمات لا تعمل عند أكثر من ٢ مليون راد.

٢- الفيروسات الجافة لا تعمل عند(٣٠ ألف –١/٢مليون) راد.

٣- البكتريا لا تعمل عند(٢٠٠٠ - ١٠٠ ألف) راد.

٤- أنواع الحيوانات والإنسان تقابلها الجرعات الإشعاعية بوحدة الراد التي تقتل ٥٠ % من هذه الكائنات خلال فترة ثلاثين يوما مثل:

١- الأميبيا عند ١٠٠ ألف راد. ٢- ذبابة الفاكهة عند ٦٠ ألف راد

٣- المحار عند ٢٠ ألف راد. ٤- السلحفاة عند ١٥٠٠ راد.
٥- العصافير والأرانب عند ٨٠٠ راد. ٦- القرود عند ٦٠٠ راد.
٧- الكلاب عند ٣٥٠ راد.
٨- الإنسان ٢٥٠ - ٤٥٠ راد .وبعض الخلايا البشرية تموت عند ١٠٠ راد فقط .

٤-٩ تأثير الجرعات الكبيرة على جسد الإنسان

الجرعات الفورية التي يتعرض لها جسد الإنسان كله خلال يوم واحد فقط والتي تزيد عن ألف ريم تؤدي إلى الموت خلال أربع وعشرين ساعة بسبب دمار الجهاز العصبي . والتعرض لجرعة إشعاعية مقدارها ٧٥٠ ريما يؤدي الى الموت أما في غضون بضعة أيام أو خلال شهر كحد أقصى بسبب النزيف الدموي في الجهاز الهضمي . غير أن العناية الطبية المركزة يمكن أن تلعب دورا لكن في تأخير أجل الموت لا أكثر . أما الجرعات الإشعاعية التي تقل عن ١٥٠ ريم فنادرا ما تكون قاتلة . ولكن عند حدودها العليا يحدث الموت عادة خلال فترة تتراوح بين ٤ - ٨ أسابيع بعد التعرض للإشعاع بسبب دمار الكرات الدم البيضاء.ومن لم يمت في هذه الفترة الحرجة يكن نصيبه الشفاء التام . وهذا يدل على أن لجسم الإنسان القدرة على إصلاح التالف الناتج من التعرض للإشعاع ، الأمر الذي أثبتته تجارب عديدة أجريت على بعض الحيوانات . ثم إن الجرعات الإشعاعية التي تقل عن الخمسين ريما لا يتسبب عنها إلا نقص عدد الكرات الدم البيضاء . وتسمى هذه الظاهرة طبياً لوكيما الدم (Leukopenia) . وان الجرعة الإشعاعية التي قدرها ٢٥ ريم تكفي لظهور الأعراض الأولى للضرر الجسدي (غير الوراثي) لو تعرض الإنسان للإشعاع لفترة قليلة. ويمكن أن يحصل هذا التفاوت في مقادير الجرعة الإشعاعية نتيجة لانفجار الأسلحة النووية (قنبلة هيروشيما وقنبلة ناجازاكي) أو الحوادث المؤسفة

التي تقع بين الحين والأخر في بعض المفاعلات النووية كتبخر الوقود النووي الثقيل المفاجئ لخلل ما في أجهزة السيطرة والتحكم والتبريد (كما حصل في مفاعلات تشير نوبل في أوكرانيا) . ويعتمد ضرر الجرعات الإشعاعية أساسا على زمن التعرض لها . وكما لوحظ أن للجسم القابلية على الشفاء من تأثيرات الإشعاع . ولكن هناك من الآثار الباقية المؤجلة التي لا تكشف عن نفسها إلا بعد مرور فترة زمنية طويلة . ويسمي هذا النوع من التأثير الإشعاعي (التأثير الجسدي الآجل).

فضحايا القنابل الذرية التي ألقيت على اليابان عام ١٩٤٥ والذين تماثلوا للشفاء بعد إصابتهم بالمرض الإشعاعي الحاد ، كانت نسبة الإصابة بمرض السرطان بينهم تساوي ٢%. لقد بينت دراسة حالات هؤلاء الناجين من الموت الذري ما يلي:

١- ظهور حالات اضطراب الرؤية بعد فترة تتراوح بين ٥ - ١٠ سنوات .

٢- سرطان كرات الدم البيضاء بعد فترة ٨ - ١٠ سنوات .

٣- سرطان الغدة الدرقية بعد فترة ١٥ - ٣٠ سنة .

أما حالة ما يسمى بالتشعيع الداخلي (لأن المصدر المشع داخل جسم الإنسان) فقد لوحظ أن الزمن اللازم لظهور أعراض مرض سرطان الرئة في عمال تعدين اليورانيوم في مناجم تفتقر إلى وسائل التهوية الفعالة ، ومرض سرطان العظام بالنسبة للعاملين في حقل طلاء عقارب الساعات وأرقامها بالراديوم المشع ، لوحظ أن الزمن اللازم لظهور أعراض هذين النوعين من السرطان يتراوح بين ١٠ - ٢٠ سنة

ويتعرض الإنسان خلال حياته إلى الأشعة المؤينة من مصادر طبيعية Sources Natural و مصادر من صنع الإنسان man-made sources عن طريق التعرض الخارجي والداخلي . يعتبر التعرض خارجي عندما يتعرض الجسم للأشعة المؤينة المنبعثة من مصدر خارج

الجسم ويتم امتصاص الطاقة الإشعاعية في الجسم من الخارج إلى الداخل - أما التعرض الداخلي فيحدث عندما تصل المادة المشعة إلى داخل الجسم عن طريق البلع أو الاستنشاق أو من خلال الجلد . وفي هذه الحالة تتعرض أنسجة الجسم ويتم امتصاص الطاقة الإشعاعية المنبعثة من المادة المشعة داخل الجسم في كافة الاتجاهات و تقدر الآثار المترتبة علي هذا التعرض بحساب الجرعة الإشعاعية الممتصة في الجسم من مجموع جرعة التعرض الخارجي والداخلي.

وتتوقف سلوكيات المواد المشعة في البيئة على:-

١- الخصائص الكيميائية والفيزيائية للعنصر المشع

٢- الكمية الموجودة

٣- خصائص مكونات البيئة

٤- المسارات الحرجة للمادة المشعة في مكون البيئة و قدرة كل مكون علي تركيز أو تخفيف المادة المشعة .

٤-١٠ تعرض الإنسان للإشعاع

عند دخول المواد المشعة داخل الجسم عن أي طريق يتم امتصاصها و دخولها في العمليات البيوكيميائية الأساسية ووصول هذه النويدات إلى الدورة الدموية و سوائل الجسم ويتم توزيعها إلى جميع أنسجة الجسم طبقا للصفات و الخصائص الكيميائية للعناصر والمركبات التي تكون هذه المواد المشعة . و تتحكم في الآثار الناجمة عن التعرض الإشعاعي الداخلي عوامل كثيرة من أهمها بطئ تطور و ظهور الأثر ، و عدم تجانس امتصاص الجرعة الإشعاعية في الأنسجة إلى جانب الفترة الزمنية اللازمة للتحلل الإشعاعي للمادة المشعة لتعطي جرعة متراكمة علي مدى الوقت ، و كذلك درجة السمية الكيمائية للمادة المشعة ذاتها. و من أهم العوامل المتحكمة في أثار التعرض الإشعاعي ما يلي :

أ- الخواص الفيزيائية للمادة المشعة وتتضمن عمر النصف ، نوع و طاقة الأشعة المنبعثة ، الانتقال الخطى للطاقة ، الطاقة الممتصة من النسيج الحاوي للمصدر إلى النسيج المستقبل للأشعة.

ب- العوامل البيولوجية للمادة المشعة و انتقال المادة داخل الجسم من عضو إلى أخر،إلى جانب استبقاء المادة المشعة في نسيج معين،والفترة الزمنية لتواجد المادة المشعة داخل الجسم ثم طرق خروج المادة المشعة من الجسم و كذلك عمر النصف البيولوجي إلى جانب عوامل أخرى مثل السن والجنس و الأمراض المختلفة. و يتوقف انتقال المادة المشعة على الدورة الدموية و سوائل الجسم وكذلك الجهاز التنفسي والجهاز الهضمي والتي تحدد آليات وميكانيكية انتقال المادة المشعة من نسيج إلى أخر.ومن الآثار الصحية للتعرض الإشعاعي هي التحول السرطاني لبعض الأنسجة التي تتواجد فيها المواد المشعة لفترات طويلة نسبيا ويمر التأثير الإشعاعي بمرحلتين أساسيتين هما:

١- المرحلة الفيزيائية

وهي تتم خلال زمن قصير جداً حوالي 10^{-16} ثانية وفيها تنتقل الطاقة من النوع المعين من الإشعاعات إلي جزئيات الماء بالخلية ويحدث التأين طبقاً للتفاعل الأتي: $H_2O \xrightarrow{Radiation} H_2O^+ + e^-$ حيث H_2O^+ هو أيون الماء الموجب، e^- هو الإلكترون السالب.

٢- المرحلة الفيزيوكيميائية:

وهذه المرحلة في تطور الإصابة الإشعاعية تخص امتصاص الطاقة الإشعاعية داخل روابط الجزئيات الكيميائية في الخلايا وينتج عن ذلك حدوث توتر أو تأين لهذه الروابط الفيزيوكيميائية في الجزئيات الموجودة في الحيز البيولوجي الذي تعرض والذي حدثت فيه عمليات امتصاص للطاقة . وينتج عن ذلك حدوث تغيرات في أداء وظيفة الجزئيات الكيمائية التي حدث توتر وتأين لروابطها وتسمي تغيرات في

الجزئيات . وتعتبر هذه المرحلة الأساس الذي سوف يترتب عليه تطور وظهور و نوعية الإصابة الناتجة من التعرض الإشعاعي . وهذه المرحلة مهمة فيما يخص حدوث عمليات إصلاح في الجزئيات الكيمائية التي تأثرت بالتعرض الإشعاعي وامتصاص الطاقة الإشعاعية وكذلك تطور الإصابة الإشعاعية ومداها والذي يحدد مقدار وحجم الأثر المتبقي بعد الإصلاح الذي يتم في الجزئيات . وتتم هذه المرحلة خلال زمن قصير حوالي 10^{-6} ثانية بعد حدوث التأين ويحدث خلالها تفاعل الأيونات الموجبة والسالبة مع جزئيات الماء الأخرى ويكون نتيجة ذلك التفاعل مجموعة مركبات جديدة حسب المعادلات الآتية: $H^{+} + H_2O \rightarrow OH + H_2O^{+}$ ، $H_2O^{+} + e^{-} \rightarrow H_2O$ ثم يتحلل هذا الأيون الأخير ويتكون ايون الهيدروكسيد السالب والهيدروجين حسب التفاعل الأتي: $H_2O^{+} \rightarrow H + OH^{+}$.

٣- المرحلة الكيميائية

وتأخذ هذه المرحلة ثواني معدودة وتتفاعل خلالها نواتج الهيدروجين والهيدروكسيد مع جزئيات الخلية المختلفة العضوية ويؤدي هذا التفاعل إلي احتمال تفاعلها مع الكروموسومات وتتحد معها وتؤدي إلي تكسيرها وإحداث بعض التغير في الجينات.

٤- المرحلة البيولوجية

وتأخذ هذه المرحلة بين دقائق معدودة وعشرات السنين. وتبدأ في هذه المرحلة ظهور أثار التغير الكيميائي التي تحدث في الخلية مثل موت الخلية ومنع وتأخر انقسام الخلية وحدوث تغيرات دائمة في الخلية تنتقل وراثياً إلي الخلايا الجديدة.و تغير المعدل الزمني للخلايا الجديدة. وهذه التأثيرات تظهر على جسم الإنسان كالأتي: تأثيرات جسدية وفيها تظهر الأعراض على جسم المتعرض للإشعاع.

و تأثيرات وراثية وفيها تظهر الأعراض على الأجيال.وفي كلا الحالتين هناك تأثيرات آنية وتأثيرات متأخرة ربما لا تظهر إلا بعد زمن

طويل. ومن التأثيرات المتأخرة هو السرطان الذي يظهر بعد (١٠ إلى ٣٠) سنة منذ زمن التعرض. ويمكن تلخيص الظواهر كما يلي:

١-الإصابة بسرطان الجلد.

٢- تغيرات في نخاع العظم الذي يولد كرات الدم والتسبب في سرطان الدم.

٣- تغيرات في عدد وطبيعة خلايا الدم.

٤- الأورام السرطانية المختلفة.

٥- إعتام عدسة العين.

٦- التأثيرات الوراثية والتشوهات الخلقية.

٧- التأثير على تكامل نمو الجنين والقصور الذهني.

obeikandl.com