الفصل الثامن 8

الاطياف الذرية والليزر

Atomic spectrums and Laser

مفردات الفصل:

8-1 مقدمة.

8-2 مستويات الطاقة وأنموذج بور للذرة.

8-3 طيف ذرة الهيدروجين

8-4 الأطياف.

8-5 انواع الأطياف.

8-6 الأشعة السينية.

8-7 تأثير كومبتن.

8-8 الليزر والميزر.

8-9 خصائص أشعة الليزر.

8-10 الية عمل الليزر.

8-11 توزيع بولتزمان والتوزيع المعكوس.

8-12 مكونات جهاز الليزر.

8-13 منظومات مستويات الليزر.

8-14 انواع الليزر.

8-15 بعض تطبيقات الليزر.

الأهداف السلوكية

بعد دراسة الفصل ينبغي للطالب ان يكون قادرا على ان:

- يعلل وضع أنموذج ذري.
- يعرف أنموذج بور للذرة.
- يذكر بنود أنموذج بور للذرة.
- يعلل فشل أنموذج رذرفورد للذرة.
- يعرف طيف ذرة الهيدروجين.
- يعرف مستويات الطاقة.
- يذكر أنواع الأطياف.
- يوضح كيفية توليد الأشعة السينية.
- يوضح تأثير كومبتن.
- يحل مسائل رياضية.
- يعرف ما الليزر والميزر.
- يذكر قانون بولتزمان.
- يعرف التوزيع المعكوس.
- يعرف آلية عمل الليزر.
- يعدد أنواع الليزرات.

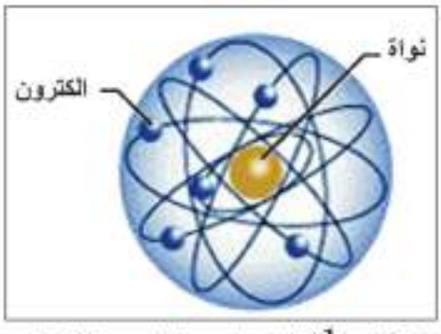
المصطلحات العلمية	
Bohr Model of the Atom	انموذج بور للذرة
Energy Levels	مستويات الطاقة
Excited State	مستوى متهيج
Ground State	مستوى ارضي
Spectrum of Hydrogen Atom	طيف ذرة الهيدروجين
Spectra	الأطياف
Continuous Spectrum	الطيف المستمر
Line Spectrum	الطيف الخطي
X-rays	الأشعة السينية
Compton Effect	تأثير كومبتن
Maser	الميزر
Laser	الليزر
Induced Absorption	الامتصاص المحتث
Spontaneous emission	الانبعاث التلقائي
Stimulated emission	الانبعاث المحفز
Pumping	الضخ
Excimer Laser	ليزر الاكسايمر
Solid-state Laser	ليزر الحالة الصلبة
Boltzmann Distribution	توزيع بولتزمان
Inversion population	التوزيع المعكوس
Four-Level system	منظومة رباعية المستوى
Three-Level system	منظومة ثلاثية المستوى

1-8 Introduction مقدمة

لقد أهتم العلماء بدراسة التركيب الذري للمادة فوضع العالم ثومسون نموذجاً يصف فيها ان الذرة كرة مصمتة متناهية في الصغر موجبة الشحنة يتوزع بداخلها عدد من الالكترونات السالبة بحيث تكون الذرة متعادلة كهربائيا ثم توالت المشاهدات والمعلومات حول تركيب المادة وطبيعة الشحنة الكهربائية فوضعت نماذج ذرية اخرى من قبل العلماء مثل دالتون و رذرفورد وبور ومع نهاية القرن التاسع عشر تركزت معظم الدراسات الطيفية على ذرة الهيدروجين باعتبارها ابسط الذرات تركيبا ومن ثم فأي أنموذج يوضع للذرة عليه تفسير كل الحقائق والمعلومات حول سلوك الذرة.

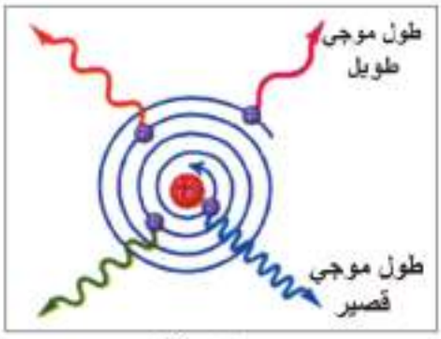
2-8 مستويات الطاقة وأنموذج بور للذرة

اقترح العالم رذرفورد عام 1911 انموذجا للذرة اذ أفترض بان الذرة تتكون من نواة موجبة متمركزة في وسط الذرة تدور حولها الالكترونات لاحظ الشكل (1) وقد فشل نموذج رذرفورد للذرة للاسباب الآتية:



شكل (1) انموذج رذرفورد للذرة

1- عندما يدور الالكترون في الذرة حول النواة يغير اتجاه حركته باستمرار، لذا فهو جسيم معجل وتبعاً للنظرية الكهرومغناطيسية الكلاسيكية فان اي شحنة متحركة بتعجيل تبعث اشعاعاً كهرومغناطيسياً ولذلك يجب ان يفقد الالكترون الدائر حول النواة داخل الذرة جزءاً من طاقته في اثناء الدوران اي انه يخسر طاقة بصورة مستمرة مادامت الحركة مستمرة ومن ثم يجب ان ينتهي بحركة حلزونية مقترباً من النواة في زمن قصير ومن ثم تنهار البنية الذرية، لاحظ الشكل (2).



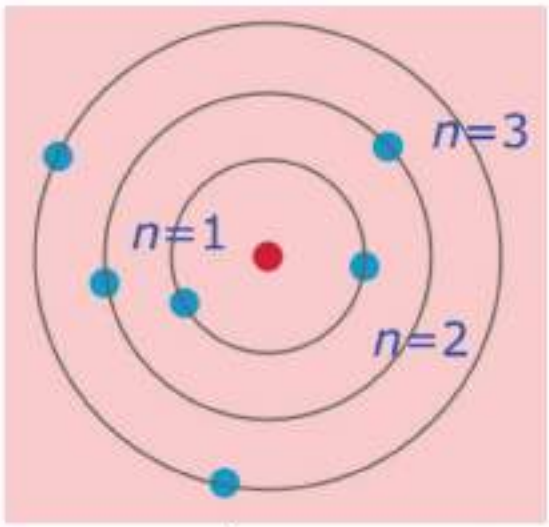
شكل (2)

2- عندما تتناقص طاقة الالكترونات تدريجيا يتولد طيف مستمر بينما اثبتت التجارب ان طيف ذرة الهيدروجين هو طيف خطي.

لكن في الحقيقة ان شيئا من هذا القبيل لايحدث مطلقاً لان الذرات موجودة وممكن ان تبعث اشعاعا باطوال موجية ذات قيم متميزة ودقيقة جداً كما ان الذرة تحت الظروف الطبيعية تمثل تركيباً مستقراً لاتبعث اي اشعاع الا تحت شروط خاصة مثل تسخين المواد أو تعريضها لجهد كهربائي في الانابيب المفرغة.

ولقد بقي وضع الالكترونات في الذرة وعدم انهيارها محيرا للعلماء إذ استمر البحث والاستقصاء عن سبب عدم انهيار الذرة الى ان درست اطياف الضوء المنبعث عن ذرات العناصر المثارة واكتشاف نظرية الكم إذ اقترح العالم بور Bohr عام 1913 نموذجا جديدا عن التركيب الذري ومن فرضياته:

1- تدور الالكترونات سالبة الشحنة حول النواة بمدارات محددة المواقع تمثل مستويات الطاقة دون ان تشع طاقة لاحظ الشكل (3). ويمتلك الالكترون أقل طاقة عندما يكون في اقرب مستوى من النواة وعندها تكون الذرة مستقرة وان بقاء الالكترون في ذلك المستوى يستوجب امتلاكه طاقة وزخم مناسبين لذلك المستوى.

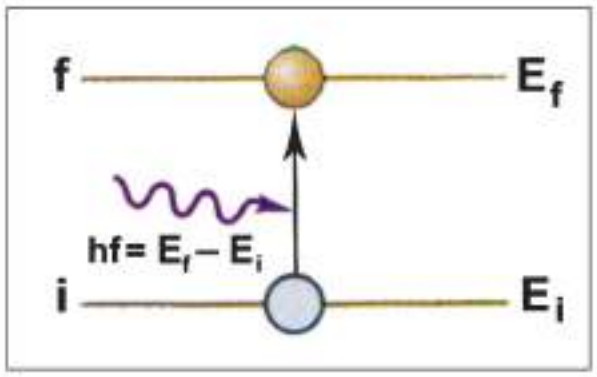


شكل (3)

2- الذرة متعادلة كهربائياً إذ إن شحنة الالكترونات تساوي شحنة النواة الموجبة.

3- ان الذرة لاتشع طاقة بسبب حركة الالكترون في مداره المحدد وتكون الذرة مستقرة.

4- عندما يكتسب الالكترون كماً من الطاقة فانه يقفز من مستوى استقراره اذ تكون طاقته فيه (E_i) الى مستوى طاقة اعلى (E_f) عندها تكون الذرة متهيجة (excited) ثم تعود الذرة الى حال استقرارها وذلك بعودة الالكترون الى مستوى استقراره باعثا فوتوناً تردده (f) لاحظ الشكلين (4 ، 5).... يعطى بالعلاقة الآتية:



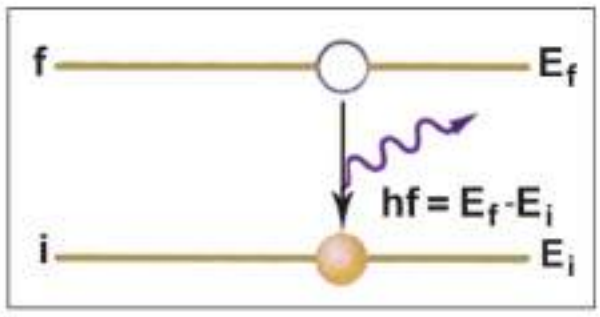
شكل (4) ذرة انتقلت من مستوى واطئ الطاقة الى مستوى طاقة اعلى

أي إن: $hf = E_f - E_i$

إذ إن:

h = ثابت بلانك = 6.63×10^{-34} J.s

f = التردد



شكل (5) ذرة متهيجة تبعث فوتون برجوعها الى مستوى الاستقرار

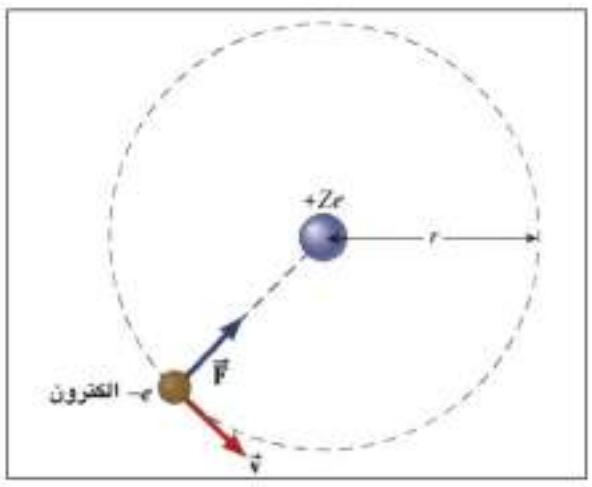
5- في مجال الذرة يمكن تطبيق قانون كولوم على الشحنات الكهربائية والقانون الثاني لنيوتن على القوى الميكانيكية لاحظ الشكل (6).

6- يمتلك الالكترون زخماً زاوياً ($L=mvr$) في مداره المحدد يساوي اعداداً صحيحة من ($h/2\pi$)

أي إن: $L_n = n(h/2\pi)$

$m v_n r_n = n(h/2\pi)$

إذ إن : n=1.2.3.4.5.. . . ويمثل العدد الكمي الرئيس.

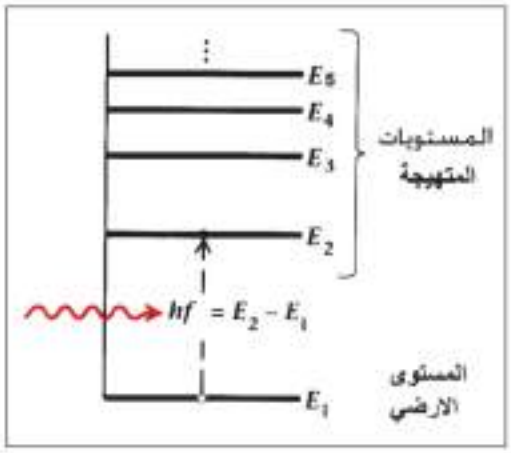


شكل (6)

3-8 طيف ذرة الهيدروجين Hydrogen Atom spectrum

درس بور طيف ذرة الهيدروجين الاعتيادي لانها ابسط ذرة، اذ تحتوي الكتروناً واحداً فقط وخرج بكثير من المشاهدات والاستنتاجات شكلت اساس نظريته عن ذرة الهيدروجين.

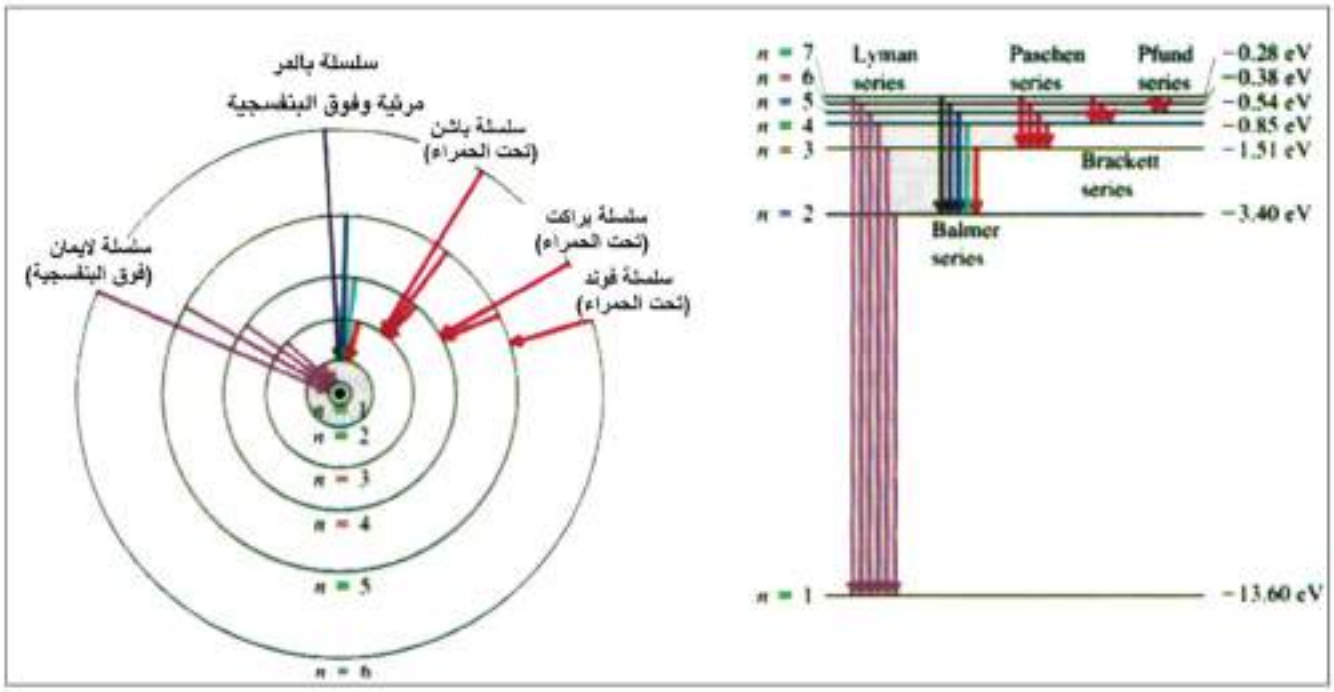
فعند اثارة ذرة الهيدروجين ينتقل الكترونها من المستوى الواطئ الطاقة الى مستوى اعلى طاقة ولا يبقى في مستوى الطاقة الاعلى الا لمدة زمنية قليلة نحو (10^{-8}s) ثم يهبط الالكترون الى مستوى الطاقة الواطئ.



شكل (7) مستويات الطاقة

ان اوطأ مستوى طاقة للذرة E_1 يسمى بالمستوى الارضي للذرة في حين تسمى المستويات العليا .....E_2, E_3, E_4 بالمستويات المتهيجة (states excited) لاحظ الشكل (7).

ان جميع طاقات هذه المستويات سالبة لذلك لايمتلك الالكترون طاقة كافية تجعله يهرب من الذرة.



شكل (8) مستويات الطاقة لذرة الهيدروجين

1- فعند انتقال الكترون ذرة الهيدروجين من المستويات العليا للطاقة الى المستوى الأول للطاقة E_1 (n=1) تنتج سلسلة لايمان (Lyman series) ومدى ترددداتها تقع في المنطقة فوق البنفسجية (uv-region)، وهي سلسلة غير مرئية.

2- وعند انتقال الكترون ذرة الهيدروجين من المستويات العليا للطاقة الى مستوى الطاقة الثاني E_2 (n=2) تنتج سلسلة بالمر (Balmer series) ومدى ترددداتها تقع في المنطقة المرئية وتمتد حتى المنطقة فوق البنفسجية.

3- وعند انتقال إلكترون ذرة الهيدروجين من المستويات العليا للطاقة الى مستوى الطاقة الثالث (E_3) (n=3) تنتج سلسة باشن (Baschen series) ومدى ترددداتها تقع في المنطقة تحت الحمراء. وهي سلسلة غير مرئية.

4- وعند انتقال إلكترون ذرة الهيدروجين من المستويات العليا للطاقة الى مستوى الطاقة الرابع (E_4) (n=4) تنتج سلسلة براكت (Brackett series) وهي سلسلة غير مرئية، ومدى ترددداتها تقع في المنطقة تحت الحمراء.

5- وعند عودة إلكترون ذرة الهيدروجين من مستويات الطاقة العليا الى مستوى الطاقة الخامس (E_5) (n=5) تنتج سلسلة فوند (Pfund series) وهي سلسلة غير مرئية، ومدى ترددداتها تقع في المنطقة تحت الحمراء.

4-8 الاطياف Spectra

عند سقوط ضوء الشمس مثلا على موشور زجاجي فإنه يتحلل الى مركباته السبعة و التي تسمى بالوان الطيف الشمسي وهذا ما لاحظه العالم نيوتن في اواخر القرن السابع عشر وتسمى سلسلة الترددات الضوئية الناتجة من تحليل حزمة من الضوء الابيض بوساطة موشور (بالطيف).

تعد دراسة وتفسير الطيف الذري لطبيعة المادة وبنية ذراتها وجزيئاتها من اهم الدراسات التي ادت الى معرفة تركيبها الذري والجزيئي ويتم ذلك عن طريق تحليل الضوء الصادر عن تلك المواد ودراسة طيفها باستعمال جهاز المطياف لاحظ الشكل (9).

شكل (9)

وأهم المصادر الضوئية المستعملة في دراسة الاطياف هي:

1- مصادر حرارية وهي المصادر التي تشع ضوءاً نتيجة ارتفاع درجة حرارتها مثل الشمس ومصابيح التنكستن والاقواس الكهربائية.

2- مصادر تعتمد على التفريغ الكهربائي خلال الغازات مثل انابيب التفريغ الكهربائي عند ضغط منخفض.

لعلك تتسائل عن انواع الاطياف ؟

وما الاختلاف بين طيف واخر وكيف نحصل على كل منهما ؟

للاجابة على هذا التساؤل نجري النشاط الآتي:

نشاط

انواع الاطياف

ادوات النشاط: موشور زجاجي ، وحاجز ذو شق للحصول على حزمة متوازية تسقط على الموشور، شاشة بيضاء، أنابيب تفريغ تحتوي غاز (مثل النيون ، الهيدروجين ، بخار الزئبق)، مصباح كهربائي خويطي، مصدر للتيار الكهربائي.

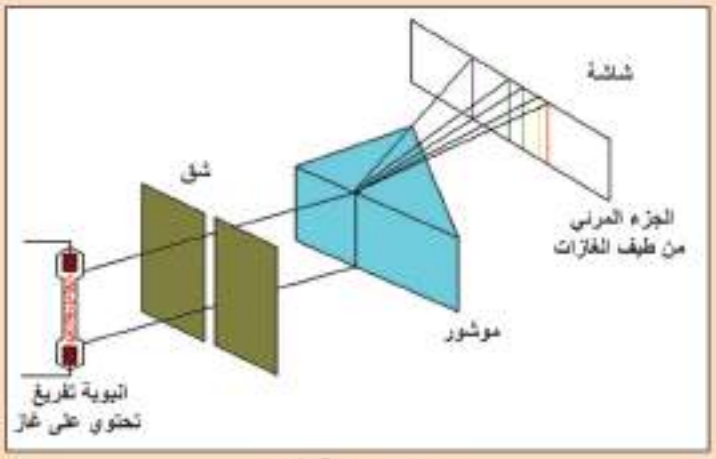
خطوات النشاط:

- نربط الانبوب الذي يحتوي الهيدروجين بالدائرة الكهربائية المناسبة لكي يتوهج غاز الهيدروجين. لاحظ الشكل (10).
- ضع الموشور الزجاجي في مسار الحزمة المنبعثة من انبوب غاز الهيدروجين.

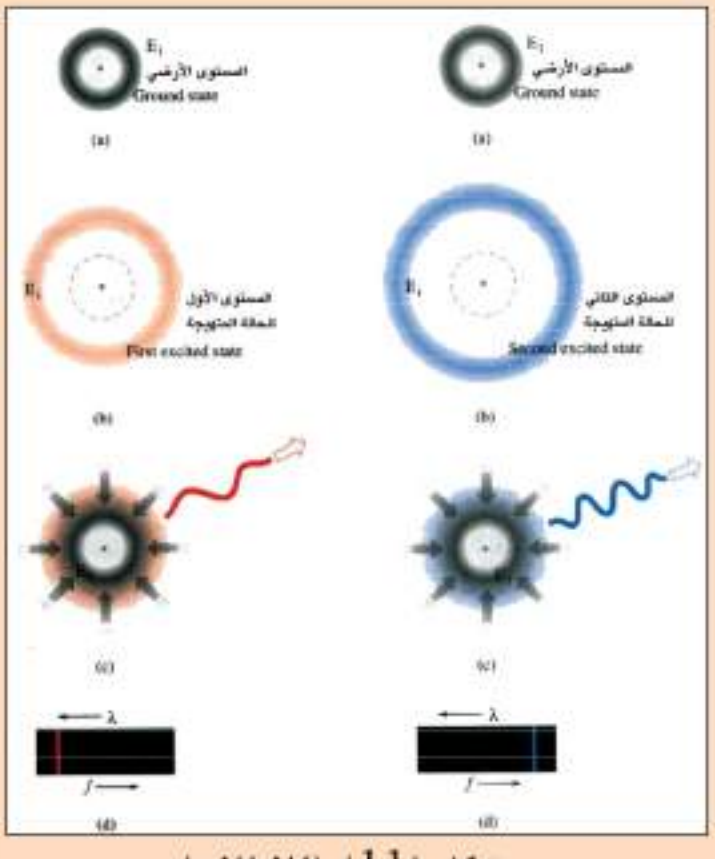
ثم نغير موقع وزاوية سقوط الحزمة المنبعثة حتى نحصل على أوضح طيف ممكن على الشاشة.

- لاحظ شكل ولون الطيف الظاهر على الشاشة.
- كرر الخطوات السابقة باستعمال انابيب الغازات الاخرى والمصباح الكهربائي الخويطي.
- لاحظ شكل ولون الاطياف المختلفة على الشاشة.

نستنتج من النشاط ان الطيف الناتج من تحليل الاشعاعات المنبعثة من الغازات الاخرى يختلف باختلاف نوع الغاز.



شكل (10)



شكل (11) (للاطلاع)

هناك صنفين من الاطياف:

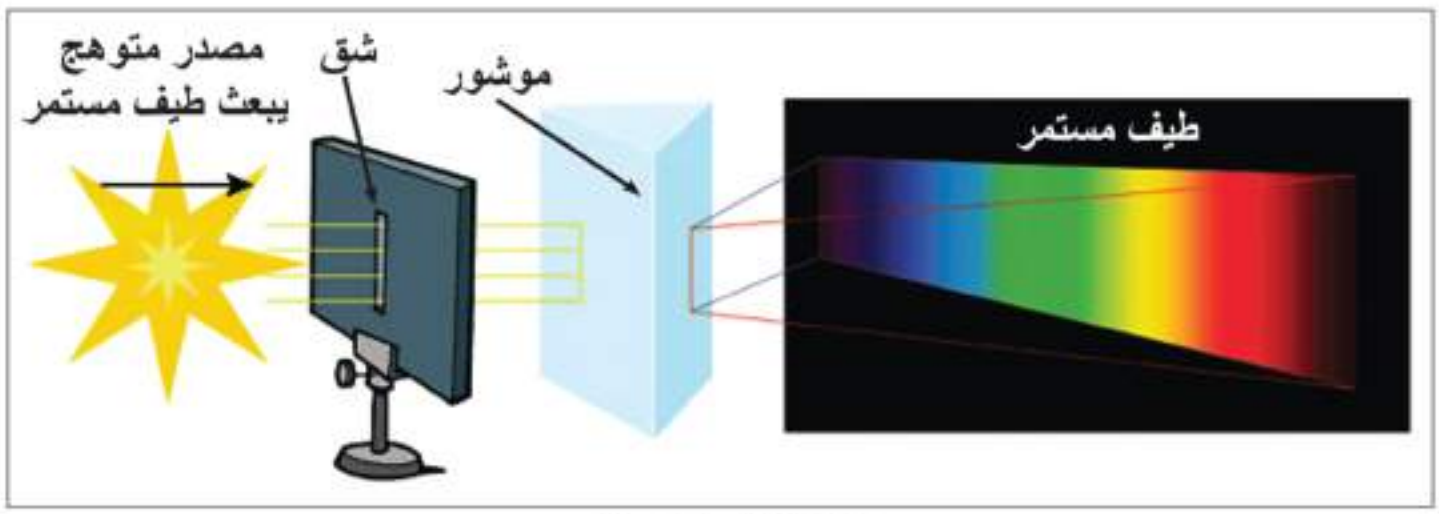
1- أطياف الانبعاث : (Emission spectra)

2- اطياف الامتصاص (Absorption spectra) لاحظ الشكل (11).

1- **اطياف الانبعاث** هي اطياف المواد المتوهجة وتقسم على:

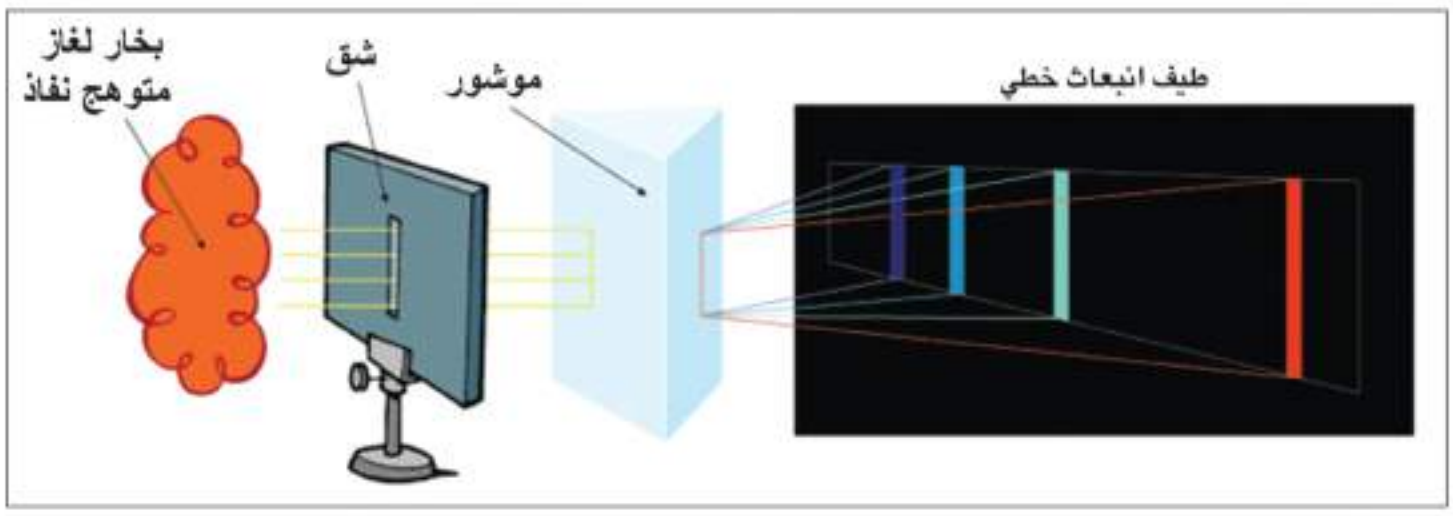
a- الطيف المستمر (continuous spectrum): نحصل عليه من الاجسام الصلبة المتوهجة والسائلة المتوهجة او الغازات المتوهجة عند ضغط عالٍ جدا. الشكل (12) يوضح طيف مستمر يحتوي مدى واسع من الترددات.

فالطيف المنبعث من خويط التنكستن لمصباح كهربائي متوهج الى درجة البياض هو طيف مستمر (continuous spectrum)، ويتكون هذا الطيف من مدى واسع من الاطوال الموجية الواقعة ضمن المدى المرئي المتصلة مع بعضها.



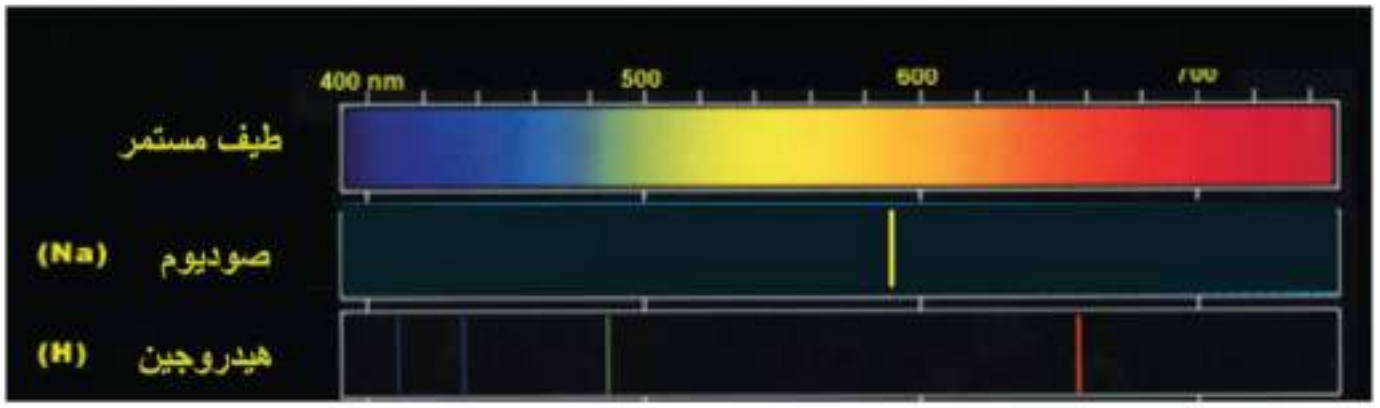
شكل (12) الطيف المستمر

b- الطيف الخطي: نحصل عليه من توهج الغازات والابخرة عند الضغط الاعتيادي او الواطئ. لاحظ الشكل (13). والذي يوضح مجموعة من الخطوط الملونة البراقة على خلفية سوداء وان كل خط منه يمثل طولاً موجياً معيناً.



شكل (13) الطيف الخطي

فالطيف الخطي البراق للصوديوم مثلا متكون من خطين اصفرين براقيين قريبين جدا من بعضهما يقعان في المنطقة الصفراء من الطيف المرئي، وقد يظهر الخطان كخط واحد ان لم تكن القدرة التحليلية للمطياف كبيرة. اما الطيف الخطي للهيدروجين فيتكون من اربعة خطوط براقة بالالوان (احمر ، اخضر، نيلي ، بنفسجي) لاحظ الشكل (14).



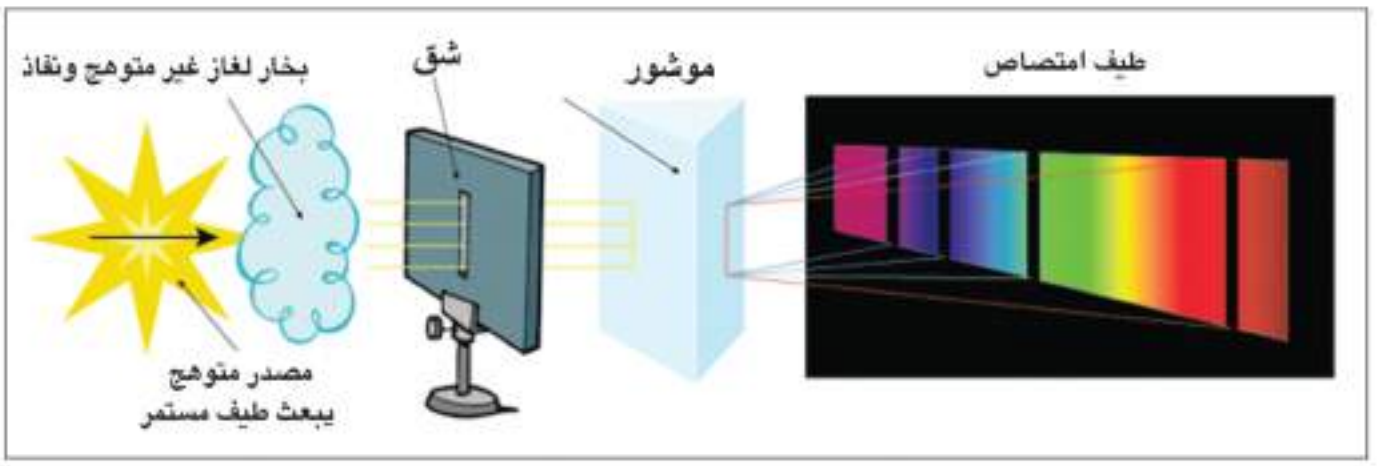
شكل (14) للأطلاع

وقد وجد ان لكل عنصر طيفاً خطياً خاصاً به اي ان الطيف الخطي هو صفة مميزة واساسية للذرات.

لقد أدت دراسة ألاطياف إلى تطوير طرائق الكشف عن وجود عنصر مجهول في مادة ما او معرفة مكونات سبيكة، وذلك بأخذ عينة من تلك المادة وتبخيرها في قوس كاربوني لجعلها متوهجة ثم يسجل طيفها الخطي بوساطة المطياف ويقارن الطيف الحاصل مع الاطياف القياسية الخاصة بطيف كل عنصر.

C- الطيف الحزمي: طيف يحتوي حزمة اوعدداً من الحزم الملونة على ارضية سوداء وتتكون كل حزمة من عدد كبير من الخطوط المتقاربة وهو صفة مميزة للمواد جزيئية التركيب. ويمكن الحصول عليه من مواد متوهجة جزيئية التركيب كغاز ثنائي اوكسيد الكاربون في انبوبة تفريغ تحتوي املاح الباريوم او املاح الكالسيوم والمتوهجة بوساطة قوس كاربوني.

2- اطياف الامتصاص Absorption spectra : طيف الامتصاص هو طيف مستمر تتخلله خطوط او حزم معتمة، فعندما يمر الضوء المنبعث من مصدر طيفه مستمر خلال بخار غير متوهج (او مادة نفاذة) يمتص من الطيف المستمر الاطوال الموجية التي يبعثها فيما لو كان متوهجاً وعندها نحصل على طيف امتصاص لاحظ الشكل (15).



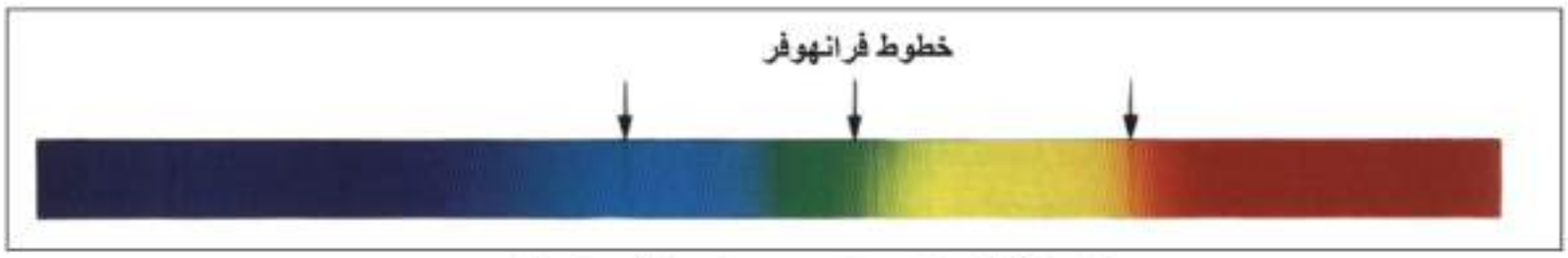
شكل (15) طيف الامتصاص

ومن الجدير بالذكر ان الجو الغازي المحيط بالشمس يمتص قسماً من الطيف المستمر لها (يمتص الاطوال الموجية التي يبعثها فيما لو كان متوهج)، وقد لاحظ فرانهوفر خطوطاً سوداً في طيف الشمس المستمر سُميت بخطوط فرانهوفر نسبة لمكتشفها العالم فرانهوفروالذي اكتشف ما يقرب من 600 خط منها.

ان سبب ظهور الخطوط السود في الشمس يعود الى ان الغازات حول الشمس وفي جو الارض الاقل توهجاً من غازات باطن الشمس تمتص من الطيف المستمر للشمس الاطوال الموجية التي تبعثها هذه الغازات فيما لو كانت متوهجة وهذا مايسمى بطيف الامتصاص الخطي للشمس. ومن هذه الخطوط أمكن معرفة الغازات التي تمتص هذا الضوء. لاحظ الشكل (16).

هل تعلم (للاطلاع)

لقد اكتشف عنصر الهليوم من طيف الامتصاص الخطي للشمس قبل اكتشافه على سطح الارض.



شكل (16) طيف الامتصاص الخطي للشمس

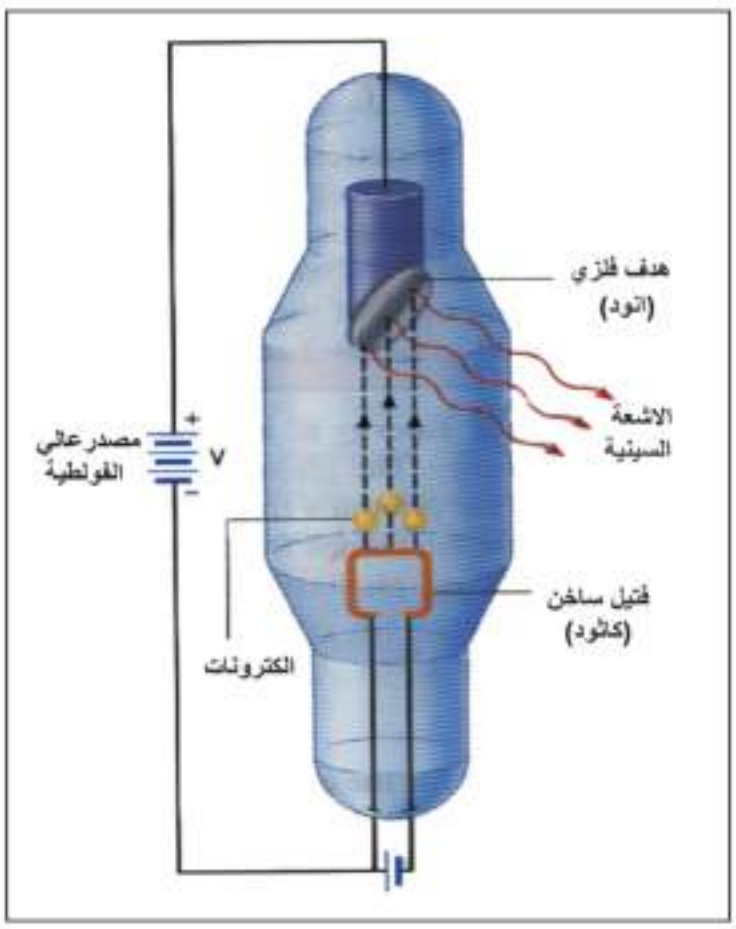
6-8 الاشعة السينية X - ray

اكتشفت الاشعة السينية عام 1895 من قبل العالم رونتجن مصادفة عندما كان يدرس كهربائية الغازات والتوصيل الكهربائي للالكترونات داخل أنابيب مفرغة جزئيا من الهواء.

الاشعة السينية هي موجات كهرومغناطيسية غير مرئية اطوالها الموجية قصيرة جدا نحو nm (0.001 - 10). لاتتـــأثر بالمجالات الكهربائية والمغناطيسية لانها ليست دقائق مشحونة.

يمكن الحصول على الاشعة السينية باستعمال انبوبة زجاجية مفرغة من الهواء، لاحظ الشكل (17).

تحتوي على قطبين احدهما سالب (كاثود Cathode) وهو فتيل تنبعث منه الالكترونات عند تسخينه والاخر قطب موجب (أنود Anode) وهو هدف فلزي عادة يميل بزاوية معينة مع اتجاه حركة الالكترونات المعجلة، ونتيجة لتصادم هذه الالكترونات تتولد حرارة عالية لذا يصنع الهدف من مادة درجة انصهارها عالية جدا مثل التنكستن والمولبدينيوم كما يختار الهدف من مادة ذات عدد ذري كبير وذلك لزيادة كفاءة الاشعة السينية وتستعمل وسائل تبريد خاصة لتبريد الهدف نتيجة تولد الحرارة العالية.



شكل (17) جهاز توليد الاشعة السينية

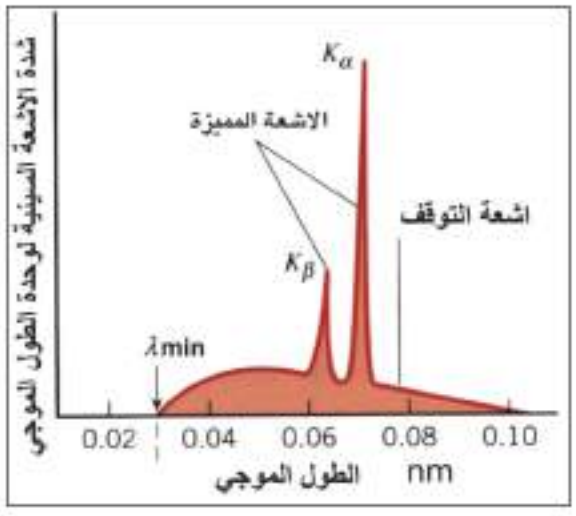
هل تعلم (للاطلاع)

اكتشف العالم وليم رونتجن الاشعة السينية ولانه كان يجهل طبيعتها، فقد أطلق على هذه الأشعة اسم أشعة X.

نوعا طيف الاشعة السينية:

تُعد الاشعة السينية ظاهرة كهروضوئية عكسية لان الاشعة السينية تتولد نتيجة لتحول طاقة الالكترونات المعجلة المنبعثة من الكاثود والساقطة على الهدف الى فوتونات الاشعة السينية.

يبين الشكل (18) احد الاطياف النموذجيةطيف للأشعة السينية الناجمة عن تصادم الالكترونات مع الهدف، إذ نجد أن شدة الاشعة السينية تتناسب طرديا مع عدد الفوتونات المنبعثة عند طول موجي معين وأن طيف الاشعة السينية يتألف من نوعين، هما الطيف المستمر والطيف الخطي.



شكل (18)

1 – الاشعة السينية ذات الطيف الخطي الحاد: وتسمى احيانا (الاشعة السينية المميزة Characteristic x-ray) عند سقوط الالكترونات المعجلة على ذرات مادة الهدف فإن هذه الالكترونات تنتزع أحد الالكترونات من أحد المستويات الداخلية للهدف ويغادر الذرة نهائيا فتحصل حالة التأين، أو قد يرتفع الى مدار اكثر طاقة وتحصل حالة التهيج، وفي كلا الحالين تصبح الذرة قلقة (متهيجة) فتحاول العودة الى وضع الاستقرار، وعندما يهبط احد الالكترونات من المستويات العليا (ذو الطاقة العالية) الى مستوى الطاقة الذي انتزع منه الالكترون يبعث طاقة بشكل فوتون للاشعة السينية طاقته تساوي فرق الطاقة بين المستويين E_2 ، E_1 أي أن :

$$hf = E_2 - E_1$$

وهذا الطيف صفة مميزة لذرات مادة الهدف.

2 – الاشعة السينية ذات الطيف المستمر Continuous spectra: ينتج هذا الطيف عن أصطدام الالكترونات المعجلة مع ذرات مادة الهدف مما يؤدي الى تباطؤ حركتها بمعدل كبير بتأثير المجال الكهربائي لنوى مادة الهدف ونتيجة لهذا التباطؤ فإن الالكترونات تفقد جميع طاقتها وتظهر بشكل فوتونات الاشعة السينية بترددات مختلفة.

ان اعظم تردد لفوتون الاشعة السينية يتوقف على فرق الجهد (V) المسلط على طرفي انبوب الاشعة السينية والذي يعجل الالكترون فيكسبه طاقة حركية عظمى (KE_{max}) على وفق العلاقة الآتية:

$$KE_{max} = e\,V$$

إذ إن:

KE_{max} = الطاقة الحركية العظمى للالكترون

e = شحنة الالكترون

V = فرق الجهد

وعند تصادم الالكترون بالهدف تتحول هذه الطاقة الى طاقة اشعاعية لفوتون الاشعة السينية (كم الاشعة السينية).

$$(KE)_{max} = Ve$$

ومنها نحصل على:

$$hf_{max} = Ve \Rightarrow f_{max} = \frac{Ve}{h}$$

ومن العلاقة السابقة يمكننا الحصول على:

إذ إن: f_{max} يمثل أعلى تردد للفوتون ويقابله أقصر طول موجي λ_{min} ،

لاحظ الشكل (18).

$$f_{max} = \frac{c}{\lambda_{min}}$$

ومن العلاقتين السابقتين يمكننا الحصول على:

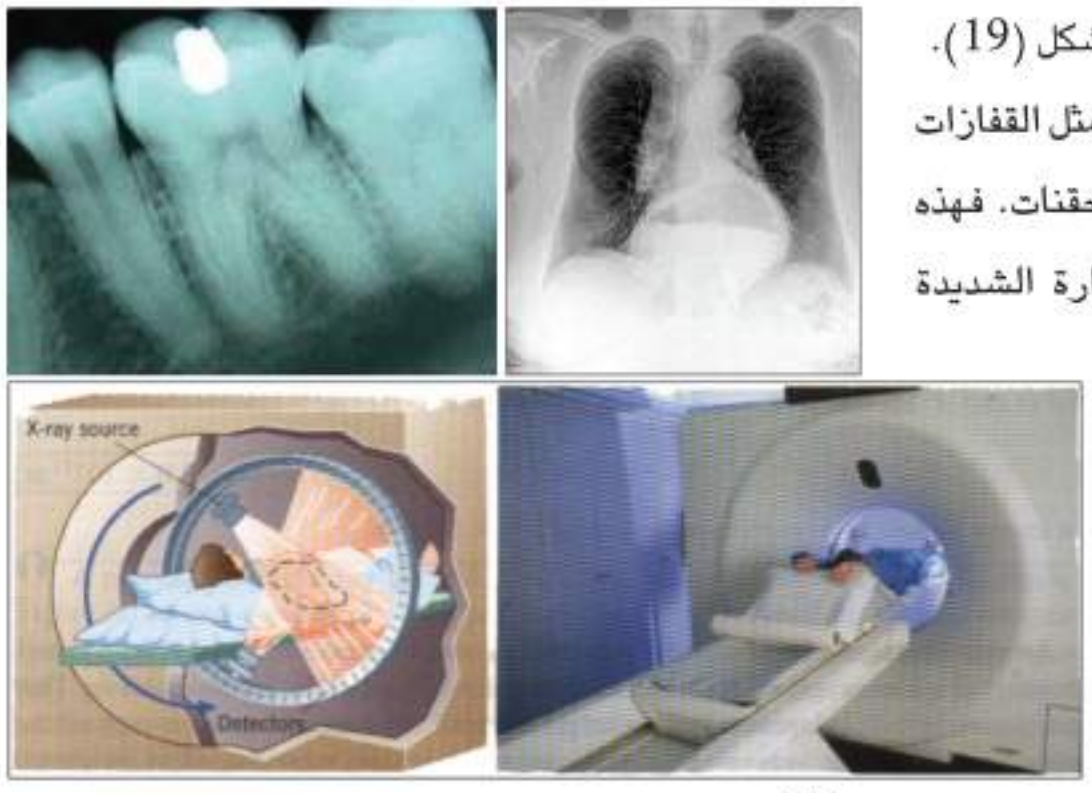
$$\therefore \frac{c}{\lambda_{min}} = \frac{Ve}{h}$$

$$\therefore \lambda_{min} = \frac{hc}{Ve}$$

ومن تطبيقات الاشعة السينية انها تستثمر في المجالات الآتية:

1. **المجال الطبي:** فهي تعطى صوراً واضحة للعظام التي تظهر بشكل فاتح والأنسجة تظهر بشكل اغمق عند التصوير الاشعاعي، للكشف عن تسوس الأسنان وكسور العظام وتحديد مواقع الأجسام الصلبة مثل الشظايا أو الرصاص في الجسم، وكذلك الكشف وعلاج بعض الأورام في الجسم، لاحظ الشكل (19).

كما تستثمر لتعقيم المعدات الطبية مثل القفازات الجراحية اللدنة أو المطاطية والمحقنات. فهذه المعدات تتلف عند تعرضها للحرارة الشديدة ولذا فلا يمكن تعقيمها بالغليان.



شكل (19) بعض تطبيقات الاشعة السينية (للاطلاع)

2. **المجال الصناعي:** للكشف عن الهنات والشقوق في القوالب المعدنية والأخشاب المستعملة في صناعة الزوارق، كما ساعدت دراسة طيف امتصاص هذه الأشعة في المادة على جعل الأشعة السينية من احدى الطرائق للكشف عن العناصر الداخلة في تركيب المواد المختلفة وتحليلها. وكذلك تستثمر في دراسة خصائص الجوامد والتركيب البلوري.

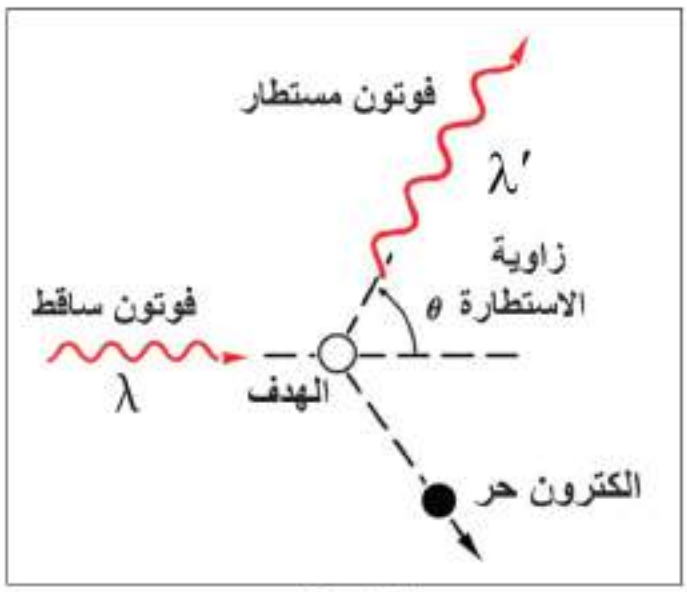
3. **المجال الأمني:** لمراقبة حقائب المسافرين في المطارات، الشكل (20).

كما تستثمر للتعرف على أساليب الرسامين والتمييز بين اللوحات الحقيقية واللوحات المزيفة، وذلك لأن الألوان المستعملة في اللوحات القديمة تحتوي على كثير من المركبات المعدنية التي تمتص الأشعة السينية، وأما الألوان المستعملة في اللوحات الحديثة فهي مركبات عضوية تمتص الأشعة السينية بنسبة أقل.

شكل (20)

7-8 تأثير كومبتن Compton effect

توصل العالم كومبتن الى انه عند سقوط حزمة من الاشعة السينية (فوتونات) ذات طول موجي معلوم (λ) على هدف من الكرافيت النقي، فإن الاشعة تستطار بزوايا مختلفة، وان الاشعة المستطارة ذات طول موجي (λ') اطول بقليل من الطول الموجي (λ) لحزمة الاشعة الساقطة وان التغيير في الطول الموجي ($\lambda' - \lambda$) يزداد بزيادة زاوية الاستطارة (θ)، مع انبعاث الكترون من الجانب الاخر للهدف لاحظ الشكل (21).



شكل (21) تأثير كومبتن

وقد فسر العالم كومبتن ذلك بأن الفوتون الساقط على هدف من الكرافيت يتصادم مع الكترون حر من الكترونات ذرات مادة الهدف فاقدا مقدار من طاقته، ويكتسب هذا الالكترون بعد التصادم مقداراً من الطاقة بشكل طاقة حركية تمكنه من الافلات من مادة الهدف (أي ان الفوتون يسلك سلوك الجسيمات).

افترض ان التصادم بين الفوتون والالكترون الحر هو من النوع المرن (elastic scattering) اذ يخضع لقانوني حفظ الزخم وحفظ الطاقة.

وطبقا لتأثير كومبتن فإن:

مقدار الزيادة في الطول الموجي لفوتونات الاشعة السينية المستطارة بوساطة الالكترونات الحرة لذرة الهدف مقارنة بالطول الموجي للفوتونات الساقطة يعتمد على زاوية الاستطارة (θ) فقط وفق العلاقة الآتية:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$$

إذ إن :

λ' : طول موجة الفوتون المستطار.

λ : طول موجة الفوتون الساقط.

h : تمثل ثابت بلانك $= 6.63 \times 10^{-34}\ J.S$

m_e : كتلة الإلكترون $= 9.11 \times 10^{-31}\ kg$

c: سرعة الضوء $= 3 \times 10^{8}\ m/s$

θ: زاوية استطارة الفوتون

$h / m_e c$ تمثل طول موجة كومبتن (Compton wave length) والتي تساوي $(0.24 \times 10^{-11}\ m)$

ومن الجدير بالذكر ان تأثير كومبتن هو احد الادلة المهمة التي تؤكد السلوك الدقائقي للموجات الكهرومغناطيسية والتي عجزت النظرية الكهرومغناطيسية لماكسويل عن تفسيره.

مثال (1)

مامقدار الزيادة الحاصلة في طول موجة الفوتون المستطار (في تأثيركومبتن) أذا استطار بزاوية 60^{o} ؟

علما بأن:

ثابت بلانك $= 6.63 \times 10^{-34}\ J.S$

سرعة الضوء $= 3 \times 10^{8}\ m/s$

كتلة الالكترون $= 9.11 \times 10^{-31}\ kg$

الحل

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos\theta)$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{9.11 \times 10^{-31} \times 3 \times 10^{8}}(1 - \cos 60^{\circ})$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{9.11 \times 10^{-31} \times 3 \times 10^{8}}(1 - \frac{1}{2})$$

$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 1.2 \times 10^{-3}\ nm$ مقدار الزيادة الحاصلة في طول موجة الفوتون

مثال (2)

اذا كان فرق الجهد المطبق بين قطبي انبوبة توليد الاشعة السينية ($1.24\times10^{4}V$) لتوليد اقصر طول موجة تسقط على هدف الكرافيت في جهاز (تأثير كومبتن)، وكانت زاوية استطارة الاشعة السينية 90° فما طول موجة الاشعة السينية المستطارة؟

الحل

$$hf_{max} = (KE)_{max} = eV$$

$$f_{max} = \frac{eV}{h} = \frac{1.6\times10^{-19}\times(1.24\times10^{4})}{6.63\times10^{-34}\,J.s}$$

$$f_{max} = 2.99\times10^{18}\,Hz \simeq 3\times10^{18}\,Hz$$

$$\lambda_{min} = \frac{c}{f_{max}} = \frac{3\times10^{8}}{3\times10^{18}} = 1\times10^{-10}\,m$$

$\lambda_{min} = 0.1\times10^{-9}\,m$ طول موجة الاشعة السينية الساقطة

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e C}(1-\cos\theta)$$

$$\lambda' - 0.1\times10^{-9}\,m = (0.24\times10^{-11}\,m)(1-\cos90^{\circ})$$

$$\lambda' - 0.1\times10^{-9}\,m = (0.24\times10^{-11}\,m)(1-0)$$

$$\lambda' = 0.24\times10^{-11}\,m + 0.1\times10^{-9}\,m$$

$$\lambda' = 0.0024\times10^{-9}\,m + 0.1\times10^{-9}\,m$$

$$= 0.1024\times10^{-9}\,m$$

$\lambda' = 0.1024nm$ طول موجة الاشعة السينية المستطارة

8-8 Laser and Maser الليزر والميزر

دخلت أشعة الليزر في العديد من المنتجات التكنولوجية فتجدها عنصر أساسي في أجهزة تشغيل الأقراص المدمجة وفي صناعة الإلكترونيات وقياس المسافات بدقة – خاصة أبعاد الأجسام الفضائية– وفي الاتصالات.أو في آلات طبيب الأسنان أو في معدات قطع ولحام المعادن وغيرها من المجالات. كل تلك الأجهزة تستعمل الليزر، ولكن ما الليزر؟ وما الذي يميزه عن المصادر الضوئية الاخرى ؟

جاءت تسمية كلمة ليزر LASER من الأحرف الأولى لفكرة عمل الليزر والمتمثلة في العبارة الآتية:

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

وتعني تضخيم الضوء بوساطة الانبعاث المحفز للإشعاع.

وضع العالم البرت اينشتاين في 1917 الأساس النظري لعملية الانبعاث المحفز stimulated emission وصُمّم أول جهاز ليزر في عام 1960 من قبل العالم ميمان T.H. Maiman باستعمال بلورة الياقوت ويعرف بليزر الياقوت Ruby laser.

أما تسمية الميزر فجاءت من الحروف الاولى لفكرة عمل الميزر والمتمثلة في العبارة:

Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation

وتعني تضخيم الموجات الدقيقة بوساطة الانبعاث المحفز للإشعاع.

هل تعلم (للاطلاع)

تمكن العالم تاونس من تصميم اول جهاز يقوم بتضخيم الموجات الدقيقة باستعمال تقنية الانبعاث المحفز وهو ميزر الامونيا عام 1954.

9-8 خصائص اشعة الليزر Properties of Laser

يمتاز شعاع الليزر بالميزات الاساسية الآتية :

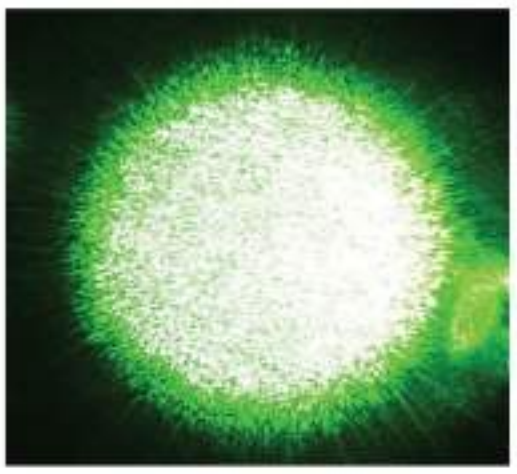
1- أحادي الطول الموجي (احادي اللون) monochromatic أي أن له طولاً موجياً واحداً. فشعاع الليزر يتميز بالنقاء الطيفي بدرجة تفوق اي مصدر اخر فأشعة الضوء المنبعثة من المصادر الضوئية العادية تحوي مدى واسعاً من الاطوال الموجية لاحظ الشكل (22).

شكل (22)

2- التشاكه coherency: موجات حزمة اشعة الليزر تكون كلها في الطور نفسه والاتجاه والطاقة، وبهذا ممكن ان تتداخل موجتان فيما بينها تداخلا بناءً. لاحظ الشكل (23).

شكل (23)

ويمكن ملاحظة ذلك عند النظر الى موقع سقوط أشعة الليزر على حاجز إذ تظهر بشكل نقاط صغيرة مرقطة (Speckle) لاحظ الشكل (24).



شكل (24) يمثل تداخل اشعة الليزر

3- الاتجاهية Directionality: تبقى موجات حزمة الليزر متوازية مع بعضها لمسافات بعيدة بانفراجية قليلة وهذا يعني ان حزمة الليزر تحتفظ بشدتها نسبياً في حين تنتشر موجات الضوء الاعتيادي بشكل عشوائي بالاتجاهات كافة، لاحظ الشكل (25)، فإذا أرسلت حزمة من اشعة الليزر الى القمر، على بعد 384000 km عن سطح الأرض تقريباً، وكانت بالشدة الضوئية الكافية، فإنها تفرش على سطح القمر بقعة مضاءة لا يزيد قطرها على 1km، في حين أنه إذا أرسل الضوء الاعتيادي ووصل، فرضاً، إلى سطح القمر، فإن قطر البقعة المضاءة يصل إلى 4376 km تقريباً.

شكل (25)

4- السطوع Brightness: ان طاقة موجات اشعة الليزر تتركز في مساحة صغيرة وذلك لقلة انفراجيتها مما يجعل شعاع الليزر ذا شدة سطوع عالية جداً، لاحظ الشكل (26) لذا يمكن ان يكون شعاع الليزر أسطع من اشعة الشمس بمليون مرة. فعلى سبيل المثال ان شدة الاشعة المنبعثة من مصباح التنكستن الاعتيادي ذو القدرة 100watt تبلغ حوالي $2000watt/cm^2$ في حين تصل شدة اشعة الليزر بالقدرة نفسها حوالي $2x10^9 watt/cm^2$ اي أعلى بمقدار مليون مرة من شدة الاشعة الصادرة عن مصباح التنكستن الاعتيادي .

شكل (26) سطوع الليزر

10-8 Mechanism of laser action آلية عمل الليزر

قد يتبادر الى ذهننا الأسئلة الآتية:

ما شروط توليد الليزر ؟

ما نوع الانتقالات التي تحصل بين مستوى الطاقة المتهيج والمستوى الارضي ؟

وما الانتقالات التي تعمل على توليد الليزر وتحت اية ظروف ؟

هل ان هذه الانتقالات ضرورية جدا لانبعاث شعاع الليزر ؟

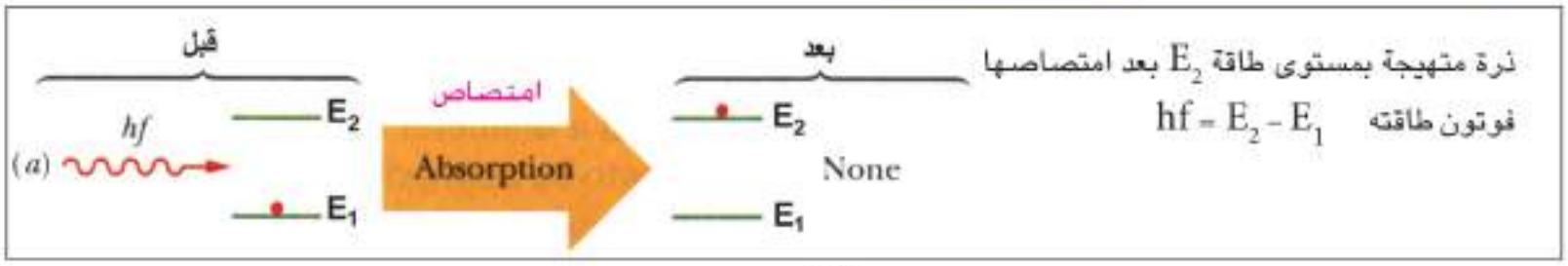
للاجابة على هذه التساؤلات لاحظ الشكل (27 a . b . c)

نفترض نظاماً ذرياً ذا مستويين للطاقة يوضح ثلاثة انواع من الانتقالات الالكترونية وهي:

1- الامتصاص المحتث Induced Absorption

هو انتقال الذرة من مستوى طاقة واطىء (E_1) الى مستوى طاقة متهيج (E_2) وذلك بامتصاص فوتون طاقته تساوي فرق الطاقة بين هذين المستويين لاحظ الشكل (27-a)

اي أن : $E_2 - E_1 = hf$



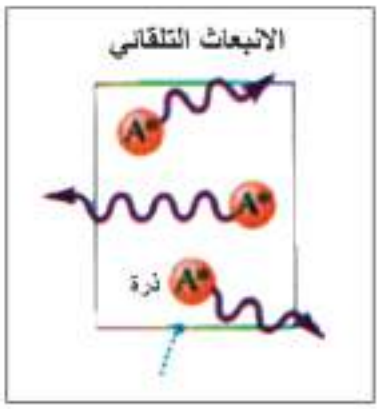
شكل (27-a) الامتصاص المحتث

2- الانبعاث التلقائي Spontaneous Emission:

عندما تصير الذرة في مستوى الطاقة الاعلى (مستوى التهيج) تميل دائما الى حالة الاستقرار فتعود تلقائياً بعد مدة زمنية قصيرة (العمر الزمني لمستوى التهيج) الى المستوى الارضي وهذا يصاحبه انبعاث فوتون، طاقته تساوي فرق الطاقة بين المستويين ($E_2 - E_1 = hf$) (ويسمى هذا الانتقال بالانبعاث التلقائي spontaneous Emission لاحظ الشكل (27-b).

وتكون الفوتونات المنبعثة تلقائياً مختلفة من حيث الطور والاتجاه والطاقة لاحظ الشكل (28).

شكل (27-b) الانبعاث التلقائي

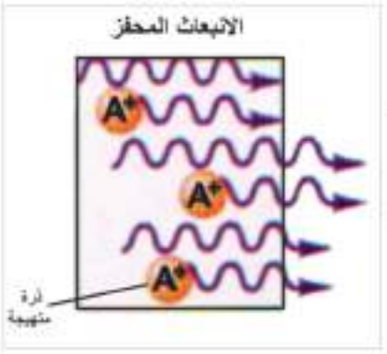


شكل (28) فوتونات منبعثة تلقائياً مختلفة من حيث الطور والاتجاه

3- الانبعاث المحفز Stimulated Emission:

عندما يؤثر فوتون في ذرة متهيجة وهي في مستوى الطاقة E_2 طاقته مساوية تماماً الى فرق الطاقة بين المستوى E_2 والمستوى الطاقة الاوطأ E_1 فإنه يحفز الالكترون غير المستقر على النزول الى المستوى E_1 وانبعاث فوتون مماثل للفوتون المحفز بالطاقة والتردد والطور والاتجاه اي الحصول على فوتونين متشاكهين لاحظ الشكلين (27-c)، (29).

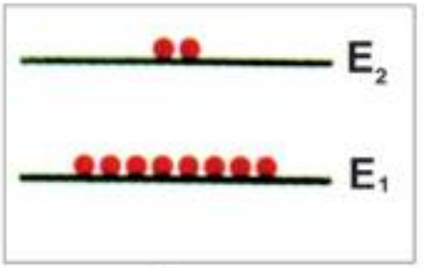
شكل (c-27) الانبعاث المحفز



شكل (29) نحصل على فوتونين متشاكهين في الانبعاث المحفز

11-8 توزيع بولتزمان والتوزيع المعكوس

Boltzmann distribution and Population Invertion

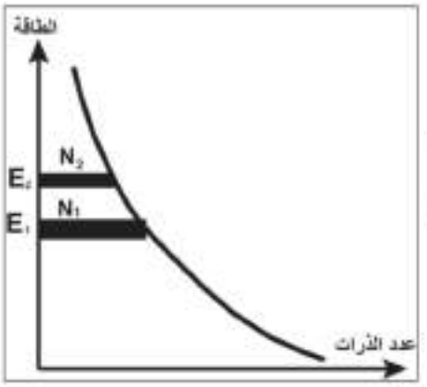


شكل (30)

لو كان لدينا نظام يتكون من (جزيئات ، ذرات او ايونات) في حال اتزان حراري تكون معظم الذرات في المستويات الواطئة للطاقة ونسبة قليلة من الذرات تكون متهيجة في المستويات العليا للطاقة لاحظ الشكل (30).

أي إن التوزيع (الاستيطان) (Population) أو عدد الذرات أو الجزيئات في المستوى الارضي (N_1) يكون اكثر من عدد الذرات أو الجزيئات في المستوى الاعلى للطاقة (N_2) لاحظ الشكل (31)..

أي إن : $N_1 > N_2$



شكل (31)

وقد تمكن العالم بولتزمان من ايجاد علاقة رياضية توضح توزيع الذرات أو الجزيئات في مستويات الطاقة واقترنت هذه المعادلة باسمه وسميت بقانون بولتزمان وفق العلاقة الآتية:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left[\frac{-(E_2 - E_1)}{kT}\right]$$

إذ إن:

k = ثابت بولتزمان

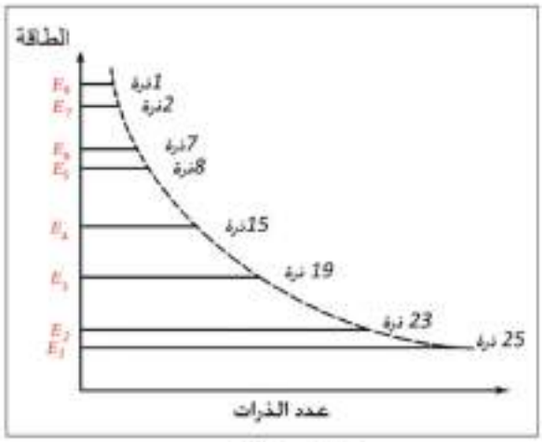
T = درجة الحرارة بالكلفن

N_2 = عدد الذرات في المستوى الاعلى للطاقة

N_1 = عدد الذرات في المستوى الارضي للطاقة

E_2 = مستوى عالي الطاقة

E_1 = اوطأ مستوى للطاقة

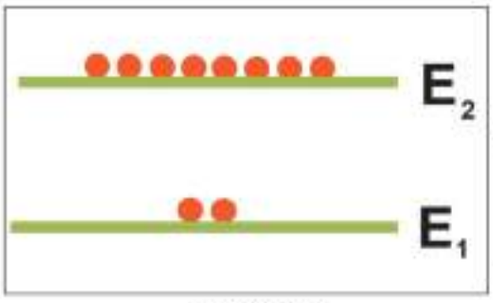


شكل (32)

فعلى سبيل المثال لو كان لدينا منظومة ذرية تتكون من 100 ذرة لعنصر فيمكن توضيح التوزيع الطبيعي للذرات بحسب توزيع بولتزمان لهذه المنظومة الذرية كما موضح بالشكل (32)، الـذي

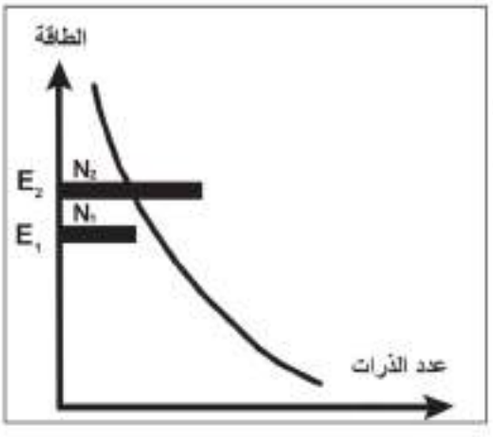
يبين ان اوطأ المستويات E_1 يحتوي على اكبر عدد من الذرات (25 ذرة) في حين تضم اعلى المستويات E_8 اقل عدد من الذرات (1 ذرة).

التوزيع المعكوس Population Inversion:



شكل (33)

اذا كان النظام الذري غير متزن حرارياً فإن عدد الذرات في المستويات العليا للطاقة اكثر مما عليه في المستويات الواطئة للطاقة، وهذا يخالف توزيع بولتزمان لاحظ الشكل (33)، اي ان توزيع الذرات في هذه الحال يكون بشكل معكوس لذا تسمى هذه العملية بالتوزيع المعكوس Population Inversion لاحظ الشكل (34)، الـتي تزيد من احتمالية الانبعاث المحفز وهذه العملية هي اساس توليد الليزر وتحصل عندما يكون هناك شدة ضخ كافية ويتحقق ذلك بوجود مستوى طاقة ذي عمر زمني اطول نسبياً ويسمى هذا المستوى بالمستوى شبه المستقر (Metastable state).



شكل (34) التوزيع المعكوس

مثال (3)

إذا كان فرق الطاقة بين المستويين يساوي ($k\,T$) عند درجة حرارة الغرفة احسب عدد الذرات N_2 بدلالة N_1 ؟

الحل

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left[\frac{-(E_2 - E_1)}{kT}\right]$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp -\left[\frac{kT}{kT}\right]$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp(-1)$$

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-1} \Rightarrow N_2 = 0.37\, N_1$$

أي إنه في الحالة الاعتيادية يكون عدد الذرات N_1 في المستوى E_1 أكثر من عدد الذرات N_2 في المستوى E_2. $(N_1 > N_2)$

مثال (4)

وضح رياضياً انه لا يتحقق التوزيع المعكوس عندما تكون الطاقة الحرارية (kT) مساوية لطاقة الفوتون الساقط.

الحل

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left[\frac{-(E_2 - E_1)}{kT}\right] \quad \ldots\ldots 1$$

$$E_2 - E_1 = hf \quad \ldots\ldots 2$$

$$kT = hf \quad \ldots\ldots 3$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp -\left[\frac{hf}{hf}\right]$$

$$= \exp(-1)$$

$$\frac{N_2}{N_1} = 0.37 \Rightarrow N_2 = 0.37N_1$$

$$\therefore N_2 < N_1$$

وبهذا لا يتحقق التوزيع المعكوس.

تذكر

1- لغرض توليد الليزر يجب ان يكون عدد الذرات في مستويات التهيج اكبر مما عليه في مستويات الطاقة الواطئة وتسمى هذه العملية بالتوزيع المعكوس.

2- لايمكن الحصول على الانبعاث المحفز من غير حصول الانبعاث التلقائي اولاً.

3- ان الفوتونات التي نحصل عليها من الانبعاث التلقائي والتي تسير بموازاة المحور البصري ضمن الوسط الفعال هي التي تحفز الذرات المتهيجة وتحثها على الانبعاث المحفز(توليد الليزر).

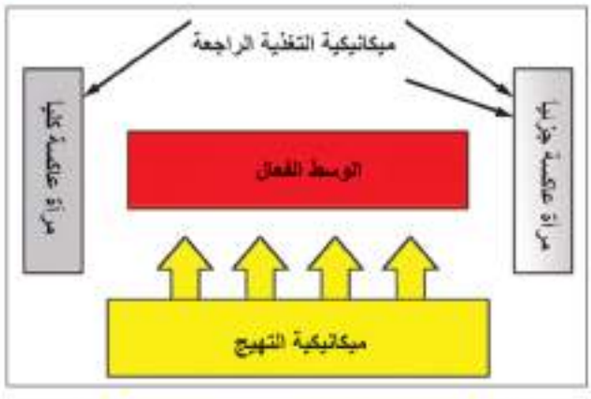
12-8 مكونات جهاز الليزر Constituents of laser

المخطط الذي يمثله الشكل (35) يوضح اهم المكونات الرئيسة التي يشترط وجودها في اجهزة الليزر وهي:

1- الوسط الفعال.

2- المرنان.

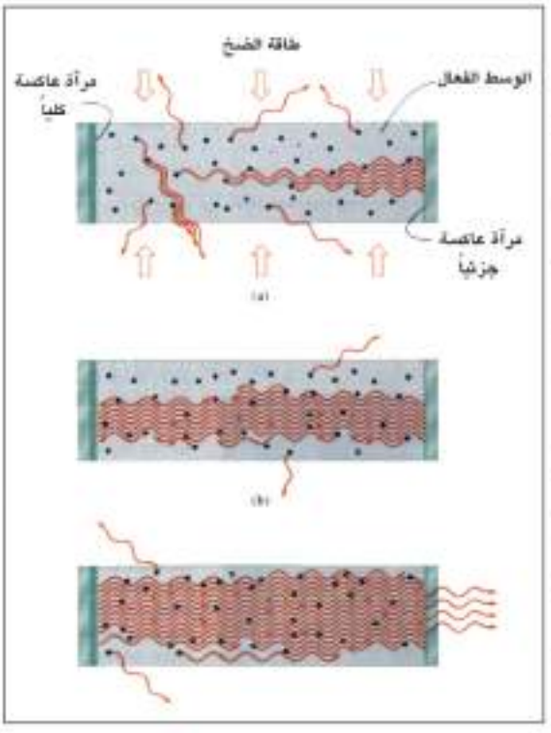
3- تقنية الضخ.



شكل (35) مخطط لمكونات جهاز الليزر

1- **الوسط الفعال Active Medium**: هو ذرات او جزيئات او ايونات المادة بحالتها الغازية او السائلة او الصلبة والتي يمكن ان يحصل فيها التوزيع المعكوس عندما يجهز الوسط الفعال بالشدة الكافية لتهيجه.

2- **المرنان:**



شكل (36)

تجويف ذو تصميم مناسب يتكون من مرآتين يوضع الوسط الفعال بينهما وتصمم المرآتان بحيث تكونان متقابلتين احداهما عاكسة كليا للضوء تقريبا والثانية عاكسة جزئيا، (تعتمد قيمة انعكاسيتها على الطول الموجي لضوء الليزر المتولد)، لذا فان الشعاع الساقط على احدهما ينعكس موازياً للمحور الاساس للمرآتين ثم يسقط على المرآة الاخرى وينعكس عنها وهكذا تتعاقب انعكاسات الاشعة داخل المرنان، وفي كل انعكاس تحصل عملية الانبعاث المحفز وبذلك يزداد عدد الفوتونات المتولدة بالانبعاث المحفز بعدد هائل فيحصل التضخيم. وتسمح المرآة ذات الانعكاس الجزئي بنفوذية معينة من الضوء الساقط عليها خارج المرنان اما بقية الضوء فتعكسه مرة اخرى داخل المرنان لادامة عملية التضخيم.لاحظ الشكل (36).

3- **تقنية الضخ pumping:**

شكل (37)

وهي التقنية التي يمكن بوساطتها تجهيز الطاقة لذرات الوسط الفعال لنقلها من مستوى الاستقرار الى مستوى التهيج. ممكن بوساطتها الحصول على الطاقة الضاخة لاثارة الذرات المستقرة في الوسط لكي يتحقق حالة التوزيع المعكوس المناسب الذي يضمن توليد الليزر.

هناك ثلاثة انواع من تقنية الضخ:

a- **تقنية الضخ الضوئي optical pumping**: يستعمل الضخ الضوئي للحصول على ليزرات تعمل ضمن المنطقة المرئية أو تحت الحمراء القريبة من الطيف المرئي، كليزر الياقوت وليزر النيديميوم، إذ تستعمل مصابيح وميضية او مستمرة الاضاءة قوة اضائتها عالية لاثارة الوسط الفعال، تصنع جدران المصابيح الومضية من مادة الكوارتز وتملأ بغازات مختلفة تبعا لنوع الوسط الفعال وتكون بأشكال مختلفة حلزونية او مستقيمة، لاحظ الشكل (37).

كما توجد تقنية اخرى للضخ الضوئي تستعمل فيها شعاع ليزر معين ليقوم هذا الشعاع بأثارة الوسط الفعال لتحقيق التوزيع المعكوس والحصول على ليزر ذي طول موجي يختلف عن الطول الموجي لشعاع الليزر الضاخ.

b - **تقنية الضخ الكهربائي** Electrical Pumping: تستعمل هذه التقنية عن طريق التفريغ الكهربائي للغاز الموضوع داخل انبوبة التفريغ الكهربائي اذ يطبق بين قطبيها فرق جهد عال حيث تصطدم الالكترونات المعجلة مع ذرات او جزئيات الغاز فتسبب تهيجها وانتقالها الى مستويات طاقة اعلى. تستعمل هذه الطريقة غالبا في الليزرات الغازية، كما يمكن استعمال تقنية الضخ الكهربائي في انتاج ليزر شبه الموصل.

c- **تقنية الضخ الكيميائي** Chemical Pumping: في هذه التقنية يكون التفاعل الكيميائي بين مكونات الوسط الفعال اساس توفير الطاقة اللازمة لتوليد الليزر اذ لا تحتاج الى وجود مصدر خارجي للقدرة.

13-8 منظومات مستويات الليزر laser levels systems

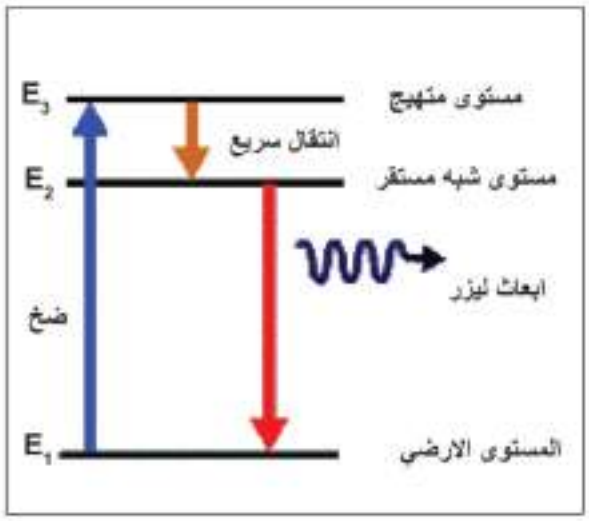
يمكن تصنيف منظومات الليزر تبعاً لمستويات الطاقة التي تشترك لاتمام عملية التوزيع المعكوس للوسط الفعال الى منظومتين:

1 - المنظومة ثلاثية المستوى. Three-Level system

2 - المنظومة رباعية المستوى Four-Level system

1- المنظومة ثلاثية المستوى:

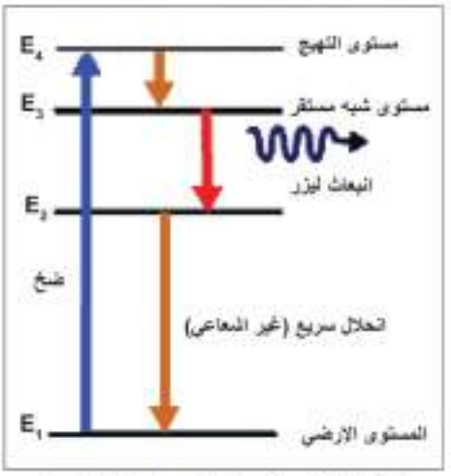
تشترك في هذه المنظومة ثلاثة مستويات للطاقة، وهي المستوى الارضي للطاقة E_1، ومستوى الطاقة الوسطي E_2 (وهوالمستوى شبه مستقر)ومستوى طاقة التهيج E_3 لاحظ الشكل (38).



شكل (38) منظومة ثلاثية المستوى

عندما تكون معظم الذرات او الجزيئات موجودة في المستوى الارضي للطاقة E_1، يعني ذلك ان الوسط الفعال في حالة استقرار، اما عند تهيج الوسط الفعال بوساطة احدى طرائق الضخ المناسبة، فان هذه الذرات اوالجزيئات سوف تنتقل الى مستوى التهيج E_3، والذي يكون زمن العمرله قصيربحدود (10^{-8} s) ولضمان توليد الليزر ينبغي ان تكون طاقة الضخ كافية لتحقيق التوزيع المعكوس. وسرعان ما تهبط هذه الذرات تلقائيا وبشكل سريع من المستوى (E_3) الى المستوى شبه المستقر(E_2) بانبعاث حراري، والذي زمن العمر له اطول وبحدود (10^{-6}s) مما يؤدي الى تجمع عدد من الذرات في المستوى (E_2) اكبر مماهو عليه في المستوى الارضي (E_1) فيتحقق عندئذ التوزيع المعكوس بين هذين المستويين فيحدث الانبعاث المحفز لاشعة الليزر. ان هذه الانظمة تتطلب طاقة ضخ عالية ليصبح عدد الذرات في مستوى التهيج اكبر من عدد الذرات في المستوى الارضي للحصول على التوزيع المعكوس.

2- المنظومة رباعية المستوى:



شكل (39) منظومة ليزر رباعية المستوى

تشترك في هذه المنظومة أربعة مستويات للطاقة (E_4, E_3, E_2, E_1) وفي هذه العملية يقوم ضخ ذرات المنظومة من المستوى الارضي للطاقة (E_1) الى مستوى التهيج للطاقة (E_4) لاحظ الشكل (39)، عندها تهبط الذرات سريعاً الى مستوى الطاقة (E_3) وبذلك تتجمع الذرات في المستوى (E_3)(وهو مستوى الطاقة شبه المستقرفي هذه المنظومة). عندها يتحقق التوزيع المعكوس بين المستويين (E_3) و (E_2) باقل عدد من الذرات في المستوى (E_3) اذ يكون المستوى (E_2) شبه فارغ من الذرات بسبب الهبوط السريع للذرات ومن هذا يتبين ان هذه المنظومة تتطلب طاقة ضخ اقل لتحقيق عملية التوزيع المعكوس مقارنه مع منظومة ثلاثية المستويات.

سؤال: ايهما افضل لتولد الليزر منظومة المستويات الثلاثة ام منظومة المستويات الاربعة؟ ولماذا ؟

14-8 أنواع الليزر Types of Laser

يأتي الليزر بأنواع مختلفة تبعاً لنوع مادة الوسط الفعال المستعمل فيها فمثلاً ليزر الهيليوم نيون He-Ne يعني ان الوسط الفعال هو خليط من الهيليوم والنيون وليزر الياقوت يعني ان المادة المنتجة لليزر هي الياقوت وهكذا لباقي الأنواع الأخرى. ولنأخذ بعض الأمثلة لأنواع مختلفة لليزر:

شكل (40) ليزر غازي

1- ليزر الحالة الصلبة solid-state laser مثل ليزر الياقوت ruby وليزر النيديميوم.

2- ليزر الحالة الغازية Gas laser مثل ليزر الهيليوم –نيون وليزر غاز ثنائي اوكسيد الكربون، شكل (40).

3- ليزر الإكسايمر Excimer laser. (تعد ليزرات الاكسايمر صنفا مفيدا ومهما من الليزرات الجزيئية التي تستثمر الانتقالات الحاصلة بين حالتين الكترونيتين مختلفتين، وتطلق على أنواع الليزرات التي تستعمل الغازات النبيلة مثل غاز الزينون والكربتون أو الأركون مع ذرة هالوجين لتكوين هاليد الغاز مثل ArF ،KrF ،XeCl تنتج هذه الغازات اشعة ليزر ذات أطوال موجية في مدى الأشعة فوق البنفسجية.

4- ليزر الصبغة Dye laser وهي الليزرات التي تكون فيها المادة الفعالة بحالة سائلة من محاليل مركبات معينة لصبغة عضوية مثل الرودامين rhodamine 6G مذابة في سوائل مثل كحول مثيلي او كحول اثيلي، تنتج ليزر يمكن التحكم في الطول الموجي الصادر عنه.

5- ليزر أشباه الموصلات Semiconductor laser. مثل ليزر زرنيخيد الكاليوم.

6- الليزر الكيميائي Chemical Laser: هو الليزر الذي يحدث فيه التوزيع المعكوس بالتفاعل الكيميائي مباشرة مثل ليزر فلوريد الديتيريوم.

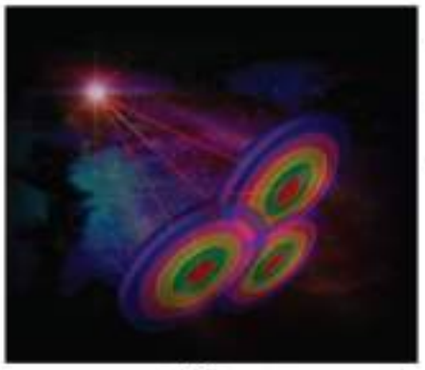
شكل (41)

1- التطبيقات الصناعية: يعد الليزر اداة فعالة لصناعة وتهذيب الكثير من المكونات الالكترونية كالمقاومات والمتسعات والترانزستورات ولعمل اقنعة الدوائر المتكاملة وفي تثقيب المعادن وقطعها ولحامها وتعود اهمية استعمال الليزر في الالكترونيات الدقيقة إلى امكانية حصر الحرارة في بقع صغيرة للغاية وتتم هذه المعالجات بدون لمس المكونات وبدون التأثير في الاجزاء المجاورة لها ومن استعمالات الليزر لحام المواد الصلبة والنشطة والمواد التي تتمتع بدرجة انصهار عالية مع امتيازها بدقة التصنيع بسبب إطلاقها لحزمة كثيفة ضيقة مركزة، كما تستطيع أشعة الليزر فتح ثقب قطره 5μm خلال 200μs في أشد المواد صلابة (الماس والياقوت الأحمر التيتانيوم) وبفضل قصر مدة التأثيرلا يحدث أي تغير في طبيعة المادة، لاحظ الشكل (41).

شكل (42)

2- يمكن استثمار اتجاهية شعاع الليزر وانتقاله بخطوط مستقيمة الى مسافات بعيدة في تطبيقات عديدة إذ أدى دورا مهما في عمليات المسح والترصيف للاعمال الهندسة كتشييد العمارات والمباني والانشاءات الميكانيكية والصناعات الضخمة وكذلك استعماله لايجاد الانحرافات التي تحل في سطوح السدود والجسور. كما يستعمل الليزر بنجاح كبير في عمليات رصف الانابيب وشق القنوات والانفاق والطرق ومسح الاراضي وتسويتها، لاحظ الشكل (42).

3- يستعمل ليزرات عديدة لقياس تلوث البيئة كاستعمال ليزر الياقوت لكشف نسبة وجود بخار الماء وثنائي اوكسيد الكاربون وثنائي اوكسيد الفسفور وقياسها.



شكل (43)

4- يستعمل الليزر للتصوير المجسم (Holography) إذ يعد التصوير المجسم من افضل تقنيات فن التصوير الذي بواسطته يمكن الحصول على صور مجسمة واقرب ما تكون الى الحقيقة وذات ثلاثة أبعاد طول وعرض وارتفاع إذ تسجل سعة الموجات الضوئية المنعكسة من الجسم وطورها ليظهر بثلاثة ابعاد على شبكية العين بينما في التصوير الاعتيادي تسجل شدة الأشعة فقط، لاحظ الشكل (43).

أسئلة الفصل الثامن

س1 اختر العبارة الصحيحة لكل من العبارات الآتية:

1- يبين انموذج بور للذرة ان:

a- العناصر الغازية متماثلة في اطيافها الذرية.

b- العناصر الصلبة المتوهجة متماثلة في اطيافها الذرية

c- العناصر السائلة المتوهجة متماثلة في اطيافها الذ رية.

d- لكل عنصر طيف ذري خاص به.

2- عندما تثار الذرة بطاقة اشعاعية متصلة فإن الذرة:

a- تمتص الطاقة الاشعاعية كلها. b- تمتص الطاقة المناسبة لاثارة ذراتها.

c- تمتص الطاقة بشكل مستمر. d- ولا واحدة منها.

3- نحصل على سلسلة لايمان في طيف الهيدروجين عند انتقال :

a- الكترون ذرة الهيدروجين من مستويات الطاقة (E_2،E_3،E_4،E_5) الى المستوى الاول للطاقة.

b- الكترون ذرة الهيدروجين من مستويات الطاقة العليا (E_2،E_3،E_4،E_5) الى المستوى الثاني للطاقة.

c- الكترون ذرة الهيدروجين من مستويات الطاقة العليا الى المستوى الثالث للطاقة.

4- في الحالة الطبيعية للمادة وحسب توزيع بولتزمان تكون:

a- معظم الذرات في المستويات العليا للطاقة.

b- معظم الذرات في المستويات الواطئة للطاقة.

c- عدد الذرات في المستوى الارضي اقل من عدد الذرات في المستويات الاعلى للطاقة.

d- عدد الذرات في مستوى التهيج اكبر من عدد الذرات في المستوى الارضي.

5- طيف ذرة الهيدروجين هو طيف:

a- مستمراً . b- امتصاصاً خطياً.

c- خطياً. d- حزمياً.

6- مقدار الزيادة في الطول الموجي لفوتونات الاشعة السينية المستطارة بوساطة الالكترونات الحرة تعتمد:

a- طول موجة الفوتون الساقط.

b- سرعة الضوء.

c- كتلة الالكترون.

d- زاوية الاستطارة.

e- نوع المعدن المستطيل.

7- تكون قدرة الضخ عالية عندما تعمل منظومة الليزر بنظام:

a- ثلاثة مستويات. b- مستويين. c- اربعة مستويات. d- اي عدد من المستويات.

8- يمكن استعمال عملية الضخ الكهربائي عندما يكون الوسط الفعال في الحالة:

a- الصلبة. b- الغازية. c- السائلة. d- اي وسط فعال.

9- يحدث الفعل الليزري عند حدوث انبعاث :

a- تلقائي ومحفز. b- محفز وتلقائي. c- تلقائي فقط. d- محفز فقط.

10- تعتمد عملية قياس المدى باستعمال أشعة الليزر على أحد خواصه وهي:

a- التشاكه. b- الاستقطاب. c- آحادية الطول الموجي. d- الاتجاهية.

س2 علل مايأتي :

1- تكون الاطوال الموجية في طيف الامتصاص لعنصر ما موجودة ايضا في طيف انبعاثه.

2- يفضل استعمال الليزر على الطرائق الاعتيادية في عمليات القطع واللحام والتثقيب.

3- تأثير كومبتن هو من احدى الادلة التي تؤكد السلوك الدقائقي للاشعة الكهرومغناطيسية.

4- في انتاج الاشعة السينية، يصنع الهدف من مادة درجة انصهارها عالية جدا.

س3 ما أسس عمل الليزر ؟

س4 وضح كيف يمكن الحصول على التوزيع المعكوس ؟

س5 ما خصائص شعاع الليزر ؟

س6 ما التصوير المجسم (الهولوغرافي) وبماذا يتميز عن التصوير العادي ؟

مسائل الفصل الثامن

س1 احسب الزخم الزاوي لالكترون ذرة الهيدروجين عندما يكون في المدار الاول مرة، وعندما يكون في المدار الثاني مرة اخرى؟

س2 ما مقدار الطاقة بوحدات (eV) لفوتون من ضوء طوله الموجي (4.5×10^{-7}m)؟

س3 احسب عدد الذرات في مستوى الطاقة الاعلى في درجة حرارة الغرفة اذا كان عدد ذرات المستوى الارضي 500 ذرة ؟

س4 ما تردد الفوتون المنبعث عند انتقال الكترون ذرة الهيدروجين من مستوى الطاقة (E_4=-0.85ev) الى مستوى الطاقة (E_2=-3.4ev)؟

س5 ما الطاقة الحركية العظمى للالكترون وماسرعته في انبوبة اشعة سينية تعمل بجهد (30kv)؟

س6 ما مقداراعظم تردد لفوتون الاشعة السينية المتولد اذا سلط فرق جهد مقداره (40kv)على قطبي الانبوبة؟

س7 ما مقدار الزيادة الحاصلة في طول موجة الفوتون المستطار (في تأثير كومبتن) اذا استطار بزاوية (90^0) مع العلم ان:

ثابت بلانك = 6.63×10^{-34} J.s

كتلة الالكترون = 9.11×10^{-31} kg

سرعة الضوء في الفراغ = 3×10^8 m/s

س8 ما الفرق بين طاقة المستوى الارضي وطاقة المستوى الذي يليه (الاعلى منه) بوحدات (eV) لنظام ذري في حالة الاتزان الحراري، اذا كانت درجة حرارة غرفة 16^0C. علماً ان ثابت بولتزمان (k) يساوي

1.38×10^{-23} J/k

س9 اذا كان الفرق بين مستوى الطاقة المستقر (الارضي) ومستوى الطاقة الذي يليه (الاعلى منه) يساوي (0.025 eV) لنظام ذري في حالة الاتزان الحراري وعند درجة حرارة الغرفة، جد درجة حرارة تلك الغرفة بالمقياس السيليزي. على ان ثابت بولتزمان (k) يساوي 1.38×10^{-23} J/k

الفصل التاسع 9

الفيزياء النووية

Nuclear physics

مفردات الفصل:

1-9 مقدمة.

2-9 تركيب النواة وخصائصها.

3-9 طاقة الربط (الارتباط) النووية.

4-9 الانحلال الاشعاعي.

1-4-9 انحلال الفا.

2-4-9 انحلال بيتا.

3-4-9 انحلال كاما.

5-9 التفاعلات النووية.

6-9 الانشطار النووي.

7-9 الاندماج النووي.

8-9 مخاطر وفوائد الاشعاع النووي.

الأهداف السلوكية

بعد دراسة الفصل ينبغي للطالب ان يكون قادرا على ان:

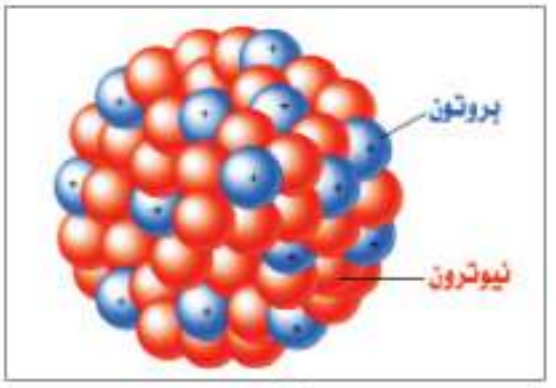
- يذكر الخصائص الرئيسة للنواة.
- يذكر بعض خصائص القوة النووية.
- يعرف مفهوم طاقة الربط النووية.
- يعلل انحلال بعض النوى تلقائيا بانحلال الفا.
- يعرف الطرائق التي تنحل بها بعض النوى تلقائيا بانحلال بيتا.
- يعلل انحلال بعض النوى تلقائيا بانحلال كاما.
- يتعرف على طاقة التفاعل النووي.
- يدرك أهمية تفاعل النيوترونات مع النواة.
- يوضح المفهوم بالانشطار النووي.
- يوضح المفهوم بالاندماج النووي.
- يذكر فوائد الاشعاع النووي.
- يحدد مخاطر الاشعاع النووي.
- يحل مسائل رياضية متنوعة.

المصطلحات العلمية	
atomic number	العدد الذري
antineutrino	مضاد النيوترينو
antielectron	مضاد الالكترون
daughter nucleus	النواة الوليدة (البنت)
chain reaction	التفاعل المتسلسل
radius of nucleus	نصف قطر النواة
endoergic reaction	التفاعل الماص للطاقة
exoergic reaction	التفاعل المحرر للطاقة
size of nucleus	حجم النواة
mass of nucleus	كتلة النواة
neutron number	عدد النيوترونات
average binding energy per nucleon	معدل طاقة الربط النووية لكل نيوكليون
nuclear force	القوة النووية
mass defect	النقص (الفرق) الكتلي
(proton-proton) cycle	دورة (بروتون – بروتون)
parent nucleus	النواة الأم
nuclear reaction energy	طاقة التفاعل النووي
neutrino	النيوترينو
mass number	العدد الكتلي
positron	البوزترون
natural background radiation	الاشعاع النووي الخلفي الطبيعي

قد تتسائل عزيزي الطالب، لماذا ندرس موضوع الفيزياء النووية؟ وما أهمية هذا الفرع الحيوي من فروع الفيزياء في حياتنا نحن البشر؟ وربما قد تتسائل ايضاً عن الطاقة المتوفرة في هذا الجزء الصغير جداً من الذرة والذي يسمى بالنواة، لاحظ الشكل (1)، والذي تبين لنا فيما بعد بأنها مخزناً واسعاً للطاقة فقد استثمرت هذه الطاقة النووية الهائلة للاغراض السلمية (كما في تحويل الطاقة النووية الى طاقة كهربائية)، لاحظ الشكل (2)، أو لأغراض غير سلمية (كما في انتاج الاسلحة النووية)، لاحظ الشكل (3). والحديث عن الطاقة النووية قد يثير ايضاً العديد من التساؤلات الاخرى، وللإجابة على هذه الاسئلة وغيرها فإنه يتطلب الرجوع الى الكيفية التي نشأت فيها الفيزياء النووية.

يعد العام (1896) لدى معظم علماء الفيزياء والباحثين على انه العام الذي بدأ معه ميلاد الفيزياء النووية فقد اكتشف العالم الفرنسي هنري بيكريل النشاط الاشعاعي الطبيعي في مركبات اليورانيوم، وبعد ذلك في عام (1911) اقترح العالم رذرفورد النموذج النووي للذرة فقد افترض ان الشحنات الموجبة تتركز في حيز صغير جداً موجود في مركز الذرة اطلق عليه اسم نواة، لاحظ الشكل (4).

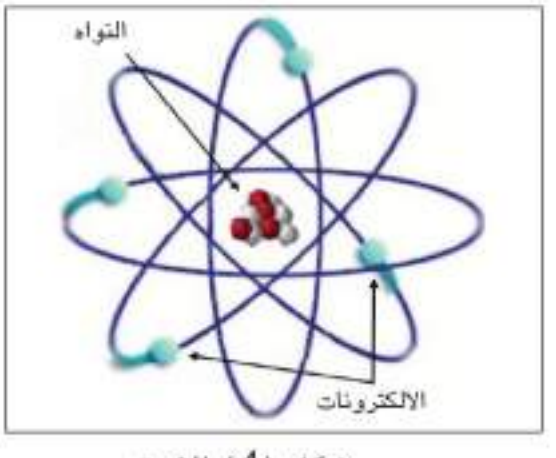
ومن ثم توالت الاكتشافات والانجازات العلمية التي حدثت لاحقاً والتي أدت بالنتيجة الى فتح آفاق جديدة وعديدة ليس أمام الفيزياء النووية فقط بل أمام الكثير من التخصصات العلمية والحياتية منها الطبية والصناعية والزراعية وغيرها الكثير. وسنقوم في هذا الفصل بدراسة بعض الملامح الاساسية للنواة، فضلاً عن أننا سنقوم بالتعرف على عدد من التطبيقات الخاصة بها.



شكل (1) نواة الذرة

شكل (2) مفاعل نووي لانتاج الطاقة الكهربائية

شكل (3)



شكل (4) الذرة

2 - 9 تركيب النواة وخصائصها

Structure and properties of the nucleus:

حاول كثير من العلماء معرفة مكونات النواة، وقد مر عليك ذلك سابقاً، فقد علمت ان النواة تتكون من جسيمات البروتونات الموجبة الشحنة وجسيمات النيوترونات المتعادلة الشحنة (شحنة النيوترون تساوي صفراً) إذ يطلق على البروتون أو النيوترون بالنيوكليون (أو بالنوية)، أي إن النواة تتكون من النيوكليونات. ويرمز للبروتون بالرمز ($_1^1H$) أو (p) وفي بعـض الاحيان ($_1^1p$)، ويرمز للنيوترون بالرمز ($_0^1n$)او(n). وكما علمت أيضاً أن عدد البروتونات في النواة يسمى العدد الذري(Z)ويكتب عادة يسار رمز العنصر (أو رمز النواة) من الأسفل، وأن عدد النيوترونات في النواة يسمى بالعدد النيوتروني (N)، أما مجموع عدد البروتونات والنيوترونات في النواة فيسمى العدد الكتلي (A) (وفي بعض الاحيان يسمى بعدد الكتلة) ويعطى على وفق العلاقة الآتية:

$$A = Z + N$$

كما ويكتب العدد الكتلي (A) عادة يسار رمز النواة (X) الى أعلى وعلى الشكل الآتي:

$$_Z^AX$$

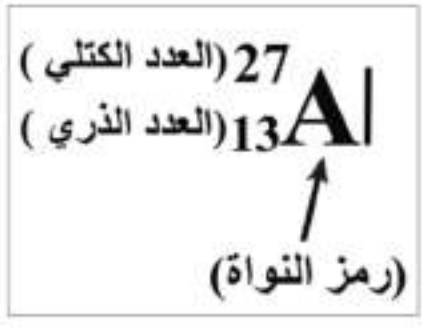
وكمثال توضيحي فإن نواة الالمنيوم التي عددها الذري يساوي (Z=13) وعددها الكتلي يساوي (A=27) فانه يرمز لها بالرمز ($_{13}^{27}Al$) لاحظ الشكل (5).

إذ إن الرمز (Al) يمثل رمز نواة الالمنيوم. وبتطبيق العلاقة (A=Z +N) فإننا نجد ان عدد نيوترونات نواة الالمنيوم (N) يساوي (14) نيوتروناً.

كما أنك قد تعرفت سابقاً أيضاً على المقصود بنظائر العنصر والتي هي نوى متساوية في العدد الذري وتختلف في عدد النيوترونات (او العدد الكتلي)، ومثال على ذلك فإن $\left(_3^6Li, _3^7Li, _3^8Li\right)$ يمثلون ثلاثة نظائر لليثيوم، لاحظ شكل (6). فماذا عن كتلة النواة؟ تشكل كتلة النواة نحو (99.9%) من كتلة الذرة. فكيف تقاس كتل

هل تعلم (للاطلاع)

تعد الليبتونات (leptons) والكواركات (quarks) جسيمات اولية للمادة فالالكترون هو ليبتون والبروتونات والنيوترونات مكونة من كواركات. ومن صفات الكواركات أنها تحمل جزءاً من الشحنة (e)، وهي أيضاً تختلف فيما بينها في الكتلة. فمثلاً يحتوي البروتون على كواركي أعلى (up)، (u)، وكوارك أسفل (down)، (d). والنيوترون يحتوي على كواركي أسفل وكوارك أعلى، لاحظ الشكل. مع العلم بأن شحنة الكوارك أعلى (u)هي $(+\frac{2}{3}e)$ وشحنة الكوارك أسفـل (d) هي $(-\frac{1}{3}e)$.



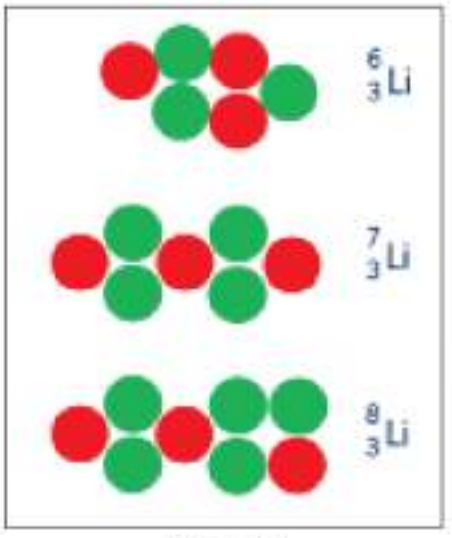
شكل (5)

نوى الذرات ؟ تقاس كتل النوى بوساطة أجهزة دقيقة ومنها مطياف الكتلة. وتقاس كتل نوى الذرات بوحدة مناسبة تسمى وحدة الكتلة الذرية (amu) أو اختصاراً (u) بدلاً من وحدة الكيلوغرام المتعارف عليها والتي لا تتلائم مع قياسات الكتل الذرية والنووية الصغيرة جداً والتي تساوي:

$$1amu = 1u = 1.66 \times 10^{-27}\,kg$$

وبما أن النواة تحتوي (A) من النيوكليونات وان كتلة النيوكليون مقاربة الى كتلة (1u)، وبذلك فإن كتلة النواة التقريبية (m´) سوف تساوي (A×u).

وعادة ما توصف النواة بكونها ثقيلة، أو متوسطة، أو خفيفة تبعاً لكون عددها الكتلي (اوكتلتها) كبير أو متوسط أو صغير على التوالي. ومن الجدير بالذكر أننا وفي هذا الفصل وعندما نتكلم عن كتل الذرات المتعادلة والنوى والجسيمات (مثل البروتون ، النيوترون ، جسيمة الفا... الخ) فإن المقصود بها هي الكتل السكونية.



شكل (6)

فكر

هل تستطيع ان تميز اللون الذي يمثل البروتون واللون الذي يمثل النيوترون في شكل (6)؟

وكثيراً ما يعبر علماء الفيزياء النووية عن الكتلة بما يكافئها من طاقة، إذ يمكن ايجاد الطاقة المكافئة للكتلة وذلك باستعمال علاقة اينشتين المعروفة في تكافؤ الكتلة (m) مع الطاقة (E) وبحسب العلاقة:

$$E = mc^2$$

إذ (c) تمثل سرعة الضوء في الفراغ وتساوي $(3x10^8\,m/s)$. أي إن علاقة الكتلة والطاقة هي علاقة تكافؤ، وإن الكتلة يمكن أن تتحول الى طاقة والعكس صحيح.

وعلى هذا الاساس فإن الطاقة المكافئة لكتلة مقدارها (1u) قد وجد أنها تساوي تقريباً (931MeV). ووفقاً لعلاقة الطاقة المكافئة للكتلة فأنه يمكننا كتابة العلاقة الاتية:

$$c^2 = 931\left(\frac{MeV}{u}\right)$$

وبعد أن تطرقنا لموضوع كتلة النواة فكيف يمكننا ايجاد شحنة النواة؟ بما أن شحنة النيوترون تساوي صفراً، لذلك فإن شحنة النواة تساوي مجموع شحنات البروتونات الموجودة فيها. وبذلك تكون نواة أي ذرة هي ذات شحنة موجبة وأن مقدار شحنتها (q) تساوي (+Ze) حيث (Z) هو العدد الذري للنواة و(+e) هي شحنة البروتون والتي تساوي $(1.6 \times 10^{-19}C)$، أي أن:

$$q = Ze$$

تذكر:

$1MeV = 10^6\,eV = 1.6 \times 10^{-13}\,J$

مثال (1)

جد مقدار شحنة نواة الذهب ($^{198}_{79}Au$)، مع العلم ان شحنة البروتون تساوي: $(1.6\times10^{-19}C)$.

الحل

لدينا العلاقة: $q = Ze$

وبالنسبة لنواة ($^{198}_{79}Au$) فإن $(Z=79)$،

وبالتعويض في العلاقة السابقة نحصل على:

$$\therefore q = 79\times1.6\times10^{-19}$$

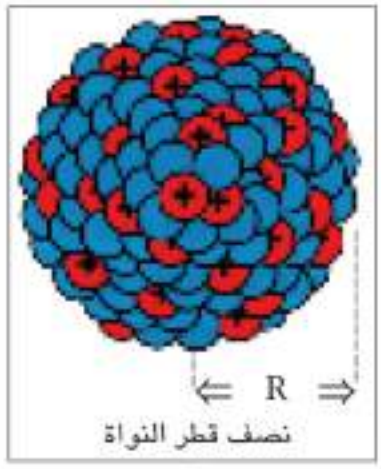
$$\therefore q = 126.4\times10^{-19}C$$

وهي مقدار شحنة نواة الذهب.

وبعد أن أوضحنا وبصورة موجزة المقصود بكتلة وشحنة النواة فماذا عن حجم النواة؟ وكيف نستطيع ان نعرف نصف قطر النواة وحجمها ؟ والجواب بأنه يمكننا ذلك بطرائق وتجارب عدة وأن أول تجربة لتقدير حجم النواة ونصف قطرها كانت قد أجريت من قبل العالم رذرفورد وذلك عن طريق استطارة جسيمات الفا من نوى ذرات الذهب، فقد توصل من هذه التجربة والعديد من التجارب الأخرى بعدها إلى ان معظم نوى الذرات هي ذوات شكل كروي تقريباً (وفي دراستنا الحالية لهذا الفصل سنعتبر أن شكل النواة هو كروي) وقد وجد أن نصف قطر النواة (R)، يتغير تغيراً طردياً مع الجذر التكعيبي للعدد الكتلي (A)، لاحظ الشكل (7).

أي إن: $(R \propto A^{\frac{1}{3}})$ ، ويعطى بحسب العلاقة:

$$R = r_o A^{\frac{1}{3}}$$



شكل (7)

إذ إن (r_o) هو مقدار ثابت يسمى ثابت نصف القطر ويساوي $(1.2\times10^{-15}m)$.

ولكون الابعاد النووية تقع في حدود ($10^{-15}\,m$) وهي أبعاد صغيرة جداً فقد وجد أنه من المناسب استعمال وحدة للطول تسمى الفيمتومتر أو الفيرمي (Fermi) ، (F)، إذ إن:

$$1Fermi = 1F = 10^{-15}\,m$$ الفيرمي=

وبذلك يمكننا كتابة العلاقة السابقة بوحدة المتر(m) وبوحدة الفيرمي (F) وعلى الشكل الآتي:

$$R = \begin{cases} 1.2\times10^{-15}A^{\frac{1}{3}} & \text{بوحدة (m)} \\ 1.2A^{\frac{1}{3}} & \text{بوحدة (F)} \end{cases}$$

هل تعلم (للاطلاع)

على الرغم من أن النيوترون هو متعادل الشحنة (شحنته تساوي صفراً) الا انه يمتلك عزماً مغناطيسياً.

مثال (2)

جد نصف قطر نواة النحاس ($^{64}_{29}Cu$) بوحدة: (a) المتر (m) ، (b) الفيرمي (F).

الحل

(a) لايجاد نصف القطر بوحدة المتر(m)، نطبق العلاقة الآتية:

$$R = 1.2\times10^{-15} A^{\frac{1}{3}}$$

وبالنسبة لنواة النحاس ($^{64}_{29}Cu$) فإن $(A = 64)$ ، وبالتعويض في العلاقة السابقة نحصل على:

$$R = 1.2\times10^{-15}(64)^{\frac{1}{3}} = 1.2\times10^{-15}\sqrt[3]{64}$$

$$\therefore R = 1.2\times10^{-15}\times4 = 4.8\times10^{-15}\,m$$

وهو نصف قطر النواة بوحدة (m)

(b) لايجاد نصف قطر النواة بوحدة الفيرمي (F)، لدينا:

$$F = 10^{-15}\,m$$

$$\therefore R = 4.8\,(F)$$

وهو نصف قطر النواة بوحدة الفيرمي (F).

[كما يمكنك ايجاد نصف قطر النواة بوحدة الفيرمي (F) وذلك باستعمال العلاقة ($R = 1.2A^{\frac{1}{3}}$)، تأكد من ذلك بنفسك وقارن نتيجة حساباتك مع نتيجة الفرع (b) من هذا المثال].

وبذلك يمكن إيجاد حجم النواة (V) بتطبيق العلاقة التالية (وذلك على اعتبار أن شكل النواة هو كروي ذات نصف قطر (R)):

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi r_o^3 A$$

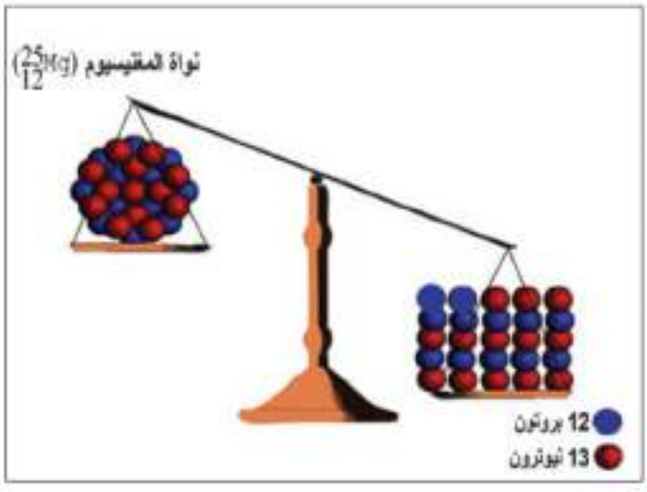
ولايجاد كثافة النواة التقريبية (ρ)، نطبق العلاقة المعروفة $(\rho = \frac{m'}{V})$ ، إذ إن (m′) تمثل كتلة النواة التقريبية (A×u). فقد وجد أن كثافة النواة التقريبية تساوي حوالي($2.3\times10^{17}\,\frac{kg}{m^3}$). وبالمقارنة مع كثافة الماء التي تساوي ($10^3\,\frac{kg}{m^3}$)؛ فإن كثافة النواة تساوي تقريباً (2.3×10^{14}) مرة بقدر كثافة الماء وهذه القيمة بلا شك قيمة كبيرة جداً .

3 - 9 طاقة الربط (الارتباط) النووية Nuclear binding energy:

نحن نعلم أن الشحنات المتشابهة تتنافر، وبما أن النواة عادة تحتوي على النيوترونات المتعادلة الشحنة وعلى البروتونات الموجبة الشحنة (ماعدا نواة ذرة الهيدروجين الاعتيادي ونظائره إذ تحتوي على بروتون واحد فقط)، فلماذا إذن لاتتنافر هذه البروتونات على الرغم من تشابهها بالشحنة؟ ومن ثم فإن هذه النتيجة سوف تؤدي إلى تفكك النواة؟ وبما ان الحال هي ليست كذلك، أي إن النوى هي موجودة فكيف إذن تحافظ النواة على تماسكها وترابطها ؟ وما هي القوة التي تربط وتمسك بنيوكليوناتها معاً ؟ والجواب على ذلك هو لابد من وجود قوة تجاذب نووية قوية تربط وتمسك بنيوكليونات النواة. وهذه القوة النووية (القوية) هي واحدة من القوى الاربعة الاساسية المعروفة في الطبيعة والتي كنت قد عرفتها سابقاً، علماً أن القوة النووية هي الاقوى في الطبيعة. ومن خواص القوة النووية هي انها قوة ذات مدى قصير وهي لاتعتمد على الشحنة.

طاقة الربط النووية (E_b):

يقصد بطاقة الربط النووية أنها الطاقة المتحررة عند جمع أعداد مناسبة من البروتونات والنيوترونات لتشكيل نواة معينة (أو هي الطاقة اللازمة لتفكيك النواة الى مكوناتها من البروتونات والنيوترونات). أن كتلة النواة لاتساوي مجموع كتل مكوناتها من البروتونات والنيوترونات عندما تكون منفصلة، فهي دائماً أقل من مجموع كتل مكوناتها من البروتونات والنيوترونات عندما تكون منفصلة، لاحظ الشكل (8). هذا الفرق في الكتلة (Δm)والذي يسمى عادةً بالنقص الكتلي (mass defect) وجد أنه يكافئ طاقة الربط النووية (E_b) حسب علاقة اينشتين في تكافؤ (الكتلة – الطاقة) أي إن:



شكل (8)

$$E_b = \Delta mc^2$$

شكل (9)

فمثلاً ومن خلال قياس كتلة نواة الديوترون ($^{2}_{1}H$) والتي تتكون من بروتون واحد ونيوترون واحد،لاحظ الشكل (9). وجد أنها تساوي (2.013553u) وهي أقل من مجموع كتلة البروتون (1.007276u) وكتلة النيوترون (1.008665u) الـذي يساوي (2.015941u) عندما يكونان منفصلين، وبذلك يكون الفرق أو النقص الكتلي (Δm) يساوي (0.002388u) ، إذ نستطيع ايجاد طاقة الربط النووية (E_b) وبوحدة (MeV) كما يأتي:

$$E_b = \Delta mc^2$$

وبالتعويض في العلاقة السابقة، إذ إن $(c^2 = 931\frac{MeV}{u})$ ، نحصل على:

$$E_b = 0.002388 \times 931 = 2.223 \ (MeV).$$

ومن الناحية العملية فأنه يكون أكثر مناسباً استعمال كتل الذرات بدلاً من استعمال كتل النوى، إذ يعطى النقص الكتلي (Δm) في هذه الحالة بالعلاقة:

$$\Delta m = ZM_H + Nm_n - M$$

إذ إن:

M_H: كتلة ذرة الهيدروجين

M: كتلة الذرة المعنية

Z: العدد الذري

N: العدد النيوتروني (أو عدد النيوترونات)

m_n: كتلة النيوترون

وبذلك تصبح معادلة طاقة الربط النووية للنواة، على الشكل الآتي:

$$E_b = (ZM_H + Nm_n - M)\,c^2$$

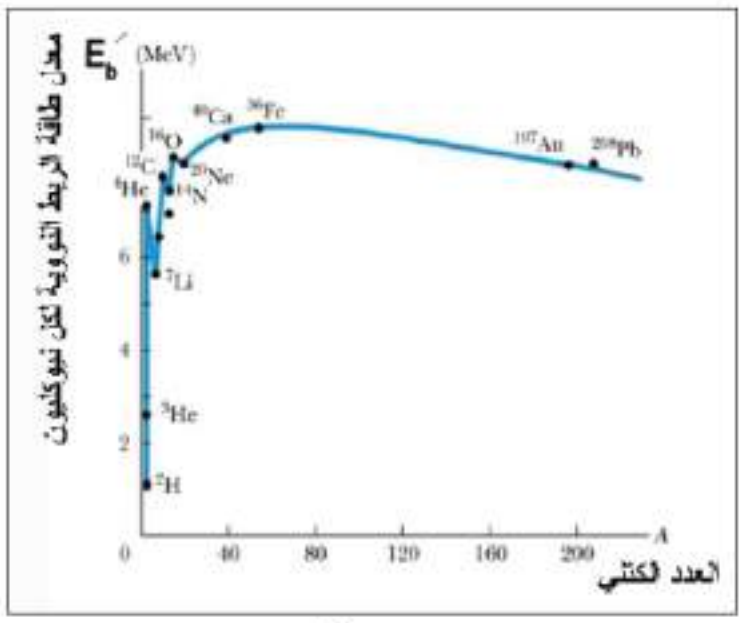
وبما أن الكتل الذرية هي عادة تقاس بوحدة (u)، فان وحدة طاقة الربط (E_b) تقاس بوحدة (MeV) اذ ان $(c^2 = 931\frac{MeV}{u})$.

إن حاصل قسمة طاقة الربط النووية (E_b) على العدد الكتلي (A) يسمى معدل (متوسط) طاقة الربط النووية لكل نيوكليون (أو للنيوكليون)(E'_b) ويعطى وفق العلاقة الآتية:

$$E'_b = \frac{E_b}{A}$$

فكيف تتغير قيمة (E'_b) مع تغير العدد الكتلي (A) للنوى؟

الشكل (10) يوضح تغير (E'_b) مع (A)، ويلاحظ من هذا الشكل أن المنحني يكون بصورة عامة ثابت نسبياً باستثناء النوى الخفيفة مثل نواة الديوترون (^2_1H) والنوى الثقيلة مثل نواة الرصاص $(^{208}_{82}Pb)$. كما يمكن ملاحظة أن النوى المتوسطة



شكل (10)

تمتلك أكبر القيم إلى (E_b')، مثل نواة الحديد ($^{56}_{26}Fe$)، وبذلك تكون النوى المتوسطة عادة هي الاكثر استقراراً. فالنوى الخفيفة والنوى الثقيلة تستطيع أن تصبح أكثر استقراراً إذا وجد تفاعلاً نووياً معيناً يستطيع أن ينقلها الى منطقة النوى المتوسطة. بعبارة اخرى اذا توافرت ظروف مناسبة فأن النوى الثقيلة اذا انشطرت الى نوى متوسطة فإنها تصبح أكثر استقراراً وبالعكس إذا إندمجت النوى الخفيفة لتكوين نوى أثقل فأنها تصبح أكثر إستقراراً أيضاً، وفي كلتا العمليتين سوف تتحرر طاقة، وستتعرف لاحقاً وبصورة أكثر تفصيلاً على تفاعلات الإنشطار والإندماج النوويين في البندين (10-6) و (10-7).

مثال (3)

جد طاقة الربط النووية لنواة النيتروجين ($^{14}_{7}N$) بوحدة (MeV). إذا علمت أن كتلة ذرة ($^{14}_{7}N$) تساوي ($14.003074u$) وكتلة ذرة الهيدروجين تساوي ($1.007825u$) وكتلة النيوترون تساوي ($1.008665u$). جد أيضاً معدل طاقة الربط النووية لكل نيوكليون.

الحل

لدينا العلاقة:

$$E_b = (ZM_H + Nm_n - M)\,c^2$$

وبما أن الكتل هي معطاة بوحدة (u)، فأن:

$$(c^2 = 931\frac{MeV}{u})$$

$$\therefore E_b = (ZM_H + Nm_n - M)\times 931(MeV)$$

وبالنسبة الى نواة ($^{14}_{7}N$) فأن:

$$Z = 7,\ A = 14,\ N = A - Z = 14 - 7 = 7$$

وبتعويض هذه القيم في العلاقة السابقة نحصل على:

$$E_b = [7\times 1.007825 + 7\times 1.008665 - 14.003074]\times 931$$

$$\therefore E_b = 0.112356\times 931 = 104.603\,(MeV)$$

وهي طاقة الربط النووية.

[لاحظ ان النقص الكتلي (Δm) في هذا المثال يساوي ($0.112356u$)].

$$\therefore E_b' = \frac{E_b}{A} = \frac{104.603}{14} = 7.472\,(\frac{MeV}{nucleon})$$

وكذلك يمكننا كتابة:

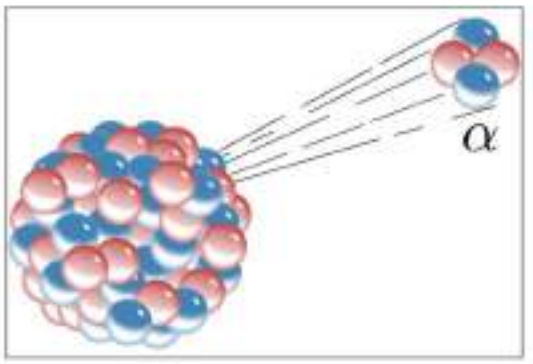
$$E_b' = 7.472\,(MeV)$$

وهي معدل طاقة الربط النووية لكل نيوكليون.

إن بعض نوى العناصر تكون غير مستقرة (مشعة) ومن ثم تسعى لكي تكون مستقرة من خلال انحلالها. وهناك ثلاثة أنواع رئيسة للانحلال الاشعاعي هي:

9-4-1 إنحلال ألفا Alpha decay

لو سألنا السؤال الآتي: متى تعاني النواة غير المستقرة إنحلال ألفا التلقائي؟، لاحظ الشكل (11-a). والجواب هو عادةً عندما تكون كتلة النواة وحجمها كبيرين نسبياً، وعلى هذا الأساس فإن إنبعاث جسيمة (دقيقة) ألفا من هذه النوى يساعدها على الحصول على استقرارية أكبر عن طريق تقليص حجمها وكتلتها. وجسيمة ألفا، وكما درست سابقاً هي نواة ذرة الهيليـوم وتتكون من بروتونين ونيوترونين وتمثل بالرمـز (^4_2He) أو (α)، لاحظ الشكل (11-b)، وهي ذات شحنة موجبة تساوي (2e+).



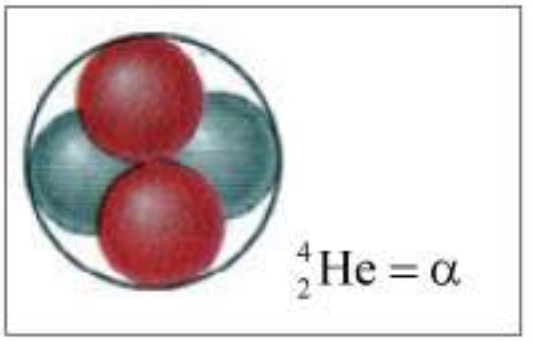
شكل (11-a)

وفي انحلال الفا(كما هو الحال في أنواع الانحلالات الاشعاعية الاخرى) عادة مايطلق على النواة الاصلية قبل الانحلال بالنواة الام والنواة الناتجة بعد الانحلال بالنواة الوليدة (او النواة البنت).

المعادلة التالية تبين معادلة نووية لنواة تعاني إنحلال ألفا:

$$^{240}_{94}Pu \rightarrow ^{236}_{92}U + ^{4}_{2}He$$

(جسيمة الفا) (النواة الوليدة) (النواة الأم)
(نواة اليورانيوم) (نواة البلوتونيوم)



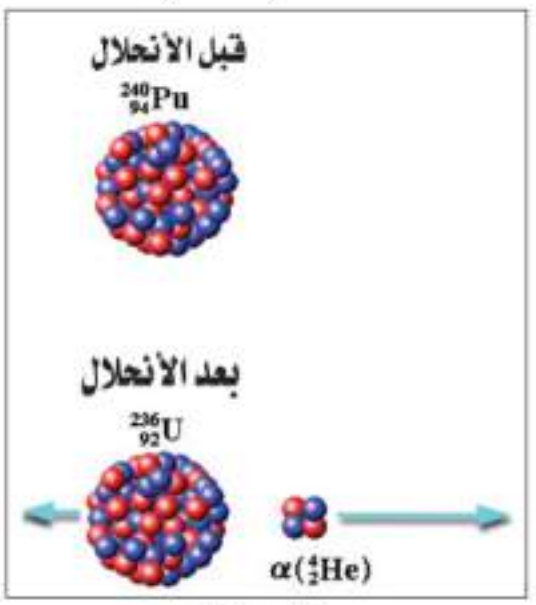
شكل (11-b)

لاحظ الشكل (12).

ولو سألنا السؤال الآتي: ما الذي يفعله انحلال الفا في قيم العدد الكتلي والعدد الذري للنواة الأم؟ والجواب ينقص العدد الكتلي بمقدار أربعة وينقص العدد الذري بمقدار اثنين (لاحظ المعادلة النووية السابقة)، لاحظ ايضا عند تغير العدد الذري فأن نواة العنصر تتحول الى نواة عنصر اخر، وهذه الحال تصح على جميع أنواع الانحلالات والتفاعلات النووية الأخرى باستثناء انحلال كاما، فكيف يمكننا ايجاد طاقة الانحلال لنواة تنحل بوساطة انحلال الفا؟

إذا أفترضنا بان كتلة النواة الأم هي (M_p) (عادة ساكنة ابتدائياً) وكتلة النواة الوليدة هي (M_d) وكتلة جسيمة الفا هي(M_α)، فان طاقة انحلال الفا (Q_α) تعطى وفق العلاقة التالية:

$$Q_\alpha = [M_p - M_d - M_\alpha]c^2$$



شكل (12)

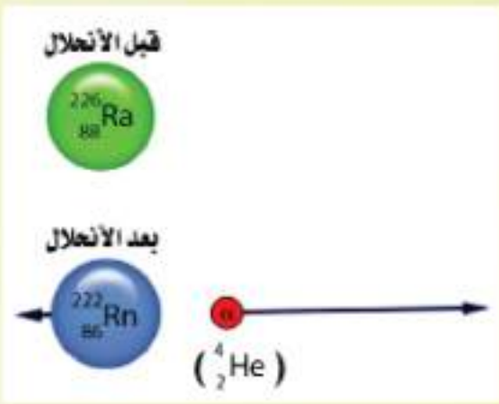
وعندما تقاس الكتل الذرية بوحدة (u) إذ إن $(c^2 = 931\frac{MeV}{u})$، فإن وحدة (Q_α) في هذه الحال هي (MeV).

أن الشرط اللازم لنواة تنحل تلقائيا بوساطة انحلال الفا هو أن تكون قيمة طاقة الانحلال (Q_α) موجبة، أي إن $(Q_\alpha > 0)$. ومن الجدير بالذكر أن جسيمة الفا (ذات الكتلة الأقل مقارنة بكتلة النواة الوليدة) سوف تمتلك سرعة وطاقة حركية أكبر من السرعة والطاقة الحركية للنواة الوليدة وذلك بحسب قانون حفظ (الطاقة–الكتلة) وقانون حفظ الزخم الخطي.

مثال (4)

برهن على أن نواة الراديوم ($^{226}_{88}Ra$) تحقق شرط الانحلال التلقائي الى نواة الرادون ($^{222}_{86}Rn$) بوساطة انحلال الفا. اكتب ايضاً المعادلة النووية للانحلال، مع العلم أن الكتل الذرية لكل من:

$$^{226}_{88}Ra = 226.025406\ (u).$$
$$^{222}_{86}Rn = 222.017574\ (u).$$
$$^{4}_{2}He = 4.002603\ (u).$$



الحل

المعادلة النووية للانحلال هي :

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$$

(النواة الأم) (النواة الوليدة) (جسيمة الفا)

أن شرط الانحلال التلقائي هو أن تكون قيمة طاقة الانحلال (Q_α) موجبة.

لدينا العلاقة: $Q_\alpha = [M_p - M_d - M_\alpha]c^2$

وبما أن الكتل هي معطاة بوحدة (u)، فأن $c^2 = 931\frac{MeV}{u}$

$$\therefore Q_\alpha = [M_p - M_d - M_\alpha] \times 931\,(MeV)$$

وبالتعويض في العلاقة السابقة نحصل على :

$$Q_\alpha = [226.025406 - 222.017574 - 4.002603] \times 931$$

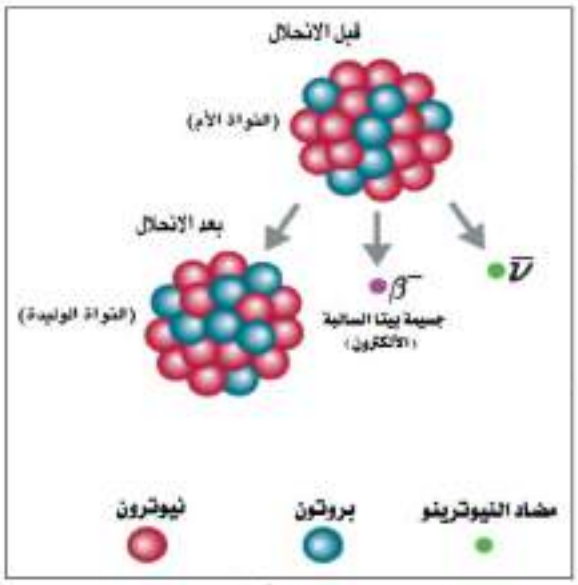
$$\therefore Q_\alpha = 5.229 \times 10^{-3} \times 931 = 4.868\ (MeV)$$

بما أن قيمة (Q_α) هي قيمة موجبة، أي إن $(Q_\alpha > 0)$ ، $\therefore$ قد تحقق شرط الانحلال التلقائي.

(2-4-9) انحلال بيتا Beta decay

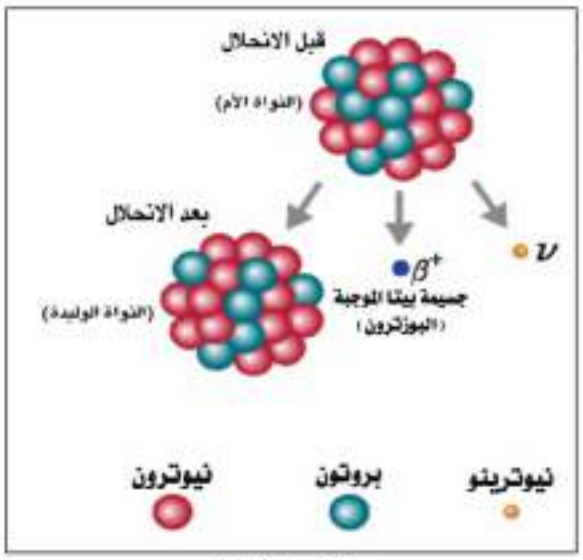
وهو الانحلال الاشعاعي التلقائي الثاني والذي من خلاله تستطيع بعض النوى الوصول الى حالة اكثر استقراراً. وتوجد ثلاث طرائق تنحل بها بعض النوى تلقائياً بانحلال بيتا وهي:

1- انبعاث جسيمة(دقيقة) بيتا السالبة (او الالكترون) ويرمز لها بالرمز(β^-) او ($_{-1}^{0}e$) وهي ذات شحنة سالبة ($e-$)وتسمى هذه العملية انحلال بيتا السالبة، لاحظ الشكل (13).



شكل (13)

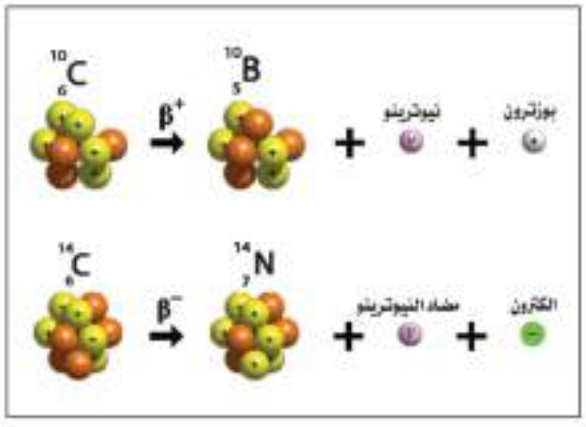
2- انبعاث جسيمة (دقيقة) بيتا الموجبة (او البوزترون) ويرمز لها بالرمز(β^+) او ($_{+1}^{0}e$) وهي ذات شحنة موجبة ($e+$) وتسمى هذه العملية انحلال بيتا الموجبة، لاحظ الشكل (14). والبوزترون عبارة عن جسيم يمتلك جميع صفات الالكترون الا ان اشارة شحنته هي موجبة، كما يطلق عليه ايضاً (مضاد الالكترون).



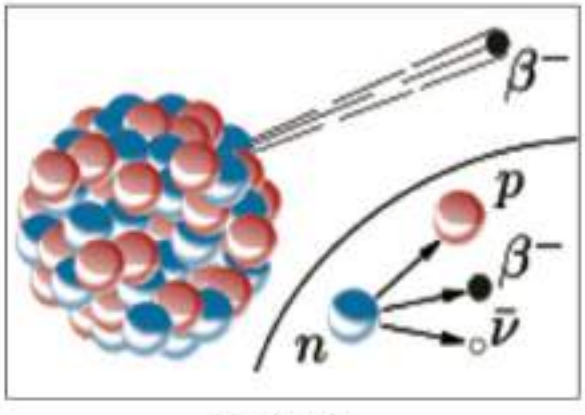
شكل (14)

3- أسر (اقتناص) النواة لاحد الالكترونات الذرية المدارية الداخلية، وتسمى هذه عملية الأسر الالكتروني.

ويرافق انحلال بيتا الموجبة انبعاث جسيم يسمى النيوترينو (شحنته وكتلته السكونية تساوي صفراً) ويرمز له بالرمز (ν)او ($_{0}^{0}\nu$)، إذ إن العدد الذري والعدد الكتلي له يساويان صفراً. كما يرافق انحلال بيتا السالبة انبعاث جسيم يسمى مضاد النيوترينو ويرمز له بالرمز ($\bar{\nu}$) او($_{0}^{0}\bar{\nu}$)، إذ إن العدد الذري والعدد الكتلي له يساويان صفراً أيضاً، (لاحظ مثلاً معادلتي الانحلال النووي المجاورتين).



وهنا يبرز السؤال الآتي: بما أن النواة أساساً لا تحتوي على الألكترونات أو البوزترونات فكيف يمكن للنواة أن تبعث الكتروناً او بوزتروناً؟ فمن اين أتى هذا الالكترون او هذا البوزترون؟ والجواب على ذلك هو عندما تبعث النواة الالكترون فهو نتاج انحلال أحد نيوترونات النواة الى بروتون والكترون ومضاد النيوترينو، لاحظ الشكل (15). ويعبر عن هذا الانحلال بالمعادلة النووية الآتية:



شكل (15)

$$_{0}^{1}n \rightarrow _{1}^{1}p + \beta^- + _{0}^{0}\bar{\nu} \ , \ (\beta^- = _{-1}^{0}e)$$

ويحدث هذا الانحلال بسبب ان نسبة عدد نيوترونات الى عدد بروتونات النواة هي أكبر من النسبة اللازمة لاستقرارها.

أما عندما تبعث النواة البوزترون فهو نتاج انحلال أحد بروتونات النواة إلى نيوترون وبوزترون ونيوترينو ويعبر عن هذا الانحلال بالمعادلة النووية الآتية:

$$ {}^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + \beta^{+} + {}^{0}_{0}\nu \quad , \quad (\beta^{+} = {}^{0}_{+1}e) $$

ويحدث هذا الانحلال بسبب أن نسبة عدد نيوترونات الى عدد بروتونات النواة هي أصغر من النسبة اللازمة لاستقرارها. وفيما يلي نورد ثلاث امثلة لمعادلات نووية لنوى تنحل تلقائياً بوساطة انحلال بيتا:

$$ {}^{64}_{29}Cu \rightarrow {}^{64}_{30}Zn + \beta^{-} + \bar{\nu} \qquad \text{(انحلال بيتا السالبة)} $$

$$ {}^{13}_{7}N \rightarrow {}^{13}_{6}C + \beta^{+} + \nu \qquad \text{(انحلال بيتا الموجبة)} $$

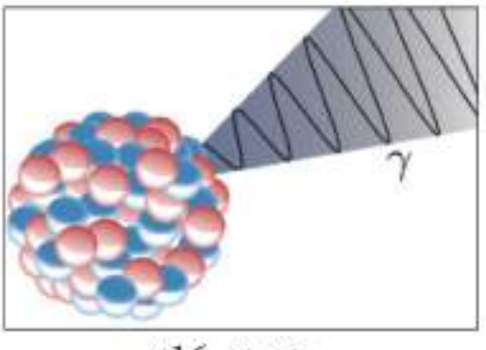
$$ {}^{41}_{20}Ca + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{41}_{19}K + \nu \qquad \text{(الأسر الالكتروني)} $$

فكر

من ملاحظة امثلة المعادلات النووية الثلاثة المجاورة لنوى تنحل تلقائياً بوساطة انحلال بيتا، هل تستطيع ان تعرف ما الذي يفعله انحلال كل من بيتا السالبة وبيتا الموجبة والأسر الالكتروني في قيم العدد الكتلي والعدد الذري للنواة الام؟

(3-4-9) انحلال كاما Gamma decay

غالبا ماتترك بعض النوى في حالة (او مستو) اثارة اي لديها طاقة فائضة وذلك بعد معاناتها انحلال الفا أو انحلال بيتا، فكيف يمكن لمثل هذه النوى تلقائيا أن تصل إلى حال أكثر استقرارا ؟ والجواب على ذلك بأنه يمكن لمثل هذه النوى أن تتخلص من الطاقة الفائضة بانحلال كاما (وهو الانحلال الاشعاعي التلقائي الثالث) والوصول الى حالة اكثر استقرارا وذلك بأنبعاث اشعة كاما، لاحظ الشكل (16-a). فلو أن النواة انتقلت من مستوى طاقة عال الى مستوى طاقة منخفض فان اشعة كاما (فوتون) سوف ينبعث وتكون طاقة الفوتون تساوي فرق الطاقة بين المستويين. وأشعة كاما، هي أشعة كهرومغناطيسية (فوتونات) ذات طاقة عالية أو تردد عالٍ، كتلتها السكونية وشحنتها تساوي صفراً وعادة يرمز لها بالرمز (γ) او (${}^{0}_{0}\gamma$). إذ إن العدد الذري والعدد الكتلي لها يساويان صفراً.



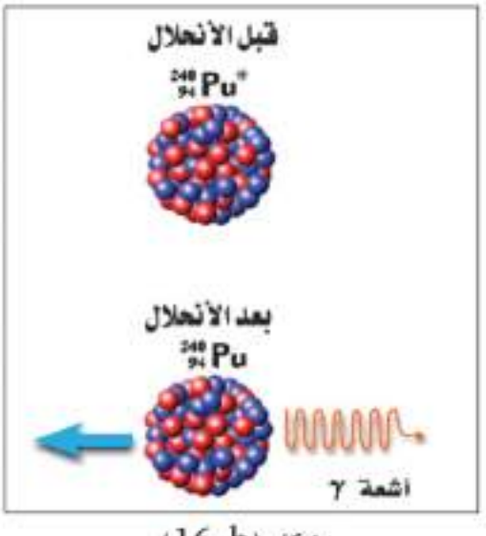
شكل (16-a)

المعادلة التالية تبين معادلة نووية لنواة تعاني انحلال كاما:

$$ {}^{240}_{94}Pu^{*} \rightarrow {}^{240}_{94}Pu + {}^{0}_{0}\gamma $$

(النواة الأم) (نواةالبلوتونيوم) المتهيجة — (النواة الوليدة) (نواة البلوتونيوم) — (اشعة كاما)

(إشارة النجمة (*) تبين أن النواة هي في حالة إثارة أو تهيج)، لاحظ الشكل (16-b).



شكل (16-b)

وكما هو واضح من معادلة الانحلال النووي لنواة البلوتونيوم المتهيجة ($^{240}_{94}Pu^{*}$) السابقة فإن العدد الكتلي والعدد الذري يبقى ثابتاً في انحلال كاما. ويمكن التعبير عن علاقة طاقة أشعة كاما أو طاقة الفوتون (E) بالتردد (f) كما يأتي:

$$E = hf$$

إذ إن: (h) هو ثابت بلا نك ويساوي (6.63×10^{-34} J.s)

وأن $f = \frac{c}{\lambda}$ ، حيث (λ) هي طول موجة الفوتون و(c) هي سرعة الضوء في الفراغ.

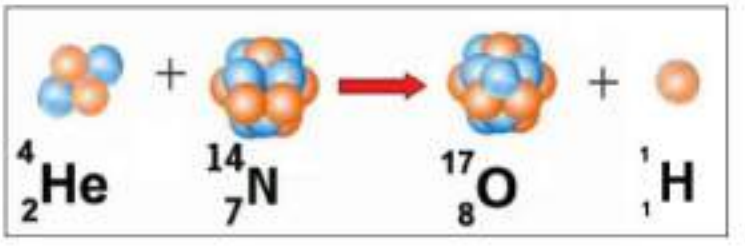
5 - 9 التفاعلات النووية Nuclear reactions

لاحظنا سابقاً أن تركيب النواة يتغير وذلك عندما تعاني النواة انحلالاً اشعاعياً تلقائياً بوساطة انحلال الفا أو انحلال بيتا وبحسب المعادلات النووية السابقة. ولعلك تسأل هل يمكننا ان نغير من تركيب النواة عند قذفها بجسيمات نووية ذات طاقة معينة؟ والجواب نعم يمكننا ذلك، إذ إن أول من برهن على حدوث هذا التفاعل النووي المحتث (الاصطناعي) هو العالم رذرفورد، لاحظ الشكل (17)، وبحسب معادلة التفاعل النووي الآتية:

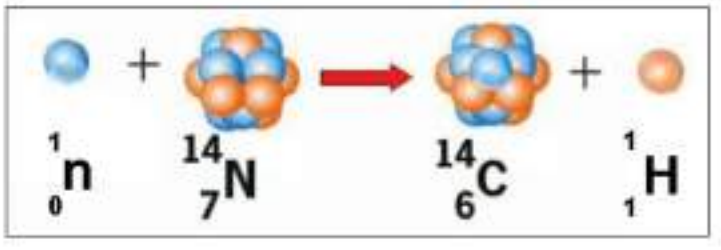
$$^{4}_{2}He + {}^{14}_{7}N \rightarrow {}^{17}_{8}O + {}^{1}_{1}H$$

(جسيمة الفا) (نواة النيتروجين) (نواة الاوكسجين) (بروتون)

وفي حال المعادلات النووية فإنه يجب أن يكون مجموع الاعداد الذرية ومجموع الاعداد الكتلية متساويين في طرفي المعادلة النووية، أي إن المعادلة النووية يجب أن تكون موزونة، وكما هو مبين مثلاً في معادلة التفاعل النووي السابقة. وهكذا نجد أن التفاعل النووي هو ذلك التفاعل الذي يحدث تغيراً في خصائص وتركيب النواة الهدف. فمثلاً عند قذف (قصف) نواة النيتروجين ($^{14}_{7}N$) بوساطة جسيم النيوترون ($^{1}_{0}n$) فإنه يمكن الحصول على نواة الكاربون ($^{14}_{6}C$) وجسيم البروتون ($^{1}_{1}H$)، لاحظ الشكل (18).



شكل (17)



شكل (18)

ومن الجدير بالذكر أن التفاعلات النووية يجب أن تتحقق فيها قوانين الحفظ وهي:

a- قانون حفظ (الطاقة - الكتلة).

b- قانون حفظ الزخم الخطي.

c- قانون حفظ الزخم الزاوي.

d- قانون حفظ الشحنة الكهربائية (أو قانون حفظ العدد الذري).

e- قانون حفظ عدد النيوكليونات (أو قانون حفظ العدد الكتلي).

طاقة التفاعل النووي:

يمكن ايجاد قيمة طاقة التفاعل النووي (Q) بصورة عامة على النحو الآتي: لو نفترض أن تفاعلاً نووياً تقذف فيه نواة الهدف (X) (عادة ساكنة ابتدائياً) والتي كتلتها (M_x) بالجسيم الساقط (المقذوف)(a) والذي كتلته (M_a) لينتج نواة (Y) والتي كتلتها (M_Y) والجسيم (b) الذي كتلته (M_b)، عندها يمكننا التعبير عن هذا التفاعل النووي بالمعادلة النووية الآتية:

$$a + X \rightarrow Y + b$$

إن قيمة طاقة التفاعل النووي (Q) يمكن ايجادها من العلاقة:

$$Q = [(M_a + M_x) - (M_Y + M_b)]c^2$$

أو

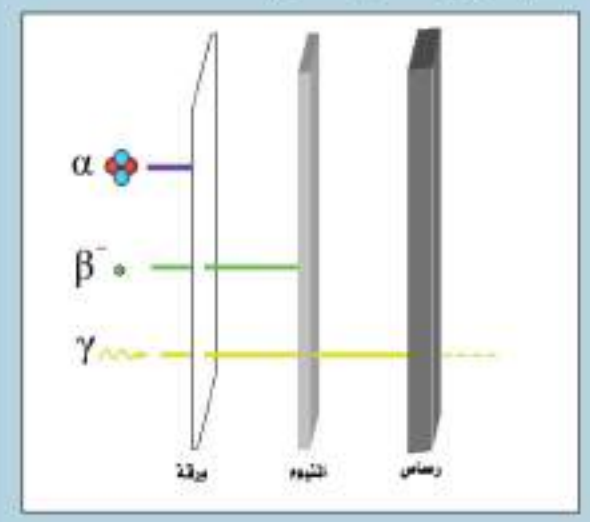
$$Q = [M_a + M_x - M_Y - M_b]c^2$$

وعندما تقاس الكتل الذرية بوحدة (u) فأن $(C^2 = 931\frac{MeV}{u})$ وتكون وحدة (Q) هي (MeV). فعلى سبيل المثال إذا كانت قيمة (Q) موجبة، $(Q > 0)$، فإن التفاعل النووي يسمى بالتفاعل المحرر للطاقة.

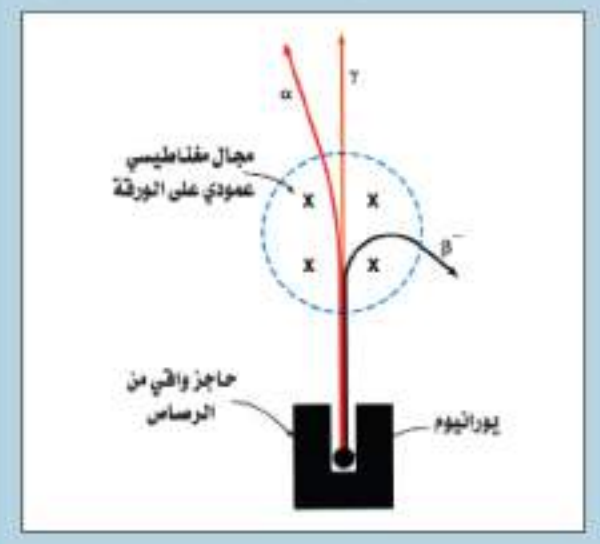
أما إذا كانت قيمة (Q) سالبة، $(Q < 0)$، فان التفاعل النووي يسمى في هذه الحالة بالتفاعل الماص للطاقة.

تذكر:

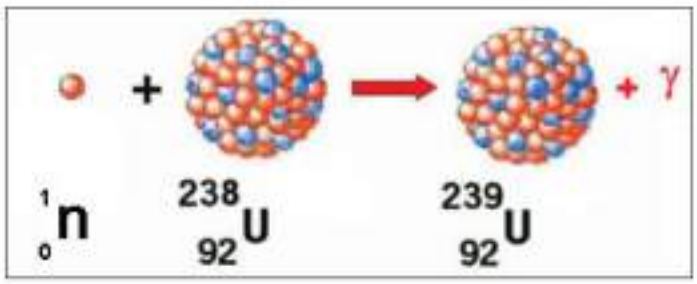
أن جسيمات الفا لها القدرة الأكبر على تأين المواد تليها جسيمات بيتا السالبة والأقل منهما قدرة هي أشعة كاما. أما من ناحية اختراق المواد فإن أشعة كاما لها القدرة الأكبر على اختراق المواد تليها جسيمات بيتا السالبة والأقل منهما قدرة هي جسيمات ألفا (فهي عادة لا تخترق الملابس وجلد الإنسان).



وتنحرف جسيمات الفا بتأثير المجال الكهربائي أو المجال المغناطيسي باتجاه يدل على أنها موجبة الشحنة وتنحرف جسيمات بيتا السالبة باتجاه يدل على انها سالبة الشحنة. ولاتنحرف أشعة كاما بتأثير المجال الكهربائي أو المجال المغناطيسي.



ومن الجدير بالذكر أن النيوترونات تُعد قذائف مهمة في التفاعلات النووية لاحظ الشكل (19)، وذلك لان شحنة النيوترون تساوي صفراً وهو بذلك يستطيع ان يدخل الى النواة بسهولة جداً (أكثر بكثير من جسيمات الفا أو البروتونات مثلاً) وذلك لعدم وجود قوة كولوم الكهربائية التنافرية بينه وبين النواة.



شكل (19)

مثال (5)

في التفاعل النووي الآتي:

$$^{4}_{2}He + ^{14}_{7}N \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H$$

جد قيمة طاقة التفاعل النووي بوحدة (MeV)، ثم بين نوعية التفاعل. مع العلم أن الكتل الذرية لكل من:

$^{14}_{7}N = 14.003074(u)$, $^{4}_{2}He = 4.002603(u)$

$^{17}_{8}O = 16.999132(u)$, $^{1}_{1}H = 1.007825(u)$

الحل

من معادلة التفاعل النووي:

$$^{4}_{2}He + ^{14}_{7}N \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H$$

(الجسيم المقذوف او الساقط) (النواة الهدف) (النواة الناتجة) (الجسيم الناتج)

(a) (X) (Y) (b)

(جسيمة الفا) (نواة النيتروجين) (نواة الاوكسجين) (جسيم البروتون)

إن طاقة التفاعل النووي (Q) يمكن ايجادها من العلاقة:

$$Q = [M_a + M_X - M_Y - M_b]c^2$$

وبما ان الكتل هي معطاة بوحدة (u)، فأن $(c^2 = 931\frac{MeV}{u})$

$$\therefore Q = [M_a + M_x - M_Y - M_b] \times 931(MeV)$$

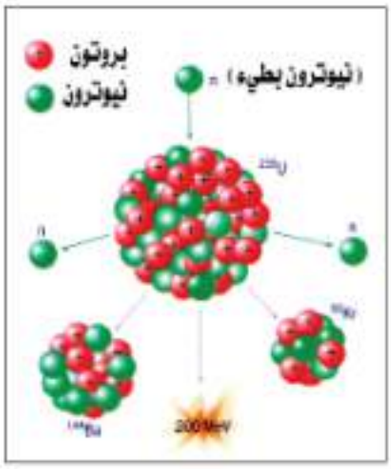
ومن ملاحظة معادلة التفاعل النووي وعند التعويض في المعادلة السابقة نحصل على:

$$Q = (4.002603 + 14.003074 - 16.999132 - 1.007825) \times 931 \ (MeV)$$

$$\therefore Q = (-0.001280) \times 931 = -1.192 \ (MeV)$$

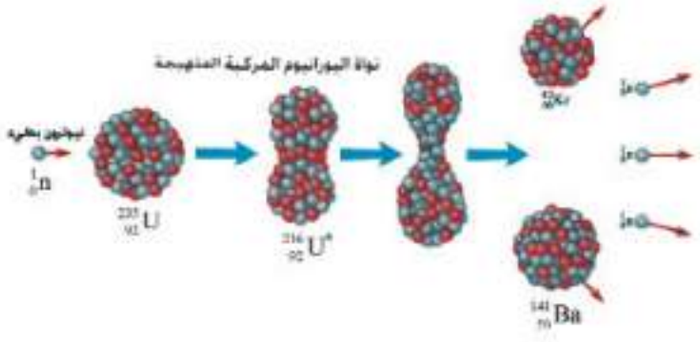
بما أن قيمة (Q) هي سالبة $(Q < 0)$، $\therefore$ التفاعل هو من النوع الماص للطاقة.

كثيراً ما نسمع عن الطاقة الهائلة والمتحررة من عملية الانشطار النووي واستعمالاتها السلمية وغير السلمية، فماذا يقصد بالانشطار النووي؟ الانشطار النووي هو تفاعل نووي تقسم فيه نواة ثقيلة (مثل نواة اليورانيوم $^{235}_{92}U$) الى نواتين متوسطتين بالكتلة وذلك عن طريق قصف هذه النواة الثقيلة بوساطة نيوترون بطيء (نيوترون حراري)، وهو نيوترون ذو طاقة صغيرة حوالي ($0.025eV$)، لاحظ الشكل (20).



شكل (20)

وعادة ماتتكون نتيجة الانشطار النووي نوى جديدة مشعة وعدد من النيوترونات (إنموذجياً اثنان أو ثلاثة) فضلاً عن الطاقة الهائلة. ولعلك تسأل من أين تأتي هذه الطاقة الهائلة؟ والجواب تأتي هذه الطاقة الهائلة من حقيقة كون ان مجموع الكتل الناتجة هي أقل من مجموع الكتل المتفاعلة إذ تتحول الكتلة المفقودة إلى طاقة هائلة على وفق علاقة انيشتاين في تكافؤ (الكتلة – الطاقة). فمثلاً تتحرر طاقة تقدر بنحو ($200MeV$) عند انشطار نواة واحدة فقط من اليورانيوم ($^{235}_{92}U$). ولذلك فإن الطاقة المتحررة من الانشطار النووي هي مثلاً أكبر بكثير من الطاقة المتحررة من التفاعلات الكيميائية. ومن أحد الأمثلة المحتملة على تفاعلات انشطار نواة اليورانيوم ($^{235}_{92}U$) بوساطة نيوترون بطيء هو التفاعل التالي، لاحظ الشكل (21):



شكل (21) (للاطلاع)

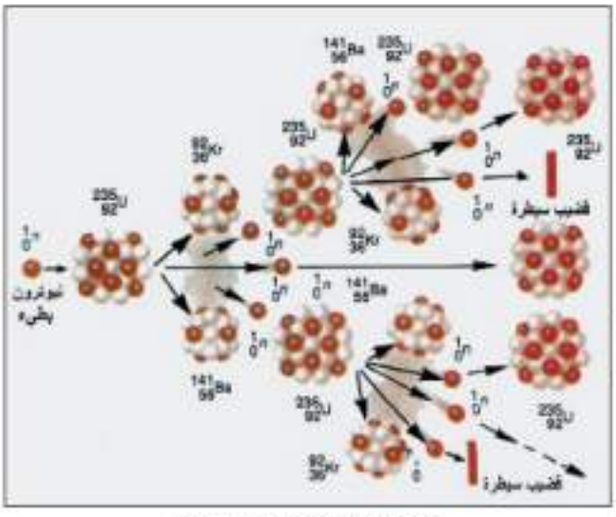
$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{236}_{92}U^{*} \rightarrow ^{141}_{56}Ba + ^{92}_{36}Kr + 3\,^{1}_{0}n$$

ويمثل الرمز ($^{236}_{92}U^{*}$) نواة اليورانيوم المركبة المتهيجة.

التفاعل النووي المتسلسل:

نسمي التفاعل النووي الذي يجعل عملية انشطار نوى اليورانيوم ($^{235}_{92}U$) وغيرها من النوى القابلة للانشطار ان تستمر بالتفاعل النووي المتسلسل، لاحظ الشكل (22).

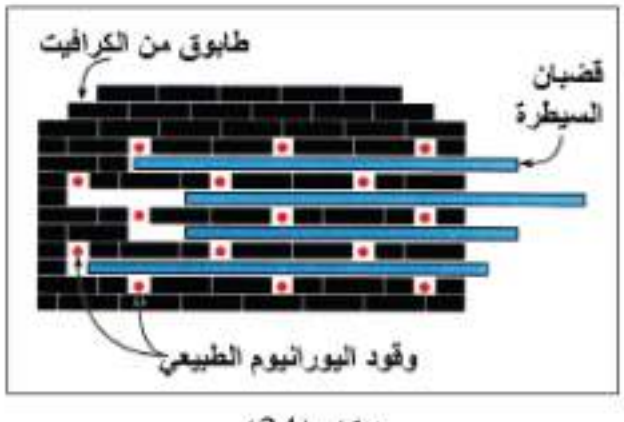
وإذا لم يسيطر على التفاعل النووي المتسلسل فإن ذلك سوف يؤدي إلى انفجار عنيف مدمر مع انبعاث كمية هائلة



شكل (22) (للاطلاع)

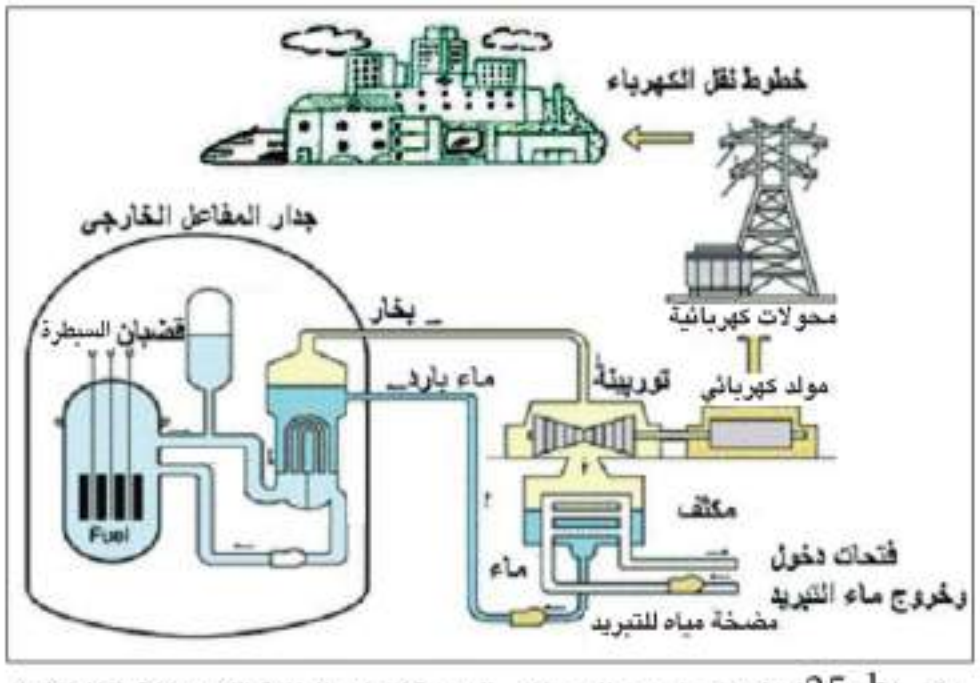
من الطاقة. وقد صنعت القنبلة النووية (شائعاً الذرية) والتي غالباً ماتدعى أيضاً بالقنبلة الانشطارية لاحظ الشكل (23)، بناءً على هذه الحالة. وقد تمكن الإنسان من السيطرة على التفاعل النووي المتسلسل، إذ إن أول تفاعل نووي انشطاري متسلسل مسيطر عليه من قبل الانسان كان أجراه العالم فيرمي ومساعدوه وذلك في أول مفاعل نووي شُغِّل في مدينة شيكاغو في الولايات المتحدة الامريكية عام (1942)، والشكل (24) يوضح مخطط أول قلب للمفاعل النووي. والمفاعل النووي عبارة عن مجموعة من المنظومات التي تسيطر على التفاعل النووي الانشطاري المتسلسل للوقود النووي (مثل اليورانيوم $^{235}_{92}U$ أو البلوتونيوم $^{239}_{94}Pu$) والطاقة الناتجة منه. إذ يستفاد حالياً وبشكل واسع من المفاعلات النووية للاغراض السلمية مثلاً في انتاج الطاقة الكهربائية، لاحظ الشكل (25- a ، b).

شكل (23)



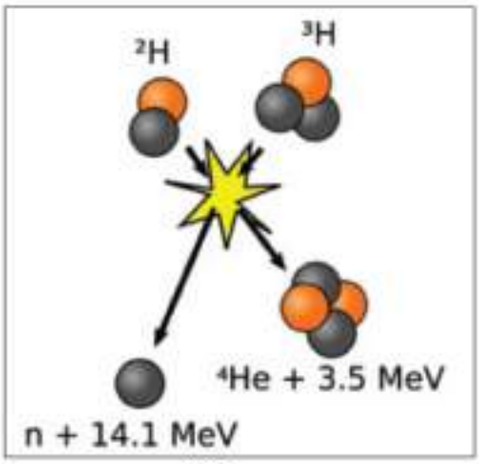
شكل (24)

شكل (25-a)



شكل (25-b) مكونات احدى المحطات النووية لتوليد الطاقة الكهربائية (للاطلاع)

هل تساءلت يوماً عزيزي الطالب من اين لشمسنا كل هذه الطاقة الهائلة والتي تغمر بها الارض وما عليها من أحياء حيث تمدنا بالضوء والحرارة التي نحتاجها ؟ والحقيقة أن هذه الطاقة الهائلة ناتجة من تفاعل نووي يسمى الاندماج النووي والذي ستتعرف عليه كما في الآتي:



شكل (26)

شكل (27)

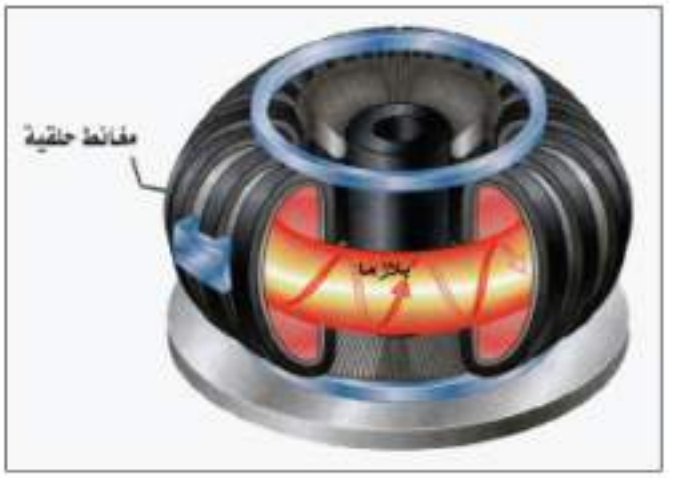
الاندماج النووي:

هو تفاعل نووي تدمج فيه نواتان صغيرتان (خفيفتان بالكتلة) لتكوين نواة أثقل لاحظ الشكل (26). وتكون كتلة النواة الاثقل هي أقل من مجموع كتلتي النواتين الخفيفتين الأصليتين، وفرق الكتلة يتحول الى طاقة متحررة وذلك على وفق علاقة اينشتاين في تكافؤ (الكتلة–الطاقة). وعلى هذا الاساس تعد الشمس مفاعل نووي اندماجي حراري عملاق لانتاج الطاقة. فماهي العمليات والتفاعلات النووية الرئيسة لانتاج هذه الطاقة الهائلة في الشمس؟ تعد سلسلة عمليات أو تفاعلات اندماج نوى ذرات الهيدروجين الاعتيادي (البروتونات) لتوليد نواة ذرة الهيليوم ($_2^4He$) هي العمليات الرئيسة التي تحدث في باطن الشمس (حيث درجة الحرارة حوالي $1.5 \times 10^7 K$) وذلك ضمن سلسلة أو دورة تسمى دورة (بروتون–بروتون). ويحرر الاندماج النووي طاقة أكبر من الطاقة التي يحررها الانشطار النووي لكتل متساوية من الوقود النووي. إن هذه الحقيقة قد طبقت عسكرياً عند انتاج القنبلة الاندماجية والتي تسمى أيضاً بالقنبلة الهيدروجينية، لاحظ الشكل (27). وهي أعظم خطراً وأشد فتكاً من القنبلة النووية (الانشطارية) ويمثل هذا النوع من القنابل الاندماجية مثالاً على التفاعلات النووية الاندماجية غير المسيطر عليها. ولكن ماذا يطلق على التفاعل النووي الاندماجي المسيطر عليه؟ وهل يمكن تحقيقه عملياً (مثلاً في المختبرات العلمية)؟ غالباً ما يطلق على التفاعل النووي الاندماجي المسيطر عليه بمصدر الطاقة الذي قد لاينضب لان مصدر الوقود النووي المستعمل (الهيدروجين) هو متاح وميسر وهو الماء المتوفر بكثرة في الكرة الأرضية. هذا فضلاً عن أن الاندماج النووي يُعد مصدراً للطاقة النظيفة نوعاً ما، إذ إن الهيليوم مثلاً هو ناتج غير مشع أي بعكس النواتج المشعة الـتي تحدث عادة

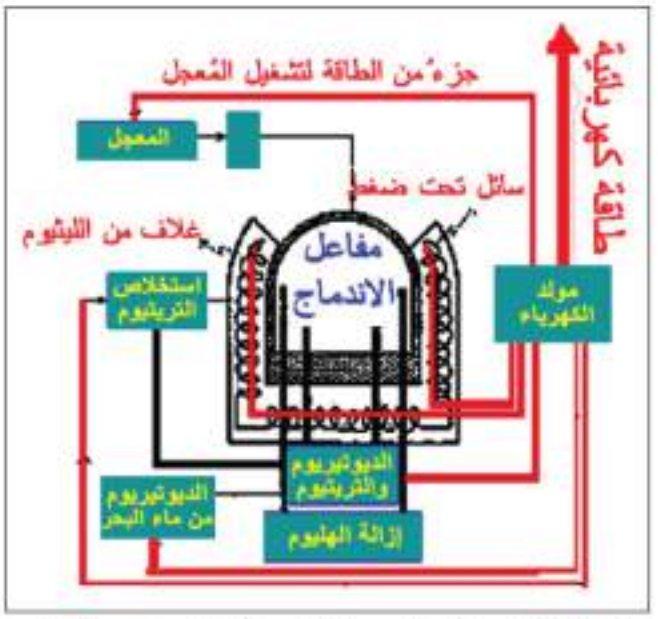
هل تعلم

توجد هناك دورة اندماج نووي أخرى تسمى دورة الكاربون وهي تحدث في النجوم التي درجة حرارتها أعلى من درجة حرارة باطن الشمس.

في عملية الانشطار النووي. وتوجد هناك صعوبات كثيرة لتحقيق عملية الاندماج النووي إذ إن العائق الرئيس للحصول على طاقة مفيدة من الاندماج النووي هو وجود قوة كولوم الكهربائية التنافرية الكبيرة بين البروتونات والنوى المتفاعلة عندما تكون المسافة بينهم قصيرة. ولأجل إعطاء البروتونات والنوى المتفاعلة طاقة كافية للتغلب على قوة كولوم الكهربائية التنافرية فإنه يتطلب رفع درجة حرارة التفاعل النووي إلى درجة حرارة مرتفعة جداً (حوالي 10^8K) حيث يصبح الوسط المعول عليه في مثل هذه الدرجات الحرارية العالية هو ما يسمى بالبلازما (الحالة الرابعة للمادة). ولكن لاتوجد مادة معروفة في الوقت الحاضر لها القدرة على تحمل مثل هذه الحرارة العالية جداً. ونظراً للصعوبة التقنية فانه وفي الوقت الحاضر لاتوجد استفادة حقيقية وعلى نطاق واسع من التفاعل النووي الاندماجي للاغراض السلمية. ويسعى العلماء والباحثون حالياً الى ابتكار طرقٍ جديدة لاحتواء البلازما المتفاعلة واللازمة للاندماج النووي مثل استعمال المجال المغناطيسي لحصر البلازما داخل حاوية ولكن بعيداً عن جدرانها (مثل جهاز التوكاماك Tokamak)، لاحظ الشكل (28). ولو أمكن التوصل الى تفاعل نووي اندماجي مسيطر عليه لأصبحت المفاعلات النووية الاندماجية من أهم مفاعلات المستقبل. ويبين الشكل (29) أحد التصاميم المقترحة لمفاعل نووي اندماجي.



شكل (28) (للاطلاع)



شكل (29) احد التصاميم المقترحة لمفاعل نووي اندماجي (للاطلاع).

9 - 8 مخاطر وفوائد الاشعاع النووي
Hazards and beneficials of nuclear radiation

قد تتعجب عزيزي الطالب إذا علمت أننا جميعاً نتعرض إلى الأشعاعات النووية في كل لحظة من حياتنا، ولكن من أين تأتي هذه الأشعاعات النووية التي نتعرض لها؟ والجواب المنطقي لهذا السؤال هو بالتأكيد من البيئة التي نعيش فيها، إذ تقسم مصادر الاشعاع النووي بصورة عامة على مصدرين رئيسين:

1 – مصادر الاشعاع النووي الخلفي الطبيعي: وتشتمل على الأشعة الكونية، والاشعاع النووي من القشرة الارضية، وكذلك النشاط الاشعاعي في جسم الانسان.

2- مصادر الأشعاع النووي الاصطناعي: ومنها المصادر النووية المشعة المستعملة في الطب لغرض التشخيص والعلاج، لاحظ الشكل (30)، النفايات النووية المشعة ، الغبار النووي المتساقط من اختبارات الاسلحة النووية، الاشعاعات النووية المنتجة من المفاعلات النووية، واستعمال المصادر النووية المشعة في البحوث والدراسات.

شكل (30)

فما تأثير ومخاطر الاشعاع النووي على جسم الانسان ؟

تعتمد درجة ونوع الضرر الذي يسببه الاشعاع النووي على عدة عوامل منها نوع الاشعاع (كاشعة كاما اوجسيمات الفا ...الخ) وطاقة هذا الاشعاع، والعضو المعرض لهذا الاشعاع (كبد او عظم او عين ....الخ).

إذ ينتج التلف الاشعاعي في جسم الانسان في المقام الاول من تأثير التأين في خلايا الجسم المختلفة. ويؤدي الضرر في خلايا الجسم الاعتيادية الى تأثيرات مبكرة مثل التهاب الجلد أو تأثيرات متأخرة مثل مرض السرطان (تأثيرات جسدية). أما الأضرار التي تحدث في الخلايا التناسلية فيمكن أن تؤدي الى حدوث ولادات مشوهة ويمكن أن ينتقل الضرر إلى الأجيال اللاحقة (تأثيرات وراثية).

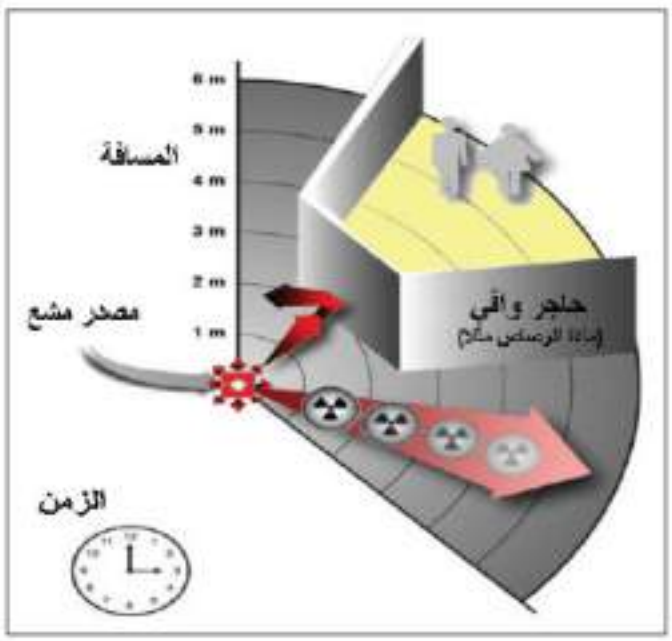
فما الاجراء الاحترازي اللازم اتخاذه لكي نقي انفسنا من مخاطر الاشعاع النووي الخارجي الذي قد يمكن ان نتعرض له اضطرارياً؟

والجواب هو في حالة التعرض للاشعاع النووي اضطرارياً فإنه يجب إبقاء التعرض الى أقل مايمكن، ويمكننا تحقيق ذلك من خلال:

a- تقليل زمن التعرض للاشعاع النووي الى اقل مايمكن.

b- الابتعاد عن مصدر الاشعاع النووي أكثر مايمكن.

c- استعمال الحواجز الواقية والملائمة (درع shield) بين الانسان ومصدر الاشعاع النووي (استعمال مادة الرصاص مثلاً)، لاحظ الشكل (31).



شكل (31)

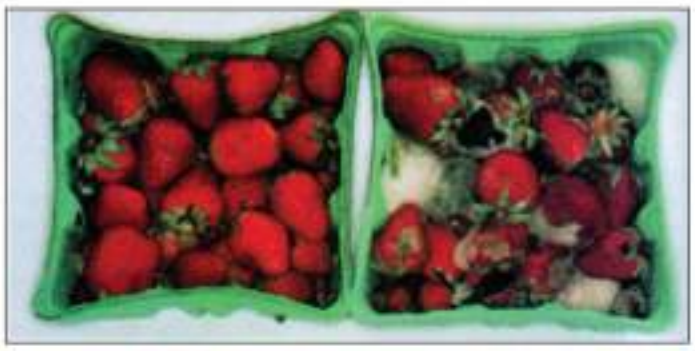
فهل توجد تطبيقات واستعمالات مفيدة وسلمية للاشعاع النووي والطاقة النووية؟

بالتأكيد هناك الكثير من الاستعمالات والتطبيقات وسنذكر هنا بعضاً منها، فضلاً عن الذي درسته سابقاً:

a- المجال الطبي مثلاً يمكن استعمال الاشعاع النووي والطاقة النووية في القضاء على بعض الكائنات المرضية التي تسبب بعض الامراض كالفيروسات وكذلك في تعقيم بعض المستلزمات الطبية.

b- المجال الزراعي مثلاً في دراسة فسلجة النبات وتغذيته وحفظ المواد الغذائية، لاحظ الشكل (32).

c- المجال الصناعي مثلاً في تسيير المركبات الفضائية لاحظ الشكل (33)، وكذلك في تسيير السفن البحرية والغواصات، لاحظ الشكل (34). كما ان هناك الكثير من التطبيقات المفيدة الاخرى للانسان وفي مختلف مناحي الحياة، التي لا يتسع المجال لذكرها هنا.



شكل (32)

هل تعلم (للاطلاع)

أن أول عملية توليد للطاقة الكهربائية من الطاقة النووية كانت في عام 1951، والآن يوجد أكثر من ثلاثين بلداً يستثمر الطاقة النووية لتوليد الطاقة الكهربائية.

شكل (33)

شكل (34)

س1 اختر العبارة الصحيحة لكل مما يأتي:

1 – نصف قطر النواة (R) يتغير تغيراً:

a – طردياً مع $A^{\frac{1}{3}}$. b – عكسياً مع $A^{\frac{1}{3}}$.

c – طردياً مع (A^3). d – عكسياً مع (A^3).

2 – تكون قيم معدل طاقة الربط النووية لكل نيوكليون:

a– أكبر لنوى العناصر الخفيفة. b– أكبر لنوى العناصر الثقيلة.

c– متساوية لجميع نوى العناصر. d– أكبر لنوى العناصر المتوسطة.

3 – كل مما يلي من خصائص القوة النووية ما عدا انها:

a– تربط وتمسك بنيوكليونات النواة. b– لاتعتمد على الشحنة.

c– ذات مدى طويل جداً. d– الاقوى في الطبيعة.

4 – إذا افترضنا أن طاقة الربط النووية لنواة النيون $\left({}^{20}_{10}Ne\right)$ تساوي $(161MeV)$، فإن معدل طاقة الربط النووية لكل نيوكليون لنواة النيون بوحدات (MeV) يساوي:

a_ 8.05 b_ 16.1

c_ 3220 d_ 1610

5 – تنحل نواة نظير البولونيوم $\left({}^{218}_{84}Po\right)$ تلقائياً الى نواة نظير الرصاص $\left({}^{214}_{82}Pb\right)$ بوساطة انحلال:

a– كاما. b– بيتا السالبة.

c– بيتا الموجبة. d– الفا.

6 – عندما تعاني نواة تلقائياً انحلال بيتا الموجبة فإن عددها الذري:

a– يزداد بمقدار واحد. b– يقل بمقدار واحد.

c– يقل بمقدار اربعة. d– لا يتغير.

7 – في التفاعل النووي التالي:

$${}^{4}_{2}He + {}^{9}_{4}Be \rightarrow {}^{A}_{6}C + {}^{1}_{0}n$$

تكون قيمة العدد (A) هي:

a_ 13 b_ 12

c_ 5 d_ 6

8 – في الفيزياء النووية تسمى عملية اندماج نواتين صغيرتين (خفيفتين بالكتلة) لتكوين نواة اثقل:

a– انشطار نووي. b– عملية الأسر الالكتروني.

c– انحلال بيتا الموجبة. d– اندماج نووي.

9 – من مصادر الاشعاع النووي الخلفي الطبيعي هي:

a– الغبار المتساقط من اختبارات الاسلحة النووية. b– الاشعة الكونية.

c– الاشعاعات النووية المنتجة من المفاعلات النووية. d– ولا واحدة منها.

10 – تتم عملية الانشطار النووي لنواة اليورانيوم ($^{235}_{92}U$) باستعمال:

a– بروتون ذو طاقة صغيرة. b– جسيمة الفا ذات طاقة صغيرة.

c– نيوترون بطيء. d– ولا واحدة منها.

س2 ما المقصود بكل مما يأتي:

البوزترون ، الانشطار النووي ، طاقة الربط النووية ، التفاعل النووي المتسلسل ، الاندماج النووي ، المفاعل النووي.

س3 ما الجسيم الذي:

a– عدده الكتلي يساوي واحد وعدده الذري يساوي صفر.

b– يطلق عليه مضاد الالكترون.

c– يرافق الالكترون في انحلال بيتا السالبة التلقائي.

d– يرافق البوزترون في انحلال بيتا الموجبة التلقائي.

س4 ماهو الشرط اللازم لنواة تنحل تلقائياً بوساطة انحلال الفا؟

س5 علل مايأتي:

a– تنبعث أشعة كاما تلقائياً من نوى بعض العناصر المشعة.

b– تُعد النيوترونات قذائف مهمة في التفاعلات النووية.

س6 ما الطرائق التي تنحل بها بعض النوى تلقائياً بانحلال بيتا؟

س7 بما أن النواة أساساً لاتحتوي على الالكترونات فكيف يمكن للنواة أن تبعث الكتروناً؟ وضح ذلك.

س8 ما قوانين الحفظ التي يجب أن تتحقق في التفاعلات النووية؟

س9 أكمل المعادلات النووية الآتية:

a - $^{2}_{1}H + ^{9}_{4}Be \rightarrow ^{7}_{3}Li + ?$

b - $^{12}_{6}C^{*} \rightarrow ^{12}_{6}C + ?$

c - $^{56}_{27}Co \rightarrow ^{56}_{26}Fe + ? + \nu$

d - $^{1}_{0}n \rightarrow ? + ? + ?$

س10 من أين تأتي الطاقة الهائلة من عملية الانشطار النووي؟

س11 ماذا يحصل إذا لم يسيطر على التفاعل النووي المتسلسل؟

س12 نواة اليورانيوم ($^{238}_{92}U$) انحلت بوساطة انحلال ألفا التلقائي فتحولت إلى نواة الثوريوم (Th). ثم انحلت نواة الثوريوم بوساطة انحلال بيتا السالبة التلقائي وتحولت الى نواة (X). ثم انحلت نواة (X) بوساطة انحلال بيتا السالبة التلقائي وتحولت الى نواة ($\acute{X}$).

a- اكتب المعادلات النووية الثلاث لهذه الانحلالات النووية بالتسلسل.

b- حدد اسم النواة ($\acute{X}$).

س13 ما العمليات والتفاعلات النووية الرئيسة لانتاج الطاقة الهائلة في الشمس؟

س14 ماذا نعني بقولنا (غالبا ما يطلق على التفاعل النووي الاندماجي المسيطر عليه بمصدر الطاقة الذي قد لاينضب).

س15 ما العائق الرئيس للحصول على طاقة مفيدة من الاندماج النووي؟

س16 ما تأثير ومخاطر الاشعاع النووي على جسم الإنسان؟ وضح ذلك.

س17 ما الأجراء الاحترازي اللازم اتخاذه لكي نقي انفسنا من مخاطر الأشعاع النووي الخارجي الذي قد يمكن أن نتعرض له اضطرارياً ؟ وضح ذلك.

استفد:

كتلة ذرة الهيدروجين $(^1_1H) = 1.007825(u)$

كتلة ذرة الهيليوم $(^4_2He) = 4.002603(u)$

كتلة النيوترون $= 1.008665(u)$

$$1u = 1.66\times10^{-27}(kg)\ ,\ h = 6.63\times10^{-34}(J.s)$$

$$c = 3\times10^{8}(m/s)\ ,\ e = 1.6\times10^{-19}(C)$$

$$1eV = 1.6\times10^{-19}(J)$$

س1 / وضع وقود نووي داخل مفاعل نووي ، وبعد حدوث التفاعل النووي كان النقص في كتلته الذي تحول الى طاقة نووية يساوي $(0.25g)$.جد مقدار الطاقة النووية الناتجة مقدرة بوحدة (MeV).

س2 / للنواة $(^{56}_{26}Fe)$ جد:

a – مقدار شحنة النواة.

b – نصف قطر النواة مقدراً بوحدة (m) أولاً ، وبوحدة (F) ثانياً .

c – حجم النواة مقدراً بوحدة (m^3)

مع العلم بان $(\sqrt[3]{7} = 1.913)$.

س3 / إذا علمت أن نصف قطر نواة البولونيوم $(^{216}_{84}Po)$ يساوي ضعف نصف قطر نواة مجهولة (X). جد العدد الكتلي للنواة المجهولة؟

س4 / جد طاقة الربط النووية لنواة $(^{126}_{52}Te)$ مقدرة بوحدة (MeV) أولاً ، وبوحدة (J) ثانياً . إذا علمت أن كتلة ذرة $(^{126}_{52}Te)$ تساوي $(125.903322\ u)$.

س5 / للنواة $(^{12}_{6}C)$ جد:

a- النقص الكتلي مقدراً بوحدة (u).

b- طاقة الربط النووية مقدرة بوحدة (MeV).

c- معدل طاقة الربط النووية لكل نيوكليون مقدرة بوحدة (MeV) .

مع العلم أن كتلة ذرة $(^{12}_{6}C)$ تساوي $(12u)$.

س6 / أي من النواتين الآتيتين تمتلك طاقة ربط نووية أكبر من الاخرى ، نواة (^3_1H) أم نواة (^3_2He) ؟ جد الجواب بوحدة (MeV) . مع العلم أن الكتل الذرية لكل من:

$$.\ {}^3_1H = 3.016050(u)\ ,\ {}^3_2He = 3.016030(u)$$

س7 / برهن على أن نواة البلوتونيوم ($^{236}_{94}Pu$) تحقق شرط الانحلال التلقائي الى نواة اليورانيوم ($^{232}_{92}U$) بوساطة انحلال الفا. اكتب أيضاً المعادلة النووية للانحلال. مع العلم أن الكتل الذرية لكل من:

$$^{232}_{92}U = 232.037168(u) \quad , \quad ^{236}_{94}Pu = 236.046071(u)$$.

س8 / ما مقدار تغير كتلة نواة ساكنة ابتدائياً عندما تطلق تلك النواة اشعة كاما طاقتها ($2MeV$) ؟جد الجواب مقدراً بوحدة (u) اولاً ، وبوحدة (kg) ثانياً . ما الطول الموجي لهذه الاشعة مقدراً بوحدة (m) ؟ اهمل ارتداد النواة .

س9 / حدث تفاعل نووي بين جسيم ساقط ونواة البريليوم ($^{9}_{4}Be$) الساكنة ونتج عن هذا التفاعل جسيم النيوترون ونواة الكاربون ($^{12}_{6}C$) .

a- عبر عن هذا التفاعل بمعادلة تفاعل نووي ومنها حدد اسم الجسيم الساقط .

b- جد طاقة التفاعل النووي مقدرة بوحدة (MeV) ؟

c- ما نوع هذا التفاعل النووي ؟

مع العلم أن الكتل الذرية لكل من:

$$^{12}_{6}C = 12(u) \quad , \quad ^{9}_{4}Be = 9.012186(u)$$.

س10 / حدث تفاعل نووي بين بروتون ساقط ونواة السماريوم ($^{150}_{62}Sm$) الساكنة ونتج عن هذا التفاعل جسيمة الفا و نواة البروميثيوم ($^{147}_{61}Pm$) . فإذا علمت أن طاقة التفاعل النووي تساوي ($6.88\ MeV$) وأن كتلة ذرة السماريوم تساوي ($149.917276\ u$). عبر عن هذا التفاعل بمعادلة تفاعل نووي، ثم جد كتلة ذرة البروميثيوم مقدرة بوحدة (u) .

س11 / إذا افترضنا بانه طاقة مقدارها ($200\ MeV$) تحرر عند انشطار نواة واحدة من اليورانيوم ($^{235}_{92}U$) . جد عدد نوى اليورانيوم اللازمة لتحرير طاقة مقدارها ($3.2\times10^{12}\ J$).