اساسيات فيزياء الطب النووي والأجهزة

راشيل أ. بوسنر	ماثيو ر بالمر
أستاذ مشارك في الأشعة، مديرة كلية الطب بجامعة بوسطن ، قسم الطب النووي قسم الأشعة ، نظام الرعاية الصحية للمحاربين القدامى في بوسطن ، الولايات المتحدة الأمريكية	دكتوراه في الفيزياء الطبية ، قسم الأشعة، أستاذ مساعد للأشعة في كلية الطب بجامعة هارفارد ، بوسطن ، الولايات المتحدة الأمريكية

ادوارد ار. بوسنر

دكتوراه في الطب، رئيس قسم خدمات الطب النووي في ادارة مستشفى المحاربين القدامى ألين بارك ، ميتشيغن أستاذ ورئيس مشارك سابق في قسم علم الأمراض ، جامعة ميشيغان الحكومية ، شرق لانسنج ، الولايات المتحدة الأمريكية

ترجمة كل من

م. د. غيداء عبد الحافظ جابر

جامعة بابل/ كلية العلوم/ قسم الفيزياء / العراق

م. د. رجاء حسين عبد علي عبيس

جامعة كربلاء / كلية العلوم/ قسم الفيزياء / العراق

الطبعة الثانية ٢٠٢٠

دار حميثرا للنشر الطبعة الاولى 2020

جميع حقوق الطبع والنشر محفوظة لدار حميثرا للنشر

لا يجوز استنساخ أو طباعة أو تصوير أي جزء من هذا الكتاب
أو اختزانه باي وسيلة إلا بإذن مسبق من الناشر.

التوزيع داخل جمهورية مصر العربية والسودان وشمال افريقيا ودول الخليج

جمهورية مصر العربية - القاهرة 26 ش شامبليون

ت : 01113664737 - 01007420665

البريد الالكترونى : Email : homysra@gmail.com

إلى رونالد وأريانا ودانيال، على صبرهم ودعمهم طوال هذا المشروع.

R.A.P

إلى جورجيو وبيتريس بسبب طاقتهم وحماسهم الملهمين لي.

M.R.P.

إلى روندا عن حبها ودعمها ومساعدتها المستمرة.

E.R.P

المحتويات

	العنوان	الصفحة
	المقدمة	7
	الشكر والتقدير	9
	المؤلف المساهم	11
1	اساسيات فيزياء الطب النووي	17
2	تفاعل الإشعاع مع المادة	49
3	تشكيل النويدات المشعة	67
4	أجهزة الكشف اللاوميضيه	81
5	الكواشف الوميضية	111
6	أجهزة التصوير	135
7	التصوير المقطعي بالانبعاث أحادي الفوتون	161
8	التصوير المقطعي بالانبعاث البوزيتروني	177
9	التصوير المقطعي بالأشعة السينية	205
10	أنظمة التصوير الهجينة	221
11	إعادة بناء الصورة ومعالجتها وعرضها	227

	العنوان	الصفحة
12	تكنلوجيا المعلومات	271
13	إدارة الجودة	283
14	بيولوجيا الاشعاع	313
15	قياس الجرعات الإشعاعية	333
16	السلامة من الإشعاع	347
17	إدارة ضحايا الأحداث النووية	359
	الملحق A: Common Nuclides	383
	الملحق B: Major Dosimetry for Common Radiopharmaceuticals	384
	الملحق C: Sample Calculations of the S Value	385
	الملحق D: Guide to Nuclear Regulatory Commission Publications	387
	الملحق E: Recommended Reading by Topic	390

المُقَدِّمَة

بعد سـنوات من التدريب بعد التخرج، نسي العديد من الأطباء او بعضًا منهـم (أو أكـثر) من فيزياء المرحلة الجامعيـة الأولى والثانوية، وقد يجدون أن الانغمـاس في الفيزيـاء النوويـة مروع إلى حد مـا. يبدأ هذا الكتـاب بمقدمة أساسية للفيزياء النووية وتفاعلات الإشعاع والمادة. ثم يتابع مناقشات أجهزة الطـب النـووي المسـتخدمة في إنتـاج النيوكليـدات وقياس الجرعات ومسـح النشاط الإشعاعي والتصوير (بما في ذلك SPECT و PET و PET-CT). تغطي الفصول النهائية بيولوجيا الإشعاع، وسلامة الإشعاع، وحوادث الإشعاع.

وقد تم تضمين العديد من الرسوم التوضيحية. واغلبها تخطيطية ومصممة لتوضيح المفاهيم بدلاً من تمثيل نماذج مصغرة لمواضيعها. هذا النص مخصص للعاملـين على الأشـعة والزمـلاء من أمـراض القلـب وزملاء الطـب النووي وطلاب تكنولوجيا الطب النووي وغيرهم من المهتمين بمقدمة لمفاهيم فيزياء وأجهزة الطب النووي.

شكر وتقدير

يـود المؤلفون أن يشـكروا الخبراء التاليـين على انتقاداتهـم القيمة لأجزاء مـن هذا النص: سـتيفن مور، دكتـوراه في مجال معالجـة SPECT وكذلك إعادة البنـاء التكـراري، فريد فاهي، دكتـوراه على أجهزة PET ، وروبـرت زيمرمان، في مجـال M.S.E.E. ومختـص على على مراقبة جودة الكامـيرا غاما والفيزياء من التلألؤ الكريسـتال. بالإضافة إلى ذلك، استعرض الدكتور فرانك ماسي بسخاء المواد المتعلقة بحوادث الإشـعاع ومارك والش، سي إتش. انتقد النص سـلامة الإشـعاع. ونقدم شـكرنا كذلك لمارجريـت نوردبي على اسـتعراضها البراهين. يعـرب المؤلفون عن امتنانهم لروندا م. بوزنر، دكتوراه في الطب لمسـاعدتها في مراجعة النص والبراهين.

نظـرًا لأن الطبعـة الثانية تضم النص من الطبعـة الأولى، يود المؤلفون أن يشـكروا الأفراد التالية أسماؤهم على مساعدتهم في مراجعة أجزاء من الطبعة الأولى أثنـاء إعدادها: ديفيد روكويل، دكتوراه في الطـب، مورا داينن-بيرتون، سي إن إم، ديبـا باتيـل، دكتوراه في الطب، ألفونس تاغيـان، دكتوراه في الطب، هيرنـان جارا، دكتوراه، سـوزان غوسـنهوفن، دكتوراه، جون شـو، م.، مايكل سـكويلانتي، دكتوراه، كيفين باكلي، سي. إتش.، جاين كاروسـو، فيكتور لي، م.، توبي وروبليكا، م.، دان ويندر، م.، دينيس أتكينسون، م. د. وإينا جازيت، م. د. بفضل بيتر شومب، أ. ر. تي، س. إن. نحن نقدر تقديرا كبيرا الصبر الذي أظهره في ذلـك الوقـت روبـرت زيمرمان، ضمن مجـال MSEE ، كيفن بـاكلي ، CHP، جـون ويدمـان ، دكتوراه ، CHP ، بيتر واير ، دكتوراه ، سـتيفن مور ، دكتوراه ، بيل ورسـتيل ، دكتوراه د. وهيرنان جارا ، دكتوراه أثناء الإجابة على العديد من الأسئلة لدينا. بفضل ديليا إدواردز، ميلدا بيتر، وبول جيدون، دكتوراه في الطب لأخذ الوقت لنشكل كنماذج.

مؤلف مساهم

كيفن دونوهو

طبيب هيئة تدريس في الطب النووي
أستاذ مساعد الأشعة
كلية الطب بجامعة هارفارد

قائمة بالمصطلحات

الرمز بالانكليزي	بالعربي	توضيح
eV	الكترون فولت	الكترون فولت هي وحدة لقياس الطاقة. هي كمية طاقة الحركة التي يكتسبها الكترون وحيد غير مرتبط عند تسريعه بواسطة جهد كهربائي ساكن قيمته 1 فولت في الفراغ. وطبقا لذلك التعريف بالإلكترون فولت حاصل ضرب 1 فولت في شحنة الإلكترون التي تقدر بـ (كولوم $(1e = 1.6023 \times 10^{-19}$
keV	كيلو الكترون فولت	وهو يعادل 1000 الكترون فولت
MeV	ميكا الكترون فولت	وهي تعادل 1000000 الكترون فولت
Bq	بيكريل	هي وحدة النشاط الإشعاعي ويرمز لها بالاختصار Bq. يعرف 1 بيكريل بأنه كمية الإشعاع الصادرة من مادة مشعة تتحلل فيها نواة واحدة في الثانية. وبذلك تصبح وحدة البيكريل تساوي ثانية$^{-1}$. وقد سميت تلك الوحدة على اسم العالم الفرنسي هنري بيكريل
MBq	ميكابيكريل	وهي تعادل 1000000 بيكريل
Ci	كوري	هي وحدة لنشاط مادة مشعة، وقد استخدمت تلك الوحدة حتى عام 1985 في الفيزياء النووية، ثم استبدلت بوحدة أصغر منها وهي الـ بيكريل $3.7*10^{10}$. 37 GBq = واحد كوري
SI	النظام العالمي للوحدات	يطبق هذا المصطلح بشكل عام على الأنظمة الدولية في القرن العشرين ويمكن تطبيقه بشكل متساوٍ على نظام الدولة الدولي ما قبل الصناعي.
negatron	النيكاترون	نيكاترون. اسم إلكترون ذو شحنة سالبة ، وهو ضديد البوزيترون.

الرمز بالانكليزي	بالعربي	توضيح
Bremsstrahlung	كبح الاشعاع	تنشأ عند إبطاء (تقليل مقدار السرعة) جسيم ذو شحنة كهربية مثل إلكترون أو بروتون. للحصول على هذه الأشعة بشكل مصطنع يجري تسريع الجسيمات بوساطة تسليط مجال كهربائي أو مجال مغناطيسي على الجسيم، كما يحدث في معجلات الجسيمات الأولية مثل السيكلوترون، ثم بإجراء عملية الكبح.
Cyclotron	السيكلوترون	جهاز يعجل الجسيمات الذّرية المشحونة كهربائياً إلى طاقات عليا. وهو نوع من معجلات الجسيمات يجعل الجسيمات تتحرك في دائرة محددة. يُسرع السّيكلوترون الجسيمات التي تتراوح كتلتها ما بين كتلة البروتون وكتلة النواة الثقيلة. وتبلغ معظمها طاقات تتراوح ما بين عشرة و50 مليون إلكترون فولت، ويصل القليل منها إلى طاقات أعلى.
parent radionuclide	النويدات المشعة الام	النويدات المشعة الأم التي تتحلل لإنتاج ابنة مشعة. عادة ما يتم إنتاج الام في مفاعل نووي.
daughter radionuclide	النويدات المشعة البنت	النويدات الناتجه من تحلل النويدة الام
Thermal neutron	النيوترونات الحرارية	تشير درجة حرارة الكشف عن النيوترون ، والتي تسمى أيضًا طاقة النيوترون ، إلى الطاقة الحركية للنيوترون الحر، والتي تعطى عادة في إلكترون فولت. يتم استخدام مصطلح النيوترونات الحرارية، بتعديل النيوترونات الساخنة الحرارية والباردة في وسط بدرجة حرارة معينة
electroscope	إليكتروسكوب.	المجهر الكهربائي هو أداة علمية مبكرة تستخدم للكشف عن وجود شحنة كهربائية على الجسم. يكتشف الشحنة بحركة الجسم ضمن عينة الاختبار بسبب قوة كولوم الكهربائية عليه.
mCi	ملي كوري	1 كوري= 1000 ملي كوري
µCi	مايكرو كوري	1 كوري= 1000000 ملي كوري
R	رونتكن	هي وحدة لقياس التعرض للأشعة السينية وأشعة كاما حتى طاقة عدة ملايين إلكترون فولط
mR	ملي روتنكن	1 رونتكن= 1000 ملي رونتكن

الرمز بالانكليزي	بالعربي	توضيح
compton interactions	تفاعلات كومبتن	هو تشتت الفوتون بسبب اصطدامه بجسيم مشحون حر، عادة إلكترون. حيث يتسبب هذا التأثير بنقصان الطاقة (زيادة طول الموجة) للفوتون، وهو ينطبق على الأشعة الكهرومغناطيسية ذات الطاقة العالية، مثل فوتونات أشعة كاما وفوتونات أشعة إكس العالية الطاقة.
Schilling Test	اختبار شيلينك	هو التحقق من أن الجسم يقوم بامتصاص فيتامين B12 بشكل سليم, أو الكشف عما إذا كان هنالك ضرر قد حصل لعملية الامتصاص. B12 (كوبالامين) هو فيتامين أساسي في عمل خلايا الجسم, وخاصة خلايا الدم الحمراء والخلايا العصبية.
Sinograms	سينوغرام	هو إجراء خاص للتصوير بالأشعة السينية يتم إجراؤه لتصوير أي فتحة غير طبيعية في الجسم، بعد حقن وسائط التباين (صبغة الأشعة السينية) في الفتحة.
Single-photon emission computed tomography	SPECT	تقنية التصوير المقطعي بالطب النووي باستخدام أشعة كاما. هي تشبه إلى حد بعيد التصوير الطبقي التقليدي باستخدام كاميرا كاما المستوية (أي التصوير الضوئي)، ولكنها قادرة على تقديم معلومات ثلاثية الأبعاد حقيقية. يتم تقديم هذه المعلومات عادةً على شكل شرائح مستعرضة التي اخذت للمريض. ويمكن إعادة تنسيقها أو التلاعب بها حسب الحاجة.
positron emission tomography – computed tomography	PET-CT	هو تشخيص جديد للتمثيل الدقيق لأنواع معينة من السرطان وانتشارها. بالتالي، من الممكن أن يظهر ليس فقط السرطان نفسه ولكن أيضًا نشاطه. تتناسب الطريقة بشكل جيد للغاية مع التحقق من آثار ونجاح العلاج المستخدم. يمكن لـ PET-CT تحديد الموقع الدقيق للسرطان وحجمه ونشاطه وتطوره في الجسم بأكمله. تظهر أصغر تشكيلات السرطان والانباث.
Gray	Gy	وحدة قياس الجرعة الإشعاعية من الأشعة المؤينة الممتصة، وتعكس كمية الطاقة التي أودعت في 1 كيلوغرام من الجسم الحي أو المادة. تستعمل الوحدة كراي لقياس جرعة الأشعة السينية أو أشعة كاما المستخدمة في الطب.

الرمز بالانكليزي	بالعربي	توضيح
millirem	mrem	Rem هـو جرعة كبيرة من الإشـعاع ، لذلك يتم اسـتخدام millirem (mrem) ، وهـو واحـد مـن الألـف مـن rem ، للجـرعات الـتي تتـم مواجهتها بشـكل شـائع، مثـل كمية الإشـعاع المتلقـاة مـن الأشـعة السـينية الطبيـة والمصادر الخلفية.

الفصل الأول

اساسيات فيزياء الطب النووي

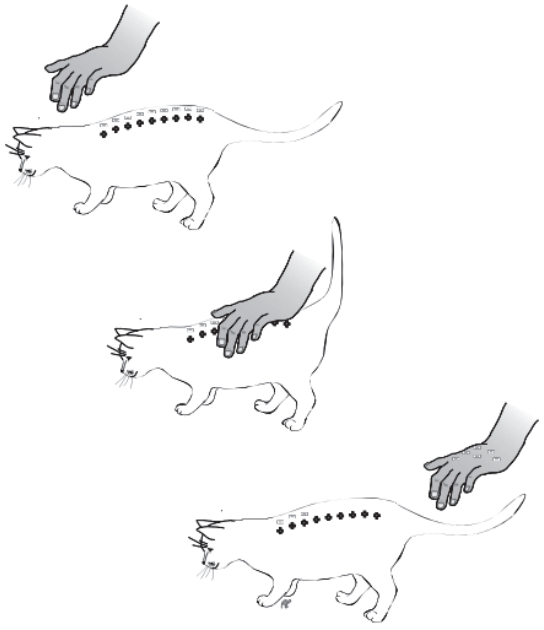
Basic nuclear medicine physics

خصائص وبنية المادة Properties and Structure of Matter

المادة لديها العديد من الخصائص الأساسية. الأكثر أهمية هي الكتلة والشحنة (الكهربائية). نحن ندرك الكتلة من خلال قوة الجاذبية المبذولة على كائن مادي وبسبب قصور الجسم، وعادة ما يشير الى وزنه وهو «المقاومة» التي نواجهها عندما نحاول تغيير موقع أو حركة جسم مادي.

بالمثل، يمكننا، في بعض الأحيان، تمييز الشحنة من خلال التأثير المباشر الذي يحدث علينا أو أننا يمكن أن نلاحظ هنا التأثير على الجماد. على سبيل المثال، قد نشعر بوجود جسم مشحون بشدة والذي يسبب التحرك لشعرنا أو حتى وقوفه الى نهايته. مع ذلك، في كثير من الأحيان، نحن غير حساسين للشحنة. لكن ما إذا كان يمكن الكشف عنها أم لا، يجب النظر في آثارها وذلك بسبب دور الشحنة الذي له دور في بنية المادة.

ويعتقد عموما أن الشحنة كان معترف بها لأول مرة من قبل اليونانيين القدماء. لاحظوا أن بعض أنواع المواد، وقضبان الكهرمان مثلا، يمكن أن تعطى شحنة كهربائية عن طريق فركها مع قطعة من القماش. لقد أقنعتهم تجاربهم بأن هناك نوعين من الشحنة: شحنات متعاكسة، تجذب بعضها البعض، والشحنات المتشابهة التي تتنافر. نوع واحد من الشحنة يسمى الموجب، والاخر سالب. نحن نعلم الآن أن الشحنة السالبة ترتبط بالإلكترونات. الفرك ينقل بعض الإلكترونات من ذرات المادة في القضيب إلى القماش. بطريقة مماثلة، يمكن نقل الإلكترونات من فرو القطة إلى اليد. بعد الملاعبة بفروها،



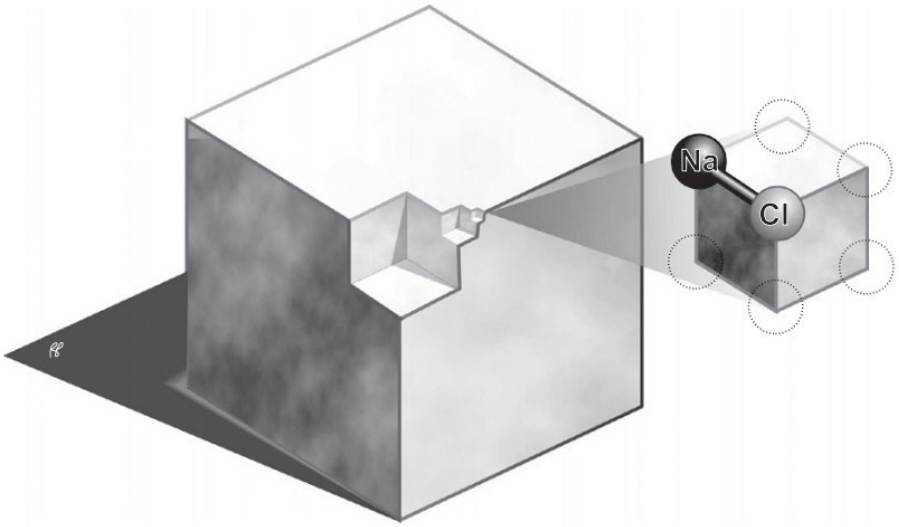
الشكل (1-1) الشحنة الكهربائية الساكنة

سيكون لدى القطة شحنة ايجابية صافية والشخص شحنة سالبة صافية كما في (الشكل 1-1). ومع اخذ هذه الخصائص الأساسية في الاعتبار، يمكننا أن ننظر الى المادة بمزيد من التفصيل.

المادة تتكون من جزيئات. وفي أي مادة نقية كيميائيا، الجزيئات هي أصغر الوحدات التي تحتفظ بخصائص المادة نفسها. على سبيل المثال، إذا كان يجب كسر كتلة من الملح إلى قطع صغيرة، فأنه الجزء الاصغر مع خصائص الملح سيكون جزيء ملح واحد الشكل (1-2).

مع المزيد من التفتيت للجزيئة لن تكون جزيئة ملح. فالجزيئات، بدورها، تتكون من **الذرات**. معظم الجزيئات تتكون من أكثر من نوع واحد من ذرة الملح، على سبيل المثال، فهو يتكون من ذرات الكلور والصوديوم. وتتكون الذرات نفسها من جسيمات أصغر حجما، وهي **جزيئات دون ذرية**، ستناقش لاحقا.

الجزيء يتماسك معاً بواسطة الاواصر الكيميائية بين ذراته. وتتكون هذه الاواصر من قوة الجذب الكهربائي بين أجزاء مشحونة متعاكسة في الجزيء. وغالبا ما يشار إلى هذه القوة باسم قوة كولومب حيث تشارلز دي كولومب، هو الفيزيائي الذي وصفها. هذه القوة المشاركة في التفاعلات الكيميائية مثل اتحاد الهيدروجين والأكسجين لتشكيل المياه، تحتفظ الإلكترونات في الذرة بالقوة الكهربائية بينها وبين النواة الموجبة.



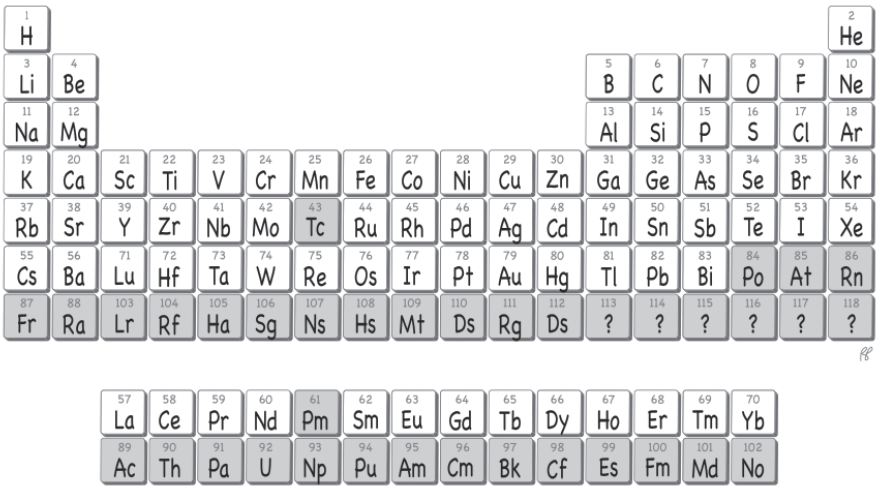
الشكل (1-2) **جزيء كلوريد الصوديوم هو أصغر وحدة في الملح الذي يحتفظ بخصائص الملح.**

ونواة الذرة تتماسك معا بنوع آخر من القوة- (القوة النووية) التي تشارك في تحرير الطاقة الذرية. القوى النووية هي أكبر من القوى الكهربائية.

العناصر Elements

هناك أكثر من 100 نوع من الذرات. ويشار إلى هذه الأنواع **كعناصر**. ومعظم العناصر المعروفة- مثل الزئبق والهيليوم والذهب والهيدروجين والأكسجين- وهي موجودة بشكل طبيعي على الأرض؛ والبعض الآخر لا توجد عادة في الطبيعة ولكن مصنوعة من قبل البشر- على سبيل المثال، يوروبيوم وامريشيوم. وهناك تفسير معقول لعدم وجود بعض العناصر في الطبيعة وذلك لانها عندما تشكلت لم تكن ثابته وهي غير مستقرة ولذلك لم تنجو ويمكن استكشاف كميات منها في الوقت الحاضر. لقد تم تعيين رموز او اسماء كيميائية مختصرة لجميع العناصر: الذهب Au، الزئبق Hg، الهيليوم He. وبعض الرموز هي اختصارات واضحة للغة الإنجليزية. والبعض الآخر مشتق من الاسم اللاتيني الأصلي للعنصر، على سبيل المثال، Au هو من Aurum، وهو الكلمة اللاتينية للذهب.

يتم تنظيم جميع العناصر المعروفة، سواء الطبيعية أو تلك التي صنعت من البشر، في الجدول الدوري. الشكل (1-3)، تظهر العناصر التي لديها حالة مستقرة في المربعات البيضاء، وتلك التي تكون مشعة تظهر في المربعات الرمادية.



الشكل (1-3) **الجدول الدوري.**

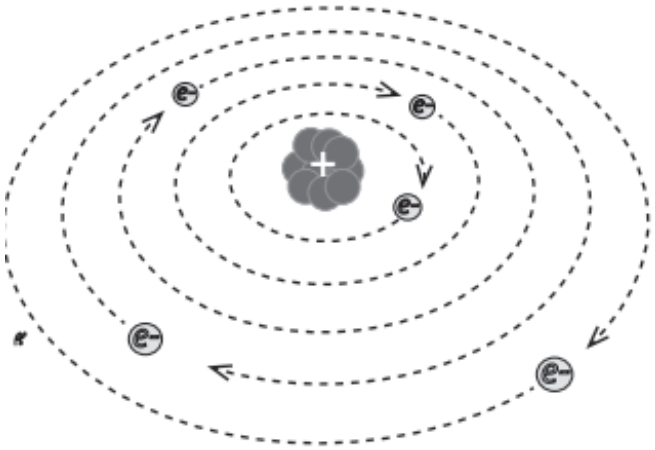
يشار إلى الرقم الظاهر في الأعلى باختصار لكل عنصر بالرقم الذري، والذي سيتم مناقشته لاحقًا في هذا الفصل.

يتم ترتيب العناصر في الجدول الدوري في أعمدة (تسمى المجموعات) والصفوف (تسمى الفترات). بشكل عام، تظهر العناصر داخل المجموعات خصائص متشابهة. وذلك لأن العناصر الموجودة في المجموعة تحتوي غالبًا على أعداد مماثلة من الإلكترونات في غلافها الخارجي. تعد ترتيب الإلكترونات الخارجية للقشرة أكثر أهمية في تحديد كيفية تفاعل الذرة مع الذرات الأولية الأخرى. اللانثانيدات والأكتينيدات عبارة عن مجموعات خاصة من العناصر، تظهر بشكل تقليدي في صفوف منفصلة عن الجدول وتوضع أسفله. تمتلك هاتان المجموعتان نفس عدد إلكترونات الغلاف الخارجي وتتقاسم العديد من الخصائص الشائعة.

البنية الذرية Atomic Structure

كانت الذرات في البداية يعتقد بأنها ليست أكثر من قطع صغيرة من المادة. وفهمنا بأن لديها بنية داخلية هي نتيجة المشاهدات من قبل الفيزيائيين في وقت سابق لذلك فان الذرات التي تتكون منها المادة تحتوي على **الإلكترونات**

وهي الـتي تكون ذات الشـحنة السـالبة. تكون الذرة وبشـكل تـام متعادلة كهربائيـا، فقـد بـدا واضحـا أنه يجب أن تحتـوي أيضا على شيء من الشـحنة الإيجابية لتحقيق التوازن بين الشـحنة السالبة للإلكترونات. وهكذا، أظهرت المحـاولات المبكرة لتصوير الذرة، على غرار نظامنا الشـمسي، فهي تحتوي على الإلكترونات السالبة الشحنة التي تدور حول مجموعة مركزية من الجسيمات، وهي النواة المشحونة إيجابيا الشكل (1-4).



الشكل (1-4) ذرة مسطحة. الرسم القياسي للبنية الذرية ثنائية الأبعاد.

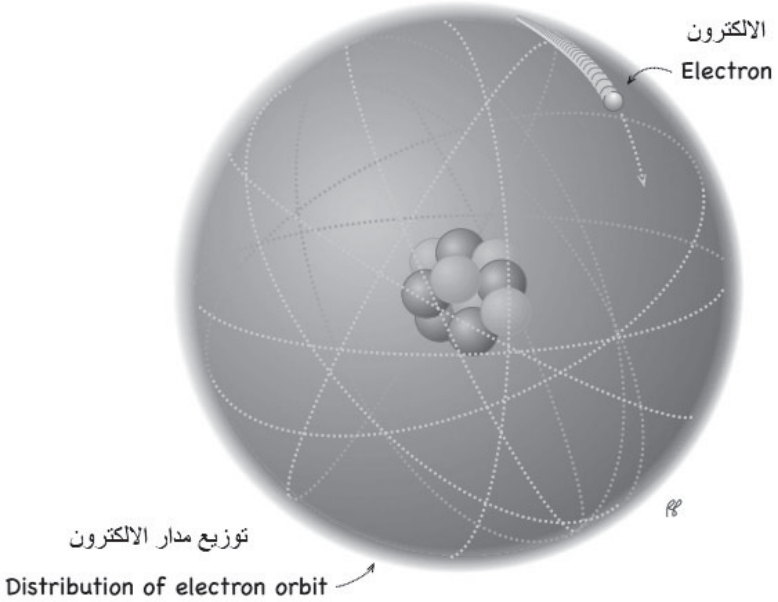
الإلكترونات Electrons

في نموذجنـا الشـمسي البسـيط لـلذرة، ينظـر إلى الإلكترونـات على أنهـا تـدور حول النواة بسرعة عالية. ولديها شـحنة سـالبة ويتم رسـمها حول النواة الموجبة الشـحنة. الشـحنات الكهربائية للذرة «متوازنة»، أي أن المجموع الكلي للشـحنات السالبة للإلكترونات يساوي الشـحنات الموجبة للنواة. كما سنرى بطريقة أخرى أن عدد الإلكترونات المدارية يساوي عدد البروتونات النووية. على الرغم من ان كل الإلكترونات المدارية ذات سرعة عالية، ألا انه لا يزال في مـداره لأن القـوة الكهربائية توجهه نحو النواة الموجبة الشـحنة. هذا التجاذب يحافـظ على الإلكترون المتحرك في مداره بنفـس الطريقة التي تتحرك بها كرة مربوطة بسلسلة وتلف بسرعة حول رأسك.

قشرة الإلكترون Electron Shells

بإضافة بعد ثالث إلى نموذجنا للذرة، يمكننا أن نصف مدارات الإلكترون كأسطح كرة (تسمى القشرة) لاقتراح على انه على عكس الكواكب التي تدور حول الشمس، فإن الإلكترونات لا تكون محصورة في مدار دائري معتمد على مستوى واحد ولكن يمكن توزيعها على نطاق أوسع (الشكل 1-5). على الرغم من أنه من المناسب لنا أن نتحدث عن مسافات وأقطار القشرة، والمسافة على النطاق الذري ليس لها نفس المعنى تماما كما يكون مع الأشياء اليومية. الخاصية الأكثر أهمية للقشرة هي الطاقة التي تحددها.

كلما كان الإلكترون أقرب إلى النواة، كلما كان ممسوكا أكثر بأحكام من خلال الشحنة الموجبة للنواة. بهذا، نحن نقصد أن المزيد من الشغل (الطاقة) مطلوب لإزالة قشرة الالكترون- الداخلية من واحد اخر خارجي. وتسمى الطاقة التي يجب وضعها في الذرة لفصل الإلكترون بطاقة ربط الإلكترون. وعادة ما يتم التعبير عنها بإلكترون فولت (eV). وتتراوح طاقة ربط الإلكترون بين بضعة آلاف من الالكترون فولت (keV) لقشرة الالكترونات -الداخلية الى عدد قليل فقط من eV وذلك بالنسبة للإلكترونات الخارجية ذات الأقل ارتباطا.



الشكل (1-5) غلاف الإلكترون هو تمثيل لمستوى الطاقة المرتبط بالإلكترون الذري.

الإليكترون فولت Electron Volt

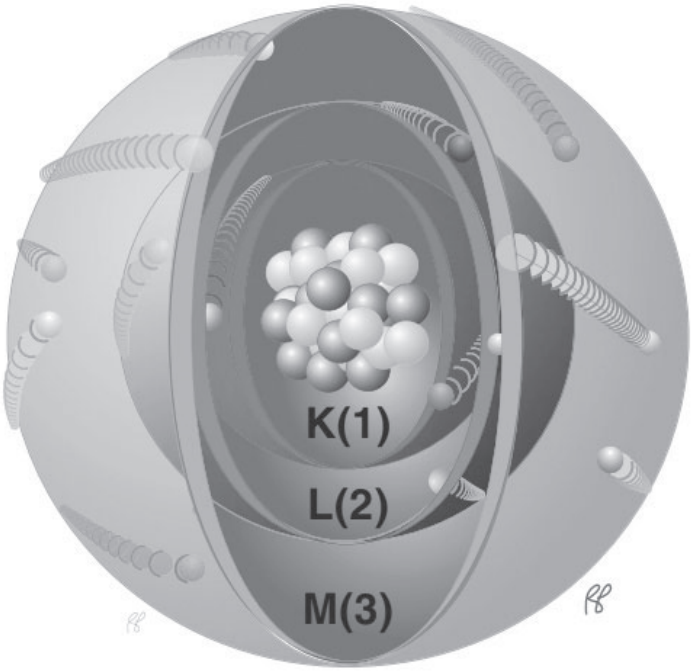
إلكترون فولت هو وحدة خاصة محددة كطاقة مطلوبة لنقل إلكترون واحد مقابل فرق جهد فولت واحد. إنها وحدة صغيرة على المقياس اليومي، حيث تساوي 1.6×10^{-19} جول (J)، ولكنها وحدة مناسبة للغاية على المستوى الذري. جول واحد هو وحدة قياس الشغل او الطاقة بالوحدات العالمية (SI) من الشغل أو الطاقة. للمقارنة، 1 J يساوي 0.24 سعرة حرارية صغيرة (بدلا من سعره حرارية kcal التي تستخدم لقياس تناول الطعام).

اعداد الكم Quantum Numbers

عادة ما توصف الإلكترونات الذرية في قشرتها بأعدادها الكمية، والتي يوجد منها أربعة أنواع. الأول هو العدد الكمي الاساسي (n)، الذي يحدد طاقة القشرة. تم وصف أول ثلاثة قشور (K، L و M) كما في الشكل (1-6). طاقة ربط الإلكترون بشكل أكبر بالنسبة للقشرة الأعمق (K) وهي أقل تدريجيا للقشرة الخارجية. والذرات الكبيرة لديها قشر أكثر.

تشير الأرقام الكمية الثانية (السمتية) والثالثة (المغناطيسية) والرابعة (الدورانية) إلى الخواص الفيزيائية الأخرى للإلكترون. يحتوي كل إلكترون داخل الذرة على تركيبة فريدة من الأرقام الكمية الأربعة.

الحد الأقصى لعدد الإلكترونات المرتبطة بكل غلاف طاقة هو $2n^2$ ، حيث n هو رقم الغلاف. يمكن أن يحتوي الغلاف الاول (القشرة K) على إلكترونين كحد أقصى، بينما يمكن أن تحتوي القشرة الثانية (القشرة L) على ثمانية إلكترونات بحد أقصى، بينما يمكن أن يحتوي الغلاف الثالث (الغلاف M) على 18 إلكترونًا بحد أقصى ، وهكذا بشكل مستمر.



الشكل 1-6 قشور الالكترون K، L **و** M.

تمثيل توزيع الإلكترون Representation of electron distribution

معظم الرسوم البيانية (على سبيل المثال الشكل 1-6) في هذا الفصل تعكس ما يشار إليه باسم نموذج بور للذرة، وعلى هذا النحو، فإن جميع الإلكترونات الموجودة داخل كل قشرة موصوفة على أنها تتحرك على طول سطح الكرة، وتمثل كل قشرة مثل الكرة مع مسافة شعاعية من نواة مركزية. يزداد نصف قطر قشر الكرة مع العدد الكمي الرئيسي. يتم استخدام هذا النموذج من الذرة بشكل متكرر لأغراض التدريس لأن المسافة الشعاعية للإلكترون من النواة تُستخدم لتصوير مدى ارتباطها بالذرة بإحكام - أقرب الإلكترونات هي الأكثر ارتباطًا بإحكام.

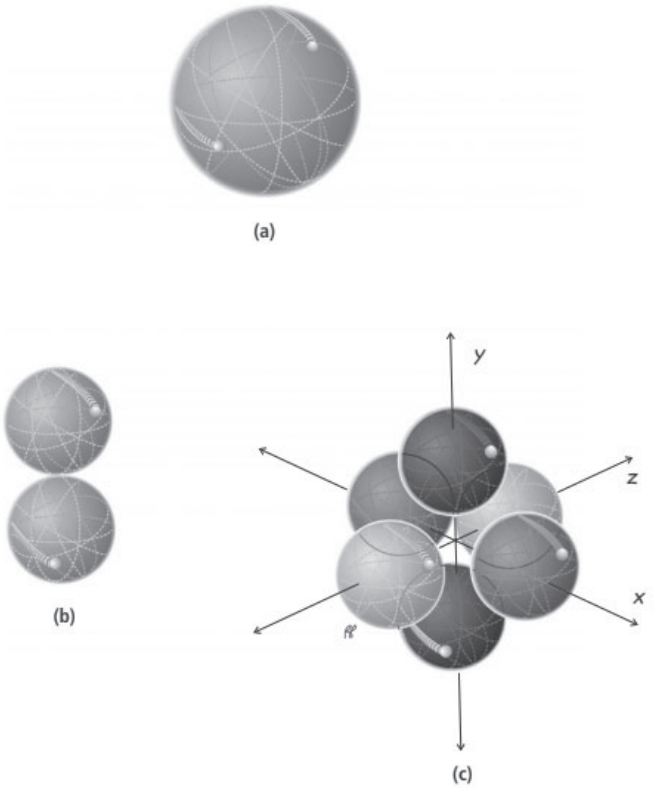
يستخدم الوصف الميكانيكي الكمومي الأكثر دقة لتوزيع الإلكترون على سلسلة من المدارات. المدارات هي دوال رياضية تصف احتمالية تواجد إلكترون في منطقة فضاء بالقرب من النواة. لكل رقم كم رئيسي (لكل قشرة)،

هنـاك مـدارات كروية، يرمز إليـه بعدد الكم الرئيسي متبـوعًا بالحرف "s". يحتوي هذا المدار على إلكترونين كما في الشكل (1-7 a). هذا هو المدار الوحيد للقشرة K، والذي يحتوي على إلكترونين كحد أقصى، وهذا المدار يسـمى المدار 1s. ذرة طبيعية مع قشرة K كاملة هي ذرة الهيليوم.

القشرة التالية، هي قشرة L، لديها قشرة ثانوية كروية s وقشرة ثانية (وتدعى القشرة 2p). والقشرة الثانوية 2s في القشرة L هي مشابه للقشرة الثانوية s من القشرة K ويمكن أن تستوعب اثنين من الإلكترونات كما في (الشكل 1-7a). أما القشرة الثانوية 2p فتتضمن ثلاثة أرقام كمية مغناطيسية محتملة (- 1، 0، و1) أو قشرة ثانوية، ولكل من هذه الأرقام الكمية يوجد عددان كميان برميان، والذي يسـمح بشكل اجمالي ستة إلكترونات. لكل قشر ثانوية 2p كما هو موضح في الشـكل (1-7 b) اثنين من الكرات المتجاورة على شـكل حرف ثمانية. يظهر الشـكل (1-7 c) ترتيب لجميع القشر الفرعية الثلاثة بثلاثة ابعاد متعامدة هي $2p_y$ ،$2p_x$ و $2p_z$ لـكل قـشرة ثانويـة الكترونين. يمكن للقشرة L اسـتيعاب ما مجموعه ثمانية الكترونات. والذرة الطبيعية التي تحتوي على جميع الإلكترونات العـشرة في القـشرة K(n=1) و L(n-2) هي النيون. بالنسـبة للمـدارات العليا ذات الترتيب الأعلى، مع n> 2 ، تصبح الأجزاء المدارية المرتبطة بأعداد الكم السمتية أكثر تعقيدًا في البنية ولن يتم مناقشتها هنا.

اعداد الكم Quantum Numbers

يعـني مصطلح الكم حرفيا، الكمية. وقد اكتسـبت أهمية خاصة في الفيزياء عندما نظـر بـور وآخـرون إلى أن الكميـات الفيزيائيـة مثـل الطاقـة والضـوء لا يمكن أن يكـون لها مجموعـة من القيم المسـتمرة، بل يمكن أن يكون لهـا فقط قيم منفـa صلـة كخطـوات. والخطـوات الفردية صغيرة جـدا لدرجة أن وجودها لـم يلاحظ من قبل الفيزيائيين حتى فرضها بور في شرح نظريته للذرة. نحن الآن نشـير إلى نظرية بور كنظرية الكم والتفسـيرات الناتجة عن الحركة على المستوى الذري كميكانيكا الكم لتمييزها عن الميكانيكا الكلاسـيكية التي وصفها إسـحاق نيوتـن، والتي لا تزال هناك حاجة لهندستها يوميا.



الشكل (1-7) مدارات الإلكترون والمدارات الفرعية. (a) **المدار** s؛ (b) **المدار الفرعي** p؛ (c) **المدارات الفرعية** p_z ، p_x، p_y.

ترتيب الالكترون المستقر Stable Electron Configuration

كمـا أنه تحتاج للطاقة لإزالـة الإلكترون من ذرة، فإنه يحتاج الطاقة لنقل الإلكـترون من القشرة الداخلية إلى القـشرة الخارجية، والتي يمكـن أيضا أن ينظر إليها على أنها الطاقة اللازمة لسحب الإلكترون السالب بعيدا عن النواة موجبة الشحنة. أي فجوة في القشرة الداخلية يخلق حالة غير مستقرة غالبا ما يشار إليها بالحالة المتهيجة.

الشـحنات الكهربائيـة لـلذرة متوازنـة، أي أن مجموع الشـحنة السـالبة للإلكترونات يساوي مجموع الشحنة الموجبة للنواة. هذا هو مجرد وسيلة أخرى للإشـارة إلى أن عدد الإلكترونات المدارية يسـاوي عـدد البروتونات النووية.

وعـلاوة على ذلـك، يجب على الإلكترونـات أن تملء القشرة بـأعلى طاقة ربط أولا. على الأقـل في العنـاصر ذات العـدد الذري المنخفـض، الإلكترونـات في القشرة الداخلية لديها أعلى طاقة ربط.

إذا كان ترتيـب الإلكترونـات في القشرة ليسـت في حالة مسـتقرة، فإنها تخضـع لإعادة ترتيـب من أجل أن تصبح مسـتقرة، وهي عملية غالبا ما يشـار لها بإزالة الاثارة. لأن التشـكيل المسـتقر للقشرة يكـون دائما أقل طاقة من أي تشـكيل غير مسـتقر، فإن إزالة الإثارة تحرر الطاقة كالفوتونات، وغالبا ما تكون أشعة سينية.

النواة Nucleus

هي تشـبه الذرة نفسـها، النـواة الذريـة لديهـا أيضـا بنيـة داخليـة كما في الشـكل (1-8). وأظهرت التجارب أن النواة تتكون من نوعين من الجسـيمات: البروتونات، التي تحمل شـحنة موجبة، والنيوترونات، التي لا تحمل أي شحنة. المصطلـح العام للبروتونات والنيوترونات هـو النيوكليونات. النوكليونات، كما هـو مبـين في الجـدول (1-1)، لديها كتلة أكـبر بكثير مـن الإلكترونات. مثل الإلكترونات، النيوكليونات لها خصائص كمية بما في ذلك البرم. النواة لها قيمة للبرم تساوي مجموع قيم البرم للنوكليون.

نموذج بسـيط ولكنه مفيد للنواة وهو عبارة عن مجموعة مترابطة بإحكام مـن البروتونات والنيوترونـات. البروتونات بطبيعة الحـال ينافر بعضهم بعضا لأنها مشـحونة إيجابيا. ومع ذلك، هناك قوة ربط قوية تسمى القوة النووية التي تحمل النوكليونات معا بشكل محكم جدا كما في الشكل (1-9).

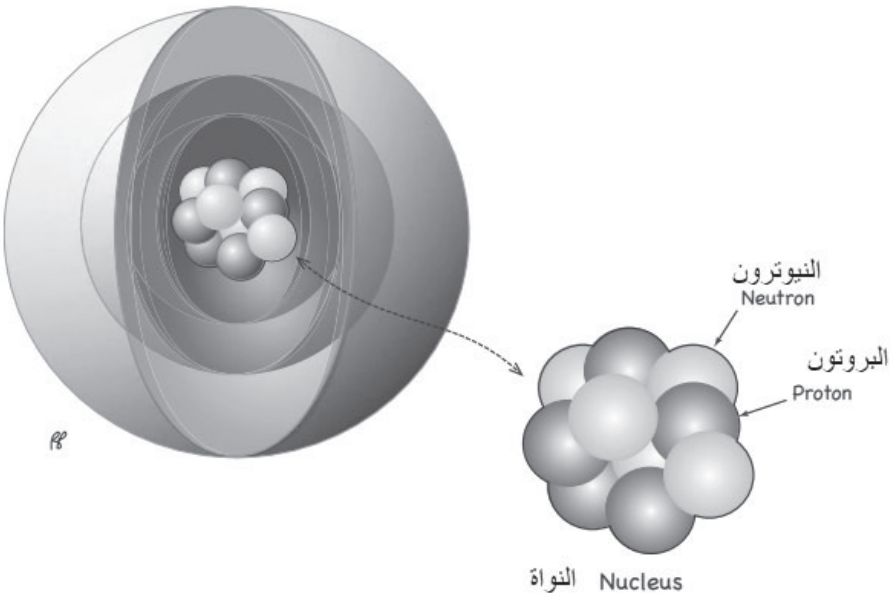
الشـغل (الطاقـة) المطلوبة للتغلـب على القوة النوويـة، والعمل على إزالة نوكليون من النواة، يسمى طاقة الربط نووية. وتتراوح طاقات الربط النموذجية بـين 6 و9 ملايـين إلكترون فولت (MeV) (ما يقـرب من ألف إلى مليون مرة مـن قوة ربط الإلكترون). ترتبط قيمة طاقة الربط بحقيقة أخرى وهي: الكتلة

المقاسة للنواة هي دائما أقل من الكتلة المتوقعة من مجموع كتل نيوتروناتها وبروتوناتها. وتسمى الكتلة «المفقودة» بالكتلة المختزلة، وهذه الطاقة تعادل او تساوي طاقة الربط النووية. وقد خلد هذا التبادل للكتلة والطاقة في معادلة أينشتاين:

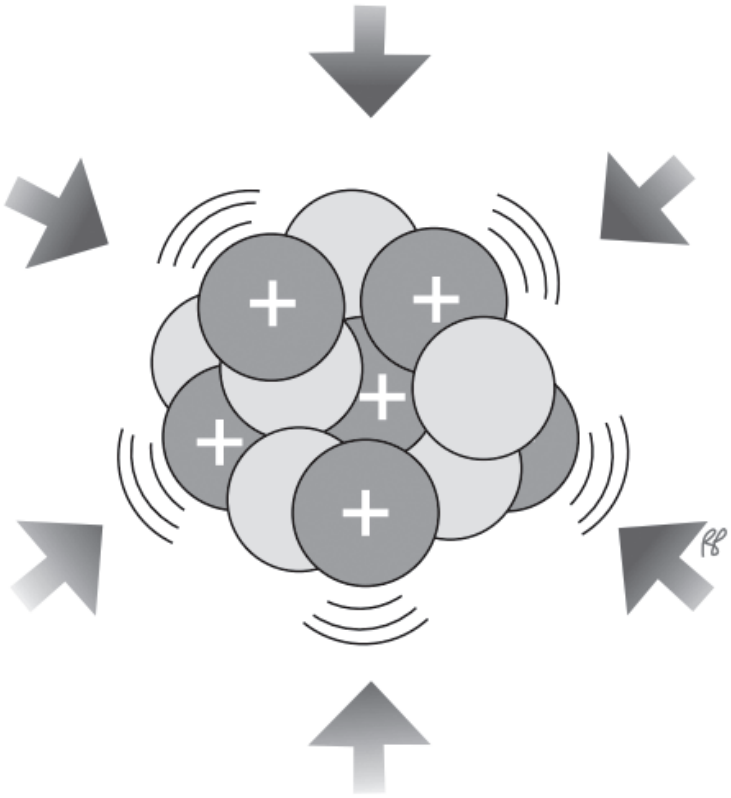
$$E = mc^2.$$

جدول 1-1 الأعداد الكمية وقيمها

العدد الكمي	الرموز المناظرة	المدى للقيم
الرئيسي (n)	K,L,M,.....	1,2,3,.....
السمتي (ℓ)	s, p, d, f, g, ...	0,1,2, 3, ... (n – 1)
المغناطيسي ($m\ell$)	لا يوجد	$-\ell,-(\ell-1),...0,$ ... $(\ell-1), \ell$
البرم (ms)	اسفل، اعلى	-1/2, +1/2



الشكل (1-8) نواة الذرة المتركبة من بروتونات ونيوترونات



الشكل (1-9) قوة الربط النووية قوية بما فيه الكفاية للتغلب على التنافر الكهربائي بين البروتونات ذات الشحنة الموجبة

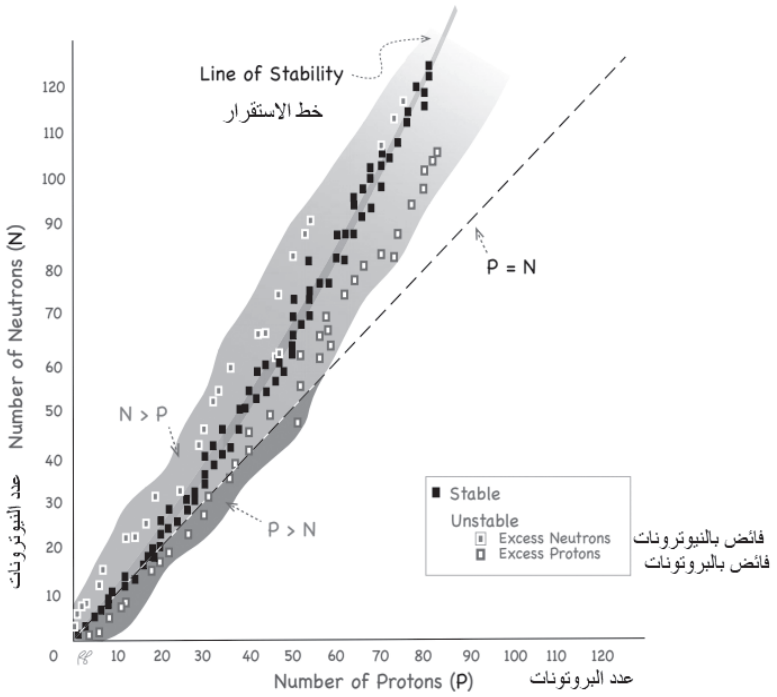
النواة المستقرة The Stable Nucleus

ليسـت كل العناصر لديها نوى مسـتقرة. غالبا موجـودة في معظم العناصر الخفيفة والمتوسـطة الوزن، تلك التي تحتوي على أعداد ذرية تصل إلى البزموت (Z = 83). والاسـتثناءات هي التنيتيـوم (Z = 43) والبرومثيـوم (Z = 61). كل العناصر التي لديها أعداد ذرية أعلى من 83، مثل الراديوم (Z = 88) واليورانيوم (Z = 92)، هي غير مستقرة بطبيعتها بسبب كبر حجمها. بالنسبة لتلك النوى في الحالـة المسـتقرة فهنـاك النسـبة المثالية مـن النيوترونـات الى البروتونات. بالنسـبة للعناصر الأخف وزنا فتكون هذه النسـبة حوالي 1:1؛ بزيادة الأوزان الذرية، يصبح عدد النيوترونات يتجاوز عدد البروتونات. تسـمى الخريطة التي

تصور عـدد النيوترونـات كدالة لعـدد البروتونات بخط الاسـتقرار، يصورها كنطاق ابيض واسع في الشكل (1-10).

الاستقرارية Stability

بالمعـنى الدقيق للكلمة، الاسـتقرار هو مصطلح نسـبي. نحن ندعـو إلى ثبات النيوكليد عندما يكـون نصف عمره طويلًا بحيث لا يمكـن قياسـه عمليًا - على سـبيل المثال، أكبر من 108 عامًا. على سـبيل المثال، يعتبر نظير البوتاسـيوم K40، الذي يشـكل حوالي 1 ٪ من البوتاسـيوم الموجود في الطبيعة، مسـتقرًا ولكـن لديه بالفعل نصف عمر يبلغ 10^9 أعوام.



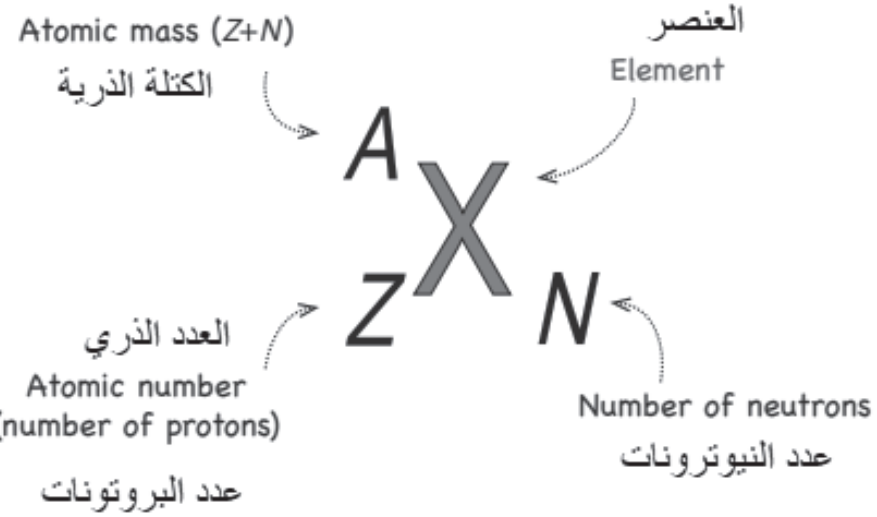
الشكل (1-10) تجمع النيوترونات والبروتونات التي يمكن أن تتواجد في تكوين نووي مستقر وهي داخل المناطق المظللة باللون الرمادي.

النظائر، إيزوتونات، و إيزوبارات Isotopes، Isotones، and Isobars

النظـير: هـو كل ذرة من أي عنصر لها نفـس عدد البروتونـات (نفس Z: العـدد الذري) في نواتهـا. الرصـاص الذي يوجـد في أي مكان في العالم سـوف

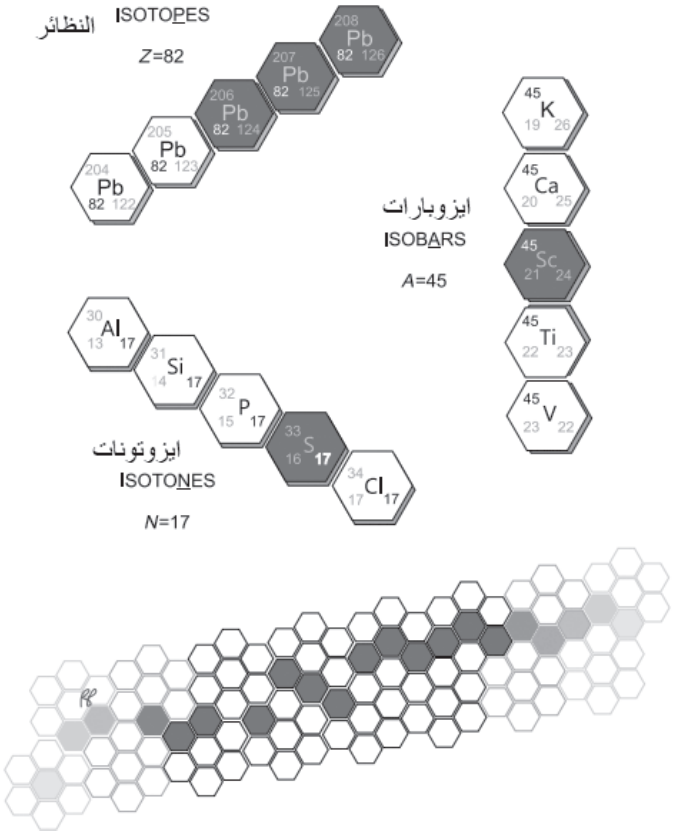
تتكـون ذراتـه دائما مـن 82 بروتون. غير أن نفس الـشيء لا ينطبق على عدد النيوترونات في النواة.

والنظـير لعنـصر هـو نتيجة لاختـلاف في التركيـب النـووي لذرات ذلك العنصر. عدد البروتونات (Z: العدد الذري) لم تتغير، ولكـن عدد النيوترونات (N) يختلف. وبما أن عدد النيوترونات يتغير، فإن العدد الإجمالي للنيوترونات والبروتونـات (A: الكتلـة الذريـة) يتغير. الرمز الكيميـائي لكل عنصر يتضمن هذه الرموز الثلاثة كما في الشكل (11-1).



الشكل (1-11) الرمز الذري القياسي

هنـــاك كيـانـان مرتبـطـان همـا الايزوتونـــات والايزوبـارات. تمثـل الإيزوتونـات ذرات لعنـاصر مختلفـة تحتـوي على أعـداد متطابقـة مـن النيوترونـات ولكـن بأعداد مختلفـة من البروتونات. الايزوبارات هي ذرات عنـاصر مختلفة مـع أعداد متطابقة من النكليونـات. أمثلة على ذلك موضحة في الشـكل (1-12).



الشكل (1-12) تسمى النويدات التي لها نفس العدد الذري ولكن الكتلة الذرية لها مختلفة بالنظائر، وتسمى هذه النظائر ذات العدد المتساوي من النيوترونات أيزوتونات، وتسمى تلك التي لها نفس الكتلة الذرية ولكن العدد الذري المختلف باسم ايزوبارات. التشوهات النووية المستقرة مظللة باللون الرمادي، وتكون التشوهات المشعة بيضاء. (مقتبس من Brucer, M., Trilinear Chart of the Nuclides, Mallinckrodt Inc., 1979.)

النشاط الإشعاعي Radioactivity

النواة غير المستقرة والانحلال الإشعاعي
The Unstable Nucleus and Radioactive Decay

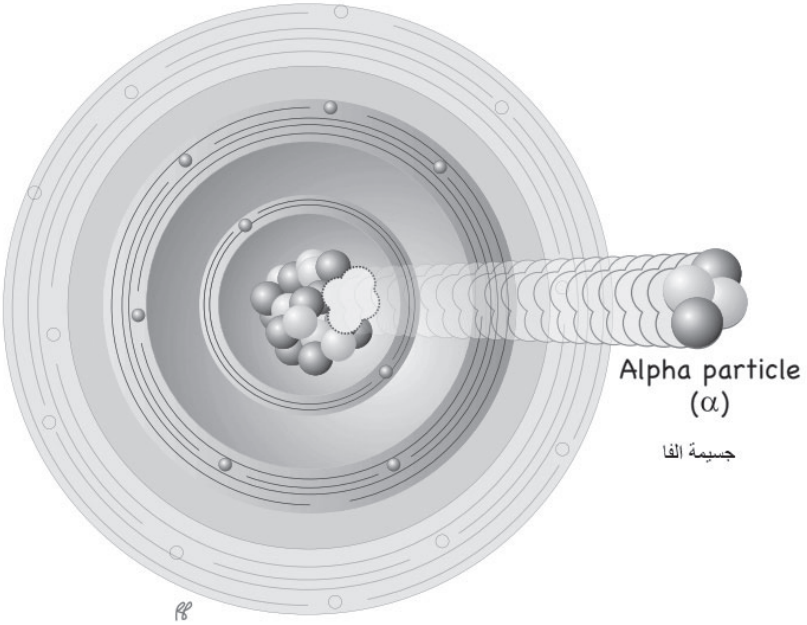
النواة التي ليست في حالتها المستقرة سوف تضبط نفسها حتى تكون مستقرة إما عن طريق إخراج أجزاء من نواتها أو عن طريق انبعاث الطاقة على

شـكل فوتونات (أشـعة كاما). يشـار إلى هذه العملية باسم الانحلال الإشعاعي. ويعتمد نوع الانحلال على القواعد التالية التي تكسر الاستقرار النووي.

الكتلة النووية المفرطة Excessive Nuclear Mass

انحلال ألفا Alpha Decay

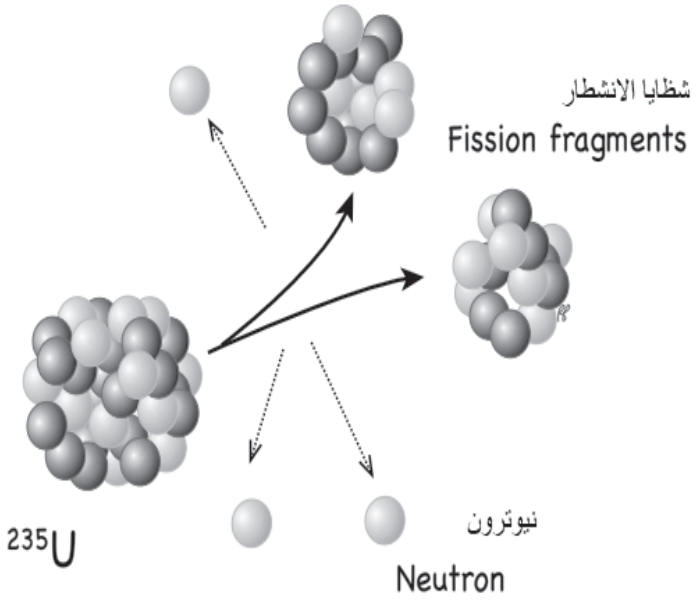
الذرات غير المستقرة والكبيرة جدا، هي الذرات ذات الكتلة الذرية العالية، وقد تنقسم إلى شظايا نووية. ان أصغر جزء نووي مستقر ينبعث هو الجسيمات المتكونـة من اثنـين نيوترونات واثنـين من البروتونـات، أي ما يعـادل نواة ذرة الهيليوم. ولأنه كان من أوائل أنواع الإشعاع المكتشفة، فإن انبعاث نواة الهيليوم يسمى إشعاع ألفا، وتسمى نواة الهيليوم المنبعثة جسيم ألفا كما في الشكل (1-13).



الشكل (1-13) انحلال الفا

الانشطار Fission

في بعـض الظروف، قد تنقسـم نواة الذرة غير المسـتقرة إلى شـظايا كبيرة، وهي عملية يشـار إليها عادة باسم الانشـطار النووي. وخلال الانشطار ينبعث نيوترونين أو ثلاثة وكذلك تنبعث الحرارة كما في الشكل (1-14).



الشكل (1-14) **الانشطار لنواة** U^{532}.

نسبة النيوترون- البروتون غير المستقرة

Unstable Neutron–Proton Ratio

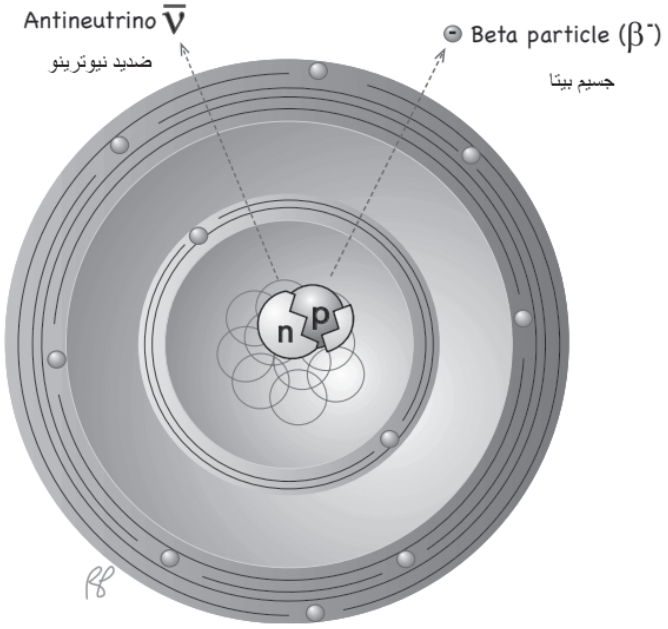
عدد كبير جدا من النيوترونات: انحلال بيتا

Too Many Neutrons: Beta Decay

النوى التي تحتوي على نيوترونات زائدة يمكنها تحقيق الاستقرار من خلال عملية تحويل النيوترون إلى بروتون وإلكترون. يبقى البروتون في النواة، ولكن ينبعث الإلكترون. وهذا ما يسمى بإشعاع بيتا، ويسمى الإلكترون نفسه جسيم بيتا كما في الشكل (1-15). وقد أعطيت هذه العملية والإلكترون المنبعث هذه الأسماء على النقيض من جسيم ألفا قبل اكتشاف الطبيعة الفيزيائية لأي منهما. وسيصبح جسيم بيتا المتولد في هذا الانحلال إلكترون حرا إلى أن يجد فراغا في قشرة الإلكترون في نفس الذرة أو في ذرة أخرى.

اقترح الفيزيائيين دراسة متأنية عن انحلال بيتا وأن تحويل النيوترون إلى البروتون يشارك أكثر في انبعاث جسيمات بيتا (الكترون). وقد أعطى

انبعاث بيتا قاعدة للحفاظ على الشـحنة في حين أن النيوترون المتعادل يعطي بروتون موجب واحد وإلكترون سـالب واحد؛ بيد أنه لا يظهر تحقيق لقاعدة مهمة وهي حفظ الطاقة. وأظهرت القياسـات أن معظـم الإلكترونات المنبعثة لم يكـن لديها كل الطاقة المتوقعة. ولشرح هذا التناقض الظاهري، تم افتراض انبعاث جسـيم ثان وتم التعرف على الجسـيمات في وقت لاحق تجريبيا. يسمى ضديـد النيوتريـنـو (النيوترينو هو جسـيم صغير ومتعادل)، إنـه يحمل الطاقة «المفقودة» من التفاعل.



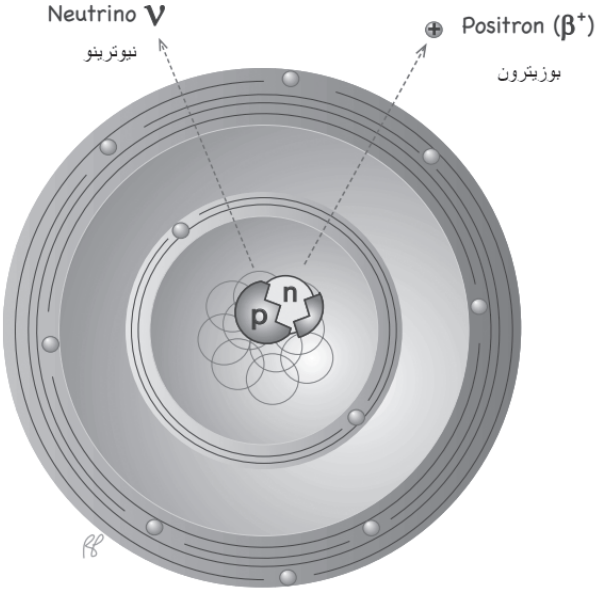
الشكل (1-15) انحلال النيكاترون β^-

الكثير من البروتونات: انحلال البوزترون واقتناص الإلكترون

Too Many Protons: Positron Decay and Electron Capture

بطريقـة مماثلة للنيوترونات الزائدة، يمكـن أن تتعرض نواة غير مسـتقرة تحتـوي على بروتونـات كثيرة جدا إلى انحلال يكـون له تأثير لتحويل بروتون إلى نيوتـرون. وهناك طريقتان يمكـن أن يحدث فيهما هذا: انحلال البوزترون واقتناص الإلكترون.

انحلال البوزتـرون (Positron decay): يمكـن تحويـل البروتون إلى النيوتـرون والبوزترون، وهو الإلكترون مع شـحنة موجبة، بدلا من السـالبة، الشكل (1-16). ويشار إلى البوزترون أيضا على أنه جسيم بيتا موجب أو إلكترون موجـب أو مضاد للإلكـترون. في انحلال البوزترون، ينبعـث النيوترينو أيضا. في العديـد من الطـرق، انحلال البوزتـرون هو مرآة لانحلال بيتـا: الإلكترون الموجب بدلا من الإلكترون السالب، والنيوترينو بدلا من ضديد نيوترينو. على عكس الإلكترون السـالب، البوزترون يبقى نفسه لمدة قصيرة. ويواجه بسرعة إلالكـترون (والإلكترونات وفيرة في المادة)، وكلاهما يباد (انظر الشـكل 1-8في الفصل الثامن)، وهذا هو السبب في أنه يعتبر مضاد للإلكترون.



الشكل (1-16) β^+ **انحلال (بوزترون).**

وبصفة عامة، تتفاعل الجسيمات المضادة مع الجسيمات المقابلة لها لإبادة كل منهما.

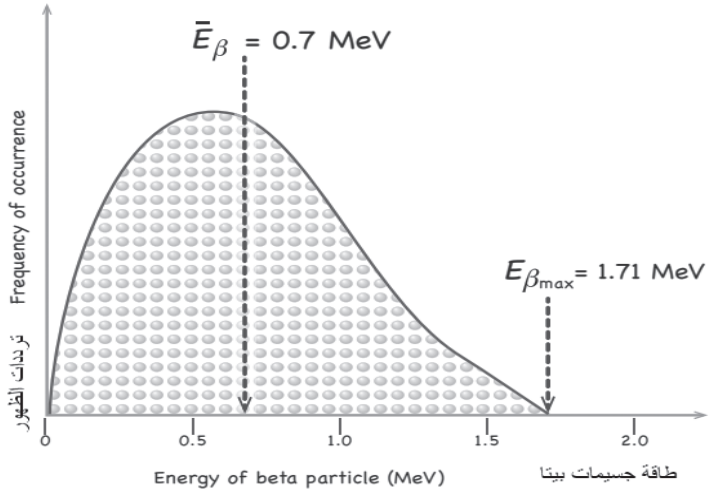
خلال تفاعل الفناء، يتم تحويل كتلة مشتركة من البوزترون والإلكترون إلى فوتونـين من الطاقة وما يعادل كتلة مدمـرة. ما لم يكن الفرق بين كتل ذرات الأم وابنتها مساويا على الأقل لكتلة إلكترون واحد زائد بوزترون واحد، أي ما يعادل 1.02 MeV، وستكون هناك طاقة غير كافية متاحة للانبعاث البوزتروني.

الطاقة من جسيمات بيتا والبوزيترونات

ENERGY OF BETA PARTICLES AND POSITRONS

على الرغم من أن الطاقة الكلية المنبعثة من الذرة خلال انحلال بيتا أو انبعاث البوزيترون ثابتة، فإن التوزيع النسبي لهذه الطاقة بين جزيئات بيتا وضديد النيوترينو (أو بوزيترون ونيوترينو) متغيرة. على سبيل المثال، فإن الكمية الإجمالية للطاقة المتاحة التي تصدر خلال نحلال بيتا من ذرة الفسفور 32 هي 1.7 MeV. فيمكن توزيع هذه الطاقة على 0.5 MeV لجسيمات بيتا و 1.2MeV إلى ضديد نيوترينو، أو 1.5 MeV لجسيمات بيتا و0.2 MeV إلى ضديد نيوترينو، أو 1.7 MeV إلى جسيمات بيتا ولا طاقة لضديد نيوترينو، وهلم جرا. في أي مجموعة من الذرات احتمال حدوث كل من هذه المجموعات هي ليست متساوية. فمن غير المألوف جدا، على سبيل المثال، ممكن ان تحمل كل من الطاقة من قبل جسيمات بيتا. ومن الشائع أن يحصل الجسيم على أقل من نصف الكمية الكلية للطاقة المنبعثة. ويتضح ذلك من الشكل 1-19، كتجمع من عدد من جزيئات بيتا المنبعثة في كل الطاقة من الصفر إلى الطاقة القصوى المنبعثة في الانحلال. $E_{\beta max}$ هي الطاقة القصوى الممكنة التي يمكن أن يحصل عليها جسيم بيتا أثناء اضمحلال بيتا من أي ذرة، و $\bar{E}_\beta$ و معدل طاقة جميع جسيمات بيتا من أجل انحلال مجموعة من هذه الذرات. ويبلغ معدل الطاقة حوالي ثلث الطاقة القصوى:

$$\bar{E}_\beta = \frac{1}{3} E_{\beta \max}$$



الشكل (1-17) انبعاثات بيتا (لكل من β^- و β^+) الخارجة من النواة مع الطاقات بين الصفر والطاقة القصوى الممكنة لها ($E_{\beta max}$). ويساوي متوسط الطاقة ($\bar{E}_\beta$) وهو ما يقرب من ثلث الطاقة القصوى.

اقتناص الالكترون Electron capture

مـن خـلال عملية تتنافس مع انحلال البوزترون، فـان نواة ما يمكن أن تتحـد مع واحدة مـن الإلكترونـات المدارية الداخلية لتحـدث تأثير لتحويل واحـد مـن البروتونات في النـواة إلى النيوترون كما في الشـكل (1-18). ثم يقوم الإلكـترون الخارجي بملء الفراغ في القـشرة الداخلية التي خلفها الإلكترون الذي تـم اقتناصـه. وان الطاقة المنبعثة من "سـقوط" الإلكـترون من القشرة الخارجية إلى القشرة الداخلية ينبعث كأشعة سينية.

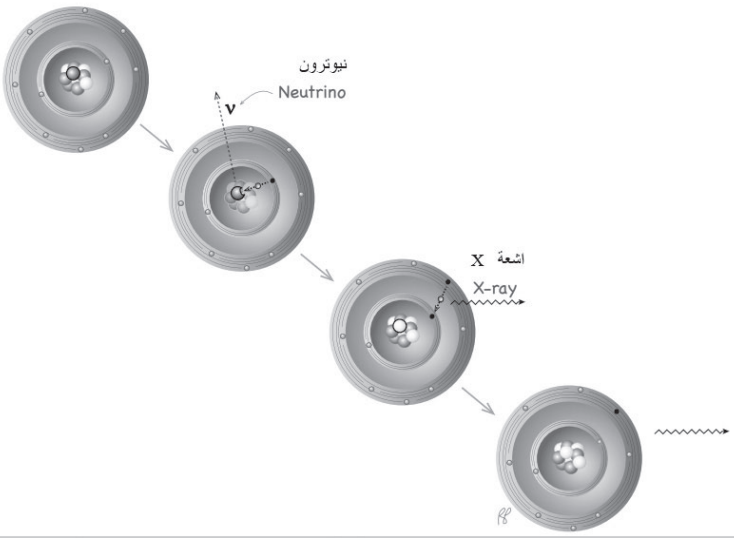
أرقام مناسبة من النويات، ولكن الكثير من الطاقة

Appropriate Numbers of Nucleons, but Too Much Energy

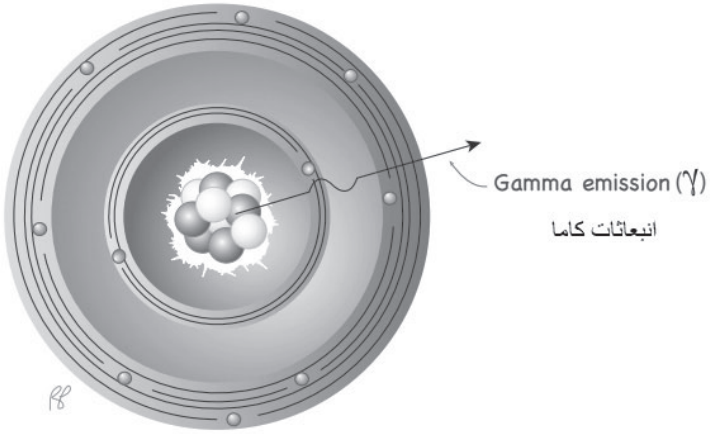
الانتقـال الأيزوميري (Isomeric transition): بعـد تحلل ألفا وبيتا والتقـاط الإلكترون، تحتوي النـواة على ترتيب فيزياوي من النكليونات، لكن عادة ما تحتوي على طاقة زائدة. يقال إن النواة في حالة من الإثارة عندما تكون طاقـة النـواة أكبر من مسـتوى الراحة. إذا كانت الحالة المثارة مسـتقرة بدرجة كافيـة (لها عمـر افتراضي أطول مـن 10-12 ثانية) فيُشـار إلى النيوكليدات على أنهـا أيزومير ويتـم التخلص من الطاقة الزائدة بواسـطة الانتقال الأيزوميري. قـد يحدث هذا من خـلال أي من أو اثنين من ردود الفعل المتنافسـة: انبعاث كامـا والتحول الداخلي. تحـدث معظم التحولات الأيزوميرية كاتحاد من هذين التفاعلين.

انبعاثات كاما Gamma Emission

وفي هذه العملية تنبعث الطاقة النووية الزائدة كأشـعة كاما كما في الشكل (1-19). أعطي اسـم كاما لهذا الإشـعاع، قبل أن يفهم طبيعتها الفيزيائية، لأنه كان النـوع الثالـث (ألفا، بيتا، كاما) من الإشـعاع المكتشـف. أشـعة كاما هي فوتـون (طاقة) تنبعث من نـواة متهيجة. على الرغم من اسـمها الفريد، فإنه لا يمكن تمييزها عن الفوتونات من نفس الطاقة من مصادر مختلفة، على سبيل المثال الأشعة السينية.



الشكل (1-18) **اقتناص الالكترون**

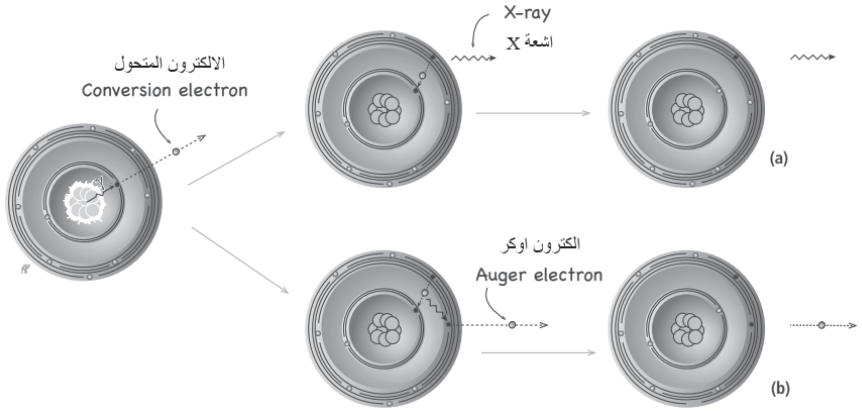


الشكل (1-19) **الانتقال الايزويمري. يتم حمل الطاقة النووية الزائدة باعتبارها أشعة كاما.**

التحول الداخلي Internal Conversion

النـواة المتهيجة يمكنها نقل الطاقة الزائـدة إلى الإلكترون المداري (عموما الى القـشرة الداخلية للإلكترون) مما تسـبب في قذف الإلكـترون وإخراجه من الذرة. ويمكن أن يحدث هذا فقط إذا كانت الطاقة الزائدة أكبر من طاقة الربط للإلكترون. ويسـمى هذا الإلكـترون بإلكترون التحول كما في الشـكل (1-20). يملأ الفـراغ المداري الداخلي بسرعة بإلكترون القـشرة الخارجية (حيث تتخذ الذرة حالة أكثر استقرارا، وتمتلئ المدارات الداخلية قبل المدارات الخارجية).

تنبعث الطاقة الناتجة عن «سقوط» الإلكترون من القشرة الخارجية إلى القشرة الداخلية كأشعة سينية كما في الشكل (1-20 a) أو الكترون حر (إلكترون اوكر) كما في الشكل (1-20 b). الجدول 1-2 يستعرض خصائص مختلف الجسيمات دون الذرية.



تحويل داخلي. كبديل لانبعاث كاما، يمكن أن يؤدي إلى انبعاث أشعة إكس (a) أو إلكترون أوكر (b).

جدول 1-2 خصائص الجسيمات دون الذرية

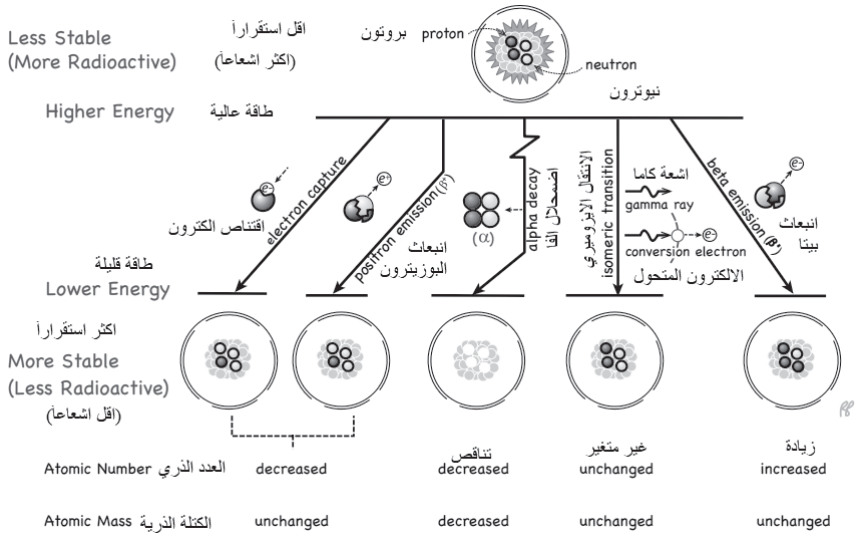
الاسم	الرمز	الكتلةa	الشحنة
النيوترون	n	1840	لاشيء
بروتون	p	1836	إيجابي (+)
الإلكترون	e^-	1	سلبي (-)
بيتا جسيم (بيتا ناقص الجسيمات، الإلكترون) b	β^-	1	سلبي(-)
بوزترون (بيتا جسيم موجب ، الكترون موجب)	β^+	1	إيجابي (-)
أشعة كاما (فوتون)	γ	لاشيء	لاشيء
أشعة سينية	X-ray	لاشيء	لاشيء
نيوترينو	ν	قريب من الصفر	لاشيء
ضديد الينترينو	$\bar{\nu}$	قريب من الصفر	لاشيء

a: نسبة إلى الإلكترون.
b: ليس هناك فرق مادي بين جسيمات بيتا والإلكترون. ويطبق مصطلح جسيمات بيتا على إلكترون الذي ينبعث من نواة مشعة. الرمز β دون علامة ناقص أو زائد المرفقة هو دائما يشير إلى الجسيمات بيتا ناقص أو الإلكترون.

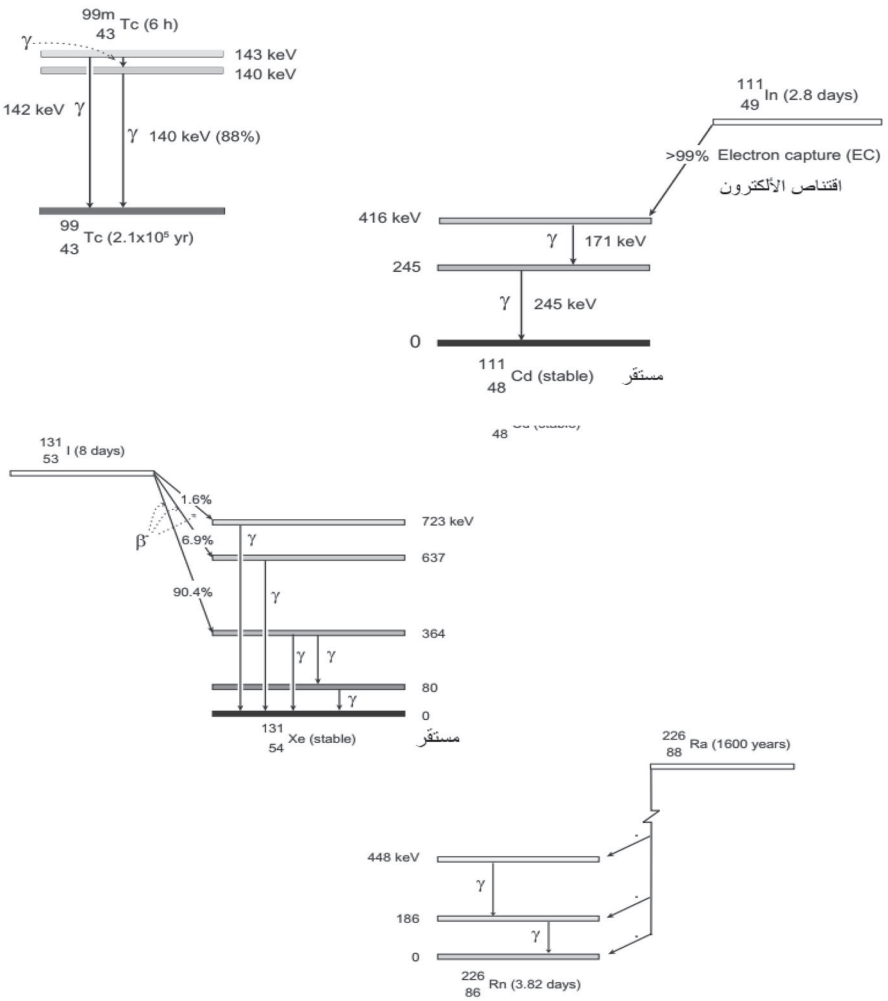
ترميز الانحلال Decay Notation

يمكـن أن يحدث انحلال نويه من حالة غير مسـتقرة (متهيجة) إلى حالة مستقرة (ثابته) في سلسلة من الخطوات، مع إنتاج الجسيمات والفوتونات المميزة لكل خطوة. ويسـتخدم الترمـيز القياسي لوصف هذه الخطوات كما في (الشـكل 1-21). المسـتوى العلوي من المخطط هو الحالة مـع أعظم طاقة. كما ان انحلال النويات يحدث عن طريق فقدان الطاقة و / أو الجسيمات، وانخفاض المستويات ألافقية يمثل حالات طاقة أقل نسبيا. واتجاه السهام من مستوى واحد إلى التالي تشير إلى نوع من الانحلال. وبالاتفاق، الخط المائل بزاوية إلى الأسفل وإلى اليسار يشـير إلى اقتناص الإلكترون. إلى الأسـفل، وإلى اليمين، انبعاثات بيتا. والسـهم العمـودي، فهي تمثل انتقال إيزوميري. يسـتخدم المنعطف لانبعاث البوزترون. ويلاحـظ أن المسـار ينتهي إلى اليسـار، كما هو الحال في اقتنـاص الإلكترون أو انبعـاث البوزترون، ويقابلـه تناقص في العدد الذري. ومـن ناحية أخرى، الخط الذي ينتهي إلى اليمين، كما في انبعاث بيتا، ويقابله الزيادة في العدد الذري.

ويصور الشكل (1-22) مخططات انحلال معينة بالنسبة إلى (للتكنيتيوم- Tc^{99m} ، الإنديوم – In^{111}، اليود – I^{131}، والراديوم- Ra^{226}) حيث يشير حرف (m) الى حالة اسـتقرار تكون على مراحل، والنواة متهيجة مع عمر (> 10^{-12} ثانية) قبل أن تمر بمرحلة انتقال إيزوميرية.



الشكل (1-21) مخططات الانحلال.



الشكل (1-22) مخططات الانحلال التي تبين التحولات الرئيسية للتكنيتيوم – Tc^{99m}، والإنديوم – In^{111}، واليود – I^{131}، والراديوم- Ra^{226}. يتم تقريب مستويات الطاقة إلى ثلاثة أرقام مهمة.

عمر النصف Half-Life

مـن غـير الممكـن التنبؤ بتحلل نويدة الذرة بشـكل منفـرد، تماما كما هو الحال في عد حبة واحدة من الفشار حيث لا يمكـن تحديد متى سيتم فتح أي نواة معينة من الذرة. ومع ذلك، فإن معدل سلوك عدد كبير من حبات الفشار

يمكـن التنبـؤ بها. ومـن الخبرة التي لدينا مـع وضع الفشـار في الميكروويف، فالواحد منا يعرف أن نصف حبات الفشـار سـوف تفتح في غضون 2 دقيقة، وسـوف يفتـح معظـم الموجود في الانـاء في غضـون 4 دقائق. وبطريقـة مماثلة، يمكن التنبؤ بسـلوك معدل العينة المشـعة التي تحتوي على مليارات الذرات. ويسـمى الوقت الذي يسـتغرقه نصف هذه الذرات إلى الانحلال (تنحل بما فيه الكفاية) بنصف العمر، أو في مصطلح علمي $T_{1/2}$ (وتلفظ "T نصف واحد").

ليس من المسـتغرب أن الوقت الذي يسـتغرقه نصف الذرات المتبقية إلى الانحلال هو أيضا $T_{1/2}$. وتستمر هذه العملية حتى يصبح عدد ذرات النويدات في نهايـة المطـاف قريبا جدا من الصفـر بحيث يمكننا اعتبـار العملية كاملة. يظهر في الشكل 1-23 العلاقة بين A(t)، وهو النشاط المتبقي، مع عمر النصف. هذا المنحنى يبين معدل سلوك عينة مشعة توصف بمعادلة الانحلال:

معادلة الانحلال (decay equation):

$$A(t) = A(0)e^{-o.693t/T1/2}$$

حيث A(0) هو العدد الأولي للذرات المشعة.

يسـتخدم النموذج البديل المستخدم بشكل موحد لمعادلة الانحلال وثابت الانحلال (λ)، الذي يقارب 0.693 مقسوما على عمر النصف ($T_{1/2}$):

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

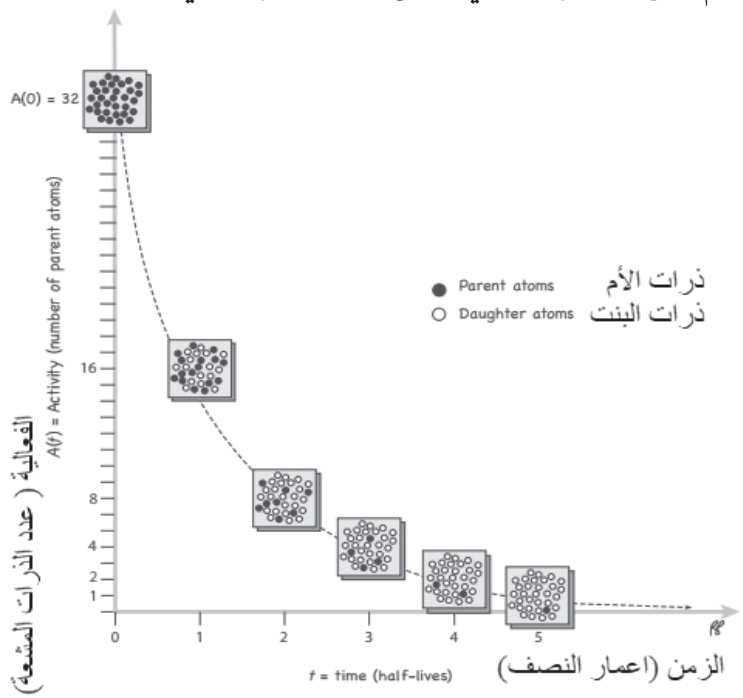
ويمكن إعادة كتابة معادلة الانحلال كما يلي

$$A(t) = A(0)e^{-\lambda t} \qquad (Eq.\ 1-4)$$

ويمكن التعبير عن مقدار نشاط أي نويدات مشعة على أنه عدد حالات الانحلال لكل وحدة زمنية. وان الوحدات المشـتركة لقياس النشـاط الإشعاعي هي كـوري *Ci* (بعد ماري كوري) أو الوحـدات الحديثة *SI*، وهي بيكريل *Bq* (وبعد رائد نووي آخر، هنري بيكيريل). ويتم تعريف البيكريل الواحد على أنه انحلال إشـعاعي واحد في الثانية. جرعات الطب النووي هي عموما مليون مرة

أكبر وأكثر سهولة بالتعبير عنها في ميكابيكريل (MBq). وواحد كوري (Ci) هو (3.7×10^{10} في الثانية) تم اختياره لأنه يساوي تقريبا النشاط الإشعاعي المنبعث من 1 غرام من الراديوم في التوازن مع النويدات الوليدة. وترد في الجدول 1-3 قائمة التحويلات.

مصطلح ذي صلة وهو غالبا ما يتم الخلط بينه وبين الانحلال وهو العد، الذي يشير إلى تسجيل انحلال واحد من قبل كاشف مثل عداد كايكر. ولا تكتشف معظم أجهزة الكشف المستخدمة في الطب النووي سوى جزء صغير من حالات الانحلال، ويرجع ذلك أساسا إلى أن الإشعاع الناجم عن العديد من الانحلالات يخرج بعيدا عن الكاشف. ويشير معدل العد إلى عدد حالات الانحلال التي يتم حسابها في وقت معين، وعادة ما يتم احتسابها في الدقيقة الواحدة. كل شيء يكون متساوي، فمعدل العد يكون متناسب مع معدل الانحلال، وأنه شائع الاستخدام، ولو انه غير دقيق في قياس النشاط الإشعاعي.



الشكل (1-23) منحنى الانحلال. لاحظ الاستبدال التدريجي للذرات المشعة بواسطة ذرات مستقرة كما هو موضح في المخطط في كل مربع.

الجدول 1-3 قيم التحويل لوحدات النشاط الإشعاعي				
واحد كوري (Ci)	واحد مليكوري (mCI)	واحد ميكروكوري (μCi)	واحد بيكريل Bq) a)	واحد ميغابكريل (MBq)
	$10^{-3}\ Ci$	$10^{-6}\ Ci$	$27 \times 10^{-12}\ Ci$	$27 \times 10^{-6}\ Ci$
$1 \times 10^{3}\ mCi$		$10^{-3}\ mCi$	$27 \times 10^{-9}\ mCi$	$27 \times 10^{-3}\ mCi$
$1 \times 10^{6}\ \mu Ci$	$1 \times 10^{3}\ \mu Ci$		$27 \times 10^{-6}\ \mu Ci$	$27\ \mu Ci$
$37 \times 10^{9}\ Bq$	$37 \times 10^{6}\ Bq$	$37 \times 10^{3}\ Bq$		$1 \times 10^{6}\ Bq$
$37 \times 10^{3}\ MBq$	$37\ MBq$	$37 \times 10^{-3}\ MBq$	$1 \times 10^{-6}\ MBq$	
(a) بيكريل واحد يساوي انحلال واحد في كل الثانية.				

الأسـئلة Questions

1 - يتم تحديد التفاعلات الكيميائية بين العناصر المختلفة بشكل أساسي عن طريق:

(أ) عدد البروتونات.

(ب) عدد النيوترونات.

(ج) عدد الإلكترونات في الغلاف الخارجي.

(د) عدد البروتونات ناقص عدد الإلكترونات.

2 - لكل من مصطلحات الخمسة أدناه، اختر أفضل تعريف:

(1) ايزوبار. (2) ايزوكلين.

(3) الايزومير. (4) ايزوتون.

(5) النظائر.

(أ) ذرات العنصر نفسه (يساوي Z) مع أعداد مختلفة من النيوترونات (N).

(ب) ذرات نفس العنصر (يساوي Z) بأعداد مختلفة من البروتونات.

(ج) ذرات العناصر المختلفة (مختلفة Z) مع أعداد متساوية من النيوترونات (N).

(د) ذرات العناصر المختلفة ذات الكتلة الذرية المتساوية (A).

3 - أي من العبارات التالية صحيحة؟

(أ) هناك نظير مستقر للتكنيتيوم.

(ب) الذرات ذات الأعداد الذرية $Z> 83$ غير مستقرة بطبيعتها.

(ج) بالنسبة للعناصر الخفيفة، يتحقق الاستقرار النووي بأعداد متساوية

من البروتونات والنيوترونات؛ بالنسبة للعناصر الأثقل، يتجاوز عدد النيوترونات عدد البروتونات.

4 - لكي يحدث التحول الداخلي، يجب أن تساوي الطاقة الزائدة للنواة المستثارة أو تتجاوز:

(أ) 0.551 فولت.

(ب) 1.102 فولت.

(ج) معامل التحول الداخلي.

(د) متوسط طاقة إلكترونات أوكر.

(هـ) طاقة الربط للإلكترون المنبعث.

5 – تحلل بيتا لذرة، فإن متوسط الطاقة لجزيئات بيتا المنبعثة هو تقريبا:

(أ) 0.551 فولت.

(ب) 0.551 أضعاف فقدان الكتلة الذرية.

(ج) نصف الطاقة الكلية المنبعثة للحدث الفردي.

(د) ثلث الطاقة القصوى لجزيئات بيتا المنبعثة.

(هـ) متوسط الطاقة لمضاد النيوترينو.

6 - تتلـقى جرعة مـن ^{99m}Tc قياس 370 MBq من الصيدلية في 10 صباحا. لا يصل المريض إلى القسـم حتى السـاعة 2 مسـاءً. ما مقدار النشـاط الذي يبقى، في mCi ؟ ($T_{1/2}$ من ^{99m}Tc هو 6 ساعات. الثابت e يساوي 2.718.).

7 - رتب طاقات الربط التالية من الأكبر إلى الأصغر:

(1) طاقة الربط الإلكتروني لإلكترونات الغلاف الخارجي.

(2) طاقة الربط النووي.

(3) طاقة الربط الإلكتروني للإلكترونات الداخلية للقشرة.

8 - صواب أو خطأ: يشير مصطلح "*metastable*" إلى حالة وسيطة من الانحلال النووي تدوم أكثر من 10^{-12} ثانية قبل أن تمر بمرحلة انتقالية ايزوميرية.

9 - أي مما يلي صحيح فيما يتعلق بتحلل بيتا لنظير مشع معين؟

(1) طاقة جسيم بيتا المنبعثة هي نفسها دائمًا.

(2) طاقة مضاد النيوترينو *antineutrino* المنبعثة هي نفسها دائما.
(3) الطاقة المجمعة لجسيمات بيتا المنبعثة ومضاد النيوترينو *antineutrino* هي نفسها دائما.

10 - أي وحدة قياس للنشاط الإشعاعي هي
يعرف بأنه انحلال إشعاعي واحد في الثانية؟
(1) بيكريل.
(2) مليكوري.
(3) ميكابيكريل.

11 - 10 mCi يساوي كم من MBq؟
(1) 2.7 ميغابايت.
(2) 37 ميغابايت.
(3) 270 ميغابايت.
(4) 370 ميغابايت.

12. تميل النيوكليدات الأخف ($Z < 83$) مع وجود فائض من النيوترونات إلى التحلل عن طريق
(1) انبعاثات كاما.
(2) انحلال بيتا السالب.
(3) الانتقال الايزوميري.
(4) انبعاث البوزترون.
(5) انبعاث ألفا.

13. أي من العبارات التالية صحيحة؟
(1) جسيم ألفا هو نفس نواة الهيليوم.
(2) النيوترونات لها نفس شحنة الإلكترون.
(3) الأشعة السينية لها طاقات أقل دائمًا من أشعة كاما.
(4) المصطلحان "نشاط" و "معدل العد" هما نفس الشيء - يعبران عن قياس للفوتونات في الثانية.

14. عندمـا تنتقل الإلكترونات المدارية من قـشرة خارجية إلى قشرة داخلية، أي مما يلي غير صحيح؟

(أ) يمكن أن تنبعث الأشعة السينية المميزة.

(ب) يمكن إصدار إلكترونات أوكر.

(ج) الذرة تصبح أكثر استقرارا.

(د) يمكن إصدار خليط من أشعة كاما وإلكترونات التحول الداخلي.

(هـ) لا تزال الذرة في حالة تأين.

الأجـوبة Answers

1 - (ج).

2 - (1) (د). (2) لا شيء مما سـبق؛ عادة ما تسـتخدم كمصطلح جيولوجي. (3) لا شيء مما سبق؛ في الطب النووي، فإنه يشير إلى عنصر نواة له في حالة غير مستقرة (متحمس). (4) (ج). (5) (أ).

3 - (ب) و (ج) صحيحـان. (أ) خطـأ: التكنيتيوم ليس له شـكل ثابت. ^{99}Tc لديه $T1/2$ من 2.1 × 105 سنة

4 - (هـ).

5 - (د).

6 - 6.3 mCi.

7 - طاقة الربط النووي، طاقة الربط الإلكتروني لإلكترونات الغلاف الداخلي، طاقة الربط الإلكتروني لإلكترونات الغلاف الخارجي.

8 - صحيح.

9 - (3).

10 - بيكريل.

11 - 370 ميغابايت.

12 - (2).

13 - (1) فقط.

14 - (د)

الفصل الثاني

تفـــاعـل الإشـــعـاع مـــع المـــادة

Interaction of radiation with matter

عندما يصدم الاشـعاع المادة، فإن طبيعة الإشعاع ومكونات المادة يؤثران على ما يحدث. وتبدأ العملية بنقل الطاقة الإشـعاعية إلى الذرات والجزيئات أو تسخين المادة أو حتى تعديل هيكلها.

إذا تـم نقـل كل الطاقة من الجسـيمات المقذوفة أو الفوتون فأن الإشـعاع يبـدو انه قـد توقف في المادة المشـعة. على العكس من ذلك، إذا لـم يتم إيداع الطاقة تماما في المادة، سـوف تظهر الطاقة المتبقية كما لو كانت المادة شـفافة أو نصف شـفافة. سنعرض الآن بعض الظواهر الفيزيائية التي تنطوي على تفاعل الإشعاع مع المادة، وعلى وجه الخصوص سننظر، بشكل منفصل أولا، التفاعلات في المادة لكل من الفوتونات (أشعة كاما والأشعة السينية) والجسيمات المشحونة (جسيمات ألفا وبيتا).

تفاعل الفوتونات مع المادة Interaction of Photons with Matter

كمـا أنها تمر عبر المـادة، فان الفوتونات تتفاعل مع الذرات. نوع التفاعل هو دالة لطاقة الفوتونات والعدد الذري (Z) للعناصر التي تشكل المادة.

أنواع تفاعلات الفوتون في المادة

Types of Photon Interactions in Matter

في ممارسـة الطب النووي، حيث يتم اسـتخدام أشـعة كاما مع الطاقات بين 50 كيلو الكترون فولت و550 كيلو الكترون فولت، وان استطارة كومبتون هو النوع المهيمن من التفاعل في المواد ذات الأعداد الذرية المنخفضة، مثل الأنسجة

البشريــة (Z = 7.5). وان التأثـير الكهروضوئي هو النوع المهيمن من التفاعل في المواد ذات الأعداد الذرية الأعلى، مثل الرصاص (Z = 82). وهناك نوع ثالث من تفاعـل الفوتونات مع المادة، هو إنتـاج الزوج، ويحدث فقط مع طاقات الفوتون العاليــة جدا (أكبر مـن 1020 كيلو الكترون فولت)، وبالتالي هي ليســت مهمة في الطـب النـووي السريري. والشـكل (2-1) يصور النمط السـائد من التفاعل لمجموعات مختلفة من الفوتونات الساقطة والأعداد الذرية الماصة.

استطارة كومبتون Compton Scattering

يتم في استطارة كومبتون نقل جزء من طاقة الفوتون الساقط إلى الغلاف الخارجي أو (بشـكل اساسي) الى الكترون حر، وطرده من الذرة. وعند طرد هذا الإلكترون يسـمى الإلكترون كومبتون. يستطار الفوتون كما في الشكل(2-2) في زاويــة تعتمد على كمية الطاقـة المنقولة من الفوتون إلى الإلكترون. يمكن أن تـتراوح زاويــة الاسـتطارة تقريبا بين 0 الى 180°. يبين الشـكل (2-3) زوايا الاستطارة من 135 و 45.

التأثير الكهروضوئي Photoelectric Effect

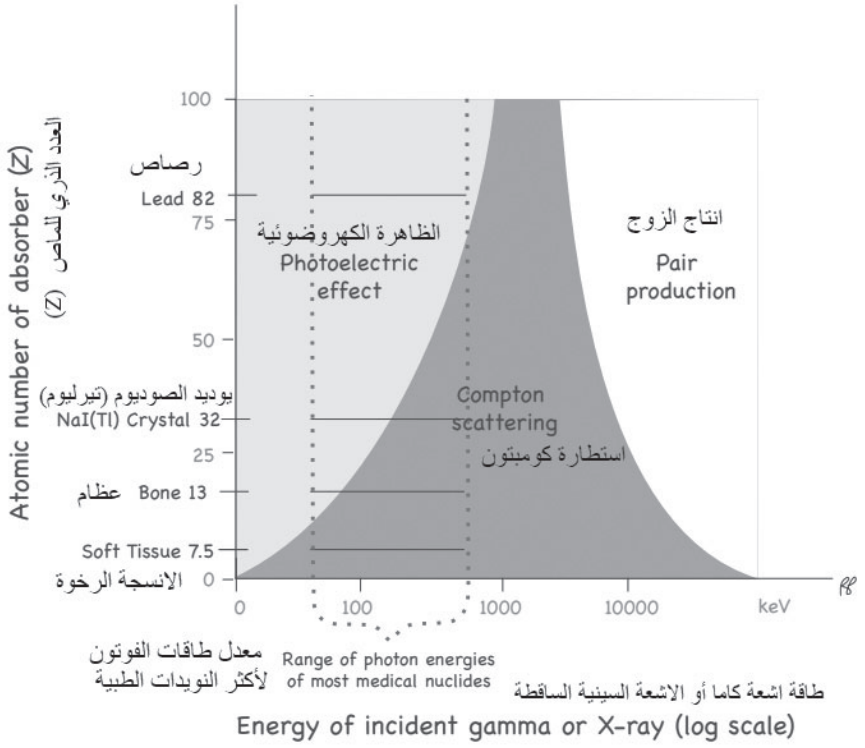
قـد ينقل الفوتـون العرضي طاقته أيضًا إلى إلكترون مـداري (عمومًا قشرة داخلية). وتسـمى هذه العملية التأثير الكهروضوئي ويسمى الإلكترون المقذوف الكهروضوئي (الشـكل 2-4). هذا الإلكترون يترك الذرة مع طاقة مساوية لطاقة أشـعة كاما السـاقطة التي تتضاءل مـن خلال طاقة الربط للإلكـترون. ثم يقوم الإلكـترون الخارجـي بمـلء الفـراغ الداخلـي، وتنبعـث الطاقـة الزائـدة كأشـعة سـينية.

$$E_{photoelectron} = E_{photon} - E_{binding}$$

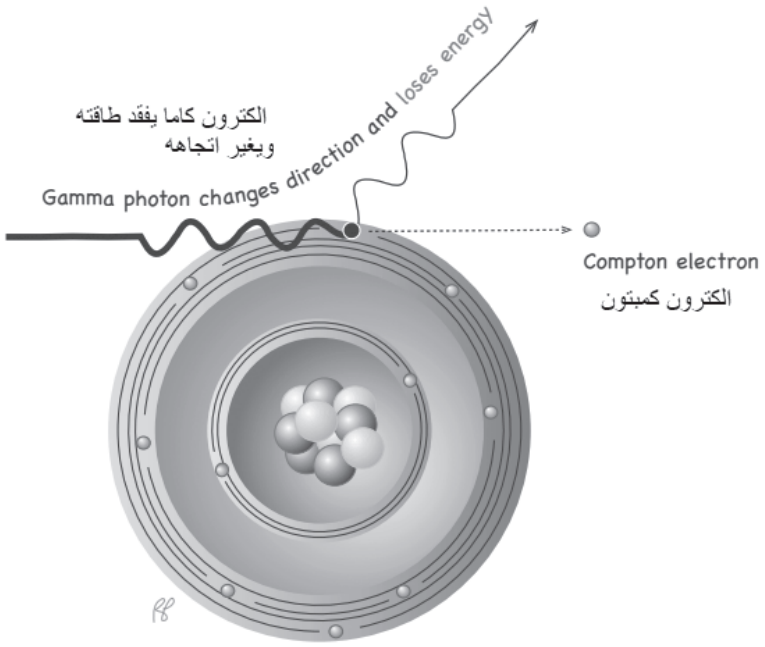
ويوضح الجدول 2-1 التفاعلات الفوتونية السائدة في بعض المواد الشائعة.

الجدول 2-1 التفاعلات الفوتونية السائدة في اغلب المواد

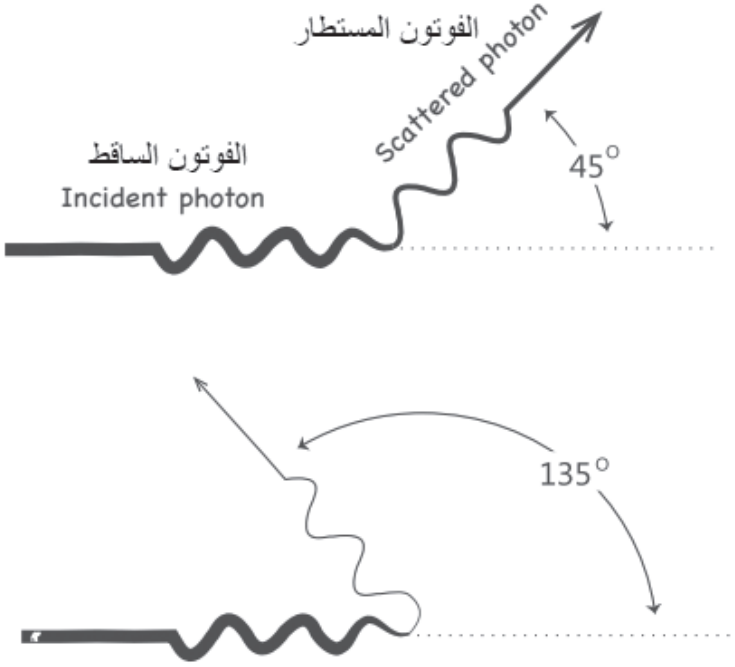
المواد	العدد الذري (Z)	الكثافة (غم / سم^3)	التفاعل السائد
الماء	7.4	1.0	استطارة كومبتون
انسجه رخوة	7.5	1.0	استطارة كومبتون
الزجاج (السيليكون)	14	2.6	استطارة كومبتون
غاز الاوكسجين O_2	16	0.0014	استطارة كومبتون
(كريستال) NaI بلورة	32	3.7	التأثير الكهروضوئي
الرصاص	82	11.3	التأثير الكهروضوئي
الزجاج الرصاصي	14, 82	6.2–4.8	التأثير الكهروضوئي



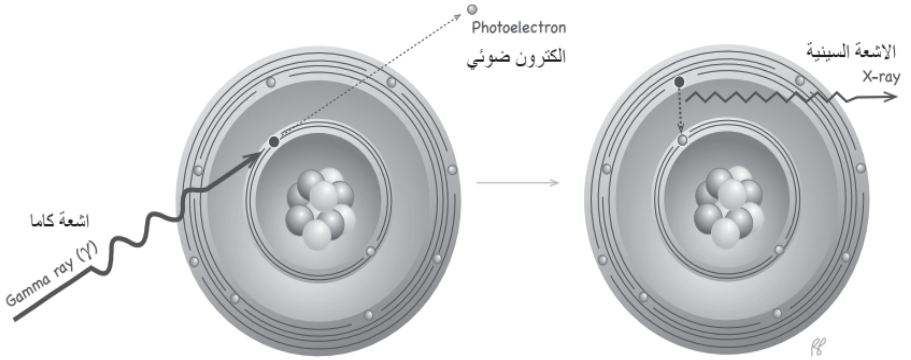
الشكل 2-1 النوع السائد من التفاعل لمجموعات مختلفة من طاقات الفوتونات الساقطة والعدد الذري الممتص.



الشكل 2-2 **استطارة كومبتون.**



الشكل 2-3 **زاوية استطارة الفوتون.**

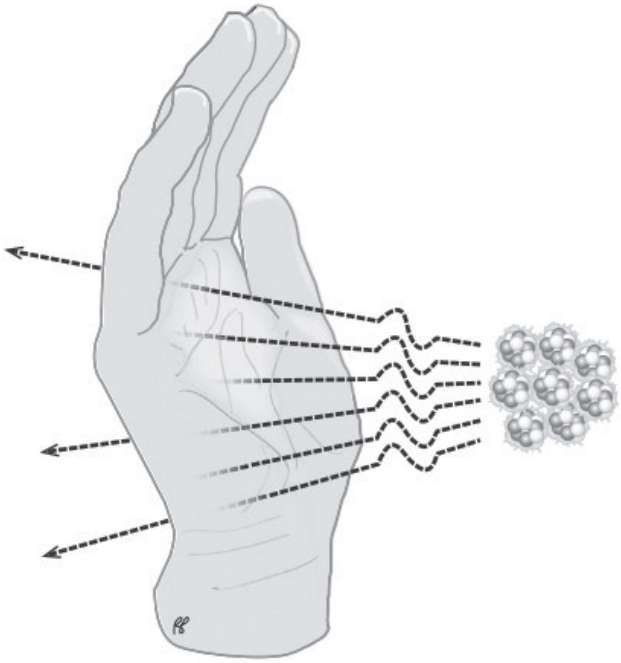


الشكل 2-4 **التأثير الكهروضوئي.**

توهين الفوتونات في المادة Attenuation of Photons in Matter

نتيجة للتفاعلات بين الفوتونات والمادة، فإن شدة الحزمة (مجرى الفوتونات)، أي عدد الفوتونات المتبقية في الحزمة، تنخفض مع مرور الحزمة عبر المادة كما في الشكل(2-5). يسمى هذا الفقدان للفوتونات بالتوهين. يشار إلى المادة التي تمر عبرها الحزمة باسم الموهن. بشكل خاص، التوهين هو نسبة الشدة عند النقطة التي تخرج فيها الحزمة من الموهن I_{out}، إلى الشدة التي كانت عند دخوله I_{in}. التوهين هو الدالة الأسية للسمك x، من الموهن بالسنتيمتر. ويمكن فهم أن الدالة ألاسية تعني أنه إذا فقد نصف الحزمة في عبور السنتيمتر الأول للمادة، فإن نصف المتبقي سيفقد عند عبور السنتيمتر التالي، وهكذا. هذا يشبه الطريقة الأسية التي يتلاشى فيها النشاط الإشعاعي مع مرور الوقت. ويعبر عن ذلك بصورة رمزية بالمعادلة،

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = e^{-(\mu x)}$$

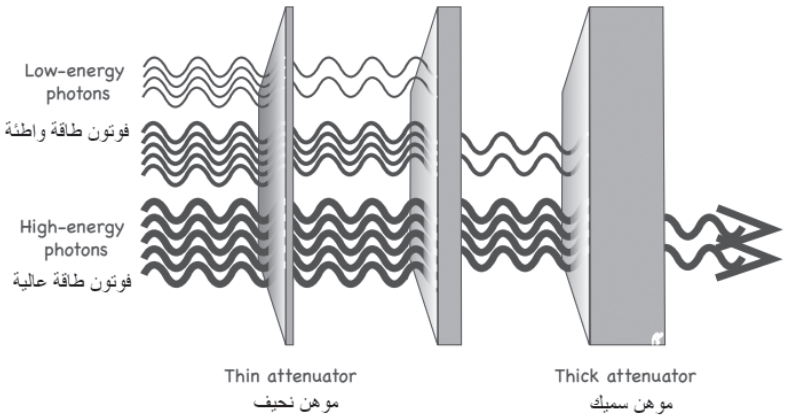


الشكل 2-5 **التوهين.**

حيث μ، هو معامل التوهين الخطي، هو خاصية الموهن. وعندما يعطى السمك بالسنتيمترات في العادة، حيث يعبر عن معامل التوهين الخطي على أنه «لكل سنتيمتر». وكما هو متوقع، تكون معامل التوهين الخطي أكبر بالنسبة للأنسجة الكثيفة مثل العظام من الأنسجة الرخوة مثل الدهون. بصورة عامة، يعتمد معامل التوهين الخطي على كل من طاقة الفوتونات وعلى العدد الذري (Z) وسمك الموهن. كلما انخفضت طاقة الفوتونات أو كلما زاد معدل العدد الذري أو سمك الموهن، فيزاد التوهين كما في الشكل(2-6).

بتعبير منفصل، فان معامل التوهين الكتلي هو (μ/ ϱ)، هو معامل التوهين الخطي مقسوما على كثافة الموهن. وعندما تعطى كثافة المادة في غرام/ سم^3 تكون وحدات التوهين الكتلي وهي غرام/ سم^2.

يصف امتصاص الإشعاع بانه جانبا آخر من جوانب عملية التوهين. ويصف التوهين بانه ضعف الحزمة عندما تمر عبر المادة. ويصف الامتصاص نقل الطاقة من الحزمة إلى المادة.



الشكل 2-6 كمية حزمة الفوتون الموهن تعتمد على طاقة الفوتون والسمك او العدد الذري للموهن

طبقات نصف القيمة وطبقات القيمة العشرية

Half-Value and Tenth-Value Layers

فعالية المادة كما في توهين فوتون توصف بمعامل التوهين. الوصف البديل، الذي هو أكثر سهولة للتصور، هو «طبقة نصف قيمة» (HVL)، فهو ببساطة عبارة عن سمك لوح من الموهن الذي سيزيل بالضبط نصف الطاقة الإشعاعية للحزمة. اللوح الثاني من نفس السمك سوف يقوم بإزالة نصف ما تبقى، وترك ربع من الشعاع الأصلي، ويستمر هكذا. لفوتون كاما ذو 100 كيلو الكترون فولت، يكون HVL في الأنسجة الرخوة هو حوالي 4 سم [1].

لأي موهن يمكن تحديد HVL تجريبيا باستخدام مصدر للفوتون وكاشف مناسب. بالنسبة للحسابات التي تنطوي على توهين لحزم إشعاع عالية الشدة، فإن مفهوما مشابها تماما، وهو طبقة القيمة العشرية (TVL)، وهي قيمة مفيدة. TVL هو سمك الموهن الذي سوف ينقل واحد من عشرة فقط من الفوتونات في الحزمة. واثنين من هذه الاسماك سوف تنقل واحد من مائة من الحزمة فقط. ويدرج الجدول (2-2) طبقات القيمة النصفية والقيمة العشرية وكذلك معامل التوهين الخطي μ، للرصاص لفوتونات بعض النويدات الطبية الشائعة.

ويمكن حساب معامل التوهين الخطي، μ، الوارد أعلاه، من HVL كما يلي:

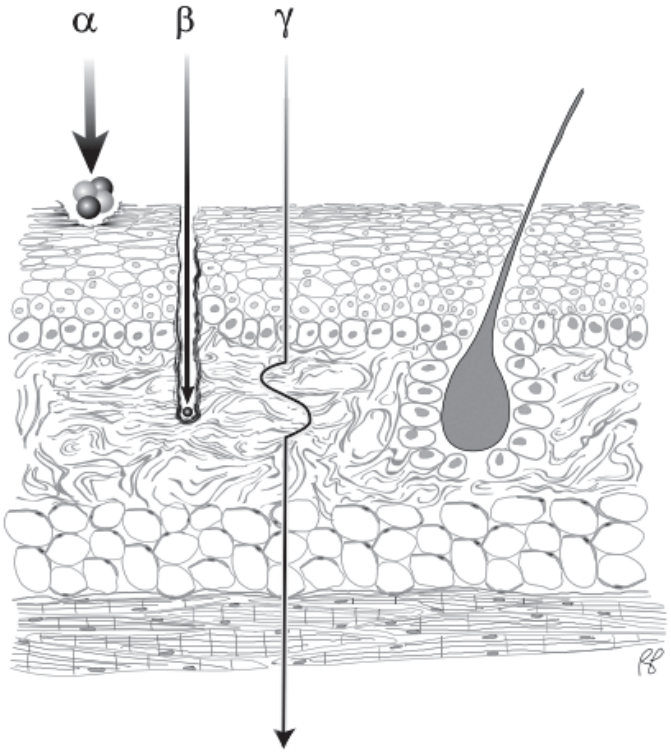
$$\mu = \frac{0.693}{\text{HVL}}$$

النوية	طاقة كاما كيلو الكترون فولت	طبقة نصف القيمة (سم)	طبقة القيمة العشرية (سم)
^{99m}Tc	140	0.03	0.09
^{67}Ga	393 ,300 ,185 ,93	0.02	0.27
^{123}I	159	0.04	0.12
^{131}I	364	0.22	0.74
^{18}F	511	0.39	1.3
^{111}In	245 ,172	0.06	0.24

تصلب الشعاع Beam hardening

عندما تحتوي الحزمة على فوتونات ذات طاقات مختلفة، كما هو الحال في حزمة الأشعة السينية، فإنها تُسمى متعدد الألوان. نظرًا لاختراق حزمة متعددة الألوان لمادة ما، يتم إطفاء الفوتونات منخفضة الطاقة أو مبعثرتها بشكل افضل على فوتونات ذات طاقة أعلى، والنتيجة هي أنه بينما تقل الكثافة الإجمالية، يزداد متوسط الطاقة للجزء المنقوص من الحزمة. وتعرف هذه الظاهرة باسم تصلب الشعاع. الشعاع المتصلب أكثر اختراقا»، وبالتالي فإن HVL أو TVL الثاني سيكون أكثر سمكًا من الأول.

يمكن استخدام مصطلح الإشعاع النافذ لوصف الأشعة السينية وأشعة كاما، حيث أن لها القدرة على اختراق سمك كبير من أي مادة. على الرغم من أننا قد وصفنا للتو بعض من العديد من طرق تفاعل الفوتون مع المادة، واحتمال أي من هذه التفاعلات التي تحدث على مسافة قصيرة هي صغيرة. قد ينتقل الفوتون الفردي عدة سنتيمترات أو أبعد داخل النسيج قبل أن يتفاعل. في المقابل الجسيمات المشحونة (أي جسيمات ألفا وبيتا) تخضع للعديد من التفاعلات المتباعدة عن كثب. هذا يحد بشدة من تغلغلها من خلال الأنسجة كما هو موضح في المقطع العرضي للبشرة في الشكل (2-7).



الشكل 2-7 الإشعاع النافذ والإشعاع غير النافذ.

تفاعل الجزيئات المشحونة مع المادة

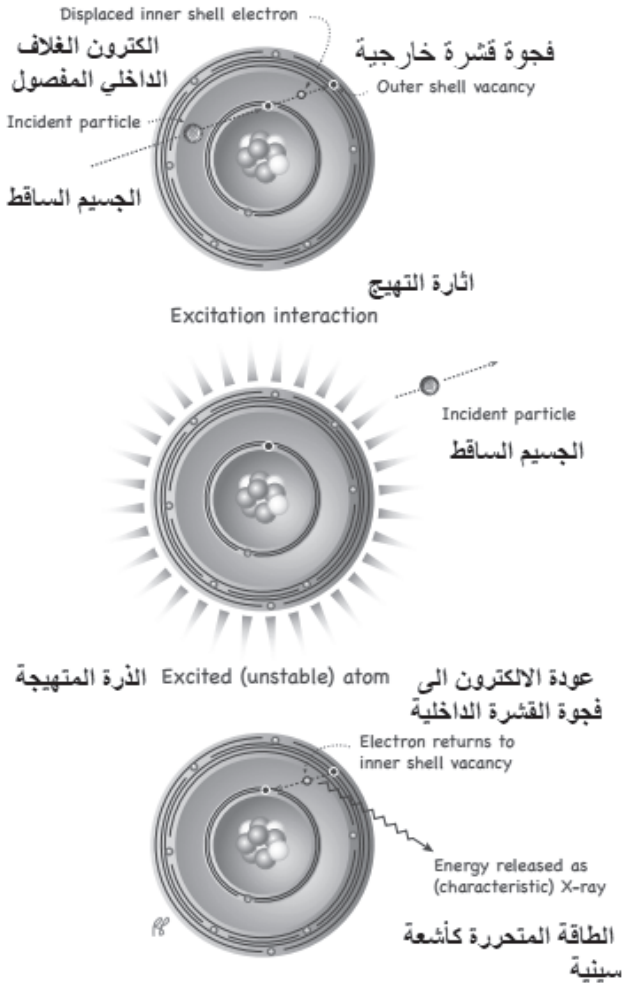
Interaction of Charged Particles with Matter

بسبب القوة الكهربائية القوية بين الجسيمات المشحونة والذرات الماصة، يمكن وقف الجسيمات المشحونة بواسطة المادة بسهولة نسبية. بالمقارنة مع الفوتونات، فإنها تنقل كمية أكبر من الطاقة في مسافة أقصر وتصل للسكون بسرعة أكثر. لهذا السبب يشار إليهما بالإشعاع غير النافذ (انظر الشكل 2-7). على النقيض من الفوتون ذو 100 كيلو الكترون فولت، فإن الإلكترون من هذه الطاقة سيكون اختراقه أقل من 0.00014 سم في الأنسجة الرخوة [1].

التهييج Excitation

تتفاعل الجزيئات المشحونة (ألفا، بيتا، بوزيترون) مع الإلكترونات المحيطة بنواة الذرة عن طريق نقل بعض طاقتها الحركية إلى الإلكترونات. غالبا ما تكون

الطاقـة المنقولة من جسـيمات منخفضـة الطاقة كافية لإزاحـة الإلكترون من القـشرة الداخلية إلى القشرة الخارجية للذرة. وتسـمى هذه العملية التهيج. وبعد التهيـج، يعود الإلكترون المشرد على وجه السرعـة إلى القشرة المنخفضة الطاقة، حيث يحرر الطاقة التي تم الحصول عليها مؤخرا كأشـعة سينية في عملية تسمى «إزالة التهييج» كما في الشـكل (2-8). لأن الطاقة المكتسـبة تسـاوي الفرق في طاقـات الربط لقشر الإلكـترون، وطاقات الربط لقشر الإلكـترون الذي يحدد بواسطة التركيب الذري للعنصر، ويشار إلى الأشعة السينية على أنها اشعة مميزة.



الشكل (2-8) التهيج وإزالة التهيج

التأين Ionization

يمكن للجسيمات المشحونة التي تحمل طاقة كافية أن تنقل أيضا طاقة كافية إلى إلكترون (عموما واحد في قشرة خارجية) لإخراج الإلكترون من الذرة. تسمى هذه العملية التأين كما في الشكل (2-9). هذا الفراغ في القشرة الخارجية هو بسرعة يمتلئ مع الإلكترون غير المقيد. إذا تم تأين قشرة الإلكترون الداخلية (يحدث بشكل قليل جدا) سوف «يسقط» الكترون القشرة الخارجية في فراغ القشرة الداخلية وسوف تنبعث الأشعة السينية المميزة. وان التأين لا يقتصر على التفاعل بين الجسيمات المشحونة والمادة. فالتأثير الكهروضوئي وتفاعلات كومبتون هي أمثلة على تفاعلات الفوتون مع المادة التي تنتج التأين.

التأين المحدد Specific Ionization

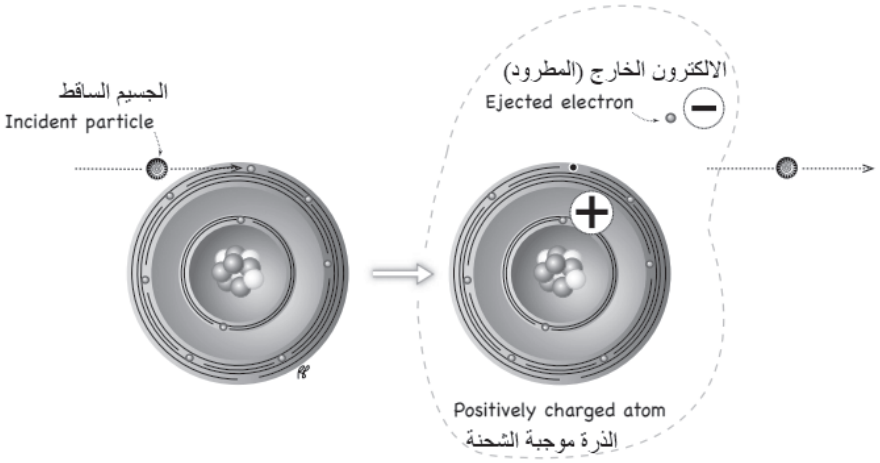
عندما يتسبب الإشعاع بطرد الإلكترون من الذرة للمادة الماصة، فالذرة الناتجة موجبة الشحنة والإلكترون الحر ذو شحنة سالبة ويسمى الزوج الأيوني كما في الشكل (2-9). كمية الطاقة المنقولة لكل زوج أيون متكون W، هو صفة للمادة الماصة. على سبيل المثال، يتم نقل ما يقرب من 33 الكترون فولت (المدى 25 الكترون فولت إلى 40 الكترون فولت) إلى مادة ماصة لكل زوج أيون تم إنشاؤه في الهواء أو الماء. غالبا ما يكون من المناسب الاشارة إلى عدد أزواج الأيونات التي تم إنشاؤها لكل وحدة من المسافة التي يقطعها الإشعاع بالتأين المحدد (SI). الجسيمات ذات الشحنة الأكبر (جسيمات ألفا) لها تأين محدد أعلى من الجسيمات الخفيفة (الإلكترونات).

نقل الطاقة الخطية Linear Energy Transfer

نقل الطاقة الخطية (LET) هو مقدار الطاقة المنقولة في مسافة معينة بواسطة جسيم يتحرك من داخل ماص. ويرتبط نقل الطاقة الخطية بالتأين المحدد.

$$LET = SI \times W$$

جسيمات ألفا تصنف على أنها عالية في LET للإشعاع، جسيمات بيتا والفوتونات منخفضة في LET للإشعاع.



الشكل 2-9 **التأين**.

الالكترون المطرود والذرة الموجبة الشحنة تسمى "الزوج"، المتمثلة بالخط المتقطع

المدى Range

المدى هو المسافة التي ينتقل فيها الإشعاع خلال الماص. الجسيمات التي تكون أخف وزنا وتكون أقل شحنة (مثل جسيمات بيتا) و/ أو تكون لها نقل طاقة أكبر من الجسيمات الأكثر ثقلا، والتي تمتلك شحنة أكبر (مثل جسيمات ألفا) و/ أو تمتلك طاقة اقل كما في الشكل (2-10).

في اجتياز المادة الماصة، فان الإلكترون يفقد الطاقة في كل تفاعل مع ذرات الماص. فقدان الطاقة لكل تفاعل يكون متغير. لذلك، فإن المسافة الإجمالية التي تقطعها الإلكترونات من نفس الطاقة يمكن أن تختلف بنسبة تصل إلى 3-4٪. ويسمى هذا الاختلاف في المدى بخداع المديات. لا تتأثر جسيمات ألفا الأثقل لدرجة كبيرة وتظهر القليل جدا من الخداع للمدى.