CHAPTER 1

أساسيات الفيزياء الذرية والنووية

FUNDAMENTALS OFATOMIC AND NUCLEAR PHYSICS

1.1. المقدمة

معرفة بنية الذرة structure of the atom، والفيزياء النووية الأولية، وطبيعة الإشعاع الكهرومغناطيسي electromagnetic radiation وإنتاج الأشعة السينية production of X- rays أمر أساسي لفهم فيزياء التصوير الطبي medical imaging والوقاية من الإشعاع radiation protection. يلخص هذا الفصل الأول من الكتيب تلك الجوانب من هذه المجالات والتي تعتبر كجزء من أساس الفيزياء الحديثة، وسوف ندعم ما تبقى من الكتاب كل ما يمت بصلة بالأشعة التشخيصية.

2.1. تصنيف الإشعاع CLASSIFICATION OF RADIATION

الإشعاع قَدْ يُصنّفُ ككهرومغناطيسي electromagnetic أَو جزيئي particulate، مع الإشعاع الكهرومغناطيسي بما في ذلك الضوء المرئي visible light والأشعة تحت الحمراء infrared والأشعة فوق البنفسجية ultraviolet والأشعة السينية X- rays وأشعة جاما gamma كما في الشكل 1.1، وإشعاع الجسيمات particulate radiation بما في ذلك الإلكترونات electrons والبوزيترون positrons والبروتونات protons والنيوترونات neutrons .

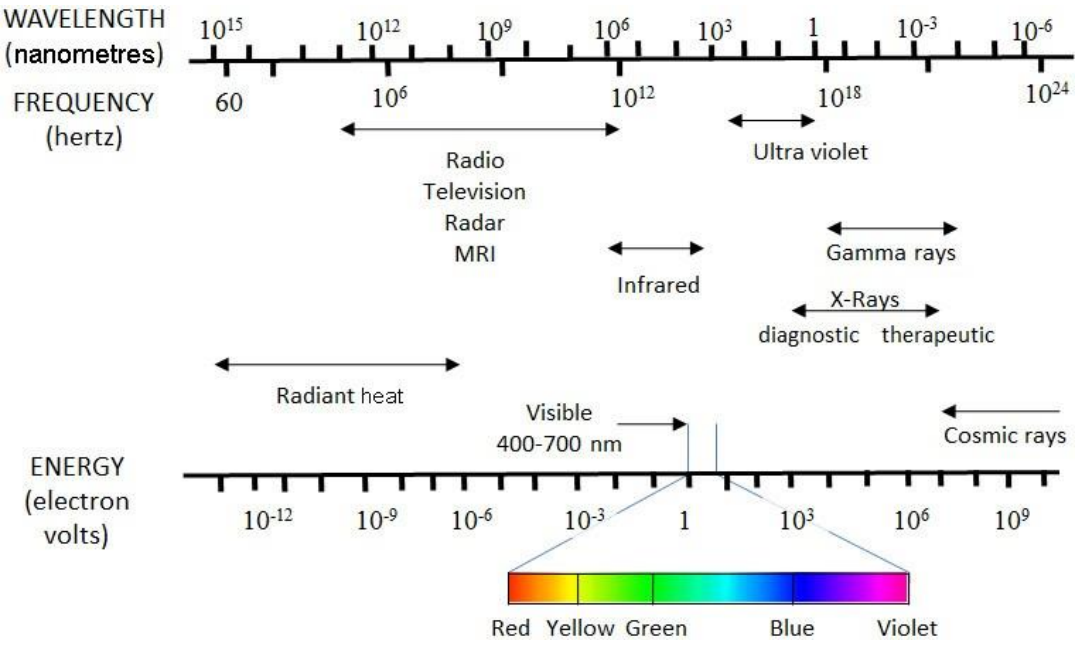
1.2.1. الاشعاع الكهرومغناطيسي Electromagnetic radiation

يمكن أن تتميز الموجات الكهرومغناطيسية electromagnetic waves، مثل جميع الموجات، بسعتها amplitude الطول الموجي wavelength (λ) والتردد frequency (v) والسرعة speed. السعة هي شدة الموجة intensity of the wave. الطول الموجي هو المسافة بين نقاط متطابقة في الدورات المجاورة adjacent cycles. التردد هو عدد تذبذبات oscillations الموجة الكاملة لكل وحدة زمنية.

سرعة الموجة تساوي ناتج التردد وطول الموجة product of the frequency and the wavelength، ويعتمد مقدارها magnitude على طبيعة المادة nature of the material التي تنتقل بها الموجة وتردد الإشعاع frequency of the radiation. في فراغ in a vacuum، ومع ذلك ،فأن سرعة جميع الموجات الكهرومغناطيسية ثابتة constant، وعادة ما يشار denoted إليها بـ(c)، وفي هذه الحالة:

$$c = \lambda v \qquad (1.1)$$

بالنسبة للأشعة السينية X- rays، يتم التعبير عن الطول الموجي عادة بالنانوميتر (nm) حيث ($1\ nm = 10^{-9}\ m$) ويتم التعبير عن التردد بالهرتز (Hz), حيث ($1\ Hz = 1\ cycle/s = 1\ s^{-1}$).



الشكل: 1.1. الطيف الكهرومغناطيسي *the electromagnetic spectrum*, التصوير بالرنين المغناطيسي *MRI magnetic resonance imaging*.

عند دراسة التفاعلات مع المادة interactions with matter، يتم التعامل مع الإشعاع الكهرومغناطيسي عمومًا على أنه سلسلة من الجزيئات الفردية individual particles، والمعروفة باسم الفوتونات photons. إنّ طاقةَ كُلّ فوتون مُعطى مِن قِبل:

$$E = h\nu \qquad (1.2)$$

حيث يعرف الثابت h باسم ثابت بلانك Planck's constant. في الأشعة التشخيصية diagnostic radiology، يتم التعبير عن طاقة الفوتون عادة بوحدات (keV)، حيث يمثل 1 electronvolt (eV) الطاقة التي يستقبلها إلكترون energy received by an electron عندما يتم تسريعها accelerated عبر فرق الجهد قدره potential difference (1V).

2.2.1. إشعاع الجسيمات Particulate radiation

في الأشعة التشخيصية diagnostic radiology، إشعاع الجزيئ الوحيد only particulate radiation الذي يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار هو الإلكترون electron. والالكترون لديه كتلة مستقرة rest mass وقدرها (9.109×10^{-31} kg) وطاقة مستقرة rest energy وقدرها (511 keV).

3.2.1. الإشعاعات المؤينة وغير المؤينة Ionizing and non-ionizing radiations

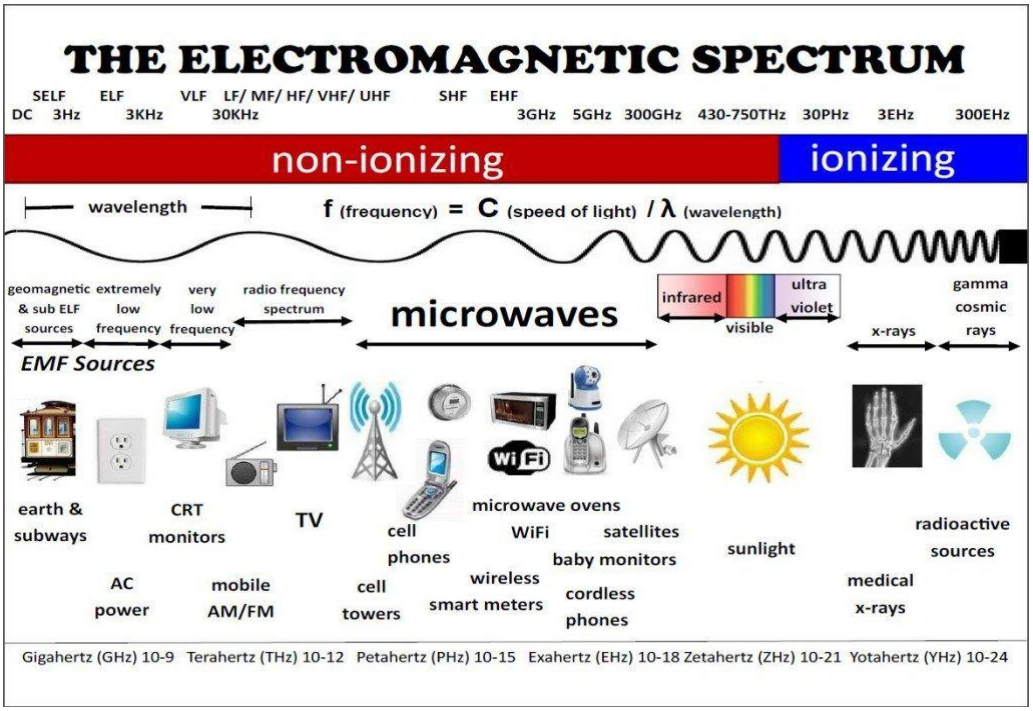
يصنف الإشعاع على أنه مؤين ionizing أو غير مؤين non-ionizing، حسب قدرته على تأين المادة ionize matter:

- الإشعاعات غير المؤينة لا يمكنها تأين المادة.
- الإشعاعات المؤينة يمكن أن تؤين المادة، إما بشكل مباشر أو غير مباشر directly or indirectly:

- **الإشعاعات المؤينة مباشرة Directly ionizing radiation:** هي جسيمات مشحونة charged particles ترسب او تودع deposit طاقتها بسرعة في المادة مباشرة، من خلال العديد من تفاعلات كولوم الصغيرة small coulomb (الكتروستاتيكية electrostatic) مع الإلكترونات المدارية orbital electrons على طول مسار الجسيمات particle track.

- **الإشعاعات المؤينة بشكل غير مباشر Indirectly ionizing radiation**: هي الاشعة السينية X- ray أو فوتونات أشعة كاما gamma ray photons أو النيوترونات neutrons التي تنقل طاقتها أولاً إلى جسيمات مشحونة charged particles بسرعة حيث تُصَدر في تفاعل واحد أو بضعة تفاعلات few interactions في المادة matter التي تمر من خلالها الجسيمات المشحونة الناتجة بسرعة ثم ترسب طاقتها مباشرة في هذه المادة.

يُعرف الحد الأدنى minimum energy من الطاقة المطلوب لتأيين الذرة ionize an atom، أي لإزالة الإلكترون remove an electron، بإمكانية التأين ionization potential. بالنسبة للعناصر، يتراوح مقدارها magnitude من عدة فولت إلكترونية (electronvolts) للمعادن القلوية alkali metals إلى (24.5 eV) للهيليوم، وللمياه (12.6 eV). الإشعاعات الكهرومغناطيسية electromagnetic radiation ذات التردد الأعلى من المنطقة القريبة من الأشعة فوق البنفسجية near-ultraviolet من الطيف الكهرومغناطيسي مؤينة electromagnetic spectrum is ionizing، في حين أن الإشعاع الكهرومغناطيسي ذو الطاقة تحت منطقة الأشعة فوق البنفسجية البعيدة far-ultraviolet region (مثل الضوء المرئي visible والأشعة تحت الحمراء infrared والتذبذ الإشعاعي الراديوي radiofrequency) غير مؤين non-ionizing.



الشكل: 2.1. الإشعاعات المؤينة وغير المؤينة *Ionizing and non-Ionizing Radiations*.

باختصار:

التأين ionization: هو تكون ايونات عن طريق حذف أو إضافة إلكترونات. يحدث التأين فلكياً نتيجة لإرتفاع درجات الحرارة كما في حالة النجوم أو عندما تصطدم الجسيمات ذات الطاقة العالية بالذرات.

تعرف عملية التأين أيضاً على أنها العملية الفيزيائية لتحويل الذرة أو الجزيء إلى أيونات بإضافة أو إزالة جسيمات مشحونة مثل الالكترونات أو أيونات أخرى وفي كثير من الأحيان جنباً إلى جنب مع التغيرات الكيميائية الأخرى.

هذه العملية تختلف بشكل طفيف اعتماداً على طبيعة الأيون ما إذا كان يتم إنتاج شحنة كهربائية موجبة أم سالبة. ينتج أيون مشحون شحنة موجبة عندما يمتص إلكترون مرتبط إلى الذرة (أو الجزيء) طاقة كافية تمكنه من الهرب من مجال الجذب الكهربائي الذي كان يثبته في مكانه، بحيث يكسر الإلكترون ارتباطه وينطلق حراً, يطلق على مقدار الطاقة اللازمة لهذه العملية اسم طاقة التأين.

طاقة التأين: هي الطاقة اللازمة لنزع إلكترون واحد من ذرة عنصر ليصبح أيون. وقيمة هذه الطاقة تدلنا على صعوبة نزع الإلكترون من الذرة، فكلما كانت كبيرة كان تأين العنصر صعبًا. وفي أغلب الأحيان يحدث النزع على عدة خطوات متتالية وتسمى الطاقة لنزع الإلكترون الأول "طاقة التأين الأولى"، وعندما ننتزع إلكترونا ثانياً من الذرة فيلزم لذلك "طاقة التأين الثانية" ، وهكذا بالنسبة إلى الإلكترونات التالية لها. وغالبًا ما تحدث هذه العملية بتسليط أشعة ضوئية ذات تردد معين على العنصر في حالته الغازية فيمتصها

الإلكترون ويُنتزع من الذرة. وتختلف ترددات الضوء اللازمة لانتزاع إلكترون من ذرة العنصر باختلاف العنصر. فطاقة التأين تعتمد أولا على نوع العنصر، كما تعتمد على الإلكترون هل هو الإلكترون الأول أم الإلكترون الثاني أم الثالث. ومن الطبيعي أنه كلما كان حجم العنصر صغيرًا كانت جاذبية النواة للإلكترون الخارجي قوية ويصعب بذلك نزعه. ولهذا السبب نجد أن طاقة التأين تزداد للعناصر من اليسار إلى اليمين في الدورة الواحدة في الجدول الدوري وتتناقص من أعلى إلى أسفل في المجموعة.

ينتج الأيون المشحون بشحنة سالبة عندما يتحد إلكترون حر مع الذرة أو الجزيء وبالتالي يتم ضمه داخل مجال الجذب الكهربائي ومطلقاً أي طاقة فائضة.

غالباً تقسم عملية التأين إلى نوعين: التأين المتسلسل، والتأين الغير متسلسل.

3.1. التركيب الذري والنووي ATOMIC AND NUCLEAR STRUCTURE

1.3.1.التعاريف الأساسية

تتكون الذرة من نواة مركزية central nucleus محاطة بسحابة cloud من الإلكترونات (e) سالبة الشحنة. تتركز معظم كتلة الذرة في النواة الذرية atomic nucleus، التي تتكون من بروتونات (*p*) ونيوترونات (*N*) (*A* minus *Z*) (A - Z)، حيث يُعرف (*Z*) بالرقم الذري atomic number و (*A*) رقم الكتلة الذرية للنواة atomic mass number.

حيث:

الرقم الذري atomic number: Z = P

الرقم الكتلي atomic mass number: A = Z + N

يمتلك البروتون (*P*) والنيوترون (*N*) كتل مستقرة متطابقة تقريبًا nearly identical؛ يمتلك البروتون شحنة موجبة positive charge مماثلة في مقدار الشحنة الإلكترونية السلبية negative electron charge، والنيوترون ليس له شحنة no charge. في الذرة غير المؤينة، يكون عدد الإلكترونات وعدد البروتونات متساويًا. نصف قطر الذرة حوالي (0.1 nm)، في حين أن نصف قطر النواة radius of the nucleus أصغر بكثير، حوالي (10^{-5} nm).

يشار عادةً إلى البروتونات Protons والنيوترونات neutrons على أنها النيوكليونات nucleons. لديهم تفاعلات قوية جذابة متطابقة identical strong attractive interactions، وترتبط في النواة بقوة قوية. على النقيض inversely proportional من القوى الكهروستاتيكية والجاذبية التي تتناسب عكسيا مع مربع المسافة بين جزيئين، فإن القوة القوية بين اثنين من النوكليونات هي قوة قصيرة المدى للغاية very short range force، تنشط فقط على مسافات بترتيب بضع فمتومتر (femtometres). في هذه المسافات القصيرة، القوة القوية strong force هي القوة الغالبة predominant force، وتتجاوز القوى الأخرى بعدة مرات من حيث المقدار.

بعض التعاريف والأوصاف الأساسية هي كما يلي:

- **العدد الذري Atomic number (Z):** عدد البروتونات أوعدد الإلكترونات في الذرة.
- **عدد الكتلة الذرية Atomic mass number (A):** عدد البروتونات Z بالإضافة إلى عدد النيوترونات N في الذرة (A = Z + N) .

لا توجد علاقة أساسية بين A و Z، ولكن العلاقة تجريبية empirical relationship يوفر تقريبًا جيدًا للنوى المستقرة stable nuclei.

$$Z = \frac{A}{1.98 + 0.0155A^{2/3}} \qquad (1.3)$$

- يشار إلى نواة X برقم الكتلة الذرية A atomic mass number والرقم الذري atomic Z number.

$$^{A}_{Z}X$$

على سبيل المثال، يتم اختصار نظير isotope الكوبالت مع 60 نوكليونات،

$^{60}_{27}Co$ abbreviated مختصرها فأن A=60 ,Z= 27

واذا كان للـ (Ra) Z=88 , A=226 فأن النواة nucleus $^{226}_{88}Ra$

- يمكن أن يتألف عنصر من ذرات تحتوي جميعها على نفس عدد البروتونات، ولكن لها أعداد مختلفة من النيوترونات N، أي لها أعداد كتلية مختلفة. الذرات ذات العدد الذري المتطابق Z ولكن أرقام الكتلة الذرية المختلفة A تسمى نظائر isotopes .

أي النظائر isotopes: هي العناصر ذات الاعداد الذرية المتطابقة والاعداد الكتلية المختلفة.

$P_1 = P_2 = P_3 \longrightarrow Z_1 = Z_2 = Z_3$

$N_1 \neq N_2 \neq N_3 \longrightarrow A_1 \neq A_2 \neq A_3$

- **وحدة الكتلة الذرية الموحدة μ :** وحدة تستخدم لتحديد كتل الذرات specifying the masses of atoms. تساوي (1/12) من كتلة ذرة ^{12}C أو ($931.5\ MeV/c^2$) .

الوزن الذري Atomic weight A_r : كمية فيزيائية بدون أبعاد dimensionless physical quantity ، وهي نسبة متوسط كتلة ذرات العنصر إلى وحدة الكتلة الذرية الموحدة.

$$A_r = \frac{\text{average mass of the atoms of an element}}{\text{unified atomic mass unit}}$$

المتوسط هو المتوسط الموزون على كل نظائر العنصر المعين، مع مراعاة وفرة نسبته.

- **الكتلة الذرية Atomic mass M:** يتم التعبير عنها بوحدات الكتلة الذرية الموحدة. تكون الكتلة الذرية M لنظير معين وأصغر من مجموع الكتل الفردية من الجسيمات المكونة بسبب الطاقة الجوهرية المرتبطة بربط الجسيمات (النواة nucleons) داخل النواة.
- **ذرة Atomic g-atom (gram-atom):** عدد الغرامات التي تتوافق مع ذرات N_A لعنصر، حيث يكون N_A ثابت اوفوكادرو Avogadro's constant ويساوي (6.022×10^{23}) (atoms/g-atom)

أي:

Avogadro's constant $N_A = (6.022 \times 10^{23}$ atoms/g-atom)

التعريف أعلاه للوزن الذري atomic weight يعني أن A_r g من كل عنصر يحتوي على ذرات N_A بالضبط. وكما يلي:

-عدد الذرات، N_{am} ، لكل كتلة وحدة لعنصر:

Number of atoms, N_{am}, per unit mass of an element:

-عدد الذرّاتِ، N_{am}، لكل كتلةِ وحدةِ عنصرٍ:

$$N_{am} = \frac{N_A}{A_r} \qquad (1.4)$$

Number of electrons, ZN_{am}, per unit mass of an element:

-عدد الإلكترونات، ZN_{am} , لكلّ كتلةِ وحدةِ عنصرٍ:

$$ZN_{am} = \frac{Z}{A_r} N_A \qquad (1.5)$$

— number of electrons, ZN_{aV}, per unit volume of an element:

-عدد الإلكترونات، ZN_{aV}، لكل وحدة حجم عنصر:

$$ZN_{aV} = \rho ZN_{am} = \rho Z \frac{N_A}{A_r} \qquad (1.6)$$

حيث ρ هي كثافة العنصر density of the element .

- لاحظ أن ($Z/Ar \approx 0.5$) لجميع العناصر، باستثناء الهيدروجين، حيث ($Z/Ar = 1$). في الواقع، (Z/Ar) ينخفض ببطء من 0.5 لعناصر Z منخفضة low *Z* elements إلى 0.4 لعناصر Z عالية high *Z* elements .
- إذا افترضنا أن كتلة الجزيئي mass of a molecule تساوي مجموع كتل الذرات التي تتكون منها الجزيئي ، فبالنسبة لأي مركب جزيئي ، توجد جزيئات N_a لكل جزيء من المركب، حيث يكون الجزيئي (g-mole) (يتم تعريف غرام مول أو مول في غرام) على أنه مجموع الأوزان الذرية للذرات التي تشكل الجزيء atomic weights of the atoms making up the molecule .

2.3.1. التركيب الذري Atomic structure

تم بناء النموذج الميكانيكي الكمومي للذرة على عمل العديد من الفيزيائيين. اقترح راذرفورد Rutherford لأول مرة فكرة وجود نواة مركزية central nucleus كثيفة تحيط surrounded بها إلكترونات مدارية orbiting electrons في عام 1911. ومع ذلك، فإن نموذجه، على أساس الفيزياء الكلاسيكية، له عدد من السمات غير المرضية unsatisfactory features. على سبيل المثال، لا يمكن تفسير أطياف الانبعاث المرصودة للعناصر. قام بوهر Bohr بتطوير نموذج رذرفورد الذري elaborated Rutherford's atomic model في عام 1913، استنادًا إلى الميكانيكا الكلاسيكية غير النسبية non-relativistic mechanics، وذلك بإضافة مفهوم تقدير الزخم الزاوي angular momentum quantization. يعتمد نموذجه على أربعة افتراضات:

1- تدور الإلكترونات حول نواة راذرفورد Rutherford nucleus في مدارات محددة جيدًا ومسموح بها وتسمى (اغلفة shells)، والقوة المركزية الجذابة تسمى بقوة كولوم وهذه القوة بين الإلكترونات والنواة المشحونة إيجابًا التي يتم موازنتها balanced بواسطة القوة الجاذبية النابعة من الحركة المدارية orbital motion .

2- أثناء وجود الإلكترون في المدار، لا يفقد أي طاقة not lose any energy على الرغم من تسارعه باستمرار being constantly accelerated (هذه الفرضية تتعارض مع الفيزياء الكلاسيكية، والتي تتنبأ بأن الجسيمات المشحونة المتسارعة ستفقد الطاقة في شكل إشعاع lose energy in the form of radiation).

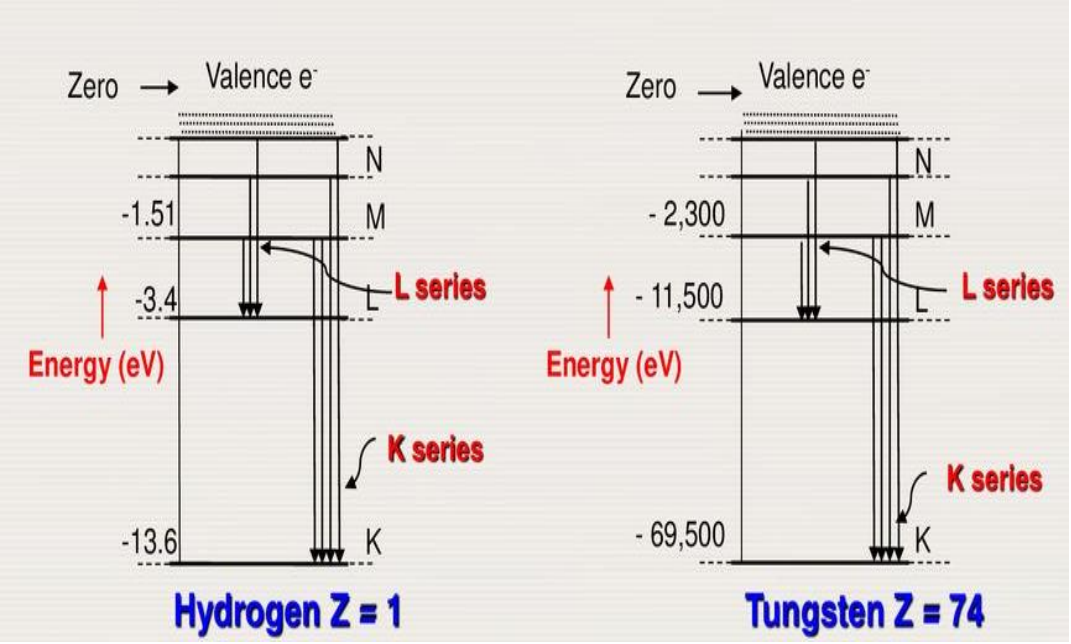
3- يتم قياس كمية الزخم الزاوي angular momentum للإلكترون في مدار مسموح به ولا تأخذ سوى قيم ($n\hbar$)، حيث n عدد صحيح و ($\hbar = h/2\pi$)، حيث h ثابت بلانك (Planck's constant) .

4- تنبعث ذرة أو أيون الإشعاع atom or ion emits radiation عندما ينتقل الإلكترون من مدار أولي initial orbit برقم كمي (n_i) إلى مدار نهائي final orbit برقم كمي (n_f) لأن

.($n_i > n_f$).

في حين أن عمل بوهر Bohr كان إنجازًا كبيرًا major breakthrough، فقد نجح في شرح جوانب سلوك ذرة الهيدروجين hydrogen atom، ذرة الهيليوم المتأينة منفردة singly ionized helium atom، ذرة الليثيوم المؤينة مضاعفة doubly ionized lithium atom، وما إلى ذلك، لم تتوقف القصة عند هذا الحد. من خلال عمل هايزنبرغ Heisenberg، شرودنجر Schrödinger، ديراك Dirac، باولي Pauli وآخرين، تم تطوير نظرية ميكانيكا الكم quantum mechanics. في هذه النظرية، تشغل الإلكترونات حالات طاقة فردية individual energy محددة بأربعة أرقام كمية four quantum numbers، على النحو التالي:

- **الرقم الكم الرئيسي principal quantum number، *n***: والذي يمكن أن يأخذ قيمًا صحيحة ويحدد غلاف الطاقة الرئيسي main energy shell.
- **الرقم الكم السمتي azimuthal quantum number، *l***: والذي يمكن أن يأخذ قيمًا صحيحة بين (0) و(n–1)، والذي يحدد الزخم الزاوي الدوراني rotational angular momentum الكلي للإلكترون.
- **الرقم الكم المغناطيسي magnetic quantum number، *m***: والتي يمكن أن تأخذ القيم الصحيحة بين (–l) و (+l) والتي تحدد أحد مكونات الزخم الزاوي angular momentum.
- **الرقم الكم الدوراني spin quantum number، *s*:** والذي يأخذ القيم (–½) أو (+½) ويحدد مكون الزخم الزاوي للإلكترون angular momentum of the electron.



الشكل: 3.1. مستويات الطاقة للهيدروجين والتنغستن. وتظهر التحولات المحتملة بين مستويات الطاقة المختلفة مع السهام.

وفقًا لمبدأ استبعاد لباولي Pauli exclusion principle، لا يمكن لأي إلكترونين شغل نفس الحالة ويترتب على ذلك أن عدد حالات الإلكترون التي يمكن أن تشترك في نفس العدد الكمي الأساسي (n)، تساوي ($2n^2$).

يمكن فهم مستويات الطاقة المرتبطة بهذه الأرقام الكمية الأربعة باستخدام الرسوم البيانية لمستوى الطاقة energy level diagrams مثل تلك الموضحة في الشكل 3.1 للهيدروجين والتنغستن hydrogen and tungsten. في هذه المخططات، تؤدي كل قيمة للرقم الكم الأساسي أعلاه (**$n = 1$**) إلى ظهور نطاق (أو قشرة) من حالات الطاقات المماثلة (كما هو موضح في طاقة واحدة للبساطة). تزداد مستويات الطاقة المرتبطة associated بمختلف مدارات الإلكترون various electron orbits (غير المرسومة للقياس) مع ***Z*** وتقل مع العدد الكمي ***n*** ومتوسط المسافة من النواة. يحدد الغلاف الإلكتروني الخارجي (غلاف التكافؤ valence shell) الخصائص الكيميائية للعنصر chemical properties. تُعرف نطاقات الطاقة المرتبطة بـ(**$n = 1, 2, 3,$**) إلخ ، باسم **k، l، M**، إلخ. ينشأ هيكل كل نطاق من الاختلافات الصغيرة في الطاقة المرتبطة بكل من الأرقام الكمومية quantum numbers.

4.1. الأشعة السينية X- RAYS

1.4.1. إنتاج الأشعة السينية المميزة وإلكترونات الثاقب Auger electrons

عندما تمر الجسيمات المشحونة charged particles عبر المادة، فإنها تتفاعل مع الإلكترونات الذرية atomic electrons وتفقد الطاقة من خلال عمليات الإثارة والتأين excitation and ionization. يمكن أيضًا إنتاج التأين ionization أثناء مرور الفوتونات عبر المادة عن طريق التفاعلات مثل التأثير الكهروضوئي photoelectric effect, انظر القسم 1.2.2 والانتثار او الاستطارة غير المترابط incoherent scattering, انظر القسم 6.2.2. يحدث الإثارة عندما يكون هناك نقل لبعض طاقة الجسيم الساقط إلى إلكترونات في المادة الماصة، وإزاحتها إلى الأغلفة displacing them to shells أكثر من النواة (أي إلى مستويات طاقة أعلى) وترك شاغرة vacancy في الغلاف الأصلي. إذا تجاوزت الطاقة المنقولة طاقة الربط للإلكترون، يحدث التأين ionization occurs، مما يؤدي إلى إخراج الإلكترون من الذرة. ثم يتم تشكيل زوج أيون ion pair، يتكون من الإلكترون المقذوف ejected electron والذرة المؤينة ذات الشحنة الموجبة ionized, positively charged atom.

في حين أن أصغر طاقات الربط (جهد التأين ionization potentials، انظر القسم 3.2.1 للإلكترونات الموجودة في الكاربون Carbo (11.3 eV) والأكسجين Oxygen (13.6 eV) والنيتروجين Nitrogen (14.5 eV)، يبلغ متوسط الطاقة اللازمة لإنتاج زوج أيون في الهواء الجاف ion pair in dry air (معظمه النيتروجين والأكسجين) 33.97 eV. فرق الطاقة (حوالي 24 eV) هو نتيجة عملية الإثارة result of the excitation process.

الإلكترون الثاقب auger electron:

عندما يتم نقل carried الطاقة المنبعثة في كل انتقال energy released in each transition عن طريق انبعاث الإشعاع الكهرومغناطيسي emission of electromagnetic radiation أو بواسطة إلكترون يتم إخراجه من غلاف خارجي آخر electron ejected from another outer shell، يعرف باسم الإلكترون الثاقب auger electron.

كلما تم إنشاء شاغر vacancy في غلاف إلكتروني داخلي inner electronic shell، سواء عن طريق الإثارة أو التأين excitation or ionization، يتم ملؤه بواسطة إلكترون من قشرة (خارجية) بعيدة. ينتج عن هذا شغور في الغلاف الخارجي الثاني vacancy in this second outer، والذي يتم تعبئته بعد ذلك بواسطة إلكترون (إن وجد) من قشرة خارجية أكثر بعدًا، وكلما تتكرر العملية process repeats، سوف تنتج سلسلة من التحولات cascade of transitions. يتم نقل الطاقة المنبعثة في كل انتقال عن طريق انبعاث الإشعاع الكهرومغناطيسي emission of electromagnetic radiation أو بواسطة إلكترون يتم إخراجه من غلاف خارجي آخر، يعرف باسم الإلكترون الثاقب auger electron. اعتمادًا على العدد الذري atomic number للمادة، والأغلفة الإلكترونية electronic shells المعنية، قد يكون الإشعاع الكهرومغناطيسي في الأجزاء المرئية visible أو فوق البنفسجية ultraviolet أو الأشعة السينية X- ray من الطيف. إن طاقة هذا الإشعاع هي سمة من سمات الذرة المعينة particular atom، لأنها تساوي الفرق في طاقات الربط binding energies الإلكتروني للحالتين الأولية والنهائية للانتقال المعين particular transition، الذي يعتمد على العدد الذري atomic number. تعرف الأشعة السينية المنبعثة بالأشعة السينية المميزة أو الفلورية characteristic or fluorescent X rays.

يستخدم اصطلاح التسمية وفقًا للغلاف shell التي حدث فيها الشاغر vacancy occurred. تُعرف الأشعة السينية المنبعثة بالاقتران مع انتقال الإلكترون إلى الغلاف k باسم السمة k المميزة للأشعة السينية (k characteristic X- rays)، والأشعة السينية الناتجة عن انتقال الإلكترون إلى الغلاف L تُعرف باسم الأشعة السينية L (L characteristic X- rays)، وهكذا دواليك. تُستخدم الحروف الصغيرة subscripts للدلالة على القشرة التي يُملأ بها الشاغر vacancy is filled. يتم استخدام الرمز (α) للدلالة على الإشعاع المنبعث denote radiation emitted من أجل الانتقال بين الأغلفة المجاورة neighbouring shells والرمز (β) للدلالة على الإشعاع المنبعث من أجل الانتقال بين الأغلفة غير المجاورة non-neighbouring shells. وبالتالي، فإن أشعة K_α X هي المنبعثة للانتقال بين الأغلفة L و k وأشعة K_β X للانتقال بين الأغلفة M أو N و K (شكل 4.1). يتم استخدام مزيد من الرموز حسب الضرورة للإشارة إلى الأجزاء الفرعية المشاركة في عملية الانتقال.

الخطوط $k_{\alpha 1}$ و $k_{\alpha 2}$ و $k_{\beta 1}$ و $k_{\beta 2}$ مرئية في طيف الأشعة السينية المبين في الشكل 2.5 من هدف التنغستن tungsten target أنبوب الأشعة السينية X- ray tube. لأطياف الأشعة السينية من هدف الموليبدينوم molybdenum target، ومع ذلك، فإن الطاقات من الأجزاء الخطوط الثانوية subshells أقرب بعضها إلى بعض closer together وغالبًا ما لا يتم حل تقسيم الخطوط k_α و k_β (انظر طيف الموليبدينوم المبين في الشكل 7.9).

كما ذكر أعلاه، فإن الطاقة التي يتم نقلها هي الفرق في طاقات الربط بين الحالة الأولية والنهائية initial and final states. على سبيل المثال، بالنسبة إلى التنغستن tungsten، يتم إعطاء طاقات energies أشعة k_α و k_β X بواسطة:

$$E(k_{\alpha 1}) = E_{LIII} - E_k = -10.2 - (-69.5) = 59.3 \text{ keV} \quad (1.7)$$

$$E(k_{\alpha 2}) = E_{LI} - E_k = -11.5 - (-69.5) = 58.0 \text{ keV} \quad (1.8)$$

$$E(k_{\beta 1}) = E_{MIII} - E_k = -2.3 - (-69.5) = 67.2 \text{ keV} \quad (1.9)$$

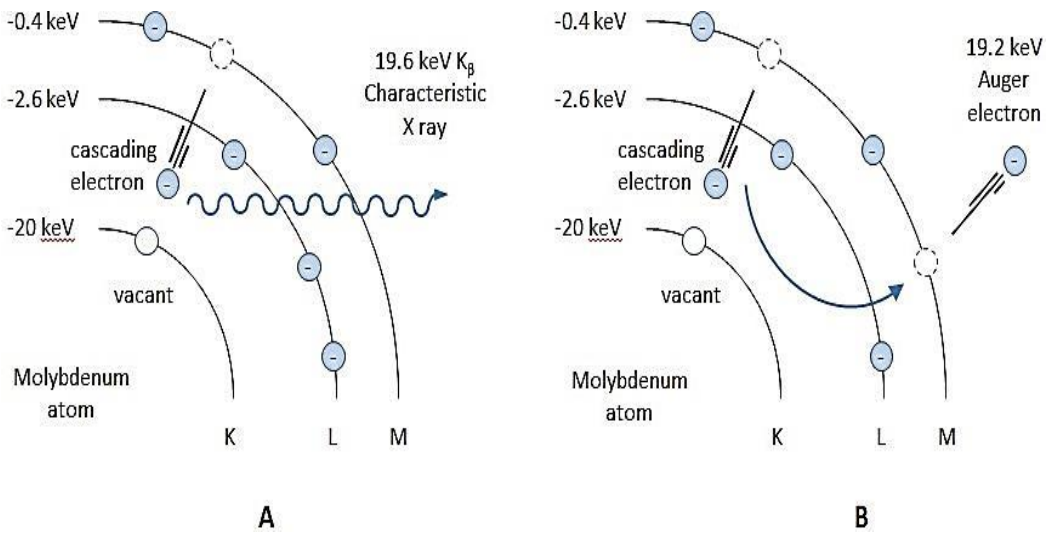
$$E(k_{\beta 2}) = E_{NIII} - E_k = -0.4 - (-69.5) = 69.1 \text{ keV} \quad (1.10)$$

عندما يحمل إلكترون المثقب auger electron فرق الطاقة بين الحالة الأولية والنهائية، يتم إنشاء شاغر أخرى في الغلاف الخارجي. على سبيل المثال، إذا كان الانتقال الأولي من الغلاف M إلى الغلاف K، وكان إلكترون المثقب auger electron ينبعث أيضًا من الغلاف M، سيكون هناك شاغران ناتجان two resultant vacancies في الغلاف M. وبالتالي يتم تحديد الطاقة الحركية kinetic energy للإلكترون المثقب عن طريق الفرق بين طاقة الربط binding energy الملزمة للغلاف الشاغر الأولي ومجموع طاقات الربط المرتبطة binding energies associated بالشاغران التي تم إنشاؤها. على سبيل المثال، للانتقال الموصوف للتو لهدف التنغستن tungsten target ، يتم إعطاء طاقة الإلكترون المثقب بواسطة:

$$E(\text{Auger}) = E_k - E_M - E_M = -[(-69.5) - (-2.3) - (-2.3)] = 64.9 \text{ keV} \quad (1.11)$$

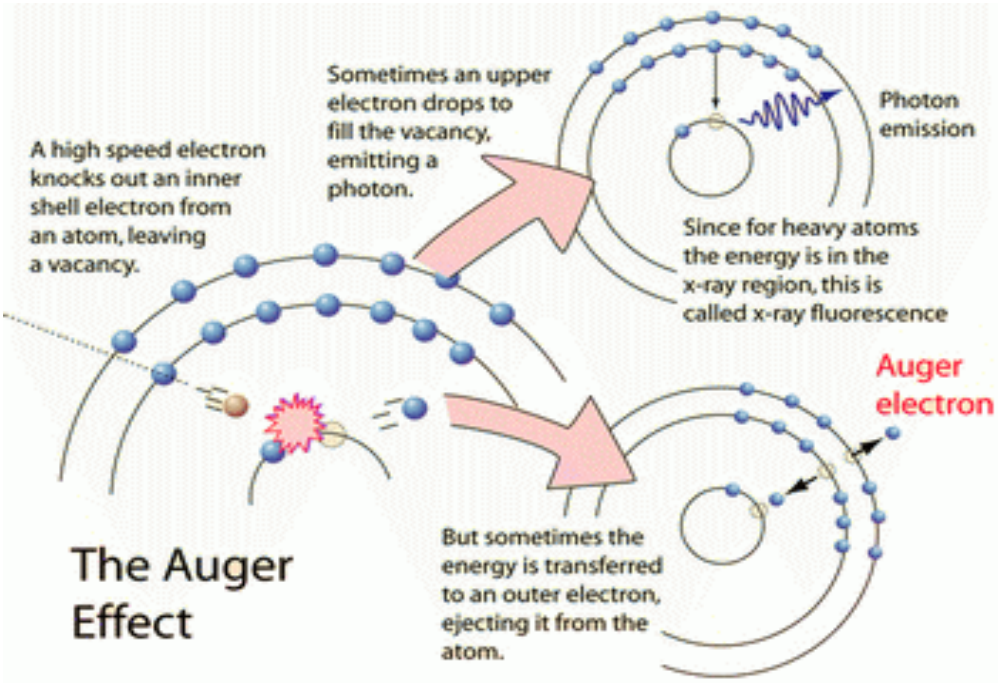
بالنسبة لهدف الموليبدينوم molybdenum target، يظهر توازن الطاقة المكافئ equivalent energy balance لانبعاث إلكترون المثقب في الشكل 3.1.

عند االنظر في considering ترسب الطاقة energy deposition في المادة التالية لإنشاء شاغر vacancy، ثم ملؤها، من المهم معرفة ما إذا كانت الأشعة السينية الفلورية fluorescent أو إلكترون المثقب auger electron تنبعث. يُعرف احتمال انبعاث الأشعة السينية الفلورية باسم ناتج الفلورسنت fluorescent yield، ω. نظرًا لأنه يجب إصدار إما الأشعة السينية الفلورية fluorescent X- ray أو إلكترون المثقب auger electron، فإن احتمال إصدار إلكترون مثقب هو $(1 - \omega)$. انبعاث الإلكترون مثقب أكثر أهمية للمواد ذات العدد الذري المنخفض low atomic number وللانتقالات بين الأغلفة الخارجية outer shells. تقترب ناتج التألق fluorescence yield k من الصفر بالنسبة للمواد ذات العدد الذري المنخفض low atomic number، ولكنها تزداد بزيادة العدد الذري increasing atomic number، وعلى سبيل المثال، تكون 0.007 و 0.17 و 0.60 و 0.93 للأكسجين oxygen والكالسيوم calcium والسيلينيوم selenium والجادولينيوم gadolinium، على التوالي.



الشكل: 4.1. انتقال الإلكترون في غلاف *M* المولبيدينوم لملء شاغر في الغلاف *K* متبوعًا بانبعاث (*a*) الأشعة السينية المميزة *characteristic X -ray* لـ K_β و (*b*) الإلكترون *Auger*.

وعند ملاحظتنا الى الشكل 5.1 نستنتج:



الشكل: 5.1. يمثل عمليات التي تصاحب اطلاق Auger electron.

1- ألكترون ذات سرعةِ عاليةِ a high speed electron يَضْربُ knocks ألكترونَ في القشرة الداخليةِ inner shell مِنْ ذرّةِ وبهذا سوف يَتْركُ مكان شاغر vacancy.

2- في بعض الاحيان يَسْقطُ ألكترونُ electron drops من الغلاف الخارجي الى الغلاف الداخلي لمَلْئ الشاغرِ fill the vacancy وبهذا سوف يَبْعثُ فوتون emitting a photon لوجود فرق في الطاقة.

3- لكن أحياناً الطاقةَ تتُحوّلُ transferred إلى ألكترونِ خارجيِ outer electron تطْردْه اوتقذفة ejecting it from the atom خارج الذرّةِ يسمى (Auger electron)

4- في الذرّاتِ الثقيلةِ، الطاقة في منطقةِ الاشعة السينيةَ X-ray region، تدْعَى فلورة الأشعة السينيةِ X-ray Fluorescence.

2.4.1. الإشعاع من شحنة متسارعة، شعاع الكبح

Radiation from an accelerated charge, bremsstrahlung

معظم التفاعلات interactions التي تربط الإلكترونات السريعة fast electrons مع مرورها عبر المادة هي مع الإلكترونات الذرية atomic electrons. ومع ذلك، يمكن أن يكون لديهم تفاعلات غير مرنة inelastic interactions مع النواة الذرية atomic nuclei. في مثل هذه التفاعلات، سيتم تحويل مسار الإلكترون ونقل الطاقة إلى الفوتون photon، الذي ينبعث emitted منها. نظرًا لأن الفوتون ينبعث مع تباطؤ الإلكترون slowing down of the electron، فإنه يعرف باسم (bremsstrahlung)، وهو ما يعني "إشعاع الفرملة أو شعاع الكبح" 'brake radiation' باللغة الألمانية, انظر القسمين 4.2 و 2.5. يمكن أن تأخذ طاقة الفوتون المنبعث أي قيمة من الصفر إلى طاقة الإلكترون الأولي from zero up to the energy of the initial electron، بحيث يصاحب مرور حزمة من الإلكترونات على الرغم من أن المادة تنبعث من طيف من الفوتونات emission of a spectrum of photons التي تغطي نطاق الطاقة هذه. تمثل فوتونات شعاع الكبح bremsstrahlung المكون الرئيسي لطيف الأشعة السينية المنبعثة X- ray spectrum emitted من أنابيب الأشعة السينية (انظر الفصل 5).

احتمال انبعاث شعاع الكبح bremsstrahlung يتناسب مع قيمة Z^2 وبالتالي فهو أعلى بالنسبة للمواد ذات العدد الذري الأعلى مثل التنجستن tungsten (Z = 74). ومع ذلك، حتى بالنسبة لهذه المواد، تكون كفاءة إنتاج شعاع الكبح bremsstrahlung أقل من 1% بالنسبة إلى 100 إلكترون فولت (100 keV). تعتمد زاوية انبعاث فوتونات شعاع الكبح bremsstrahlung على طاقة الإلكترون. بالنسبة إلى طاقات الإلكترون أكبر بكثير من الكتلة الباقية للإلكترون، يبلغ التوزيع الزاوي angular distribution ذروته في الاتجاه الأمامي forward direction، ولكن مع انخفاض طاقة الإلكترون، يتحرك موضع الذروة بحيث يكون في زاوية الاتجاه الأمامي angle to the forward direction. عندما تكون طاقة الإلكترون منخفضة electron energy is low، ينبعث الإشعاع بشكل أساسي بين 60° درجة و 90° درجة إلى الاتجاه الأمامي forward direction.

BIBLIOGRAPHY

ATTI X, F.H., Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry, John Wiley & Sons, New York (1986).

BUSHBERG, J.T., SEIBERT, J.A., LEIDHOLDT, E.M.J., BOONE, J.M., The Essential Physics of Medical Imaging, 2nd edn, Lippincott Williams & Wilkins (2002).

INTERNATIONAL ATO MIC ENERGY AGENCY, Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students, IAEA, Vienna (2005).

JOHNS, H.E., CUNNINGHAM, J.R., The Physics of Radiology, 4th edn, Charles C. Thomas, Springfield, IL (1983).