

## CHAPTER 2

## تفاعلات الإشعاع مع المادة

## INTERACTIONS OF RADIATION WITH MATTER

## 1.2. المقدمة

يتناول هذا الفصل فيزياء الأحداث physics of events التي تظهر occur عندما تتفاعل الفوتونات والإلكترونات مع المادة photons and electrons interact with matter. هذه هي الإشعاعات المهمة للأشعة التشخيصية diagnostic radiology، ويتم التعامل فقط مع تلك التفاعلات التي تؤدي إلى التوهين attenuation والامتصاص absorption والاستطارة scattering. التفاعلات الأخرى، مثل تلك التي تحتوي على نوى nuclei، لا يتم أخذها في الاعتبار هنا لأنها تحدث فقط للإشعاع التي تكون فيها الطاقة أعلى من تلك المستخدمة في الأشعة التشخيصية.

طاقة الأشعة السينية X-rays energy من بضع عشرات من الفولت الكهربائي few tens of kiloelectronvolts أو نحو ذلك ولها طول موجي من بضعة نانومتر nanometres. نظرًا لأن هذا في النطاق العام للأبعاد الذرية atomic dimensions، يتوقع المرء حدوث تفاعلات interactions بين الإشعاع الكهرومغناطيسي والذرات electromagnetic radiation and atoms وهذا هو الحال بالفعل. تتوافق correspond أبعاد الإلكترون Electron dimensions (نصف القطر الكلاسيكي للإلكترون pm) مع الطرف الأعلى higher end من نطاق طاقة energy range الأشعة السينية التشخيصية (2.8) diagnostic X-ray ويتوقع المرء أن يكون هذا هو المنطقة العامة general region حيث تحدث التفاعلات interactions بين الإشعاع الكهرومغناطيسي electromagnetic radiation والإلكترونات المكونات منها الذرات constituents of atoms.

يقع نطاق الطاقة energy range المستخدم في الأشعة التشخيصية بشكل عام على الحدود boundary بين الفيزياء الكلاسيكية والكمومية classical and quantum physics، وينتج "مبدأ التكامل" 'complementarity principle'، سيتم التعامل مع التفاصيل الرقمية numerical details للتفاعلات interactions عن طريق المنطق الكلاسيكي classical reasoning عند الاقتضاء وبالاعتبارات الميكانيكية الكمية quantum mechanical considerations حيث يعطي هذا نتائج متفوقة superior results.

يختلف سلوك behavior الفوتونات والإلكترونات photons and electrons أثناء اجتيازها للمادة traverse matter اختلافًا كبيرًا. الفوتونات بشكل عام photons in general لها تفاعلات صفرية أو تفاعلية واحدة أو قليلة zero, one or a few interactions ويتم توهينها بشكل كبير exponentially attenuated. من الصعب difficult إجراء حساب مباشر direct computation للتأثيرات المشتركة لعدة تفاعلات several interactions، وعادة ما تستخدم تقنيات مونت كارلو Carlo techniques

لدراسة نقل الفوتون photon transport عبر الوسائط الكبيرة bulk media. يتم التعبير عن تفاعلات الفوتون من حيث المقاطع العرضية cross-sections للتفاعلات الفردية individual interactions ومعاملات التوهين attenuation coefficients للمرور عبر الوسائط الكبيرة. تواجه الإلكترونات أعدادًا كبيرة large numbers من التفاعلات وتفقد الطاقة lose energy بشكل عام تدريجياً general gradually حتى يتم إيقافها. يتم التعبير عن ذلك من حيث نطاق الإلكترون electron range وقدرات إيقاف المواد .material stopping powers.

## 2.2. تفاعلات الفوتونات مع المادة

### INTERACTIONS OF PHOTONS WITH MATTER

تفاعلات الإشعاعات مثل الفوتونات photons والإلكترونات electrons عشوائية stochastic وتطيع obey قوانين الصدفة laws of chance. بالنسبة للإشعاع الفوتوني photon radiation، يتبع مفهوم المقطع العرضي cross-section، بعلاقته بالاحتمال probability، مباشرة directly. يمكن تفسير ذلك ببساطة explained rather simply عن طريق الاعتبار considering بأن فوتونًا واحدًا single photon سيكون ساقطاً incident على لوح من مادة المنطقة (A) التي تحتوي على هدف واحد contains one target من مساحة المقطع العرضي ( $\sigma$ ) سيكون احتمال تفاعل الفوتون مع الهدف photon interacting with the target هو نسبة المنطقتين ratio of the two areas:  $(\sigma/A)$ .

بعد ذلك، دعنا نقول أن هناك ( $\Phi$ ) فوتونات photons وأنها موجهة بشكل عشوائي randomly directed إلى المنطقة (A)، وعلاوة على ذلك، تحتوي هذه المنطقة (A) على أهداف (n) targets، ولكل منها منطقة ( $\sigma$ ) من السهل أن نرى أن العدد المتوقع expected number للتفاعلات ( $\Delta\Phi$ ) بين الفوتونات والأهداف photons and targets سيكون:

$$\Delta\Phi = \Phi n(\sigma/A) \quad (2.1)$$

هناك طريقة أخرى another way لتوضيح ذلك وهي أن احتمال probability قيام قذيفة projectile بعمل ضربة هو ( $\sigma / A$ )، وهو مجرد جزء fraction من المنطقة المحظورة بواسطة الأهداف blocked off by the targets.

لنفترض الآن أننا نغير الوصف الهندسي geometrical description قليلاً وندع الأهداف تكون ذرات targets be atoms. سيكون المقطع العرضي cross-section الخاص بهم مقطعاً عرضياً ذرياً atomic cross-section. لن يكون هذا مجالاً فعلياً actual area للذرة ولكنه سيكون مجالاً فعالاً - للتفاعل effective area — effective area بين الفوتون والذرة photon and the atom قيد الدراسة. يتم تمثيل المقاطع العرضية بشكل متكرر بالرمز ( $\sigma$ ) ويتم التعبير عنها تقليدياً في وحدة مساحة تسمى barn .

حيث أن:  $(1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2)$  تستخدم هذه الوحدة عادة unit is commonly used في الفيزياء النووية والإشعاعية nuclear and radiation physics. إنها ليست (SI) ولكن، على مضض إلى حد ما، مقبولة من قبل تلك الهيئة.

هناك أربعة تفاعلات أساسية للأشعة السينية four fundamental X-ray interactions نحتاج إلى أخذها في عين الاعتبار need to consider؛ يمكن ربط كل منها بقطعة عرضية محددة associated with a specific cross-section. من المفيد استخدام رموز مختلفة لتمثيلها represent them: يتم استخدام ( $\tau$ ) للدلالة على المقطع العرضي لفوتون cross-section for a photon للتفاعل مع الذرة من خلال التأثير الكهروضوئي photoelectric effect، يتم استخدام ( $\sigma_{\text{coh}}$ ) لتمثيل المقطع العرضي للتفاعل cross-section for interaction من خلال الاستطارة المتشاكهة coherent scattering، ويتم استخدام ( $\sigma_{\text{incoh}}$ ) للاستطارة غير المتشاكهة incoherent scattering.

و( $\kappa$ ) للإنتاج الثنائي والثلاثي pair and triplet production. الثلاثة الأولى من هذه التفاعلات مهمة في مجال الطاقة التشخيصية important in the diagnostic energy ما يصل إلى 150 keV، في حين أن إنتاج الزوجين والثالث مهم فقط في الطاقات الأعلى كثيرًا important at much higher energies ويتم التعامل معه فقط من أجل اكتماله only treated here for completeness.

### 1.2.2. التأثير الكهروضوئي Photoelectric effect

في التأثير الكهروضوئي، يتفاعل الفوتون الساقط مع ذرة، والتي تترك في حالة من الإثارة left in an excited state. يتم تحرير الطاقة الزائدة excess energy عن طريق إخراج ejection أحد الإلكترونات المرتبطة بالنواة electrons bound to the nucleus. يترك هذا الإلكترون، المسمى الإلكترون الضوئي photoelectron، الذرة مع الطاقة الحركية kinetic energy:

$$T = h\nu - E_s \quad (2.2)$$

حيث:

$E_s$  هي طاقة الربط binding energy لغلاف الإلكترون electron shell التي جاء منها الإلكترون؛  $h$  ثابت بلانك Planck's constant؛ و  $\nu$  هو تردد الفوتون photon frequency.

الطاقة المنقولة energy transferred إلى ذرة الارتداد recoiling atom صغيرة جدًا ويمكن إهمالها neglected. لا يمكن أن يحدث التأثير الكهروضوئي photoelectric effect إلا إذا كانت طاقة الفوتون ( $h\nu$ ) تتجاوز طاقة الربط binding energy للإلكترون في تلك الغلاف shell. أكثر غلاف الكتروني محتمل ليفقد الإلكترون هو الذي يرضي هذا القيد satisfies this constraint ولديه أيضًا أعلى طاقة ربط highest binding energy.

على الرغم من أن هذا يبدو seems like وكأنه عملية بسيطة simple process إلى حد ما، إلا أن حساب احتمال التفاعل calculation of the probability of the interaction معقد للغاية very complicated ويتطلب ميكانيكا الكم quantum mechanics is required. هذا لأنه يشتمل على دالة الموجة wave function لكل سحابة إلكترون ذري atomic electron cloud وهذه الوظائف متاحة فقط

## فيزياء الأشعة التشخيصية

للذرات البسيطة نسبيًا. في الطاقة التشخيصية تصل إلى (150 keV)، وتأثير الكهروضوئية photoelectric effect يتم إعطاء المقطع العرضي cross-section لكل ذرة، و ( $\tau$ ) تعطى تقريبًا بواسطة:

$$\tau(h\nu, Z) = k \frac{Z^n}{(h\nu)^m} \quad (2.3)$$

حيث:

$k$  ثابت؛

$Z$  هو الرقم الذري atomic number؛

$n$  هو الأس في النطاق exponent in the range (3.6-5.3)، كونه أكبر بالنسبة للأعداد الذرية المنخفضة low atomic numbers؛

و  $m$  هو الأس في النطاق (2.5-3.5)، مرة أخرى أكبر للأعداد الذرية المنخفضة largest for low atomic numbers.

الاعتماد النموذجي ( $\tau$ ) في نطاق طاقة الفوتون التشخيصي diagnostic photon energy range هو:

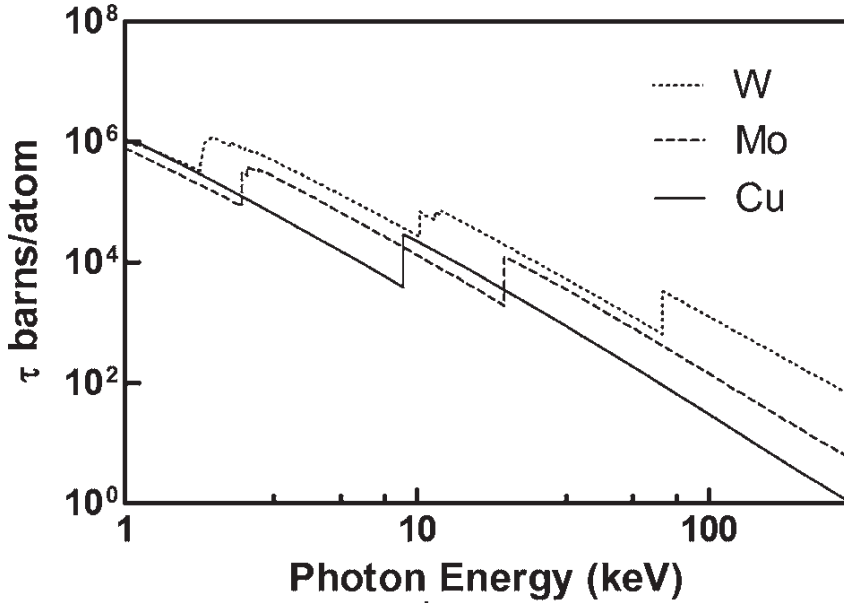
$$\tau \sim \frac{Z^4}{(h\nu)^3} \quad (2.4)$$

يشير هذا التعبير إلى اعتماد قوي للغاية very strong dependence على العدد الذري atomic number وكذلك اعتماد قوي عكسي على طاقة الفوتون strong inverse dependence on photon energy.

يوضح الشكل 1.2 بيانات المقطع العرضي الذري atomic cross-section للعملية الكهروضوئية للفوتونات photoelectric process التي تشع التنجستن irradiating tungsten والموليبدنيوم molybdenum والنحاس copper. يتم تصميمها ضد طاقة الفوتون against photon energy على مقياس القطع log-log scale وتغطي نطاق الطاقة من (1 keV) إلى (300 keV). تتوافق الانقطاعات الحادة مع مواضع حواف الامتصاص absorption edges للمواد المختلفة، والتي تزيد من الطاقة مع زيادة العدد الذري وطاقة ربط الغلاف shell binding energy. على سبيل المثال، بالنسبة إلى التنجستن، يمثل التوقف discontinuity الذي يظهر عند (69.5 keV) يمثل التأثير (k) represents the effect عند طاقة أقل من هذا، يكون المقطع العرضي ( $6.4 \times 10^2$  barn/atom)، بينما أعلى من هذه الطاقة، يكون المعامل ( $3.3 \times 10^3$  barn/atom).

ويمثل هذا زيادة مفاجئة sudden increase في المقطع العرضي بحوالي عامل خمسة factor of five عندما تزيد طاقة الفوتون أعلى من طاقة الغلاف (k) أي (حافة k) وبالتالي، فإن المساهمة الرئيسية major contribution في المقطع العرضي أعلى (الحافة k) تأتي من التفاعلات interactions مع

إلكتروني غلاف (k). تمثل الانقطاعات discontinuities في المقطع العرضي للنتغستن tungsten cross-section في الطاقات التي تزيد طاقتها عن (10 keV) تأثير القشرة (L)، وهو الأمر الأكثر تعقيدًا more complicated لأنه يشتمل على ثلاثة اغلفة فرعية three subshells. يظهر تأثير القشرة (M) بسرعة (2.5 keV) مع بنية أكثر تعقيدًا more complex structure. بالنسبة للنحاس copper والموليبدينوم molybdenum، تكون حواف الامتصاص (k) عند (8.98 keV) و (20.00 keV) على التوالي.

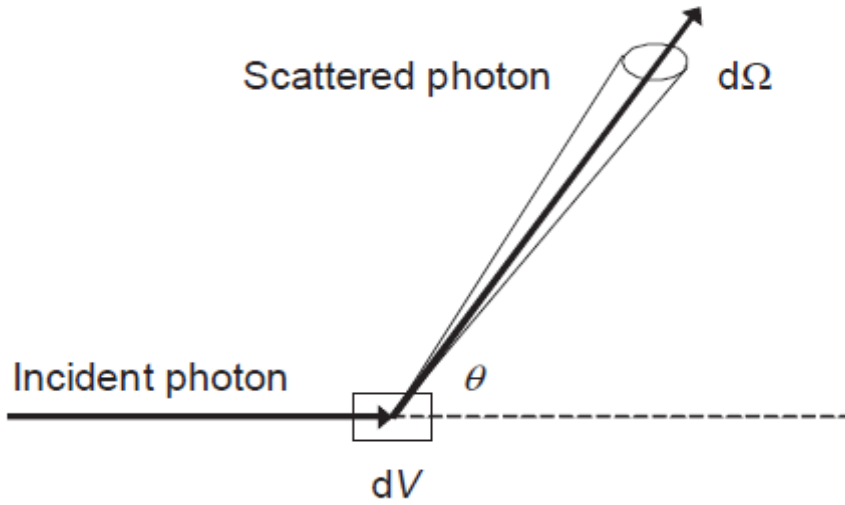


الشكل 1.2. مقاطع عرضية كهروضوئية ذرية للنحاس (Cu)، الموليبدينوم (Mo) والنتغستن (W).

يختفي الفوتون الساقط incident photon في التفاعل الكهروضوئي photoelectric interaction. بعد التفاعل، ثم يترك شاغر في بنية القشرة الذرية vacancy is left in the atomic shell structure ويتم ملء هذا بواسطة إلكترون من مدار أعلى higher shell، مع اختلاف الطاقة الناتج عن ذلك إما بواسطة الأشعة السينية المميزة characteristic X-ray (المعروفة أيضًا باسم الأشعة السينية الفلورية fluorescent X-ray) أو بواسطة إلكترون آخر من مدار أعلى higher shell، والمعروفة باسم الإلكترون الثاقب Auger electron. بعد ملء الشاغر الأولي initial vacancy is filled، سيتم ملء الشاغر vacancies أو الشاغر الجديد new vacancy وستستمر هذه العملية مع سلسلة من الأحداث cascade of events التي قد تترك الذرة في النهاية finally leave the atom في حالة تأين عالية highly ionized state.

### 2.2.2. استطارة تومسون Thomson scattering

أعطى تومسون J.J. Thomson أول علاج first treatment لتشتت الفوتونات (استطارة الفوتونات scattering of photons) بواسطة الإلكترونات في السنوات الأولى very early years من القرن العشرين 20th century. كانت محاولة مبكرة للتحقيق في الطريقة التي من المتوقع أن تتفاعل بها الأمواج التي وصفتها معادلات ماكسويل مع الإلكترون المكتشف حديثاً interact with the newly discovered electron. اشتقاقه له أهمية تاريخية، لأنه يعتمد على فيزياء كلاسيكية classical physics وينتج وصفاً لتشتت الفوتون photon scattering الذي لا معنى له إلا في حدود الطاقة المنخفضة low energy limit لهذا التفاعل.



الشكل: 2.2. زوايا الاستطارة *scattering angles* والزوايا الصلبة *solid angle*. استطارة سقوط الفوتون *photon incident* على عنصر حجم صغير  $dV$  عبر الزاوية  $\theta$  في عنصر الزاوية الصلبة  $d\Omega$ .

نعطي نتائج تومسون هنا كخطوة أولى first step نحو علاج towards the treatment المقاطع العرضية المتناسكة وغير المتناسكة coherent and incoherent cross-sections للاستطارة من الذرات scattering from atoms. نحتاج أولاً إلى تقديم مفهوم المقطع العرضي التفاضلي differential cross-section. بينما يرتبط المقطع العرضي الإجمالي total cross-section باحتمال تفاعل الفوتون photon will interact، يرتبط المقطع العرضي التفاضلي ( $d\sigma / d\Omega$ ) باحتمالية تفاعل الفوتون photon will interact وانتشاره scattered في الزاوية الصلبة ( $d\Omega$ ) الشكل 2.2. هذا الاحتمال يتناسب probability is proportional مع:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega \quad (2.5)$$

ويتم الحصول على المقطع العرضي الكلي total cross-section من خلال التكامل على جميع الزوايا الصلبة : integrating over all solid angles

$$\sigma = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega \quad (2.6)$$

في الأشعة التشخيصية ، يكون لشكل المقطع العرضي التفاضلي differential cross-section تأثير مهم important influence على كمية الإشعاع المتناثرة (المستطارة) amount of scattered radiation التي تسجلها مستقبلات الصورة image receptor .

بالنسبة لتشتت الفوتون بواسطة إلكترون حر واحد single free electron ، أوضح ثومسون أن المقطع التفاضلي differential cross-section ، عند زاوية التشتت  $(q)$  ، يُعطى بتعبير بسيط إلى حد ما:

$$\frac{d\sigma_{Th}}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} (1 + \cos^2 \theta) \quad (2.7)$$

في هذا التعبير  $(r_0)$  هي "نصف القطر الكلاسيكي للإلكترون" classical radius of the electron وتعطى بواسطة:

$$r_0 = \frac{ke^2}{m_0 c^2} = 2.81794 \times 10^{-15} \text{ m} \quad (2.8)$$

حيث:

$k$ : هو ثابت التناسب من قانون كولوم Coulomb's law .

$e$ : هي الشحنة على الإلكترون the charge on the electron .

$m_0$ : هي الكتلة المستقرة للإلكترون the rest mass of the electron .

$c$ : هي سرعة الضوء the speed of light .

يمكن أن نرى أن المعادلة 7.2 المتوقعة أن تكون نفس كمية الطاقة المستطارة energy will be scattered للأمام كما للخلف forward as backward ، وأيضًا أن الطاقة المستطارة energy scattered في الزوايا الصحيحة right angles ستكون نصف هذه الكمية half this amount . إلا في الطاقات المنخفضة low energies ، هذه النتيجة لا تتفق result does not agree مع الملاحظة observation أو مع التنبؤات الصادرة predictions made عن ميكانيكا الكم quantum mechanics .

تصف المعادلة 7.2 احتمال تشتت الإشعاع (استطارة الشعاع) probability of scattering radiation من خلال وحدة زاوية صلبة unit solid angle متمركزة على زاوية الاستطارة scattering angle  $(q)$  . تتضمن طريقة بديلة للتعبير عن المقطع العرضي للاستطارة التفاضلي differential scattering cross-section وصف احتمال describing the probability of scattering في زاوية

## فيزياء الأشعة التشخيصية

صلبة موصوفة solid angle described بواسطة حلبة حلقية annular ring بعرض زاوي  $(d\theta)$ ، تركزت على زاوية  $(\theta)$ . بالنسبة للفوتونات الساقطة غير المستقطبة unpolarized incident photons لا يوجد اعتماد لاحتمال الاستطارة scattering probability على زاوية الاستطارة السمتي azimuthal scattering angle، ويمكننا بعد ذلك استخدام العلاقة بين الزاويتين الصلبتين two solid angles :

$$d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta \quad (2.9)$$

وبالتالي يتم الحصول على المقطع العرضي الإجمالي total cross-section للاستطارة ثومسون Thomson scattering باستخدام معادلة 9.2. لتحويل  $(d\Omega)$  إلى  $(d\theta)$  ودمج المقطع العرضي للاستطارة التفاضلي integrating the differential scattering cross-section معادلة 2.7 على جميع زوايا الاستطارة من  $(0)$  إلى  $(\pi)$  التكامل بسيط للغاية ويعطي:

$$\sigma_{Th} = \frac{r_0^2}{2} \int_0^\pi 2\pi (1 + \cos^2\theta) \sin\theta d\theta = \frac{8\pi r_0^2}{3} = 66.52 \times 10^{-30} \text{ m}^2 \quad (2.10)$$

وهو ثابت، متوقعًا أن احتمال الاستطارة الكلاسيكي classical scattering probability مستقل independent عن طاقة الإشعاع الكهرومغناطيسي electromagnetic radiation energy. هذا، بطبيعة الحال، غير صحيح، ولكن سوف نرى في القسم 4.2.2 أن تكامل في المعادلة 10.2 هو المصطلح الأول للنتيجة الأكثر دقة التي تم الحصول عليها باستخدام ميكانيكا الكم (لتأثير كومبتن for the compton effect) بمعنى آخر، النتيجة التي حصلت عليها الفيزياء الكلاسيكية هي النتيجة التي تقدمها ميكانيكا الكم عندما تقترب طاقة الفوتون من الصفر photon energy approaches zero .

### 3.2.2 استطارة رايلي المتشابهة Coherent (Rayleigh) scattering

في اشتقاق التعبير عن استطارة ثومسون Thomson scattering، كان من المفترض أن الإلكترونات كان حراً electron was free، وحده وفي حاله مستقرة alone and at rest. في الواقع، ينتشر الفوتون photon is scattered بشكل جماعي collectively بواسطة الإلكترونات الذرية atomic electrons، التي ليست حرة not free، وقربها proximity من بعضها البعض to one another لا يختلف اختلافاً كبيراً عن طول موجة الإشعاع wavelength of the radiation. في التشتت المترابط coherent scattering، لا يضيع الفوتون الطاقة بشكل أساسي لأنه ينقل الزخم transfers momentum إلى الذرة atom وينتشر عبر الزاوية  $(\theta)$  يكون تشتت الاستطارة بواسطة الإلكترونات المختلفة scattering by the different electrons في الطور ويتم تحديد التوزيع الزاوي angular distribution الناتج بواسطة مخطط تداخل مميز للذرة characteristic of the atom. ثم يتم إعطاء المقطع العرضي التفاضلي differential cross-section بواسطة:



$$\frac{d\sigma_{\text{coh}}}{d\Omega} = \frac{d\sigma_{\text{Th}}}{d\Omega} F^2(x, Z) \quad (2.11)$$

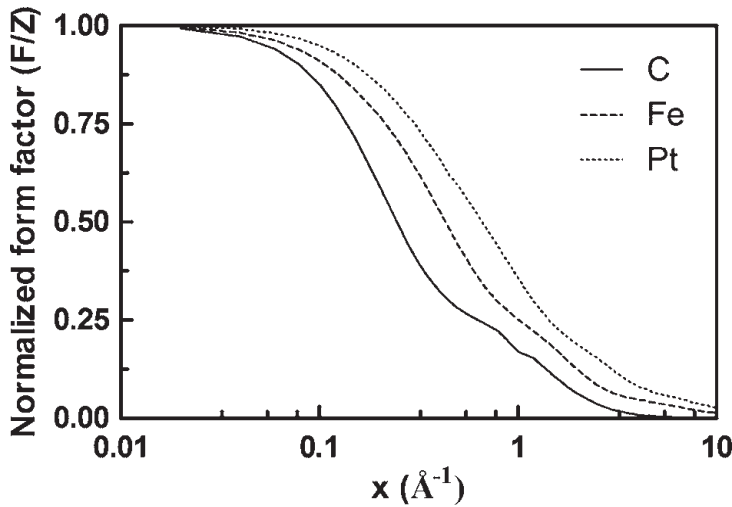
((بالمعنى الدقيق للكلمة، تنطبق حالة عدم حدوث تغيير في طاقة الفوتون photon energy على الإطار القصوربي inertial frame الذي يكون فيه الزخم الكلي total momentum للذرة بالإضافة إلى الفوتون صفرًا (atom plus photon is zero))

هو معامل استقطار تومسون التفاضلي من معادلة 7.2  $\frac{d\sigma_{\text{Th}}}{d\Omega}$

والكمية ( $F$ ) هي عامل الشكل المتماسك coherent form factor. يمكن حسابها باستخدام النماذج الميكانيكية الكمومية quantum mechanical models وهي دالة للرقم الذري للذرة number of the atom ( $Z$ )، والمعلمة parameter ( $x$ )، والتي يتم الحصول عليها بواسطة:

$$x = \frac{\sin(\theta/2)}{\lambda} \quad (2.12)$$

حيث ( $\lambda$ ) هو الطول الموجي wavelength للفوتون الساقط incident photon. تتناسب عامل التغيير ( $x$ ) parameter proportional مع نقل الزخم transfer of momentum بين اتجاهات الفوتون الأولية والمستقطار initial and scattered photon directions.

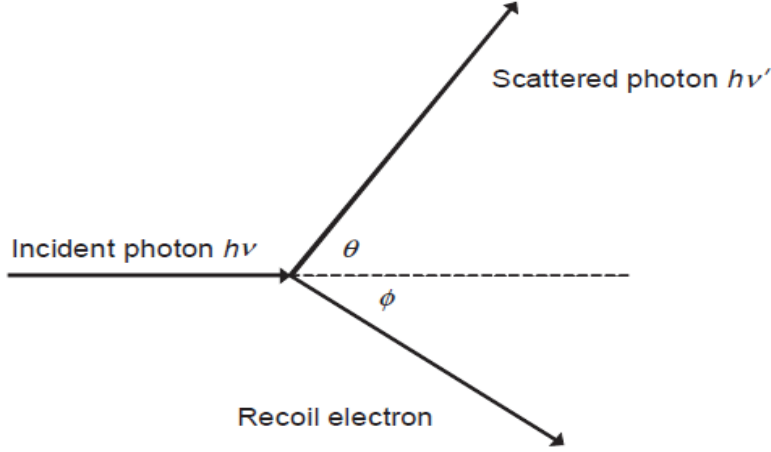


الشكل: 3.2. تباين عامل الشكل المقيس ( $F/Z$ ) للاستقطار المتماسك coherent scattering مع عامل تغيير نقل الزخم ( $x$ ) momentum transfer parameter يتم عرض القيم الخاصة بالكربون (C) والحديد (Fe) بيانات من المرجع [1.2].

بالنسبة إلى التشتت في الاتجاه الأمامي scattering in the forward direction، تعمل جميع الإلكترونات الذرية معًا atomic electrons act together، و ( $F$ ) تساوي العدد الذري atomic number number ويعتمد المقطع العرضي cross-section التفاضلي على ( $Z^2$ ) كلما زادت زاوية الاستقطار

## فيزياء الأشعة التشخيصية

scattering angle increases، تتناقص (F) decreases لأن الإلكترونات تزداد صعوبة للاستطارة في الطور دون نقل اي من الطاقة without any energy transfer. ومع ذلك، لقيمة معينة لزاوية الاستطارة value of the scattering angle، يزيد عامل الشكل المتشابه الطبيعي normalized coherent form factor (F / Z)، مع زيادة العدد الذري increasing atomic number. يوضح الشكل 3.2 عامل الشكل الطبيعي لثلاثة عناصر مختلفة.



الشكل: 4.2. هندسة تشتت كومبتون *Geometry for Compton scattering*.

### 4.2.2. استطارة كومبتون بواسطة الإلكترونات الحرة Compton scattering by free electrons

استطارة كومبتون Compton scattering، مثل استطارة تومسون Thomson scattering، هو التفاعل بين الإشعاع الكهرومغناطيسي electromagnetic radiation والإلكترون الحر free electron، ولكن في هذه الحالة هناك نقل للطاقة إلى الإلكترون energy transfer to the electron. نحن نعتبر هذه الحالة قبل معالجة الاستطارة غير المترابط treating incoherent scattering بواسطة الذرة. نطاق الطاقة energy range بحيث يجب استخدام النسبية relativity وميكانيكا الكم quantum mechanics لاستخلاص تعبيرات derive expressions المقطع العرضي. يجب اعتبار كل من الفوتون photon والإلكترون electron جزيئات particles. يظهر الترتيب الهندسي في الشكل 4.2، حيث يأتي الفوتون من اليسار مع الطاقة (hv) والزخم (hv / c) إنه تصادم يشبه كرة البلياردو billiard-ball-like collision مع الإلكترون ويستطير عبر الزاوية (θ)، مع الطاقة (hv) والزخم (hv' / c) يتراجع الإلكترون recoils في الزاوية (φ) مع الطاقة الحركية (Te) والزخم kinetic energy (pe) باستخدام الحفاظ conservation على الطاقة والزخم energy and momentum، يمكننا استخلاص العديد من العلاقات المفيدة several useful relations، مثل نسبة طاقة الفوتون المستطارة scattered photon energy (hv')، إلى طاقة الفوتون الساقطة (hv) incident photon energy:

$$\frac{hv'}{hv} = \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \quad (2.13)$$

حيث  $(\alpha)$  هي النسبة بلا أبعاد dimensionless ratio  $(hv / m_0c^2)$  العلاقة بين زاوية الفوتون المستطارة scattered photon angle وزاوية الإلكترون المستطارة scattered electron angle هي:

$$\cot\phi = (1 + \alpha) \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.14)$$

والإلكترون المستطار لديه طاقة حركية kinetic energy تعطى بواسطة:

$$T_e = hv - hv' = \frac{\alpha(1 - \cos\theta)hv}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \quad (2.15)$$

هذه هي علاقات كومبتن Compton relations يصفون حركات describe the kinematics التفاعل ولكنهم لا يقولون شيئاً عن احتمال التفاعل probability of interaction أو المقطع العرضي cross-section. في نطاق الطاقة التشخيصية diagnostic energy range، تكون البارامتر (العامل أو المؤشر) parameter  $(\alpha)$  صغيرة، ونتيجة لذلك as a consequence، فإن نقل الطاقة energy transfer إلى الإلكترون الارتداد recoil electron صغير أيضاً، حيث يمثل صفراً في الاتجاه الأمامي forward direction ويستحوذ على قيمته الأكبر largest value عندما عودة استطارة الفوتون photon is backscattered. ويتجلى هذا demonstrated في الشكل 5.2، مما يدل على العلاقة relationship بين الساقط وطاقت الفوتون المستطارة scattered photon energies. بالنسبة إلى (20keV و 50keV و 100keV) فوتون، يبلغ الحد الأقصى لعمليات نقل الطاقة إلى الإلكترون الارتداد (1.5keV و 8.2keV و 28.1keV) على التوالي.

المقطع العرضي cross-section لإستطارة الفوتون scattering of a photon  $(hv)$  من خلال زاوية معينة  $(\theta)$ ، تم اشتقاقها لأول مرة في عام 1928 بواسطة كلاين ونيشينا Klein and Nishina باستخدام نظرية ديراك للإلكترون Dirac theory of the electron. كلاين ونيشينا Klein and Nishina تم الحصول على التعبير التالي following expression عن المقطع العرضي التفاضلي differential cross-section لإستطارة الفوتونات scattering of photons بواسطة إلكترون حر واحد : single free electron

$$\frac{d\sigma_{KN}}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} (1 + \cos^2\theta) f_{KN} \quad (2.16)$$

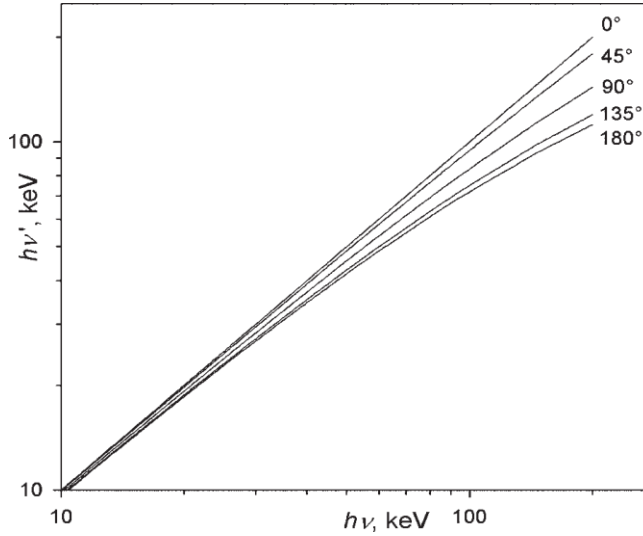
Where

$$f_{KN} = \left\{ \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right\}^2 \left\{ 1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{[1 + \alpha(1 - \cos\theta)][1 + \cos^2\theta]} \right\} \quad (2.17)$$

يقال هذا المقطع العرضي cross-section reduces إلى المقطع العرضي لثومسون Thomson cross-section عندما تكون  $\alpha \rightarrow 0$  (that is,  $h\nu/h\nu \rightarrow 1$ )

علماً أنه كان حساب احتمالات التفاعل لتأثير كومبتون Compton effect بواسطة كلاين ونيشينا Klein and Nishina أحد أول الاختبارات الناجحة لميكانيكا الكم first successful tests of quantum mechanics.

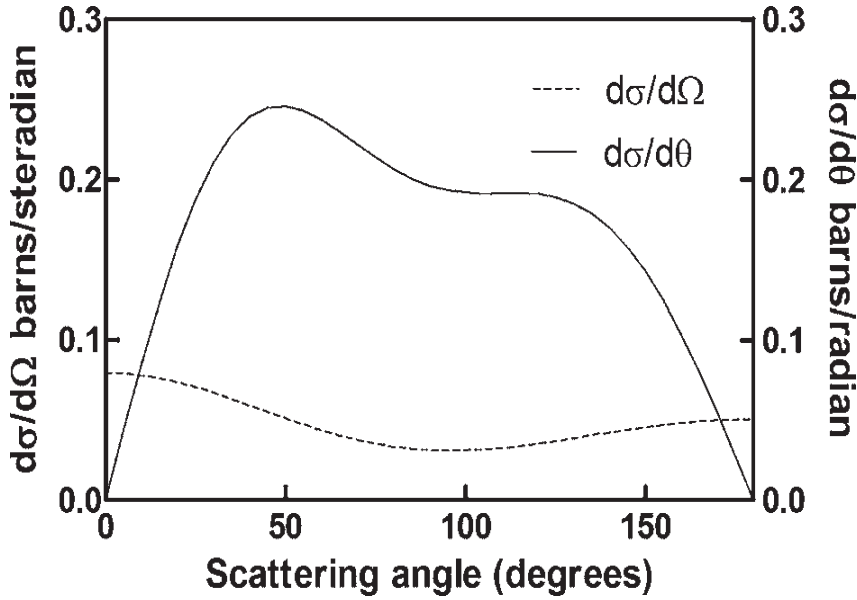
يوضح الشكل 6.2 المقطع العرضي للإستطارة التفاضلي differential scattering cross-section المرسوم كدالة function لزواوية استطارة (تشتت) الفوتون photon scattering angle المرسومة بطريقتين plotted in two ways. المنحنى السفلي lower curve هو رسم بياني للمعامل التفاضلي لكل سترادي steradian، أما المنحنى العلوي upper curve فهو رسم بياني للمعامل التفاضلي لكل زاوية استطارة وحدة per unit scattering angle. الاستطارة التفاضلي differential scattering المقطع العرضي  $(d\sigma/d\theta)$  يساوي صفرًا في الاتجاه الأمامي نظرًا لأن  $(\sin\theta)$  تساوي الصفر انظر المعادلة 9.2.



الشكل: 5.2. طاقة الفوتون الثانوية  $h\nu'$  مقابل طاقة الفوتون الأولية  $h\nu$  لتفاعلات كومبتون *compton interactions* وزوايا الانتثار المختلفة . various scattering angles

يتم الحصول على المقطع العرضي الكلي لكومبتن total Compton cross-section (احتمال التفاعل لكل إلكترون probability of interaction per electron) لفوتون الطاقة  $(h\nu)$ ، من خلال دمج معادلة 16.2 باستخدام معادلة 9.2 والمدى الزاوي  $(\theta)$  لـ  $(\pi)$  إلى  $(0)$  والنتيجة هي:

$$\sigma_{KN}(h\nu) = 2\pi r_0^2 \left\{ \left( \frac{1+\alpha}{\alpha^2} \right) \left( \frac{2(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \frac{\ln(1+2\alpha)}{\alpha} \right) + \frac{\ln(1+2\alpha)}{2\alpha} - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^2} \right\} \quad (2.18)$$



الشكل: 6.2 . المقاطع العرضية التفاضلية لكومبتن *Compton differential cross-sections* الاستطارة الفوتونات من (70 keV).

### 5.2.2. معاملات الاستطارة ونقل الطاقة Scattering and energy transfer coefficients

في عملية استطارة (تشتت) scattering process الإلكترون الحر غير المترابط incoherent free electron، يتم تقسيم طاقة الفوتون الأولية initial photon energy بين الفوتون المستطار scattered photon والإلكترون المتراجع recoiling electron. يمكن الحصول على معامل نقل الطاقة التفاضلي باستخدام المعادلة:

$$\frac{d\sigma_{tr}}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} (1 + \cos^2\theta) f_{KN} \left( \frac{\alpha(1 - \cos\theta)}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right) \quad (2.19)$$

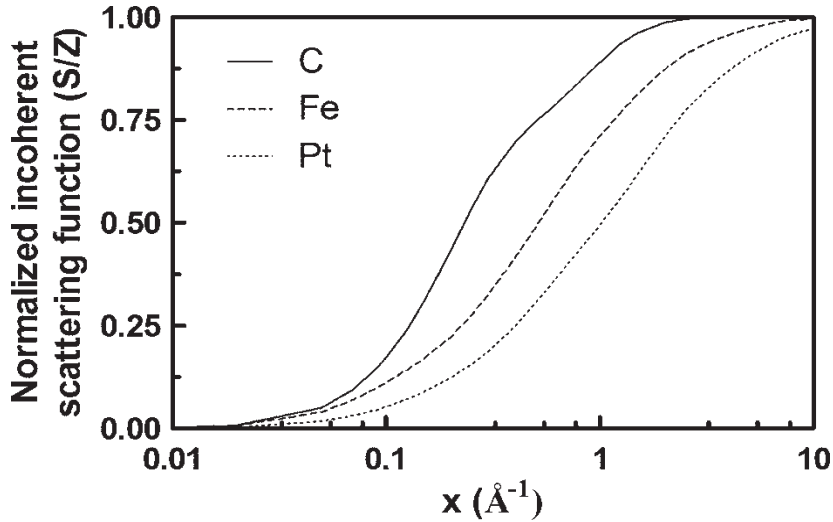
يمكن دمج هذا على جميع الزوايا all angles لإعطاء  $(\sigma_{tr})$ ، معامل نقل الطاقة energy transfer coefficient. عندئذ يكون معامل الانتشار هو، بحكم تعريفه، الفرق بين إجمالي المقطع العرضي لإستطارة كومبتن total cross-section for Compton scattering ومعامل نقل الطاقة energy transfer coefficient :

$$\sigma_s = \sigma_{KN} - \sigma_{tr} \quad (2.20)$$

### 6.2.2. الاستطارة الغير متشاكه Incoherent scattering

بالنسبة لتشتت كومبتن Compton effect، كما هو الحال مع تشتت طومسون Thomson scattering، من المفترض أن الإلكترون حر ومستقر electron is free and at rest. بالنسبة للاستطارة غير المتشاكه incoherent scattering بواسطة الإلكترونات الذرية المربوطة bound atomic electrons، تتم إضافة مساهمات contributions الإلكترونات الفردية individual electrons ويأخذ المقطع التفاضلي differential cross-section الشكل:

$$\frac{d\sigma_{incoh}}{d\Omega} = \frac{r_0^2}{2} (1 + \cos^2 \theta) f_{KN} S(x, Z) \quad (2.21)$$



الشكل: 7.2. تباين دالة الاستطارة غير المترابطة المقيسة  $(S / Z)$  مع عامل نقل الزخم  $(x)$  يتم تقديم البيانات الخاصة بالكربون (C) carbon والحديد (Fe) iron والبلاتين (Pt) platinum بيانات من المرجع [2.2].

تُعرف الدالة  $(S)$  باسم دالة الاستطارة الغير مترابط (الغيرمتشاكه) incoherent scattering function، وكما هو الحال مع عامل الشكل المترابط coherent form factor، فهي دالة عالمية universal function لكمية نقل الزخم momentum transfer quantity  $(x)$  والرقم الذري atomic

number. قيمة (S) تساوي صفرًا في الاتجاه الأمامي forward direction وتزداد بزيادة نقل الزخم increases with increasing momentum transfer، لتصل إلى قيمة (Z)، عدد الإلكترونات لكل ذرة number of electrons per atom. هذه الزيادة تصبح أبطأ مع زيادة increase becomes slower مع زيادة العدد الذري atomic number increases. كما موضح illustrated في الشكل 7.2، مما يدل على وظيفة الاستطارة غير المترابطة الطبيعية (S/Z) لثلاثة عناصر.

يتم الحصول على المقطع العرضي الكلي للاستطارة غير المترابطة total cross-section for incoherent scattering من خلال التكامل العددي numerical integration للمعادلة 21.2. في العديد من المواقف، تكون مساوية تقريبًا للمقطع العرضي للإلكترون المفرد Single electron cross-section مضروبة multiplied في عدد الإلكترونات في الذرة : number of electrons in the atom

$$\sigma_{\text{incoh}} \approx Z \sigma_{\text{KN}} \quad (2.22)$$

### 7.2.2. إنتاج الزوج والإنتاج الثلاثي Pair and triplet production

عندما يمر فوتون عالي الطاقة high energy photon بالقرب من نواة ذرية atomic nucleus، قد يتفاعل الفوتون photon مع مجال كولوم النووي nuclear coulomb field بواسطة عملية تسمى إنتاج الزوج pair production. يتم تحويل الفوتون إلى زوج إلكترون - بوزيترون electron-positron pair، ولكل منهما طاقته الحركية الخاصة own kinetic energy. ميزان الطاقة energy balance هو:

$$h\nu = T_+ + T_- + 2m_0c^2 \quad (2.23)$$

بشرط أن تتجاوز طاقة الفوتون عتبة طاقة التفاعل energy threshold for the interaction (1022 keV)  $(2m_0c^2)$ . لا يمكن أن يحدث إنتاج الزوج للفوتونات مع طاقات أقل من هذا. عندما يحدث إنتاج الزوج في مجال النواة field of the nucleus، يختلف المقطع العرضي لهذا التفاعل تقريبًا كـ  $(Z^2)$ ، حيث (Z) هي الشحنة النووية nuclear charge.

يمكن أن تحدث العملية أيضًا في مجال الإلكترون field of an electron. ثم يطلق عليه الإنتاج الثلاثي لأن الإلكترون المستهدف هو نفسه target electron is itself طرد بقوة كبيرة ejected with considerable energy. وبالتالي يتم تعيين إلكترونين وبوزيترون واحد one two electrons and one positron. عتبة الطاقة للإنتاج الثلاثي هي  $(4m_0c^2)$ . تُعد عتبات thresholds الإنتاج المزدوج والزوج أعلى بكثير من طاقات الفوتون photon energies ذات الصلة relevant بالأشعة التشخيصية.

### 3.2. معاملات توهين الفوتون PHOTON ATTENUATION COEFFICIENTS

كانت المناقشة أعلاه متعلقة بتفاعل الفوتونات interaction of photons مع الذرات الفردية individual atoms، ولكن من الضروري أيضًا النظر في السلوك المجهرى macroscopic

behaviour للفوتونات التي تعبر المادة photons traversing matter. لهذا الغرض، يتم استخدام معاملات التوهين الخطي والكتلي linear and mass attenuation coefficients، والتي ترتبط ببساطة بالقسم العرضي الإجمالي total cross-section. كما هو مذكور في المقدمة، قد تخضع الفوتونات لأكثر من تفاعل more than one interaction أثناء مرورها بكميات كبيرة pass through bulk material. على سبيل المثال، قد يتبع التفاعل المستطار الأولي initial scatter interaction عملية استطارة ثانية second scattering process، والتي بدورها قد يتبعها استطارة ثالث third scatter أو امتصاص كهروضوئي photoelectric absorption أو عدم وجود تفاعلات أخرى no further interactions، مع ترك الفوتون المادة السائبة (المادة الأساسية) bulk material. تقدم معاملات التوهين الخطي والكتلي linear and mass attenuation معلومات حول مرور radiation field الفوتونات الأولية primary photons عبر المادة. سيشمل مجال الإشعاع scattered photons في الوسط المتعمق في الوسط أيضاً فوتونات مستطارة scattered photons، والتي تساهم أيضاً في الجرعة داخل الوسط dose within the medium. ستتضمن حزمة الخروج من المادة السائبة bulk material أيضاً فوتونات أولية ومستطارة primary and scattered photons. كما ذكرنا سابقاً، من الأفضل تقدير هذه التأثيرات باستخدام تقنيات مونت كارلو Monte Carlo techniques.

### 1.3.2. معامل التوهين الخطي Linear attenuation coefficient

ضع في اعتبارك لوحًا موحدًا رقيقًا thin uniform slab من مادة السماكة material of thickness (dx) والذي يتم تشعيه irradiated مع حزمة من الفوتونات الساقطة beam of photons incident عادةً على اللوح slab. قد تمر الفوتونات الفردية عبر اللوح دون تفاعل without interacting، أو قد يتم امتصاصها absorbed أو قد تكون مبعثرة scattered. من المناقشة في القسم 2.2. ويترتب على ذلك احتمال probability أن يتفاعل الفوتون الفردي individual photon will interact في هذا القسم الضئيل من خلال:

$$N_a \sigma dx \quad (2.24)$$

حيث ( $N_a$ ) هو عدد مراكز التفاعل number of interaction centers (الذرات) (atoms) لكل وحدة حجم per unit volume و ( $\sigma$ ) هو إجمالي المقطع التفاعلي لكل ذرة total interaction cross-section per atom.

تُعرف الكمية ( $N_a \sigma$ ) بمعامل التوهين الخطي linear attenuation coefficient ويُشار إليها عادةً بـ ( $\mu$ ) بالنسبة للاستطارة بواسطة الذرات scattering by atoms، يمكن حساب ( $N_a$ ) من ثابت أفوكادرو ( $N_A$ )، الوزن الذري atomic weight ( $A_r$ )، والكثافة ( $\rho$ )، لذلك يصبح لدينا:



$$\mu = N_a \sigma = \frac{1000 N_A \rho \sigma}{A_r} \quad (2.25)$$

هذا التعبير في وحدات (SI) ، بحيث تكون أبعاد  $(\mu)$  هي  $(\text{m}^{-1})$ .

### 2.3.2. التوهين الأسي Exponential attenuation

نعتبر الآن لوح سميك thick slab من المواد material  $\Phi(x)$  يمثل الفلورة fluence (انظر القسم 1.2.3 للتعرف على الفلورة fluence) من الفوتونات التي لم تتفاعل في اللوح بعد المرور عبر السماكة  $(x)$ . التغيير المتوقع expected change  $(d\Phi)$ ، في هذه الفلورة fluence بعد المرور عبر سماكة thickness إضافية  $(dx)$  يعطى بواسطة:

$$d\Phi = -\Phi \mu dx \quad (2.26)$$

حيث يتم استخدام علامة سالبة negative sign للدلالة على أن  $(\Phi)$  أخذ في التناقص. المعادلة 26.2 هي إعادة صياغة معادلة 24.2 ودمج معادلة 26.2 تعطي المعادلة التالية:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\mu x} \quad (2.27)$$

حيث  $(\Phi_0)$  هي القيمة الأولية للفلورة initial value of the fluence. هذه هي المعادلة التي تصف التوهين الأسي exponential attenuation لحزمة الفوتون photon beam. يعرف بقانون البيرة Beer's law. تجدر الإشارة إلى أنه يصف عدد الفوتونات describes the number of photons التي لم تتفاعل not interacted، والتي تعرف أيضاً باسم الفوتونات الأولية primary photons. في الطاقات التشخيصية diagnostic energies، قد تكون الفوتونات الأخرى موجودة في العمق present at depth، ناتجة عن تفاعلات استطرارة الفوتون photon scattering interactions أو انبعاث فوتونات الفلورسنت emission of fluorescent photons بعد تفاعل كهروضوئي photoelectric interaction.

### 3.3.2. معامل التوهين الكتلي Mass attenuation coefficient

يعتمد معامل التوهين الخطي linear attenuation coefficient  $(\mu)$  على الكثافة dependent on density، وبدوره يعتمد على الحالة المادية للمادة physical state of the material. نتيجة لذلك،  $(\mu)$  ليست كمية مناسبة لتجميع البيانات data compilations، ويتم استخدام الكمية ذات الصلة  $(\mu / \rho)$ ، والتي هي مستقلة عن الكثافة independent of density، بدلاً من ذلك. تُعرف هذه الكمية بمعامل التوهين الكتلي mass attenuation coefficient وأبعادها متر مربع لكل كيلوغرام  $(\text{m}^2/\text{kg})$ . تجدر الإشارة إلى

أنه في معظم مجموعات البيانات، يتم إعطاء معاملات التوهين الكتلي بوحدات تبلغ السنتيمترات المربعة لكل كرام (cm<sup>2</sup>/g) لأنه تم التعبير عنها تاريخياً بهذه الطريقة وهذا يوفر أرقاماً سهلة للمعالجة . convenient to manipulate

#### 4.3.2. معاملات نقل الطاقة الكتلية ومعاملات امتصاص الطاقة

##### Mass energy transfer coefficients and mass energy absorption coefficients

لأغراض قياس الجرعات for dosimetric purposes، من الضروري necessary معرفة الطاقة المنقولة energy transferred إلى الإلكترونات الثانوية secondary electrons نتيجة للتفاعل الأولي initial interaction. الخطي (μ<sub>tr</sub>) ومعاملات نقل الطاقة الجماعية mass energy transfer coefficients (μ<sub>tr</sub>/ρ) بحساب هذه الطاقة. يتم تعريف كل من الكميات باستخدام:

$$\mu_{tr} = \mu \frac{\langle T \rangle}{h\nu} \quad (2.28)$$

حيث  $\langle T \rangle$  هي القيمة المتوقعة للطاقة المحولة energy converted إلى إلكترونات ثانوية secondary electrons .

بالنسبة لفوتونات الطاقة photons of energy ( $h\nu$ ) التي تعبر مسافة traversing a distance ( $dx$ ) في المادة ، تُعطى الطاقة ( $d(h\nu)_{tr}$ ) المنقولة بواسطة التفاعلات transferred by interactions إلى الطاقة الحركية kinetic energy للإلكترونات بواسطة:

$$d(h\nu)_{tr} = \Phi h\nu \mu_{tr} dx \quad (2.29)$$

يمكننا استخدام هذا التعبير لحساب كيرما kerma في المادة المحددة ببساطة simply dividing عن طريق قسمة الكتلة على وحدة المساحة التي تم عبورها ( $dm = \rho dx$ )، للحصول على:

$$K = \frac{d(h\nu)_{tr}}{dm} = \Phi h\nu \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) \quad (2.30)$$

يتم فقد بعض الطاقة المنقولة energy transferred إلى الجزيئات الثانوية المشحونة secondary charged particles في العمليات الإشعاعية في المادة radiative processes in the material، وخصوصاً شعاع الكبح bremsstrahlung لتأخذ في الاعتبار هذا، نحن نستخدم معامل امتصاص الطاقة الشاملة (μ<sub>en</sub> / ρ) mass energy absorption coefficient، المعطى من قبل:

$$\left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right) = \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) (1-g) \quad (2.31)$$

حيث (g) هي جزء الطاقة المفقود energy fraction lost في العمليات الإشعاعية radiative processes. بالنسبة للطاقات المستخدمة energies used في الأشعة التشخيصية، يمكن اعتبار (g) صفرًا.

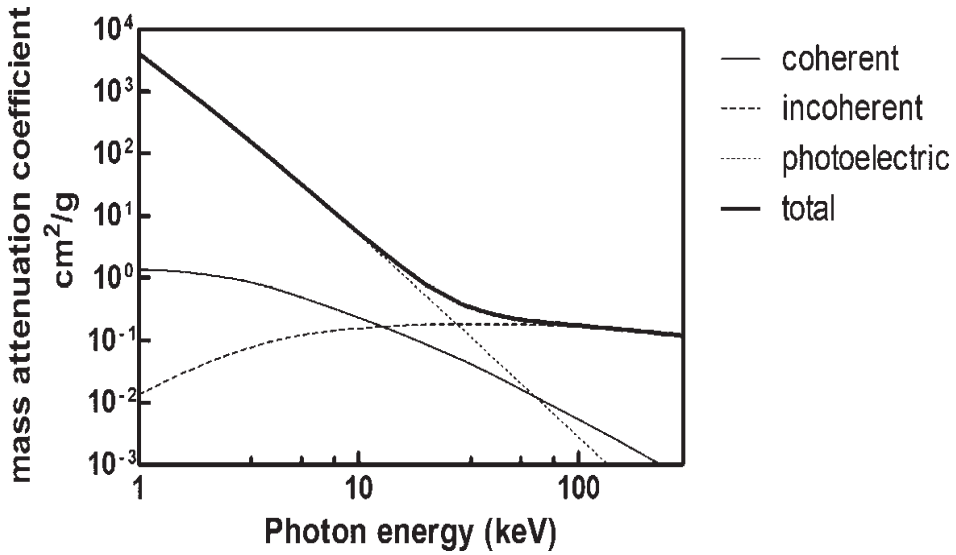
## 5.3.2. مساهمة التفاعلات الفردية في معامل التوهين الشامل الكلي

## Contribution of individual interactions to the total mass attenuation coefficient

نحن الآن نعتبر الآليات الأربع المختلفة اختلافاً واضحاً و four distinctly different mechanisms والتي من خلالها تتفاعل الفوتونات مع المادة photons may interact with matter. يتنافسون جميعاً، حيث قد تحدث occur جميعاً في أي حزمة من الفوتونات beam of photons، كل حسب احتمالته الفردي individual probability. وعليه، فإن معامل التوهين الشامل الكلي هو مجموع جميع معاملات التوهين الجماعي الفردي، وباستخدام (معادلة 25.2)، نحصل على : we obtain

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \left(\frac{\tau}{\rho}\right) + \left(\frac{\mu_{\text{coh}}}{\rho}\right) + \left(\frac{\mu_{\text{inc}}}{\rho}\right) + \left(\frac{\kappa}{\rho}\right) = (\tau + \sigma_{\text{coh}} + \sigma_{\text{inc}} + \kappa) \frac{N_A}{A_r} 1000 \quad (2.32)$$

يعتمد حجم كل معامل توهين size of each attenuation coefficient على طاقة الفوتون photon energy والعدد الذري للمادة atomic number. حيث يوضح الشكل 8.2 معاملات التوهين الشامل mass attenuation coefficients للمياه في طاقات الفوتون photon energies من (1 keV) إلى (300 keV).



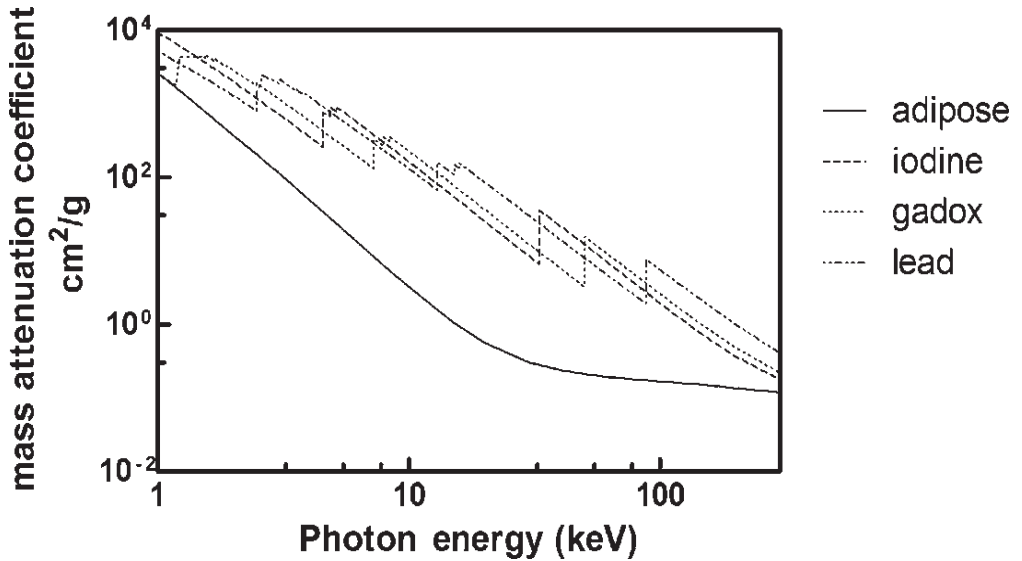
الشكل: 8.2. معاملات التوهين الشامل للمياه لكل من التفاعلات التي تمت مناقشتها. أعلى طاقة معروضة هي أقل من عتبات إنتاج الزوج والثلاثي (بيانات من المرجع [3.2]).

التفاعل الكهروضوئي photoelectric interaction يجعل المساهمة المهيمنة dominant contribution في إجمالي المقطع التفاعلي total interaction cross-section في أقل الطاقات lowest energies. يعتبر الانخفاض الحاد steep decrease في طاقات الفوتون السفلى lower photon energies.

## فيزياء الأشعة التشخيصية

energies سمة من سمات التأثير الكهروضوئي characteristic of the photoelectric effect وينتهي عندما يصبح الاستطارة غير المتشاكله incoherent (استطارة كومبتن Compton) سائدًا dominant، ويظل كذلك بالنسبة لبقية نطاق الطاقة التشخيصية diagnostic energy range. يعتمد موضع التقاطع crossover position بين هذين التفاعلين على العدد الذري atomic number، ولكن بالنسبة للمياه حوالي (30 keV).

يوضح الشكل 9.2 مقارنة معاملات التفاعل comparison of interaction coefficients للمواد المختلفة ذات الأهمية في الأشعة التشخيصية. في نطاق الطاقة يصل إلى (100 keV) وللحصول على المواد ذات العدد الذري العالي high atomic number materials، فإن الانقطاعات الناشئة the discontinuities arising عن الاختلافات في الامتصاص الكهروضوئي عند حواف (K و L و M) واضحة. الاختلافات في الامتصاص differences in absorption التي ينتج عنها هذا مهمة لتصميم المرشحات important for the design of filters المستخدمة لتشكيل أطيف الأشعة السينية shape X- ray spectra (خاصة في التصوير الشعاعي للثدي والتصوير باستخدام عوامل التباين المعالج باليود) (particularly in mammography and for imaging using iodinated contrast agents). يمكن أن يكون لموضع حافة edge (أو حافات edges) المواد المستخدمة في مستقبلات الصور image receptors تأثير مهم important influence على كفاءة الامتصاص absorption efficiency.



الشكل: 9.2. معاملات التفاعل الشامل الكلية للمواد ذات الصلة بالأشعة التشخيصية (الأنسجة الدهنية *adipose tissue*، اليود *iodine*، ثاني أكسيد الجادولينيوم *gadolinium oxysulphide* (*gadox*) والرصاص *lead* (بيانات تكوين الأنسجة *tissue composition data* من المرجع. [4.2]؛ معاملات التفاعل من المرجع. [3.2].

### 6.3.2. Coefficients for compounds and mixtures المعاملات للمركبات والمخاليط

يمكن الحصول على معاملات التوهين الكتلي Mass attenuation coefficients ومعاملات نقل الطاقة الكتلية mass energy transfer coefficients للمركبات والمخاليط العميقة compounds and intimate mixtures من خلال الجمع الموزون a weighted summation لمعاملات المكونات : coefficients of the constituents

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \sum_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i w_i; \quad \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right) = \sum_i \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right)_i w_i \quad (2.33)$$

حيث  $(w_i)$  هي الكسور ذات الوزن الطبيعي normalized weight fractions للعناصر  $(i)$  elements (أو مكونات الخليط  $(i)$ ) (or mixture components  $i$ ) الموجودة في جهاز الامتصاص present in the absorber. يمثل معامل امتصاص الطاقة الشامل mass energy absorption coefficient للخسائر الإشعاعية radiative losses للإلكترونات الثانوية secondary electrons. نظرًا لأن الإلكترون الثانوي الناشئ عن ذرة  $(A)$  سيعاني أيضًا من خسائر إشعاعية من المكونات الأخرى other constituents، فإن الإضافة البسيطة الموزونة simple weighted addition لا يمكن إلا أن تقارب approximate معامل امتصاص الطاقة الكلية mass energy absorption coefficient للمزيج mixture، طالما أن الخسائر الإشعاعية صغيرة radiative losses are small، والتي يتم الحصول عليها بعد ذلك بواسطة:

$$\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right) = \sum_i \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_i w_i \quad (2.34)$$

حيث الكسور الوزني weight fractions في حالة المركبات، يتم اشتقاق أجزاء الوزن المقيسة من النظر في التركيب الكيميائي للمركب والأوزان الذرية للعناصر الفردية  $(Ar)$  انظر القسم 3.1 وكذلك المرجع [5.2].

### 4.2. تفاعلات الإلكترونات بالمادة

#### INTERACTIONS OF ELECTRONS WITH MATTER

هناك آليتان رئيسيتان لفقدان الطاقة عن طريق الإلكترونات energy loss by electrons: الفقدان الأيوني أو الاصطدامي ionizational or collisional losses والخسائر الإشعاعية أو اشعاع الكبح radiative losses or bremsstrahlung. تتضمن العملية الرئيسية principal process لفقدان الطاقة energy loss عندما تمر الإلكترونات when electrons pass عبر المادة through matter تصادمات مع إلكترونات أخرى. نظرًا لأن لديهم نفس الكتلة same mass، فقد تكون خسائر الطاقة energy losses may كبيرة جدًا ويمكن أن تكون التغييرات في الاتجاه كبيرة جدًا changes in direction can also be quite large. بما أنه لا يمكن تمييز الإلكترونات cannot be distinguished، فمن المفترض أن الإلكترون الذي يترك الاصطدام original incident leaves the collision بأكثر قدر من الطاقة هو الإلكترون الساقط الأصلي

electron. هذا يعني أن الحد الأقصى لتبادل الطاقة maximum energy exchange سيكون نصف الطاقة الأصلية half the original energy. بالإضافة إلى ذلك، نظرًا للكتلة الصغيرة للإلكترون small mass of the electron، فقد تتفاعل أيضًا مع المجال الكهربائي electric field للنواة وتتباطأ بسرعة كبيرة بحيث يمكن تشجيع بعض طاقتها بعيدًا radiated away. يشار إلى ذلك باسم اشعاع الكبح bremsstrahlung وهي العملية الرئيسية المسؤولة عن إنتاج الأشعة السينية عندما تصطدم شعاع إلكتروني بالهدف electron beam strikes a target .

يوصف بشكل عام الطاقة المفقودة energy lost بواسطة الجسيمات المشحونة energy lost في المرور عبر المادة باستخدام كمية تسمى قدرة التوقف (S) stopping power. ويعرف هذا بأنه (S = dT / dx)، حيث dT هو فقدان الطاقة الحركية للجسيم kinetic energy of the particle أثناء انتقاله مسافة (dx) travels a distance. من الشائع التعبير عن المسافة من حيث الكتلة لكل وحدة مساحة للمادة mass per unit area of the material، مما يعطي قدرة إيقاف الكتلة (S/ρ):

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dT}{dx} \quad (2.35)$$

حيث (ρ) تمثل كثافة الكتلة للمادة mass density of the material

#### 1.4.2. التفاعلات الأيونية (الاصطدامية) وقوة التوقف الأيونية

##### Ionizational (collisional) interactions and ionizational stopping power

تتضمن هذه العملية process involves تصادمات بين الإلكترونات التي تنتقل عبر المادة the electrons that electrons travelling through matter and الإلكترونات التي تشكل جزءًا من المادة are part of the material dislodged from. والناتجة هي أن الإلكترونات قد تُخرج من ذراتها their atoms، مما يجعلها "مؤينة" ionized. ولهذا السبب فإن "الإشعاعات المؤينة" ionizing radiation' تحصل على اسمها. من الصعب قياس معدل الطاقة المفقودة energy lost بواسطة هذه التفاعلات interactions ولكن من السهل نسبيًا حسابها relatively easy to calculate. نظرًا لأن الإلكترونات صغيرة جدًا، فإن التأثيرات النسبية relativistic effects مهمة حتى في الطاقات الحركية المنخفضة جدًا quite low kinetic energies. يجب أيضًا استخدام ميكانيكا الكم Quantum mechanics وتم حل المشكلة أولاً problem was first solved عن طريق التنبيه في أوائل القرن العشرين 20th century. التعبير التالي هو صيغة (Bethe-Bloch)، التي قدمها ستيرنهايمر (Sternheimer)، وتعطي قوة توقف الكتلة الأيونية ionizational mass stopping power :

$$\frac{S_{\text{ion}}}{\rho} = 2\pi r_0^2 N_c \frac{\mu_0}{\beta^2} \left[ \ln \frac{T^2(T+2\mu_0)}{2\mu_0 I^2} + \frac{T^2/8 - (2T+\mu_0)\mu_0 \ln 2}{(T+\mu_0)^2} + 1 - \beta^2 - \delta \right], \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1} \quad (2.36)$$

تم استخدام بعض من هذا الترميز من قبل:  $(r_0)$  هو نصف القطر الكلاسيكي للإلكترون classical

$$N_e = N_A (Z / A_r) \text{ , radius of the electron'}$$

مع العلم أن:  $N_A$ : ثابت أفوكادرو Avogadro constant

$Z$ : هو العدد الذري atomic number

و  $A_r$ : الوزن الذري للمادة atomic weight of the material.

الكمية  $\mu_0 = m_0 c^2$  هي الكتلة الباقية للإلكترون مضروبة في سرعة الضوء التربيعي،

$T$ : هي الطاقة الحركية kinetic energy

و  $\beta$ : هي نسبة سرعة الإلكترون إلى سرعة الضوء ratio of the speed of the electron to

.that of light

تمت إضافة مصطلح تصحيح الكثافة density correction term  $(\delta)$ ، لاحقًا بواسطة (Sternheimer) تأثيره هو تقليل فقدان الطاقة effect is to reduce energy losses، ولكن فقط في الطاقات العالية high energies: عند (100 MeV)، يمكن أن تكون كبيرة مثل (20%).

$I$ : عبارة عن كمية شبيهة تجريبية تسمى "طاقة الإثارة المتوسطة" mean excitation energy، وهي خاصية للمادة وتزداد كلما زاد العدد الذري للمادة. يتم إعطاء قيم  $(I)$  لعدد كبير من المواد من قبل المعهد الوطني للمعايير والتكنولوجيا national institute of standards and technology .

في منطقة الطاقة المنخفضة low energy region، أقل من (100 keV) أو نحو ذلك، فإن المصطلح أمام الأقواس المربعة هو الأكثر أهمية square brackets is the most important. عامل  $(1/\beta^2)$  يجعل قدرة التوقف stopping power متناسبة عكسياً inversely proportional تقريباً مع الطاقة الحركية kinetic energy. بالنسبة للطاقات التي تزيد عن (100 keV)، فإن  $(\beta)$  هي في الأساس (1) ويصبح الحد الأمامي term in front ثابتاً تقريباً nearly constant. تزيد المصطلحات الموجودة داخل القوس المربع ببطء مع الطاقة وتميرير قدرة التوقف stopping power passes خلال through الحد الأدنى في منطقة (1 MeV) minimum in the region .

الاعتماد على العدد الذري dependence on atomic number ليس قويا. يحتوي العامل الموجود بين الأقواس المربعة على عدد الإلكترونات number of electrons لكل كتلة وحدة per unit mass وبما أن هذا يعطى بواسطة  $Na (Z / Ar)$ ، مع التذكير بأن  $(Z / Ar)$  هو (0.5) أو أقل قليلاً لجميع المواد باستثناء الهيدروجين except hydrogen، قدرة إيقاف الكتلة mass stopping power ينخفض قليلاً فقط decreases only slightly مع زيادة العدد الذري. تزيد طاقة الإثارة المتوسطة،  $I$ ، مع زيادة العدد الذري atomic number increases، مما يساعد أيضاً في جعل  $(S_{ion})$  أصغر بالنسبة للمواد ذات العدد الذري العالي high atomic number materials .

## 2.4.2. التفاعلات الإشعاعية وقدرة التوقف الإشعاعية

### Radiative interactions and radiative stopping power

عندما يمر إلكترون electron passes بالقرب من النواة close to a nucleus، سيواجه قوة كولوم coulomb force كبيرة وسيتباطأ decelerated. الشحنة المبطأ decelerated charge سوف تشع طاقة على شكل إشعاع كهرومغناطيسي electromagnetic radiation. يكون الحل الميكانيكي الكومبي quantum mechanical solution معقدًا complicated ويجب إجراء التقديرات approximations. ويعد الشكل الأنسب للنتيجة على نطاق الطاقة energy range. must be made . قدرة إيقاف stopping power الكتلة الإشعاعية التقريبية للطاقات التشخيصية هي:

$$\frac{S_{\text{rad}}}{\rho} = \sigma_0 \frac{N_A}{A_r} Z^2 (T + \mu_0) \bar{B}, \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1} \quad (2.37)$$

$$\sigma_0 = (1/137) \left( e^2 / \mu_0 \right)^2 = 0.580 \text{ barns/nucleus} \text{ عندما:}$$

$$B = B(h\nu/T) \text{ الدالة:}$$

وظيفة متباينة ببطء slowly varying function من  $(Z$  و  $T)$  بمتوسط للطاقات غير النسبية average for non-relativistic energies،  $(T \ll m_0c^2)$ ، من  $(\bar{B} = 16/3)$ . تقريبات أخرى صالحة لطاقات الإلكترون النسبية.

على الرغم من أن هذا التعبير يبدو أبسط بكثير من معادلة 36.2، المشكلة المادية الفعلية actual physical problem التي يجري حلها أكثر تعقيدًا بكثير much more complicated. يعتمد فقدان الطاقة energy loss الناتج عن هذه العملية اعتمادًا كبيرًا على العدد الذري، كما يتضح من المصطلح  $(Z^2)$ .

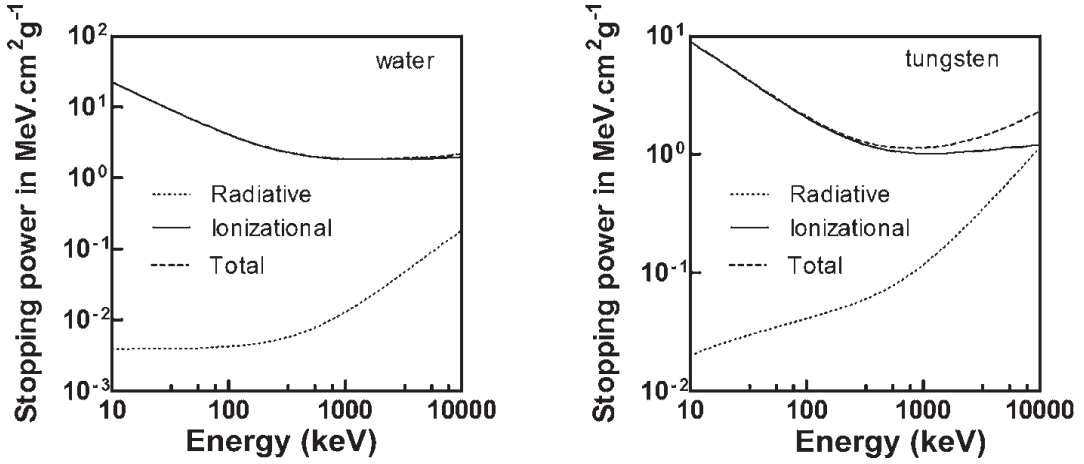
### 3.4.2. إجمالي قدرة التوقف Total stopping power

إجمالي قدرة التوقف هي مجموع sum قوى التوقف الأيونية والإشعاعية ionizational and radiative stopping powers، كما هو موضح في المعادلات 37.2، 36.2:

$$S_{\text{tot}} = S_{\text{ion}} + S_{\text{rad}} \quad (2.38)$$

يوضح الشكل 10.2 قوى التوقف الكاملة الأيونية والإشعاعية للمياه وللتنغستن for water and for tungsten.





الشكل: 10.2. قوى التوقف المؤينة والإشعاعية والكاملة للمياه والتغستن لطاقتا الإلكترون من (10 keV) إلى (10 MeV).

من الشكل 10.2 (الماء)، يمكن ملاحظة أن قدرة الإيقاف الإشعاعي radiative stopping power almost negligible ويمكن اعتبار قوة التوقف الكلية total stopping power نتيجة لقدرة التوقف الأيونية ionizational stopping power.

الشكل 10.2 (التغستن) يدل على أن هذا لم يعد هو الحال بالنسبة للمواد ذات العدد الذري العالي high atomic number materials، مثل التغستن. على سبيل المثال، عند (100 keV)، تكون قدرة التوقف الإشعاعية أكثر بقليل slightly more than مجرد ترتيب أقل من قدرة التوقف الأيونية ionizational stopping power، وفي (10 MeV) تقترب من المساواة approaching equality.

وتناقش خصائص طيف اشعاع الكبح spectrum bremsstrahlung المنتجة produced في هدف الأشعة السينية X-ray target بالتفصيل في الفصل 5.

#### 4.4.2. وقف الطاقة في المركبات والمخاليط

##### Stopping power in compounds and mixtures

يمكن تقريب approximated قدرة إيقاف الكتلة للمركبات compounds أو المخاليط العميقة intimate mixtures من خلال إضافة مرجحة لقوة إيقاف الكتلة mass stopping power الأولية elemental constituents، مع افتراض مساهمة مستقلة assuming independent contribution في قوة التوقف stopping power:

$$\left(\frac{S}{\rho}\right) = \sum_i \left(\frac{S}{\rho}\right)_i w_i \quad (2.39)$$

حيث  $(w_i)$  هي كسور الوزن الطبيعي normalized weight fractions للعناصر (i) elements، موجودة في المادة. يتم إهمال تأثير الربط الكيميائي influence of chemical binding is neglected هنا.

#### 5.4.2. نقل الطاقة الخطية Linear energy transfer

تميز characterizes قوة إيقاف التصادم الجماعي هو فقدان الطاقة energy loss للإلكترون الناتج electron resulting عن جميع التصادمات all collisions. تحمل الإلكترونات الثانوية الناتجة secondary electrons resulting عن التصادمات القوية (أشعة  $\delta$ ) جزءاً من الطاقة على بُعد مسافة بعيدة some distance away عن المسار track وقد تفلت من حجم الاثارة escape the volume of interest. إذا تم النظر في الظواهر على نطاق مجهري (على سبيل المثال في البيولوجيا الإشعاعية radiobiology)، استخدام قوة وقف التصادم collision stopping power يمكن أن يؤدي إلى المبالغة في تقدير الجرعة overestimation of dose. في مثل هذه الحالات such situations، يمكن استخدام طاقة التوقف المقيدة restricted stopping، والتي تتعلق بالطاقة المفقودة energy lost في جهاز الامتصاص بواسطة جسيمات ثانوية absorber by secondary particles لا تتجاوز حد الطاقة not exceeding an energy limit، مما يحد من حجم thus limiting the volume بنطاق الإلكترونات مع الطاقة  $(\Delta)$ ، قيمة معقولة  $\Delta$  (هي 10 keV). يمكن التعبير عن قوة التوقف المقيدة إما كإيقاف مقيد جماعي القدرة  $(S/\rho)_{Res}$  الدقة، أو لوصف الطاقة التي يتم تمريرها إلى متوسط لكل وحدة طول المسار medium per unit track length، من الشائع استخدام نقل الطاقة الخطية linear energy transfer،  $(L_\Delta)$ ، الوارد في وحدات  $(\text{keV}/\mu\text{m})$ :

$$L_\Delta = \frac{\rho}{10} \left( \frac{1}{\rho} \frac{dT}{dx} \right)_\Delta \quad (2.40)$$

حيث يتم إعطاء الكثافة في  $(\text{g}/\text{cm}^3)$  وتقييد قدرة إيقاف الكتلة في  $(\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1})$

#### 5.2. مصادر البيانات DATA SOURCES

يمكن العثور على البيانات الخاصة بمعاملات توهين الفوتون photon attenuation coefficients وقدرات التوقف stopping powers في العديد من الكتب المدرسية ولكن يتم الحصول عليها بسهولة إما من مصادر البيانات المستندة إلى الويب المتوفرة في المراجع [3.2 ، 5.2]، أو الجداول في المرجع [6.2]. وترد تركيبة أنسجة الجسم والمواد الوهمية phantom materials في المراجع [4.2 ، 7.2].

**REFERENCES**

- [2.1] HUBBELL, J.H., ØVERBØ, I. Relativistic atomic form factors and photon coherent scattering cross sections, *J. Phys. Chem. Ref. Data* **8** (1979) 69–106.
- [2.2] HUBBELL, J.H., et al., Atomic form factors, incoherent scattering functions, and photon scattering cross sections, *J. Phys. Chem. Ref. Data* **4** 3 (1975) 471–539.
- [2.3] BERGER, M.J., et al., XCOM: Photon Cross Sections Database (version 1.3), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (2005).
- [2.4] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS, Tissue Substitutes in Radiation Dosimetry and Measurement, Rep. 44, ICRU, Bethesda, MD (1989).
- [2.5] BERGER, M.J., COURSEY, J.S., ZUCKER, M.A., CHANG, J., ESTAR, PSTAR, and ASTAR: Computer Programs for Calculating Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions (version 1.2.3), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (2005).
- [2.6] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS, Photon, Electron, Proton and Neutron Interaction Data for Body Tissues, Rep. 46, ICRU, Bethesda, MD (1992).
- [2.7] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values, Publication 85, Pergamon Press, Oxford (2003).

**BIBLIOGRAPHY**

- HUBBELL, J.H., Review of Photon Interaction Cross Section Data in the Medical and Biological Context, *Phys. Med. Biol.* **44** (1999) R1–22
- INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS, Stopping Powers for Electrons and Positrons, Rep. 37, ICRU, Bethesda, MD (1984).
- JOHNS, H.E., CUNNINGHAM, J.R., *The Physics of Radiology*, 4th edn, Charles C. Thomas, Springfield, IL (1983).

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY,  
<http://www.nist.gov/index.html>

SELTZER, S.M., BERGER, M.J., Evaluation of the collision stopping power of elements and compounds for electrons and positrons, Int. J. Appl. Radiat. Isot. 33 (1982) 1189–1218.