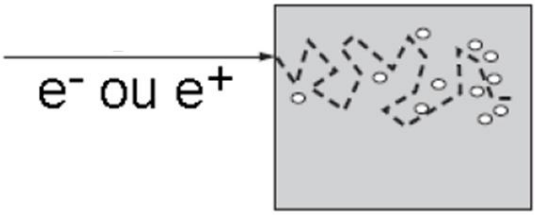
II-1 تمهيد

دراسة تفاعل الجسيمات المشحونة الخفيفة مع المادة هو أكثر تعقيدا من حالة الجسيمات المشحونة الثقيلة لسببين أساسين هما:

- السرعات العالية للجسيمات المشحونة الخفيفة مما يتطلب استخدام العلاقات النسبية.
- كتلتها الصغيرة فإن مسارها داخل المادة سيعاني إنحرافات شديدة بعد كل تصادم مع ذرات المادة (الشكل**II** - 1).



الشكل**II** -1: مسار الجسيمات المشحونة الخفيفة داخل المادة

سنركز في عرضنا على مثال تفاعل الإشعاع الإلكتروني مع المادة.

II-2 آليات التفاعل

II-2-1 تعريف

إن تفاعل الإلكترون مع المادة هو ذو طبيعة كهرومغناطيسية. معالجة هذه الظاهرة يماثل ذلك المتبع للجسيمات المشحونة الثقيلة ولكن بوجود اختلاف وهو نسبة الكتلة. ينتج من ذلك نتيجتين هما: الأول هو أنحراف المسار بسبب الإثارة والتأيين لذرات المادة، والثاني هو توليد إشعاع ناتج من كبح الإلكترونات والذي لا يمكن إهماله.

عدة آليات تساهم في كبح الكترون داخل المادة: التأيين والإثارة، إشعاع الكبح ، إشعاع سيرنكوف (**Cirenkov**) و التشتت المرن.

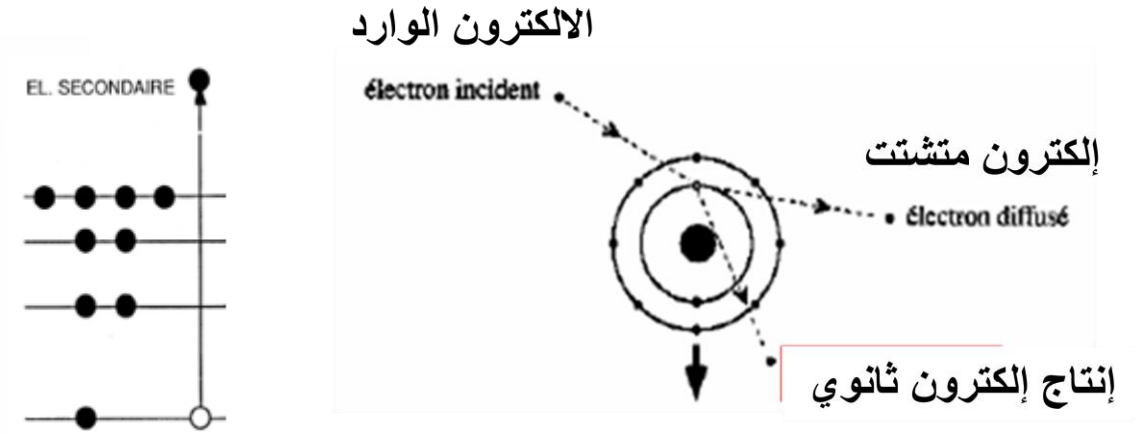
سوف نعالج فيما يأتي مجموع الآليات التي تعمل على ضياع طاقة الإلكترونات والبوزيترونات. قدرة إيقافهما ومداهما هما تقريبا نفسها مع وجود اختلاف طفيف بسبب الشحنة الموجبة والتي تعطيه تعاملا مختلفا عند الطاقات المنخفضة بجوار المجال الكهرومغناطيسي للإلكترون.

II-2-2أنواع آليات التفاعل

هناك ثلاث آليات اساسية خلال تفاعل الإشعاع الإلكتروني مع المادة وهي:

II-2-2-1 إنتاج إلكترون ثانوي

الإلكترون الثانوي هو غلكترون منتزع من المدارات الداخلية للذرة بعد اصطدام الإلكترون الوارد به، بشرط ان يكون التحويل الطاقوي الحاصل أكبر من طاقة ربط الإلكترون الثانوي. ننمذج هذا التفاعل على الشكل(II-2).



الشكلII -2: طريقة إنتاج إلكترون ثانوي

حسب مبدأ إنحفاظ الطاقة فإن:$E_{ep}=E_{es}+E_{ep'}$

حيث:

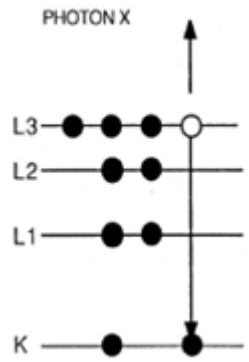
E_{ep}: طاقة الالكترون الوارد

E_{es}: طاقة الإلكترون الثانوي

$E_{ep'}$: طاقة الإلكترون المتشتت

II-2-2-2 إنتاج فوتون X

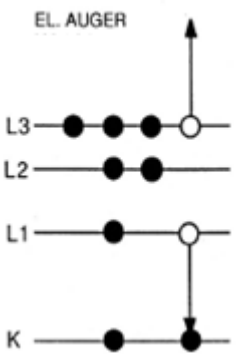
هذه الآلية تتبع عادة آلية انتاج الإلكترون الثانوي عندما يتم ملؤ الفراغ الذي تركه الإلكترون الثانوي من طرف إلكترون من الطبقات السطحية بحيث يتحول الفرق الطاقوي ΔE على شكل فوتون X كما يبينه الشكل(II-3).



الشكلII -3: إنتاج فوتون X

II-2-2-3 إصدار إلكترون أوجير (Auger electron)

يمكن أن يصدر إلكترون عندما ينتزع إلكترون من الطبقات الداخلية تاركا فجوة تملأ بعدها تلقائيا بإلكترون آخر من طبقة أعلى منتجا إشعاعا كهرومغناطيسيا موافق للفرق الطاقوي. فإذا تفاعل هذا الإشعاع مع إلكترون من الطبقات الخارجية وكانت طاقته أعلى من طاقة ربط هذا الإلكترون فسينتزع فيخرج خارج الذرة (الشكلII - 4). هذا الإلكترون المنتزع يطلق عليه **"بإلكترون أوجير"**.**(Auger electron)** .



الشكلII -4: إصدار إلكترون أوجير

مثال:

نفرض أن إلكترون أوجير ينتج من الطبقة L3 بعد إنتزاع إلكترون ثانوي من الطبقة K فعوضه إلكترون من الطبقة L1 . ولإيجاد طاقة إلكترون أوجير الصادر يمكن تطبيق مبدأ إنحفاظ الطاقة فنجد أن:

$$E_{eA} = (W_k - W_{L1}) - W_{L3}$$

حيث : E_{eA}: هي طاقة إلكترون أوجير

W_k: طاقة ربط الطبقة K

W_{L1}: طاقة ربط الطبقة L1

W_{L2}: طاقة ربط الطبقة L2

II-3 كبح الإشعاع الإلكتروني

إن سلوك الإلكترونات أثناء تفاعلها مع المادة هو نتاج خاصيتين مميزتين تختلف عن الجسيمات الثقيلة وهي:

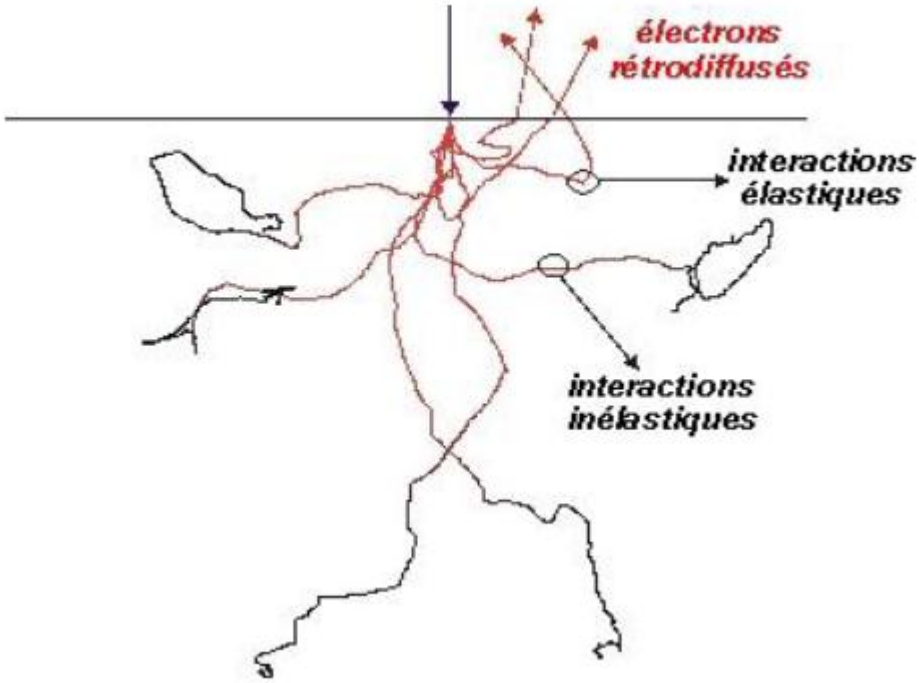
- تطبق النسبية إبتداءا من الطاقة 50Kev للإلكترونات، في حين تطبق هذه الأخيرة بالنسبة للجسيمات الثقيلة ابتدائا من MeV 90 .
- كتلتها هي نفسها كتلة إلكترونات ذرات المادة التي تتفاعل معها.

ينتج أساسا كبح الإلكترونات خلال المادة بفعل الآليات المذكورة سابقا، حيث نتحدث عن تشتت غير مرن في حالة الإلكترونات ذات الطاقات الضعيفة، في حين يحدث بانبعاث إشعاعات كهرومغناطيسية في حالة الإلكترونات ذات الطاقات العالية .

II-3-1 ضياع طاقة الإلكترونات

المبدأ الأساسي لآلية كبح الإلكترونات ذات الطاقة المنخفضة أثناء اصطدامها بإلكترونات المادة التي تخترقها هو نفسه ذلك الخاص بالجسيمات المشحونة الثقيلة. بالمقابل، التصادم بين الإلكترونات يتنتج عنه إنحراف شديد للمنحى الإبتدائي للإلكترون الوارد. مسارات الإلكترونات تكون متعرجة وكل تعرج يوافق

تأيين (الشكل**II** -5). بحكم ان سرعة الإلكترونات الواردة تنخفض فإن إحتمالية تفاعلها مع إلكترونات المادة تزداد والتعرج بذلك يزداد.

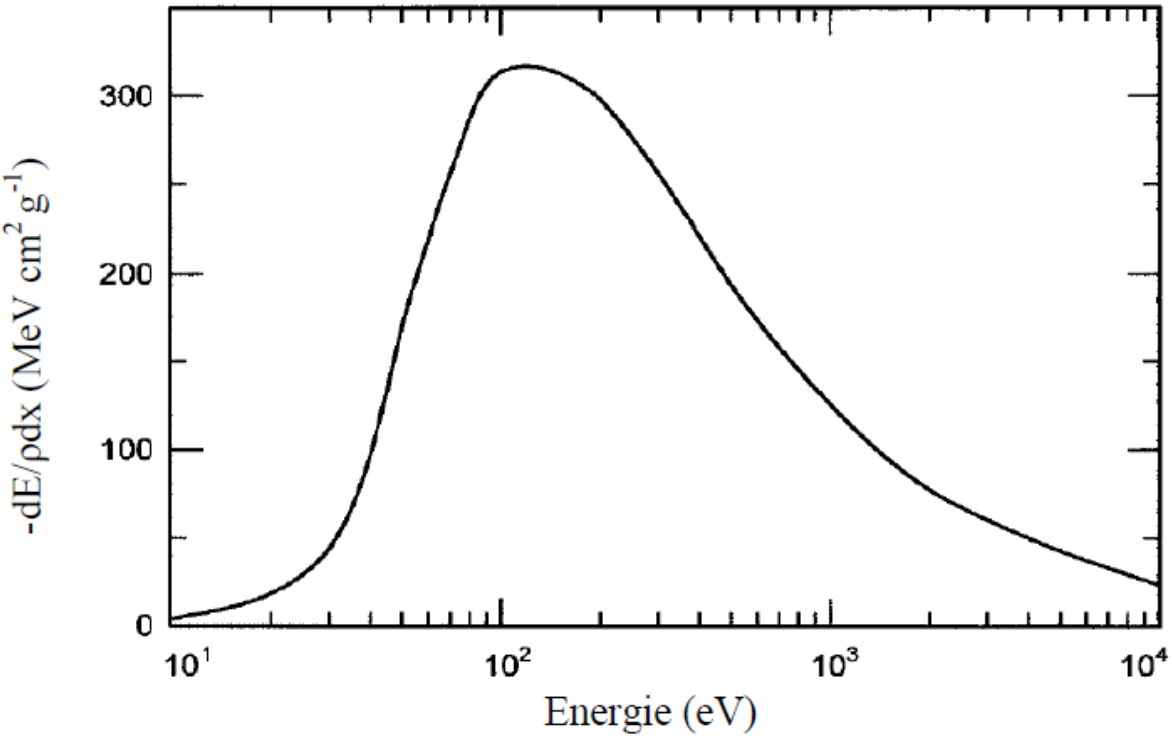


الشكل**II** - 5: مسار الإلكترون الوارد داخل المادة

جزء كبير من طاقة الإلكترون الوارد يمكن ان تضيع في تصادم واحد ويكون حينها التحويل الطاقوي الأعظمي أثناء التصادم مساو لطاقة الإلكترون الوارد. ولكن بعد التصادم مع إلكترون من إلكترونات الذرة فإنه لا يمكن التفريق بين الإلكترونات المتشتتة والمنتزعة. ولذلك نصطلح على الإلكترون المتشتت بالإلكترون الاولي وهو الذي يأخذ أكبر جزء من الطاقة أما الإلكترون الأبطأ بالالكترون المنتزع.

الإلكترونات الواردة سيؤول بها الأمر إنها ستتوقف عندما تصبح طاقتها أقل من مستوى الإلكترونات الموجودة في الوسط الذي تم تشعيعه (الطاقة الحرارية).

على الشكل(**II**- 6)، نمثل قدرة الإيقاف الكتلية المحسوبة للماء السائل في حالة إلكترونات ذات طاقة منخفضة. هنا يتم إهمال قدرة الإيقاف الخاصة بالإشعاعات الثانوية الناتجة



الشكل**II** - 6: قدرة الإيقاف الكتلية للماء السائل في الطاقات المنخفضة

من ناحية أخرى، الإلكترونات السريعة تفقد طاقتها بنسبة أقل من حالة الجسيمات المشحونة الثقيلة وتتبع مسارا متعرجا داخل المادة. ينتج عن هذا انحرافات شديدة في مسار الإلكترونات بحكم كتلته المساوية لكتلة إلكترونات المدارات التي يتفاعل معها بالتصادم، وهنا جزء كبير من طاقته يمكن ان يفقد في تصادم واحد. بالإظافة إلى ذلك فإن تفاعلات بين الإلكترون والنواة ستنتج بسبب التشتت غير المرن والتي يمكنها أن تغير بشكل مفاجئ مسار الإلكترونات.

II-3-2 ضياع الطاقة بالتصادم

هناك علاقة مماثلة لتلك التي تطرقنا إليها في حالة الجسيات المشحونة الثقيلة جاء بها ايضا "بيتي" (Bethe) لوصف ضياع الطاقة المميز والناتج عن التأيين او الإثارة أو ما يعرف بقدرة الإيقاف للتصادم بالنسبة للإلكترونات السريعة وهي:

$$(-\frac{dE}{dx})_{coll} = \frac{2\pi e^2 NZ}{m_0 v^2}(ln\frac{m_0 v^2 E}{2I^2(1-\beta^2)} - (ln2)\left(2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2\right) + (1-\beta^2) + \frac{1}{8}(1-\sqrt{1-\beta^2})^2)$$

حيث تمثل الرموز أعلاه نفس الرموز السابقة .

II-3-3 ضياع الطاقة بالإشعاع

تسارع جسيم مشحون ثقيل خلال تصادم ذري يكون عموما ضعيف الا في حالات حدية فينتج إشعاع مهمل. بكون الإكترون يملك كتلة صغيرة يمكن أن تسرع بشكل كبير بنفس القوة الكهرومغناطيسية داخل ذرة وهكذا يفقد طاقته بإصدار إشعاع يسمى إشعاع تشتت الكبح (***bremsstrahlung radiation***) وهو التشتت غير المرن على أنوية ذرات المادة. هذا الضياع في الطاقة يمكن أن يحدث في اي موضع على مسار الإلكترون. يتحرك الإلكترون خلال هذه الآلية بجوار نواة ويكون تحت تأثير قوى تسريع حسب قوانين الكهرومغناطيسية الكلاسيكية (يسرع كل جسيم مشحون تحت تأثير المجال الكواومي للنواة التي تتفاعل معه سيصدر إشعاعا كهرومغناطيسيا بطاقة تتناسب مع مربع التسارع). هذا يعتبر ضياعا للطاقة بالنسبة للجسيم ويسبب كبحه. وبهذا الشكل فإن الجسيم يتعرض لانحراف لمسارها ونتيجة لذلك فإن انحرافات الإلكترون ضمن تفاعلاته مع المادة تكون بنفس النحو وبنفس التسارع.

قدرة الإيقاف الإشعاعية أو الضياع الخطي للطاقة المميز بهذه الآلية هو:

$$(-\frac{dE}{dx})_{rad} = NEZ\frac{(Z+1)e^4}{137m_0^2\ c^2}(4ln\frac{2E}{m_0c^2} - \frac{4}{3})$$

حيث E: الطاقة الحركية للإلكترون.

II-3-4 الضياع في الطاقة الكلي

قدرة الإيقاف الكلية الخطية للإلكترونات هي مجموع الضياع الناتج عن التصادم والإشعاع أي:

$$\frac{dE}{dx} = (\frac{dE}{dx})_{coll} + (\frac{dE}{dx})_{rad}$$

النسبة بين الضياعات في الطاقة المميزة للآليتين (تصادم وإشعاع) يعطى تقريبيا بالنسبة لإلكترون طاقته E معبر عليها بوحدة الـ MeV في مادة عددها الذري Z بالعلاقة التالية:

$$\frac{(dE/dx)_{rad}}{(dE/dx)_{coll}} \cong \frac{EZ}{700}$$

نتيجة لذلك فإن الضياع في الطاقة بإشعاع الكبح يمثل دائما جزءا بسيطا من الضياع الناتج عن التأيين او الإثارة. في حين أنه ومن أجل طاقات بعشرات الـ MeV وبالنسبة لمواد ذات عدد ذري Z كبير يصبح جزء الضياع في الطاقة بالكبح مهيمنا. يبين الجدول التالي قيم الضياع في الطاقة بمختلف أنواعه في الماء.

Energie cinétique	β^2	$-\frac{1}{\rho}\left(\frac{dE}{dx}\right)^{-}_{col}$ (MeV cm^2 g^{-1})	$-\frac{1}{\rho}\left(\frac{dE}{dx}\right)^{-}_{rad}$ (MeV cm^2 g^{-1})	$-\frac{1}{\rho}\left(\frac{dE}{dx}\right)^{-}_{tot}$ (MeV cm^2 g^{-1})	Rendement radiatif	Parcours (cm^{-2})
10 eV	0.00004	4.0	—	4.0	—	4×10^{-8}
30	0.00012	44.	—	44.	—	2×10^{-7}
50	0.00020	170.	—	170.	—	3×10^{-7}
75	0.00029	272.	—	272.	—	4×10^{-7}
100	0.00039	314.	—	314.		5×10^{-7}
200	0.00078	298.	—	298.	—	8×10^{-7}
500 eV	0.00195	194.	—	194.	—	2×10^{-6}
1 keV	0.00390	126.	—	126.	—	5×10^{-6}
2	0.00778	77.5	—	77.5	—	2×10^{-5}
5	0.0193	42.6	—	42.6	—	8×10^{-5}
10	0.0380	23.2	—	23.2	0.0001	0.0002
25	0.0911	11.4	—	11.4	0.0002	0.0012
50	0.170	6.75	—	6.75	0.0004	0.0042
75	0.239	5.08	—	5.08	0.0006	0.0086
100	0.301	4.20	—	4.20	0.0007	0.0140
200	0.483	2.84	0.006	2.85	0.0012	0.0440
500	0.745	2.06	0.010	2.07	0.0026	0.174
700 keV	0.822	1.94	0.013	1.95	0.0036	0.275
1 MeV	0.886	1.87	0.017	1.89	0.0049	0.430
4	0.987	1.91	0.065	1.98	0.0168	2.00
7	0.991	1.93	0.084	2.02	0.0208	2.50
10	0.998	2.00	0.183	2.18	0.0416	4.88
100	0.999+	2.20	2.40	4.60	0.317	32.5
1000 MeV	0.999+	2.40	26.3	28.7	0.774	101.

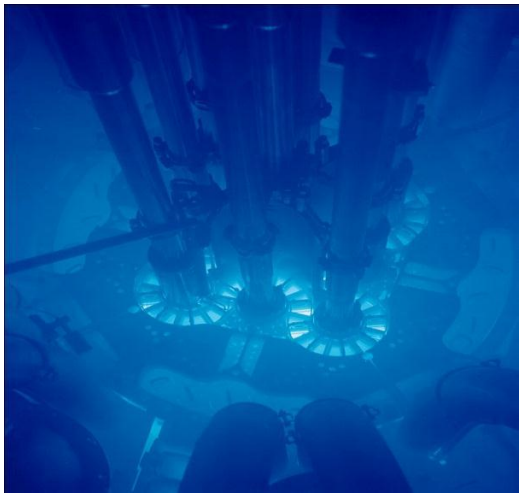
II-3-5 ضياع الطاقة بإشعاع "سيرنكوف" (Cirenkov)

إشعاع سيرنكوف هو نتيجة موجة التصادم الحاصل من جسيم مشحون كهربائيا الذي يسري عبر وسط شفاف (غير الفراغ) بسرعة أكبر من سرعة الضوء في هذا الوسط ($v_L=c/n$) حيث n هي قرينة انكسار الوسط و c سرعة الضوء في الفراغ. فالجسيم المشحون يكون محاطا بمجال كهربائي فيستقطب الذرات والجزيئات التي يخترقها بجوار مساره. إذا كانت سرعة الجسيم غير كبيرة جدا فإن حالات الاستقطاب لا تكون وفق إتجاهات مفضلة. ولكن إذا كانت هذه السرعة تفوق سرعة الضوء في الوسط ($v>v_L$) فإن فوتونات ستنبعث وفق زاوية محددة بالنسبة للمنحى الأول (فوتونات مستقطبة بشكل كبير) وهو ما يعرف بإشعاع سيرنكوف (Cirenkov radiation).

ينبعث الضوء داخل مخروط فتحته تعتمد على الوسط وعلى سرعة الجسيم وبذلك ستصنع فوتونات سيرنكوف زاوية مع إتجاه الجسيم بحيث:

$$cos\theta = \frac{1}{v}.\frac{c}{n}$$

جزء معتبر من إشعاع سيرنكوف ينتمي إلى المجال الضوئي الذي يظهر خصوصا في المفاعلات النووية، أين يكون مسؤولا عن اللون الأزرق في مسابح الخاصة بتخزين المصادر المشعة. وهذا هو الأثر الذي يجعل من لون الماء المحيط بقلب المفاعل النووي أزرقا كما يبينه الشكل(**II**- 7).



الشكل**II** - 7: إشعاع سيرنكوف (Cirenkov) في قلب مفاعل نووي

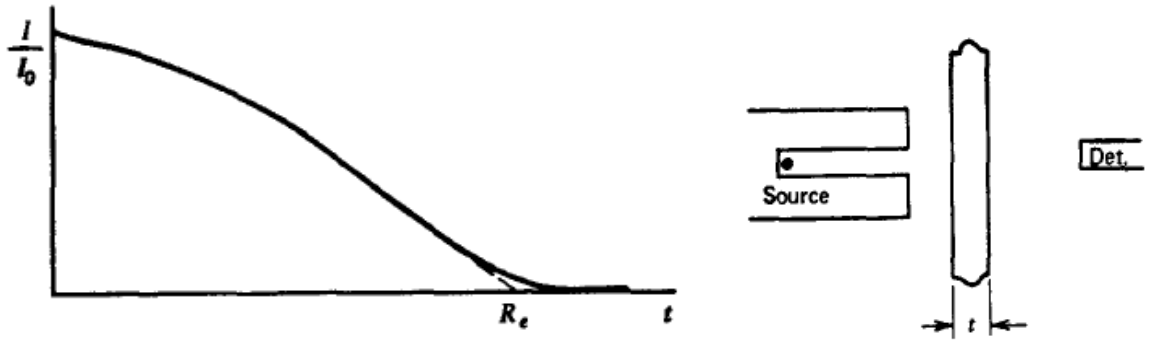
II-4 مدى الإلكترونات ومنحنيات الإنبعاث

II-4-1 إمتصاص الإلكترونات وحيدة الطاقة

لا يوجد تعريف محدد لمدى الإلكترونات. كما ذكر سابقا فإن مسار الكترون في وسط معين هو جد متعرج، ونتيجة لذلك فإن العمق الأعظمي الذي يمكن للالكترون بلوغه في اتجاه الورود ستكون أقل بكثير لطول مساره. هذا العمق الأعظمي هو ما يعرف "بالمدى" أو "عمق الإختراق".

عند الأخذ بعين الإعتبار إمتصاص الجسيمات فإن المدى سيوافق المسافة المستقيمة بين نقطة الإنبعاث ونقطة توقف الجسيم. هذه المسافة تتناسب عكسيا مع كثافة المادة المخترقة ولكن تتغير بشكل كبير بدلالة طاقة الجسيم.

يقاس المدى تجريبيا باستعمال مصدر للإلكترونات السريعة وحيدة الطاقة ومواد ممتصة ذات سمك مختلف كما هو مبين في الشكل(**II**- 8). هذه التجربة الخاصة بالتوهين تبين أن حتى السمك الصغير للمادة الماصة ينتج عنه ضياع في عدد من إلكترونات الإشعا الذي يتم التقطه باللاقط لأن تشتت الإلكترون يقصيه من التدفق الذي يصل إلى اللاقط.



الشكل**II** - 8: منحني الإنبعاث لإشعاع إلكتروني وحيد الطاقة بدلالة سمك المادة. R_e هو المدى

نحصل على مدى الإلكترونات إنطلاقا من رسم المماس للجزء المستقيم من المنحني ، أي من النقطة الأدنى قبل انعطاف المنحني كما هو مبين في الشكل(**II**- 8) أعلاه.

إن مدى الإلكترونات في وسط معين هو دالة لطاقاتها ويمكن التعبير عنه بعلاقات تجريبية تعطينا مدى الجسيمات β المنبعثة من مصدر مشع.

ففي حالة طاقات أقل من 0.8MeV ، فإن مدى الجسيمات β يعطى بالعلاقة:

$$R_{\beta(g.cm^{-2})} = 0.407\ E^{1.38}\ (MeV)$$

وبالنسبة لطاقات محصورة بين 0.8MeV و 3.7 MeV العلاقة تصبح:

$$R_{\beta(g.cm^{-2})} = 0.542\ E\ (MeV)-0.133$$

II-4-2 إمتصاص الجسيمات بيتا (β)

توزع طاقة الجسيمات " بيتا (β) " بطريقة مستمرة من القيمة 0 إلى قيمة أعظمية، تبعا للنظير المشع ولهذا السبب فإن منحني إنبعاث الجسيمات "بيتا" من مصدر نظير مشع تختلف بشكل ملموس عن ذلك المبين في الشكل(**II-** 8) أعلاه للإلكترونات وحيدة الطاقة. الجسيمات "بيتا" ذات الطاقات الضعيفة هي سيعة الامتصاص حتى وإن كان سمك المادة صغيرا (إختراق بسيط) بحيث يكون ميل المنحني أكبر بكثير. بالنسبة لعموم الأطياف "بيتا" فإن المنحني يكون له هيئة تقريبا أسية أي يكون شبه مستقيم كما يبينه الشكل(**II-** 9)نصف – اللوغاريتمي. نستعمل في بعض معامل امتصاص يرمز له بالرمز n معرف بـ:

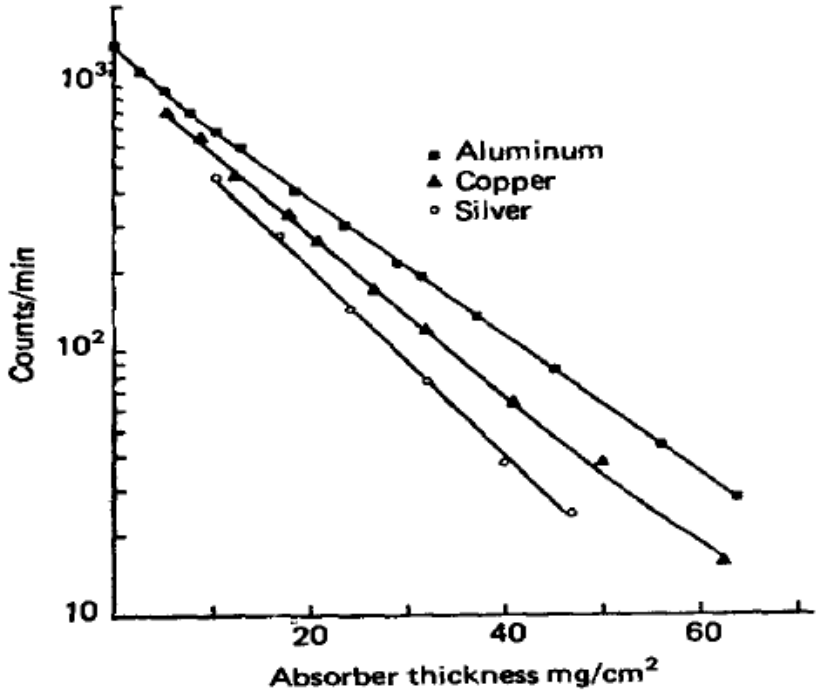
$$\frac{I}{I_0} = e^{-nt}$$

حيث:

I0: عدد الضربات التي يلتقطها العداد بدون وجود المادة

I: عدد الضربات التي يلتقطها العداد بوجود المادة

t: سمك المادة



الشكل **II-9** : منحني الإنبعاث للجسيمات "بيتا" من مصدر W^{185} (طاقة آخر نقطة هي 0.43 MeV).

في مجال الطاقات العالية جدا فإن غالبية ضياع الطاقة الناتج من الإشعاع (على حساب ضياع الطاقة الناتج من التصادم) ينتج تسلسل لتفاعلات اكترون – فوتون.

II-4-3 الإرتداد

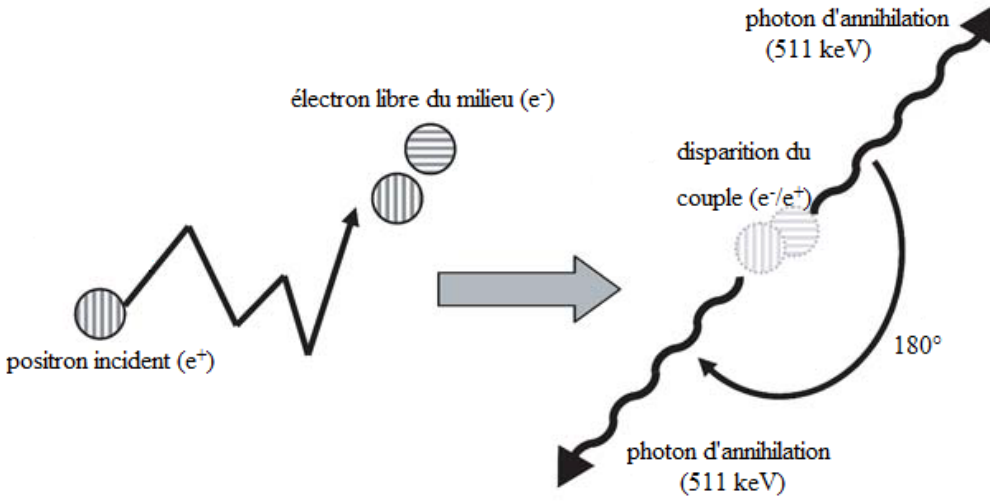
يمكن للإلكترونات التي تخترق سطح مادة أن تنعكس بزاوية كبيرة على طول مسارها لكي تظهر من جديد من خلال السطح الذي اخترقت المادة من خلاله، وهو ما يعرف بارتداد الالكترونات وفي هذه الحالة تسمى بـ " الإلكترونات المرتدة (Back-scatered electrons)" وهي إلكترونات تنتج من فعل إشعاع الكتروني يسمى ابتدائي ومادة كما يبينه الشكل(**II-** 8) السابق.

تدخل الإلكترونات الإبتدائية في تصادم مرن مع ذرات سطح المادة. هذه الإلكترونات تنبعث من جديد في اتجاه قريب من اتجاهها الأصلي ولا تضع كل طاقتها في الوسط المادة، فترتد بضياع قليل من الطاقة. يقوى الإرتداد في حالة الإلكترونات ذات الطاقات الضعيفة وبالنسبة للمواد ذات العدد الذري الكبير.

II-5 تفاعل البوزيترونات

البروزيترون أو يسمى أيضا بـ "ضد-الالكترون" له شحنة موجبة. القوى الكولومبية التي تعتبر السبب الأساسي في ضياع الطاقة بالنسبة للإلكترونات والجسيمات الثقيلة هي أيضا موجودة في حالة الشحنات الموجبة أيضا. بمعنى أن كل ما تم عرضه سابقا يطبق إيضا على البوزيترون. ومنه فإن أثر البورزيترون في المادة هو أثر مماثل لأثر الإلكترون فيه وأيضا فإن الضياع في الطاقة والمدى تكون تقريبا متماثلة لحالة الإلكترون عندما تكون الطاقات الابتدائية نفسها، ومادام التفاعل يستوجب قوة تنافر أو تجاذب بين الجسيم الوارد وإلكترون المدار، أما الزخم و التحويل الطاقوي للجسيمات ذات الكتلة المتساوية هي تقريبا نفسها. ومنه فإن إبطاء البوزيترون سيكون بنفس الآلية التي تبطئ الإلكترون.

إن مسار البوزيترون يملك خاصية مهمة عندما يفقد جل طاقته الحركية أي عندما يكون في توازن حراري مع ذرات الوسط ، وهي أنه يختفي (إختفاء الثنائية بوزيترون-إلكترون) يتحول إلى فوتونين بطاقة لكل منهما قدرها 0.511MeV كما يبينه الشكل(**II**- 10).



الشكل**II** - 10: إختفاء البوزيترون عند ملاقاته إلكترون

وبالتالي كل شاشة (مادة) تستعمل لامتصاص البوزيترونات (β^+) يصبح مصدرا للفوتونات الثانوية وحيدة الطاقة وعددها هو ضعف عدد البوزيتروات الممتصة.

II-6 *تمارين الفصل*

التمرين الأول

نعرض صفيحة من الزنك لإشعاع الكتروني طاقته 12,4KeV . تعطى طاقات الربط لذرة الزنك بالـ KeV كما يلي:

W_K=9,66 ; W_{L1}=1,20 ; W_{L2}=1,06 ; W_{L3}=1,02 ; W_{M1}=0,14 ; W_{M2}=0,10 ; W_{M3}=0,06 ; W_{M4}=0,01

1- هل يمكن لهذا الإشعاع أن ينتج الكترونات أوجي تبعا لإلكترون ثانوي مصدره الطبقة K؟ إن كان الجواب بنعم فماهي الطبقات التي يمكن أن ينبعث منها؟

2- ما هي أقل وأقصى سرعة يمكن ان ينبعث بها الكترون أوجي؟

التمرين الثاني

إشعاع إلكترونات طاقته 500 eV يتفاعل مع إلكترونات الطبقة k للكبريت (Z=16) . إذا فرضنا أنه ينتج الكترون أوجي من الطبقة L .

1- صف ماذا يحدث؟

2- باستعمال نموذج بور للطاقة ، أوجد قيم الطاقة الموافقة لكل مرحلة؟

3- ما هي الطاقة الحركية لإلكترون اوجي المنبعث؟

التمرين الثالث

إشعاع إلكترونات طاقته 2 MeV يسقط على غاز الارغون

1- أوجد ضياع الطاقة الناتج من التصادم ؟

2- أوجد ضياع الطاقة بالاشعاع؟

3- ماهي قيمة ضياع الطاقة الكلي؟

4- ما هو طول الاشعاع الموافق؟

5- هل يمكن لهذا الاشعاع أن ينتج إشعاع شيرنكوف في الماء ذو قرينة انكسار 1,33 ؟ علل.

يعطى: Z=18 ; A=40 ; ρ_{Ar}= 1,8 x 10^{-3} g/cm^3 ; I=15,75 eV

التمرين الرابع

عند دراسة امتصاص جسيمات بيتا الصادرة من نظير الفوسفور في مادة الالمنيوم كانت النتائج كالمبينة في الجدول عيني من هذه البيانات مدى الجسيمات في الالمنيوم ؟

ep (cm)	0	0,100	0,200	0,300	0,400	0,500	0,600	0,700	0,800	0,900
I	100	60	37,5	16,5	12,5	8	4.5	2	0,5	0,4

أوجد مدى الالكترونات؟