1- تمهيد (طبيعة التفاعل مع المادة)

عند سقوط الجسيمات المشحونة الثقيلة (كتلتها كبيرة بكثير من كتلة الالكترون M>>me) كجسيمات ألفا أو الديوتروات والبروتونات وغيرها على المادة، تنتقل طاقة هذه الجسيمات إلى المادة بالتدريج إلى ان تتوقف الجسيمات الساقطة. ويتم هذا الإنتقال اساسا عن طريق التصادمات غير المرنة (inelastic collision) مع غلكترونات ذرات المادة التي تخترقها الجسيمات. ينتج عن هذه التصادمات بين الجسيمات المشحونة والإلكترونات إثارة لهذه الذرات (أي أن انتقال أحد الكترونات الذرة من مداره غلى مدار آخر ذو طاقة أعلى) أو تأيينها (أي انفصال الكترون من ذرته تماما).وهكذا يحدث تأيين إبتدائي (أول) لذرات المادة وهو ذلك التأين الناتج عن الجسيمات الثقيلة ذاتها. ويمثل هذا التأيين حوالي 30% من إجمالي التأيين الناتج من توقف الجسيم المشحون في المادة. أما النسبة المتبقية وهي حوالي 70% من إجمالي التأيين فيعرف بالتأيين الثانوي، وهو ناتج عن إلكترونات التأيين الابتدائي التي تنطلق بسرعات عالية نسبيا، فتؤدي بدورها إلى تايين المادة، وتسمى الإلكترونات الثانوية بإلكترونات دلتا (δ electrons).

وبهذه الطريقة، تفقد الجسيمات المشحونة الثقيلة طاقتها بالتدريج مع إختراقها للمادة وتقل بالتالي سرعاتها إلى ان تصبح قريبة من سرعة إلكترونات المدار K لذرة الجسيم الوارد، فيحدث عندئذ تبادل بين الإلكترونات المدارية لذرات المادة وإلكترونات التأيين الناتجة عن الجسيم الساقط. وقد يصل عدد هذه التبادلات إلى 10^3 مرة قبل أن يتحول الجسيم الساقط إلى ذرة متعادلة.

وهكذا يتكون نتيجة لتأيين الذرة الواحدة زوج إلكترون-أيون. يمكن قياس العدد الكلي n للأزواج الإلكترونية-الايونية الناتجة عن كل من التأيين الابتدائي والثانوي باستخدام الطرق التجريبية المختلفة. وبمعرفة كل من طاقة الجسيمات المشحونة الساقطة E وعدد الأزواج n فإنه يمكن حساب القيمة المتوسطة $\acute{W}$ للطاقة اللازمة لتكوين زوج إلكترون-أيون واحد من العلاقة التالية:

$$\acute{W}=\frac{E}{n}$$

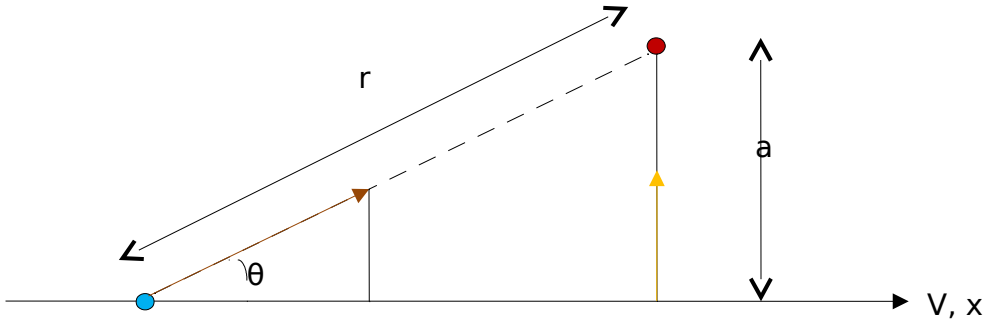
ولقد وجد ان قيمة $\acute{W}$ اللازمة لتكوين زوج واحد تعتمد على نوع المادة ولكنها لا تعتمد على طاقة الجسيمات الساقطة أو على طبيعة هذه الجسيمات. وتجدر الاشارة إلة أن الجسيمات المشحونة الساقطة تتفاعل مع نوى المادة التي تمر خلالها إلا أن هذا التفاعل يعتبر مهملا كوسيلة من وسائل فقد الطاقة حيث ان احتمال التصادم مع النوى أقل بكثير جدا من احتمال التصادم مع الالكترونات.

2- الضياع في الطاقة ($\frac{-dE}{dx}$ **¿**

كما تم توضيحه أعلاه، فإن خلال انتقال الإشعاع الجسيمي المشحون الثقيل خلال المادة فسوف يفقد الطاقة بشكل تدريجي نظرا لطاقته العالية التي لا يمكن أن تضيع كليا او جزئيا بعد التفاعل مع إلكترون أو اكثر كما هو الحال في حالة الإشعاع الكهرومغناطيسي.

علاقة الضياع في الطاقة:

التفاعل بين الإلكترونات والجسيمات المشحونة هو تفاعل كولومي كما يبينه الشكل 1 أدناه.



الشكل 1

كمية الحركة المكتسبة من الإلكترون نتيجة قوة كولوم هي:

$$P=\int_{-\infty}^{+\infty} F_y\,dt=\int_{-\infty}^{+\infty} F\sin\theta\,dt=\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{z\,e^2}{(4\pi\varepsilon_0)r^2}\sin\theta\,dt \quad .....(1)$$

حيث F_y هي المركبة العمودية للقوة $\vec{F}$.

ze^2: شحنة الجسيم الثقيل

r: البعد

لدينا $\sin\theta=\frac{a}{r} \Rightarrow \frac{1}{r^2}=\frac{\sin^2\theta}{a^2}$

و $v=\frac{dx}{dt} \Rightarrow dt=\frac{dx}{v} \quad ...(2)$

حيث x هو فاصلة الجسيم على المحور الأفقي.

$$x=\frac{a}{\tan\theta} \Rightarrow dx=\frac{-a}{\sin^2\theta}d\theta$$

$$\text{من (2)} \Rightarrow \quad dt = \frac{-a}{v\sin^2\theta}d\theta$$

بالتعويض في العلاقة (1):

$$P = \int_0^{\pi} \frac{ze^2}{(4\pi\varepsilon_0)} \frac{\sin^2\theta}{a^2} sin\theta \left(\frac{-a}{v\sin^2\theta}\right) d\theta \quad = \quad \int_0^{\pi} \frac{-ze^2}{(4\pi\varepsilon_0)a} \frac{1}{v} sin\theta\, d\theta$$

$$\| \quad -cos\theta \text{¿} \quad \text{¿}$$

$$\text{¿} \frac{-ze^2}{(4\pi\varepsilon_0)av} \int_0^{\pi} sin\theta\, d\theta = \frac{-ze^2}{(4\pi\varepsilon_0)av} \text{¿}$$

$$\Rightarrow \quad P = \frac{-ze^2}{2\pi\varepsilon_0 av} \quad \text{.....(3)}$$

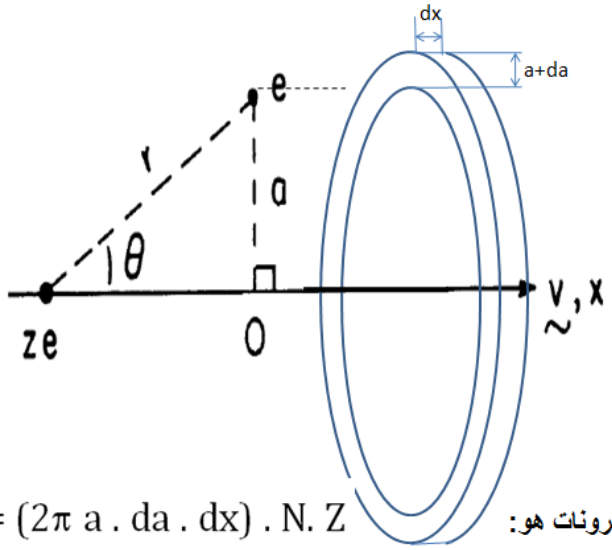
الطاقة الحركية التي تحول إلى الإلكترون الواحد هي:

$$dE = \frac{P^2}{2m_e} \quad = \quad \frac{z^2e^4}{(4\pi^2\varepsilon_0^{\,2})a^2v^2} \cdot \frac{1}{2m_e}$$

$$\Rightarrow \quad dE \quad = \quad \frac{z^2e^4}{(8\pi^2\varepsilon_0^{\,2})a^2m_e v^2} \quad \text{.....(4)}$$

تعميم:

سنعتبر جزءا عنصريا من المادة على شكل إسطواني يكون فيه توزيع منتظم للإلكترونات محصور بين a و (a+Δa) وسمكه dx (الشكل 2)



عدد الالكترونات هو: $dN_e = (2\pi\ a\ .\ da\ .\ dx)\ .\ N.\ Z$

الشكل 2: توزيع اسطواني للإلكترونات

عدد الإلكترونات المحصورة في الحجم dv هو : $dN_e = N\ Z\ dv$

N: عدد الإلكترونات في وحدة الحجم (m^{-3})

Z: العدد الذري للمادة

من جهة أخرى

$dv = 2\pi\ a\ da\ dx \Rightarrow dN_e = 2\pi\ a\ da\ dx\ N\ Z$

التحويل الطاقوي في هذا الحجم سيكون:

$$dW_e = dN_e.dE_e \Rightarrow dW_e = 2\pi\ a\ da\ dx\ N\ Z.\ \frac{z^2 e^4}{\left(8\pi^2 \varepsilon_0^{\ 2}\right) a^2 m_e v^2}$$

حيث dW_e : هو مقدار ما يضيع من طاقة الجسيمات المحونة الثقيلة في الحجم dv من المادة.

وعليه فغن ضياع الطاقة في وحدة الطول هي:

$$\frac{-dE}{dx} = \int_{a_{min}}^{a_{max}} \frac{dW_e}{dx} = \int_{a_{min}}^{a_{max}} \frac{z^2 e^4}{\left(4\pi\varepsilon_0^{\ 2}\right) m_e v^2} NZ\left(\frac{da}{a}\right)$$

$$\Rightarrow \quad \frac{-dE}{dx} = \frac{z^2 e^4}{\left(4\pi\varepsilon_0^{\ 2}\right) m_e v^2} NZ \ln\left(\frac{a_{max}}{a_{min}}\right)$$

عبارة a_{max} و a_{min} :

- عند القيمة a_{max} يجب ان تكون قيمة التحويل الطاقوي : $dE_e=I$ حيث أن I هي طاقة التأيين.

$$\Rightarrow \quad \frac{2z^2e^4}{(4\pi\varepsilon_0)^2 m_e v^2 a_{max}^2} = I \Rightarrow$$

$$a_{max}=\frac{ze^2}{(4\pi\varepsilon_0)v}\sqrt{\frac{2}{m_e}}$$

- عند a_{min}: فإن $dE_e=\frac{4m_e}{M}.E$

$$\Rightarrow \quad dE_e=\frac{4m_e}{M}.\frac{1}{2}Mv^2=2m_e v^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{(4\pi\varepsilon_0)}\cdot\frac{ze^2}{m_e v^2 a_{min}^2} = 2m_e v^2$$

$$\Rightarrow$$

$$a_{min}=\frac{1ze^2}{(4\pi\varepsilon_0)m_e v^2}$$

بالتطبيق في علاقة الضياع في الطاقة سنجد:

$$\frac{-dE}{dx}=NZ\frac{z^2e^4}{(4\pi\varepsilon_0^2)m_e v^2}\ln\sqrt{\frac{2m_e v^2}{I}}$$

تعرف أيضا بعلاقة بيتي BETHE.

هذه العلاقة صحيحة عندما تكون السرعة V<C ووحدتها MeV/ cm .

ملاحظات:

1- الضياع في الطاقة يتعلق بسرعة الجسيم (v) وبطبعة المادة (I).

2- يمكن تعريف مقدرا آخر وهو ما يسمى **"بقدرة الإيقاف"** وهو عبارة بالقيمة الموجبة لقيمة الضياع في الطاقة ويرمز له بالرمز Sp.

3- يمكن حساب القيمة I انطلاقا من العدد الذري z للمادة حيث:

$z<13 \Rightarrow I=11.2+(11.7+z)$

$z>13 \Rightarrow I=53.8+(8.11+z)$

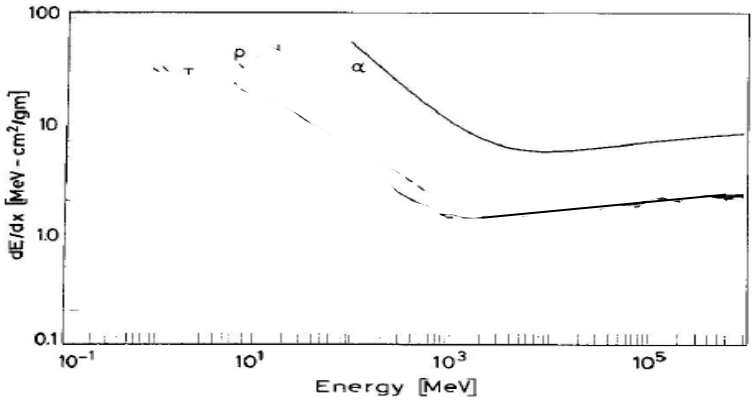
4- في حالة v تكون عالية جدا فإنه يتوجب إظافة عامل تصحيح لتصبح عبارة الضياع في الطاقة هي علاقة "**بيتي-بلوخ (Bethe – Bloch)**" والتي تعطى بالعلاقة:

$$\frac{-dE}{dx}=NZ\frac{z^2e^4}{\left(4\pi\varepsilon_0{}^2\right)m_e v^2}\left[ln\sqrt{\frac{2m_e v^2}{I}}+\ln\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)-\frac{v^2}{c^2}\right]$$

بوضع : $\beta=\frac{v}{c}$ ←

$$\frac{-dE}{dx}=NZ\frac{z^2e^4}{\left(4\pi\varepsilon_0{}^2\right)m_e v^2}\left[ln\sqrt{\frac{2m_e c^2\beta^2}{I}}+\ln\left(1-\beta^2\right)-\beta^2\right]$$

5- قدرة الإيقاف تتناسب عكسا مع طاقة الجسيم كما يبينه الشكل 3.

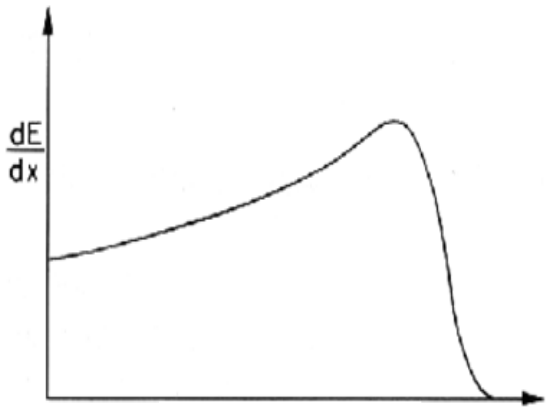


الشكل 3: قدرة الإيقاف لوحدة الكتلة وتغيرها بدلالة طاقة الجسيم

3- منحني براغ (Bragg)

هم منحني يبين تغير قدرة الإيقاف لإشعاع الجسيمات المشحونة الثقيلة بدلالة مسافة الإختراق في المادة. $S_p=f(D_p)$ ، حيث D_p يمثل مسافة الاختراق. ففي حالة الجسيمات ألفا (α) وعند طاقة معينة E وبالنسبة لجسيم واحد في المنحني –أ- وبالنسبة لحزمة من الجسيمات في المنحني – ب - نحصل على منحني يماثل المنحني المبين في الشكل-4- التالي:

(أ)



(ب)

الشكل 4: منحني براغ
(أ) لجسيم واحد، (ب) لحزمة من الجسيمات

التفسير:

المنحني (أ): الخاص بجسيم واحد

1- نلاحظ أن التأيين يبدأ مباشرة وبشكل آني عند سقوط الإشعاع على المادة وهذا سبب عدم إنعدام قدرة الإيقاف عندما يكون Dp=0 أي أن $\frac{dE}{dx}\iota_{D_p=0} \neq 0$

2- تتواصل زيادة قدرة الإيقاف مع زيادة مسافة الاختراق داخل المادة أي يزداد التأيين وهذا بسبب انخفاض سرعة الجسيم الناتج من زيادة زمن تعرض الالكترونات للمجال الكهربائي الخاص بالجسيم.

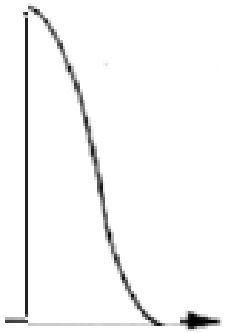
3- تبلغ قدرة الإيقاف قيمة أعظمية بسبب انخفاض طاقة الجسيم إلى قيمة لا تصبح تحقق شرط التأيين مباشرة إلى القيمة 0.

4- Dp الموافقة لـ $\frac{dE}{dx}=0$ تسمى بمدى الجسيم ونرمز له بالرمز R.

المنحنى (ب): الخاص بحزمة من الجسيمات

له نفس هيئة المنحني الأول بصفة عامة، ولكن بتسجيل إختلاف في الجزء الثاني منه (بعد القيمة الأعظمية) حيث نلاحظ أن قدرة الإيقاف تصل تدريجيا إلى القيمة 0 وليس بشكل مباشر مثل المنحني أ. وهذا

مـا يعـرف بــ **"التبعـثر فـي الطاقـة"** (Straggling in Energy) (الشـكل 5)، وسـببه هـو اختلاف مـدى الجسيمات المكونة للحزمة داخل المادة نفسها.



الشكل 5: التبعثر في الطاقة Straggling in Energy

4-مدى الجسيمات في المادة R

يعرف على أنه هو المسافة القصوى التي يقطعها الجسيم المشحون الثقيل داخل المادة قبل أن يتوقف.

يمكن إيجاد علاقته غنطلاقا من أن :

$$R=\int_{E_0}^{0} dx=\int_{E_0}^{0} \frac{-dE}{\frac{-dE}{dx}}$$

لدينا: $\frac{-dE}{dx}=K\frac{z^2}{v^2}$ و $E=\frac{1}{2}Mv^2$

و $dE=mvdv$

$$\Rightarrow \quad R=\int_{v}^{0} \frac{-mvdv}{\frac{Kz^2}{v^2}} \quad = \quad \frac{m}{Kz^2}\int_{v}^{0} v^3 dv$$

$$v=\sqrt{\frac{2E}{M}}$$

بوضع $m=M$ فإن:

$$R=\frac{Mv^4}{4Kz^2}$$

M: كتلة الجسيم، z: العدد الذري للجسيم، v: سرعة الجسيم و K: ثابت.

ملاحظة:

يمكن حساب قيمة مدى الجسيمات في مادة معينة إذا عرفناه مداه في مادة أخرى بالعلاقة:

$$\frac{R_1}{R_0}=\frac{\rho_0}{\rho_1}\sqrt{\frac{A_1}{A_0}}$$

حيث:

R_0: مدى الجسيم في المادة (0)، R_1: مدى الجسيم في المادة (1)، ρ_0 و ρ_1: الكتلة الحجمية للمادتين (0) و (1) على الترتيب، A_0 و A_1: العدد الكتلي للمادتين (0) و (1) على الترتيب.

5- زمن الإيقاف: T_s

وهو الزمن التقريبي اللازم لإيقاف الجسيمات داخل المادة ويحسب تجريبيا بالعلاقة:

$$T_s=1.2\,x10^{-7}\,R\sqrt{\frac{M}{E}}$$

يجب الإشارة إلى أن زمن الإيقاف T_s هو أقل من زمن التأيين T_i لأن التأيين يتوقف قبل أن يتوقف الجسيم المسبب له.

6- التبعثر في المدى

يرمز لها بالرمز ΔR ولإيجاد قيمته نستعمل المنحني المعبر عن الدالة $\frac{n}{n_0}=f(e_p)$ حيث:

n_0: عدد الجسيمات الإبتدائي.

n: عدد الجسيمات النافذة من المادة بعد التفاعل

e_p: سمك المادة.

ولرسم المنحني السابق الذكر يجب الإعتماد على التركيب التجريبي المبين في الشكل 6.

ep

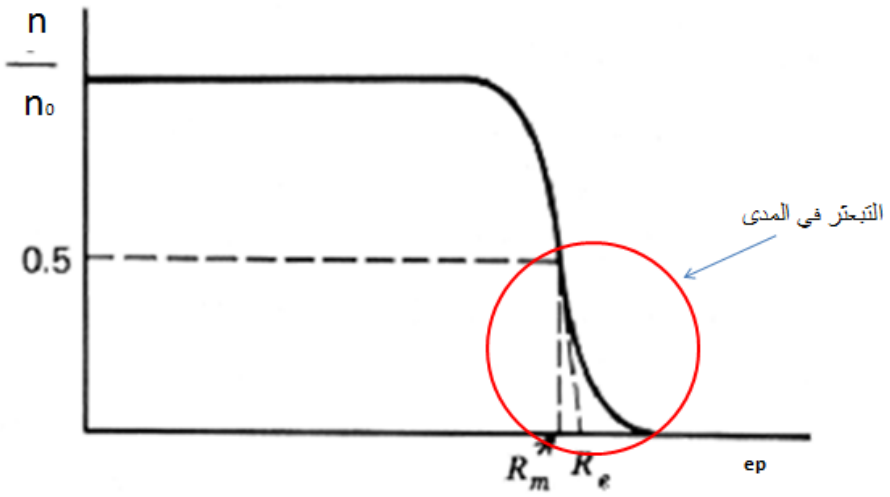
الشكل 6: التركيب التجريبي اللازم لإيجاد التبعثر في المدى

على الشكل-7- الموالي شكل المنحني الممثل للدالة $\frac{n}{n_0}=f(e_p)$ وتحديد R_m و R_e و R_s . حيث

R_m: المدى المتوسط لحزمة الجسيمات والذي يوافق سمك المادة الذي يوقف عدد $\frac{n_0}{2}$ من الجسيمات.

R_e: ثابت التغير (مماس لنقطة الانعطاف)

R_s: السمك الذي عنده تتوقف جميع الجسيمات الابتدائية (n=o).



الشكل 7: طريقة تحديد التبعثر في المدى

وعليه فإن التبعثر في المدى هو:

$$\Delta R = R_s - R_m$$