## الفصل الثالث

## تفاعل الجسيمات المشحونة مع المادة

* أفترض أن جسيمة $\alpha$ مرت خلال غاز فانها سوف تتفاعل مع الالكترونات المحيطة لذرات الغاز على الأغلب.
* يعتبر الالكترون خفيف بالنسبة لجسيمات $\alpha$ حيث أن $\frac{m_e}{m_\alpha} = 1.4 \times 10^{-4}$.
* في اي تصادم بين جسم خفيف وآخر ثقيل فان الاول ينحرف بعيداً ويسمى الثاني يتحرك بنفس أتجاهه. أن مقدار الطاقة المنقولة الى الالكترون هي :-

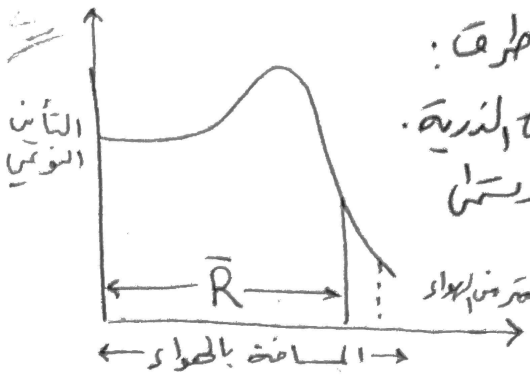
$$\Delta E = \frac{4 m_0}{m_\alpha} E_\alpha \quad \text{---} (1)$$

حيث $\Delta E$ تمثل الطاقة المنقولة للالكترون
$E_\alpha$ طاقة جسيمة $\alpha$
$m_0$ و $m_\alpha$ كتل الالكترون وجسيمة الفا على التوالي.

ان $\Delta E$ تمثل الطاقة الحركية المفقودة للالكترونات المقذوفة خارج الذرات
ملاحظة/ نعرف هذا النوع من التأين المحض بالعلامة (1) بالتأين الابتدائي وتعرف الالكترونات المقذوفة خارج الذرات بأشعة دلتا والتأين الذي تسببه اشعة دلتا يسمى بالتأين الثانوي.

## التطوح Straggling

* أن التصادم الذي تعانيه جسيمات الفا أثناء مرورها بالمادة هو عشوائي فعندما تمر جسيمة الفا بالمادة فان احتمالية تصادم جسيمات الفا مع الالكترونات كالتالي:
* اذا كان عدد الالكترونات هو $N$ فاننا نلاحظ انتشار لهذا التصادم على كل آثار مختلفة وهذا الانتشار يحدد $\sqrt{N}$ فاذا كان $N$ هو معدل الحوادث فعليه فان 68% من الحالات الملاحظة هي يحدد $\pm\sqrt{N}$ حول المعدل $N$ وفي حالة توقف جسيمة الفا فانه يمكن القول انها فقدت طاقة مقدارها $E_\alpha$.
* ويعتبر الأمر هو أن الجسيمات عند دخولها الى المادة فانها لا تفقد طاقتها بصورة متساوية رغم انبعاثها من مصدر واحد ولذلك فان مداياتها لا تكون متساوية دائماً وانما تتغير حول معدلها. وتعرف هذه الظاهرة بالتطوح ولذلك يؤخذ معدل متوسط المدى $\bar{R}$ أو في بعض الأحيان المدى المستكمل (extrapolated).




* تفقد جسيمة الفا طاقتها عند مرورها في وسط معين بثلاث طرق:

① القوة الكهروستاتيكية الناتجة بين جسيمات الفا والإلكترونات الذرية.

② التباطؤ الناتج من امتصاص الجسيمات للأشعة الكهرومغناطيسية وتسمى هذه الظاهرة "bremsstrahlung". وكذلك فان سرعة الجسيمات خلال الوسط اكبر من سرعة الضوء ولذلك سوف تسبب استقطاب الذرات المجاورة من مسارها وبالتالي تنبعث أشعة وهذا يسمى بالظاهرة (cherenkov radiation).

③ القوى الكهروستاتيكية الناتجة بين الجسيم المشحون وبين ذرات الوسط وهذا يسبب إزاحة الذرات من مواقعها البلورية أو خارج السلاسل الجزيئية.

* أن النقطة ② تكون ذات تأثير قليل لذلك فان الفقدان الكلي بالطاقة يكون حسب ① و ③

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{Tot} = -\left(\frac{dE}{dx}\right)_{nucl} + \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{elec.}$$

الفقدان الكلي بالطاقة

* لجسيمة شحنتها Z وطاقتها E وكتلتها $M_1$ تتحرك في وسط معترض له N من مراكز التشتت فان عدد التفاعلات الحادثة خلال سمك مقداره dx من الوسط المعترض الناقل له لطاقة W هي:

$$\text{عدد التفاعلات} = N\,d\sigma(E,W)\,dx$$

حيث $d\sigma$ هو مقطع التفاعل الجزئي الذي تم خلاله نقل طاقة مقدارها W

اذن فالطاقة المفقودة في كل التفاعلات تصبح:

$$-dE(W) = NW\,d\sigma(E,W)\,dX = W * \text{عدد التفاعلات}$$

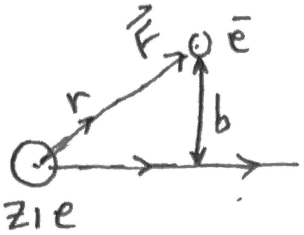
وعليه فان مقدار الفقدان الكلي يأتي من التكامل حول كل القيم الممكنة للطاقة بين قيمتين مناسبتين $W_{min}$ و $W_{max}$:

$$-\frac{dE}{dX} = N\int_{W_{min}}^{W_{max}} W\,d\sigma(E,W)$$

مقدار الطاقة الكلية المفقودة

# الفقدان بالطاقة عن طريق التفاعل الالكتروني (صدمة الايقاف)

* وهو الفقد بواسطة القوى الكهروستاتيكية بين الجسيم المحقون والالكترونات الذرية.




* نفرض ان أيون سرعته $(Z_1 e)$ يمر قرب الكترون بمسافة $b$ اتجاه القوة على الالكترون يصنع زاوية مقدارها $\theta$ مع اتجاه مسار الايون الموجب وان الدفع الذي يؤثر على الالكترون يعود الى وجود زخم منقول مقداره $P$ يعطى بالعلاقة

$$P=\int_{-\infty}^{\infty} F\sin\theta\, d\theta \quad \text{——①}$$

طاقة كولوم $F=\dfrac{Z_1 e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$

$$\because r^2\frac{d\theta}{dt}=vb \Rightarrow dt=\frac{r^2}{vb}d\theta \qquad \text{, where } w=\frac{d\theta}{dt}$$

ويكون الزخم المنقول للالكترون:

$$P=\int_0^{\pi}\frac{Z_1 e^2\sin\theta\, d\theta}{4\pi\epsilon_0 bV}=\frac{Z_1 e^2}{2\pi\epsilon_0 bV} \quad \text{——②}$$

$$W=\frac{P^2}{2m_0}=\frac{Z_1^2 e^4}{8\pi^2\epsilon_0^2 b^2 m_0 V^2} \quad \text{——③}$$

حيث عوضنا عن $F$ و $dt$ في العلاقة ① وان $W$ هي الطاقة الحركية المنقولة للالكترون

* اذا كان هناك $n$ من الالكترونات في وحدة الحجوم فان الالكترونات في السمك $dx$ للحادة المعترضة هي $(2\pi bn\,db\,dx)$ وان الطاقة المفقودة من الايون لهذه الالكترونات ستكون:

$$-dE=2\pi bn\,db\,dx\,W=2\pi bn\,db\,dx\frac{Z_1^2 e^4}{8\pi^2\epsilon_0^2 b^2 m_0 V^2}$$

$$\therefore \frac{-dE}{dx}=\frac{nZ_1^2 e^4}{4\pi\epsilon_0^2 m_0 V^2}\ln\frac{b_{max}}{b_{min}}$$

وعندما تكون $(b)$ كبيرة مقارنة مع زمن ذبذبة الالكترون في مداره فان الحدود العليا والدنيا لـ $(b)$ ستكون

$$b_{max}\simeq\frac{V}{\upsilon} \text{ and } b_{max}\simeq\frac{h}{m_0 c}$$

$$b_{min}=\frac{h}{m_0 V}$$

$$\therefore -\frac{dE}{dx} = \frac{nZ_1^2 e^4}{4\pi\epsilon_0^2 m_0 v^2} \ln\frac{m_0 v^2}{h\nu}$$

$h\nu$ هي جهد تأين الإلكترون في الذرة ( $I = h\nu$ ) :

$$\therefore -\frac{dE}{dx}\Big)_{\text{electron}} = \frac{nZ_1^2 e^4}{4\pi\epsilon_0 m_0 v^2}\left(\ln\frac{m_0 v^2}{I}\right) \quad \text{---(3)}$$

وعند استخدام Q.M فاننا نحصل على علاقة بيثي-بلوخ :

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{electron}} = \frac{nZ_{eff}^2 e^4}{4\pi\epsilon_0 m_0 v^2}\left[\ln\frac{2mv_{max}^2}{I^2(1-\beta^2)} - 2\beta^2 - \mathcal{L} - U\right] \quad \text{---(4)}$$

$U$ : التصحيح لعدم مشاركة الإلكترونات القريبة من النواة

$\mathcal{L}$ : التصحيح للاستقطاب عند السرع العالية.

## الفقدان بالطاقة نتيجة التصادم النووي

إن الأيونات التي تمتلك طاقة بحدود الميكا الكترون فولت فانها سوف تتشتت بمجال كولومي ناتج عن الشحنة الموجبة لنوى ذرات المادة المخترقة وهذا معروف بتشتت رذرفورد وان مساحة المقطع الجزئي لـ $d\sigma(E,W)$ بالشكل التالي :-

$$d\sigma(E,W) = \frac{\pi Z_1^2 Z_2^2 e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2}\left(\frac{M_1}{M_2}\right)\frac{dW}{W^2} \quad \text{---(1)}$$

$$Z_{eff} = Z_1\left(1 - e^{\frac{-130\beta}{Z_1^{2/3}}}\right)$$

وعندما يتعادل الأيون بشكل تام فان قوى التنافر بين الأيون وذرات الهدف تأتي عن تداخل (تطابق) المستويات الإلكترونية البعيدة بصورة تدريجية بمسافة اقتراب قليلة والتشتت من هذا النوع يعرف بتشتت الكرة الصلدة :

$$d\sigma(E,W) = 4\pi R^2(E)\frac{dW}{W_{max}}$$

$$W_{max} = \frac{4M_1M_2}{(M_1+M_2)^2}E$$

حيث أن $R(E)$ نصف القطر المؤثر للكرة الصلدة

$W_{max}$ أكبر طاقة منقولة.

## تفاعل البوزيترونات مع المادة ($\beta^+$)

* يفقد الإلكترون والبوزيترون طاقته بعمليات مشابهة لجسيمات الفا عن طريق تهيج وتأين ذرات الوسط ما عدا الاختلاف التالي :

① بسبب الكتلة الصغيرة لهما فانهما ينحرفان بزوايا كبيرة مقارنة مع الجسيمات المحتوية لنفس الطاقة

② ان الجسيمات المتحركة والجسيمات المشتتة هي جسيمات متشابهة ولهذا فان عمليات التبادل للمواقع يجب أن تؤخذ بنظر الاعتبار .

* ان الفقد بالطاقة نتيجة هذه العمليات يعطى بالعلاقة التالية :-

$$\left(-\frac{dE}{dX}\right)_c = \frac{e^4 Z N}{8\pi\epsilon_0^2 m_0 v^2}\left[\ln\frac{m_0 v^2 E}{2I(1-\beta^2)} - (2\sqrt{1-\beta^2}-1+\beta^2)\ln 2 + (1-\beta^2) + \frac{1}{8}(1-\sqrt{1-\beta^2})^2\right]$$

$$\beta = \frac{v}{c} \qquad \text{——} ①$$

لقد أعطى (Beth) معادلة تطبق على الالكترونات والبوزيترونات معاً عندما تكون $E \gg m_0 c^2$ حيث الفقد بالطاقة عن طريق الاشعاع هو :

$$\left(-\frac{dE}{dX}\right)_r \simeq \frac{[4Ze^6 nE(Z+1.3)(\ln(183Z^{-1/3}))+\frac{1}{8}]}{(4\pi\epsilon_0)^3 \hbar m_0^2 c^5} \qquad \text{——} ②$$

العلاقة ② يمكن أن تأخذ الشكل التالي

$$-\frac{dE}{d\xi} = \frac{E}{X_0} \qquad \text{——} ③$$

حيث $\xi$ هي المسافة التي يقطعها الجسيم مقاسة بوحدات $gm/cm^2$

$X_0$ هو ثابت يمكن ايجاده من المعادلة السابقة .

$$X_0 = \frac{(4\pi\epsilon_0)^3 \hbar m_0^2 c^5 M_a}{4e^6 N_A Z(Z+1.3)(\ln(183Z^{-1/3}))+\frac{1}{8}} \qquad \text{——} ④$$

حيث $M_a$ هو الوزن الكزيئي . وبعد التعويض ينتج :-

$$X_0 = \frac{716\, M_a}{[Z(Z+1.3)(\ln(183Z^{-1/3}))+\frac{1}{8}]} \quad (gm/cm^2) \qquad \text{——} ⑤$$

ليس $X_0$ طول مسار الاشعاع (radiation length) وهو سمك الوسط المطلوب اللازم لتقليل طاقة الالكترون بواسطة الاشعاع الى $\frac{1}{e}$ من قيمته الاولية .

يمكن للبوزترون أن يفنى باتجاه الالكترون بحيث محكوسة الى عملية أنتاج الازواج
وان احتمال الفناء يكون أكبر في حالة الطاقات القليلة حيث اذا كان الالكترون ضعيف الارتباط بالنواة يكون فوتونين اما اذا كان ارتباط الالكترون قوي فيكون فوتون واحد وان قسم من زخم البوزترون تمتصه النواة.

* أن الالكترون والبوزترون يمكن أن يكونا معاً نوعاً من الذرات يتحرك فيها كل منهما حول مركز ثقلهما المشترك ويسمى هذه الذرات البوزترونيوم وهي ذات عمر قصير جداً ($10^{-7}-10^{-10}$) ثانية اعتماداً على أتجاه البرم لان احدهما سيفنى الاخر

* يمكن حساب معدل فقدان الطاقة الخطي نتيجة لعمليات الأثارة والتأين من معادلة (بيث-بلوخ) التالية:-

$$\frac{dE}{dX} = \frac{2\pi q^4 NZ (3\times10^9)^4}{E_m \beta^2 (1.6\times10^{-6})^2} \left\{ \ln \left[ \frac{E_m E_k \beta^2}{I^2(1-\beta^2)} \right] - \beta^2 \right\} \left(\frac{MeV}{cm}\right) \quad \text{---(6)}$$

$q$ : شحنة الالكترون $1.6\times10^{-19}$ C

$N$ : عدد الذرات في الوسط الممتص بـ $cm^3$

$Z$ : العدد الذري للوسط الممتص

$NZ$ : عدد الالكترونات بالوسط الممتص بـ $cm^3$ حيث :-

$NZ = 3.88\times10^{20}$ (للهواء عند $0^\circ$ وضغط 760mm زئبق)

$E_m$ : طاقة الالكترون السكوني $E_m = 0.51$ MeV

$E_K$ : الطاقة الحركية لجسيمات $\beta$ (بوحدات MeV).

$\beta = \frac{V}{C}$ : سرعة الجسيمات المتأينة الى سرعة الضوء

$I$ : معدل جهد الأثارة أو التأين في الوسط الممتص بوحدات (MeV)

$$I = \begin{cases} 8.6\times10^{-5} & \text{(الهواء)} \\ 1.35\times10^{-5} Z & \text{(المواد الاخرى)} \end{cases}$$

## مدى الجسيمات المثقلة الأخرى في الهواء

* لحساب مدى جسيمة الفا بالهواء أو في أي وسط آخر نستخدم العلاقة التالية :-

$$R_\alpha = \frac{m_\alpha m_0 M K^2}{4\pi e^4 Z_\alpha^2 A_0 Z \rho} \int_{V_0}^{0} \frac{V^3 dV}{\ln(2m_0V^2/B)}$$

حيث

$\beta$ : جهد التأين $= h\nu$ — $A_0$ : عدد أفوكادرو

$m_0$ : كتلة الإلكترون — $V$ : سرعة الجسيمة المثقلة

$Z$ : العدد الذري للوسط — $\rho$ : كثافة الوسط المعترض

$Z_\alpha$ : شحنة جسيمة الفا — $M$ : الوزن الجزيئي للوسط

$k$ : ثابت العزل الكهربائي

بما أن :

$$E = \frac{1}{2} M_\alpha V^2$$

$$\therefore dE = M_\alpha V dV$$

ان جسيمة $\alpha$ لها مدى في الوسط المعترض يعطى بالعلاقة

مدى جسيمة $\alpha$ في وسط

$$R_\alpha = \frac{m_\alpha m_0 M K^2}{4\pi e^4 Z_\alpha^2 A_0 Z \rho} f(V_0, B) \quad (cm)$$

$$R' = \frac{m' m_0 M K^2}{4\pi e^4 Z'^2 A_0 Z \rho} f(V_0', B) \quad (cm)$$

نفرض أن الجسيمة المكونة تمتلك نفس سرعة جسيمة الفا وبقسمة العلاقتين السابقتين :

$$\boxed{\frac{R'}{R_\alpha} = \frac{m' Z_\alpha^2}{m_\alpha Z^2}}$$

(السرع متساوية)

هذه العلاقة تستخدم لحساب مدى أي جسيمة مثقلة بالاعتماد على مدى جسيمة الفا في أي وسط كذلك تستخدم لمعرفة مدى جسيمة $\alpha$ في أي وسط معترض . أو حساب مدى أي جسيمة في أي وسط بالاعتماد على مدى جسيمة الفا في الهواء .

$$\text{or} \quad \boxed{\frac{R'}{R_\alpha} = \frac{\rho_{air}(M')^{1/2}}{\rho'(M_{air})^{1/2}}}$$

$M'$ الوزن الجزيئي للوسط الجديد / $\rho'$ كثافة الوسط الجديد

$M$ " " للهواء / $\rho$ كثافة الهواء