| | |
|---|---|
| الكلية | التربية للعلوم الصرفة |
| القسم | الفيزياء |
| المادة باللغة الانجليزية | Health physics |
| المادة باللغة العربية | فيزياء صحيه |
| المرحلة الدراسية | المرحلة الثانية |
| اسم التدريسي | نور زهير |
| عنوان المحاضرة باللغة الانجليزية | Stopping power |
| عنوان المحاضرة باللغة العربية | قدرة الايقاف |
| رقم المحاضرة | المحاضرة الاولى |
| المصادر والمراجع | كتاب الفيزياء الصحية المنهجي<br>تأليف / الدكتور خالد الاحمد |
| | |
| | |

# محتوى المحاضرة

### 1.4.2قدرة الايقاف Stopping power

بغية حساب قدرة الايقاف للجسيمات المشحونة في المادة يتم تقسيم هذه الجسيمات إلى مجموعتين. المجموعة الأولى تضم الجسيمات المشحونة الثقيلة وتشمل جميع الجسيمات المشحونة عدا الالكترونات، التي تكون المجموعة الثانية من هذا التقسيم. إن الفرق الرئيسي بين سلوك الالكترونات وبقية الجسيمات المشحونة يعود إلى ان كتلة السكون للإلكترون $m_o$ هي صغيرة مقارنة مع عناصر المجموعة الأولى . وبما أن اهم التفاعلات التي تؤدي إلى فقدان الطاقة من قبل الجسيمات المشحونة تحصل بين الجسيم والالكترونات الذرية في المادة فإن إصطدام الكترون مع الكترون ذري سوف يسبب خسارة كبيرة في طاقة الالكترون القذيفة في التصادم الواحد يسبب التماثل في الكتلة بين القذيفة والهدف ، كما أن الالكترون القذيفة قد ينحرف بزاوية كبيرة تغير اتجاه حركته . أما بالنسبة للجسيمات الثقيلة فإنها تفقد مقداراً قليلاً من الطاقة، حوالى $\left(\frac{4m_o}{M}\right)$من طاقتها الأصلية ، حيث M هي كتلة الجسيم الثقيل و $m_o$ كتلة الالكترون وهي تنحرف عن اتجاهها بزوايا صغيرة ويوضح الجدول (1−1) بعض خواص الجسيمات المشحونة.

### 1.4.3.معادلة قدرة الايقاف للجسيمات المشحونة الثقيلة

تعد التصادمات الرخوة والقاسية بين الجسيمات المشحونة والالكترونات الذرية في المادة هي العمليات الفعالة في تقليل طاقة هذه الجسيمات. هناك عدة طرق لحساب قدرة المواد على ايقاف الجسيمات المشحونة ، وهي عبارة عن متوسط ما يفقده الجسيم المشحون طاقة في وحدة المسافة من مساره . إحدى الطرق المتبعة لاشتقاق معادلة قدرة الايقاف تعتمد على مبادئ الميكانيك الكلاسيكي في معالجة عملية التصادم بين الجسيم المشحون والالكترونات في الذرة، إلا ان هذه المعالجة لاتصح في جميع الطاقات ولاسيما بالنسبة للإلكترونات حيث تبدأ الآثار النسبية بالظهور مبكراً. لذلك قام بيث Bethe باعتماد ميكانيك الكم لاشتقاق علاقة قدرة الايقاف $\frac{dT}{dx}$ : يجري عادة استخدام ما يعرف باسم قدرة الايقاف الكتلية بدلا من قدرة الايقاف وهي عبارة عن قدرة الايقاف مقسومة على كثافة المادة الموقفة وذلك لالغاء تأثير الكثافة.

اعتمدت عملية اشتقاق علاقة قدرة الايقاف الكتلية $\frac{1}{\rho} = \frac{dt}{dx}$ على تجزئتها إلى مركبتين هما قدرة الايقاف التصادمية Collision stopping power ، وقدرة الايقاف الاشعاعية Radiative stopping power . تمثل المركبة الأولى الطاقة التي يفقدها الجسيم نتيجة التصادمات الرخوة والقاسية أما المركبة الثانية فهي تعبر عن الطاقة المفقودة خلال التفاعلات التي تحصل بين الجسيم والمادة وتؤدي إلى خسارة

في طاقته على شكل إشعاع bremsstrahlung . إن الطاقة المفقودة عن طريق الاشعاع تنتقل بعيداً عن مسار الجسيم بوساطة الفوتونات ، في حين أن الطاقة المفقودة عن طريق التصادمات تقوم بتهييج وتأيين الذرات في المنطقة المجاورة للمسار. بناءً على التقسيم السابق يمكن كتابة معادلة قدرة الايقاف التصادمية الكتلية كما يأتي:

$$\left(\frac{1}{\rho}\frac{dt}{dx}\right)_c = \left(\frac{dt_s}{\rho dx}\right)_c + \left(\frac{dt_h}{\rho dx}\right)_c \qquad \dots (1-2)$$

الجدول (1 – 1) بعض خصائص الجسيمات المشحونة

| الجسيم المشحون | الشحنة (كولوم) | الكتلة M | | طاقة السكون | متوسط العمر sec | $\frac{M}{M_{proton}}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | غرام | amu | $Mc^2$ (MeV) | | |
| الالكترون | $\pm 1{\cdot}60210 \times 10^{-19}$ | $9{\cdot}10908 \times 10^{-28}$ | $5{\cdot}58597 \times 10^{-4}$ | 0·511006 | مستقر | 0·00054463 |
| ميون Muon | $\pm 1{\cdot}6021 \times 10^{-19}$ | $0{\cdot}188346 \times 10^{-24}$ | 0·113432 | 105·659 | $2{\cdot}2 \times 10^{-6}$ | 0·112612 |
| بايون Pion | $\pm 1{\cdot}6021 \times 10^{-19}$ | $0{\cdot}248812 \times 10^{-24}$ | 0·149848 | 139·58 | $2{\cdot}55 \times 10^{-8}$ | 0·148765 |
| كائون Kaon | $\pm 1{\cdot}6021 \times 10^{-19}$ | $0{\cdot}880204 \times 10^{-24}$ | 0·530104 | 493·78 | $1{\cdot}229 \times 10^{-8}$ | 0·526274 |
| بروتون Proton | $+ 1{\cdot}6021 \times 10^{-19}$ | $1{\cdot}67252 \times 10^{-24}$ | 1·00727663 | 938·256 | مستقر | 1·000 |
| $\Sigma^+$ | $+ 1{\cdot}6021 \times 10^{-19}$ | $2{\cdot}120187 \times 10^{-24}$ | 1·276885 | 1189·39 | $0{\cdot}79 \times 10^{-19}$ | 1·267660 |
| $\Sigma^-$ | $- 1{\cdot}6021 \times 10^{-19}$ | $2{\cdot}134109 \times 10^{-24}$ | 1·285269 | 1197·2 | $1{\cdot}58 \times 10^{-10}$ | 1·275984 |
| جسيم الفا | $2 (+1{\cdot}60210 \times 10^{-19})$ | $6{\cdot}601 \times 10^{-24}$ | 3·975457 | 3701·15 | مستقر | 3·94673 |

13 of 4Page

حيث أن الرمز C، وضع لتبيين أن الكميات الواردة في المعادلة (1.2) هي ناتجة عن التصادم فقط و s للتصادمات الرخوة و h للتصادمات القاسية.

لقد تم إشتقاق علاقة قدرة الايقاف الناتجة عن التصاديات الرخوة من قبل بيث Bethe بالاعتماد على تقريب بورن Born approximation الذي يفترض أن سرعة الجسيمات المشحونة الثقيلة هى اكبر بكثير من السرعة القصوى للإلكترونات الذرية في مدار بور . Bor orbital velocity . لقد كانت العلاقة المشتقة بهذه الطريقة للتصادمات الرخوة هي:

$$\left(\frac{dt_s}{\rho dx}\right)_c = \frac{2cm_o e^2 z^2}{\beta^2}\left[in\ \frac{2m_o e^2\beta^2 H}{I^2(1-\beta^2)} - \beta^2\right] \quad \dots (1-3)$$

حيث T تمثل الطاقة الحركية للجسيم المشحون ، I متوسط جهد التأين لمذرات المادة المعترضة ، H تمثل قيمة اختيارية للطاقة التي يفقدها الجسيم خلال التصادم الواحد وتمثل الحد الفاصل بين التصادمات الرخوة والتصادمات القاسية NAZ . $C = \pi\left(\frac{N_A Z}{A}\right) r_0^2$ حيث يمثل المقدار $\frac{N_A Z}{A}$ عدد الالكترونات في الغرام الواحد من المادة المعترضة أما $r_o = \frac{e^2}{m} = 2.87 \times 10^{-13} cm$ r هو نصف القطر الكلاسيكى للإلكترون. يمكن تبسيط المقدار الموجود خارج القوس باستبدال بعض الثوابت بقيمتها فتصبح

$$k = \frac{2Cm_0 c^2 z^2}{\beta^2} = 0.1535\frac{Zz^2}{A\beta^2}\ \frac{MeV}{g/Cm^2}$$

حيث z تمثل العدد الذري للجسيم المشحون، و Z العدد الذري للمادة المعترضة ، $m_0 c^2 =$ $0.511\ meV$ هي طاقة السكون للإلكترون.

بالنسبة للتصادمات القاسية فإن قدرة الايقاف تعتمد على نوع الجسيم المشحون (الكترون، يوزترون ، جسيم ثقيل). بالنسبة للجسيم الثقيل الذي يملك كتلة أكبر بكثير من كتلة الالكترون فإن علاقة قدرة الايقاف هي:

$$\frac{dT_h}{\rho dx} = k\left[in\left(\frac{T_{max}}{H}\right) - \beta^2\right] \quad \dots (1-4)$$

حيث $T_{max}$ تمثل الطاقة القصوى التي يمكن أن تنتقل في تصادم رأس Head on collision بين الجسيم الثقيل والالكترون الذري وتعطى $T_{max}$ بالعلاقة الاتية:

$$T_{max} = m_0c^2\left(\frac{\beta^2}{1-\beta^2}\right) = 1.022\left(\frac{\beta^2}{1-\beta^2}\right)\ \text{MeV}$$

بجمع المعادلتين (1.3) و (1.4) يمكن الحصول على معادلة قدرة الايقاف التصادمية الكتلية كما يأتي:

$$\left(\frac{dt_s}{\rho dx}\right)_c = k\left[in\left(\frac{m_0c^2\beta^2T_{max}}{I^2(1-\beta^2)}\right) - 2\beta^2\right] \qquad \ldots(1-5)$$

وبتعويض قيمة $T_{max}$ وبعض الثوابت الأخرى وبعض الثوابت الأخرى يمكن تبسيط هذه المعادلة إلى الشكل الآتي:

$$\left(\frac{dt}{\rho dx}\right)_c = 0.3071\ \frac{z^2}{A\beta^2}\left[13.8373 + in\ \frac{\beta^2}{(1-\beta^2)} - \beta^2 - in\ I\right]$$

إن المعادلة (1.5) تتوقع قيمة اعلى من الحقيقة وسبب ذلك هو ان تقريب بورن يصبح غير صالح عندما تكون طاقة الجسيمات قليلة لأن سرعتها تصبح مقاربة السرعة الالكترونات الذرية في مداراتها الداخلية ، مما يقلل من مساهمة هذه الالكترونات في ايقاف الجسيم المشحون . لذلك يتم طرح حد يمثل التصحيح المطلوب ويسمى تصحيح الطبقات Shell Correction و يرمز له بالرمز $\frac{C}{Z}$ وستتم مناقشته لاحقا وتصبح المعادلة كما يأتي:

$$\left(\frac{dt}{\rho dx}\right)_c = 0.3071\ \frac{z^2}{A\beta^2}\left[f(\beta) - in\ I - \frac{\beta^2}{(1-\beta^2)} - \frac{C}{Z}\right] \qquad \ldots(1-6)$$

حيث ان $f(\beta)$ تسمى دالة رقم الايقاف stopping number function وهي تعطى بالعلاقة الآتية

$$f(\beta) = 13\cdot8373 + \text{In}\ \frac{\beta^2}{(1-\beta^2)} - \beta^2$$

ويحوي الملحق (1) قيم $\beta$ , $\beta^2$ , $f(\beta)$ ويمكن الاستفادة منها في حساب قدرة الايقاف لمختلف المواد.

### 1.4.4 معادلة قدرة الايقاف للإلكترونات

على الرغم من أن الالكترونات عند مرورها عبر المادة تخوض تفاعلات مشابهة لتلك التي تخوضها الجسيمات الثقيلة إلا ان هناك فرقين أساسيين بينها:

1- في التصادمات التي تحصل بين الالكترونات المارة عبر المادة والالكترونات الذرية فإن هناك خسارة كبيرة في الطاقة يمكن ان تتعرض لها الالكترونات العابرة قد تصل إلى نصف الطاقة الأصلية في التصادم الواحد.

2- إن الآثار النسبية سوف تبدأ في الظهور عند طاقات قليلة (بضع مئات kev ) مقارنة مع الجسيمات الثقيلة، مما يجعل كمية الطاقة المفقودة عن طريق الاشعاع Bremsstrahlung كبيرة نسبيا ولاسيما في الطاقات العالية. لذلك يتم تقسيم قدرة الايقاف للالكترونات إلى مركبتين هما:

1- قدرة الايقاف التصادمية وتمثل معدل الطاقة المفقودة من قبل الالكترون في وحدة المسافة من مساره نتيجة التصادمات الكولومية مع الالكترونات الذرية في المادة المعترضة.

2- قدرة الايقاف الاشعاعية ، وتمثل معدل الطاقة المفقودة في وحدة المسافة من مسار الالكترون عن طريق اطلاق الاشعاعات الكهرومغناطيسية نتيجة الكبح النووي.

إن فصل قدرة الايقاف بالنسبة للإلكترونات إلى مركبتين مفيد لسببين ، أولها أن الطريقة المتبعة في حساب كل مركبة مختلفة عن الأخرى ، وثانيها أن الطاقة التي تذهب لعمليات التأيين والتهييج في الذرات يجري امتصاصها من قبل المادة قريباً من مسار الالكترون ، في حين أن معظم الطاقة المفقودة عن طريق الاشعاع تذهب بعيداً عن مسار الالكترون قبل أن يتم امتصاصها في المادة . إن التقسيم السابق له أهمية خاصة عندما يتعلق الامر بكمية الطاقة التي تتسلمها المادة نتيجة مرور الاشعاعات فيها لارتباط ذلك في دراسة تأثير الاشعاعات على الخلايا والانسجة وتقدير الجرع الاشعاعية.

بنفس الطريقة المتبعة مع الجسيمات الثقيلة تقسم قدرة الايقاف التصادمية للالكترونات إلى مركبة للتصادمات الرخوة وأخرى للتصادمات القاسية. لقد قام بيث Bethe باشتقاق معادلة قدرة الايقاف للتصادمات الرخوة وهي المعادلة (1.3) . أما مركبة التصادمات القاسية فقد أشتقها بيث أيضاً مستخدماً المقطع العرضي للإلكترون الذي اعطاه مللر. إن علاقة قدرة الايقاف الكتلية التصادمية للالكترونات والبوزترونات هي الآتية:

$$\left(\frac{dt}{\rho dx}\right)_c = k\left[in\left(\frac{\tau^2(\tau+2)}{2(I/m_0c^2)^2}\right) + F^{\pm}(\tau) - \frac{2C}{Z} - \delta\right] \qquad \ldots(1-7)$$

ويمثل المقدار $\delta$ في المعادلة (7.1) تأثير الكثافة الذي يسبب نقص قدرة الايقاف بسبب الاستقطاب الذي يحصل في المواد الصلبة والسائلة عندما تكون سرعة الالكترونات عالية جداً.

إن المعادلة (1.7) تستخدم للإلكترونات حيث يتم استبدال $F^-(\tau)$ بقيمتها وللبوزترونات تستخدم $F^+(\tau)$

$$F^-(\tau) = 1 - \beta^2 + \left(\left[\frac{\tau^2}{8} + 1 - (2\tau+1)in\,2\right]/(\tau+1)\right)$$

$$F^+(\tau) = 2\,In2 - \beta^2/12\left(23 + \frac{14}{\tau+2} + \frac{10}{(\tau+2)^2} + \frac{4}{(\tau+2)^3}\right)$$

$\tau$ هي الطاقة الحركية للالكترون بوحدات $m_0c^2$ بعد تعويض قيم الثوابت في المعادلة (7.1) تصبح بالشكل المبسط الاتي:

$$\left(\frac{dt}{\rho dx}\right) = k\,\frac{0\cdot 1535Z}{A\beta^2}\left[in\left(\frac{\tau^2(\tau+1)}{2(I/m_0c^2)^2}\right) + F^{\pm}(\tau) - \frac{2C}{Z} - \delta\right] \qquad \ldots(1-8)$$

إن المعادلة (1.8) لاتصلح لحساب قدرة الايقاف في الطاقات التي تقل عن 50keV، لذلك قام Sugiyama بادخال تحويرات على هذه المعادلة بالاعتماد على أسس تجريبية ، حتى تصبح صالحة لحساب قدرة الايقاف للإلكترونات ذات الطاقات القليلة حتى عشرة الكترون فولت ، حيث تم استبدال شحنة الالكترون $Z_1$ بقيمتها الفعالة $Z_1$ والتي تعطى بالعلاقة الآتية:

$$Z^*_1 = Z_1(1 - \exp(-2\cdot 2\times 10^3\beta^{1.9}))$$

وقد جاء هذا التصحيح للتقليل من أثر تبادل الشحنات charge exchange كما تم أيضاً استبدال العدد الذري للمادة المعترضة Z بقيمته الفعالة كما يأتي:

$$Z^*_1 = Z_2[1 - \exp(-0\cdot 64\,V^2{}_r)Z_2]$$

$$N = \frac{2}{3} + \frac{1}{3}[1 - \exp(1 - 145\beta^2)]$$

كما تم أيضاً استبدال قيمة جهد التأين I بقيمة تتغير مع طاقة الالكترون T وأصبح كالآتي:

$$I^* = I\,[\,1 - \exp(-0.71\,T/I)]\ eV$$

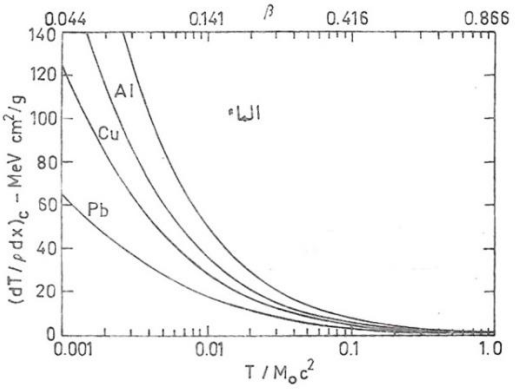
بادخال هذه المقادير على المعادلة (8.1) أمكن الحصول على معادلة قدرة الايقاف التصادمية الكتلية وهي:

$$\frac{dt}{\rho dx} = 0\cdot 1535\ \frac{{Z_1}^{*2} Z_2^{*}}{A\beta^2}\left[in\left(\frac{T}{I^*}\right) + F(\tau) - \frac{2C}{Z_2^{*}}\right] \qquad \ldots(1-9)$$

وقد أهمل تأثير الكثافة في المعادلة (1.9) لأنها تصبح قليلة جداً في الطاقات الواطئة . يبين الشكل (1.2) قدرة الايقاف التصادمية الكتلية لعدد من المواد كدالة لـ $\beta$ وكذلك كدالة للطاقة T بوحدات $m_0c^2$ كما يبين الشكل (1.3) قدرة الايقاف لعنصري الالمنيوم والذهب بالنسبة للإلكترونات بطاقة من 1kev إلى 10 kev بدلالة الطاقة T محسوبة من المعادلتين (1.8) و (1.9) كما يورد الملحق (2) قيم قدرة الايقاف الكتلية لجسيمات بيتا في عدد من العناصر والمركبات لمختلف الطاقات وتصحيح الكثافة ( $\delta$ ) .

### 1.4.5 تحليل معادلة قدرة الايقاف

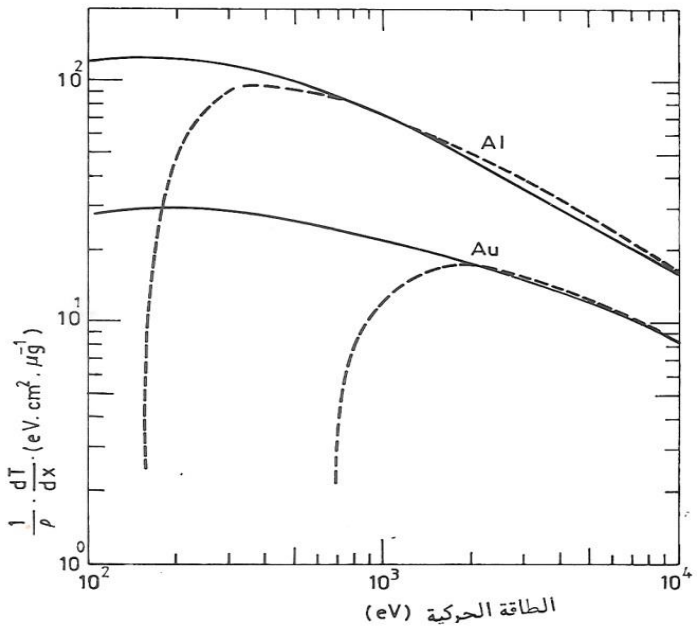
لقد نشرت الـ (ICRU) في تقريرها الدوري لعام 1984 جداول لقيم قدرة الايقاف لعدد كبير من العناصر والمركبات ، قام بحسابها الثنائي بيرغر وسلتزر Berger and Seltzer باستخدام المعادلة (1.8) التي تعد المعادلة النظرية الأكثر شيوعاً في هذا المجال . وكما هو واضح من المعادلة المذكورة فإن هناك عدة عوامل لها تأثير واضح على قدرة الايقاف سوف نقوم بمناقشة تأثير كل من هذه العناصر وعلاقته بتأثيرات بقية عناصر المعادلة:




شكل (1.2) قدرة الايقاف التصادمية الكتلية $\frac{dt}{\rho dx}$ لعدد من العناصر بدلالة $\beta\frac{V}{C}$ وكذلك بدلالة الطاقة T بوحدات $m_0c^2$

1- تأثير الوسط المعترض : تعتمد قدرة الايقاف التصادمية على نوع الوسط الذي تمر فيه الاشعاعات من خلال وجود اثنين من العوامل المتعلقة بهذا الوسط ، وهما يقللان من قدرة الايقاف التصادمية كلما ازداد العدد الذري Z للمادة المعترضة ، أولاً المعامل $\frac{Z}{A}$ خارج القوس والذي يجعل قدرة الايقاف متناسبة مع عدد الالكترونات في وحدة الكتلة للوسط، وتقل قدرة الايقاف هذه بمقدار حوالي 20% عند الانتقال من الكربون إلى الرصاص. أما العنصر الثاني المتعلق بالمادة المعترضة فهو المقدار – 1nl الموجود داخل القوس ، إن هذا المقدار يقلل قدرة الايقاف كلما زادت Z ومقدار التناقص يعتمد على سرعة الجسيم وذلك بسبب تأثير المقدار الذي يحوي على $\beta^2$ والموجود داخل القوس.

إن المقدار 1nl سوف يقلل قدرة الايقاف $\frac{dt}{\rho dx}$ بحيث تصبح للرصاص 48% أقل منها للكربون عندما تكون $\beta = 0 \cdot 1$ أي أن $T = 5MeV$ وتصبح أقل بمقدار 24% عندما تكون $\beta = 0 \cdot 85$ أي أن الطاقة الحركية للجسيم $T = 850MeV$ ، إن الحسابات السابقة هي للبروتونات ، كما أن المقدار In I يسبب تغييراً شديداً في قدرة الايقاف التصادمية مع العدد الذري للمادة المعترضة . بسبب تأثير العاملين $\frac{Z}{A}$ و In I




شكل (1.3) قدرة الايقاف لعنصري الألمنيوم والذهب.

الخط المتقطع المعادلة (1.8) والخط المتصل المعادلة (1.9).

تتناقص قدرة الايقاف $\frac{dt}{\rho dx}$ للرصاص بمقدار من 40% إلى 60% من قيمتها للكربون ضمن قيم المحصورة بين 0.85 و 0.1.

2- تأثير سرعة الجسيم : إن الاعتماد الأكبر على السرعة يأتي من تأثير مقلوب $\beta^2$ خارج القوس والذي يسبب تناقص قدرة الايقاف بسرعة عندما تزداد سرعة الجسيم ولا يتوقف تأثير هذا المقدار إلا عندما تصبح قيمة $\beta$ مساوية للواحد ، ولكن مع ذلك فإن المقادير الحاوية على $\beta^2$ داخل القوس تستمر في التأثير ولكن بشكل محدود.

3- تأثير شحنة الجسيم : إن المقدار $Z^2$ يعني أن الجسيم الثنائي الشحنة سوف يملك أربعة أضعاف قدرة الايقاف التي يملكها الجسيم الأحادي الشحنة الذي يملك نفس السرعة وفي نفس الوسط ، لذلك نستطيع أن نتوقع أن يخسر جسيم الفا مثلاً أربعة أضعاف ما يخسره البروتون عندما يتساويان في السرعة.

4- تأثير كتلة الجسيم : لايظهر في معادلة قدرة الايقاف الكتلية التصادمية أي اعتماد على كتلة الجسيم مما يعني أن كل الجسيمات التي لها نفس الشحنة ونفس السرعة سوف يكون لها نفس قدرة الايقاف في نفس الوسط

### 1.4.6تصحيح الطبقات Shell correction

إن الفرضية الأساسية لتقريب بورن Born approximation المستخدم في اشتقاق أن تكون سرعة الجسيمات المشحونة اكبر من سرعة الالكترونات الذرية في مداراتها ضمن المادة المعترضة ، لكن في الحقيقة أن الالكترونات في الطبقات الداخلية (K – shell) يمكن أن تكون سرعتها عالية جداً، خصوصاً في العناصر الثقيلة حيث تكون Z كبيرة ، إن هذا التناقض يجعل قدرة الايقاف المحسوبة من علاقة بيث Bethe اكبر من القيمة الحقيقية وخاصة عندما تكون طاقة الجسيمات المشحونة قليلة ، ولهذا فمن أجل الحصول على نتائج دقيقة من هذه المعادلة كان لابد من القيام بتصحيح يستهدف تقليل مساهمة الالكترونات في المدارات الداخلية في عملية ايقاف الجسيمات المشحونة . إن مقدار التصحيح C/ Z في المعادلة هو عبارة عن مجموع التصحيحات للطبقات المختلفة .... L,K الخ وهو نفسه لجميع الجسيمات المشحونة التي تملك سرعاً متساوية بما في ذلك الالكترونات وتعتمد قيمته على نوع الوسط وسرعة الجسيم.

لقد قام بيكسيل Bichsel في عام 1968 بحساب هذا التصحيح للبروتونات وكذلك فعل بنديروب Banderup ويبين الشكل (1.4) هذه التصحيحات كدالة للعدد الذري للمادة المعترضة للطاقات من 2 إلى 100 mcv.

### 1.4.7تأثير الكثافة (δ)

إن تأثير الكثافة يكون اكثر وضوحاً بالنسبة للتصادمات الرخوة والتي تسبب انتقال الطاقة بين الجسيم المشحون والذرات البعيدة نسبياً عن مساره في الغازات تكون الذرات متباعدة عادة بحيث أن الجسيمات المشحونة تتفاعل معها بصورة مستقلة عن بعضها بالنسبة للمواد الكثيفة (الصلبة والسائلة ) فإن الكثافة سوف تزداد بمقدار يتراوح بين $10^3$ إلى $10^4$ مرة مما هي عليه للغاز في الضغط الجوي الاعتيادي ، كما أن البعد بين الذرات يتناقص في المواد الصلبة إلى $\frac{1}{10}$ من قيمته في الغازات ، في هذه الحالة يؤدي استقطاب الذرات القريبة من مسار الجسيم المشحون إلى تقليل شدة مجال قوة كولوم التي تتعرض لها الذرات البعيدة وبالتالي تقليل كمية الطاقة المفقودة من قبل الجسيم المشحون مما يسبب تناقص قدرة الايقاف التصادمية في المواد الكثيفة.

لقد قام سترينها يمر Strenheimer بمعالجة هذا الموضوع ووضع جداول لتأثير الكثافة.

يكون تأثير الكثافة بالنسبة للإلكترونات اكبر منه لبقية الجسيمات المشحونة وذلك لأن الالكترونات تكتسب سرعة عالية حتى عندما تكون طاقتها قليلة ، ويبدأ تأثير الكثافة بالظهور بالنسبة للإلكترونات عند طاقة 0.5MeV في حين لا يظهر هذا التأثير بالنسبة للجسيمات المشحونة الثقيلة إلا في طاقات أقل بكثير من الطاقة المذكورة.

يبين الجدول (1.2) تأثير الكثافة δ على قدرة ايقاف الالكترونات في عدد من العناصر عند طاقات مختلفة.

### 1.4.8متوسط جهد التأين I Mean Ionization Potential

يعرف متوسط جهد التأين I بأنه أقل كمية من الطاقة يجب أعطاؤها إلى الكترون مرتبط بذرته وتكفي لنقله من مداره تكتسب الكمية I أهمية كبيرة في حساب قدرة الايقاف . ونظراً لصعوبة حساب قيمة I نظرياً فقد لجأ الكثير من الباحثين لحسابها عملياً وذلك من تحليل قدرة الايقاف للبروتونات عالية الطاقة، حيث أن معرفة قدرة الايقاف التصادمية يسمح بحساب قيمة I من علاقة بيث السابقة.

الجدول (1.2) النسبة المئوية لتناقص قدرة الايقاف التصادمية الكتلية للإلكترونات في عدد من المواد نتيجة تأثير الكثافة .

| الطاقة MeV | فحم كرافيت $\rho = 2{\cdot}265 \frac{gm}{cm^3}$ | فحم كرافيت $\rho = 2{\cdot}265 \frac{gm}{cm^3}$ | ماء سائل $\rho = 1{\cdot}0 \frac{gm}{cm^3}$ | Au $\rho = 19{\cdot}32 \frac{gm}{cm^3}$ | هواء $\rho = 1{\cdot}205 \times 10^{-3}$ gm / cm³ | xe $\rho = 5{\cdot}485 \times 10^{-3}$ gm / cm³ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1000 | 30·2 | 30·9 | 29·3 | 27·4 | 11·8 | 8·3 |
| 500 | 28·2 | 29·0 | 27·2 | 25·0 | 9·3 | 6·0 |
| 200 | 25·2 | 26·0 | 24·1 | 21·5 | 5·0 | 3·4 |
| 100 | 22·6 | 23·6 | 21·5 | 18·7 | 3·4 | 1·8 |
| 50 | 19·7 | 20·6 | 18·6 | 15·7 | 1 | 0·7 |
| 20 | 15·6 | 16·4 | 14·6 | 11·9 | | 0·0 |
| 10 | 12·6 | 13·3 | 11·5 | 9·1 | | |
| 5 | 9·7 | 10·4 | 8·2 | 6·5 | | |
| 2 | 6·1 | 6·7 | 3·9 | 3·6 | | |
| 1 | 3·7 | 4·1 | 1·2 | 2·1 | | |
| 0·2 | 1·9 | 2·2 | – | 1·2 | | |
| 0·1 | 0·3 | 0·3 | – | 0·2 | | |