تأثير الشحنة على قدرة ايقاف الايونات الثقيلة البطيئة و السريعة

Charge Effect Of Stopping Power for Swift and Slow Heavy Ions

د. راشد عويد كاظم
جامعة الكوفة /كلية التربية للبنات / قسم الفيزياء

الخلاصة:
تم دراسة تأثير الشحنة على قدرة الأيقاف للايونات الثقيلة البطيئة من خلال دالة عزل لندهارد بأستخدام الطور االعشوائي التقريبي *(RPA)* وأستخدام قطب البلازمون التقريبي *(PLA)* للايونات الثقيلة السريعة . أظهر البحث أن قدرة الايقاف عند السرع البطيئة أكبر من السرع العالية للايونات الساقطة وكذلك أعتماد قدرة الايقاف على العدد الذري للايونات الساقطة . تم حل الصيغ العددية التي أستخدمت في البحث بواسطة برنامج حاسوبي يتضمن برامج فرعية بلغة فورتران- 90 .

Abstract:
Charge effect of stopping power for slow heavy ions through Lindhard dielectric function have been studied by using the random phase approximation (RPA) and also using the plasmon pole approximation (PLA) for fast incident ions. The investigation shows stopping power at low velocities greater than the stopping power at fast velocities, as well as, the dependence of stopping power on atomic number for incident ions (z_1) . The numerical formulas, found in the research, were solved by using computer program in (Fortran- 90) language with many subroutines .

المقدمة:
ان لقدرة الايقاف اهمية كبيرة في الفيزياء الذرية ،وذلك لتاثيرها على عمليات فقدان الطاقة خلال الهدف الذري .وتعرف قدرة الايقاف على انها معدل الطاقة المفقودة لوحدة المسار *(dE/dx)* *[1]* .في هذا البحث تمت دراسة تاثير الشحنة على قدرة ايقاف الايونات الثقيلة باعتماد الطور العشوائي التقريبي *(RPA)* عند السرع الواطئة وقطب البلازمون التقريبي *(PLA)* عند السرع العالية ،وذلك من خلال برمجة المعادلات الموجودة في البحث حيث تم اعتماد الطرق العددية والتحليلية في حل هذه العادلات وباستخدام البرنامج التشغيلي *(Compiler Visual Fortran V.6.6)* .

1- الجانب النظري:

تعرف دالة العزل $\varepsilon(k,\omega)$ كزخم وطاقة متحولة *[1]* .كما يمكن تعريفها الكتروستاتيكيا في حدود المجال الكهربائي *(E)* والاستقطاب *(P)* *[2]* .

$$D=E+4\pi P \qquad (1)$$

حيث D - تمثل العزم المزدوج *(Moment couple)* .
تقسم دوال العزل الى عدة أنواع أعتمادا على نوع التقريب المستخدم وعلى سرعة الايونات الساقطة . أن دالة عزل لندهارد والتي تمثل أستجابة الوسط بأستخدام تقريب الطور العشوائي التقريبي *(RPA) random phase approximation* عند السرع الواطئة تعطى بالمعادلة الاتية *[3]* .

$$\varepsilon(\omega)=1-\frac{\omega_p^2}{\omega(\omega+i\gamma)},\ \gamma\to 0 \qquad (2)$$

حيث $\varepsilon(\omega)$ - تمثل دالة العزل *(Dielectric function)*
ω -التردد البلأزمي *(Plasmon frequency)*
ω_p- التردد البلازمي للوسط *(Plasmon frequency for medium)*
γ-عامل الأضمحلال *(Damping factor)*
بينما يستخدم تقريب قطب البلازمون التقريبي *(PLA) plasmon pole approximation* عندما تكون سرعة الايونات الساقطة عالية $(v>>v_{thr})$. أن دالة العزل التي تحتوي على التقريب *(PLA)* هي كالاتي *[4]* .

$$\varepsilon(k,w)=1+\frac{\omega_p^2}{\omega_g^2+\beta^2k^2+\frac{k^4}{4}-\omega(\omega+i\gamma)} \qquad (3)$$

حيث v –السرعة للايون الساقط *[Incident velocity]* ،
v_{thr} - سرعة العتبة*[Threshold velocity]*
ω_g– تردد فجوة الطاقة *[Frequency for e nergy gap]*
$\beta=\sqrt{\frac{3}{5v_f}}$ -تمثل سرعة أنتشار كثافة الاضطراب في الغاز الالكتروني .
$(k^2/4)$ - تمثل الطاقة الحركية. k- العدد الموجي
v_f - سرعة فيرمي *[Fermi velocity]* .
لقد تم حساب قدرة الايقاف (S) وفقا للنظرية الخطية للجسيمات المشحونة بأستخدام الصيغة الاتية *[5]* .

$$S=\frac{2Z_1^2}{\pi v}\int_0^{\infty}\frac{dk}{k}\int_0^{kv}\omega d\omega\,\mathrm{Im}\left[\frac{-1}{\varepsilon(k,w)}\right] \qquad (4)$$

حيث z_1العدد الذري للايون الساقط .

2-الحسابات والنتائج *Results and Calculation:*

***(i)* - حساب قدرة الايقاف عند السرع الواطئة .**

أعتمدنا تقريب الطور العشوائي التقريبي *(RPA)* في دالة العزل لاشتقاق الجزء الخيالي وبأيجاد المقلوب للجزء الخيالي توصلنا الى المعادلة الاتية .

$$\mathrm{Im}\left(\frac{-1}{\varepsilon(k,\omega)}\right)=\frac{2k\omega}{\left[k^2+k_D^2\right]^2} \qquad (5)$$

$$k_D^2=\frac{4k_f}{\pi}$$

حيث k_f - زخم فيرمي *Fermi momentum*
$k_D^{\,2}$ - مربع العدد الموجي الحاجب .
وبتعويض معادلة الجزء الخيالي (5) في معادلة الايقاف (4) وبأشتقاق المعادلة الاخيرة نصل الى المعادلة اللازمة لحساب قدرة الايقاف عندما $(\gamma\to 0)$ والمتمثلة بالمعادلة الاتية *[6]* .

$$S(v)=\frac{2z_1^2v}{3}\left[\ln\left(1+\frac{\pi}{\alpha r_s}\right)-\left(\frac{1}{1+\frac{\alpha r_s}{\pi}}\right)\right] \qquad (6)$$

حيث
$$\alpha=\left(4/9\right)^{\frac{1}{3}}$$

أن معادلة (6) تمثل الاثارة الناتجة عن الجسيمات الاحادية ، فعند الكثافة العالية فأن $(r_s<<1)$ وهذا يؤدي الى $(\pi/\alpha r_s>>1)$ فتصبح المعادلة بالشكل التالي .

$$S=\frac{2z_1^2v}{3\pi}\ln\left(\frac{\pi}{\alpha r_s}\right) \qquad (7)$$

وهذه المعادلة تتفق مع النتائج التي توصل اليها (توماس – فيرمي) بالاعتماد على الطور العشوائي التقريبي عندما $(\gamma\to 0)$.

الشكل (1) يوضح أعتماد قدرة الايقاف على العدد الذري للايون الساقط (z_1) حيث ظهر أن قدرة الايقاف تزداد بزيادة العدد الذري . الشكل (2) يوضح العلاقة بين قدرة الايقاف للايونات الثقيلة *(C, N, Ar, I, U)* كدالة لنصف القطر للاهداف *(Au, C, Al, Cs)* عند السرعة $(v=0.3au)$. وبمقارنة النتائج التي حصلنا عليها مع نتائج المصدر *[7]* نجد أنها مقاربة .

(ii) - حساب قدرة الايقاف عند السرع العالية .

تم أشتقاق قدرة الايقاف عند السرع العالية بالاعتماد على قطب البلازمون التقريبي *(PLA)* والمتمثل بالمعادلة (3) وصولا الى الجزء الخيالي.

$$\mathrm{Im}\left(\frac{-1}{\varepsilon(k,\omega)}\right)=\left(\frac{\pi\omega_p^2}{2A}\right)\delta(\omega-A) \qquad (8)$$

حيث A -العدد الكتلي ، δ- دالة ديراك .

وبتعويض معادلة (8) في معادلة الايقاف (4) وبأجراء التكاملات على المعادلة الاخيرة وذلك بالاعتماد على دالة ديراك نحصل على معادلة حساب الطاقة المفقودة (9) عندما $(\gamma\to 0)$.

$$S=\frac{z_1^2\omega_p^2}{v_1^2}\ln\frac{k^+}{k^-} \qquad (9)$$

حيث

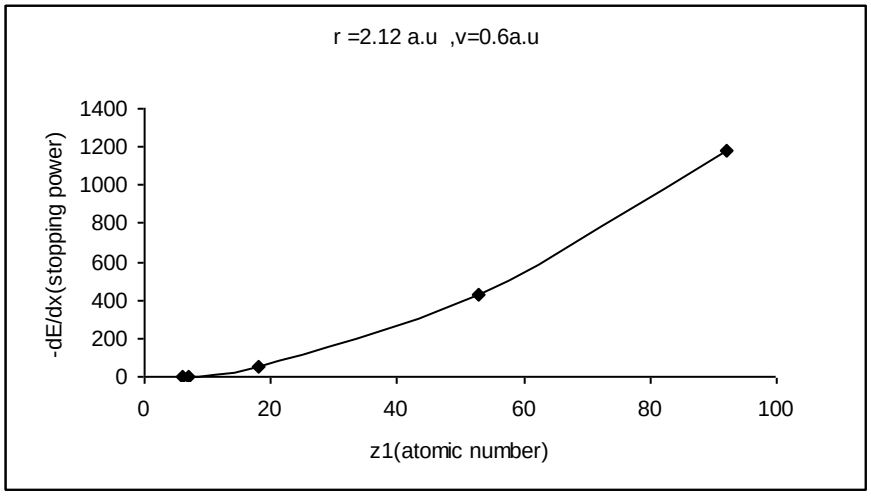
$$k^{\pm}=\left\{2\left(v^2-\beta^2\right)\pm 2\left[\left(v^2-\beta^2\right)^2-\Omega_p^2\right]^{\frac{1}{2}}\right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\beta^2=\frac{3}{5}k_f^2\ ,\ \Omega_p^2=\left(\omega_p^2+\omega_g^2\right)^{\frac{1}{2}} \qquad , \qquad \omega_p=\frac{3^{\frac{1}{3}}}{r_s^{\frac{3}{2}}}$$

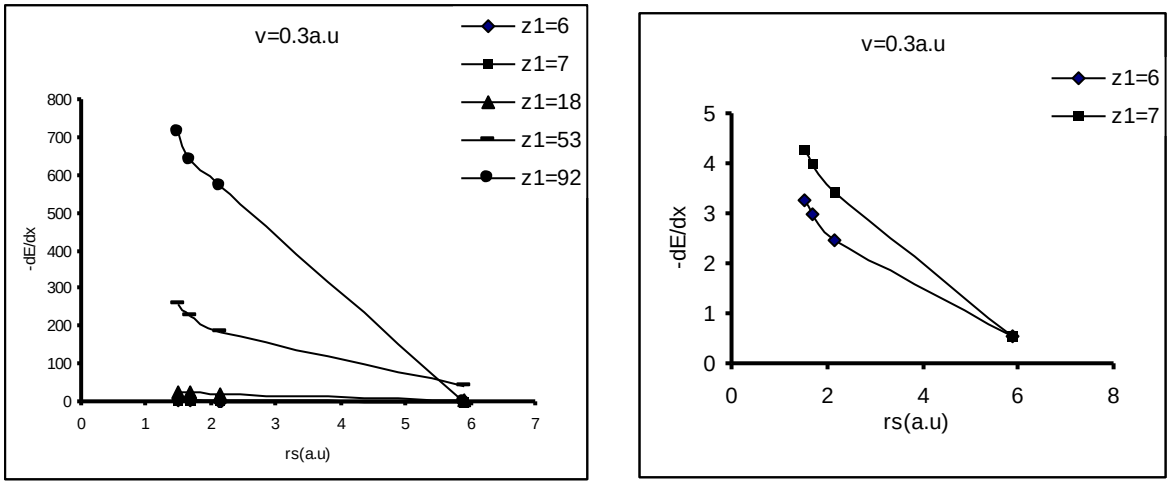
r_s- نصف قطر الكثافة الالكترونية.

الشكل (3) يبين أعتماد قدرة الايقاف على العدد الذري للايونات الساقطة *(C, N, Ar, I, U)* كدالة لنصف القطر للاهداف *(Au, C, Al, Cs)* عند السرعة $(v=12a.u)$ والتي ظهرت بأنها تزداد بزيادة العدد الذري للايون الساقط كما في الشكل (4) .

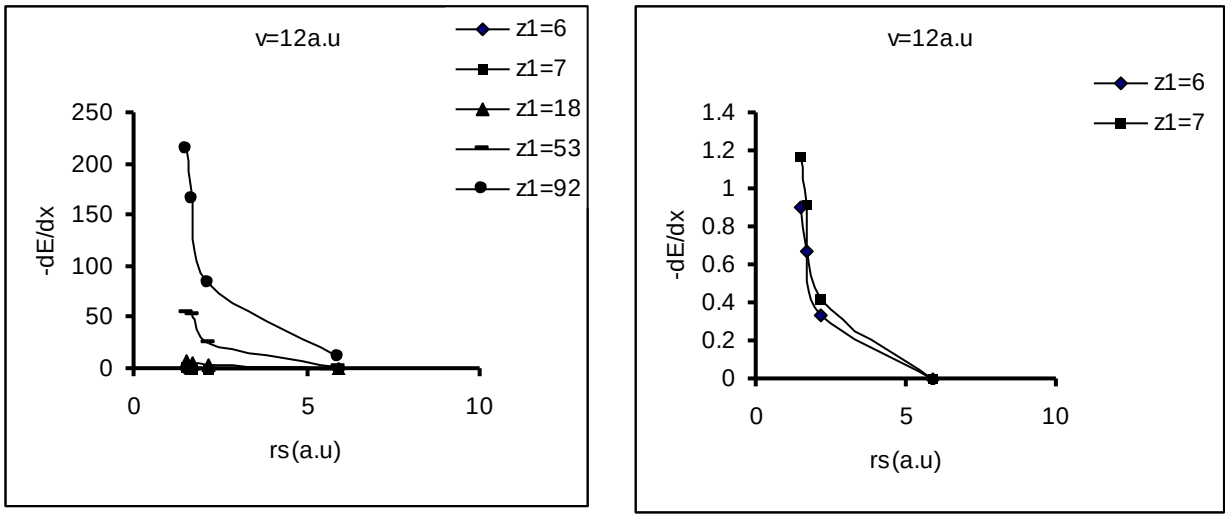
تم حل المعادلات الرياضية عدديا بأستخدام برنامج حاسوبي بأعتماد طريقة *(Gaussian)* أو *(Simpson)* في حل التكاملات عدديا .



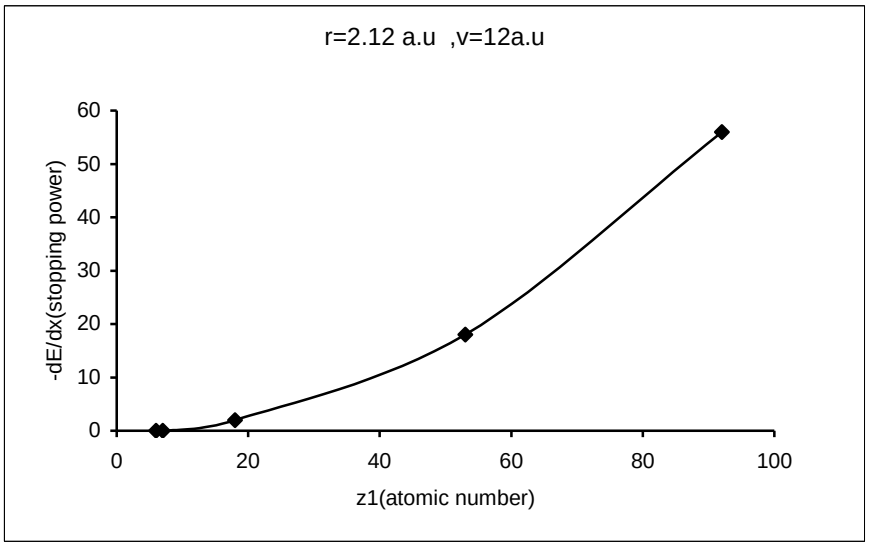
شكل (1): يوضح العلاقة بين قدرة الايقاف كدالة للعدد الذري z_1 للايونات الثقيلة *(C,N,Ar,I,U)* على هدف الالمنيوم $(r_s=2.12a.u)$ للسرعة الواطئة ($v=0.6\ a.u$) .



شكل (2): يوضح العلاقة بين قدرة الايقاف للايونات الثقيلة *(C,N,Ar,I,U)* كدالة لنصف القطر للاهداف *(Au,C,Al,Cs)* عند السرعة (*v=0.3 a.u*) .



شكل (3): يوضح العلاقة بين قدرة الايقاف للايونات الثقيلة *(C,N,Ar,I,U)* كدالة لنصف القطر للاهداف *(Au,C,Al,Cs)* عند السرعة (*v=12 a.u*) .



شكل (4): يوضح العلاقة بين قدرة الايقاف كدالة للعدد الذري z_1 للايونات الثقيلة *(C,N,Ar,I,U)* على هدف الالمنيوم $(r_s=2.12)$ للسرعة العالية ($v=12a.u$) .

3-المناقشة:

نلاحظ عند السرع الواطئة *(0.1-1a.u)* يكون الأيقاف اكبر من السرع العالية *(10-20a.u)* وكما توضحه الاشكال (1,2,3,4) ، أن السبب في ذلك يعود الى تولد جهد محتث عند السطح الصلب ، وهذا ناتج من تفاعل الايونات الثقيلة مع سطح الهدف . عند السرع الواطئة تحدث عمليات تغير الشحنة (أسر وفقدان الألكترون) مما يسبب في زيادة فقدان الطاقة . كذلك تؤثر التقريبات المستخدمة على قدرة الايقاف فنجد قدرة الايقاف بأدخال تقريب الطور العشوائي (S_{RPA}) عند السرع الواطئة تكون أكبر من قدرة الايقاف بأدخال تقريب قطب البلازمون (S_{PLA}) عند السرع العالية .

كما تتأثر قدرة الايقاف بالعدد الذري للايون الساقط (z_1) والسبب في ذلك أن مناطق السرع الواطئة يكون التصادم فيها بين الذرات فيأخذ (z_1) بنظر الاعتبار حيث يكون فقدان الطاقة قليل ، ولكون سرعة الجسيم تكون بطيئة يحصل أكبر قدر ممكن من التصادمات ، أما في مناطق السرع العالية فأن التصادم يحدث بين الالكترونات ونظرا لكون كتلة الالكترون صغيرة فلا يؤخذ (z_1) بنظر الاعتبار . فنلاحظ أعتماد قدرة الايقاف على (z_1) كبير عند السرع الواطئة .

كذلك نجد عدم تأثر قدرة الايقاف بالعدد الذري للهدف (z_2) وتناسبها العكسي مع كل من (r_s) و (v) حيث يقل الايقاف كلما زاد أختراق الجسيمة داخل الهدف بسبب قلة عمليات تغير الشحنة .

المصادر :

[1]-D.Pines ,Electron Interaction in solid . characteristic energy loss spectrum, Phy.Vol.113 ,No.5, (1959).

[2]-R.Nunez ,P.M.Echenique and H.Ritchie, The energy loss of energetic ions moving near a solid surface ,Phys.C.solid st. Phys.13 (1980).

[3]-Arista Nestor, Dynamical image potential and induced forces for charged particles moving parallel to solid surface ,Phys. Rev. A, Vol.49, No.3 (1994).

[4]-H.Winter ,J.I.Juaristi and I.Nagy, Energy loss of slow ions in an anon uniform electron gas ,Phys.Rev.B 67, 245401(2003).

[5]-T.L.Ferrell and R.H.Ritchie ,Energy losses by slow ions and atoms to electronic excitation in solids ,Phys. Rev. B,Vol.16,No.1(1977).

[6]-I.Abril ,G.Rafael, Dielectric description of wakes and stopping power in solids ,Phys.Rev. A, Vol.58 No.1(1998).

[7]-J.M.Pitarke and Campillo, Quadratic response theory for the interaction of charged particles with an electron gas ,scanning microscopy ,Vol.12,No.1(1998).