كلية العلوم

القسم : الفيزياء

السنة : الرابعة

المادة : فيزياء اشعاعية

المحاضرة : الخامسة/نظري/

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر (What's app-Telegram) على الرقم 0931497960

الفيزياء الاشعاعية

المحاضرة-5

تفاعل الجسيمات المشحونة مع الوسط

تفاعل الجسيمات المشحونة مع الوسط

- يُحاط الجسيم المشحون بمجال القوة الكولونية الكهربائية الخاصة به التي تتفاعل مع الإلكترونات المدارية (خسارة تصادمية) والنواة (خسارة إشعاعية) لكل الذرات التي يصادفها أثناء اختراقه للمادة.

- نقل الطاقة من الجسيم المشحون إلى المادة في كل تفاعل ذري فردي يكون بشكل عام صغيراً، بحيث يخضع الجسيم لعدد كبير من التفاعلات قبل أن تُستهلك طاقته الحركية.

تفاعل الجسيمات المشحونة مع الوسط

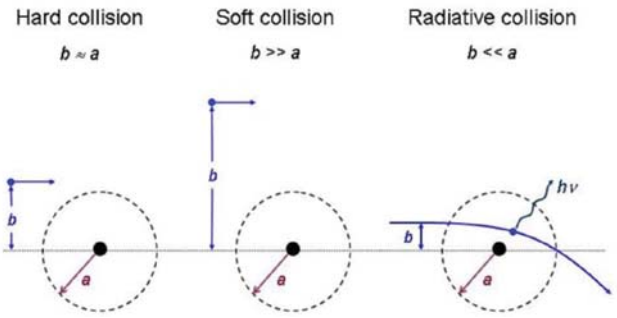
- قدرة التوقف (Stoppin power) هي المعيار المستخدم لوصف الفقد التدريجي للطاقة للجسيم المشحون أثناء اختراقه لوسط ماص.
- تُعرف فئتان من قوى التوقف:
  - قدرة التوقف التصادمية (التأيين) الناتجة عن تفاعل الجسيم المشحون مع الإلكترونات المدارية للمادة الماصة
  - وقدرة التوقف الإشعاعية الناتجة عن تفاعل الجسيم المشحون مع نوى المادة الماصة.

تفاعل الجسيمات المشحونة مع الوسط

- قدرة التوقف (Stoppin power) هي المعيار المستخدم لوصف الفقد التدريجي للطاقة للجسيم المشحون أثناء اختراقه لوسط ماص.
- تُعرف فئتان من قوى التوقف:
  - قدرة التوقف التصادمية (التأيين) الناتجة عن تفاعل الجسيم المشحون مع الإلكترونات المدارية للمادة الماصة
  - وقدرة التوقف الإشعاعية الناتجة عن تفاعل الجسيم المشحون مع نوى المادة الماصة.
- تلعب قدرة التوقف دوراً مهماً في قياس الجرعات الإشعاعية. تعتمد هذه القدرة على خصائص الجسيم المشحون مثل كتلته وشحنته وسرعته وطاقته وكذلك على خصائص الوسط الماص مثل كثافته والعدد الذري له.

قدرة التوقف Stopping power:

- أثناء عبور جسيم مشحون عبر مادة ماصة، يخضع لتفاعلات كولونية مع النوى والإلكترونات المدارية لذرات المادة الماصة.
- يمكن تقسيم هذه التفاعلات إلى ثلاث فئات بناءً على أبعاد ثابت الصدم الكلاسيكي b مقارنةً بنصف القطر الذري الكلاسيكي a:
  - تفاعل قوة كولون للجسيم المشحون مع الحقل النووي الخارجي (إنتاج اشعاع الكبح) عندما يكون b≫a.
  - تفاعل قوة كولون للجسيم المشحون مع الإلكترون المداري عندما يكون b ≈ a (تصادم صلب).
  - تفاعل قوة كولون للجسيم المشحون مع الإلكترون المداري عندما يكون b ≪ a (تصادم ناعم).



الشكل 1 ثلاث أنواع من التصادمات موجودة بين الجسيم المشحون والذرة وفقاً لقيمة معامل الصدم b ونصف قطر الذرة a.

قدرة التوقف Stopping power:

- نُعرف نوعين من قدرة التوقف:
  - قدرة التوقف الإشعاعية التي تنتج من التفاعل الكولوني للجسيم المشحون مع نوى المادة الماصة. فقط الجسيمات المشحونة الخفيفة (الإلكترونات والبوزيترونات) تعاني من خسائر كبيرة في الطاقة من خلال هذه التفاعلات التي يُشار إليها عادةً بتفاعلات أشعة الكبح.

  - قدرة التوقف التصادمية (التأيين) التي تنتج من التفاعلات الكولونية للجسيم المشحون مع الإلكترونات المدارية للمادة الماصة. كلا الجسيمات المشحونة الثقيلة والخفيفة تُعاني من هذه التفاعلات التي تؤدي إلى نقل الطاقة من الجسيم المشحون إلى الإلكترونات المدارية، أي، إثارة وتأيين ذرات المادة الماصة.

قدرة التوقف Stopping power:

- قدرة التوقف الكلية S_{tot} لجسيم مشحون بطاقة E_K ينتقل عبر مادة ماصة ذات عدد ذري Z هي مجموع قدرة التوقف الإشعاعية والتصادمية، أي:

$$S_{\mathrm{tot}} = S_{\mathrm{rad}} + S_{\mathrm{col}}$$

قدرة التوقف الاشعاعية :

- معدل إنتاج إشعاع الكبح بواسطة الجسيمات المشحونة الخفيفة (الإلكترونات والبوزيترونات) أثناء مرورها عبر مادة ماصة يُعبر عنه بقدرة التوقف الإشعاعية الكتلية S_{rad}(بوحدة MeV. cm^2/g) والتي تُعطى كما يلي:

$$S_{\mathrm{rad}} = N_{\mathrm{a}}\sigma_{\mathrm{rad}}E_{\mathrm{i}}$$

- حيث N_a : عدد الذرات في واحدة الكتل $N_a = {}^{N}/_{m} = \frac{N_A}{A}$ ، σ_{rad}: المقطع العرضي لانتاج أشعة الكبح ، E_i: الطاقة الكلية البدئية للجسيم المشحون الخفيف
- $E_i = E_{ki} + m_e c^2$ و E_{ki}: الطاقة الحركية البدئية للجسيم المشحون الخفيف.
- بالتعويض عن قيمة σ_{rad} من أجل الجسيمات غير النسبية $\frac{16}{3}\alpha r_e^2 Z^2$ نجد أن قوة التوقيف S_{rad}:

قدرة التوقف الاشعاعية :

- معدل إنتاج إشعاع الكبح بواسطة الجسيمات المشحونة الخفيفة (الإلكترونات والبوزيترونات) أثناء مرورها عبر مادة ماصة يُعبر عنه بقدرة التوقف الإشعاعية الكتلية S_{rad} (بوحدة MeV. cm^2/g) والتي تُعطى كما يلي:

$$S_{\mathrm{rad}} = N_{\mathrm{a}}\sigma_{\mathrm{rad}}E_{\mathrm{i}}$$

- حيث N_a : عدد الذرات في واحدة الكتل $N_a = {}^{N}/_{m} = \frac{N_A}{A}$ ،
- σ_{rad}: المقطع العرضي لانتاج أشعة الكبح ،
- E_i: الطاقة الكلية البدئية للجسيم المشحون الخفيف
- $E_i = E_{ki} + m_e c^2$ و E_{ki}: الطاقة الحركية البدئية للجسيم المشحون الخفيف.
- بالتعويض عن قيمة σ_{rad} من أجل الجسيمات غير النسبية $\frac{16}{3}\alpha r_e^2 Z^2$ نجد أن قوة التوقيف S_{rad}:

$$S_{\mathrm{rad}} = \alpha r_{\mathrm{e}}^2 Z^2 \frac{N_{\mathrm{A}}}{A} B_{\mathrm{rad}} E_{\mathrm{i}}$$

قدرة التوقف الاشعاعية :

جدول -1 المقطع العرضي الكلي لإنتاج أشعة الكبح و B_{rad} من أجل مجالات مختلفة لقيم الطاقة الحركية للالكترون.

Energy range	σ_{rad} (cm^2/nucleon)	$B_{\mathrm{rad}} = \sigma_{\mathrm{rad}}/(\alpha r_e^2 Z^2)$
Non-relativistic $E_{\mathrm{K_i}} \ll m_e c^2$	$\frac{16}{3}\alpha r_e^2 Z^2$	$\frac{16}{3}$
Relativistic $E_{\mathrm{K_i}} \approx m_e c^2$	complicated power series	—
High-relativistic $m_e c^2 \ll E_{\mathrm{K_i}} \ll \frac{m_e c^2}{\alpha Z^{1/3}}$	$8\alpha r_e^2 Z^2 \left[\ln\left(\frac{E_{\mathrm{i}}}{m_e c^2}\right) - \frac{1}{6}\right]$	$8\left[\ln\left(\frac{E_{\mathrm{i}}}{m_e c^2}\right) - \frac{1}{6}\right]$
Extreme relativistic $E_{\mathrm{K_i}} \gg \frac{m_e c^2}{\alpha Z^{1/3}}$	$4\alpha r_e^2 Z^2 \left[\ln\frac{183}{Z^{1/3}} + \frac{1}{18}\right]$	$4\left[\ln\frac{183}{Z^{1/3}} + \frac{1}{18}\right]$

$$S_{\mathrm{rad}} = N_{\mathrm{a}}\sigma_{\mathrm{rad}}E_{\mathrm{i}}$$

$$S_{\mathrm{rad}} = \alpha r_{\mathrm{e}}^2 Z^2 \frac{N_{\mathrm{A}}}{A} B_{\mathrm{rad}} E_{\mathrm{i}}$$

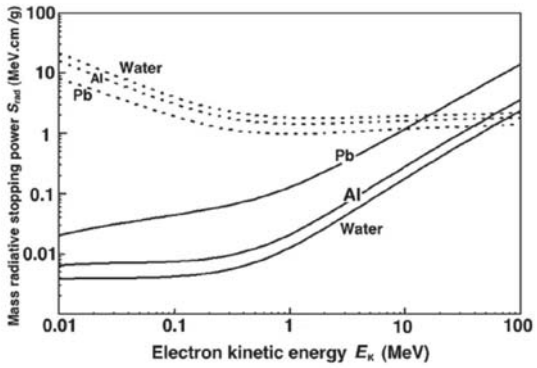
حيث B_{rad} يتغير ببطىء بتابعية Z و E_i وهو معطى في الجدول 1، حيث B_{rad} يأخذ قيمة $\frac{16}{3}$ من أجل الجسيمات المشحونة الخفيفية غير النسبية والتي تقع ضمن مجال طاقي $E_K \ll m_e c^2$؛ و قيمة 6 عندما $E_K = 1\ MeV$ ؛ و قيمة 12 عندما $E_K = 10\ MeV$؛ و 15 عندما $E_K = 100\ MeV$.

قدرة التوقف الاشعاعية :

$$S_{\mathrm{rad}} = N_{\mathrm{a}}\sigma_{\mathrm{rad}}E_{\mathrm{i}}$$

$$S_{\mathrm{rad}} = \alpha r_{\mathrm{e}}^2 Z^2 \frac{N_{\mathrm{A}}}{A} B_{\mathrm{rad}} E_{\mathrm{i}}$$

الشكل 2 يُظهر تغير قدرة التوقف الاشعاعية S_{rad} للالكترونات في أوساط الماء و الألمنيوم والرصاص بتابعية الطاقة الحركية للالكترون وهي ممثلة بخطوط مستمرة و نلاحظ تابعية S_{rad} للعدد الذري Z و الطاقة الحركية للجسيمات المشحونة الخفيفة بطاقة أكبر من 2 MeV.

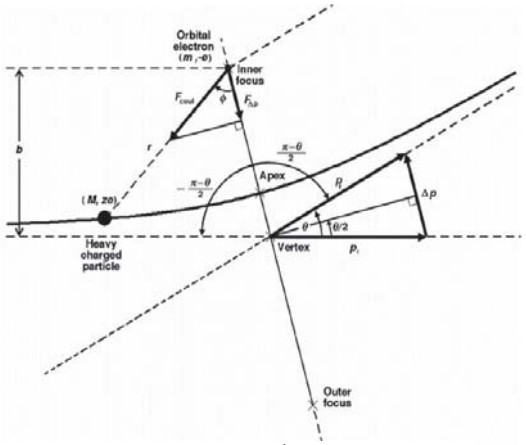


الشكل 2 قدرة التوقف الاشعاعية S_{rad} للالكترونات في أوساط الماء و الألمنيوم والرصاص بتابعية الطاقة الحركية للالكترون وهي ممثلة بخطوط مستمرة. تم رسم قوة التوقف التصادمية في نفس الأوساط للمقارنة وهي المنحنيات المرسومة بشكل نقطي.

انتقال كمية الحركة من الجسيم المشحون الثقيل الى الالكترون المداري:

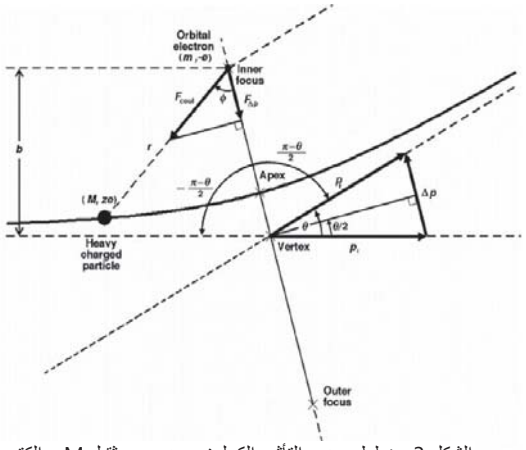
- الحساب الكلاسيكي لقدرة التوقيف التصادمية S_{col} لجسيم مشحون ثقيل مثل البروتون يرتكز على:
  - حساب تغير كمية الحركة لجسيم ثقيل يصطدم مع الكترون مداري.
  - حيث أن التأثير الكولوني بين الجسيم المشحون الثقيل (بكتلة M وشحنة Ze) و الالكترون المداري (بكتلة m_e وشحنة e) تم توضيحه في الشكل التالي:
  - كمية الحركة المنقولة ΔP من الجسيم الثقيل المشحون تكون على طول خط يتقاطع مع الزاوية $\theta - \pi$، ويتم حساب السعة ΔP كمايلي:

$$\Delta p = \int F_{\Delta p} dt = \int_{-\infty}^{\infty} F_{\mathrm{coul}} \cos\phi \, dt \, .$$



الشكل 3 مخطط يوضح التأثير الكولوني بين جسيم ثقيل M و الكترون مداري m_e

انتقال كمية الحركة من الجسيم المشحون الثقيل الى الالكترون المداري:



الشكل 3 مخطط يوضح التأثير الكولوني بين جسيم ثقيل M و الكترون مداري m_e

- كمية الحركة المنقولة ΔP من الجسيم الثقيل المشحون تكون على طول خط يتقاطع مع الزاوية $\pi - \theta$، ويتم حساب السعة ΔP كمايلي:

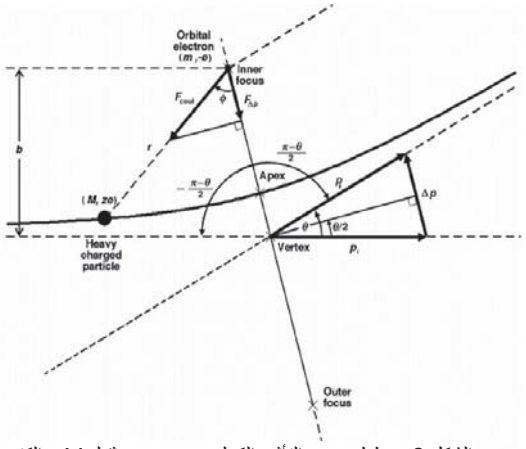
$$\Delta p = \int F_{\Delta p} dt = \int_{-\infty}^{\infty} F_{\mathrm{coul}} \cos\phi \, dt \, .$$

- حيث F_{coul} هي القوة الكولونية بين الجسيم الثقيل المشحون والالكترون المداري:

$$F_{\mathrm{coul}} = \frac{ze^2}{4\pi\varepsilon_{\mathrm{o}}} \frac{1}{r^2}$$

- و r هي المسافة بين الجسيمين.

انتقال كمية الحركة من الجسيم المشحون الثقيل الى الالكترون المداري:



الشكل 3 مخطط يوضح التأثير الكولوني بين جسيم ثقيل M و الكترون مداري m_e

- وبتعويض القوة الكولونية في كمية الحركة المنقولة ΔP نجد:

$$\Delta p = \frac{ze^2}{4\pi\varepsilon_{\mathrm{o}}} \int_{-\frac{\pi-\theta}{2}}^{\frac{\pi-\theta}{2}} \frac{\cos\phi}{r^2} \frac{dt}{d\phi} d\phi$$

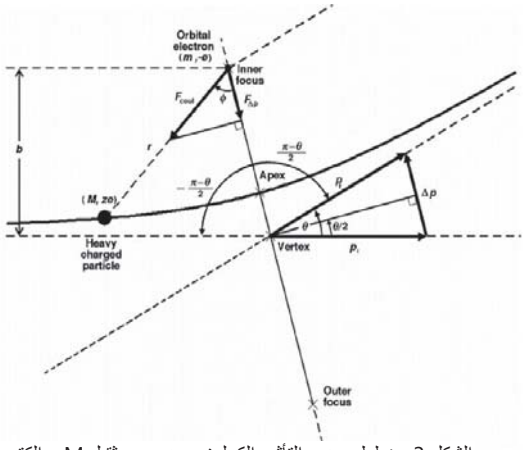
- حيث $\emptyset$ هي الزاوية بين المتجه r حامل القوة الكولونية F_{coul} و مركبتها $F_{\Delta p}$ على الخط المتوسط الذي يقسم المستوي الذي يمر فيه الجسيم المشحون الثقيل الى قسمين محصورين بين زاويتين: $\frac{\pi-\theta}{2}$ و $-\frac{\pi-\theta}{2}$

- يُحدد العزم الزاوي لعملية التصادم كمايلي:

$$L = Mv_{\infty}b = M\omega r^2$$

- حيث M هي كتلة الجسيم الثقيل، v_{∞} السرعة البدئية للجسيم الثقيل (قبل التصادم)، و ω التردد الزاوي وهو يساوي $\frac{d\emptyset}{dt}$.

انتقال كمية الحركة من الجسيم المشحون الثقيل الى الالكترون المداري:



الشكل 3 مخطط يوضح التأثير الكولوني بين جسيم ثقيل M و الكترون مداري m_e

- وباستخدام انحفاظ العزم الزاوي:

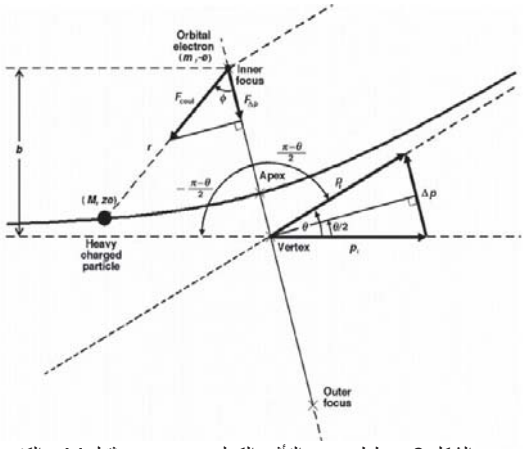
$$\Delta p = \frac{ze^2}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{v_\infty b}\int_{-\frac{\pi-\theta}{2}}^{\frac{\pi-\theta}{2}}\cos\phi\, d\phi = \frac{ze^2}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{v_\infty b}\{\sin\phi\}_{-(\pi-\theta)/2}^{(\pi-\theta)/2}$$

$$= 2\frac{ze^2}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{v_\infty b}\cos\frac{\theta}{2}$$

- بما أن $M \gg m_e$ فأن زاوية التشتت θ تساوي تقريباً الصفر:

$$\Delta p = 2\frac{ze^2}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{v_\infty b}$$

انتقال كمية الحركة من الجسيم المشحون الثقيل الى الالكترون المداري:



الشكل 3 مخطط يوضح التأثير الكولوني بين جسيم ثقيل M و الكترون مداري m_e

- بما أن $M \gg m_e$ فأن زاوية التشتت θ تساوي تقريباً الصفر:

$$\Delta p = 2\frac{ze^2}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{v_\infty b}$$

- و تكون الطاقة المنقولة من الجسيم الثقيل المشحون الى الالكترون المداري في التصادم الواحد ومن أجل ثابت صدم b:

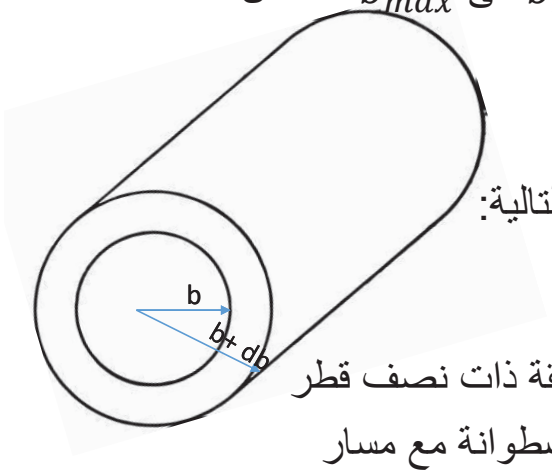
$$\Delta E(b) = \frac{(\Delta p)^2}{2m_e} = 2\left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2\frac{z^2}{m_e v_\infty^2 b^2}$$

- حيث m_e هي كتلة الالكترون المداري الذي يمثل الهدف و ϑ_∞ سرعة الجسيم المشحون الذي يمثل القذيفة.

قدرة التوقيف التصادمية الخطية:

- الطاقة الكلية الضائعة من الجسيم المشحون في المادة الماصة خلال واحدة الطول $\frac{dE}{dx}$ تُعرف باسم قدرة التوقيف التصادمية الخطية. وهي تُحسب بإجراء التكامل لعلاقة الطاقة المنقولة $\Delta E(b)$ على جميع مجالات قيم ثابت الصدم b من b_{min} الى b_{max} لنحصل على:

$$-\frac{dE}{dx} = \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} \Delta E(b) \frac{\Delta n}{\Delta x}$$



- حيث يتم حساب قدرة التوقيف التصادمية الكتلية من العلاقة التالية:

$$S_{\text{col}} = -\frac{1}{\rho}\frac{dE}{dx}$$

- $\frac{\Delta n}{\Delta x}$ هو عدد الإلكترونات في كل وحدة طول في أسطوانة رقيقة ذات نصف قطر داخلي b ونصف قطر خارجي b + db. يتماشى محور الأسطوانة مع مسار الجسيم المشحون الثقيل.

قدرة التوقيف التصادمية الخطية:

- بشكل بديهي، يمكننا اعتبار التكامل على جميع قيم ثابت الصدم الممكنة من 0 إلى ∞؛ ومع ذلك،

$$-\frac{dE}{dx} = \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} \Delta E(b) \frac{\Delta n}{\Delta x}$$

- يجب أن نأخذ في الاعتبار قيدين فيزيائيين يؤثران على نقل الطاقة من الجسيم المشحون الثقيل إلى الإلكترونات المدارية:

1- أقل نقل للطاقة يتمثل بالتأين والإثارة للإلكترونات المدارية مما ينتج عنه ثابت صدم كبير b_{max} و بعده يصبح نقل الطاقة مستحيلاً.

2- أعلى نقل ممكن للطاقة في التصادم الرأسي بين الجسيم المشحون الثقيل والإلكترون المداري ينتج عنه معامل ثابت صدم صغير b_{min}.

قدرة التوقيف التصادمية الخطية:

- يكون عدد الالكترونات الموجودة Δn في شريحة اسطوانية بأنصاف أقطار b و b+db:

$$\Delta n = N_e dm = (ZN_A/A)dm$$

- حيث N_e هو عدد الالكترونات في واحدة الكتل $^{Z\,N_A}/_{A}$ للمادة الماصة، و dm هي كتلة الشريحة الاسطوانية الموجودة بين b و b+db وتساوي:

$$dm = \rho dV = \rho\pi(b+db)^2\Delta x - \rho\pi b^2\Delta x$$
$$= \rho\pi\Delta x[b^2 + 2b(db) + (db)^2 - b^2] \approx 2\pi\,\rho\, b\, db\,\Delta x$$

- وباهمال قيمة $(db)^2$ لصغرها نجد أن قيمة $\frac{\Delta n}{\Delta x}$ تساوي:

$$\Delta n/\Delta x = 2\pi\,\rho(ZN_A/A)b\,db$$

قدرة التوقيف التصادمية الخطية:

- وتُصبح قدرة التوقيف التصادمية:

$$S_{col} = -\frac{1}{\rho}\frac{dE}{dx} = 4\pi N_e\left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_o}\right)^2\frac{z^2}{m_e v_\infty^2}\int_{b_{min}}^{b_{max}}\frac{db}{b}$$
$$= 4\pi N_e\left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_o}\right)^2\frac{z^2}{m_e v_\infty^2}\ln\frac{b_{max}}{b_{min}}.$$
$$= 4\pi\frac{Z}{A}N_A\left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_o}\right)^2\frac{z^2}{m_e v_\infty^2}\ln\frac{b_{max}}{b_{min}}$$

قدرة التوقيف التصادمية تتناسب طرداً مع مربع شحنة القذيفة وعكساً مع مربع سرعة القذيفة. تغير $\frac{Z}{A}$ هو صغير من مادة الى مادة أخرى (فهو ينقص من 0.5 في المواد ذات العدد الذري المنخفض الى 0.4 في المواد ذات العدد الذري المرتفع)، أي تغير قدرة التوقيف التصادمية يكون خفيف من مادة الى أخرى. وهذا يعني أن ضياع الطاقة من جسيم مشحون خلال طبقات متساوية السماكة هو نفسه في جميع المواد.

$$-\frac{dE}{dx} = \int_{b_{min}}^{b_{max}}\Delta E(b)\frac{\Delta n}{\Delta x}$$

$$S_{col} = -\frac{1}{\rho}\frac{dE}{dx}$$

$$\Delta n/\Delta x = 2\pi\,\rho(ZN_A/A)b\,db$$

$$\Delta E(b) = \frac{(\Delta p)^2}{2m_e} = 2\left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_o}\right)^2\frac{z^2}{m_e v_\infty^2 b^2}$$

نقل الطاقة الأصغري وكمون التأيين والأثارة الوسطي:

- من أجل ثابت صدم كبير b فأن الطاقة المنقولة يمكن أن تكون أصغر من طاقة ارتباط الالكترون المداري أو أصغر من الحد الأدنى لكمون الاثارة الوسطي للإلكترون المداري المحدد.

- وهكذا لا يوجد نقل للطاقة ممكن من أجل $b > b_{max}$ حيث b_{max} تُناسب أصغر نقل للطاقة ΔE_{min} وهو يُعرف باسم كمون الاثارة أو التأيين الوسطي لذرات الوسط الماص.

- يعتمد هذا الجهد فقط على وسط الإيقاف ولكن ليس على نوع الجسيم المشحون. وهو دائماً أكبر من جهد التأين للذرة لأنه يأخذ في الاعتبار جميع حالات التأين الذري الممكنة وكذلك الإثارة الذرية.

نقل الطاقة الأصغري وكمون التأيين والأثارة الوسطي:

- يتوافق متوسط جهد التأين-الإثارة مع أقل مقدار من الطاقة ΔE_{min} التي يمكن نقلها في المتوسط إلى ذرة ماصة في تفاعل كولوم بين الجسيم المشحون وإلكترون مداري.

$$\Delta E(b) = \frac{(\Delta p)^2}{2m_e} = 2\left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_o}\right)^2 \frac{z^2}{m_e v_\infty^2 b^2}$$

$$\Delta E_{\min} = 2\left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_o}\right)^2 \frac{z^2}{m_e v_\infty^2 b_{\max}^2} = I$$

ونجد أن ثابت الصدم $b_{max} \propto \frac{1}{\sqrt{I}}$

- بشكل عام، لا يمكن حساب متوسط جهد التأين-الإثارة من النظرية الذرية؛ ومع ذلك، يمكن تقديره من العلاقات التجريبية التالية:

$$I(\text{in eV}) \approx 11.5\ Z$$

و بتقريب أفضل:

$$I(\text{in eV}) = 9.1Z\,(1 + 1.9\ Z^{-2/3})$$

النقل الأعظمي للطاقة:

- بالنسبة لثوابت الصدم الصغيرة b يتم التحكم في نقل الطاقة الأعظمي ΔE_{max} التي يمكن نقلها في تصادم مباشر واحد.
- بشكل كلاسيكي ΔE_{max} لتصادم مباشر بين جسيم مشحون ثقيل بكتلة M وبطاقة حركية E_K والكترون بكتلة m_e تُعطى بالعلاقة التالية:

$$\Delta E_{\max} = \frac{4 m_e M}{(m_e + M)^2} E_K \approx 4 \frac{m_e}{M} E_K = 4 \frac{m_e}{M} \frac{M v_\infty^2}{2} = 2 m_e v_\infty^2$$

وهذه العلاقة توضح أن جزء صغير من الطاقة الحركية ($4\frac{m_e}{M}$) للجسيم المشحون سيتم نقله الى الالكترون المداري في التصادم الواحد ($M \gg m_e$).

النقل الأعظمي للطاقة:

- العلاقة الكلاسيكية بين ΔE_{max} و ثابت الصدم الأصغري b_{min} التي تسمح بأقصى نقل للطاقة من جسيم مشحون ثقيل إلى إلكترون مداري هي:

$$\Delta E(b) = \frac{(\Delta p)^2}{2 m_e} = 2 \left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_o} \right)^2 \frac{z^2}{m_e v_\infty^2 b^2}$$

$$\Delta E_{\max} = 2 \left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_o} \right)^2 \frac{z^2}{m_e v_\infty^2 b_{\min}^2} = 2 m_e v_\infty^2$$

ومنه ينتج أن: $\Delta E_{max} \propto \frac{1}{b_{min}^2}$ أو $b_{min} \propto 1/\sqrt{\Delta E_{max}}$

قدرة التوقيف التصادمية الكتلية:

- نقل الطاقة $\Delta E(b)$ من جسيم مشحون ثقيل الى الكترون مداري يقع ضمن مجال يمتد من:

$$\Delta E_{min}(\, b_{max}) = I \; to \; \Delta E_{max}(b_{min}) = 2m_e\vartheta_\infty^2$$

$$I \leq \Delta E(b) \leq 2m_e v_\infty^2$$

والنسبة بين b_{max}/b_{min} تُعطى بالعلاقة:

$$\frac{b_{\max}}{b_{\min}} = \sqrt{\frac{\Delta E_{\max}}{\Delta E_{\min}}} = \sqrt{\frac{2m_e v_\infty^2}{I}}$$

- اذن قدرة التوقيف التصادمية الكتلية الكلاسيكية بين جسيم مشحون ثقيل والكترون مداري تُعطى بالعلاقة التالية:

$$S_{\text{col}} = 4\pi \frac{Z}{A} N_{\text{A}} \left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_{\text{o}}}\right)^2 \frac{z^2}{m_{\text{e}} v_\infty^2} \ln \sqrt{\frac{2m_{\text{e}} v_\infty^2}{I}}$$

قدرة التوقيف التصادمية الكتلية:

- اذن قدرة التوقيف التصادمية الكتلية الكلاسيكية بين جسيم مشحون ثقيل والكترون مداري تُعطى بالعلاقة التالية:

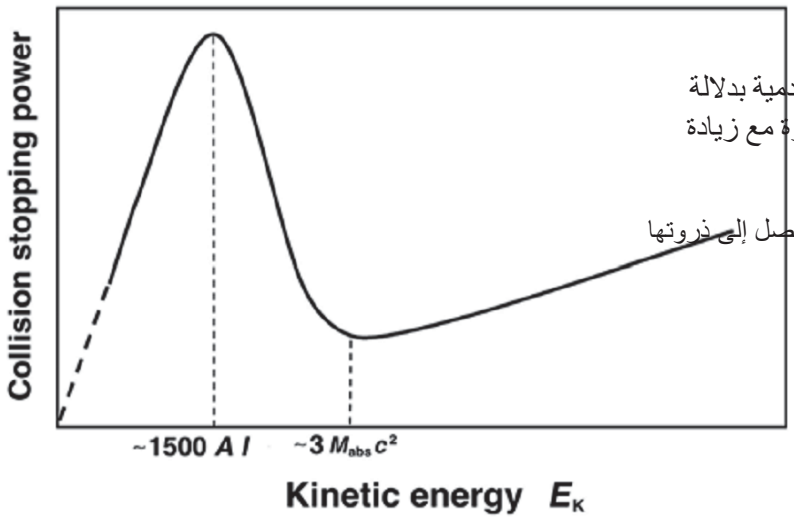
$$S_{\text{col}} = 4\pi \frac{Z}{A} N_{\text{A}} \left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_{\text{o}}}\right)^2 \frac{z^2}{m_{\text{e}} v_\infty^2} \ln \sqrt{\frac{2m_{\text{e}} v_\infty^2}{I}}$$

وهي علاقة كلاسيكية لقدرة التوقيف التصادمية الكتلية للعالم *Niels Bohr*(*1913*). وفي ميكانيك الكم غير النسبي تم وضع علاقة تُعرف باسم *Beth-Bloch* لحساب قدرة التوقيف التصادمية الكتلية:

$$S_{\text{col}} = 4\pi \frac{Z}{A} N_{\text{A}} \left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_{\text{o}}}\right)^2 \frac{z^2}{m_{\text{e}} v_\infty^2} \ln \frac{2m_{\text{e}} v_\infty^2}{I}$$

وهي تختلف عن علاقة *Bohr* بظهور القوة $\frac{1}{2}$ في المصطلح اللوغاريتمي لبور.

قدرة التوقيف التصادمية الكتلية:



شكل منحنى قدرة التوقف التصادمية كدالة للطاقة الحركة للجسيم المشحون.

- كما هو موضح في الشكل التالي تمر قدرة التوقف التصادمية بدلالة الطاقة الحركية للجسيم المشحون عبر ثلاث مناطق مميزة مع زيادة الطاقة الحركية :

1- عند الطاقات الحركية المنخفضة، ترتفع S_{col} مع الطاقة وتصل إلى ذروتها عند I A 1500:

$$(E_{\mathrm{K}})_{\max} = \left(\frac{4}{I}\frac{m_e}{M}\right)^{-1} \mathrm{e} \approx 1500\ A\,I$$

2-بعد الذروة، ينخفض S_{col} بمقدار $\frac{1}{\vartheta^2}$

3-بعد الانخفاض الأعظمي، يزداد S_{col} بشكل خفيف بازدياد الطاقة الحركية للجسيم المشحون.

مكتبة A to Z