

Physique des Particules et Physique Nucléaire

PHYS-F305

Année 2025-2026

Première partie - L. Favart

V - Interactions des particules avec la matière

Contenu Chapitre V

V. Interactions des particules avec la matière

1. Tableau général

2. Interactions électromagnétiques

2.a interactions des particules chargées

- perte d'E par ionisation
- perte d'énergie par unité de longueur, Bethe-Bloch
- rayonnement de freinage

2.b interactions des photons

- effet photo-électrique
- diffusion Compton
- création de paires

3. Interactions nucléaires fortes

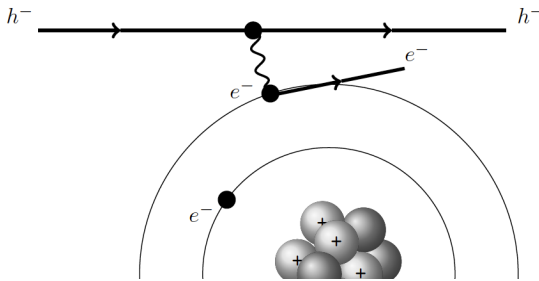
Tableau général

Pour détecter une particule il faut qu'elle interagisse

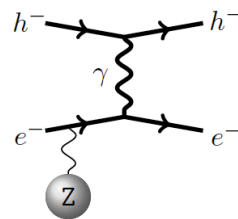
$e^{\pm}, \mu$	EM	
γ	EM	
$p, \pi, K^{\pm}, \dots$	EM	IF
$n, K^0, \Lambda, \dots$		IF

Interactions EM des particules chargées

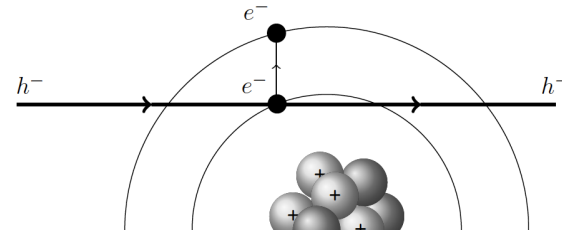
Ionisation



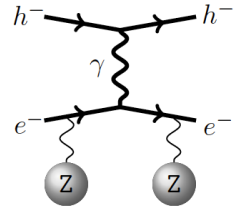
$$h^- + A \rightarrow A^+ + h^- + e^-$$



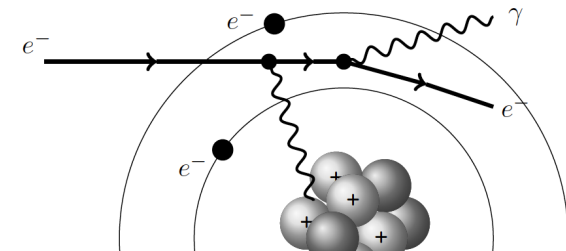
Excitation



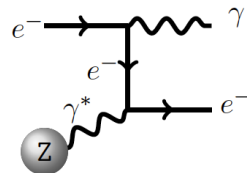
$$h^- + A \rightarrow h^- + A$$



Production de photon

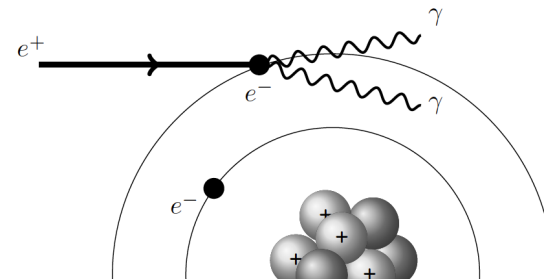


$$e^- + \gamma^* \rightarrow e^- + \gamma$$

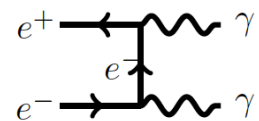


(Bremsstrahlung)

Annihilation (e^+)

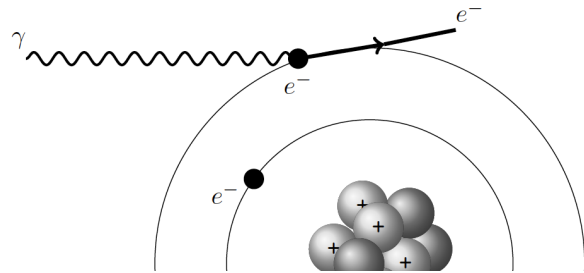


$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$$

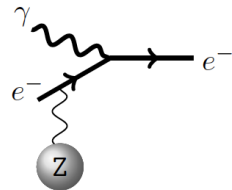


Interactions des photons

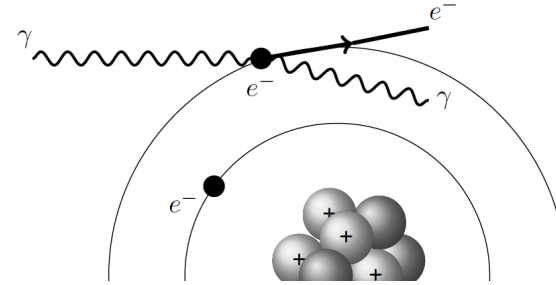
Effet photo-électrique



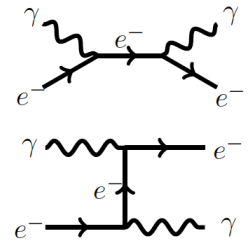
$$\gamma + A \rightarrow A^+ + e^-$$



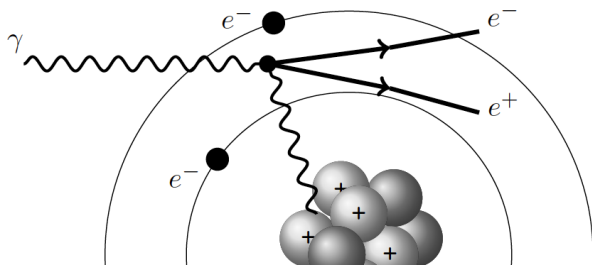
Effet Compton



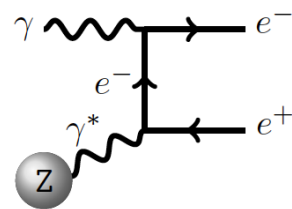
$$\gamma + A \rightarrow A^+ + e^- + \gamma$$



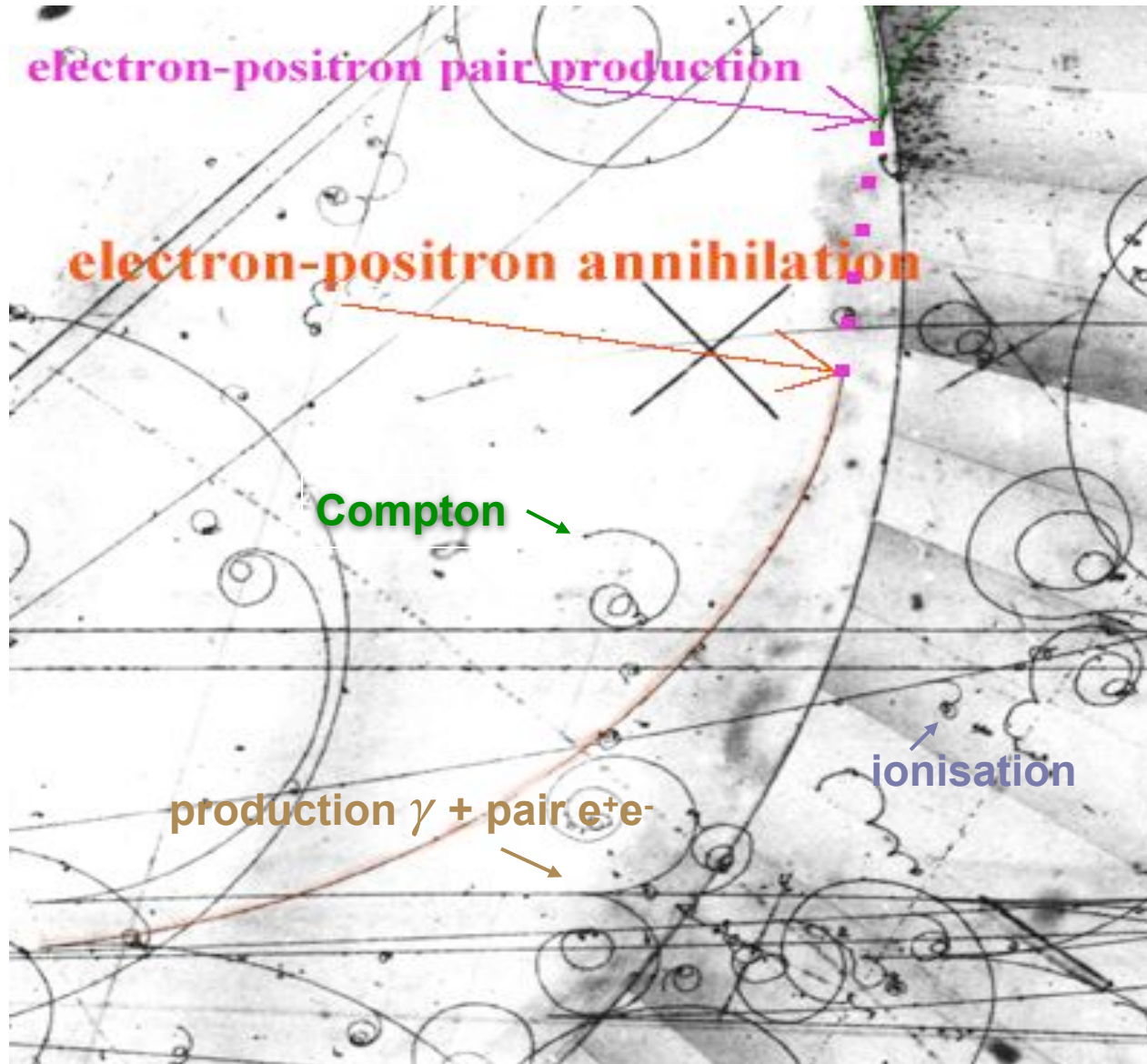
Création de paires



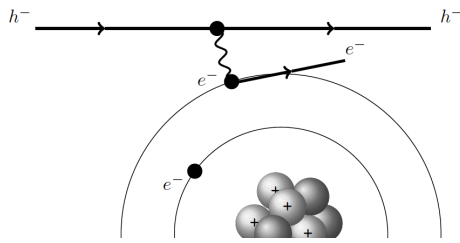
$$\gamma + \gamma^* \rightarrow e^+ + e^-$$



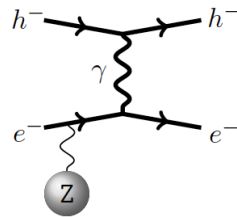
Interactions EM



Interactions EM des particules chargées - ionisation



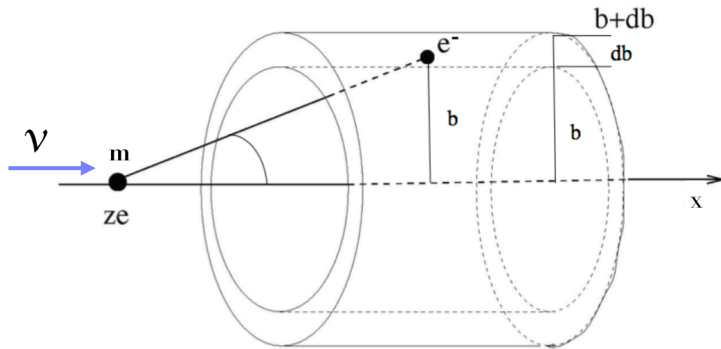
$$h^- + A \rightarrow A^+ + h^- + e^-$$



$$\sigma \simeq 10^{-16} - 10^{-17} \text{cm}^2$$

mais nombre d'atome très élevé

Bohr (1913) : calcul de la perte d'énergie par unité de longueur (classique)



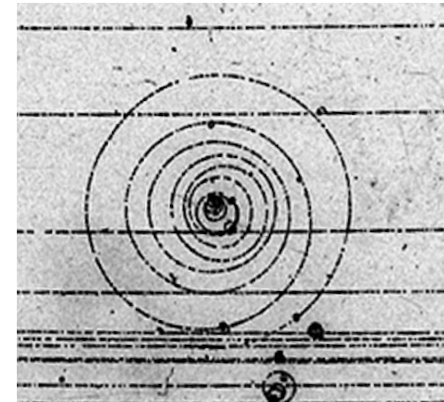
approximations :

- e^- libre et au repos car $v \gg v_{\text{orbitale}}$
- particule incidente non déviée
- déplacement de l' e^- est négligeable

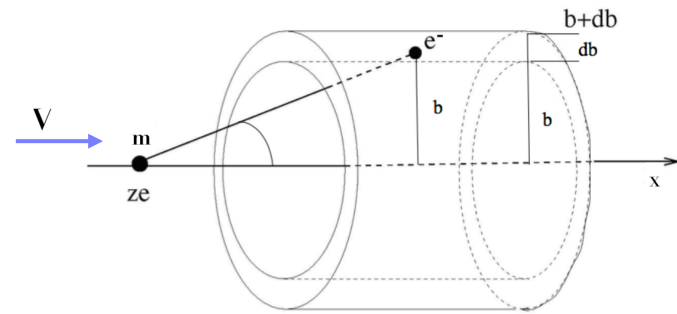
$$\Delta p_x = \int_{-\infty}^{+\infty} F_x(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} ze E_x(t) dt = 0$$

$$\Delta p_y = \int_{-\infty}^{+\infty} ze E_y(t) dt = \frac{ze}{v} \int_{-\infty}^{+\infty} E_y(x) dx$$

$$\Delta p_z = 0$$



suite du calcul :



$$\Delta p_y = \int_{-\infty}^{+\infty} ze E_y(t) dt = \frac{ze}{v} \int_{-\infty}^{+\infty} E_y(x) dx$$

Th. de Gauss : flux traversant él. de surface du cylindre de rayon $b = \Sigma$ charges int

$$\oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \int_{-\infty}^{+\infty} 2\pi b E_y(x) dx = \frac{e}{\epsilon_0} = 4\pi e \quad (\epsilon_0 = 1/4\pi) \quad \text{en la position de l'e-}$$

$$\Rightarrow \int_{-\infty}^{+\infty} E_y(x) dx = \frac{2e}{b}$$

énergie acquise par l'e-

$$\Delta E = \frac{p^2}{2m_e} = \frac{2z^2 e^4}{m_e v^2 b^2}$$

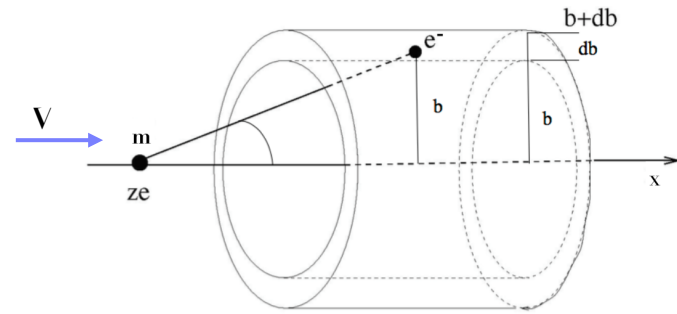
indép. de m
et du signe de
la charge

Remarque : effet de la charge du noyau (Z, M)

$$\Delta E_Z = \frac{2Z^2 z^2 e^4}{M v^2 b^2} \quad \text{rapport } Ze/N : \frac{Z \Delta E_e}{\Delta E_Z} \simeq \frac{Z/m_e}{Z^2/M} \simeq \frac{1/m_e}{Z/2Zm_p} = \frac{2m_p}{m_e} \simeq 4000$$

$$(A \simeq 2Z, \quad M \simeq Am_p)$$

suite du calcul :



particule incidente traverse dx
du milieu de densité d' e^- n_e ,
dans un élément de volume d^3V

$$\text{dans } d^3V : -d^3E = \Delta E(b) n_e d^3V$$

$$d^3V = b db dx d\phi$$

+ intégration sur $\phi \Rightarrow 2\pi$

$$\Rightarrow -d^2E = \frac{4\pi z^2 e^4}{m_e v^2} n_e \frac{db}{b} dx$$

$$\text{et } n_e = N_A \rho / A_i$$

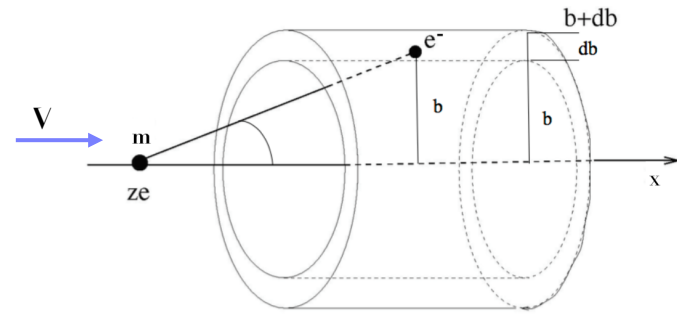
$$\Rightarrow -\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4 n_e}{m_e v^2} \ln \frac{b_{max}}{b_{min}}$$

estimation de b_{min} : E_{cin} max de l' e^-

$$v_e = \frac{2m}{m_e + m} v \simeq 2v \quad \text{si } m \gg m_e \quad \text{et donc} \quad E_{cin}^{max} = \frac{1}{2} m_e (2v)^2 = 2m_e v^2$$

$$\text{relativiste : } E_{cin}^{max} = 2m_e \gamma^2 v^2 \quad \text{et} \quad \Delta E = \frac{p^2}{2m_e} = \frac{2z^2 e^4}{m_e v^2 b^2} \Rightarrow b_{min} = \frac{ze^2}{\gamma m_e v^2}$$

suite du calcul de la perte d'énergie par unité de longueur (classique)



estimation de $b_{\max}$: e^- pas vraiment libre

libre si le temps de l'interaction $\tau \ll 1/\nu$ petit devant la période de révolution

$\Rightarrow$ estimation du temps de l'interaction

[détails dans les notes]

$$\tau = \frac{b}{v\gamma} \quad \Rightarrow \quad b_{\max} = \frac{v}{\langle \nu \rangle} \gamma$$

$I = \hbar \langle \nu \rangle$ énergie d'ionisation liée à la fréquence moyenne
de révolution orbitale doit être mesurée

Perte d'E par ionisation

Formule de Bohr (semi-classique):

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{m_e v^2} \frac{N_A \rho}{A} \left[\ln \frac{m_e \gamma^2 v^3}{ze^2} \frac{1}{I^2} \right]$$

- bonne approximation pour les $m \gg m_e$
 - pas suffisant pour le proton, OK pour particule α
-

Meilleure approximation (1953): Formule de Bethe-Bloch

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \rho \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} - \frac{C}{Z} \right]$$

$$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0.307 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$$

$$r_e = \frac{e^2}{m_e c^2}$$

le rayon classique de l'électron(= 2.8 fm)

$$T_{max} = 2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2$$

l'énergie cinétique maximale transférée à l'électron,
pour $m \gg m_e$

$$I = (10 \pm 1) \cdot Z \text{ eV}$$

pour les éléments de Z au delà de l'oxygène

Perte d'E par ionisation

Formule de Bethe-Bloch

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \rho \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} - \frac{C}{Z} \right]$$

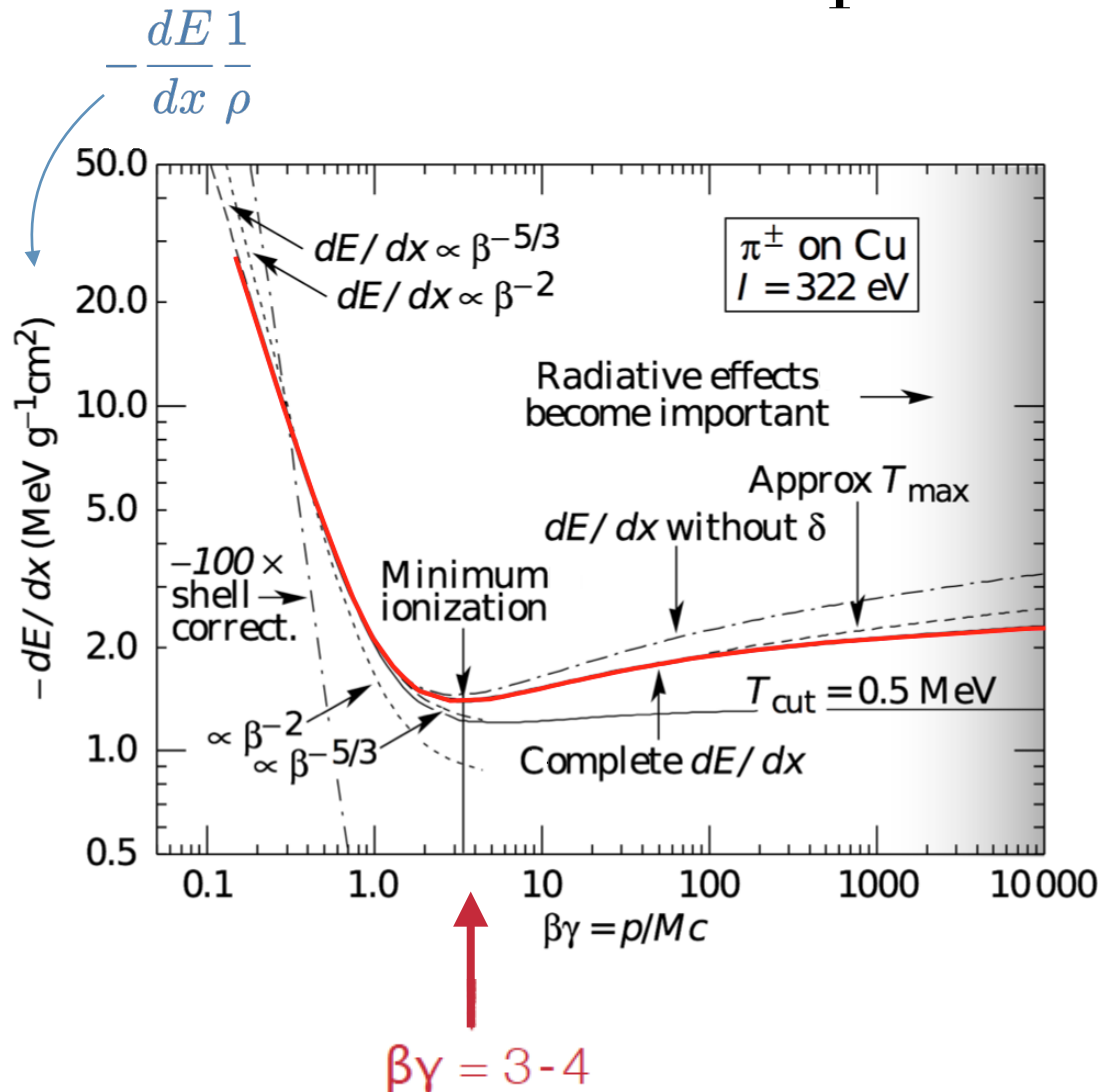
- correction β^2 : relativiste due aux déformations du champ électrique $E_y \rightarrow \gamma E_y$.
- correction C/Z : tient compte des effets de liaison des électrons (pas immobiles) quand la vitesse orbitale n'est plus négligeable face à la vitesse incidente
- correction $\delta/2$: le champ électrique de la particule incidente polarise les atomes (effet Cherenkov)

$$\frac{\delta}{2} \rightarrow \ln \frac{\hbar \omega_p}{I} + \ln \beta \gamma - \frac{1}{2}$$

$$\omega_p = \sqrt{\rho e^2 / \pi m_e}$$

dite fréquence de plasma des électrons

Perte d'E par ionisation



Minimum ionizing particles (MIP): $\beta\gamma = 3-4$

dE/dx falls $\sim \beta^{-2}$; kinematic factor
[precise dependence: $\sim \beta^{-5/3}$]

dE/dx rises $\sim \ln(\beta\gamma)^2$; relativistic rise
[rel. extension of transversal E-field]

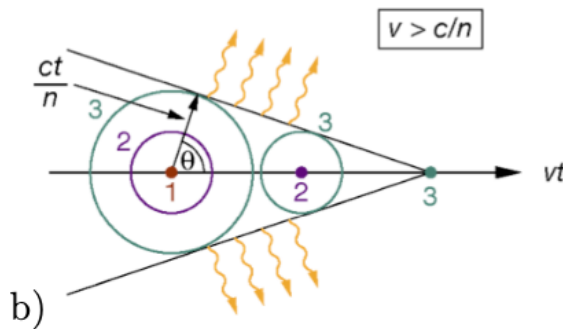
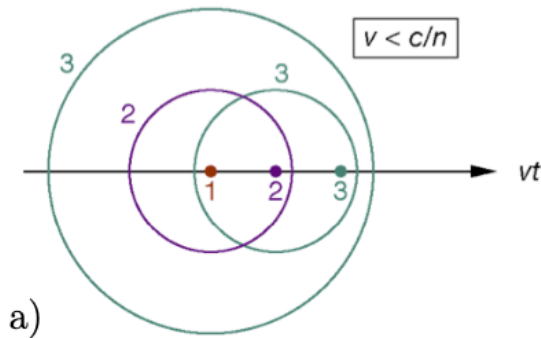
Saturation at large $(\beta\gamma)$ due to
density effect (correction δ)
[polarization of medium]

Units: $\text{MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$

MIP loses $\sim 13 \text{ MeV/cm}$
[density of copper: 8.94 g/cm^3]

Effet Cherenkov

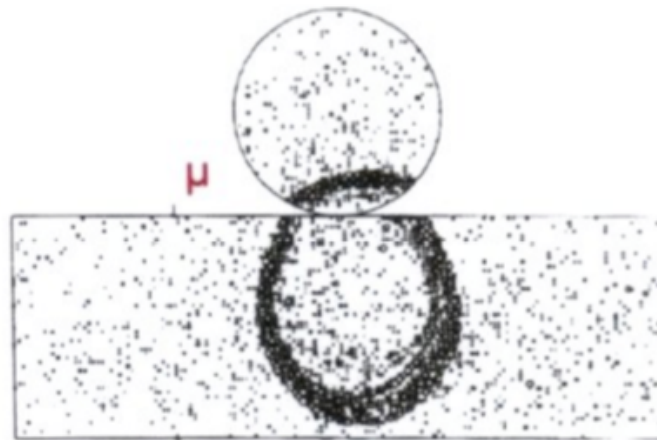
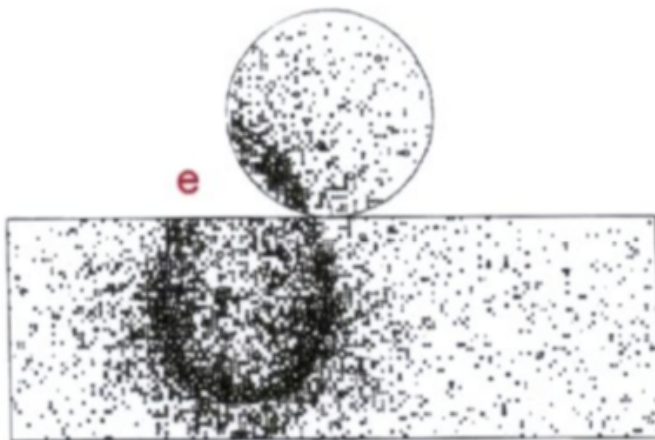
la dépolarisation entraîne l'émission d'un rayonnement en chaque point de la trajectoire. Emissions en phase si $v > c/n$ (n indice de réfraction).



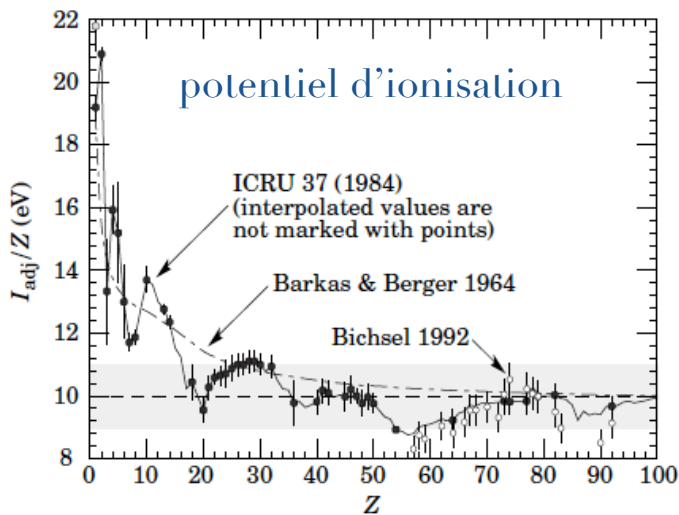
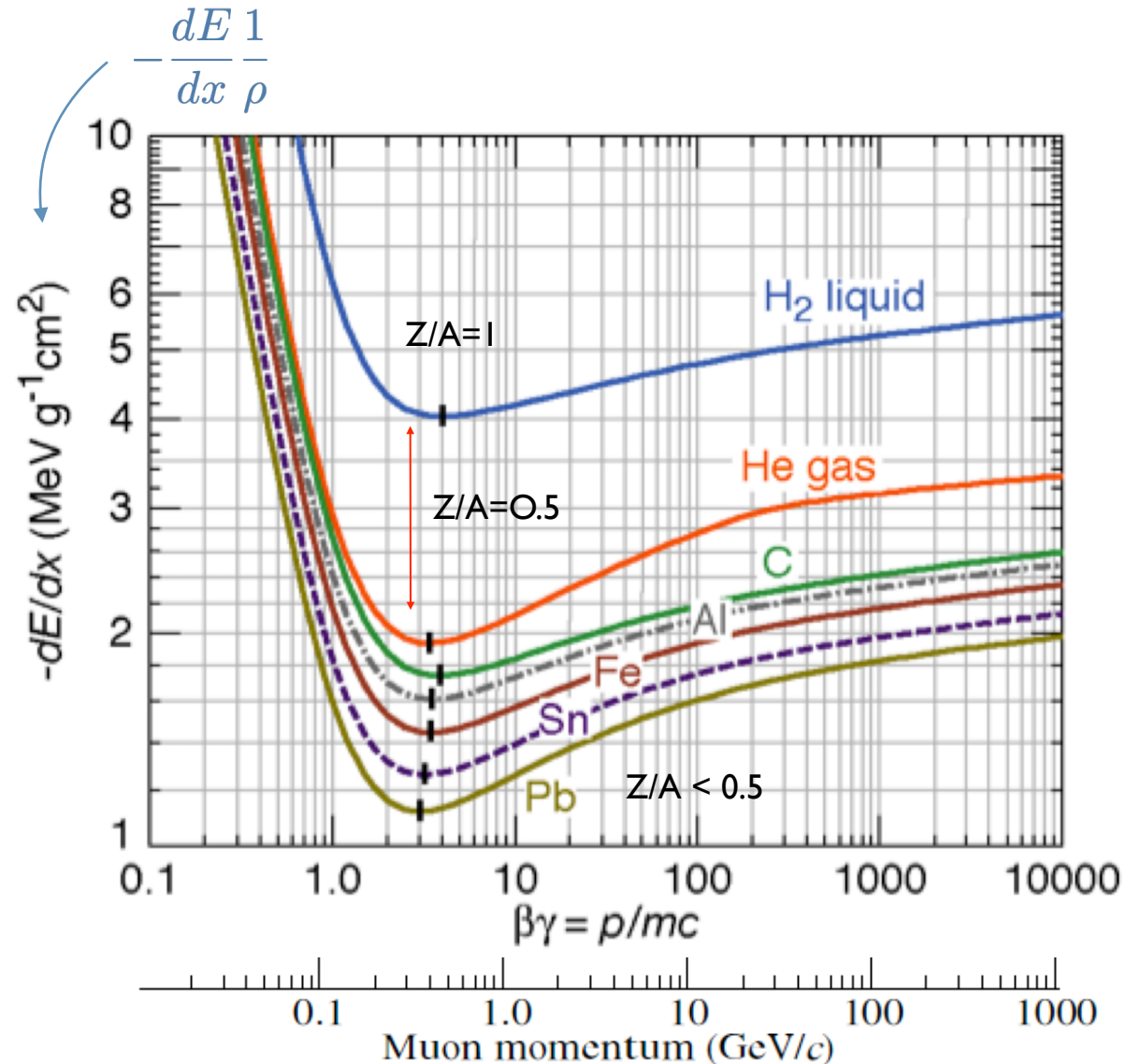
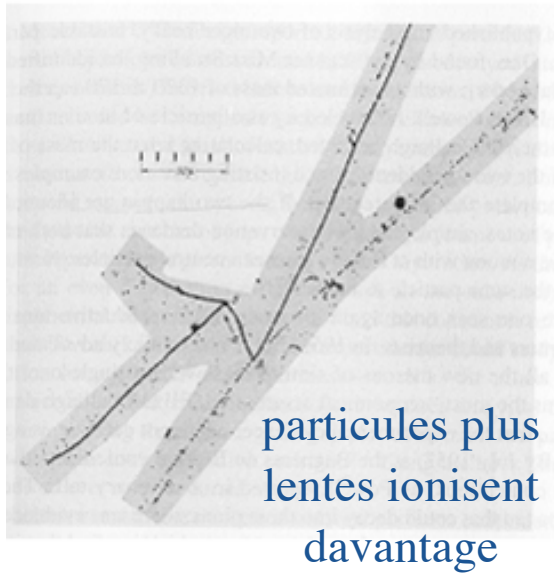
cône Cherenkov

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta}$$

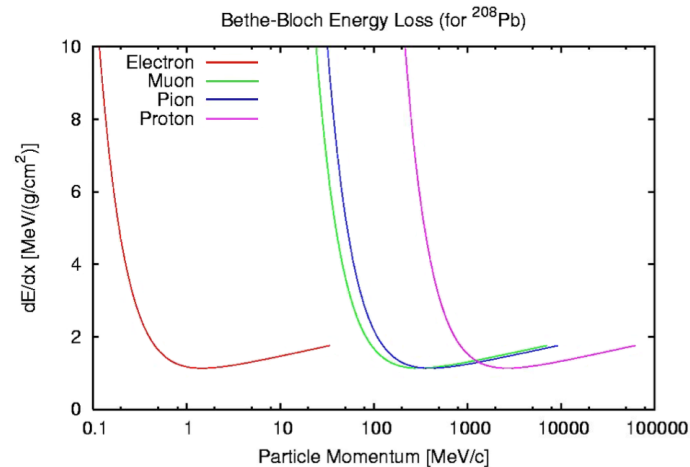
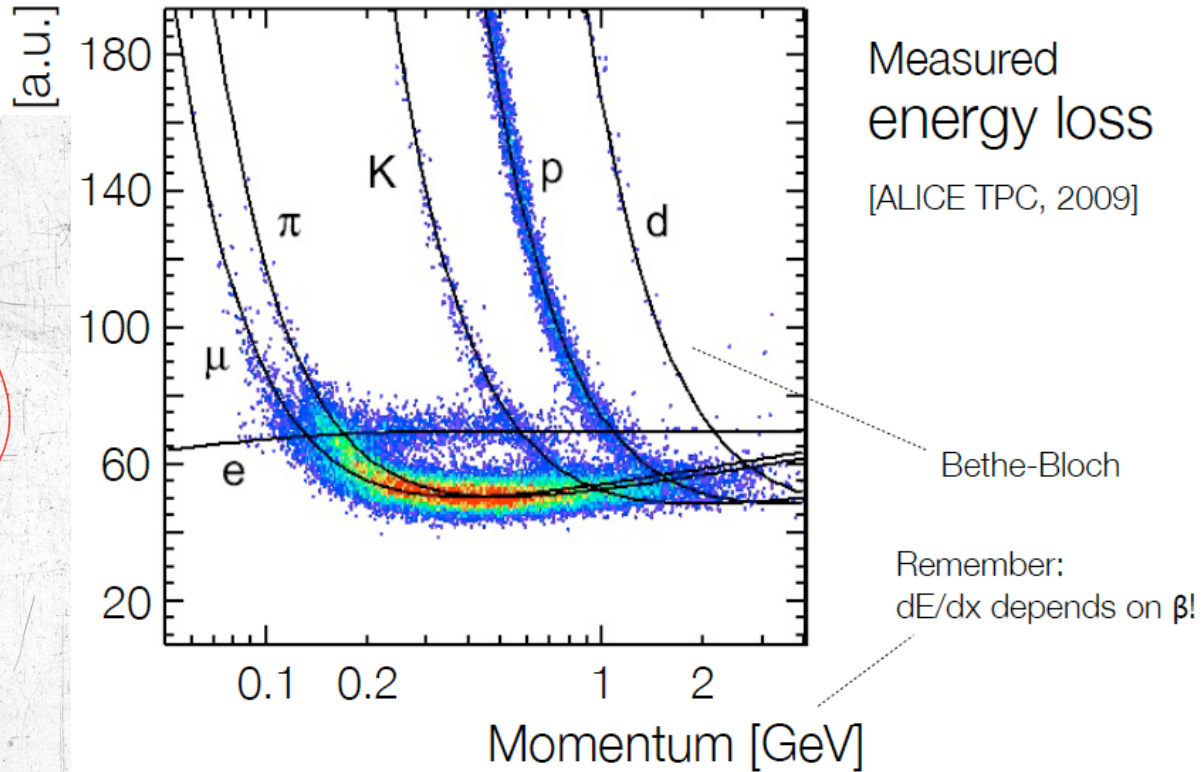
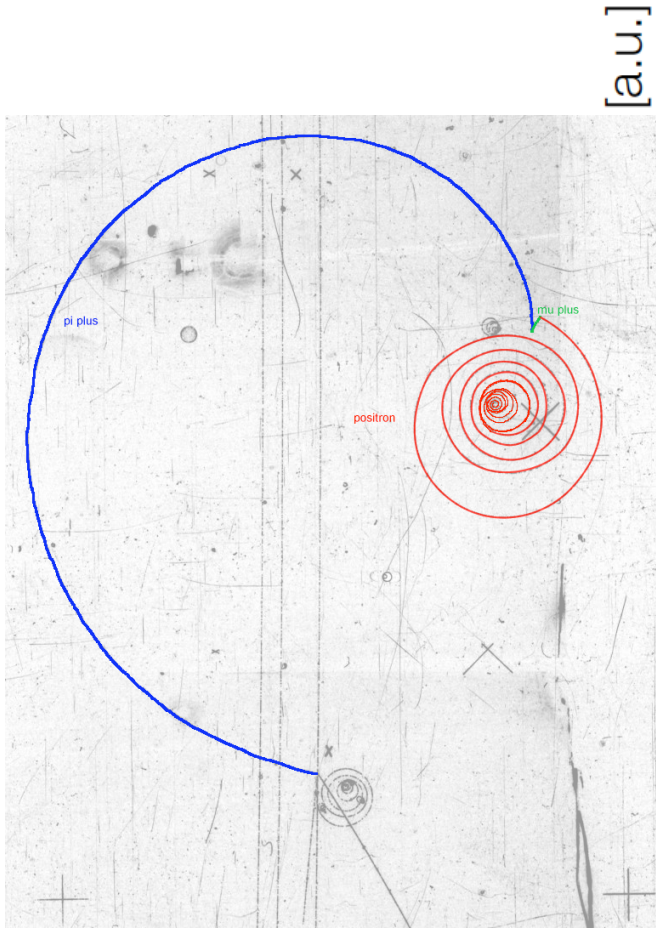
n = indice de réfraction
du milieu



Perte d'E par ionisation

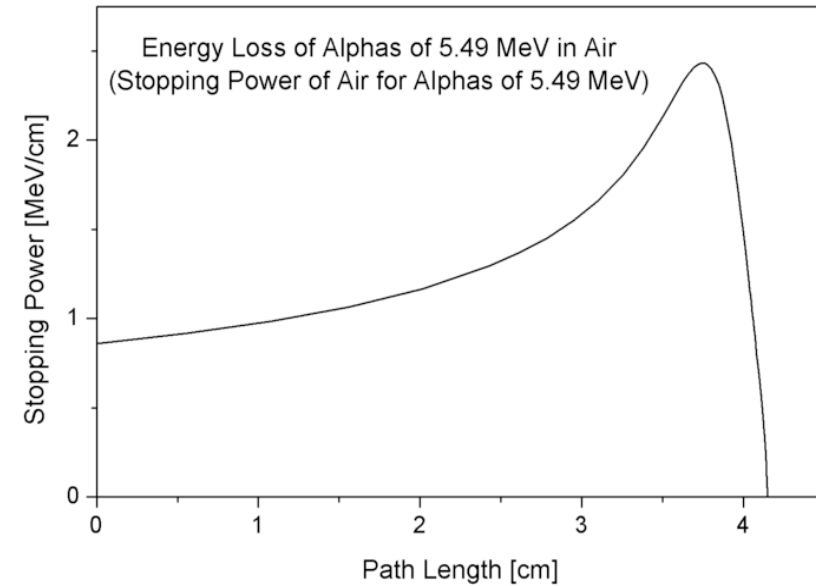


Mesure dE/dx: moyen d'identification

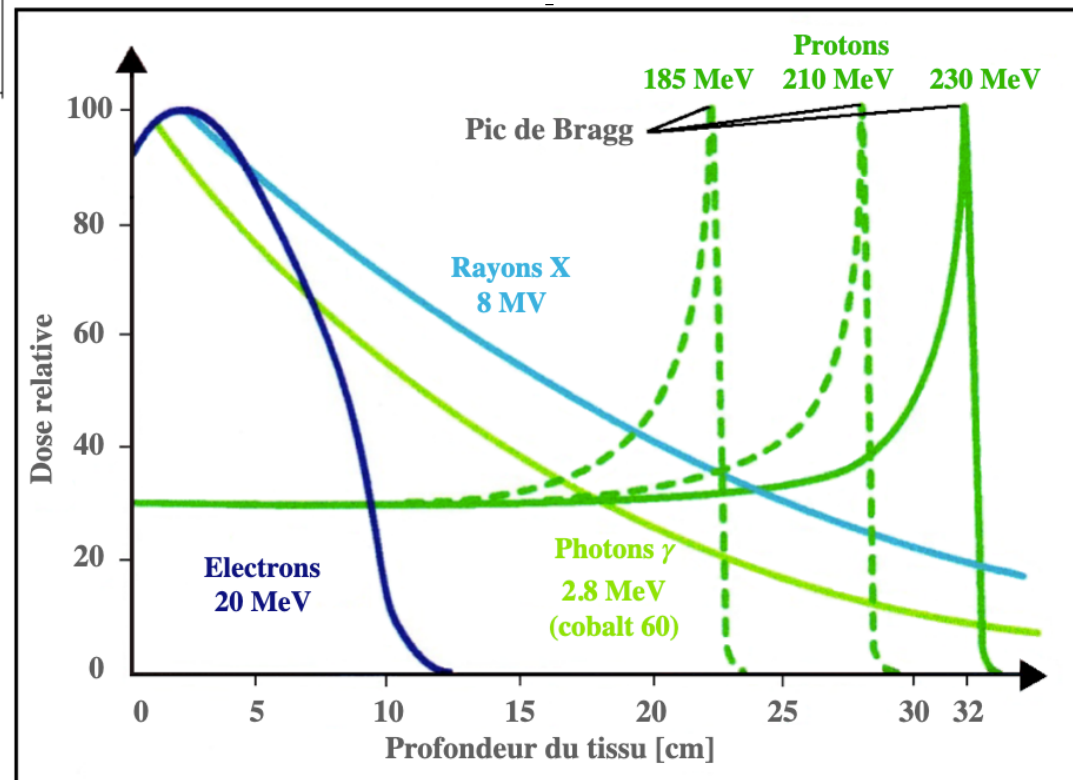


bonne identification
quand $p < m$

Parcours moyen - Pic de Bragg



parcours moyen :
$$R = \int_E^0 \frac{dE}{dE/dx}$$

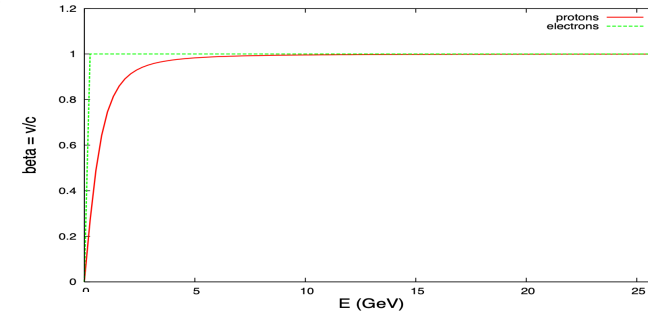


Perte d'E par ionisation pour les e^+/e^-

petite masse $\rightarrow$

- même à petite impulsion, effets relativistes importants : rayonnement de freinage
- énergie perdue dans l'interaction n'est plus négligeable

$$\left. \frac{dE}{dx} \right|_{tot} = \left. \frac{dE}{dx} \right|_{ion} + \left. \frac{dE}{dx} \right|_{brem}$$



Ionisation

$$-\left. \frac{dE}{dx} \right|_{ion} = K \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \frac{m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_e^{max}}{2 I^2} + F(\gamma) \right]$$

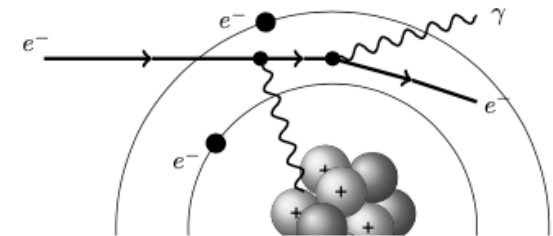
$F(\gamma)$ diffère pour les électrons et les positons

$$T_e^{max} = m_e c^2 (\gamma - 1)/2$$

Bremsstrahlung (rayonnement de freinage)

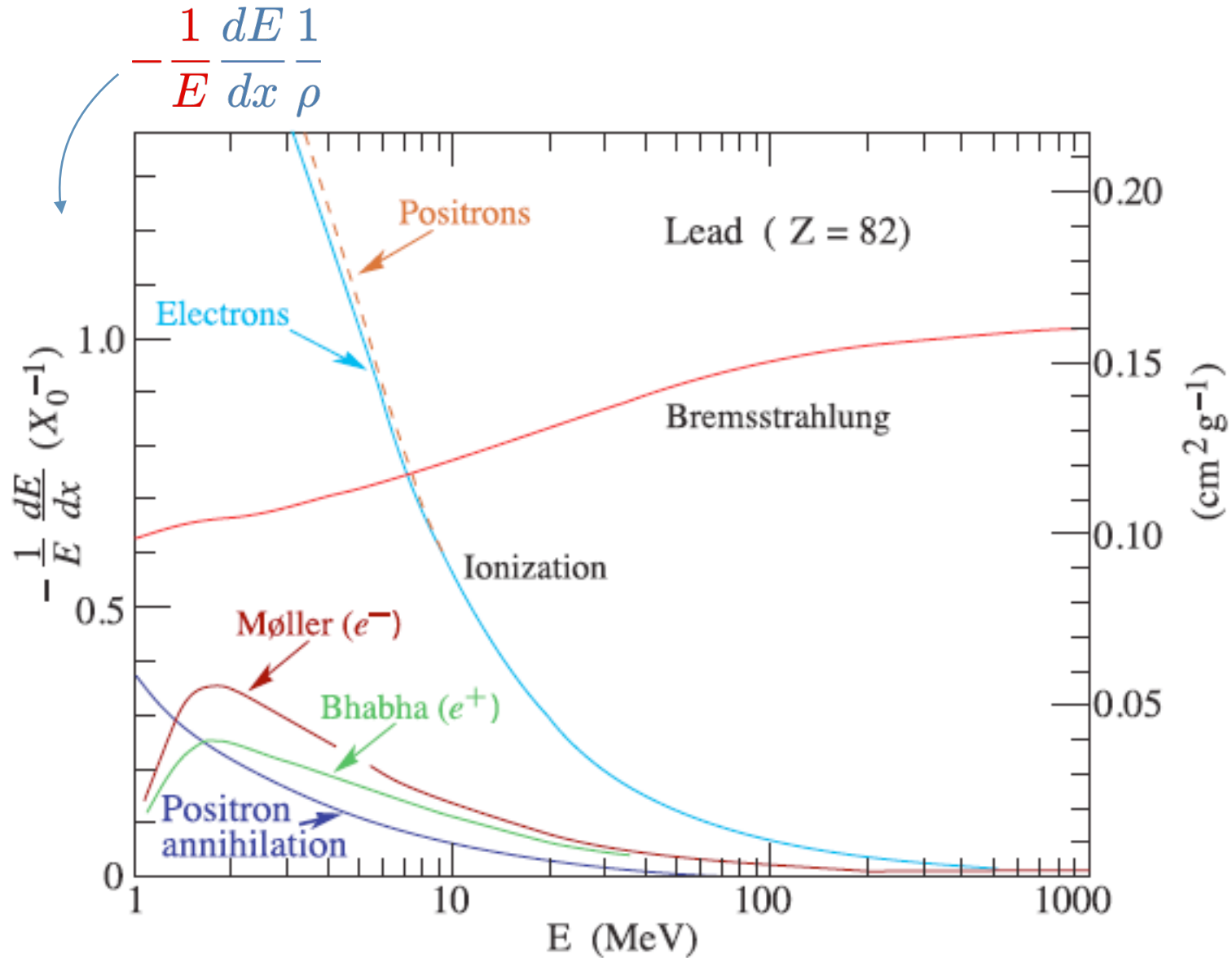
$$\frac{dE}{dx} = 4\alpha N_A \frac{z^2 Z^2}{A} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mc^2} \right)^2 E \ln \frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}} \propto \frac{E}{m^2}$$

même origine que le rayonnement synchrotron
mais ici dans le champs EM de la matière



Bremsstrahlung

Perte d'E totale pour les e^+/e^-



La longueur de radiation

à grand $\beta\gamma$, dE/dx est linéaire en $E \rightarrow$

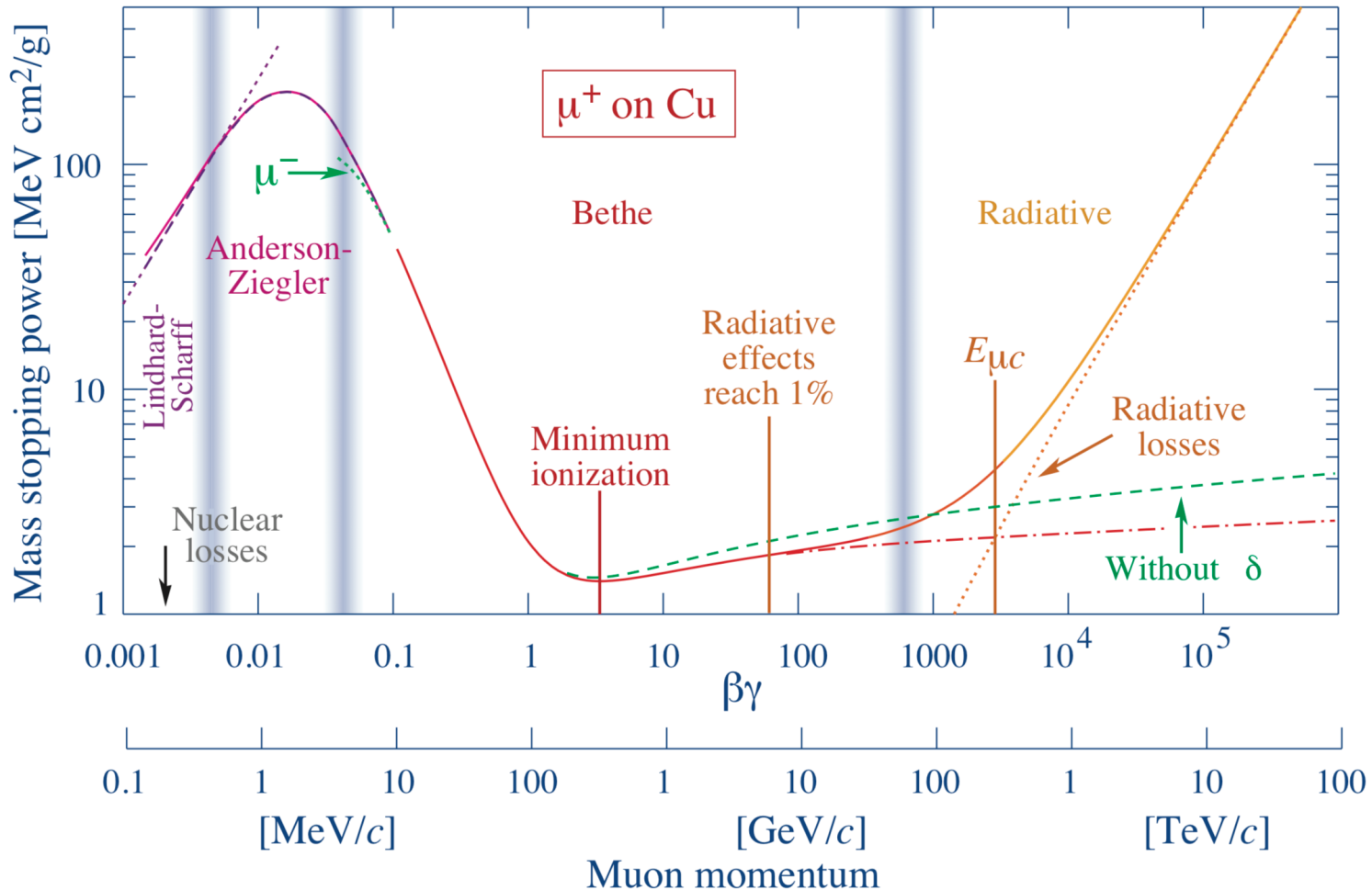
$$-\frac{dE}{dx} = \frac{E}{X_0}$$

X_0 est la longueur de radiation

$$\rightarrow E(x) = E_0 e^{-x/X_0}$$

X_0 représente donc le **parcours moyen** d'un électron, dans un milieu donné, avant qu'il ne perde une fraction $1/e$ de son énergie par rayonnement de freinage

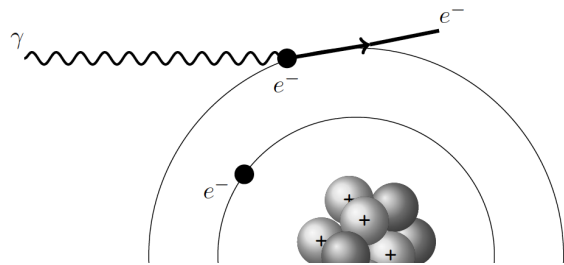
Perte d'E pour les muons



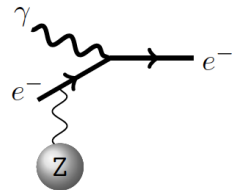
rayonnement de freinage est réduit d'un facteur $(m_\mu/m_e)^2 \approx (206)^2 \approx 43000$
 et ne devient dominant qu'au-delà de 100 GeV

Interactions des photons

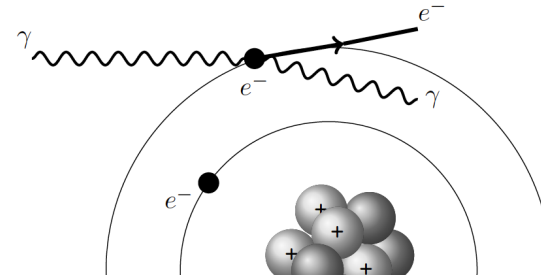
Effet photo-électrique



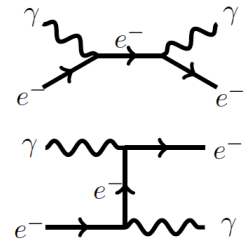
$$\gamma + A \rightarrow A^+ + e^-$$



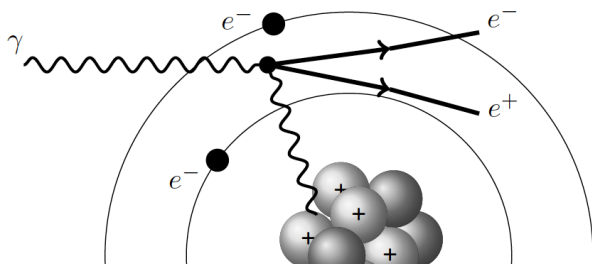
Effet Compton



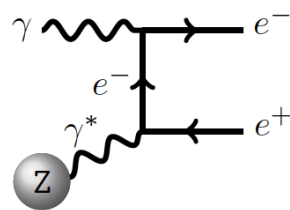
$$\gamma + A \rightarrow A^+ + e^- + \gamma$$



Création de paires



$$\gamma + \gamma^* \rightarrow e^- + e^+$$



Loi de Beer-Lambert

intensité

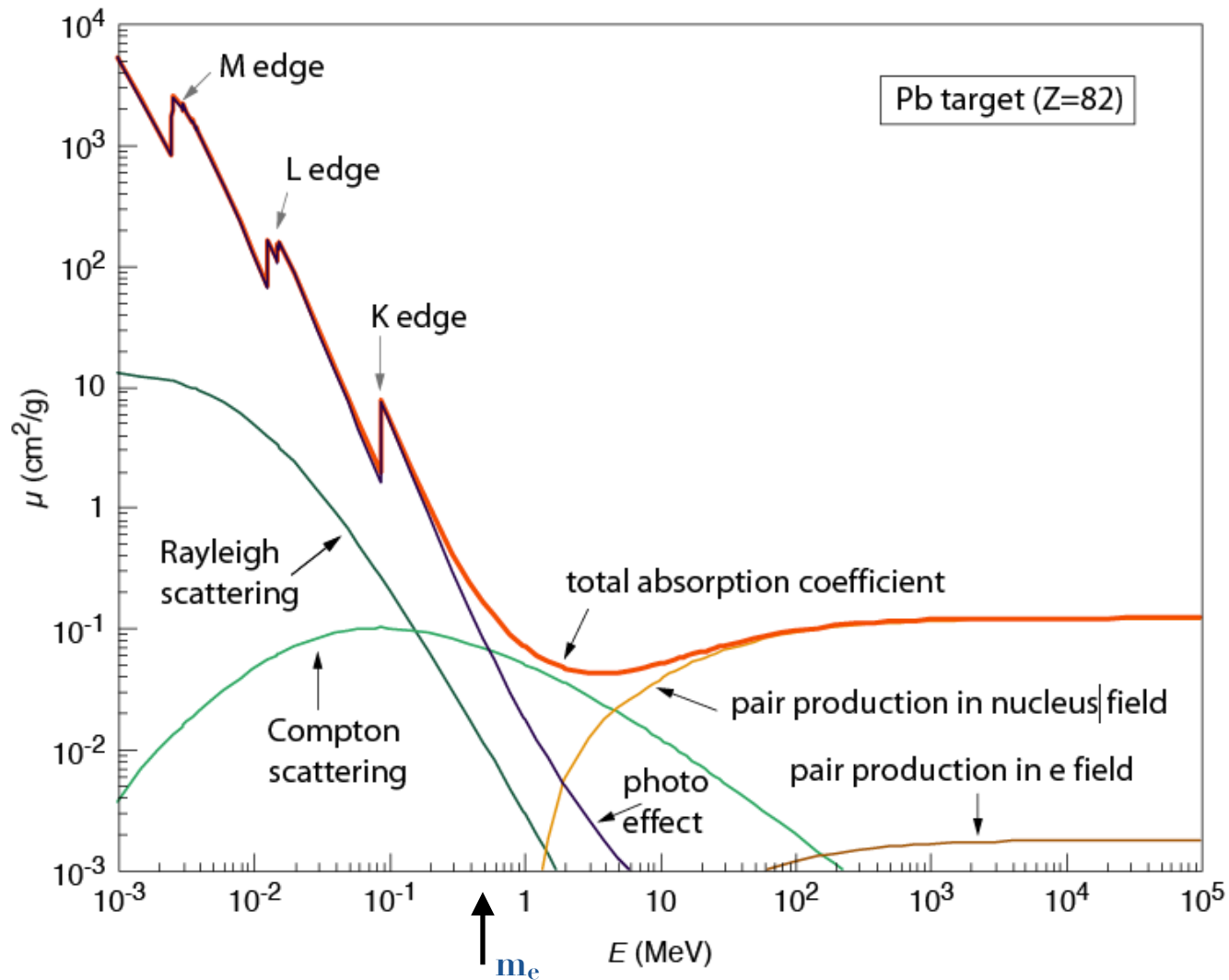
$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

où
$$\mu = \frac{\rho N_A}{A} \sum_i \sigma_i$$

libre parcours moyen $\lambda = 1/\mu$

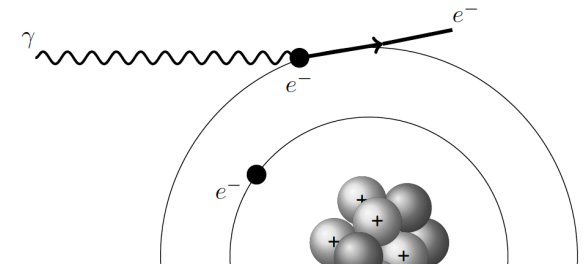
Les photons sont toujours absorbés / jamais diffusés

Interactions des photons



diffusion **Rayleigh**. Quand $E_\gamma \rightarrow 0$ on ne peut plus considérer que les électrons sont libres et au repos. Le photon (grande longueur d'onde) interagit alors avec le système électronique global de l'atome.

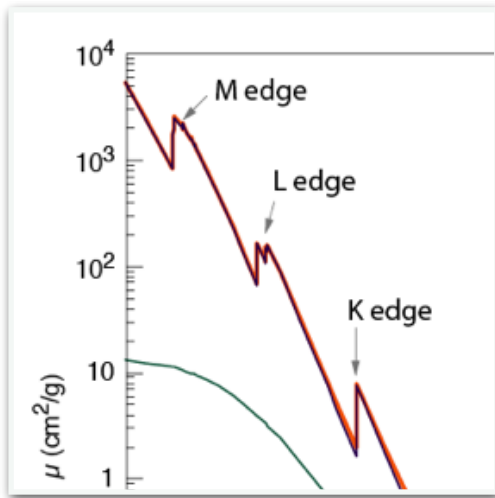
Effet photoélectrique



La section efficace est approchée différemment suivant l'énergie du photon :

$$\sigma_{pe} = \frac{8\pi r_e^2}{3} \alpha^4 Z^5 2^{(5/2)} \left(\frac{m_e c^2}{E_\gamma} \right)^{3.5} \quad \text{pour} \quad E_{liaison} \ll E_\gamma \ll m_e c^2$$

$$\sigma_{pe} = 2\pi \alpha^4 r_e^2 Z^5 \frac{m_e c^2}{E_\gamma} \quad \text{pour} \quad E_\gamma \gg m_e c^2$$



→ chaque couche donne une contribution à la section efficace totale

L'atome peut ensuite se réarranger :

rayonnement X : $\text{atome}_K^{+*} \rightarrow \text{atome}_{LM}^{+*} + \gamma$

électrons Auger : $\text{atome}_K^{+*} \rightarrow \text{atome}_{LM}^{++*} + e^-$

Effet Compton

Arthur Compton (1922) mesure les longueurs d'onde des rayonnements incident et "diffusé" :

→ pas un spectre de longueur d'onde continu mais :

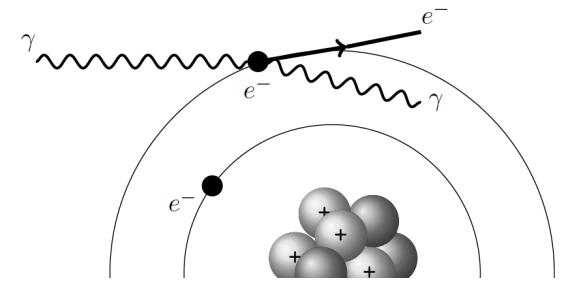
$$\lambda_1 - \lambda_0 = \frac{h}{E_{\gamma'}} - \frac{h}{E_{\gamma}} = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \leq \frac{2h}{m_e c}$$

- ne dépend pas du nombre atomique du diffuseur
- ne dépend pas de la longueur d'onde de l'onde incidente
- l'énergie et la quantité de mvt perdue par le photon se retrouvent dans un seul électron

$$\rightarrow E_{\gamma'} = E_{\gamma} \frac{1}{1 + \frac{E_{\gamma}(1 - \cos \theta)}{m_e c^2}} \quad = \text{diffusion sur un } e^- \text{ libre}$$

La section efficace est approchée de deux façons suivant l'énergie du photon :

$$\begin{array}{lll} \sigma_c = \frac{8\pi}{3r_e^2} \left(1 - \frac{2E_{\gamma}}{m_e c^2} \right) & \text{pour} & E_{\gamma} \ll m_e c^2 \\ \sigma_c = \pi r_e^2 \frac{m_e c^2}{E_{\gamma}} \left(\ln \frac{2E_{\gamma}}{m_e c^2} + \frac{1}{2} \right) & \text{pour} & E_{\gamma} \gg m_e c^2 \end{array}$$



La création de paires

création de nouvelles particules → seuil en énergie

$$E_\gamma \geq 2m_e c^2 \simeq 1\text{MeV}$$

$$\sigma_{\text{paire}} = \frac{7}{9} \left(4\alpha r_e^2 Z^2 \ln \frac{2E_\gamma}{m_e c^2} - \frac{218}{21} \right)$$

pour

$$2m_e c^2 < E_\gamma < \frac{m_e c^2}{2\alpha} Z^{1/3}$$

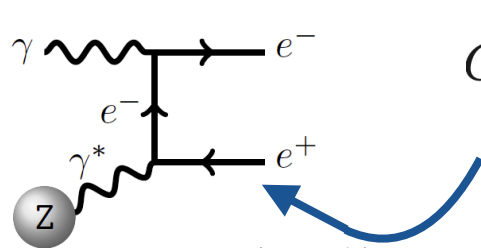
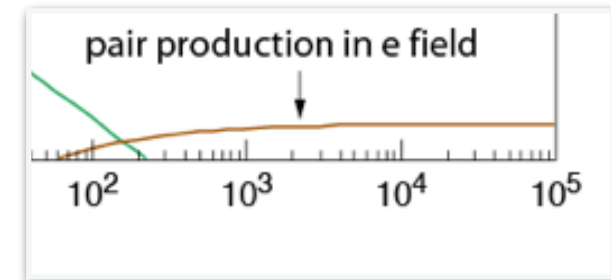
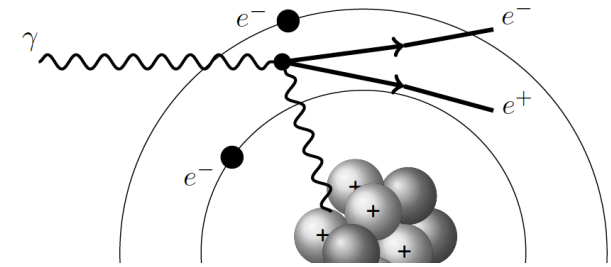
$$\sigma_{\text{paire}} = \frac{7}{9} \left(\underbrace{4\alpha r_e^2 Z^2 \ln \frac{183}{Z^{1/3}} - \frac{2}{21}}_{A/N_A X_0} \right)$$

pour

$$E_\gamma > \frac{m_e c^2}{2\alpha} Z^{1/3}$$

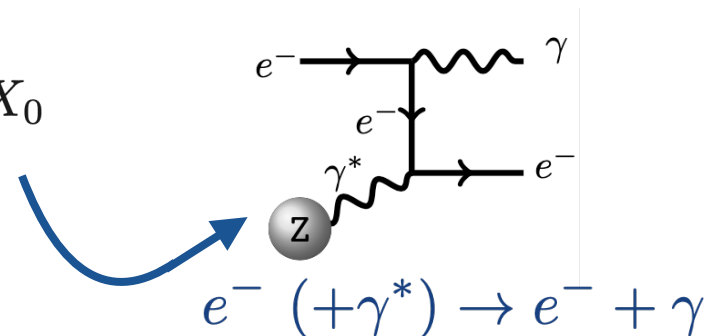
constante

on constate la relation entre la longueur de conversion (C_0) et la longueur de radiation (X_0)



$$\gamma (+\gamma^*) \rightarrow e^+ + e^-$$

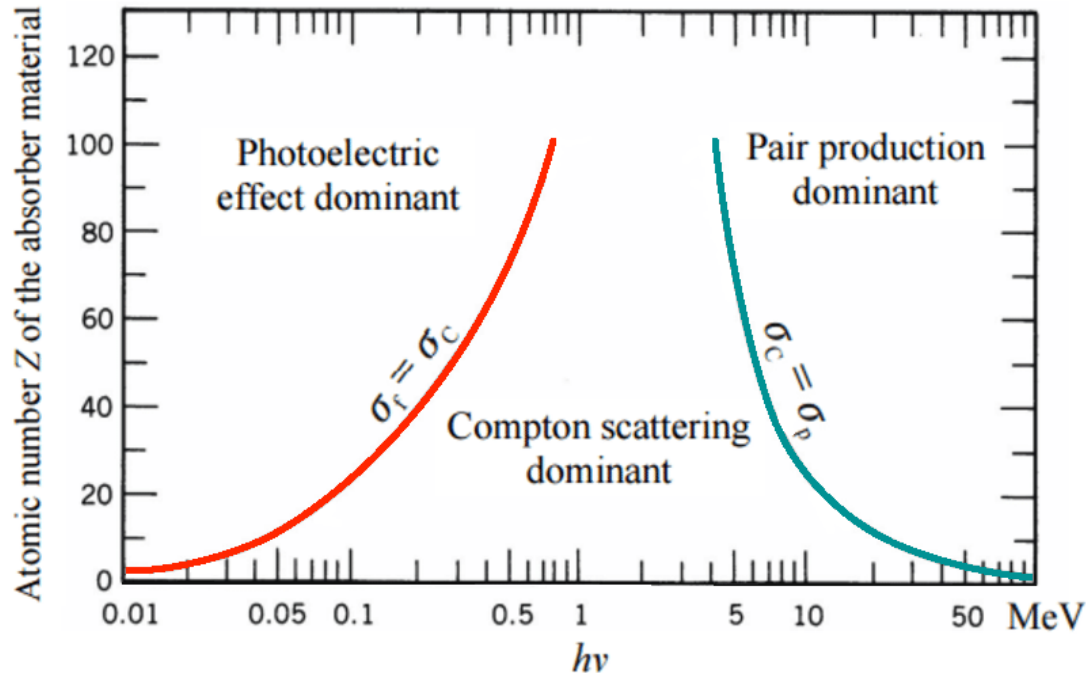
$$C_0 = \frac{A}{N_A \sigma_{\text{paire}}} = \frac{9}{7} X_0$$



$$e^- (+\gamma^*) \rightarrow e^- + \gamma$$

Interactions EM : photon

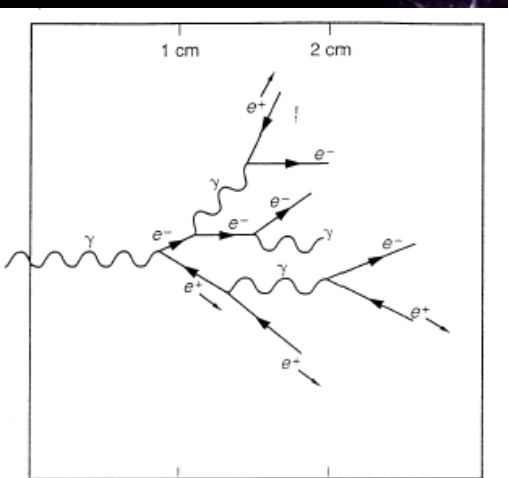
Zones de prépondérance des 3 processus d'interaction des photons avec la matière, dans le plan Z-E γ



Au-delà de 20-30 MeV, c'est le processus de création de paires qui domine.

$$\begin{aligned}\sigma_{tot} &= \sigma_{pe} + \sigma_c + \sigma_{paire} \\ \mu &= \mu_{pe} + \mu_c + \mu_{paire} \\ \text{où } \mu_i &= n\sigma_i = \frac{N_A \rho}{A} \sigma_i\end{aligned}$$

Gerbe EM



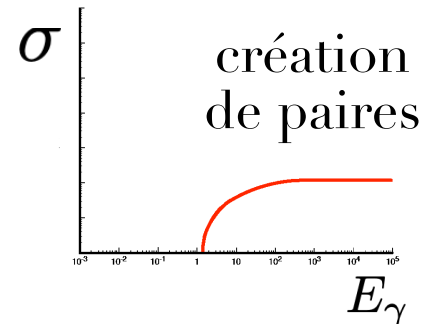
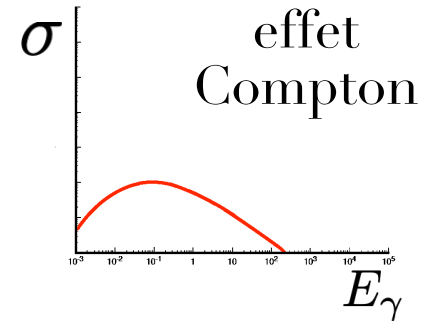
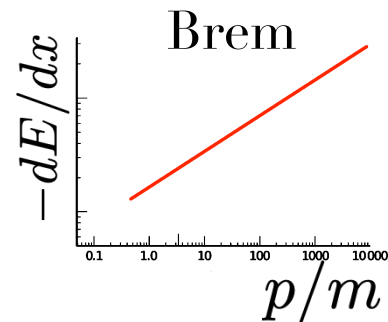
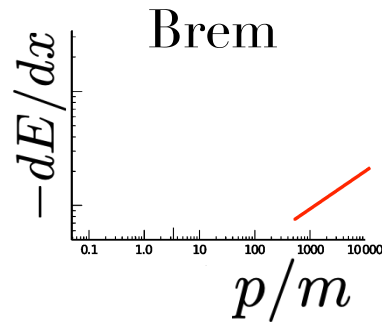
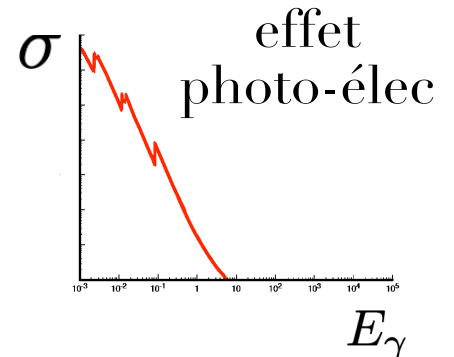
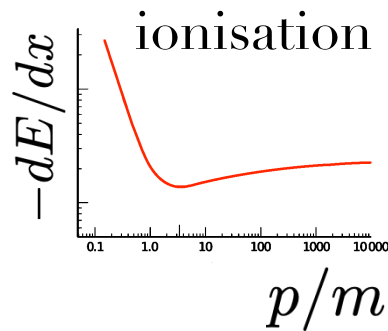
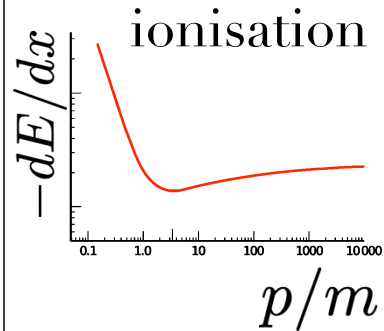
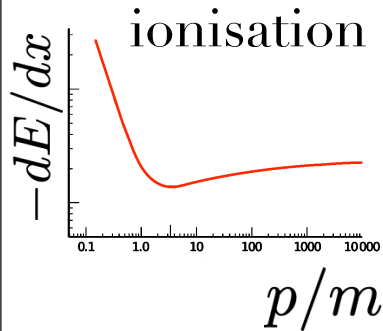
Résumé

h^+ / h^-

μ^+ / μ^-

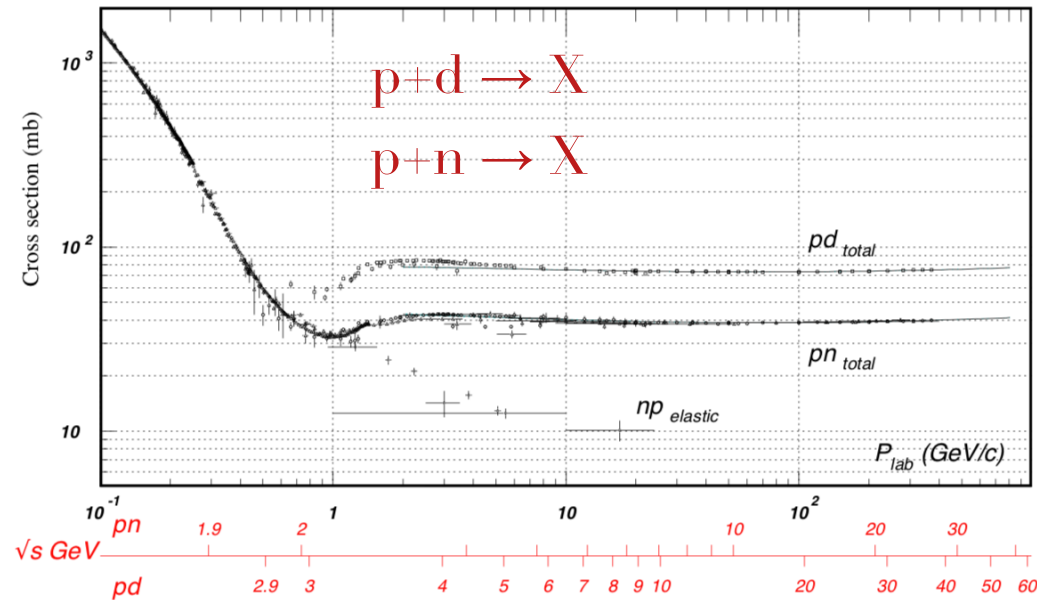
e^+ / e^-

γ



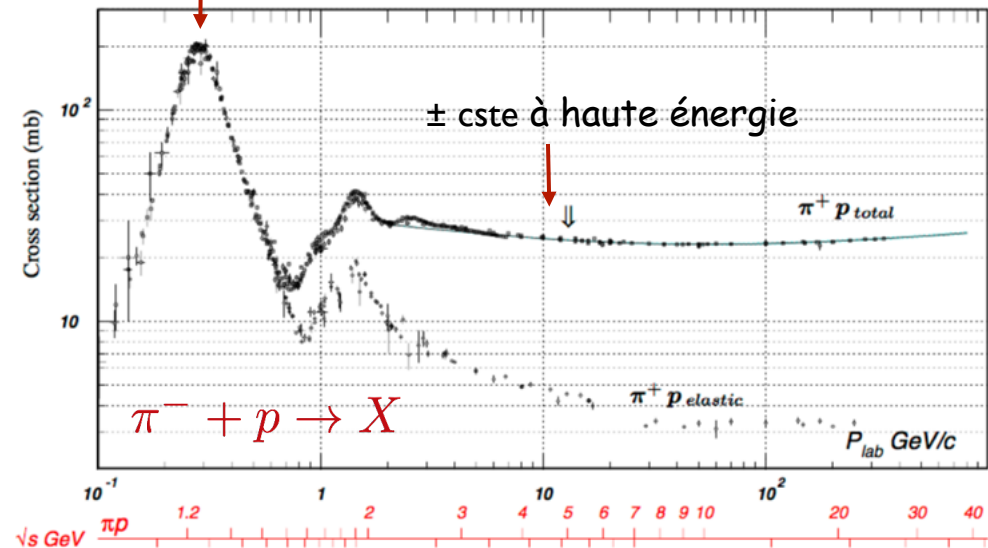
+
interactions
fortes

3. Interactions fortes



- constante à haute E
- sauf si résonance

resonances à basse énergie



$$\sigma_{tot} = \sigma_{\text{élastique}} + \sigma_{\text{inélastique}}$$

Longueur de collision nucléaire

$$dN(x) = -N(x) n \sigma_{tot} dx$$

n = nombre de noyaux
par unité de volume

$$\Rightarrow N(x) = N_0 e^{-xn\sigma_{tot}}$$

longueur de collision nucléaire λ_T définie par :

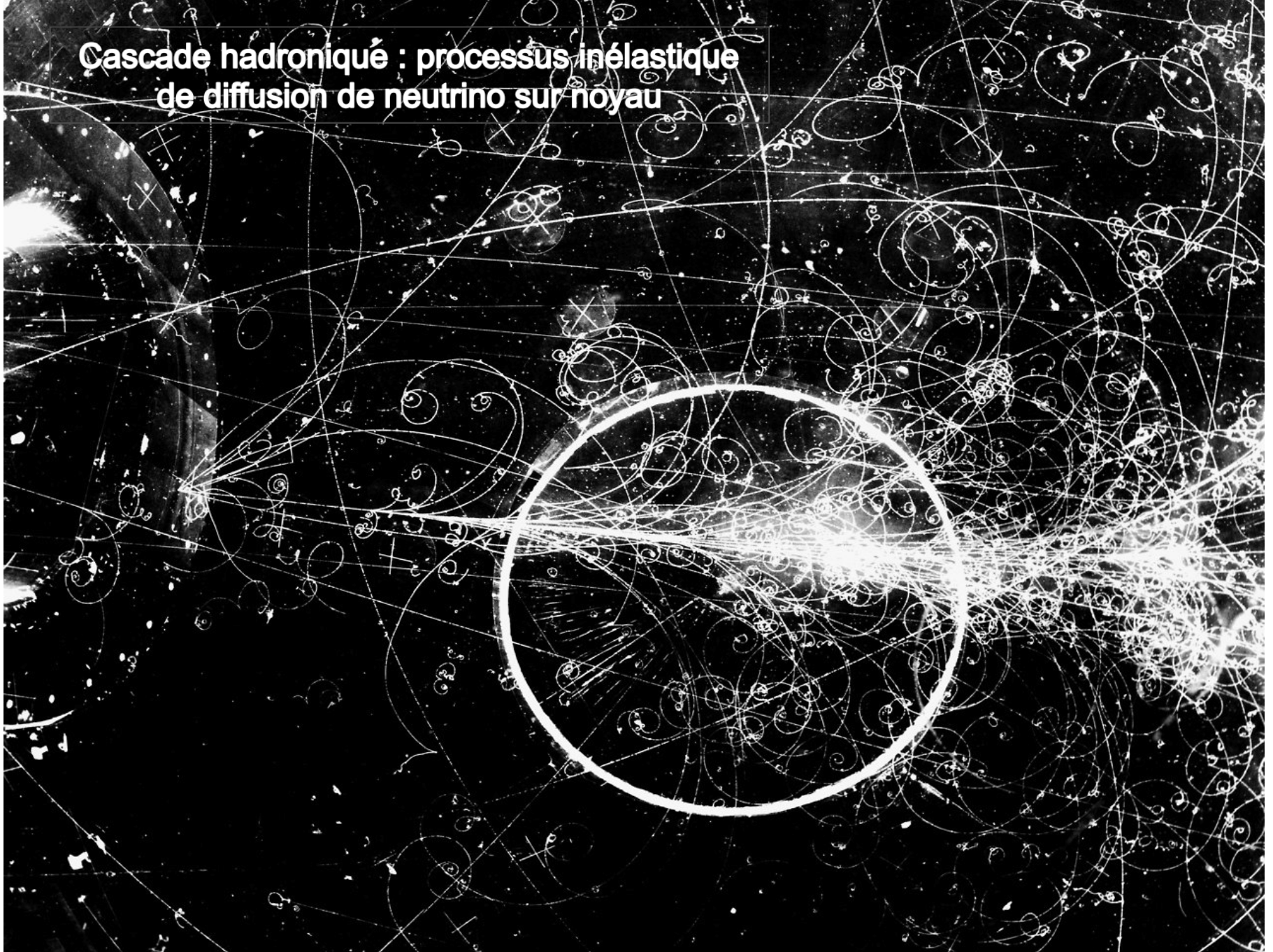
$$\lambda_T = \frac{1}{n \sigma_{tot}} \quad [g/cm^2]$$

longueur d'absorption nucléaire λ_a

$$\lambda_a = \frac{1}{n \sigma_{in\acute{e}lastique}} \quad [g/cm^2]$$



**Cascade hadronique : processus inélastique
de diffusion de neutrino sur noyau**



Material	Z	A	$\langle Z/A \rangle$	Nucl.coll. length λ_T {g cm ⁻² }	Nucl.inter. length λ_I {g cm ⁻² }	Rad.len. X_0 {g cm ⁻² }	$dE/dx _{\min}$ { MeV g ⁻¹ cm ² }	Density {g cm ⁻³ } ({gℓ ⁻¹ })
H ₂	1	1.00794(7)	0.99212	42.8	52.0	63.04	(4.103)	0.071(0.084)
D ₂	1	2.01410177803(8)	0.49650	51.3	71.8	125.97	(2.053)	0.169(0.168)
He	2	4.002602(2)	0.49967	51.8	71.0	94.32	(1.937)	0.125(0.166)
Li	3	6.941(2)	0.43221	52.2	71.3	82.78	1.639	0.534
Be	4	9.012182(3)	0.44384	55.3	77.8	65.19	1.595	1.848
C diamond	6	12.0107(8)	0.49955	59.2	85.8	42.70	1.725	3.520
C graphite	6	12.0107(8)	0.49955	59.2	85.8	42.70	1.742	2.210
N ₂	7	14.0067(2)	0.49976	61.1	89.7	37.99	(1.825)	0.807(1.165)
O ₂	8	15.9994(3)	0.50002	61.3	90.2	34.24	(1.801)	1.141(1.332)
Air (dry, 1 atm)				61.3	90.1	36.62	(1.815)	(1.205)
Shielding concrete				65.1	97.5	26.57	1.711	2.300
Borosilicate glass (Pyrex)				64.6	96.5	28.17	1.696	2.230
Lead glass				95.9	158.0	7.87	1.255	6.220
Standard rock				66.8	101.3	26.54	1.688	2.650

