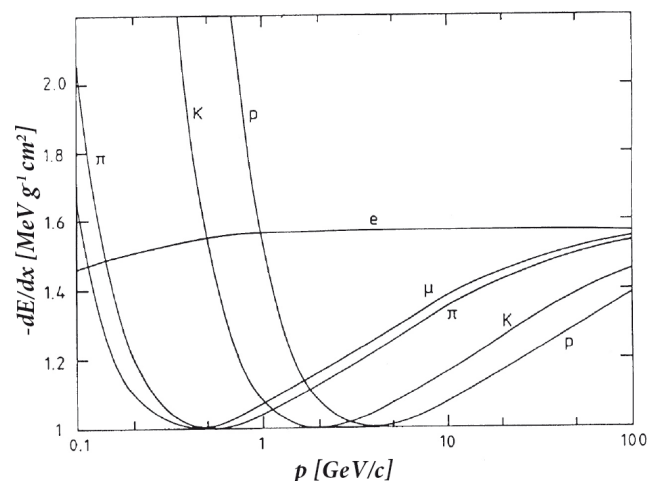
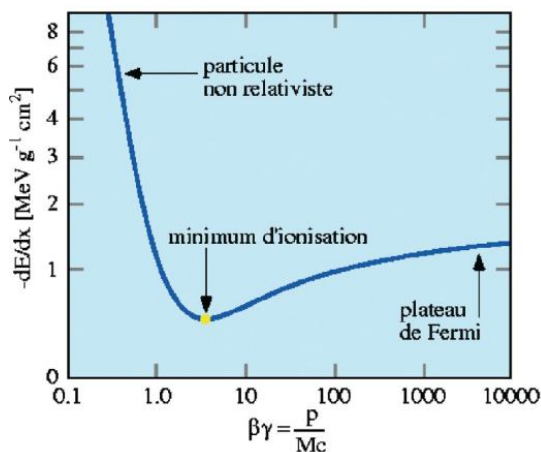


Physique des détecteurs

i. Interaction avec la matière

Chaque particule élémentaire interagit de manière propre avec la matière.

- **Neutrinos** : ceux-ci interagissent très faiblement avec la matière. La probabilité d'interaction par interaction faible est d'environ 1 sur 10 milliards. Leur détection se fait donc soit avec de grand volume de détecteur¹, soit en mesurant l'énergie manquante lors d'une collision par conservation de l'impulsion.
- **Muons** (et ou particules chargées) : ceux-ci interagissent avec la matière essentiellement de manière électromagnétique suivant trois processus :
 - *la diffusion multiple au voisinage des différents noyaux composant la matière.* Cette succession de diffusions conduit à un changement global de direction du muon ayant pour effet de dégrader la précision des mesures de l'impulsion, basée sur la déviation de la direction de la particule par un champ magnétique.
 - *la perte d'énergie par ionisation.* La perte d'énergie par unité de distance est donnée par la formule dite de Bethe Bloch dont l'allure est donnée sur la figure ci-dessous. La première partie décroissante est liée au fait que plus la particule est rapide moins le processus de ionisation a le temps de se produire ; la deuxième partie croissante est liée à des effets relativistes augmentant la probabilité d'interaction. La figure ci-dessous montre que chaque particule a un comportement différent dans un matériau donné ce qui peut permettre leur identification.
 - *rayonnement de freinage à haute énergie.* Celui-ci est lié au passage d'une particule chargée près du champ coulombien d'un atome : l'accélération de celle-ci est alors modifiée, entraînant un rayonnement électromagnétique (production d'un photon) et la perte d'énergie. Il ne concerne que les muons les plus énergétiques ($E > 100$ GeV)



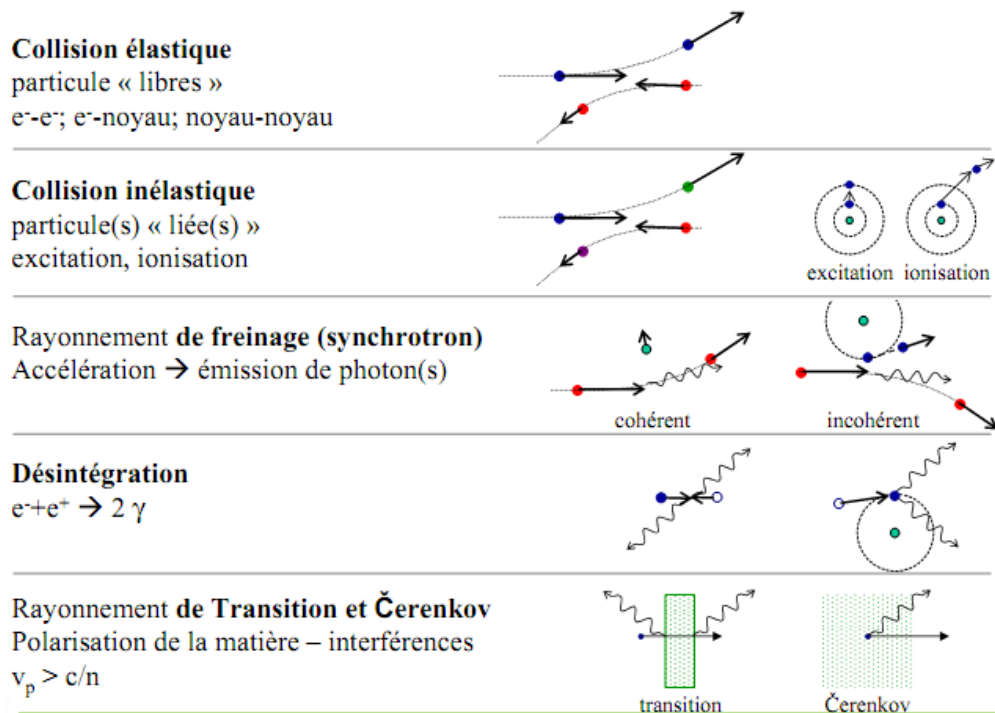
Allure de la perte d'énergie d'une particule chargée traversant la matière. A gauche en fonction de la vitesse de la particule, à droite en fonction de son impulsion. Crédit : revue élémentaire, LAL, IN2P3.

- **Electrons** : l'électron peut être considéré comme un muon léger : ces interactions avec la matière sont identiques à celles du muon. Cependant, en raison de sa masse beaucoup plus faible, celui-ci perd essentiellement son énergie en raison du

¹ Le détecteur japonais SuperKamiokandé est composé de 50 000 tonnes d'eau, permettant la détection journalière d'une trentaine de neutrinos.

rayonnement de freinage. La diffusion multiple a pour conséquence de dévier fortement la direction de l'électron.

Les positrons ont le même type d'interaction avec la matière que les électrons. A cela s'ajoute cependant le phénomène d'annihilation² avec les électrons atomiques : cette annihilation conduit à la production de un ou deux photons.

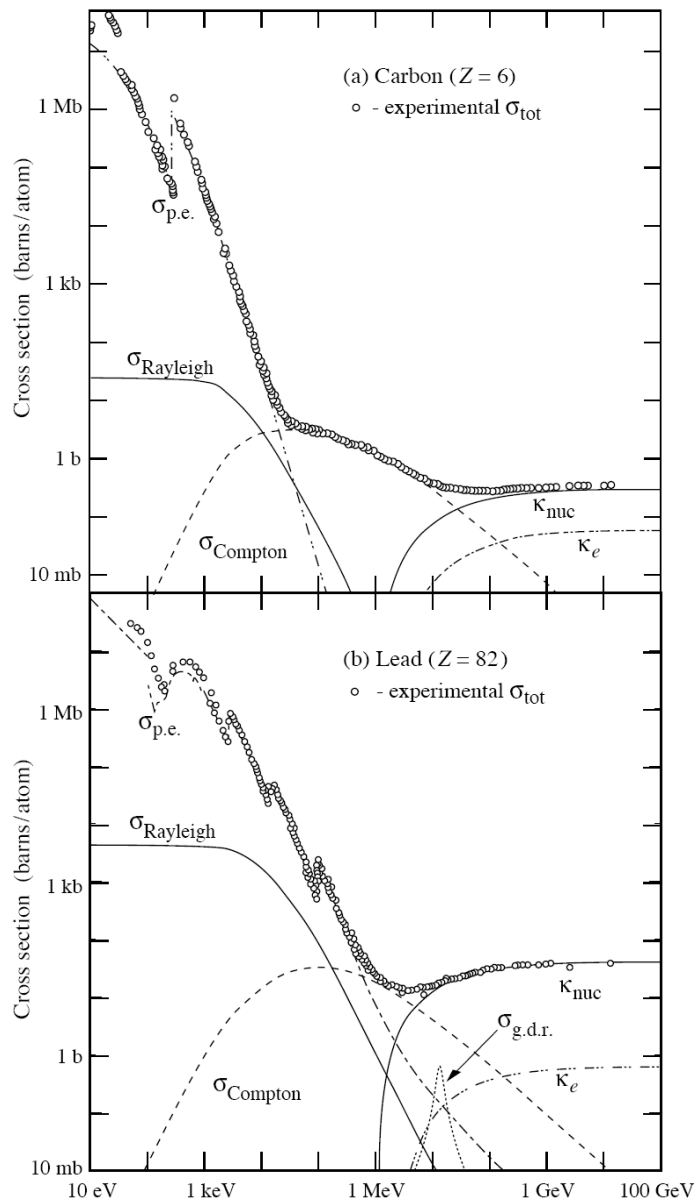


Interactions entre particules chargées. Crédit : N. Pichoff, CEA.

- **Photons** : il y a essentiellement trois mécanismes d'interaction des photons avec la matière dont les proportions varient avec l'énergie du photon (voir la figure ci-dessous).
 - *effet photoélectrique* : dominant à faible énergie ($E \ll 1$ MeV). Le photon est absorbé par l'atome et son énergie est transférée à un électron de celui-ci qui est alors dans un état excité. Si l'énergie est suffisante, l'électron peut être éjecté. La section efficace montre un pic caractéristique des couches électroniques de l'atome.
 - *diffusion Compton*³ : dominant à partir de 1 MeV. Le photon interagit avec un électron lié : après collision, le photon est diffusé avec un certain angle. La diffusion est inélastique : une partie de l'énergie du photon incident est absorbée.
 - *création de paires* : dominant au-delà de quelques MeV. Lorsque l'énergie du photon devient supérieure à $2m_e c^2$, la production d'une paire électron-positron devient possible. Cette production se fait par interaction avec le champ électrique produit soit par le nuage électronique, soit par le noyau.

² $e^+e^- \rightarrow \gamma$.

³ A faible énergie, on appelle la diffusion Compton, diffusion Thomson.



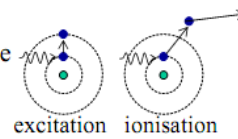
Section efficaces* d'interaction des photons en fonction de l'énergie dans le cas du carbone en haut et du plomb en bas.

- $\sigma_{p.e.}$: effet photoélectrique
- κ_{nucl} : production de paires, par interaction avec le champ électrique nucléaire
- κ_e : production de paires, par interaction avec le champ électrique électronique
- $\sigma_{g.d.r.}$: interaction photon-noyau : lors de ce type d'interaction le noyau est détruit.

Crédit : K. Nakamura et. al.

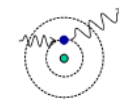
Effet **photo-électrique** : absorption par un atome

Basse énergie < 2-500 keV



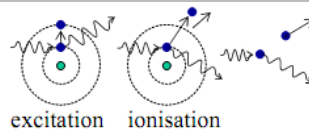
Effet **Rayleigh** : diffusion élastique sur électron lié

Basse énergie, toujours minoritaire



Effet **Compton** : diffusion sur électron

Energie moyenne 2-500 keV << 5-100 MeV



Production de **paire** : annihilation

Haute énergie > 5-100 MeV



Interactions photon-matière. Crédit : N. Pichoff, CEA.

- **Hadrons** : les hadrons créés lors des interactions se désintègrent généralement très rapidement en hadrons stables : pions et nucléons. Les interactions de ces derniers avec la matière sont identiques à celles pour les muons. L'énergie linéique perdue par ionisation est d'autant plus importante que la particule est lourde (voir figure de la partie des muons). La longueur d'interaction beaucoup plus faible des hadrons permet de les distinguer des muons. Les hadrons peuvent également interagir par interaction forte.
- **Effet Cerenkov** : cet effet se produit lors du passage d'une particule dans un milieu diélectrique à une vitesse plus élevée que la vitesse de la lumière. De manière analogue au bang supersonique créé lors du dépassement de la vitesse du son par un avion, la particule crée ici un flash lumineux. Cette émission de lumière est due à la polarisation du milieu diélectrique induite par le passage de la particule chargée. Lors de la relaxation du milieu, celui-ci émet alors une onde électromagnétique. A faible vitesse, les ondes électromagnétiques sont émises à différents points de la trajectoire et interfèrent destructivement. Si la vitesse des particules dépasse la vitesse de la lumière, les ondes interfèrent constructivement suivant un front d'ondes qui fait un angle θ caractéristique par rapport à la trajectoire. Cet effet est responsable de la lumière bleue observée dans les piscines de refroidissement des réacteurs nucléaires. Cet effet est aussi à la base de la détection du passage de particules chargées dans les expériences HESS et AUGER.

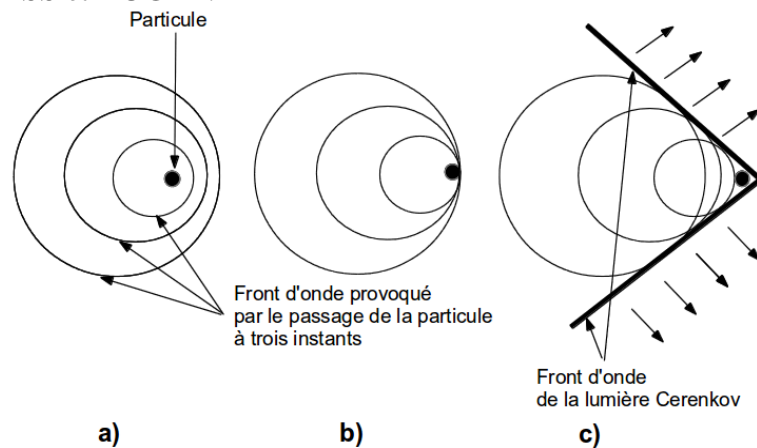
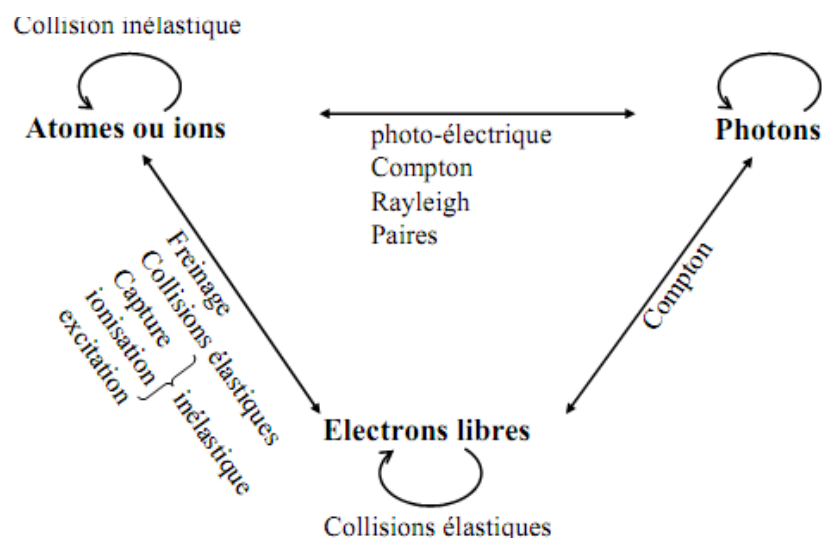


Illustration de l'effet Cerenkov :

- La vitesse de la particule est inférieure à la vitesse de la lumière dans le milieu
- La vitesse de la particule est égale à la vitesse de la lumière dans le milieu
- La vitesse de la particule est supérieure à la vitesse de la lumière dans le milieu

Crédit : Sciences à l'Ecole



Résumé des interactions photon/particule chargée-matière. Crédit : N. Pichoff,

ii. Application aux détecteurs

Un détecteur de particules est un appareil qui permet de détecter le passage d'une particule et, généralement, d'en déduire différentes caractéristiques (en fonction du type de détecteur) telles que sa masse, son énergie, son impulsion, ou encore sa charge électrique.

- **Détecteurs à ionisation** : lors du passage dans le milieu actif (solide, liquide ou gazeux) du détecteur, la particule ionise ce milieu. Le détecteur est muni de deux électrodes : les électrons créés lors de l'ionisation migrent alors vers la cathode et les cations vers l'anode. On peut alors mesurer la variation de tension créée au niveau des électrodes ou encore le courant créé par le déplacement des ions et/ou des électrons créés dans le milieu actif. En fonction de la différence de potentiel V entre les deux électrodes, plusieurs régimes d'utilisation sont possibles :
 - *région de recombinaison* : V est faible. Les électrons et les ions créés par ionisation sont peu accélérés et se recombinent par agitation thermique. Seule une petite fraction des charges d'ionisation est détectée. Le taux de recombinaison diminue quand on augmente V .
 - *région d'ionisation* : au dessus d'une certaine valeur de V (quelques centaines de volts), la recombinaison devient négligeable et pratiquement l'ensemble des charges d'ionisation dérivent vers les électrodes et sont donc détectés. Le courant d'ionisation atteint sa valeur de saturation : si on augmente V sur une certaine plage, le courant mesuré reste constant. Le signal est proportionnel à l'ionisation déposée et **permet une mesure de l'énergie des particules**. L'inconvénient de ce régime est la faible intensité des signaux qui requiert une électronique à bas bruit.
 - *région proportionnelle* : pour un champ électrique suffisamment fort, les électrons sont suffisamment énergétiques pour créer des ionisations secondaires et permettent une amplification du signal. Cette région est appelée proportionnelle car l'amplitude mesurée est proportionnelle au nombre de paires d'ions produites par la particule. Ce type de régime est utilisé essentiellement **pour mesurer les positions des particules**. La mesure d'énergie est rendue impossible par les fluctuations possibles lors du processus d'amplification (celui-ci dépendant également de nombreux paramètres : température, tension). L'avantage des chambres proportionnelles est de ne pas exiger d'électronique à bas bruit.
 - *région Geiger* : pour un champ électrique encore plus élevé, le nombre d'électrons et d'ions créés par avalanche devient indépendant du nombre d'ions primaires. Quelle que soit la particule incidente, un fort signal est créé dans le milieu lié à une ionisation quasi-totale de l'enceinte. Cela permet de **compter le nombre de particules traversant le détecteur et est utilisé dans les détecteurs Geiger-Müller**. L'inconvénient est que ce type de détecteur ne peut détecter un flux élevé de particules en raison du temps mort existant entre le passage de deux particules lié au temps de dérive des ions.
- **Détecteur à semi-conducteurs** : ils fonctionnent sur le même principe que les chambres à ionisation : les porteurs de charges positifs et négatifs sont libérés lors du passage d'une particule. Ces porteurs traversent un champ électrique entre les électrodes et créent une impulsion de tension. La hauteur de celle-ci est proportionnelle au nombre de porteurs de charge libérés et ainsi à l'énergie.
- **Détecteurs à scintillations** : ils sont composés d'un scintillateur (substance radio-luminescente : qui produit des photons le long du passage d'une particule chargée) et d'un photomultiplicateur permettant de créer des impulsions électriques à partir de faibles éclairs de lumière du scintillateur. Dans la plupart des cas, les scintillateurs utilisés sont tels que l'intensité mesurée par le photomultiplicateur est proportionnelle à l'énergie de la particule : il peut donc servir de **spectromètre** et non pas uniquement de **compteurs**. Il existe deux types de scintillateur :

-
- *inorganiques* : la production de photons est liée à la structure en bandes d'énergies des matériaux cristallins.
 - *organiques* : même dans un état cristallin, le phénomène de création de photon est lié au spectre des molécules organiques constituant le scintillateur. Ceux-ci ont un temps de réponse plus court que les scintillateurs inorganiques.

Les scintillateurs liquides sont des solutions organiques dont le solvant n'absorbe pas le rayonnement. Les scintillateurs plastiques sont également des solutions dont le solvant est une substance solide polymérisée. Ce type de détecteur est utilisé pour le cosmodétecteur pour sa rapidité (il ne permet pas cependant d'accéder à l'énergie des muons)

- **Détecteur Cerenkov** : ils utilisent le rayonnement Cerenkov produit par les particules rapides et se composent principalement d'un milieu traversé par les particules (ex : eau) dans lequel est produite la lumière, d'un système optique qui intercepte la lumière et de photomultiplicateurs qui transforme le signal lumineux en signal électrique. Par rapport aux détecteurs à scintillations les détecteurs Cerenkov peuvent être composés de n'importe quel matériel transparent ce qui les rend bon marché. Ils sont utilisés comme **compteurs de particules**, comme compteurs de particules ayant une vitesse supérieure à un seuil ou comme compteurs de particules dont la vitesse est comprise dans un intervalle donné.

Bibliographie :

- *Atlas de la physique atomique et nucléaire, Encyclopédies d'aujourd'hui*
- *Introduction à la physique des particules, R. Zitoun, édition Dunod*
- *Précis de physique nucléaire, D. Blanc, édition Dunod*
- www.ondes-et-matiere.fr/Joomla/pdf/presentation_pichoff.pdf