

UJF-DLST - GRENOBLE

UE: PHY11a

RADIOACTIVITE

A.M. CHARVET

Université Joseph Fourier- UFR de Physique - INSERM U836, Equipe 6

Qu'est ce que la radioactivité?

- Les atomes sont formés d'un **noyau (neutrons + protons)** et du nuage électronique périphérique
- Les noyaux (assemblages de neutrons -sans charge- et de protons -charges positives) **ne sont pas tous stables du point de vue énergétique**
 - Pour atteindre un **état stable** les noyaux émettent divers types de particules subatomiques (massiques ou sans masse)
 - Ce phénomène **naturel** est la **radioactivité**
 - Encore appelé **désintégration radioactive**
 - Découvert par **Henri BECQUEREL** en 1896



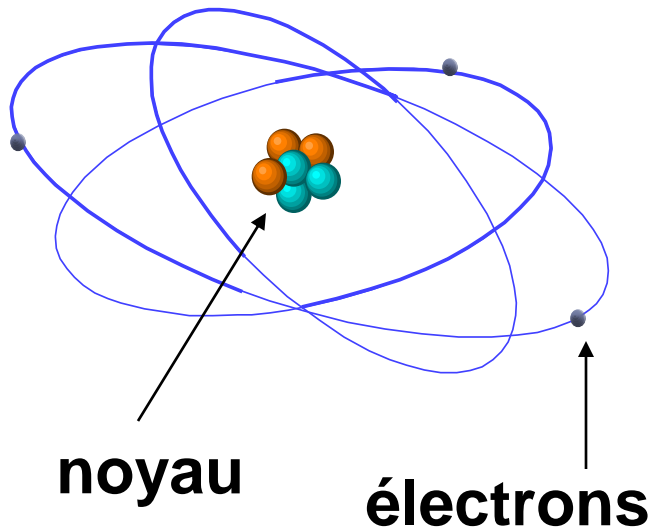
Pourquoi étudier la radioactivité en biologie?

- Les noyaux radioactifs nous entourent, même si les concentrations naturelles sont peu élevées
- Les produits de désintégration radioactive ne sont pas neutres biologiquement
 - Les effets biologiques des rayonnements de désintégration sont le sujet de la RADIOBIOLOGIE
 - Certains nucléides permettent la datation
 - Certains éléments radioactifs sont des marqueurs intéressants des processus biologiques in-vivo
- Médecine nucléaire: utilisation de radiopharmaceutiques pour l'imagerie médicale et la radiothérapie des tumeurs

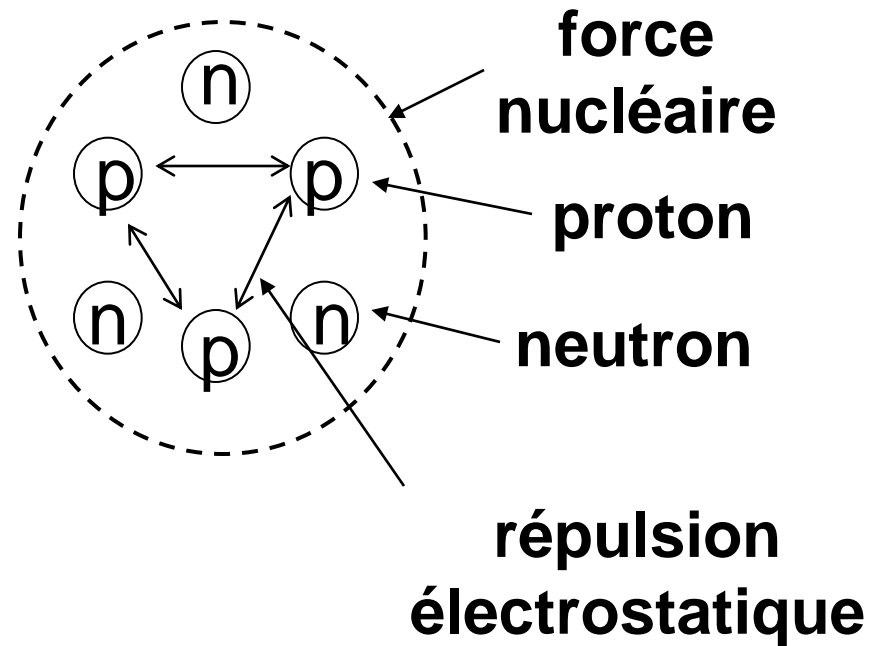
Le Noyau

Le Noyau est composé de protons ($q=+e$) et de neutrons ($q=0$)

Atome de
Beryllium
[${}^6\text{Be}$]



Forces agissant sur
le noyau de ${}^6\text{Be}$



► Les Forces déterminent la stabilité ou l'instabilité du noyau

La radioactivité dans la nature

- ▶ Selon les théories de formation de l'Univers, les éléments (noyaux, atomes) ont été formés:
 - ▶ - éléments légers (hydrogène, hélium) : phase de nucléosynthèse premiers instants de l'univers
 - ▶ - éléments jusqu'au FER: dans les étoiles
 - ▶ - éléments de $Z > Z_{\text{FER}}$: lors de l'explosion des étoiles en fin de vie
 - ▶ Dans les étoiles sont créés des noyaux énergétiquement instables



Ordres de grandeur

▶ Echelle de distance:

- ▶ Taille de l'atome: environ 1 angstrom = 10^{-10} m
- ▶ Taille du noyau: de l'ordre de 10^{-15} m (1 fermi - femtomètre: fm)

▶ Echelle de masse volumique:

- ▶ Masse d'un cm^3 de fer: 7,874 g
- ▶ Masse d'un cm^3 de noyaux de fer: $2,125 \times 10^{14}$ g
 - ▶ Similaire à la densité des étoiles à neutrons

▶ Echelle d'énergie



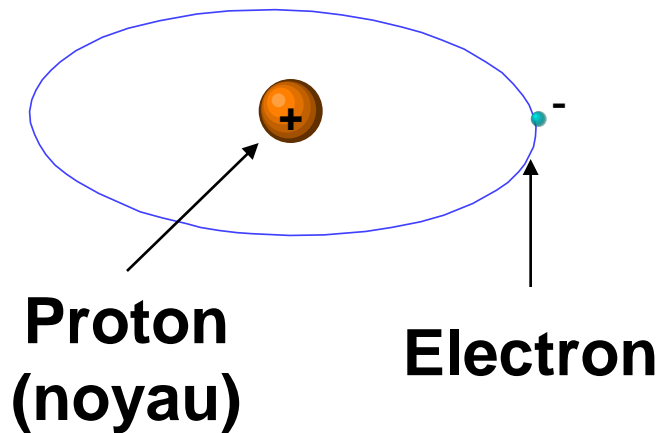
Papier millimétré

- ▶ <http://jeux-et-mathematiques.davalan.org/divers/a4/index.html>.



Modèles de l'atome

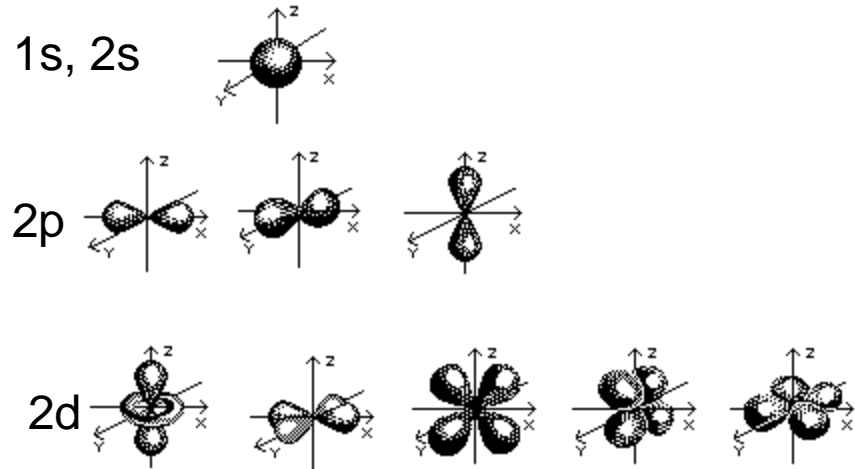
Modèle de Bohr
(planétaire –
électron dit
localisé)



L'électron tourne
autour du noyau $\sim 10^{15}$
fois par seconde

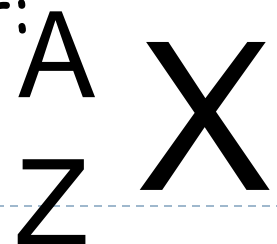
Modèle Quantique des
orbites électroniques

Electron délocalisé



Définitions (1)

- ▶ Z : numéro atomique - c'est le nombre de protons dans le noyau de l'atome
- ▶ Nucléons = proton ou neutron
- ▶ A : nombre de masse - c'est le nombre de nucléons dans un noyau atomique
- ▶ N : nombre de neutrons dans un noyau atomique $N = A - Z$
- ▶ Représentation symbolique d'un élément:
Avec X : symbol de l'élément chimique



La Table Périodique

$\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} X$

Les propriétés physico-chimiques ne dépendent que du *nombre d'électrons* de l'atome

X: nom de l'élément chimique

“Elément”: référence aux entités élémentaires de la chimie (table périodique – outil de la chimie)

Nucléides: noyaux élémentaires

En physico-chimie: systèmes quasi-stables avec une quasi-neutralité (ions faiblement ionisés)



PERIODIC TABLE

Atomic Properties of the Elements

U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE
 Technology Administration
 National Institute of Standards and Technology

Frequently used fundamental physical constants

For the most accurate values of these and other constants, visit physics.nist.gov/constants

1 second = 9 192 631 770 periods of radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of ^{133}Cs

speed of light in vacuum	c	299 792 458	m s^{-1}	(exact)
Planck constant	h	6.626×10^{-34}	J s	$(h = h/2\pi)$
elementary charge	e	1.6022×10^{-19}	C	
electron mass	m_e	9.1094×10^{-31}	kg	
	$m_e c^2$	0.5110	MeV	
proton mass	m_p	1.6726×10^{-27}	kg	
fine-structure constant	α	1/137.036		
Rydberg constant	R_∞	10 973 732	m^{-1}	
	$R_\infty c$	$3.289 84 \times 10^{15}$	Hz	
	$R_\infty h c$	13.6057	eV	
Boltzmann constant	k	1.3807×10^{-23}	J K^{-1}	

Period	Group IA		Group IIA		Groups IIIA-VIIIA										Group IB		Group IIB		Group VIII					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18						
1	H Hydrogen 1.00794 $1s$ 13.5984																		He Helium 4.00260 $1s^2$ 24.5984					
2	Li Lithium 6.941 $1s^2 2s$ 5.3917	Be Beryllium 9.01218 $1s^2 2s^2$ 9.3227																	B Boron 10.811 $1s^2 2s^2 2p$ 8.2980	C Carbon 12.0107 $1s^2 2s^2 2p^2$ 11.2603	N Nitrogen 14.00644 $1s^2 2s^2 2p^3$ 14.5341	O Oxygen 15.9994 $1s^2 2s^2 2p^4$ 13.6181	F Fluorine 18.99840 $1s^2 2s^2 2p^5$ 17.4228	Ne Neon 20.1797 $1s^2 2s^2 2p^6$ 21.5646
3	Na Sodium 22.98977 $[\text{Ne}]3s$ 5.1391	Mg Magnesium 24.3050 $[\text{Ne}]3s^2$ 7.9462																	Al Aluminum 26.98154 $[\text{Ne}]3s^2 3p$ 5.9858	Si Silicon 28.0855 $[\text{Ne}]3s^2 3p^2$ 8.1517	P Phosphorus 30.97376 $[\text{Ne}]3s^2 3p^3$ 10.4887	S Sulfur 32.066 $[\text{Ne}]3s^2 3p^4$ 10.3600	Cl Chlorine 35.4527 $[\text{Ne}]3s^2 3p^5$ 12.9676	Ar Argon 39.948 $[\text{Ne}]3s^2 3p^6$ 15.7596
4	K Potassium 39.0983 $[\text{Ar}]4s$ 4.3407	Ca Calcium 40.078 $[\text{Ar}]4s^2$ 6.1132	Sc Scandium 44.95591 $[\text{Ar}]3d^1 4s^2$ 6.5815	Ti Titanium 47.887 $[\text{Ar}]3d^2 4s^2$ 6.8281	V Vanadium 50.9415 $[\text{Ar}]3d^3 4s^2$ 6.7462	Cr Chromium 51.9961 $[\text{Ar}]3d^5 4s$ 6.7685	Mn Manganese 54.9385 $[\text{Ar}]3d^5 4s^2$ 7.4340	Fe Iron 55.845 $[\text{Ar}]3d^6 4s^2$ 7.9024	Co Cobalt 58.9332 $[\text{Ar}]3d^7 4s^2$ 7.8810	Ni Nickel 58.6934 $[\text{Ar}]3d^8 4s^2$ 7.6398	Cu Copper 63.546 $[\text{Ar}]3d^9 4s$ 7.7264	Zn Zinc 65.39 $[\text{Ar}]3d^10 4s^2$ 7.9342	Ga Gallium 69.723 $[\text{Ar}]3d^10 4s^2 4p$ 5.9933	Ge Germanium 72.61 $[\text{Ar}]3d^10 4s^2 4p^2$ 7.8994	As Arsenic 74.92160 $[\text{Ar}]3d^10 4s^2 4p^3$ 8.9886	Se Selenium 78.96 $[\text{Ar}]3d^10 4s^2 4p^4$ 9.7524	Br Bromine 79.904 $[\text{Ar}]3d^10 4s^2 4p^5$ 11.8198	Kr Krypton 83.904 $[\text{Ar}]3d^10 4s^2 4p^6$ 13.9966						
5	Rb Rubidium 85.4678 $[\text{Kr}]5s$ 4.1771	Sr Strontium 87.62 $[\text{Kr}]5s^2$ 5.6949	Y Yttrium 88.90585 $[\text{Kr}]4d^1 5s^2$ 6.2171	Zr Zirconium 91.224 $[\text{Kr}]4d^2 5s^2$ 6.6339	Nb Niobium 92.90638 $[\text{Kr}]4d^4 5s$ 6.7589	Mo Molybdenum 95.94 $[\text{Kr}]4d^5 5s$ 7.0924	Tc Technetium (98) $[\text{Kr}]4d^5 5s^2$ 7.28	Ru Ruthenium 101.07 $[\text{Kr}]4d^7 5s$ 7.3605	Rh Rhodium 102.90550 $[\text{Kr}]4d^8 5s$ 7.4589	Pd Palladium 106.42 $[\text{Kr}]4d^10$ 8.3369	Ag Silver 107.8682 $[\text{Kr}]4d^10 5s$ 7.5762	Cd Cadmium 112.411 $[\text{Kr}]4d^10 5s^2$ 8.9938	In Indium 114.818 $[\text{Kr}]4d^10 5s^2 5p$ 5.7864	Sn Tin 118.710 $[\text{Kr}]4d^10 5s^2 5p^2$ 7.3439	Sb Antimony 121.760 $[\text{Kr}]4d^10 5s^2 5p^3$ 8.6084	Te Tellurium 127.60 $[\text{Kr}]4d^10 5s^2 5p^4$ 9.0096	I Iodine 126.90447 $[\text{Kr}]4d^10 5s^2 5p^5$ 10.4813	Xe Xenon 131.29 $[\text{Kr}]4d^10 5s^2 5p^6$ 12.1298						
6	Cs Cesium 132.90545 $[\text{Xe}]6s$ 3.8939	Ba Barium 137.327 $[\text{Xe}]6s^2$ 5.2117		Hf Hafnium 178.49 $[\text{Xe}]4f^14 5d^2 6s^2$ 6.8251	Ta Tantalum 180.9479 $[\text{Xe}]4f^14 5d^3 6s^2$ 7.5496	W Tungsten 183.84 $[\text{Xe}]4f^14 5d^4 6s^2$ 7.9640	Re Rhenium 186.207 $[\text{Xe}]4f^14 5d^5 6s^2$ 7.8336	Os Osmium 190.23 $[\text{Xe}]4f^14 5d^6 6s^2$ 8.4382	Ir Iridium 192.2217 $[\text{Xe}]4f^14 5d^7 6s^2$ 8.9670	Pt Platinum 195.078 $[\text{Xe}]4f^14 5d^9 6s$ 8.9887	Au Gold 196.96655 $[\text{Xe}]4f^14 5d^10 6s$ 9.2255	Hg Mercury 200.59 $[\text{Xe}]4f^14 5d^10 6s^2$ 10.4375	Tl Thallium 204.3833 $[\text{Hg}]6p$ 6.1082	Pb Lead 207.2 $[\text{Hg}]6p^2$ 7.4167	Bi Bismuth 208.98038 $[\text{Hg}]6p^3$ 7.2856	Po Polonium (209) $[\text{Hg}]6p^4$ 8.4177	At Astatine (210) $[\text{Hg}]6p^5$	Rn Radon (222) $[\text{Hg}]6p^6$ 10.7485						
7	Fr Francium (223) $[\text{Rn}]7s$ 4.0727	Ra Radium (226) $[\text{Rn}]7s^2$ 5.2784		Rf Rutherfordium (261) $[\text{Rn}]5f^14 6d^2 7s^2$ 6.0?	Db Dubnium (262)	Sg Seaborgium (263)	Bh Bohrium (264)	Hs Hassium (265)	Mt Meitnerium (268)	Uun Ununium (269)	Uuu Ununium (272)	Uub Unubium												

Atomic Number: 58
Ground-state Level: G_4^0
Symbol: Ce
Name: Cerium
Atomic Weight: 140.116
Ground-state Configuration: $[\text{Xe}]4f^1 5d^1 6s^2$
Ionization Energy (eV): 5.5387

- Solids
- Liquids
- Gases
- Artificially Prepared

For a description of the atomic data, visit physics.nist.gov/atomic

[†]Based upon ^{12}C . () indicates the mass number of the most stable isotope. For a description and the most accurate values and uncertainties, see J. Phys. Chem. Ref. Data, 26 (5), 1239 (1997).

Définitions (2)

- ▶ **Nucléide:** Un atome caractérisé par la constitution de son noyau (en particulier N et Z)
- ▶ **Radionucléide:** Nucléide dont le noyau est instable et se désintègre avec un temps de vie mesurable
- ▶ **Isotope:** Même Z *même élément chimique*
- ▶ **Isobare :** Même A
- ▶ **Isotone:** Même N



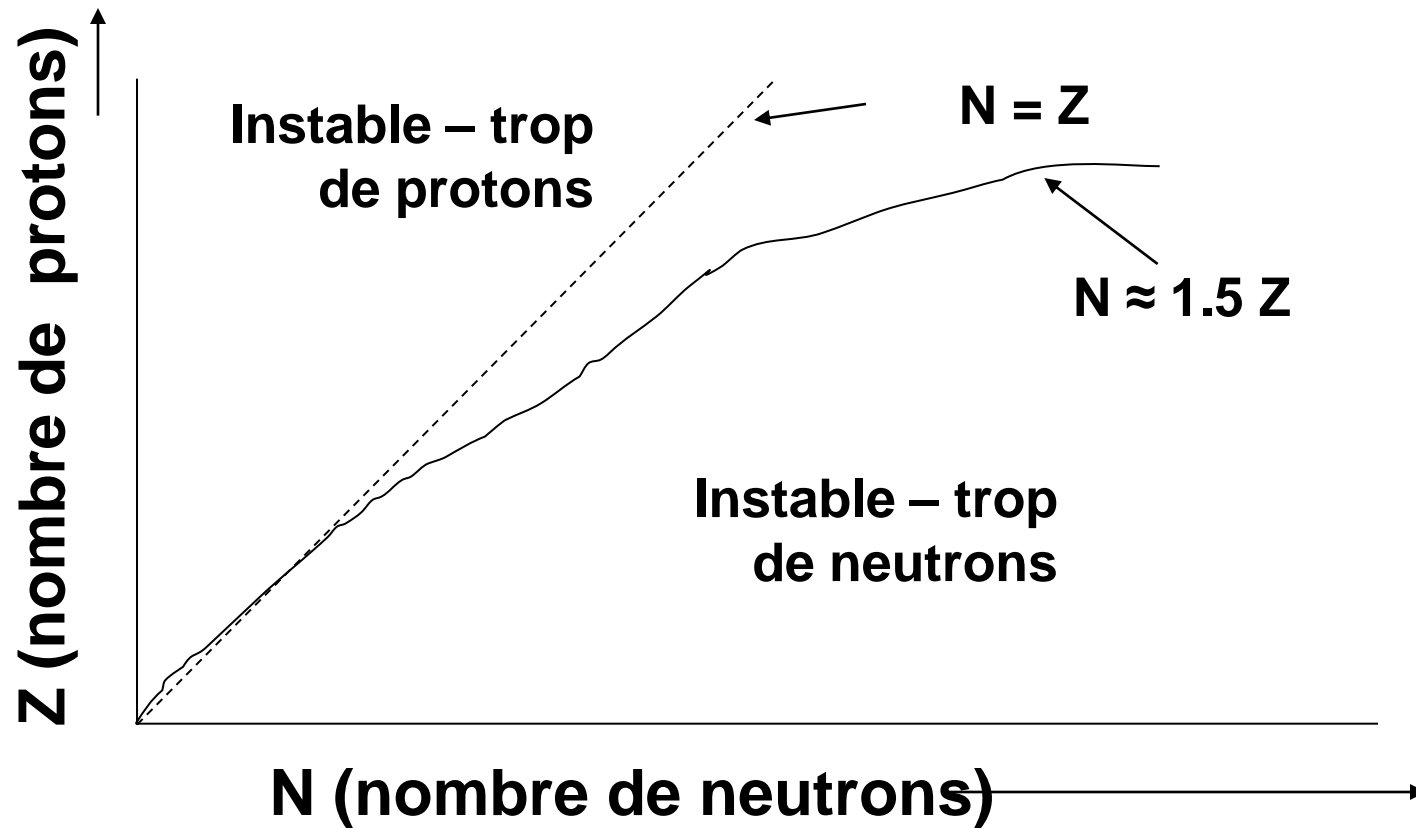
Stabilité et Instabilité des noyaux

- ▶ L'instabilité de la vaste majorité des noyaux présents dans l'univers est un phénomène naturel:
 - ▶ Elle découle des lois de la Physique qui limitent les structures stables à celles présentant un minimum d'énergie
- ▶ L'intégralité des éléments présents sur Terre ont été formés:
 - ▶ Dans la phase de nucléosynthèse aux premiers instants de l'univers pour les éléments légers (hydrogène et hélium)
 - ▶ Dans les étoiles, pour les éléments jusqu'au fer
 - ▶ Lors de l'explosion des étoiles en fin de vie, pour les éléments au-delà du fer

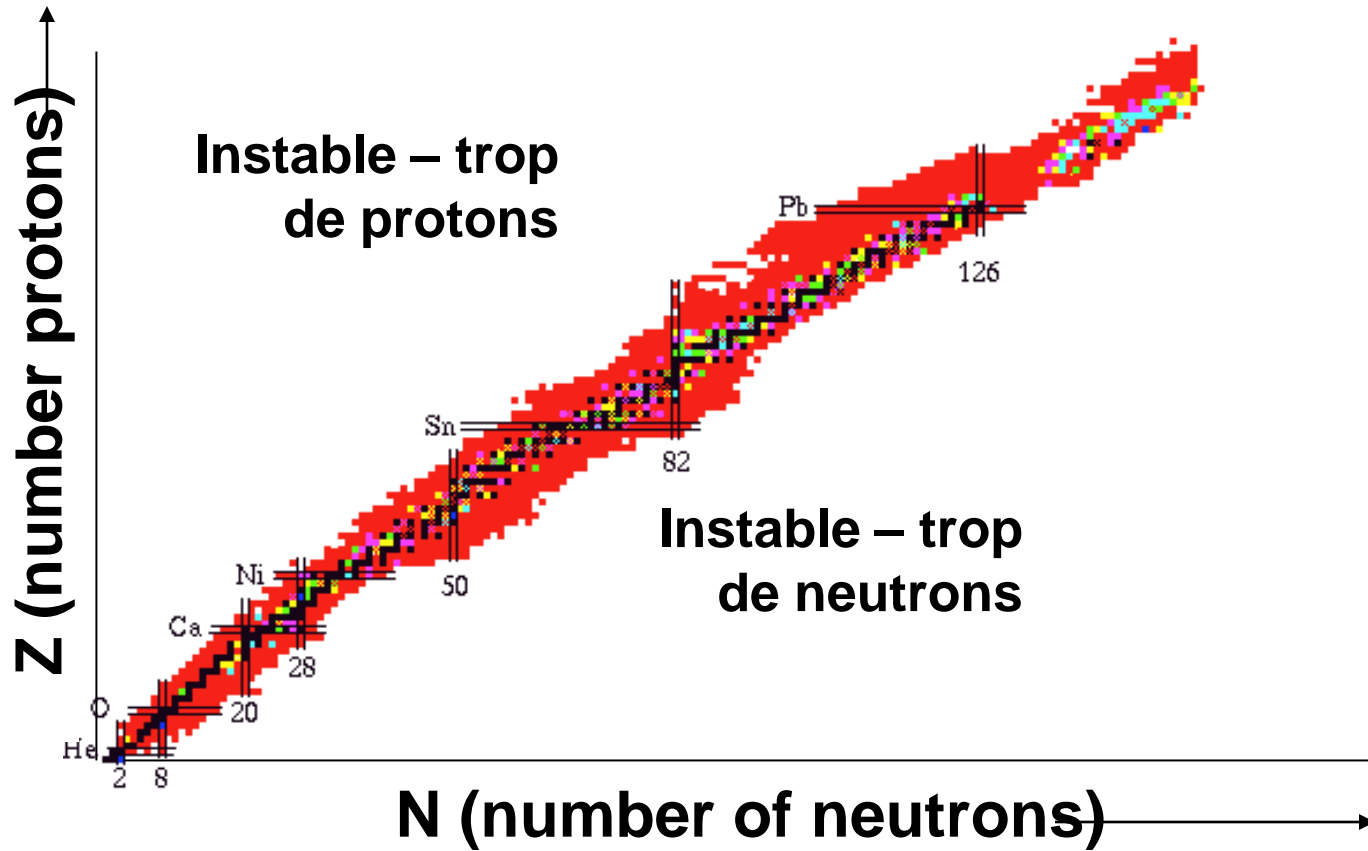


La courbe de stabilité nucléaire

Pour assurer la stabilité d'un noyau il faut **plus de neutrons** que de protons



La vallée de stabilité des Nucléides

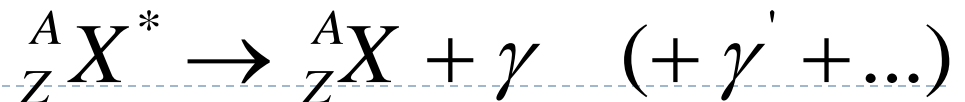
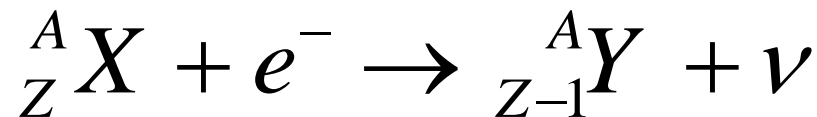
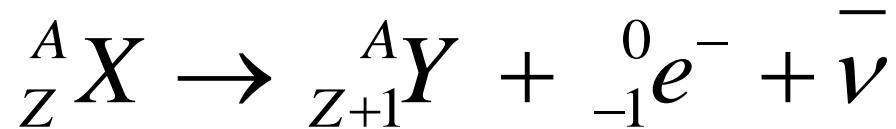
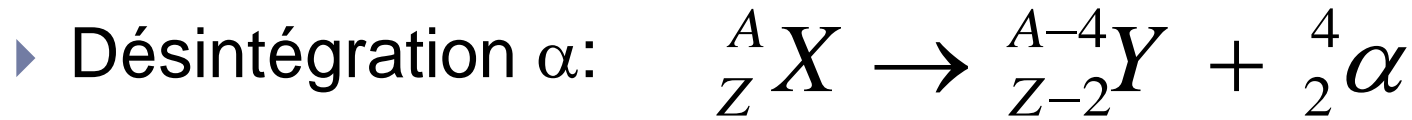


[Brookhaven National Laboratories - <http://www2.bnl.gov/CoN/>]

Désintégration Radioactive

- ▶ Les produits de désintégration peuvent être:
 - ▶ Une particule ALPHA α (noyau d'hélium)
 - ▶ Une particule BETA β (électron ou positron)
 - ▶ Un photon – appelé GAMMA - γ
 - ▶ Des noyaux (noyaux filles)
 - ▶ Neutrinos et anti-neutrinos (émission BETA)
- ▶ Lois de conservation: Lors d'une désintégration, il y a *conservation du nombre de masse total et du nombre de charge total*

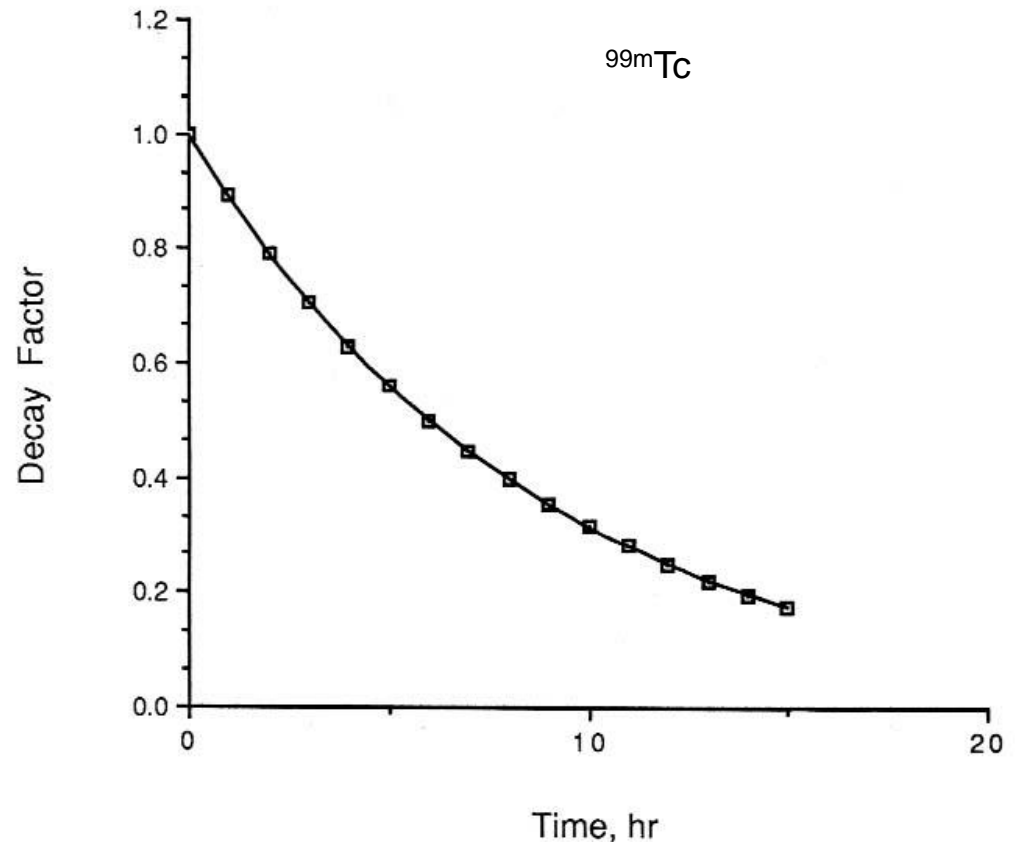




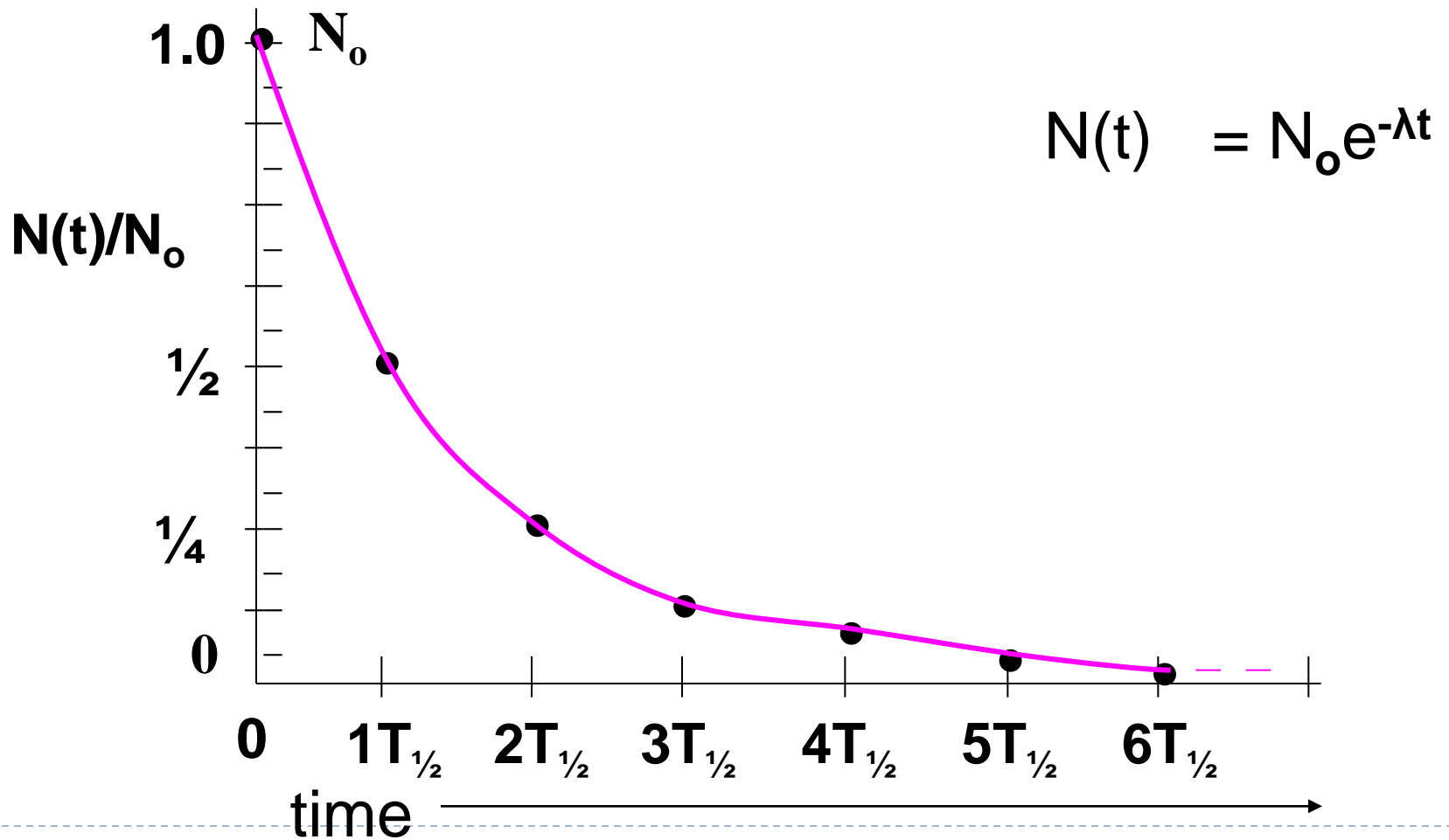
Loi de désintégration radioactive

- ▶ Au temps t il reste un nombre de noyaux radioactifs $N(t)$:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$



Loi de désintégration radioactive



Unités caractérisant la radioactivité

Unités d'Activité – Nombre de désintégration par seconde

curie (Ci): 3.7×10^{10} désintégration/seconde

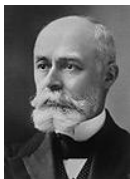
- 1 Ci = activité d' 1 g radium
- adulte a une activité de ~ 0.1 microcurie (μCi) ^{14}C



1867-
1934



1859-
1906



1852-1908

becquerel (Bq): 1 désintégration/seconde

- 1 Bq = [SI unit]
- adulte a $\sim 3,700$ Bq ^{14}C

L'activité

- ▶ Au temps t il reste un nombre de noyaux radioactifs $N(t)$:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

– **Activité:**

Nombre de désintégration par seconde

$$a(t) = -\frac{dN}{dt}$$

$$a(t) = N_0 \lambda e^{-\lambda t}$$

- ▶ Unité d'activité:

$$a(t) = \lambda N(t)$$

- ▶ Le Becquerel (Bq)
1 désintégration/seconde

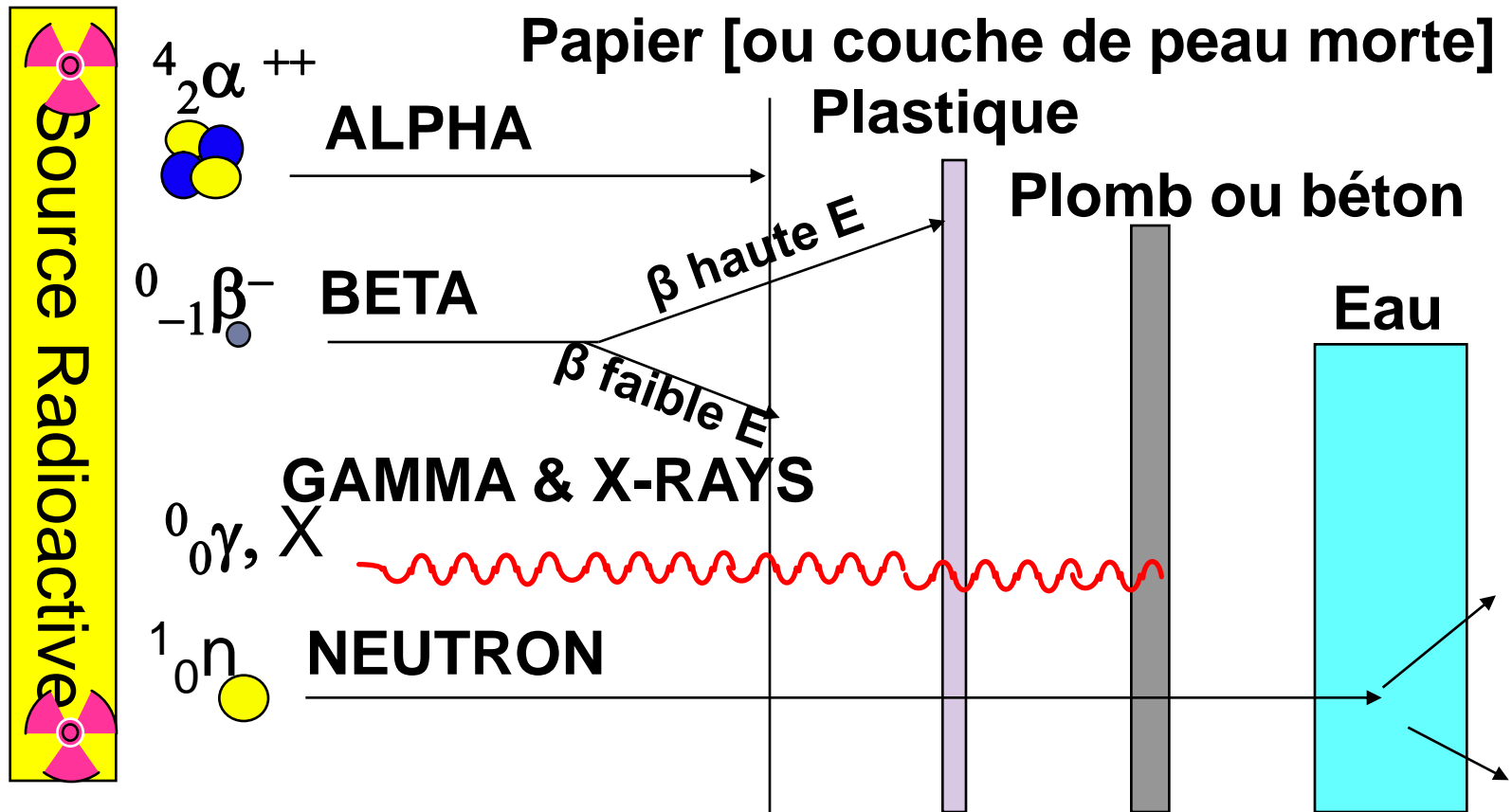
$$a(t) = a_0 e^{-\lambda t}$$



Interactions des particules avec la matière



Arrêt des radiations



Interactions des particules avec la matière: Qualitativement

- ▶ Du point de vue de la particule:
 - ▶ Perte d'énergie et donc ralentissement, diffusion éventuelle (changement de direction) - scattering
- ▶ Du point de vue de la matière: excitations et ionisations
 - ▶ Cascade de recombinaison (émission de photons et électrons dits secondaires) - de manière ultime une partie de l'énergie transformée en phonons (chaleur)



Interactions des particules avec la matière

- ▶ On quantifie l'énergie déposée dans le milieu par le *Transfert d'énergie linéique* (TEL ou TLE - LET)
- ▶ TEL souvent exprimé en keV/ μm

- ▶ On utilise également la *Densité linéique d'ionisation* (DLI):
- ▶ Nombre de paires d'ions créées par unité de longueur



Interactions des particules avec la matière

- ▶ Valeurs typiques du TEL 0.2 - 10 keV/ μm pour les électrons
- ▶ Les particules Alpha (noyau d'hélium α) ont un TEL beaucoup plus grand (250 keV/ μm) car elles sont plus lourdes



Interactions des Alpha avec la matière

- ▶ Trajectoire rectiligne
- ▶ Interaction électromagnétique avec les électrons atomiques
- ▶ Fort pouvoir ionisant
- ▶ α 5,3 MeV: 4 cm dans l'air, 50 μm dans eau, tissus
- ▶ 5000 ionisations par μm dans l'eau

Interactions des électrons avec la matière

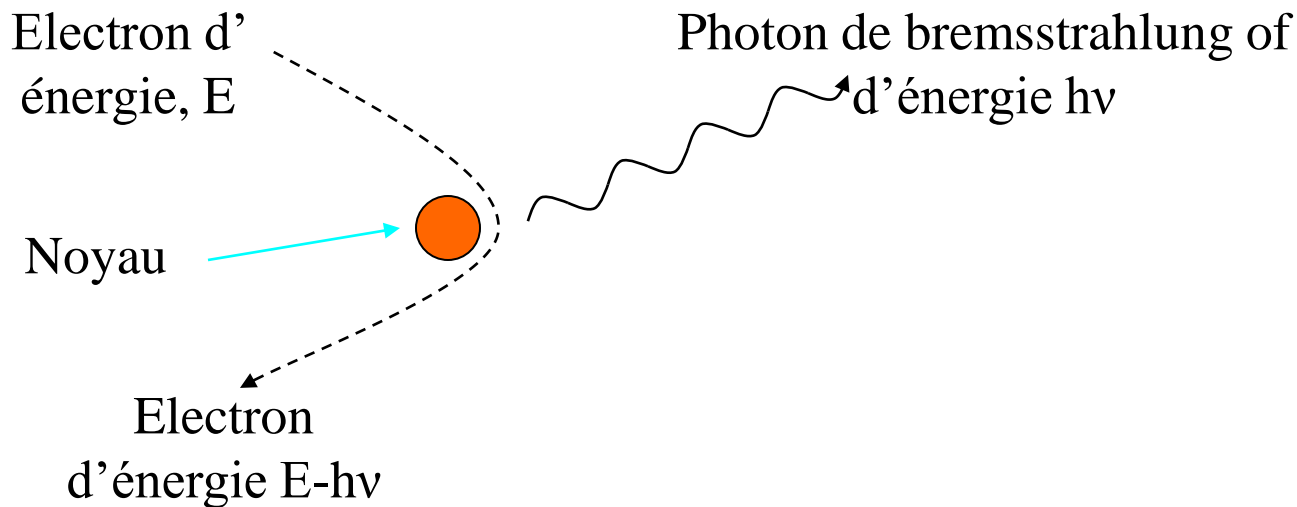
- ▶ Trajectoire brisée
- ▶ Les électrons interagissent avec (**toutes**) les charges du milieu qu'ils traversent par la force de Coulomb
- ▶ Ils transfèrent leur énergie soit aux atomes du milieu par **collision** (ionisations et excitations des atomes), soit en produisant des photons (production de **bremsstrahlung**)

2 MeV: 6 m dans air, 1 cm dans eau, 3 mm dans Al
DLI: 10 ionisations par μm dans eau



Bremsstrahlung (rayonnement de freinage)

- ▶ Transformation directe de l'énergie cinétique de l'électron en énergie d'un photon X

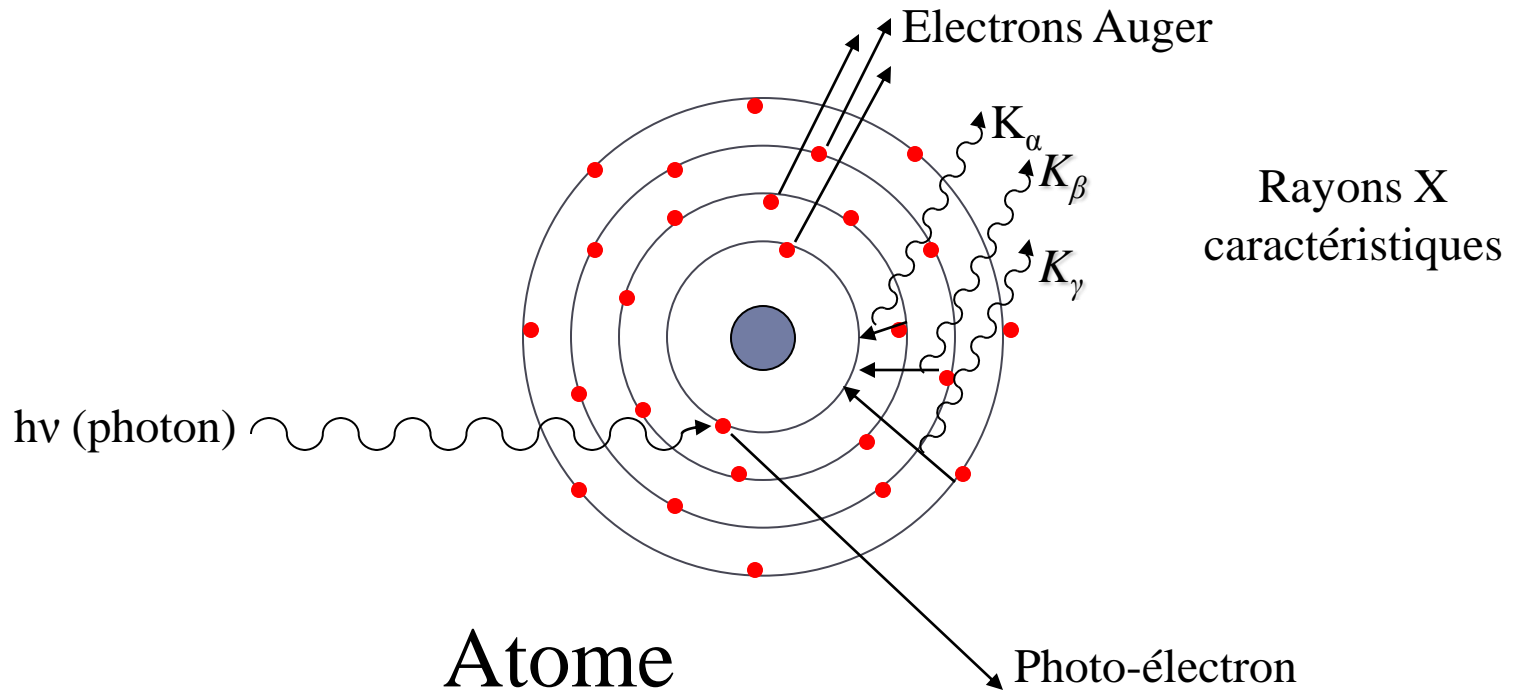


Interactions des photons γ avec la matière

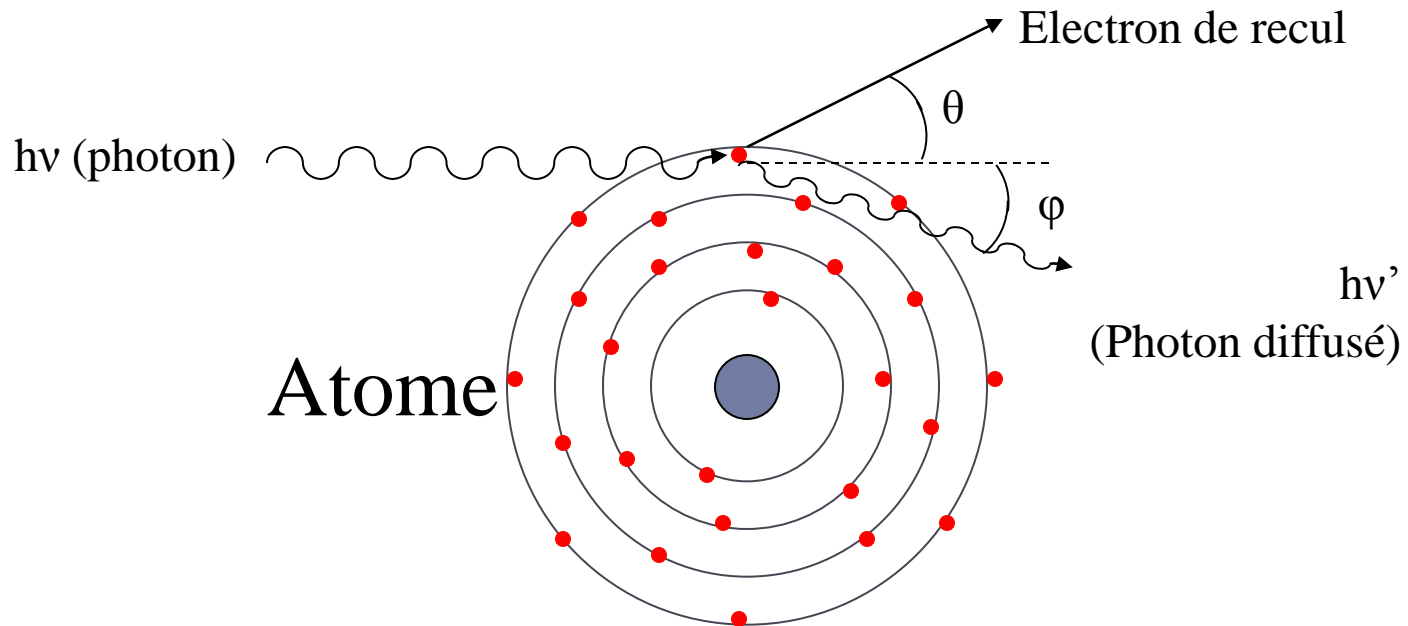
- ▶ 5 mécanismes élémentaires:
 - ▶ Diffusion cohérente
 - ▶ Effet photo-électrique
 - ▶ Diffusion Compton
 - ▶ Production de paires
 - ▶ Interaction photo-nucléaire



Effet Photo-électrique (2)



La diffusion Compton (2)



Relation énergie-angle

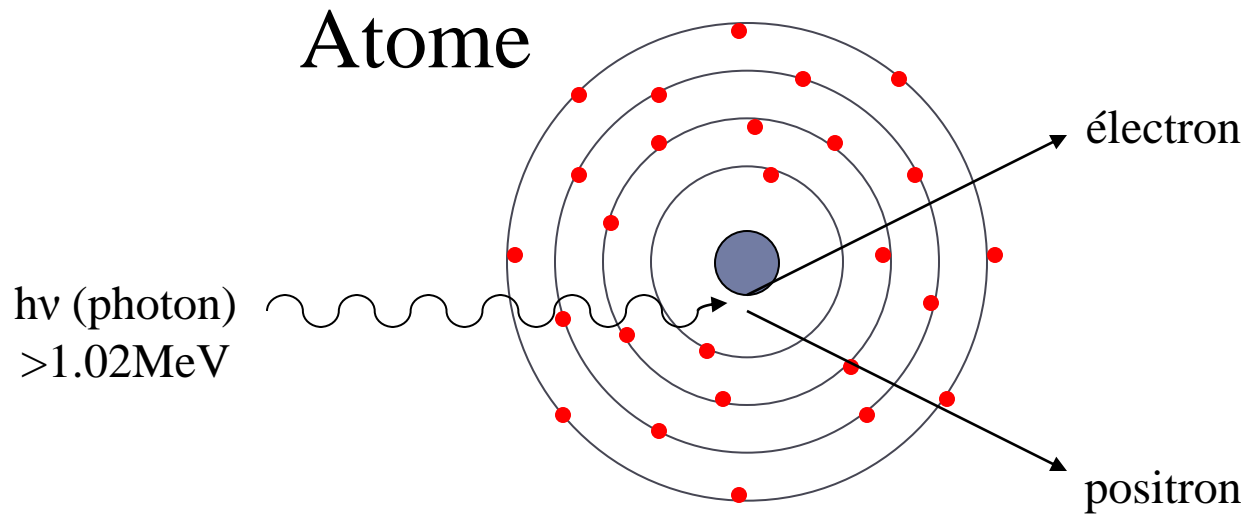
$$h\nu' = h\nu \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos \phi)} \quad \text{where} \quad \alpha = \frac{h\nu}{m_0 c^2} = \frac{h\nu}{0.511}$$

L'effet Compton (Diffusion inélastique)

- ▶ Le photon incident interagit avec un électron des couches externes de l'atome; cet électron peut être considéré comme libre (énergie de liaison $E_L \sim 0$)
- ▶ Un photon diffusé est produit lors de l'interaction
- ▶ L'électron cible (dit de recul ou Compton) est éjecté de l'atome avec une énergie cinétique initiale
- ▶ La quantité d'énergie transférée à l'électron dépend de l'angle de diffusion du photon



Production de paires (2)



$$h\nu = 1.022\text{MeV} + \text{K.E.}e^+ + \text{K.E.}e^-$$



Production de paires (1)

- ▶ Un photon d'énergie $> 1.022\text{MeV}$ peut interagir avec le champ électrique du noyau
- ▶ Le photon disparaît, son énergie est convertie en masse: Matérialisation
- ▶ Une paire électron - positron est créée. Chaque particule a une énergie de repos de 511 keV plus de l'énergie cinétique
- ▶ Conservation de l'énergie: $E_{\text{photon}} = h\nu = mc^2$
- ▶ Le positron perd rapidement son énergie cinétique et s'annihile avec un électron
- ▶ La probabilité d'interaction est proportionnelle au champ électrique du noyau, c.à.d à Z et croît avec $h\nu$
- ▶ Peu probable aux énergies des RX diagnostiques dans les tissus.
- ▶ A prendre en compte en médecine nucléaire et radiothérapie

Atténuation (1)

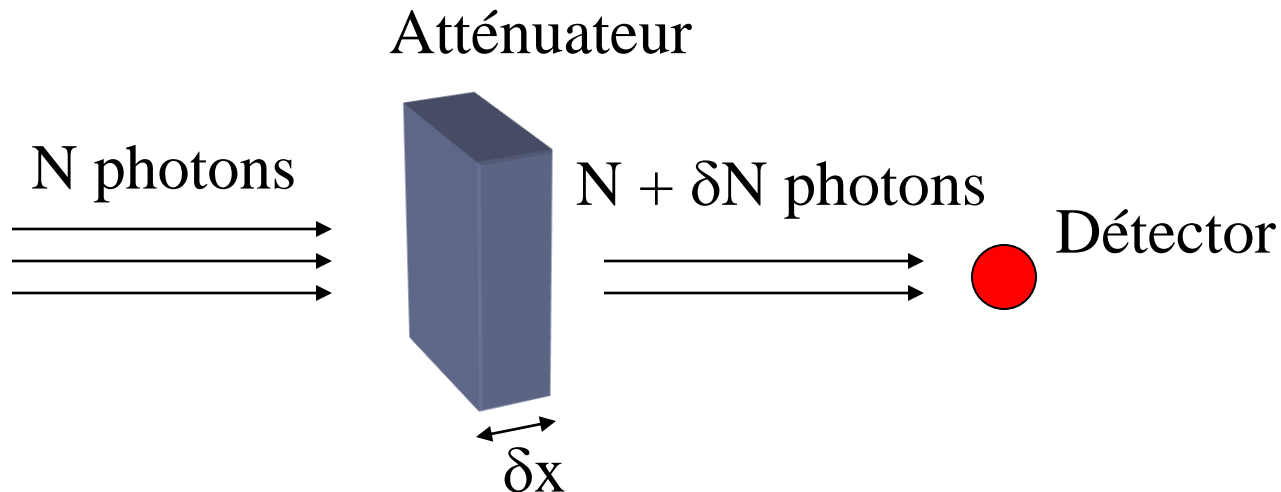
- ▶ Définition: La réduction en intensité I ou nombre de photons N d'un faisceau de rayons X ou γ lorsqu'il traverse la matière
 - ▶ Les photons peuvent être perdus par absorption ou déflexion (diffusion)
 - ▶ Dépend de:
 - ▶ L'énergie des Photons
 - ▶ Les propriétés de la matière traversée (numéro atomique, nombre d'éléments absorbants ou diffusants)



Atténuation (2)

- ▶ Equation définissant le coefficient d'atténuation linéique μ :

$$\frac{\delta N}{N} = -\mu \delta x$$



Loi de Beer-Lambert

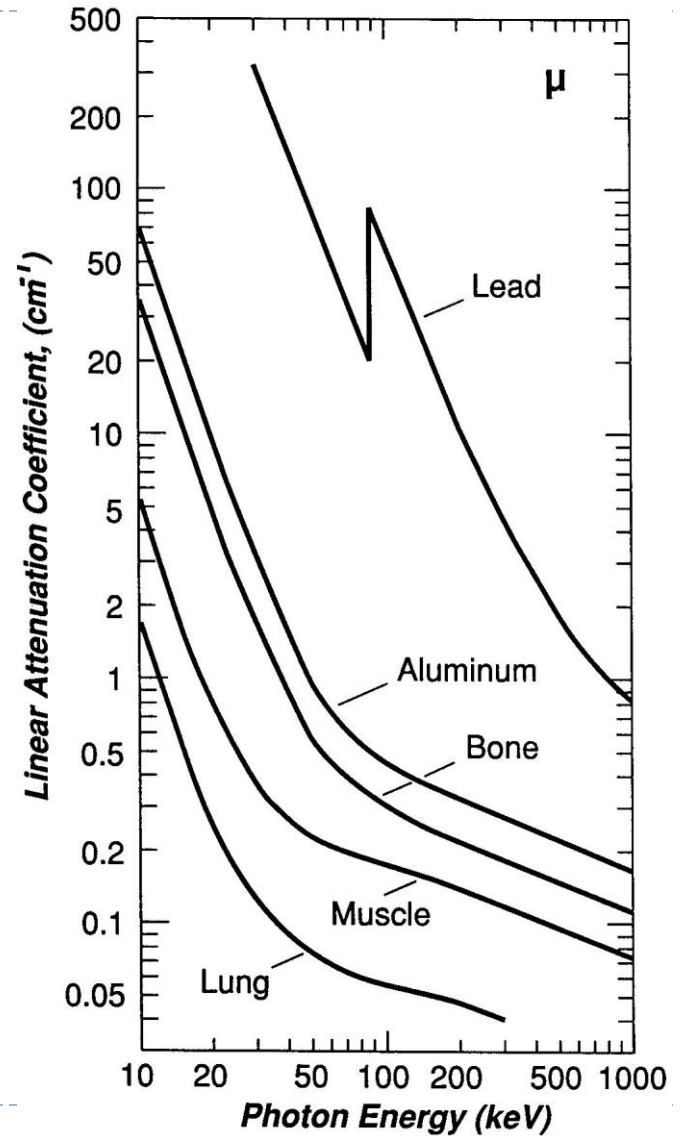
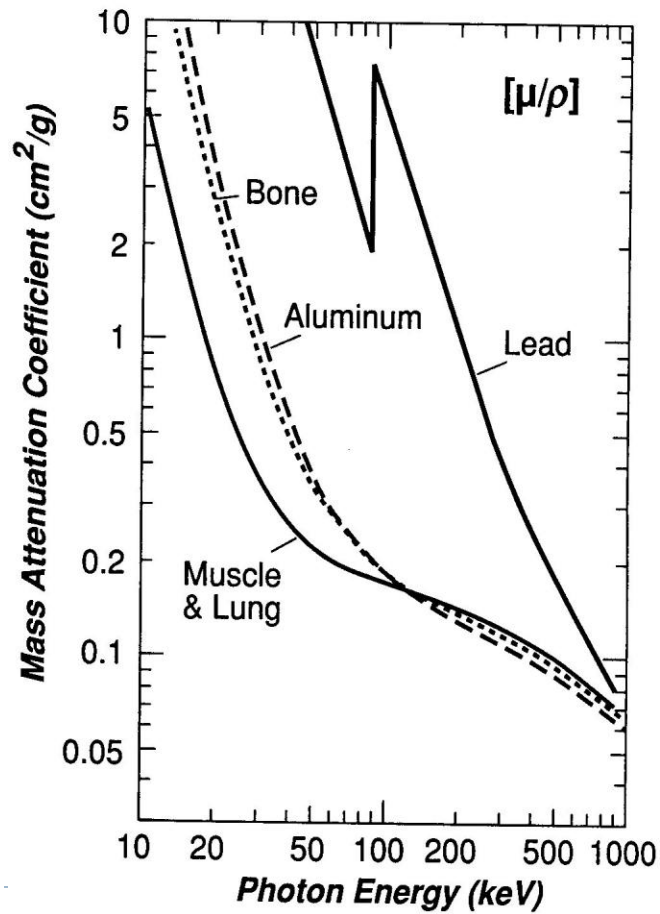
- ▶ En résolvant l'équation on exprime le nombre de photons N qui arrivent sur le détecteur en fonction de l'épaisseur de l'atténuateur:

$$N = N_0 e^{(-\mu x)}$$

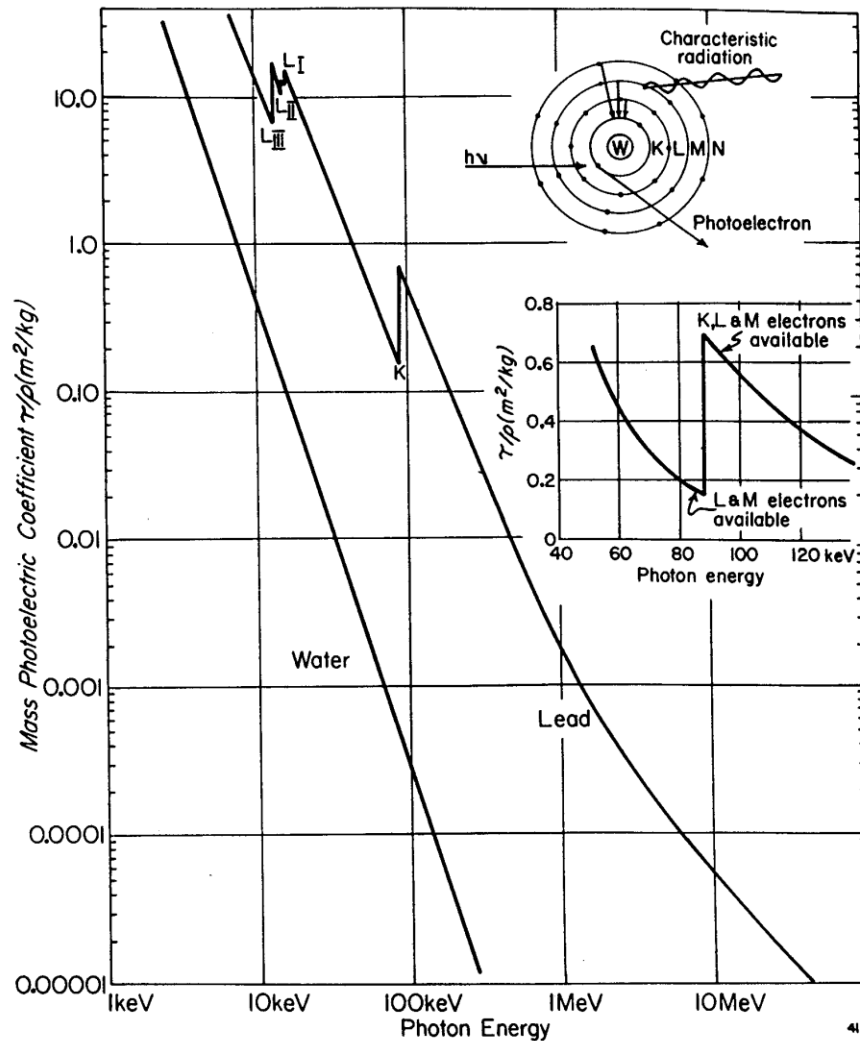
- ▶ Unités usuelles de μ : cm^{-1}
 - ▶ Le *Libre parcours moyen* est donné par: $1/\mu$
-



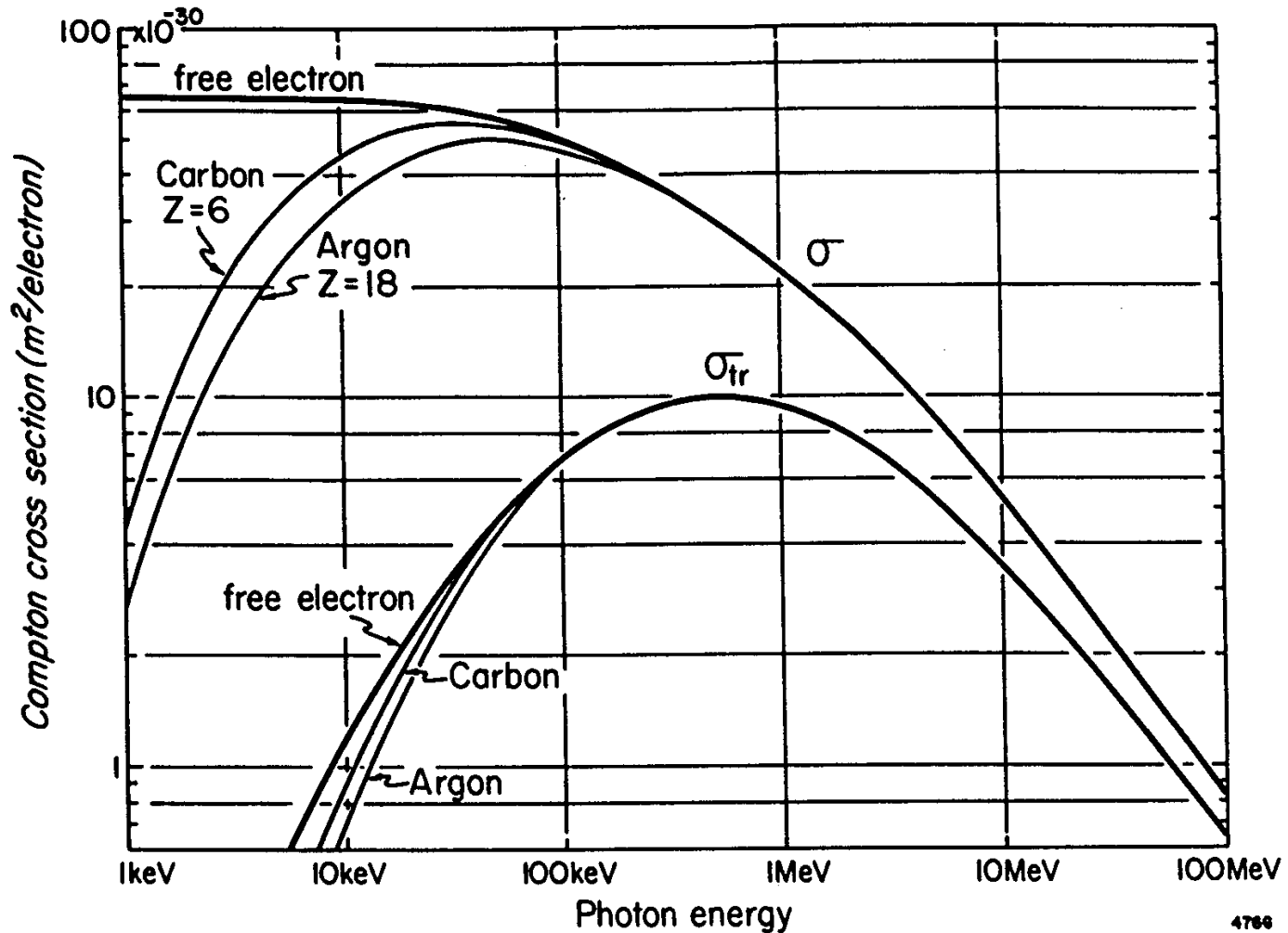
μ/ρ et μ



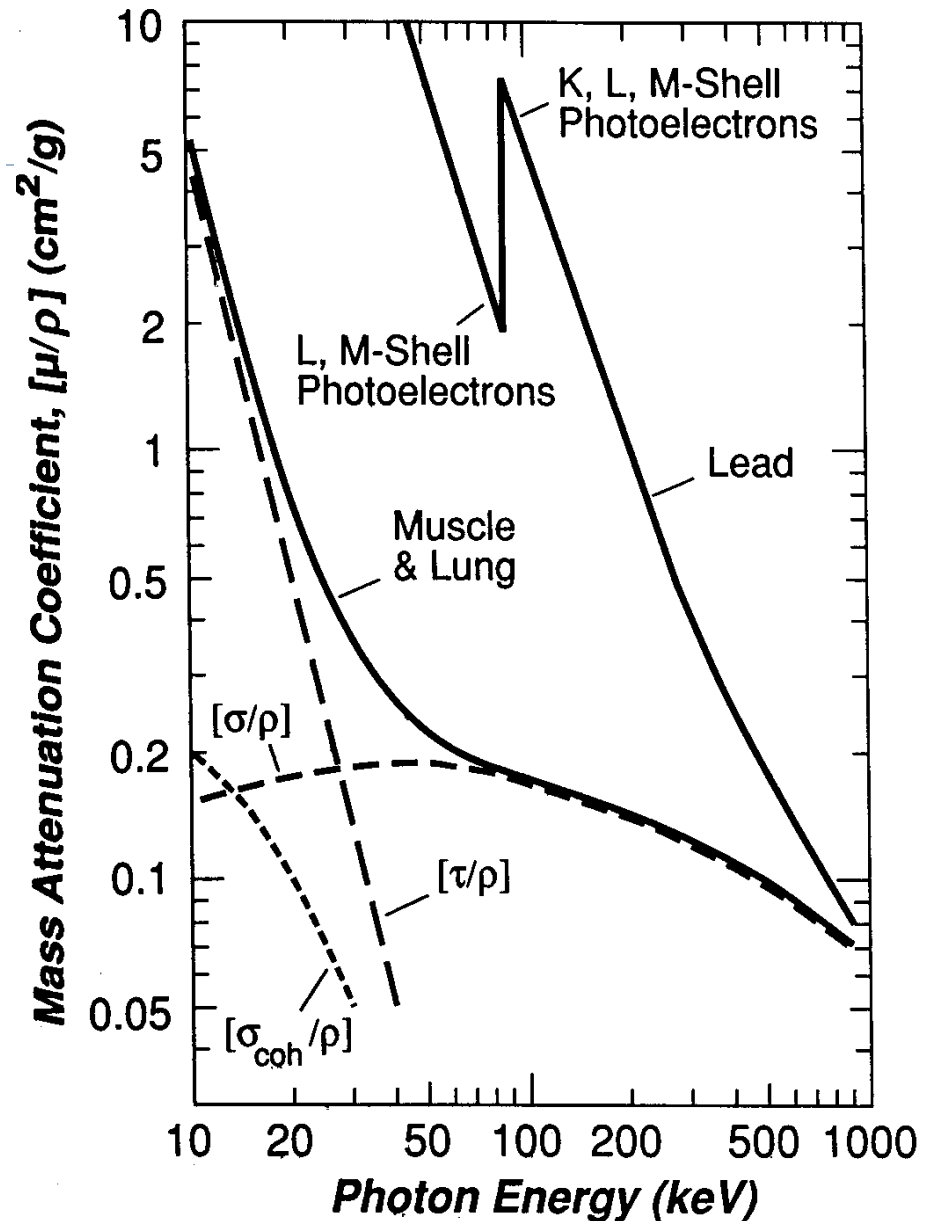
Effect Photo-électrique



Section efficace Compton

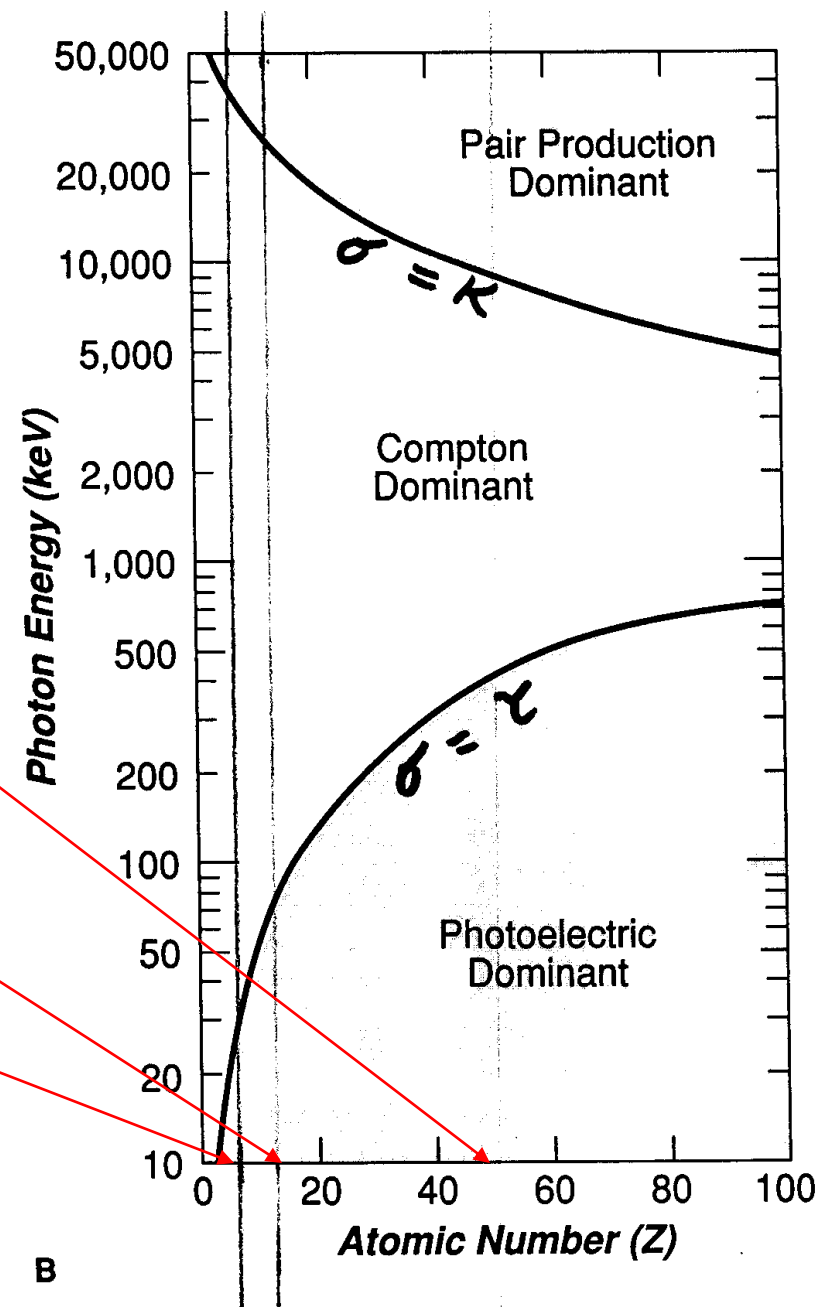


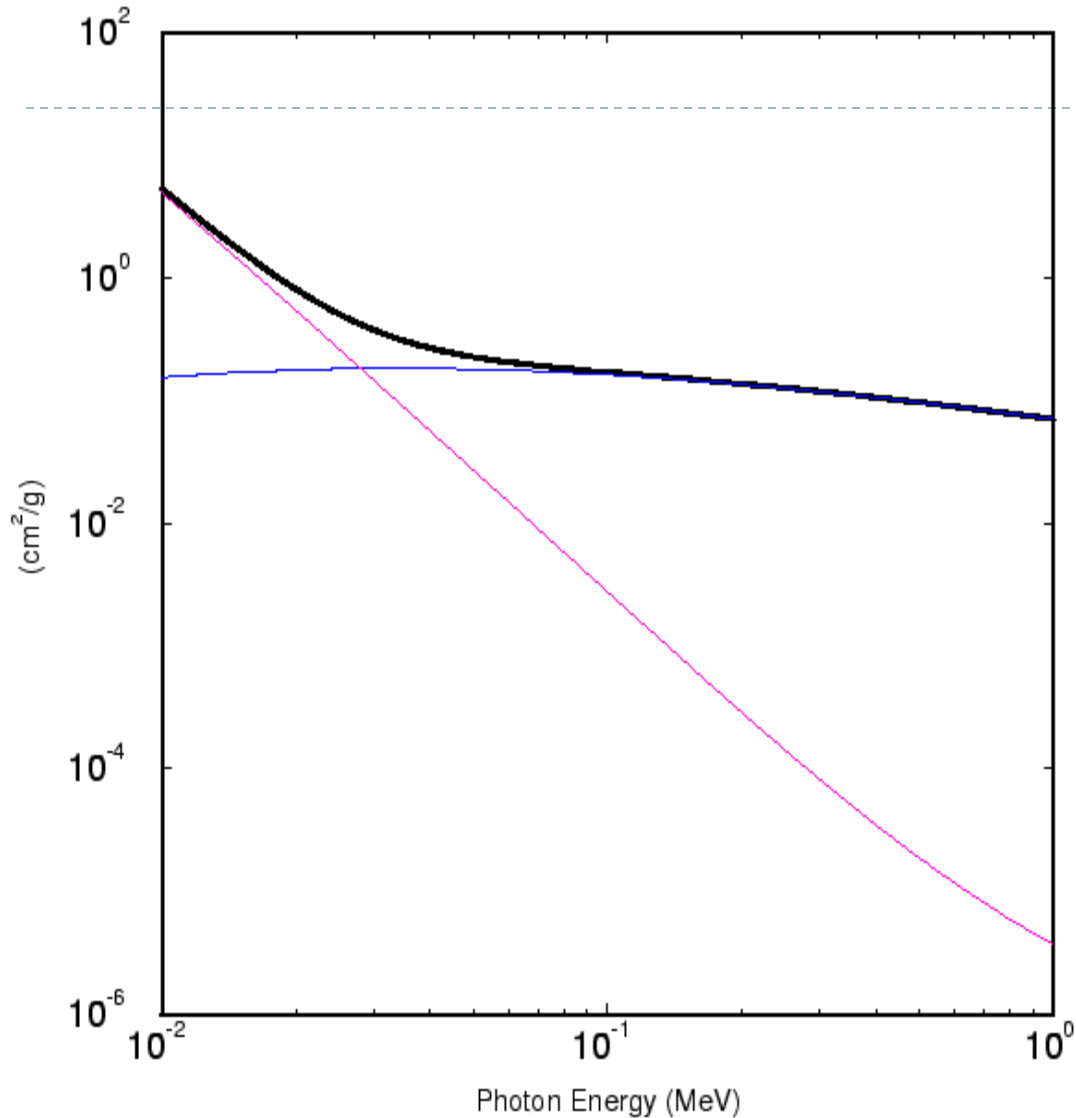
Importance relative des différents mécanismes d'interaction



Importance Relative

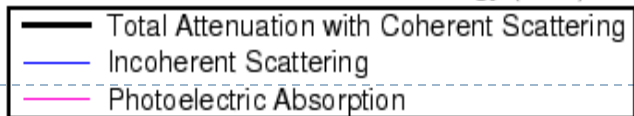
- Phosphore
- Os
- Graisses

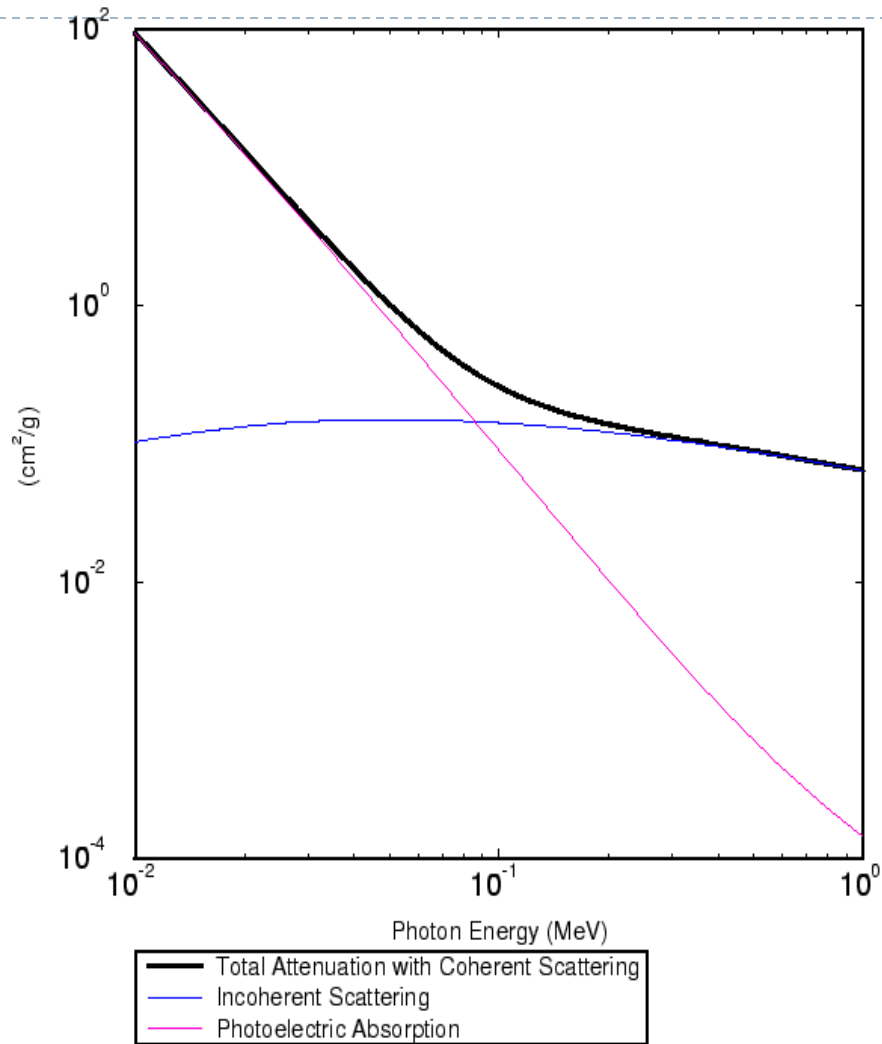




Eau:

Sections efficaces
photo-electrique
et Compton





- ▶ **CALCIUM:**
- ▶ **Sections efficaces photo-électrique et Compton**

