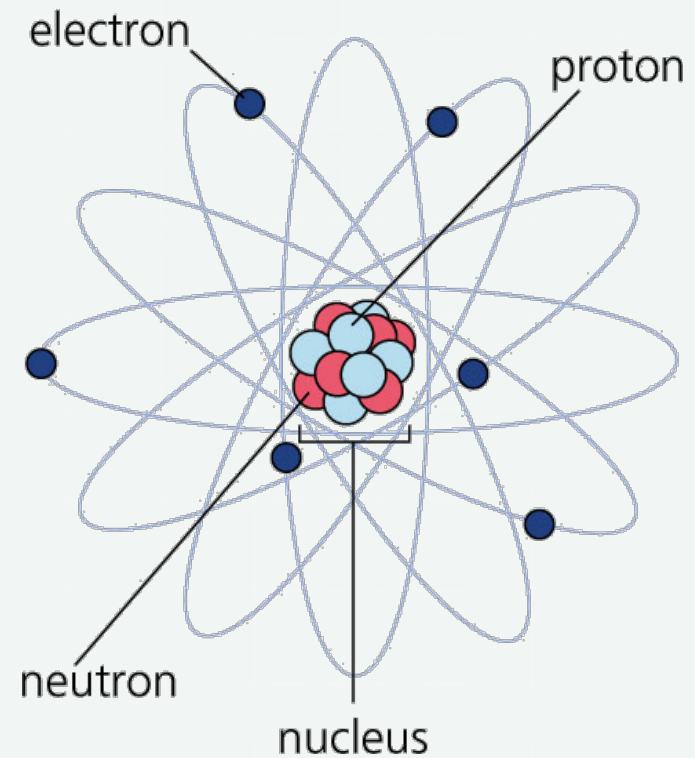


Au coeur de l'atome : Noyau et Radioactivité

Université Ouverte
Université Lyon 1

Stéphane Perriès

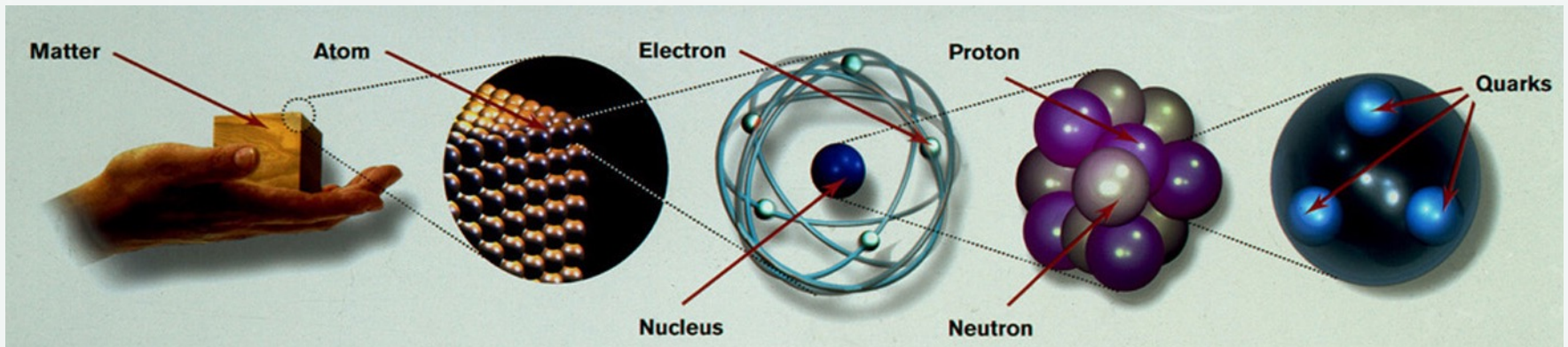


Plan général

1. Qu'est-ce qu'un noyau atomique
2. Masse, énergie et stabilité des noyaux atomiques
3. La radioactivité sous ses différentes formes
4. La fission des noyaux, source d'énergie
5. La fusion sur terre et dans les étoiles
6. Les applications médicales et civiles du nucléaire
7. Les centrales nucléaires
8. La problématique des déchets nucléaires

Chapitre 1

Qu'est-ce qu'un noyau atomique ?



Plan

- 🌐 **Constituants élémentaires de la matière**
- 🌐 **Echelles de la physique nucléaire**
- 🌐 **Notions de base et définition**
- 🌐 **Techniques expérimentales**
- 🌐 **Taille et forme des noyaux**

Au cœur de l'atome : Noyau et Radioactivité



Noyau :

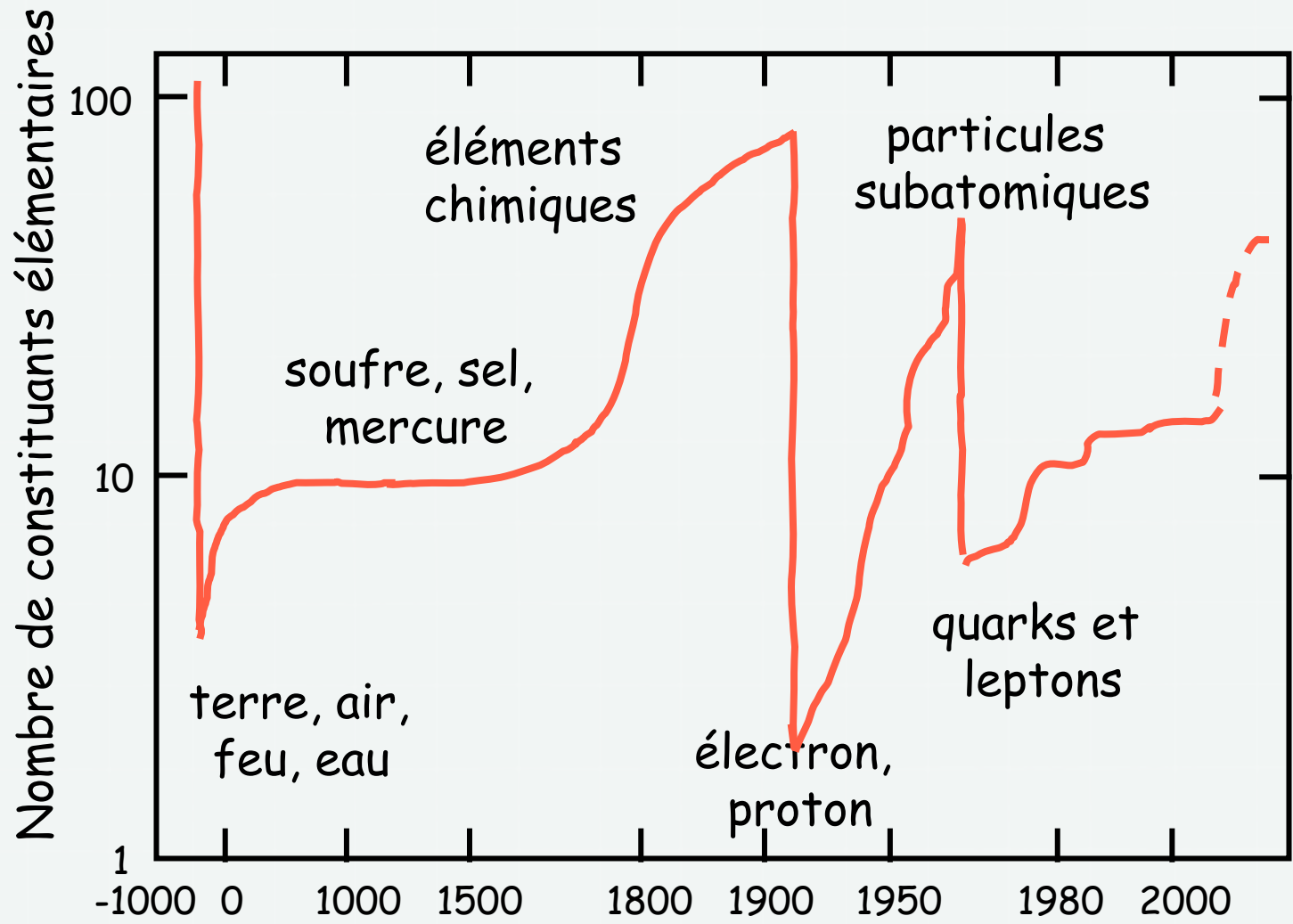
Le noyau atomique désigne la région située au centre d'un atome constituée de protons et de neutrons.



Radioactivité :

phénomène naturel au cours duquel des noyaux atomiques **instables**, dits radio-isotopes, se transforment **spontanément** (« désintégration ») en dégageant de l'énergie sous forme de rayonnement divers.

La quête des constituants élémentaires



La matière qui nous entoure

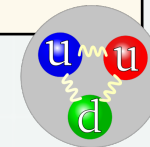
CONNAISSANCE SUFFISANTE POUR UN PHYSICIEN NUCLÉAIRE OU ATOMIQUE

Toute la matière ordinaire peut être décrite par les interactions de quatre fermions élémentaires (spin $\frac{1}{2}$) :

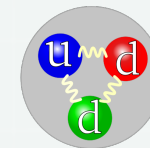
Particule	Symbole	Type	Charge (unité e)
Electron	e^-	Lepton	-1
Neutrino Electronique	ν_e	Lepton	0
Quark up	u	Quark	$\frac{2}{3}$
Quark down	d	Quark	$-\frac{1}{3}$

LA PREMIÈRE GÉNÉRATION

Les quarks sont les briques élémentaires des protons et des neutrons, qui sont les états liés de plus basse énergie d'un système trois quarks.



Proton (uud)



Neutron (udd)

Matière : 3 générations

La matière n'est pas si simple : Il y a 3 générations de fermions fondamentaux :

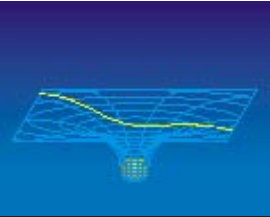



FERMIONS			matter constituents spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...		
Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0	u up	0.003	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.006	-1/3
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0	C charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	S strange	0.1	-1/3
ν_τ tau neutrino	<0.02	0	t top	175	2/3
τ tau	1.7771	-1	b bottom	4.3	-1/3

- Chaque génération p. ex. (μ, ν_μ, c, s) est une réplique de (e, ν_e, u, d)
- La principale différence est la masse des particules : La première generation est la plus légère et la troisième la plus lourde.
- Une Conséquence du mariage de la relativité et de la mécanique quantique est que pour chaque particule, il existe une antiparticule qui a une masse identique, un spin identique mais des charges opposées.

Hadrons

- Les **quarks** libres ne sont jamais **observés**, ils sont toujours confinés dans des **états liés** appelés **hadrons**.
- Macroscopiquement les **hadrons** se comportent comme des particules ponctuelles
- Les Hadrons sont de deux types :
 - MESONS** ($q\bar{q}$)
états liés d'un quark et d'un anti-quark $\pi^+ = (u\bar{d})$ and $K^- = (d\bar{s})$
 - BARYONS** (qqq)
états liés de 3 quarks $p = (uud)$ and $n = (udd)$
 - ANTIBARYONS** ($\bar{q}\bar{q}\bar{q}$) e.g. $\bar{p} = (\bar{u}\bar{u}\bar{d})$

Les 4 interactions fondamentales

	Force	Fermions	Bosons	Range	Charge	Relative intensity
	Gravitation Gravité, marées, trajectoire des planètes	Toutes les particules massives	graviton (?)	infinie	mass	10^{-39}
	Electromagnetique Presque tous les phénomènes de la vie courante	Leptons chargés et quarks	photon	infinie	Charge électrique	10^{-2}
	Forte Cohésion des noyaux atomiques	quarks	gluon	10^{-15} m	Charge de couleur	1
	Faible Radioactivité β , Soleil	leptons and quarks	W^+ , W^- , Z^0 bosons	10^{-18} m	Charge faible	10^{-7}

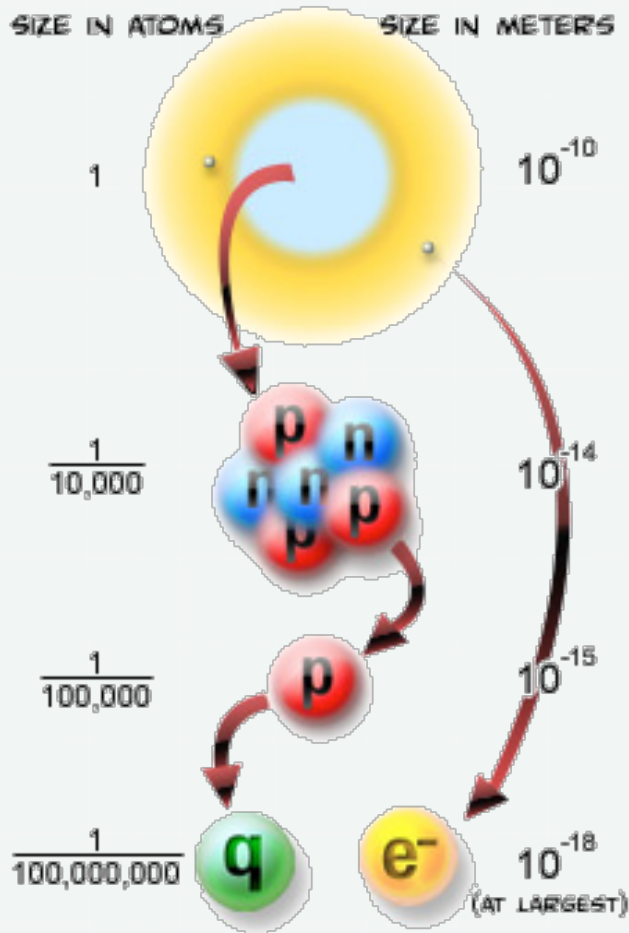
Modèle standard de la physique des particules



La physique nucléaire

- Objet d'étude : Noyaux atomiques (état lié de protons et de neutrons)
- Intéractions
 - Nucléaire forte (cohésion du noyau)
 - Electromagnétique et Faible (dans les désintégrations)
- la **structure nucléaire**, qui vise à comprendre comment les nucléons (protons et neutrons) interagissent pour former le noyau.
- les **mécanismes de réaction** dont le but est de décrire les différentes façons qu'ont les noyaux d'interagir : fission, fusion, diffusion (élastique, inélastique)
- les aspects **inter-disciplinaires** qui explorent les interactions entre la physique nucléaire et les autres sciences fondamentales telles que l'astrophysique, la physique des particules, la physique atomique, etc.
- les **applications** de la physique nucléaire à la médecine, à la production d'énergie, à la fabrication d'armes.

Echelles de distance



La matière est essentiellement vide !

Unité de distance naturelle
en physique nucléaire :

1 fermi
= 1 fm
= 1 femtomètre
= 10^{-15} m

E=mc²

- Equivalence masse-énergie (Einstein 1905)

- E : énergie [J]
m : masse [kg]
c : vitesse de la lumière [$3 \cdot 10^8$ m.s⁻¹]
- 1 g de matière contient $9 \cdot 10^{13}$ J !
~1.5 hiroshima

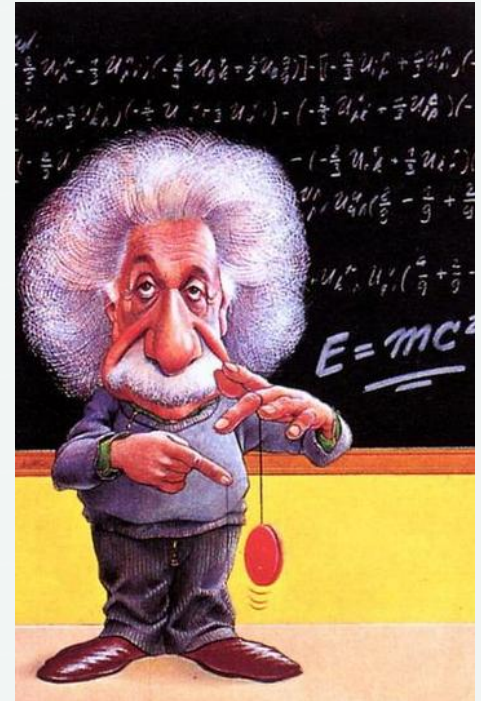
- Cette relation n'est valable que pour des objets au repos.

Equations plus générales :

$$E = E_{\text{cin}} + mc^2$$

$$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$$

avec E_{cin} l'énergie cinétique de l'objet et p son impulsion (quantité de mouvement)

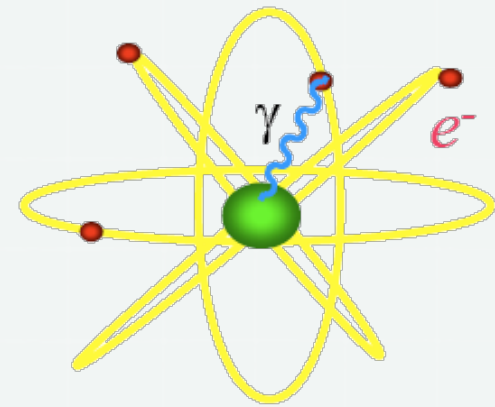


Masses

- On peut exprimer une masse en unité d'énergie via $M=E/c^2$... mais le joule n'est pas du tout adapté à la masse des objets microscopiques.
Par exemple : $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg} = 8.2 \cdot 10^{-14} \text{ J}/c^2$
- Masse en électron-volt:
Un électron-volt vaut $1,6 \times 10^{-19}$ joule.
 $m_e = 510\,999 \text{ eV}/c^2 = 0.511 \text{ MeV}/c^2$
- On a donc les formules de passage :
 $1 \text{ eV}/c^2 = 1.783 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$ et $1 \text{ kg} = 5.610 \cdot 10^{35} \text{ eV}/c^2$
- On utilise les multiples de l'eV : keV, MeV, GeV, TeV, PeV, ...
- Unité naturelle de la physique nucléaire pour les énergies et les masses : MeV

L'atome

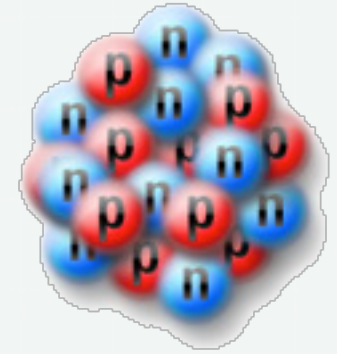
- 1 noyau et Z électrons liés au noyau par la force électromagnétique
- Taille :** Atome $\sim 10^{-10}$ m, $e^- < 10^{-19}$ m
- Charge :** L'atome est globalement neutre, électron $-e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C
- Masse :**
 - Masse atomique \sim Masse nucléaire
 - $m_e = 9.10938215(45) \times 10^{-31}$ kg
 - $m_e = 0.510998910(13)$ MeV/c²
 - $m_e = 0.511$ MeV/c²
- Les propriétés chimiques dépendent du nombre atomique Z



Energie de
liaison des
électrons
 ~ 10 eV

Le noyau

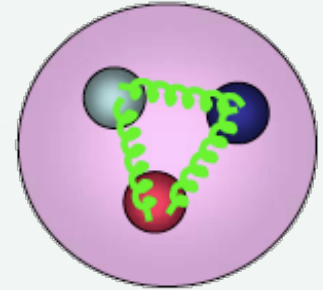
- Cohésion assurée par la **force nucléaire forte**
- **Taille :**
Pour un noyau de masse intermédiaire (80 nucléons)
 $R \sim 5 \text{ fm}$ (rappel : $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$)
- **Charge :** Ze (Z protons)
- **Masse :** de quelques GeV/c^2 à quelques centaines de GeV/c^2
 - $m(^1\text{H}) = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$
 $= 938.8 \text{ MeV}/c^2$
 - $m(^{244}\text{Pu}) \approx 4.08 \cdot 10^{-25} \text{ kg} \approx 230 \text{ GeV}/c^2$
- Certains noyaux sont stable, d'autre sont instables et se désintègrent



Energie de
liaison
 $\sim 10 \text{ MeV/nucleon}$

Les nucléons

- Proton (p) and neutrons (n) : cohésion assurée par la **force forte (de couleur)**
- Taille** : p,n ~1 fm
- Charge** : proton +e; neutron non chargé
- Masse** :
 - $m_p = 1.672621637(83) \times 10^{-27} \text{ kg} = 938.27 \text{ MeV}/c^2$
 - $m_n = 1.67492729(28) \times 10^{-27} \text{ kg} = 939.57 \text{ MeV}/c^2$
 - $m_p \sim m_n \sim 1836 m_e$
- Stabilité** :
 - Proton : stable (période $> 3 \times 10^{29}$ ans)
 - neutron : instable, période 614 s ~10 minutes



Energie de
liaison ~ 1 GeV

Les noyaux : A_ZX

- Un **noyau** est un état lié de Z protons et N neutrons.
- p et n sont appelés génériquement “**NUCLEONS**”
- A (nombre de masse) = Z (nombre atomique) + N (nombre de neutrons)

- Un “**NUCLEIDE**” est un noyau spécifique caractérisé par Z, N .

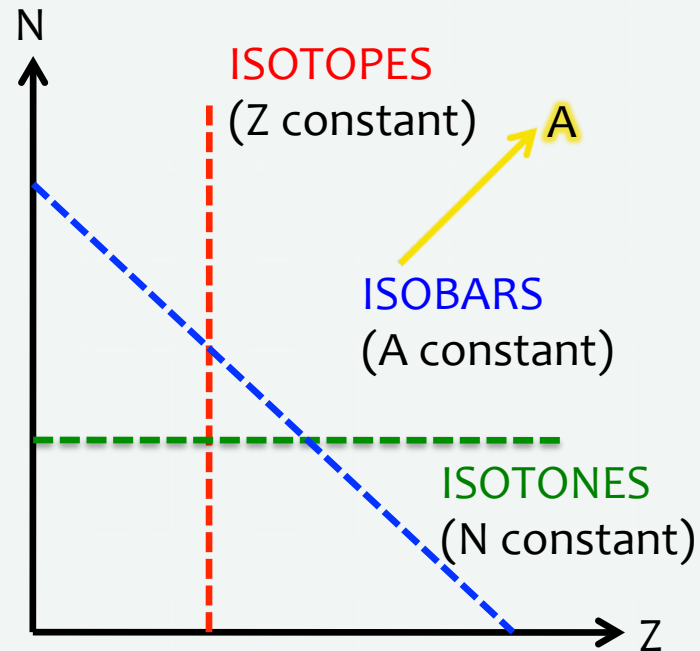
$${}^1_1\text{H or } p : Z = 1, N = 0, A = 1$$

$${}^2_1\text{H or } d : Z = 1, N = 1, A = 2$$

$${}^4_2\text{H or } \alpha : Z = 2, N = 2, A = 4$$

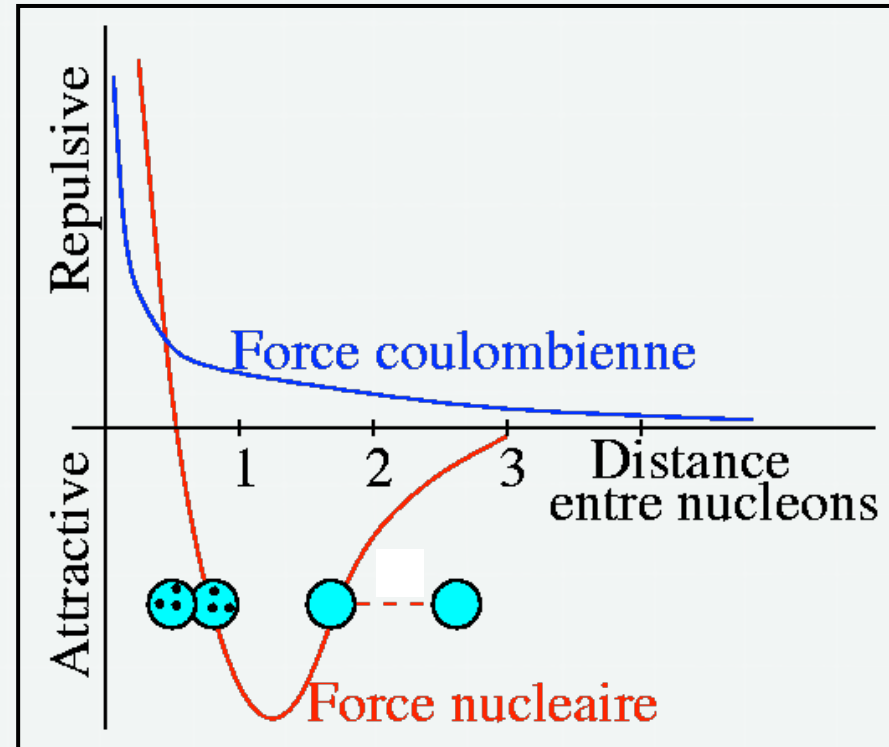
$${}^{208}_{82}\text{Pb} : Z = 82, N = 126, A = 208$$

- En principe, des antiatomes et des antinoyaux peuvent être fabriqués à partir d’antiprotons, d’antineutrons et de positrons
Expérimentalement très complexe,
moins d’une centaine d’antihydrogènes synthétisés jusqu’à maintenant.



Interaction nucléaire forte

- ✓ La force entre les nucléons est appelée la “force nucléaire forte”
- ✓ Le lien entre la la “force nucléaire forte” et “l’interaction forte de couleur” est similaire au lien entre le potentiel coulombien et la force de van der Waals.
- ✓ La force nucléaire n'est pas calculable en détail au niveau des quarks et peut uniquement être déduite empiriquement de résultats expérimentaux.
- ✓ Quelques propriétés :
 - ❖ “Cœur dur” à très petite distance
 - ❖ Très intense à courte distance (max à 1.3 fm)
 - ❖ Indépendance de charge (même force entre protons and neutrons)
 - ❖ Dépendante du spin
 - ❖ Composante non centrale



La table périodique des éléments

- Seuls trois éléments ont été formés lors du big bang (H, He, Li)
- Tous les autres éléments ont été créés dans les étoiles (nucleosynthèse).
- 80 Eléments stables : de H (Z=1) à Pb (Z=82)
- 84 Eléments naturels : de H (Z=1) à Pu (Z=94)
- Pour un isotope donné, plusieurs nucléides peuvent coexister.
 - Plomb : 4 isotopes stables ^{204}Pb (1.4%), ^{206}Pb (24.1%), ^{207}Pb (22.1%) et ^{208}Pb (52.4%)
 - Etain : 10 isotopes stables (A=112,114,115,116,117,118,119,120,122,124,126)
- 339 isotopes naturels sur terre (dont 270 isotopes stables)
- La table périodique classe les éléments d'après leurs propriétés chimiques.

Plus d'informations sur <http://www.webelements.com> et http://www.don-lindsay-archive.org/creation/isotope_list.html

Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
↓ Period																		
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	* Lanthanoids	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	** Actinoids	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
			* Lanthanoids	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
			** Actinoids	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Atomic number colors show state at standard temperature and pressure (0 °C and 1 atm)

Borders show natural occurrence

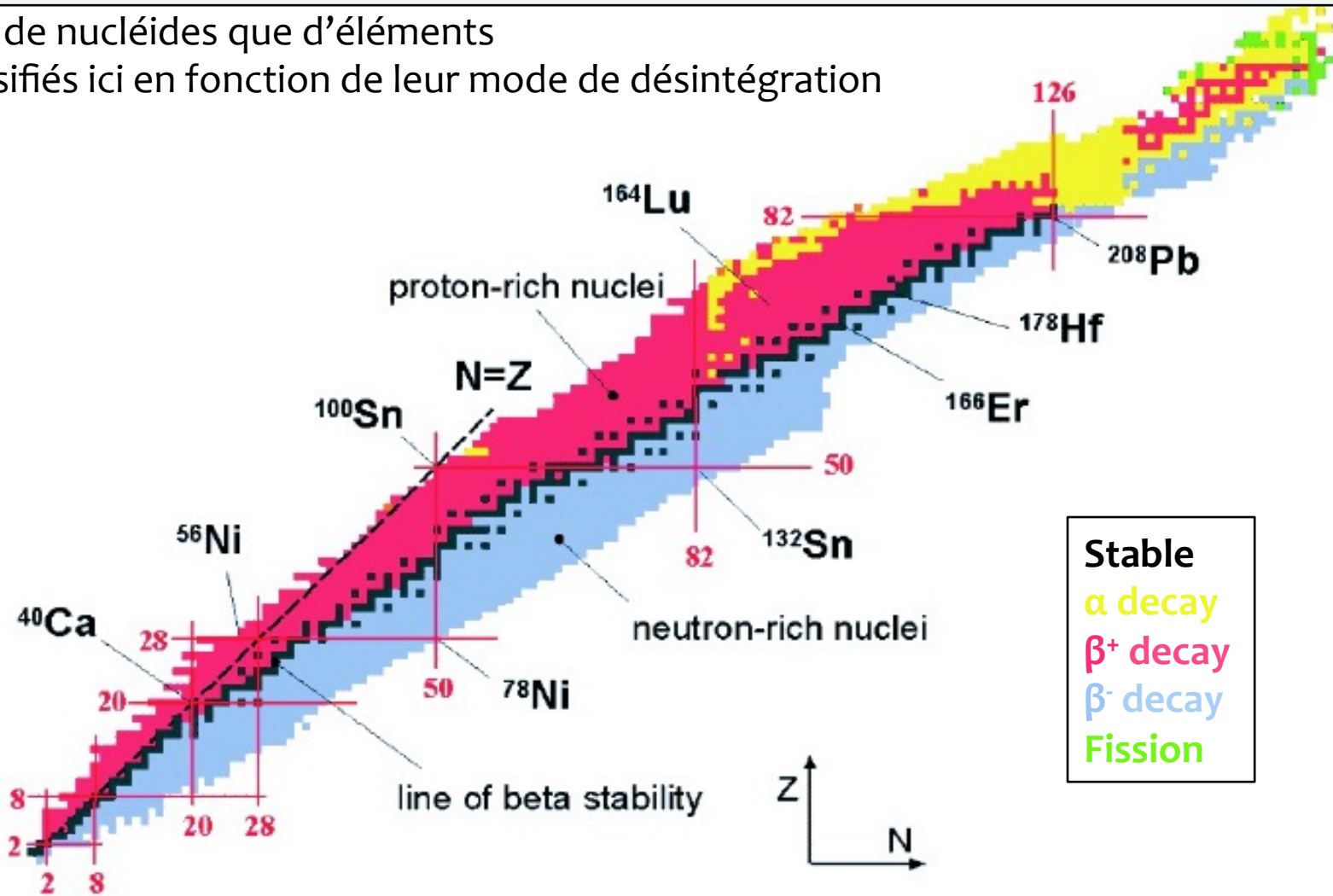
Primordial	From decay	Synthetic	Undiscovered
------------	------------	-----------	--------------

Solids		Liquids		Gases		Unknown										
Metals										Metalloids		Nonmetals				Unknown
Alkali metals		Alkaline earth metals		Inner transition elements		Transition elements		Other metals				Other nonmetals		Halogens	Noble gases	
				Lanthanides	Actinides											

Charte des noyaux

Plus de nucléides que d'éléments

Classifiés ici en fonction de leur mode de désintégration

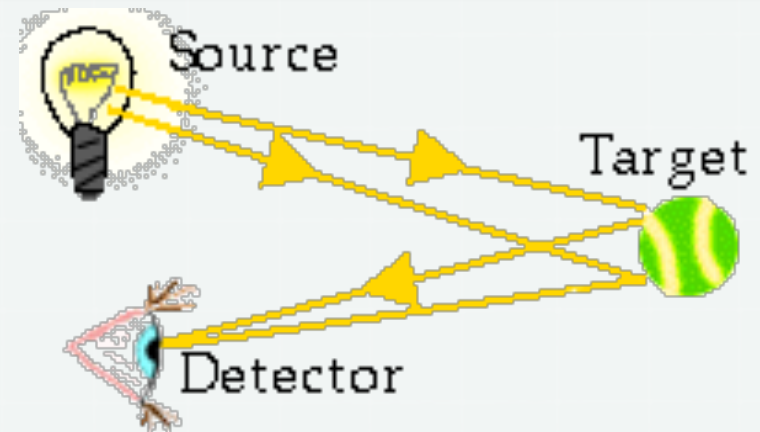


Les outils théoriques

- Dans le monde subatomique:
 - Mécanique quantique
 - Quantification des niveaux énergétiques
 - Effet tunnel
 - Relativité restreinte
 - Equivalence masse-énergie
 - Dilatation des temps
- Principaux problèmes dans la description théorique du noyau
 - Problème à N corps
 - Interaction effective

Les outils expérimentaux

- Pour observer un objet :



- Comment voir un noyau ?

(invisible même avec un microscope)

- Source : particules subatomique de haute énergie.
(→ accélérateur de particules) → “source lumineuse”
- Détecteurs de particules subatomiques → “yeux”

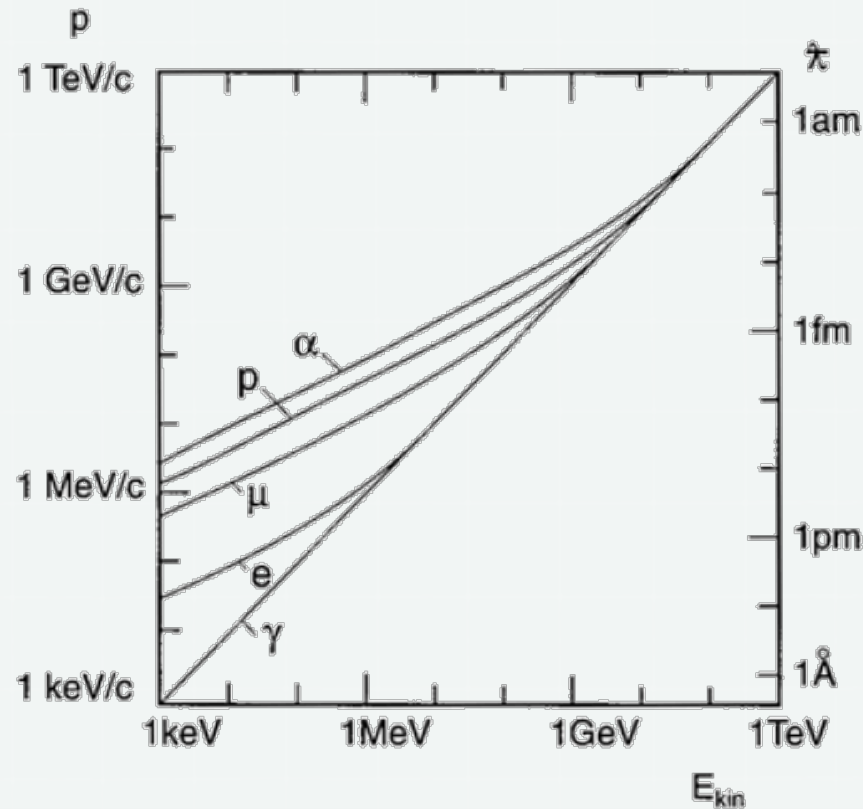
Les accélérateurs et les détecteurs sont les outils commun de la physique nucléaire et de la physique des particules

Mécanique quantique : dualité onde corpuscule

Une particule incidente peut sonder la matière à l'échelle

$$\lambda = \frac{\hbar}{p} = \frac{\hbar c}{\sqrt{K(K + 2mc^2)}}$$

Avec K: Energie cinétique



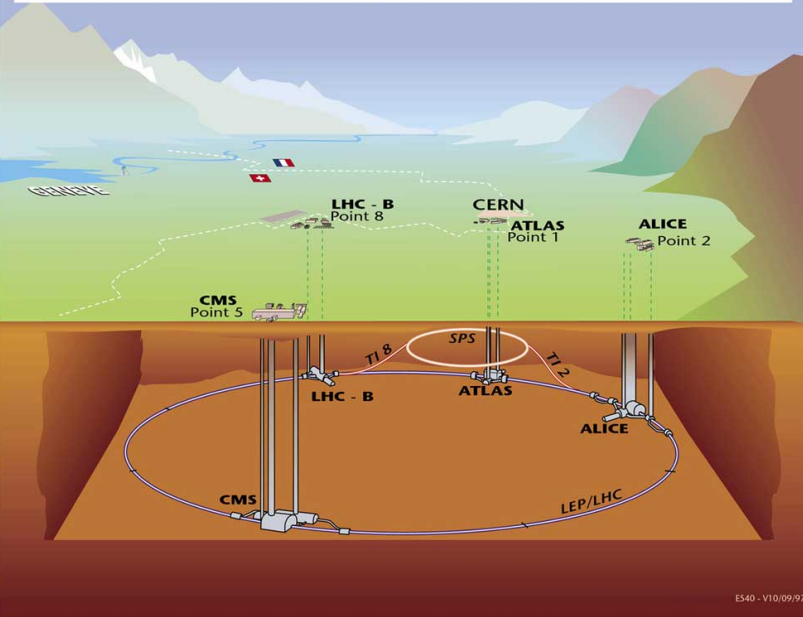
Les accélérateurs

- Utilisation de particules chargées et de champs électromagnétiques pour les accélérer et les focaliser dans un faisceau.
- Soit collision sur un cible fixe (favorise le nombre de collisions) , soit collision entre deux faisceaux (favorise l'énergie disponible)
- Soit accélérateur linéaire, soit accélérateur circulaire

CERN

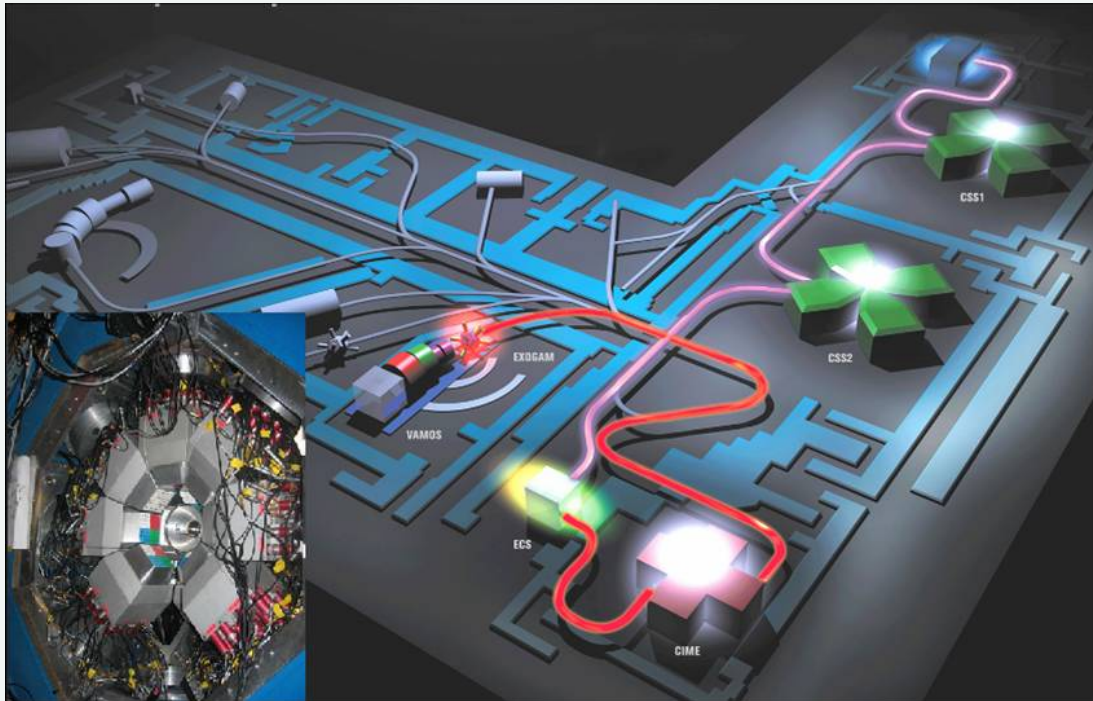
Accélérateur : LHC (Large Hadron Collider)
proton-proton ; $E = 14 \text{ TeV}$

Overall view of the LHC experiments.



GANIL (Caen)

Accélérateur : SPIRAL (faisceau radioactif sur une cible fixe)

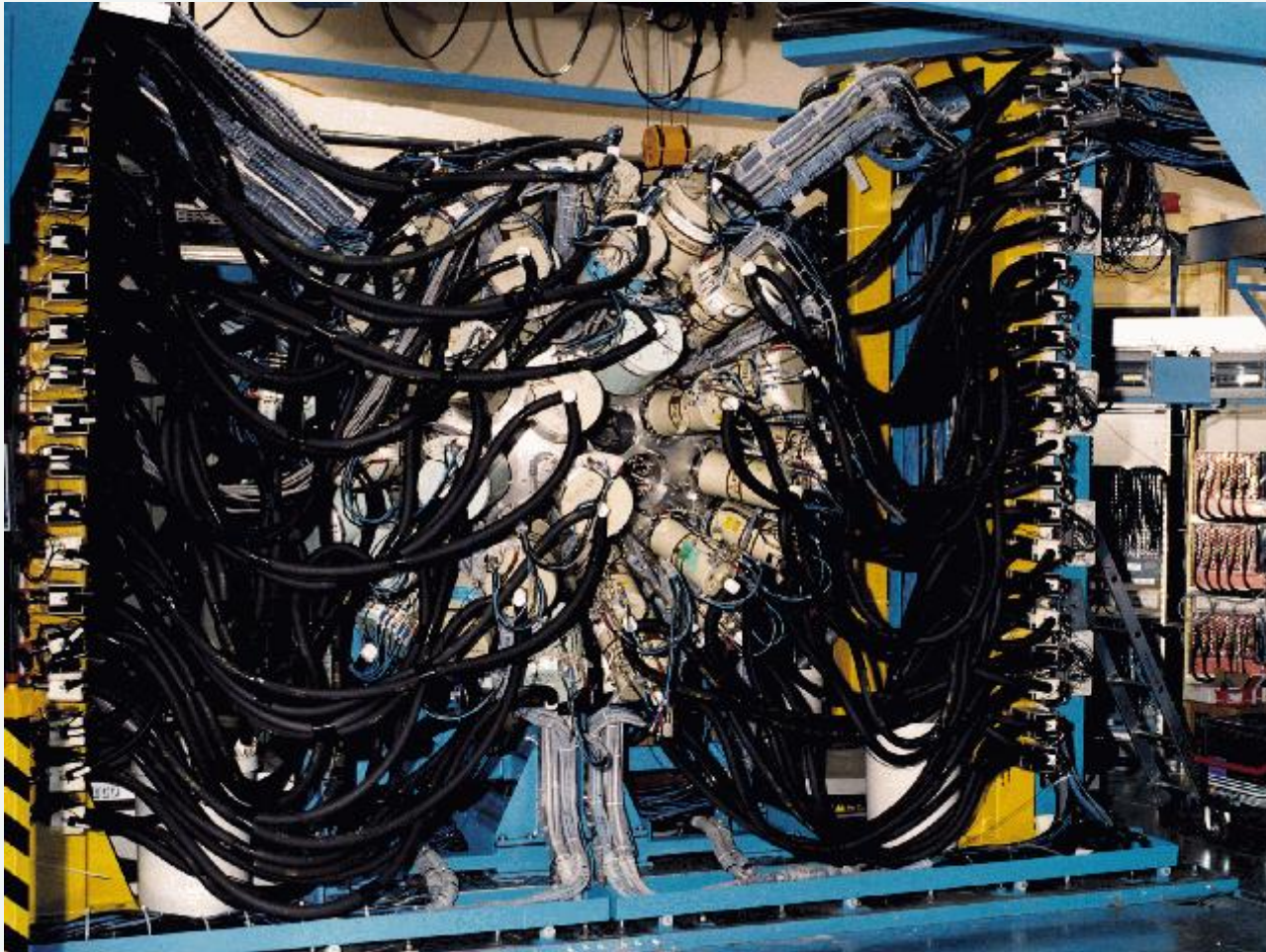


Detector: EXOGAM (amongst others)

Les détecteurs

- 🌐 Autour du point d'interaction, on place des détecteurs dont le rôle est de mesurer l'énergie et/ou l'impulsion des particules/ noyaux émis, et de distinguer le type de ces particules
- 🌐 Le principe général est un dépôt d'énergie, converti en signal électrique, qui est ensuite traité informatiquement.

Exemple de détecteur : EUROBALL



Collisions dans le monde macroscopique

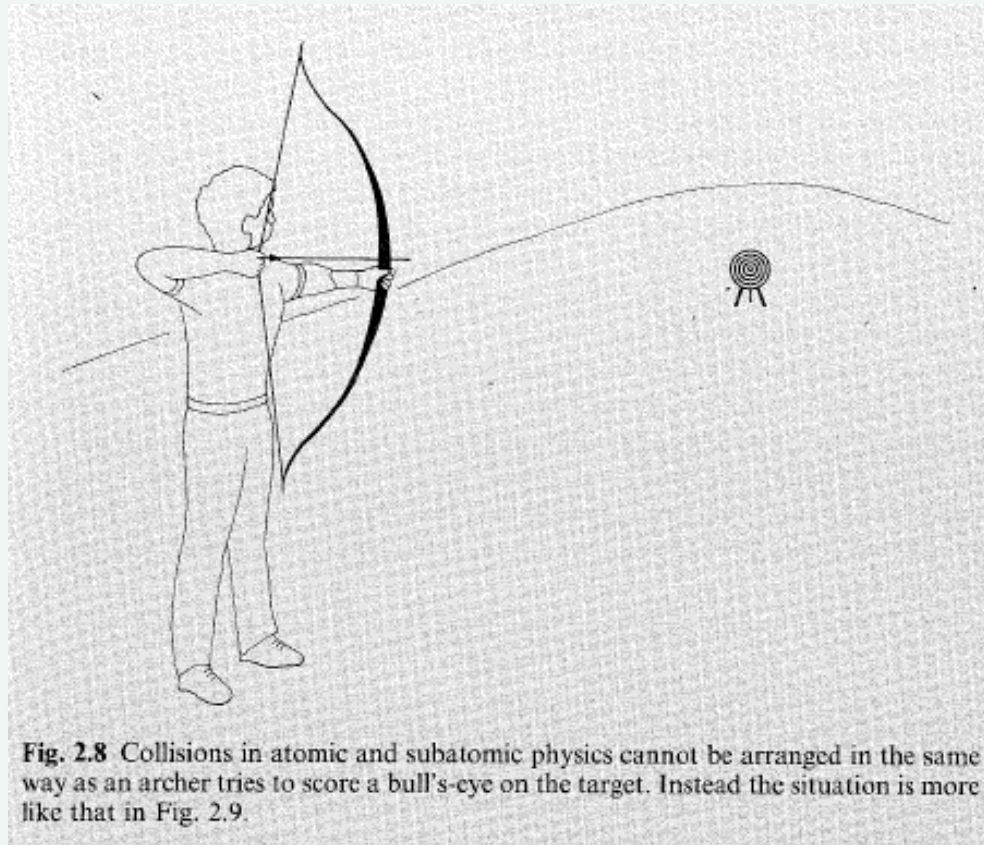


Fig. 2.8 Collisions in atomic and subatomic physics cannot be arranged in the same way as an archer tries to score a bull's-eye on the target. Instead the situation is more like that in Fig. 2.9.

Collisions dans le monde microscopique

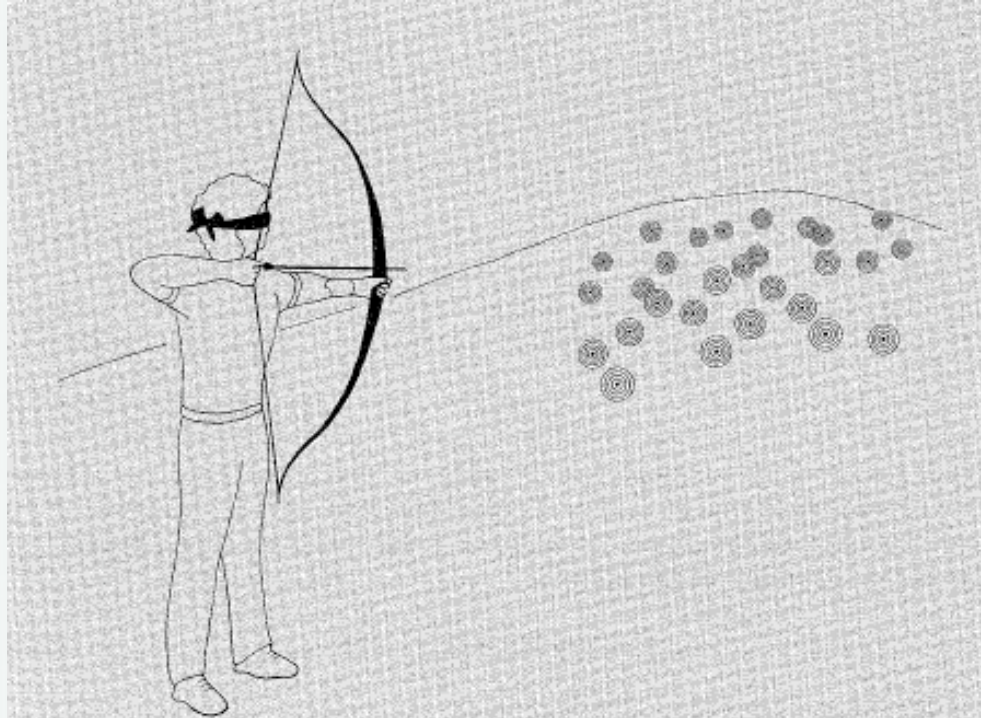
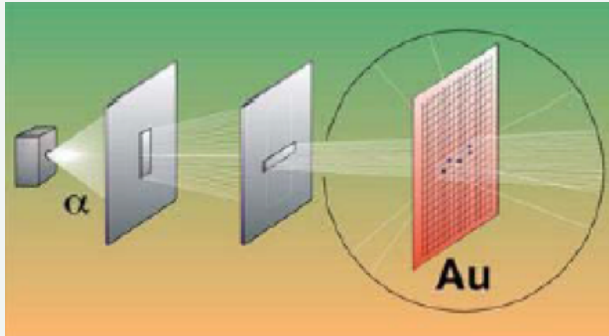


Fig. 2.9 Clearly the chance that the blindfolded archer hits any target is proportional to the density of targets and to the area (cross-section) presented by each, and to the number of arrows that he fires if he has more than one attempt, provided, of course, that he is firing into the region of the assembly of targets. When an arrow does strike the target the archer will score depending on which ring of the target is struck. The probability of a given single score for the blind archer will be proportional to that partial area of the whole target which yields that score. In atomic and nuclear collisions the total cross-section gives the probability that a collision will occur and a partial cross-section gives the probability that the collision has a given outcome.

Réactions nucléaires

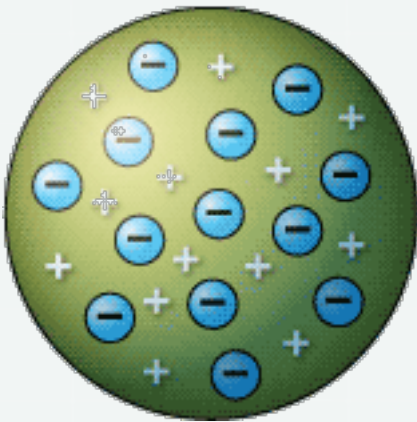
- Voie de sortie à 2 corps
 - $a+X \rightarrow b+Y$
 - a : projectile
 - X : cible
 - Y : noyau de recul
 - b : éjectile
 - a+X : voie d'entrée
 - b+Y : voie de sortie
 - Si $a+X \rightarrow a+X$: collision élastique
- Si $a+X \rightarrow 1+2+3+\dots$: voie de sortie à trois corps

L'expérience de Geiger-Marsden



1909 : Diffusion élastique de particules α ($z=2$ and $E_{cin}=5$ MeV) par des noyaux d'Or ($Z=79$)

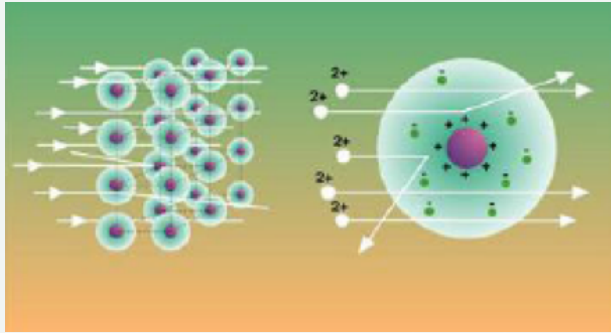
- 🌐 Expérience : [H. Geiger](#) et [E. Marsden](#)
- 🌐 Interprétation : [E. Rutherford](#)



Modèle plum-pudding de Thompson
→ les particules α ne sont quasiment pas déviées

[Animation](#)

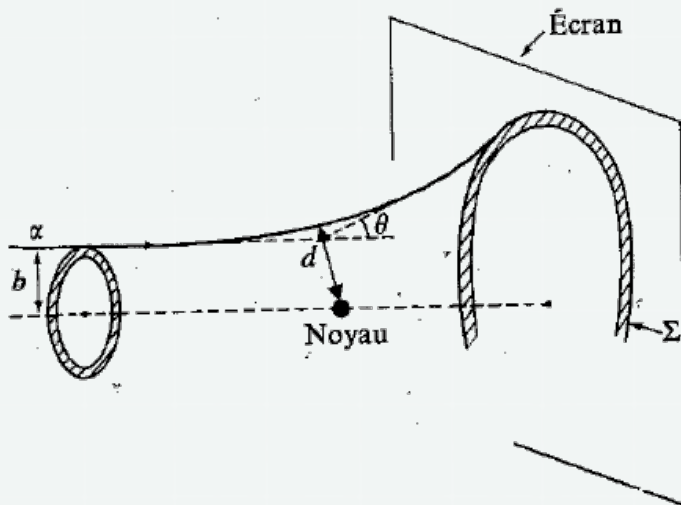
Interprétation de Rutherford



- Noyau d'or ponctuel
- Mécanique classique : trajectoire hyperbolique, l'angle de diffusion dépend du paramètre d'impact b , et de l'énergie cinétique

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) = \left(\frac{zZ\alpha\hbar c}{4E_{kin}} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \theta/2}$$

- Conclusion : $R < 70 \text{ fm}$
- Modèle planétaire de l'atome
→ modèle de bohr
→ modèle quantique



Taille du noyau

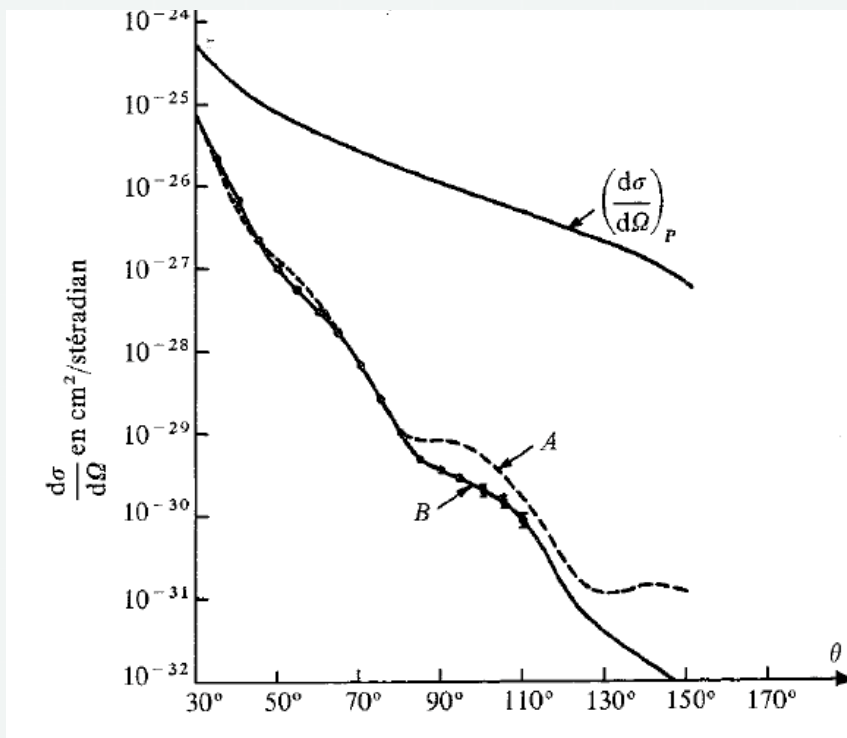
La taille des noyaux peut-être déterminée à partir de plusieurs méthodes

- Méthodes utilisant **l'interaction electromagnetique**
 - Diffusion d'électrons
 - Rayon X des atomes muoniques
 - Noyaux miroirs
- Méthodes utilisant **l'interaction nucléaire forte**
 - Diffusion d' α
 - Diffusion de neutrons
 - Diffusion de p, π
 - Temps de vie des émetteurs α

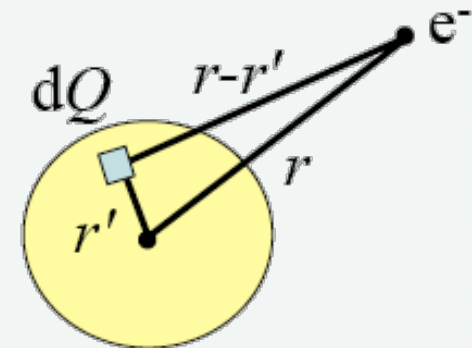
Les méthodes les plus importantes sont basées sur la diffusion angulaire de particules incidentes

Diffusion élastique d'électrons

Électrons de 153 MeV sur de l'Or ($Z=79$)



- La théorie supposant un noyau ponctuel ne décrit pas les données expérimentales
- Il faut convoluer le potentiel coulombien avec la distribution de charge du noyau \rightarrow facteur correctif dit facteur de forme



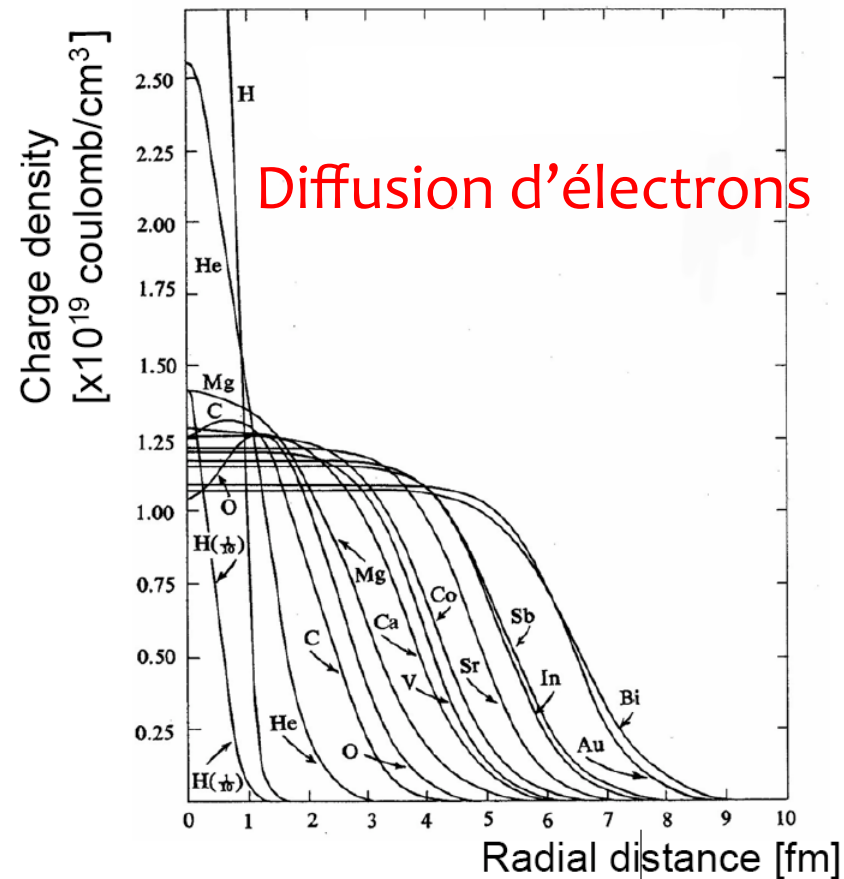
Densité de charge

Paramétrisation de Fermi :

$$\rho(r) = \frac{\rho(0)}{1 + e^{\left(\frac{r-R}{d}\right)}}$$

Pour tous les noyaux

- 🌐 **Densité centrale** presque identique pour tous les noyaux
 $\rho_0 \approx 0.08$ protons/fm³
saturation des forces nucléaires
→ interaction à courte distance
- 🌐 $R \approx r_0 A^{1/3}$ avec $r_0 = 1.2$ fm
(densité centrale presque identique pour tous les noyaux)
- 🌐 $d \approx 2.5$ fm (régit par la portée de l'interaction nucléaire)



Densité nucléaire

- La densité totale est la somme de la densité de proton et de la densité de neutron
- Les résultats expérimentaux suggèrent la même forme pour les densités de proton et de neutrons.

$$\frac{\rho_Z}{\rho_N} = \frac{Z}{N} \qquad \rho_{\text{tot}} = \rho_Z \left(1 + \frac{N}{Z}\right)$$

- Si $N=Z$ (matière nucléaire symétrique),

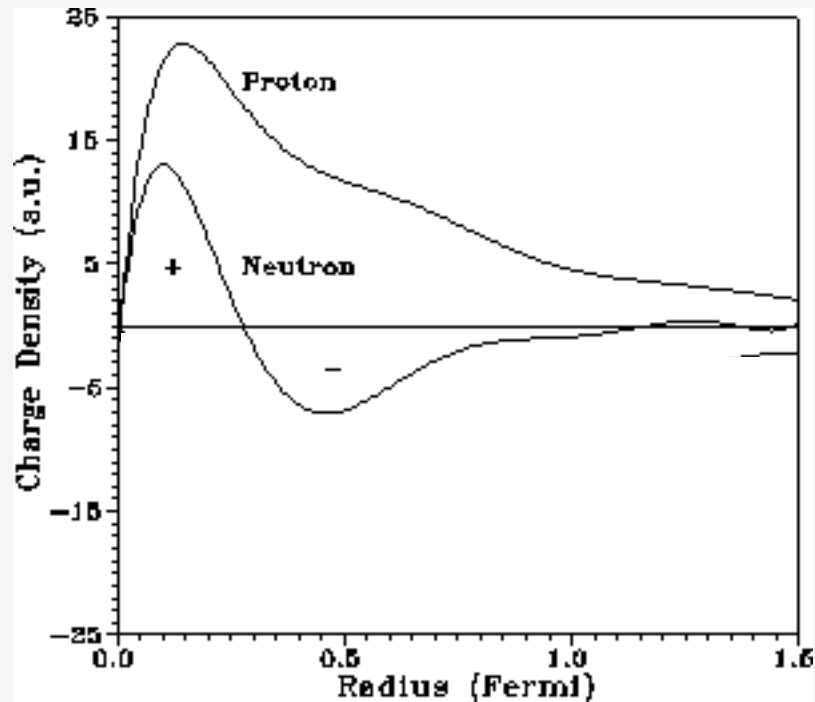
$$\rho_{\text{tot}} = 2\rho_0 = 0.17 \text{ nucleons/fm}^3$$

- Dans l'approximation de la sphère dure, le rayon est :
 $R \approx r_0 A^{1/3}$ avec $r_0 = (3/4\pi\rho_{\text{tot}})^{1/3} \approx 1.1 - 1.2 \text{ fm}$

- Remarque : dans une étoile à neutrons $\rho \approx 10^{14} \text{ neutrons/cm}^3 \approx 2 \cdot 10^{11} \text{ kg/cm}^3$

Densité de charge des nucléons

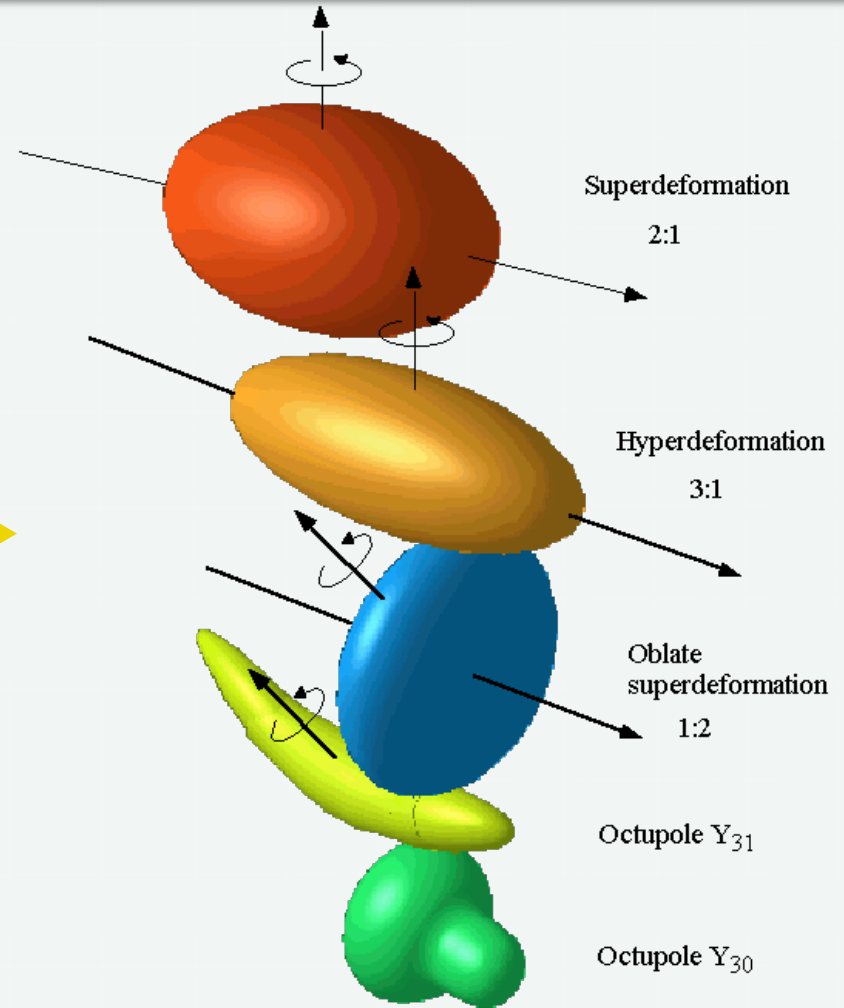
- 🌐 *Expérience de diffusion de d'électrons de très haute énergie*



La forme des noyaux

Les noyaux ne sont pas
nécessairement
sphériques

Déformations extrêmes →



Déformation des noyaux

Le paramètre β est relié à la déformation des noyaux

