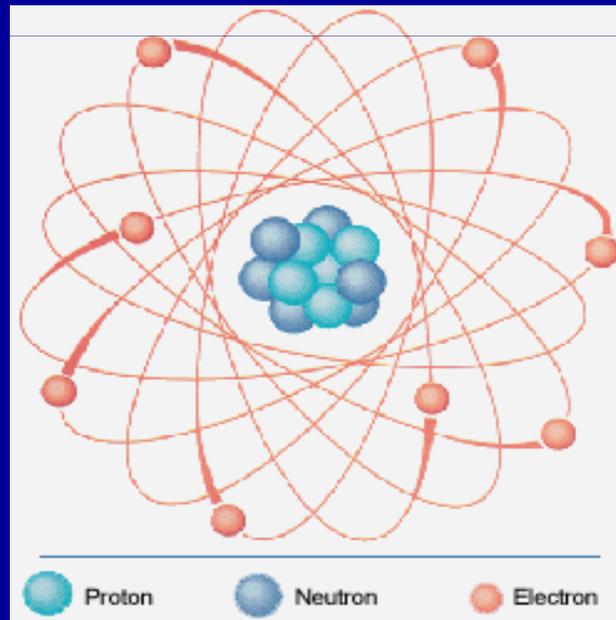


Eléments de Physique Nucléaire





SOMMAIRE

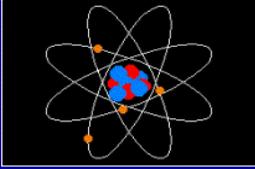
Chapitre I :
Caractéristiques générales du Noyau

Chapitre II :
Énergie de liaison du Noyau

Chapitre III :
Transformations radioactives

Chapitre IV :
Réactions Nucléaires

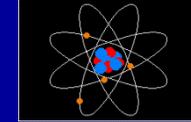
Chapitre V :
Interaction Rayonnement- Matière



Chapitre I :

Caractéristiques générales du Noyau

I - Bref historique



- 1) Atome et Noyau
- 2) Les particules
- 3) Les interactions

II –Généralités et rappels

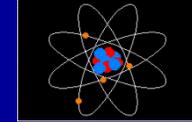
- 1) La physique nucléaire
- 2) Nomenclature
- 3) Principes fondamentaux
- 4) Dualité onde corpuscule
- 5) Principe d'incertitude d'Heisenberg
- 6) Expressions relativistes de l'Energie et de l'impulsion
- 7) Les unités en Physique Nucléaire

III) Répartition des noyaux

IV) Évaluation des dimensions du noyau

- 1) distance minimale d'approche
- 2) Rayon- Nombre de masse

V) Moment cinétique du noyau



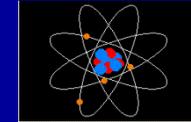
I – Bref Historique

1) Atome et Noyau

- ❑ Dès 420 avant JC, **Démocrite** (philosophe grec) a l'intuition de l'existence des atomes et invente leur nom (« **atomos** » en grec qui signifie insécable).
- ❑ **Aristote** (philosophe grec) conteste cette existence. Il faut attendre le début du XIX^{ème} siècle pour que cette idée reprenne vie.
- ❑ En 1805, **John Dalton** annonce au monde l'existence des atomes.
- ❑ En 1881, **J. J. Thomson** découvre l'un des composants de l'atome. Il s'agit de particules élémentaires négatives appelées en 1891 **électrons**.
- ❑ En 1904, **Thomson** suppose que la **charge positive** est répartie dans un petit volume (sphère) et parsemé **d'électrons** (pudding de Thomson).
- ❑ **1911** Découverte du noyau : **Rutherford** postule que toute **la charge positive de l'atome est concentrée dans un espace minuscule** - qu'il appela **noyau** - alors que la charge négative est distribuée dans une sphère de rayon voisin de celui de l'atome.

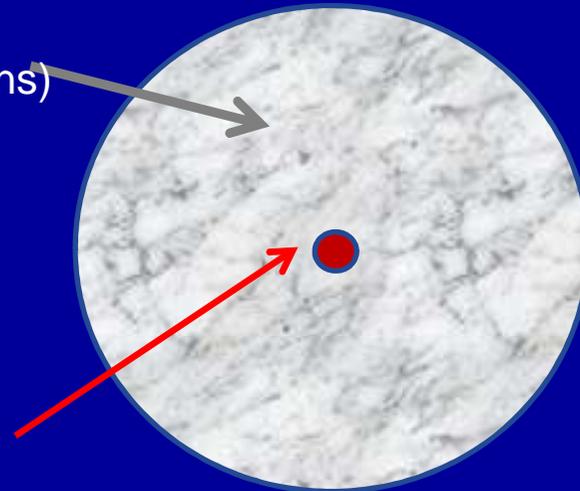


Fig. 1.1 Ernest Rutherford (1871–1937), the father of nuclear physics. This photograph was taken about 1906, five years before his discovery of the atomic nucleus. In 1908 he received the Nobel Prize in chemistry for his investigations into the disintegration of the elements and the chemistry of radioactive substances.



Nuage de charges négatives (électrons)

Noyau très petit et très massif, portant toute la charge positive de l'atome

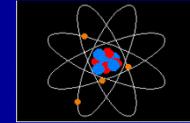


Père de la Physique Nucléaire. Prix Nobel de Chimie en 1908 (substances radioactives)

Prophétie de Rutherford (**Vraie ou fausse ?**) : « Le noyau, bien que de très faible dimensions, est lui-même un système très complexe, comportant des corps chargés **positivement** et **négativement** maintenus cote à cote par des forces électriques intenses » (Rutherford – 1914) -

Tableau périodique Mendéléïev (1869) → élément 112

<table border="0" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>masse</td> <td>▽</td> <td>△</td> <td>▽</td> <td>△</td> </tr> <tr> <td>Z</td> <td>Sb.</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Nom.</td> <td>Solide</td> <td>Gaz</td> <td>Liquide</td> <td>Synthèse</td> </tr> </table>																		masse	▽	△	▽	△	Z	Sb.				Nom.	Solide	Gaz	Liquide	Synthèse													VIII A	
masse	▽	△	▽	△																																										
Z	Sb.																																													
Nom.	Solide	Gaz	Liquide	Synthèse																																										
IA												III A	IV A	V A	VI A	VII A	VIII A																													
10 ¹	1 H											10,81	12,01	14,01	16,00	19,00	4,00																													
Hydrogène												B	C	N	O	F	He																													
3	Li											5	6	7	8	9	10																													
Lithium	Béryllium											Bore	Carbone	Azote	Oxygène	Fluor	Néon																													
22,99	24,31											26,98	28,09	30,97	32,06	35,45	39,95																													
11	Na	12		III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII B		IB		II B	13	14	15	16	17	18																											
Sodium	Magnésium	Aluminium	Silicium	Phosphore	Soufre	Chlore	Argon																																							
39,10	40,08	44,96	47,90	50,94	52,00	54,94	55,85	58,93	58,71	63,54	65,37	69,72	72,64	74,92	78,96	79,90	83,80																													
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											
Potassium	Calcium	Scandium	Titane	Vanadium	Chrome	Manganèse	Fer	Cobalt	Nickel	Cuivre	Zinc	Gallium	Germanium	Arsenic	Sélénium	Brome	Krypton																													
85,47	87,62	88,91	91,22	92,91	96,91	98,91	101,07	102,91	106,40	107,87	112,40	114,82	118,70	121,76	127,60	126,90	131,30																													
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											
Rubidium	Strontium	Yttrium	Zirconium	Niobium	Molybdène	Technétium	Ruthénium	Rhodium	Palladium	Argent	Cadmium	Indium	Étain	Antimoine	Tellure	Iode	Xénon																													
132,91	137,34	174,97	178,46	180,95	183,85	186,20	190,20	192,20	195,09	196,97	200,59	204,37	207,19	208,98	208,98	209,97	222,02																													
55	Cs	56	Ba	71	Lu	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											
Césium	Baryum	Lutécium	Hafnium	Tantale	Tungstène	Rhénium	Osmium	Iridium	Platine	Or	Mercure	Thallium	Plomb	Bismuth	Polonium	Astato	Radon																													
223,02	226,03	260,11																																												
87	Fr	88	Ra	103	Lr																																									
Francium	Radium	Lavrencium																																												
				L																																										
				138,91	140,12	140,91	144,24	146,00	160,36	151,96	157,25	168,93	152,00	164,93	167,25	168,93	173,04																													
				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															
				Lanthane	Cérium	Fraséodyme	Néodyme	Prométhium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium																													
				227,03	232,04	231,04	238,03	237,05	242,06	243,06	247,00	247,07	251,08	264,00	267,10	268,10																														
				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															
				Actinium	Thorium	Protactinium	Uranium	Neptunium	Plutonium	Americium	Curium	Berkélium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendélévium	Nobelium																													
				A																																										



2) Les particules

- 1932 Découverte du neutron (**Chadwick**). **Atome = protons + neutrons + e-**
- 1930 Hypothèse des antiparticules (**Dirac**) **e+**
- 1933 Hypothèse du neutrino **v** (**Pauli**)
- 1950 **Gell-Mann** introduit les **quarks**, objets « élémentaires » constituant les protons et les neutrons. Jamais identifiés à ce jour **MAIS** leur existence est confirmée par les données expérimentales.

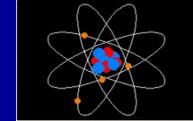
Situation actuelle - Résumé:

	Familles			Charge
	F1	F2	F3	
Quarks	u (up)	c (charme)	t (top)	2/3 e
	d (down)	s (strange)	b (beauté)	-1/3 e
Leptons	e-	μ-	τ-	-e
	ν _e	ν _μ	ν _τ	0

12 constituants groupés en 3 familles de 4 éléments. Seule la première famille décrit le monde physique. Exemple:

- le proton: 2 quarks **u** et d'un quark **d** : $p = (uud)$
- le neutron : un quark **u** et 2 quarks **d** : $n = (udd)$

3) Les Interactions



Les particules interagissent entre elles par l'intermédiaire de **quatre types d'interactions**, qui diffèrent entre elles par leur **nature**, leur **portée** et leur **intensité** :

<i>Interaction</i>	<i>Intensité</i>	<i>Portée</i>
Forte	1	courte : 1 fm (10^{-15} m)
Électromagnétique	10^{-2}	Longue $1/r^2$
Faible	10^{-14}	courte 10^{-2} fm
Gravitationnelle	10^{-44}	Longue $1/r^2$

Les **interactions Fortes** interviennent entre quarks, c'est-à-dire entre les nucléons (assurent la cohésion des noyaux)

Les **interactions Électromagnétiques** interviennent quand les particules en interaction sont chargées

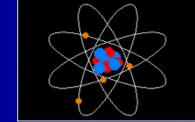
Les **interactions Faibles** agissent entre Leptons (émission β).

Les **forces gravitationnelles** interviennent quand les particules en interaction ont une masse. (seront négligées ici).

Caractéristiques de l'Interaction Forte entre nucléons (p, n)

- ❑ Attractive (noyau = état lié)
- ❑ Saturée (pas de noyau stable > uranium $Z = 92$)
- ❑ Forte $\sim \text{MeV}$ (électromagnétisme $\sim \text{keV}$)
- ❑ Courte portée $\sim \text{fermi}$; au delà l'électromagnétisme domine
- ❑ Indépendante de charge $p \sim n$

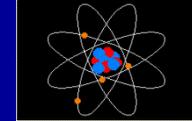
II –Généralités et rappels



1) La physique nucléaire :

- est l'étude des constituants du noyau **ET** de leurs interactions.
- est un cas particulier de l'étude du **problème à N corps** (ici les nucléons) en interaction **Forte et électromagnétique**.
- Elle fait appel aux résultats et méthodes de la **Physique Quantique** et aux lois de la **Dynamique relativiste**.
- Les données **expérimentales** se déduisent de :
 - la **Spectroscopie** (observation des propriétés des noyaux ou des particules),
 - des **désintégrations** radioactives
 - de l'étude de **diffusion** de particules

2) Nomenclature



- le noyau est un système de **Z** protons et **N** neutrons en interaction forte ET électromagnétique.

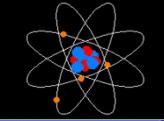
- **$A = N + Z$** est le nombre total de nucléons, ou nombre de masse. Pour les noyaux naturels, **A** est compris entre **1** (hydrogène) et **238** (uranium)

- Z varie entre **Z = 1** (hydrogène) et **Z = 92** (uranium) .

Remarque : Z = 43 (technétium) et Z = 61 (prométhéum) n'existent pas naturellement. Ils ont été créés artificiellement

Dans la nature il existe **325 nucléides** (stables +radioactifs) qui appartiennent à **90** éléments





3) Principes fondamentaux

□ Équivalence de la masse et de l'énergie

A toute masse m_0 correspond une énergie E.

$$E = m_0 \cdot c^2$$

une particule au repos possède une énergie : son énergie de masse au repos.

Chaque fois que de la matière disparaît, de l'énergie apparaît et inversement.

□ Conservation de la charge : La Charge électrique Q d'un système est conservée quand le système se transforme

□ Conservation du nombre de nucléons : au cours d'une transformation le nombre de nucléons reste constant

□ Conservation de l'énergie : Chaque particule possède une énergie, somme de son énergie de masse au repos et de son énergie cinétique E_{cin} :

$$E = m_o c^2 + E_{cin} = m.c^2 \quad (1)$$

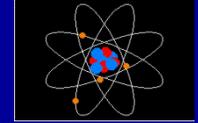
Où $m = \frac{m_o}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ avec $\beta = v/c$ et $c = 2,99792458. 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

□ Conservation de l'impulsion: Au cours d'une interaction, l'impulsion totale d'un système de particule est conservée.

Une particule en mouvement , de vitesse V , a une impulsion $\vec{p} = m \vec{v}$ (2)

Des relations (1) et (2) on déduit la relation entre énergie et impulsion :

$$E^2 = (p.c)^2 + (m_o.c^2)^2$$



4) Dualité onde corpuscule:

A toute particule doit être associée une onde et réciproquement (De Broglie):

$$\text{particule } (E, p) \iff \text{onde } (\nu, \lambda)$$

Où ν est la fréquence et λ la longueur d'onde de l'onde associée.

avec $E = h \nu$

et $\lambda = h/p = h/mV$

ou bien : $E = \hbar \omega$ et $k = p / \hbar$

h est la constante de plank: $h = 6,626.10^{-34} \text{ J.s}$ et $\hbar = h / 2\pi$

Les couples (λ, k) et (E, p) caractérisent respectivement l'aspect onde et l'aspect corpusculaire de la particule.

5) Principe d'incertitude d'Heisenberg :

si δx est l'incertitude sur la composante x du vecteur position \mathbf{r}

$$\delta x \cdot \delta p > h$$

ou bien:

$$\delta E \cdot \delta t > h$$

Énoncé :

il est impossible d'imaginer un principe de mesure qui rende infinie la précision sur les mesures simultanées de la position et de la quantité de mouvement

6) Expressions relativistes de l'Energie et de l'impulsion

$$E = \gamma m_0 c^2 \quad \text{avec} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \beta = \frac{V}{c}$$
$$\vec{p} = \gamma m_0 \vec{V}$$

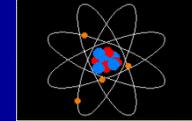
$$E^2 = c^2 \vec{p}^2 + m_0^2 c^4$$

Pour des particules sans masse (photons) :

$$E = \hbar \omega = h\nu \quad h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ j.sec}$$

$$\text{avec : } \omega = 2\pi\nu, \quad h = 2\pi\hbar$$

7) Les unités en Physique Nucléaire :



- **Longueurs** : 1 femto mètre = 10^{-15} m = 1 Fermi

Le rayon des noyaux varie entre ~ 1 Fermi (*p*) et ~ 7 Fermi (*noyaux lourds*).

- **Masse** : *Unité de masse atomique (uma)*

$$1 \text{ u} = \frac{\text{masse de } ({}^{12}_6\text{C})}{12} = \frac{\text{Mol} / N_A}{12} = \frac{12}{12.6,02.10^{23}} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

	m (g)	m (u)	m (MeV/c ²)	m / m _e
Neutron	1.6747 10 ⁻²⁴	1,00866	939.57	1839
Proton	1.6724 10 ⁻²⁴	1,00727	938.28	1836
Electron	9.108 10 ⁻²⁸	5,485. 10 ⁻⁴	0.511	1

$$\frac{m_n - m_p}{\frac{1}{2}(m_n + m_p)} = 10^{-3}$$

Avec les masses exprimées en uma, les nucléons ont des masses voisines de 1 u : la **masse exprimée en uma** sera voisine du **nombre de masse A**

Remarque : la différence relative entre la masse du neutron et celle du proton est de l'ordre de 0,1% :

- Énergie:

L'unité d'énergie est l'électronvolt (eV) . C'est l'énergie acquise par une charge élémentaire e soumise à une différence de potentiel de 1 volt.

$$1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Joules}$$

Multiples : $1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$ et $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$

Dans la pratique on n'utilise non pas les masses, mais leur équivalence énergétique :

$$E = m \cdot c^2 = u \cdot c^2 = 1,66 \cdot 10^{-27} (3 \cdot 10^8)^2 = 1,495 \times 10^{-11} \text{ Joules}$$

$$E = u \cdot c^2 = \frac{1,495 \cdot 10^{-11}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 931,5 \text{ MeV}$$


$$1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV} / c^2$$

III) Répartition des noyaux (diagramme de Segré)

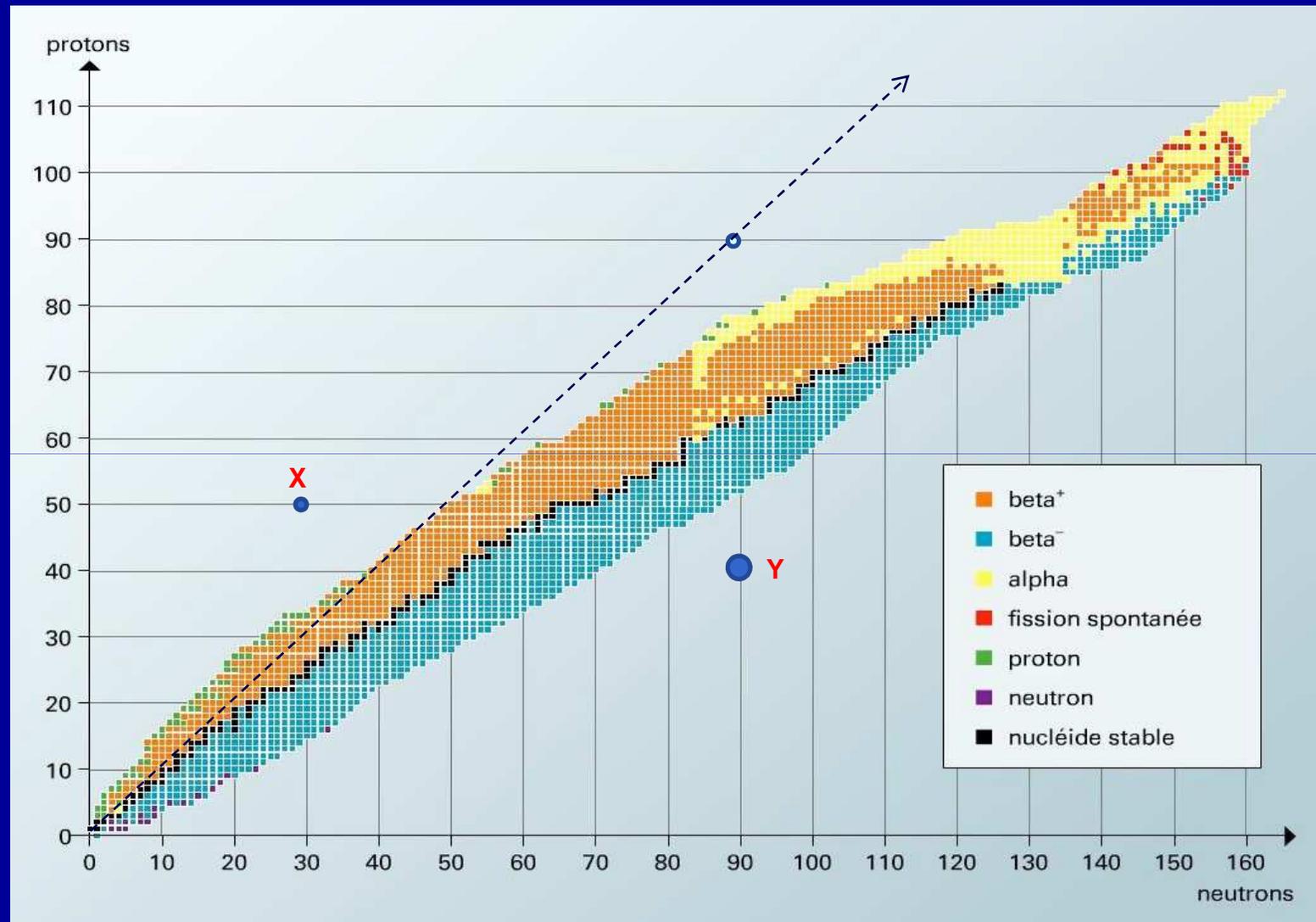
- **Plus de 2000** nucléides (types de noyaux) connus actuellement
- **274** sont stables, c'est à dire que leurs propriétés restent constantes sur de long intervalles de temps ($> 10^9$ ans).
- **Les autres** sont radioactifs (**radionucléides**) : Ils évoluent spontanément par émission soit d'un rayonnement électromagnétique soit d'une particule.
- 2 sortes de radionucléides (R.N) : les **RN naturels**, qu'on peut extraire de minerais (U, Th, K) et les **RN artificiels** , produits en laboratoire par des réactions nucléaires.

Remarque : Actuellement il n'existe pas de nuclides stables artificiels.

Les noyaux résultent d'un assemblage de Z protons et de N neutrons.

Mais toute combinaison de N et de Z ne constitue pas un noyau.

Sur le graphique des nuclides connus (**Segré**), la place d'un nuclide est définie par le nombre de **protons Z** (en ordonnée) et le nombre de **neutrons N** (en abscisse).



Commentaire :

- Les noyaux sont groupés suivant une **bande**, qui se confond avec la bissectrice pour les éléments légers ($N = Z$)
- Les noyaux stables sont répartis le long d'une ligne située au centre de la bande : C'est la **ligne de stabilité ou vallée de stabilité**. Cette ligne s'arrête au noyau de Bismuth ($Z= 83$)
- Pour un Z donné (ligne horizontale) on a tous les isotopes d'un même élément. **Les isotopes instables** sont situés de part et d'autre des isotopes stables (carrés noirs)
- Pour les éléments plus lourds la bande s'écarte de la bissectrice en s'infléchissant vers le bas , à cause de l'influence croissante de la répulsion coulombienne ($N = 1,5 Z$)

-

On peut donc définir 4 zones dans le diagramme de Segré :

- la **vallée** ou **ligne de stabilité** (qui contient les 282 noyaux stables)
- la zone **au dessus de la vallée** et qui contient des **noyaux instables** car ils renferment un nombre trop grand de protons par rapport à celui des neutrons .
- la zone en **dessous de la ligne de stabilité** comprenant des **noyaux instables** car renfermant un nombre trop élevé de neutrons par rapport aux protons
- une zone **au delà de $Z = 83$** (Bismuth) qui est celle des **noyaux instables** car trop « gros ». La force coulombienne, répulsive, devient trop importante.

Influence de la parité

Si on procède à un dénombrement des noyaux stables selon la parité il apparaît que:

N Z	A pair		A impair	
	pair pair	impair impair	pair impair	impair pair
nombre	165	4	50	55

- les nuclides pairs–pairs sont les plus abondants (60%) : ce sont les plus stables (relation linéaire entre abondance et stabilité).
- pour A pair seuls les pairs-pairs existent (à l'exception de ${}^2_1\text{H}$; ${}^6_3\text{Li}$; ${}^{10}_5\text{B}$; ${}^{14}_7\text{N}$ qui sont des éléments légers ayant N=Z)
- pour A impair, il n'y a **qu'un seul isobare stable** (sauf pour A=113 et A= 123)
- Enfin une stabilité exceptionnelle caractérise certains nombres pair de nucléons : **20, 28, 50, 82**. Ces nombres dits « **magiques** » correspondent à des couches fermées de nucléons identiques

IV) Évaluation des dimensions du noyau

En l'absence d'interaction le projectile aurait un mouvement de translation rectiligne et uniforme le long de Sx

Hypothèse : La seule force agissant entre les particules est la répulsion Coulombienne.

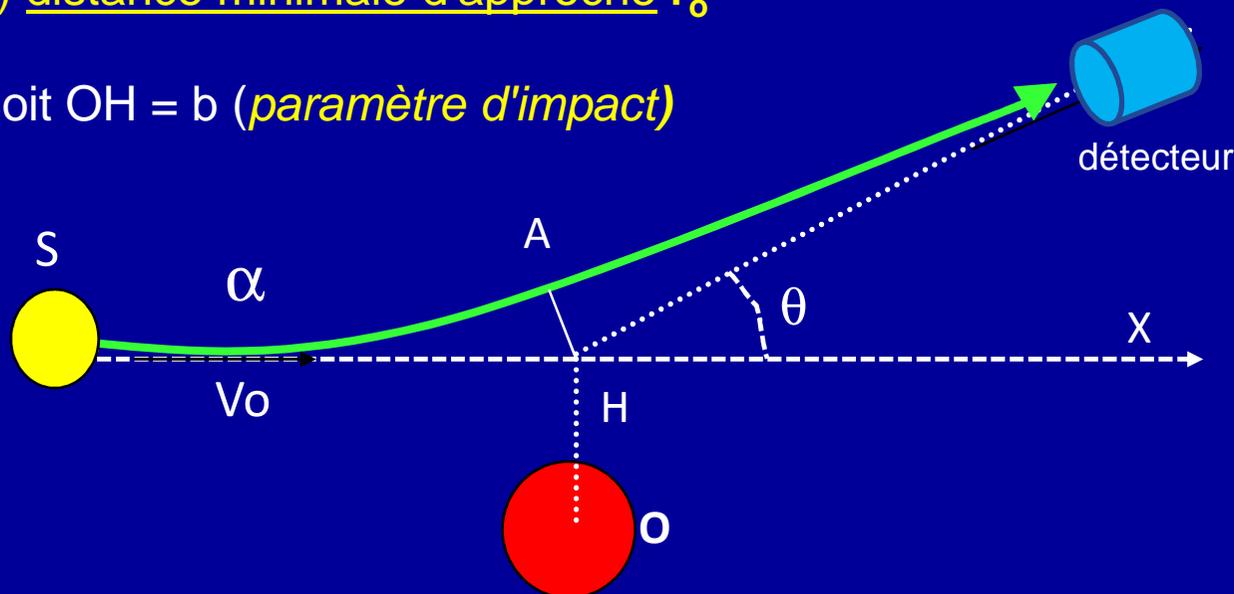
Du fait de l'interaction coulombienne α suit une trajectoire hyperbolique et émerge selon une autre direction asymptotique d'angle θ .

L'angle de déflexion θ dépend de b .

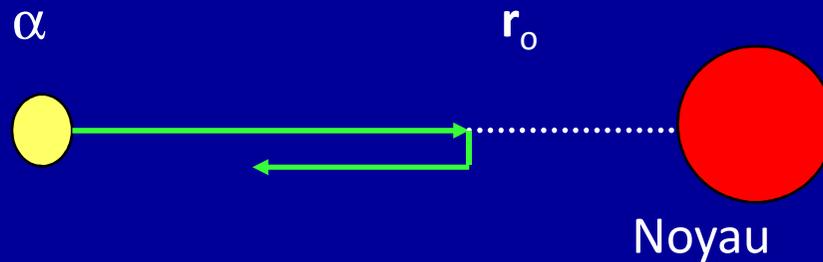
$$\operatorname{tg} \frac{\theta^*}{2} = \frac{r_o}{2b}$$

1) distance minimale d'approche r_o

Soit $OH = b$ (*paramètre d'impact*)



Dans le cas particulier où $\mathbf{b} = 0$ (choc central ou de plein fouet). Le projectile s'approche à la distance minimale r_0 et rebrousse chemin.



$$\frac{p_o^2}{2m} = \frac{p^2}{2m} + \frac{P_N^2}{2M} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{zZe^2}{r}$$

$$\vec{p}_o = \vec{p} + \vec{P}_N$$

En éliminant P_N entre les deux équations de conservation on obtient :

$$r = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{zZe^2}{\frac{p_o^2}{2} \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{M} \right) + \frac{pp_o}{M} - \frac{p^2}{2} \left(\frac{1}{m} + \frac{1}{M} \right)}$$

La distance r est minimale si la dérivée du dénominateur est nulle, c'est-à-dire pour :

$$p = \frac{M_o \cdot p_o}{M}$$

Où M_o est la masse réduite du système, définie par $\frac{1}{M_o} = \frac{1}{m} + \frac{1}{M}$

La valeur minimale r_o de r , est :

$$r_o = \frac{1}{4\pi\epsilon_o} \cdot \frac{2 \cdot z \cdot Z \cdot e^2}{M_o V_o^2} \cong \frac{1}{4\pi\epsilon_o} \cdot \frac{z \cdot Z \cdot e^2}{T_\alpha}$$

Avec : z et Z les numéros atomiques respectifs de la particule incidente α et de la cible N
 V_o vitesse initiale de la particule incidente et T_α son énergie cinétique

Etablir et discuter cette relation

2) Relation Rayon- Nombre de masse

Au lieu d'une particule α on utilise des **électrons** ayant une grande énergie cinétique. Les mesures des rayons des noyaux montrent que le rayon du noyau est proportionnel à $A^{1/3}$

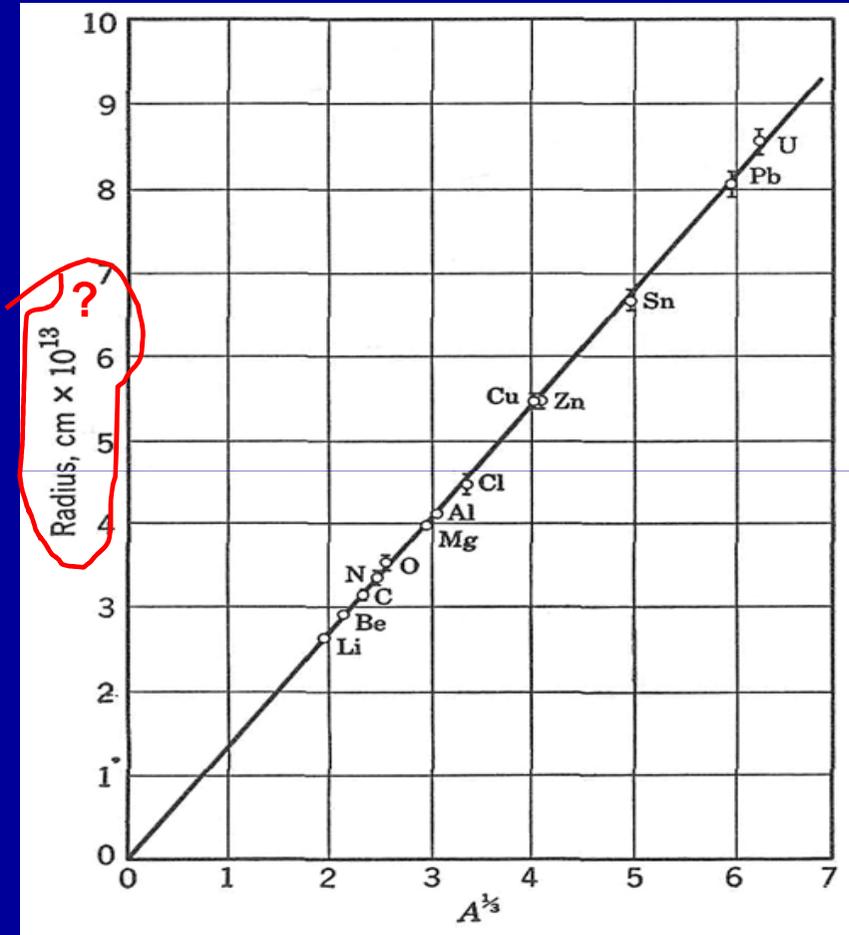
$$R = R_0 A^{\frac{1}{3}}$$

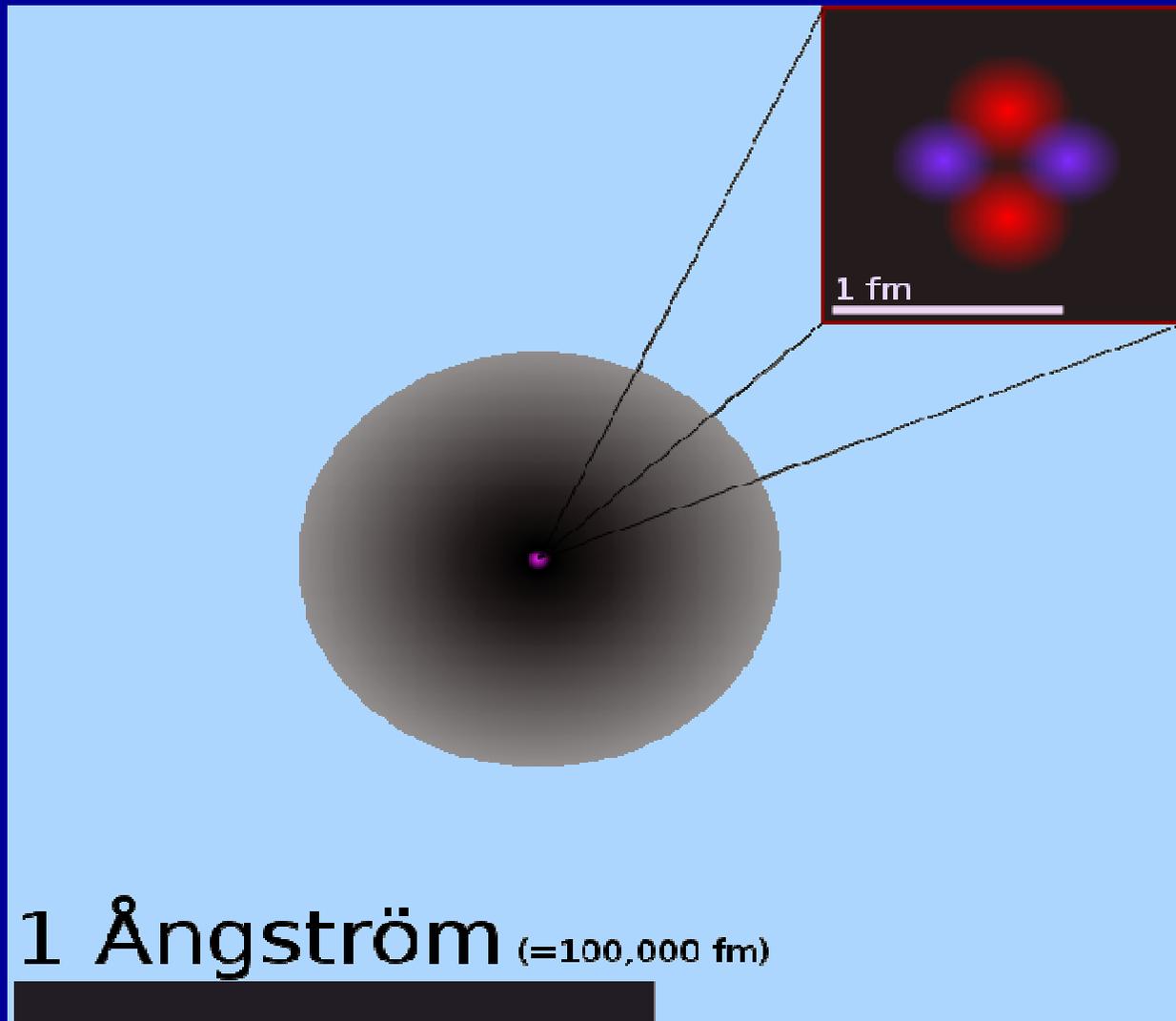
Avec $1,2 < R_0 < 1,5$ Fermi

Le volume du noyau est donc proportionnel au nombre de nucléons A .

C'est-à-dire que le nombre n de nucléons par unité de volume est constant

Cette propriété est appelée **saturation des forces nucléaires**





Rayon du noyau $\ll 10^{-4}$ Rayon de l'atome

Différence d'échelle considérable entre la physique nucléaire et la physique atomique !!

❖ Densité des noyaux

Pour simplifier on supposera que $M_p = M_n = m$:

$$d = \frac{3}{4\pi} \frac{A \cdot m}{R_o^3 \cdot A}$$

A.N : $d = 2 \cdot 10^8$ tonnes par cm^3 !!!

Masse volumique nucléaire » 10^{14} Masse volumique atomique

Remarque : cette densité est indépendante de A, donc elle est la même pour tous les noyaux.

Cette indépendance traduit la saturation des forces nucléaires.