

NOYAUX : DESCRIPTION, PROPRIÉTÉS & MODÈLES

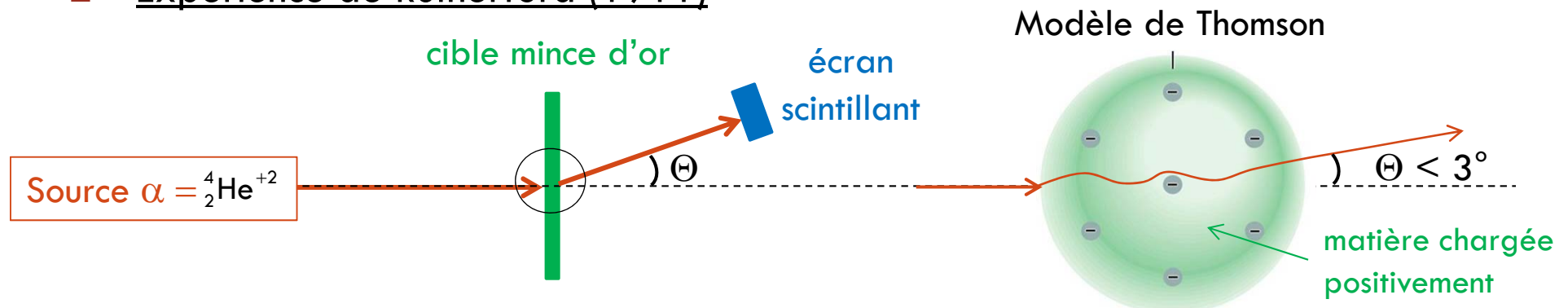
Partie I

Physique nucléaire & ses applications

Découverte du noyau

2

- L'atome contient des électrons, particules « légères » chargées négativement
- L'atome est neutre électriquement : la charge positive qu'il contient doit être exactement opposée à celle des électrons
- masse de l'électron \ll masse de l'atome : la masse de l'atome est principalement associée à la charge positive
- Modèle de J. J. Thomson : « *plum pudding* » model
 - les électrons sont immergés dans une sphère, de rayon équivalent à celui de l'atome ($\sim \text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$), et contenant une densité uniforme de charges positives
- Expérience de Rutherford (1911)

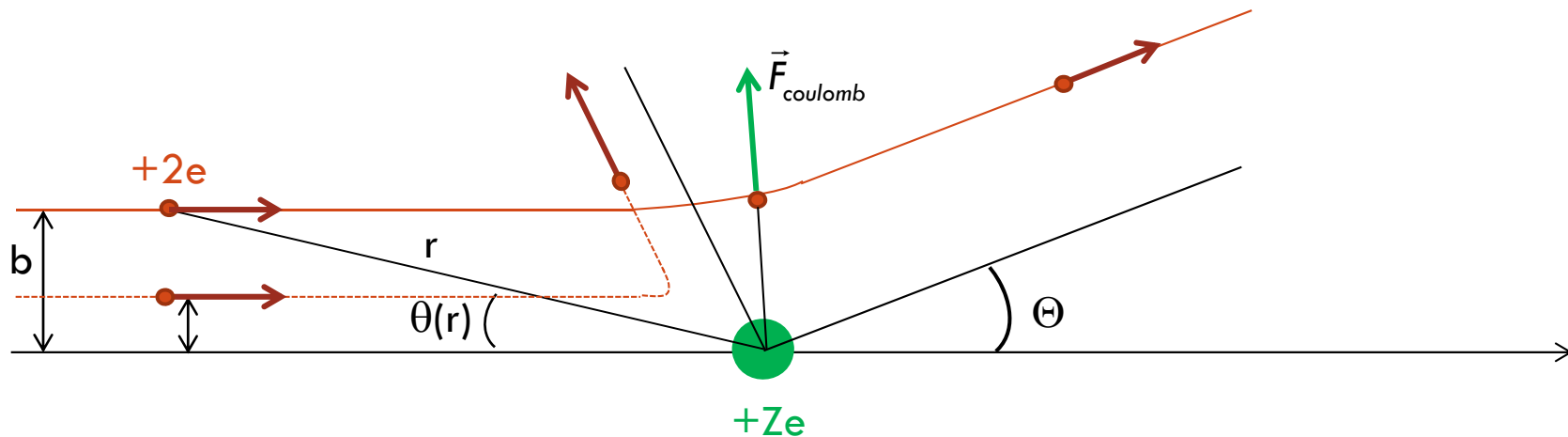


Observation : 99% des particules α détectées à des angles $< 3^\circ$,
0,01% des particules détectées à $90^\circ < \Theta < 180^\circ$
→ incompatible avec le modèle de Thomson

Découverte du noyau

3

- modèle de Rutherford : toute la charge positive de l'atome est concentrée dans une région confinée au centre de l'atome appelé le noyau
 - Si la particule α passe suffisamment près du noyau, de charge $+Ze$, elle ressent une forte répulsion coulombienne, et est donc déviée à de grands angles

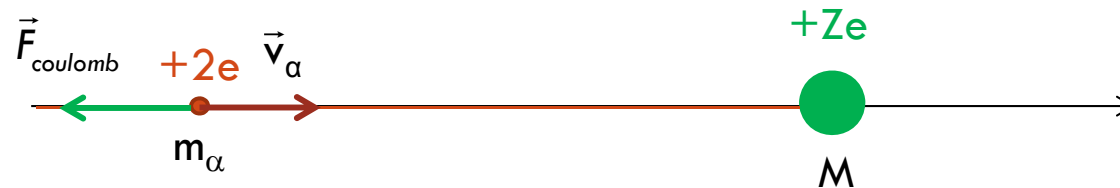


- lois de conservation pour les forces centrales
 - conservation de l'énergie totale : $E = T + E_p$
 - conservation de la quantité de mouvement totale : $\vec{p} = m\vec{v}$
 - conservation du moment angulaire total : $\vec{\ell} = \vec{r} \wedge m\vec{v}$

Découverte du noyau

4

- hypothèses simplificatrices
 - ▣ choc frontal
 - ▣ $m_\alpha \ll M$
 - ▣ trajectoire asymptotique $\leftrightarrow E_p \sim 0$
- conservation de l'énergie totale : $m_\alpha v_\alpha^2 = m_\alpha v_\alpha'^2 + M V'^2$
- conservation de la quantité de mouvement : $m_\alpha v_\alpha = m_\alpha v_\alpha' + M V'$



$$m_\alpha v_\alpha = m_\alpha v_\alpha' + M V' \Rightarrow M V'^2 = \frac{m_\alpha^2 (v_\alpha - v_\alpha')^2}{M} = m_\alpha (v_\alpha^2 - v_\alpha'^2)$$

$$\Rightarrow \frac{m_\alpha}{M} (v_\alpha - v_\alpha') = (v_\alpha + v_\alpha') \Rightarrow v_\alpha \left(\frac{m_\alpha}{M} - 1 \right) = v_\alpha' \left(1 + \frac{m_\alpha}{M} \right)$$

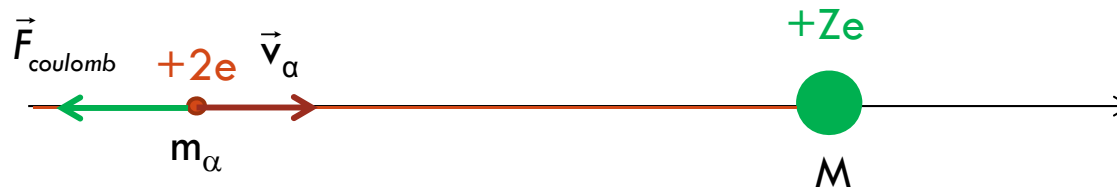
$$m_\alpha \ll M \Rightarrow v_\alpha \approx -v_\alpha' \quad \text{et} \quad V' \approx 0$$

Découverte du noyau

5

- limite supérieure de la dimension du noyau
- ⇒ Distance minimale d'approche dans le cas d'un choc frontal : d_{\min}
 - conservation de l'énergie totale de la particule α en r_{∞} et d_{\min} :

$$\rightarrow d_{\min} = \frac{k}{T_{\alpha}}$$



Expérience de Rutherford (1911)

$$\left. \begin{array}{l} T_{\alpha} = 5 \text{ MeV} \\ \frac{k}{Z_{\alpha} Z_{\text{Au}}} = 2,304 \cdot 10^{-28} \text{ (J.m)} \end{array} \right\} \Rightarrow R_{\text{noyau}} < d_{\min} \approx 45 \text{ fm} \text{ soit } \sim 10^5 \text{ fois plus petit que la dimension de l'atome}$$

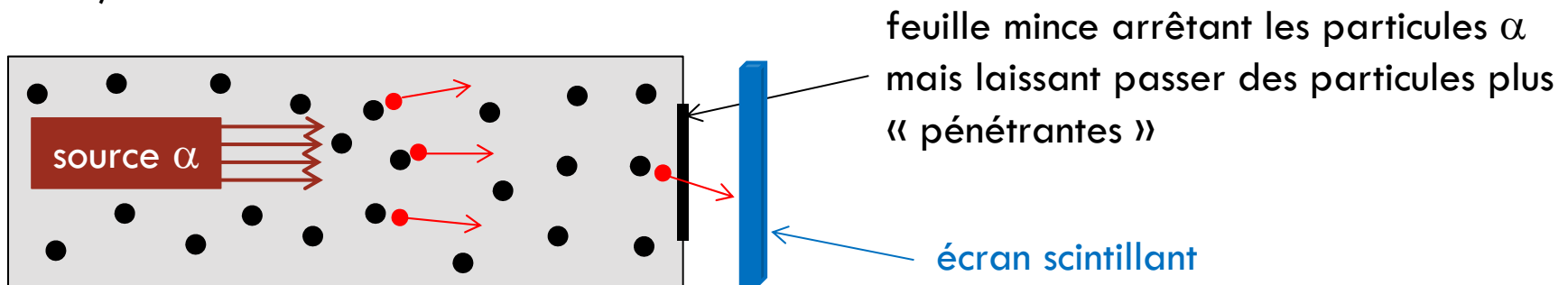
$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$

Découverte du noyau

6

□ Découverte du proton par Rutherford (1919)

- immersion d'une source émettrice de particules α dans une enceinte contenant un gaz (azote, fluor)



- identification d'une nouvelle particule « massive » émise par le noyau des atomes du gaz lorsqu'ils sont bombardés par des particules α , de charge $+e$: le proton
- $M_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \sim 1800$ fois plus grande que la masse de l'électron $m_{e^-} = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
- 1^{ère} réaction nucléaire : ${}_2^4\text{He} + {}_7^{14}\text{N} \rightarrow {}_8^{17}\text{O} + p$

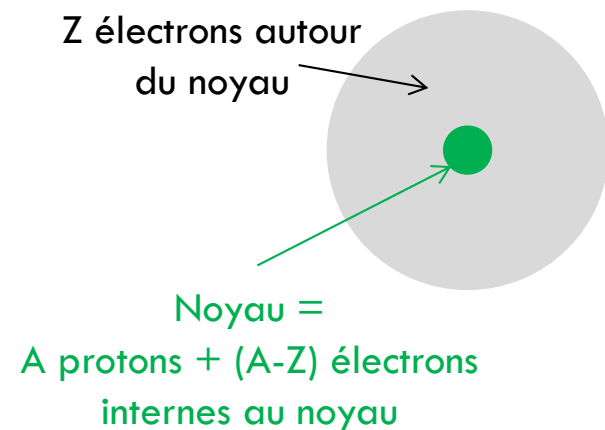
- Nouvelle représentation du noyau

- masse de l'atome = masse du noyau + masse des électrons
 \sim masse du noyau = $A m_p$
└───────────> nombre de masse

-  atome neutre

→ Au sein du noyau : (A-Z) paires neutres (e^- - proton)

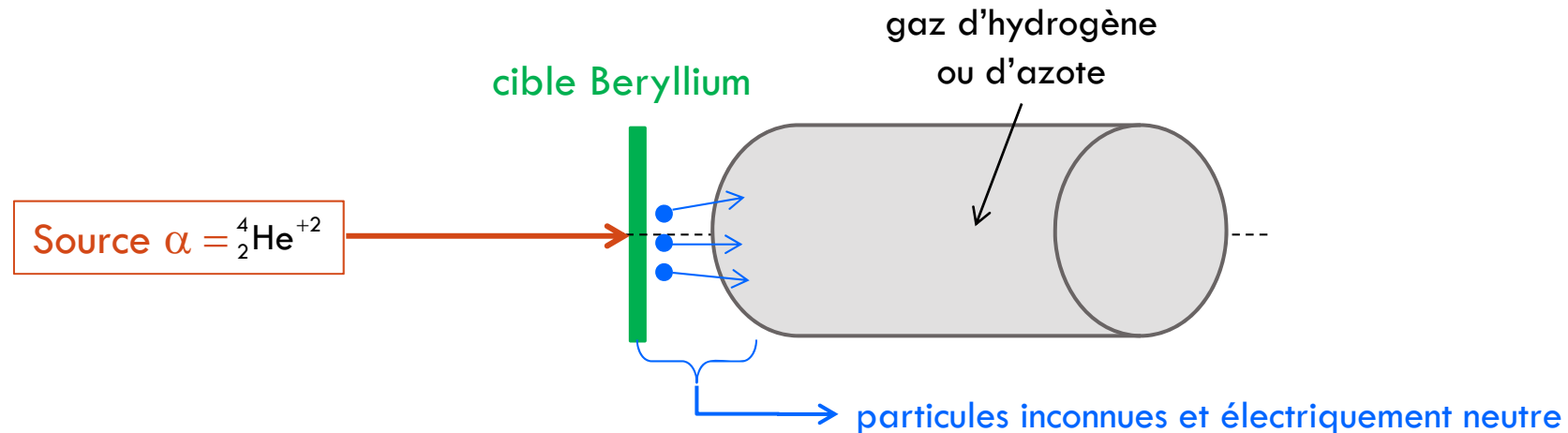
+ Z protons non « neutralisés »



Découverte du noyau

7

- découverte du neutron : expérience de Chadwick (1932)

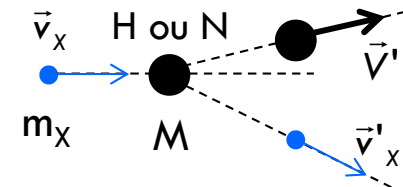


- Mesure de l'énergie de recul des atomes H et N après transfert d'énergie de la particule inconnue \leftrightarrow collision

- $v_x \gg V_{H,N}$ tel qu'au moment de la collision $V_{H,N} \sim 0$

- transfert maximal d'énergie lorsque la collision est frontale

→ Chadwick a mesuré : $E_{\text{cin}}^{\text{max}}(M_H) = 5,7 \text{ MeV}$ et $E_{\text{cin}}^{\text{max}}(M_N) = 1,42 \text{ MeV}$



$$\frac{E_{\text{cin}}^{\text{max}}(M)}{E(m_x)} = \frac{4 M m_x}{(M + m_x)^2}$$

$$\frac{E_{\text{cin}}^{\text{max}}(M_H)}{E_{\text{cin}}^{\text{max}}(M_N)} = \frac{5,7 \text{ MeV}}{1,42 \text{ MeV}} = C \Rightarrow r^2(14C - 1) + r(28C - 28) + (14C - 14^2) = 0$$

$$\Rightarrow r = \frac{m_x}{M_H} \sim 1 \Rightarrow \text{Masse des particules neutres} \sim \text{masse du proton}$$

\Rightarrow Nouvelle représentation du noyau

Propriétés générales du noyau

8

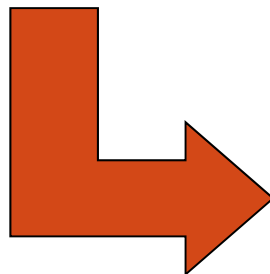
- un noyau ${}^A_Z X$
 - Z protons, N neutrons
 - $A = Z + N$: nombre de masse
 - Z : nombre d'électrons de l'atome, définit l'élément (mêmes propriétés chimiques)

Etat physique du corps simple(25°C, 1 atm)

SOLIDE										LIQUIDE										GAZEUX										SYNTHESE									
* Lanthanides										Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu																
# Actinides										Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr																

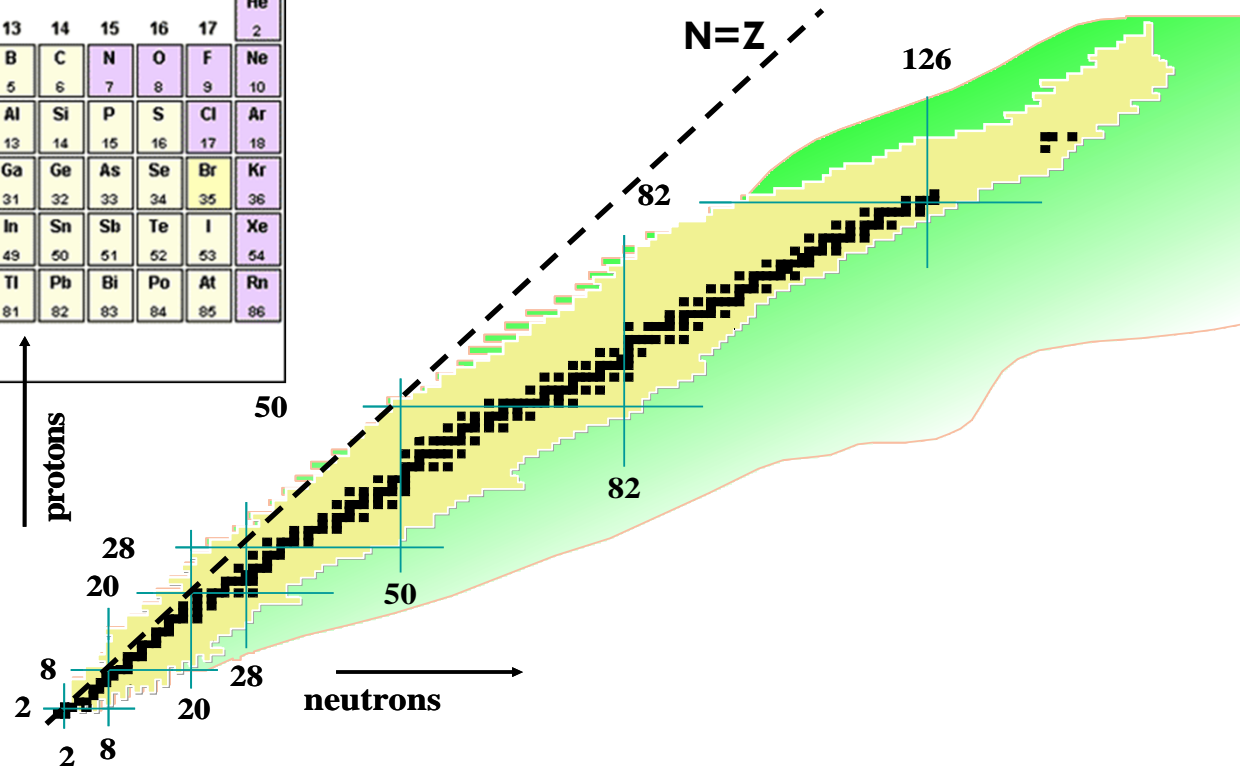
1																	18					
1	H																	He				
2	Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
6	Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
7	Fr	Ra	Ac#	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt													

chimie



Physique
nucléaire

Carte des noyaux



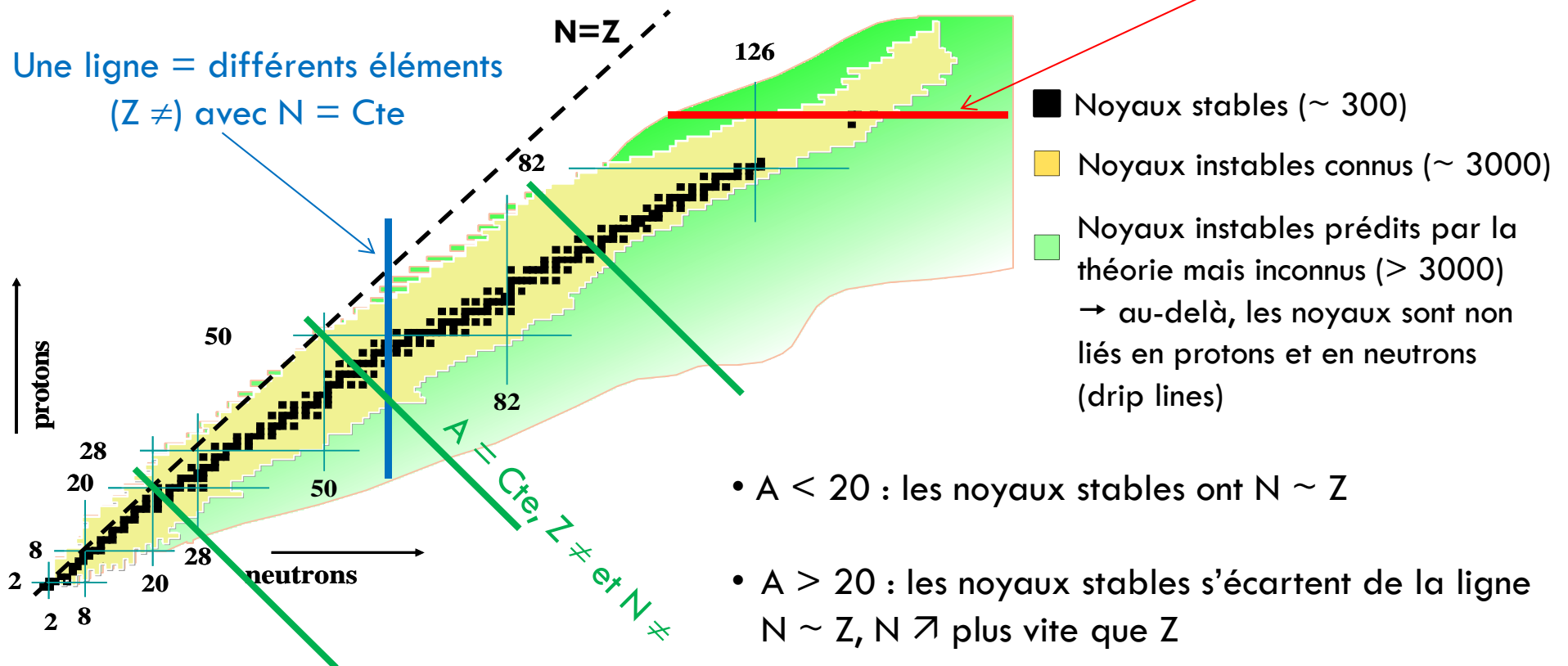
Propriétés générales du noyau

9

□ un noyau A_ZX

- isotopes : noyaux de même Z (${}^{233}_{92}\text{U}$, ${}^{234}_{92}\text{U}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{238}_{92}\text{U}$)
- isotones : noyaux de même $N = A - Z$ (${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{15}_7\text{N}$, ${}^{14}_6\text{C}$)
- isobares : noyaux de même A (${}^{40}_{20}\text{Ca}$, ${}^{40}_{19}\text{K}$, ${}^{40}_{18}\text{Ar}$)

Une ligne = isotopes d'un même élément : $Z = \text{Cte}$, $N \neq$



Propriétés générales du noyau

10

- densité de la matière nucléaire

$$\rho \approx \frac{A m_{\text{nucléon}}}{V_{\text{noyau}}}$$

- représentation schématique du noyau ~ assemblée de A nucléons, chacun ayant un volume d'interaction

$$v_{\text{nucléon}} = \frac{4}{3} \pi r^3$$

Hyp ① : force nucléaire à courte portée

→ chaque nucléon interagit avec ses plus proches voisins $\Rightarrow v_{\text{nucléon}} = \frac{4}{3} \pi r_0^3$
indépendant de A

\Rightarrow Volume du noyau : $V_{\text{noyau}} = A v_{\text{nucléon}} \propto A$

\Rightarrow densité indépendante de A

Hyp ② : force nucléaire à longue portée

→ chaque nucléon interagit avec l'ensemble des (A - 1) nucléons $\Rightarrow v_{\text{nucléon}} = \frac{4}{3} \pi r^3$
dépendant de A

\Rightarrow Volume du noyau : $V_{\text{noyau}} = A v_{\text{nucléon}} \propto A^\alpha, \alpha \neq 1$

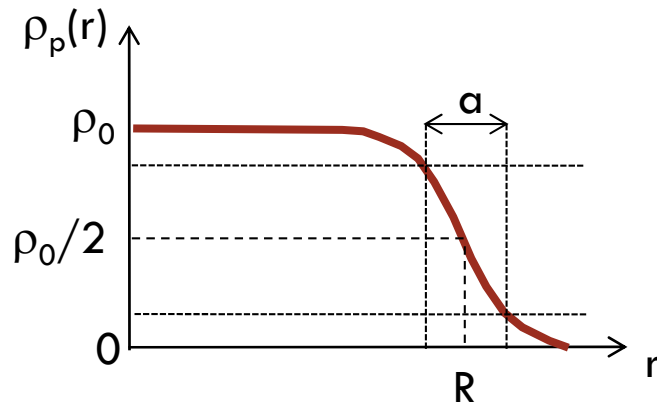
\Rightarrow densité nucléaire dépendante de A

Propriétés générales du noyau

11

- Mesure expérimentale de la distribution des protons dans les noyaux stables
 - diffusion d'électrons de \sim qq centaines de MeV, sensibles uniquement à l'interaction coulombienne avec les protons
 - différentes modélisations du noyau sont testées pour reproduire les mesures (angles de diffusion des électrons) : noyau « ponctuel », sphère uniformément chargée, sphère uniformément chargée à bord diffus, ...
- Expression de la densité de protons dans le noyau, $\rho_p(r)$, et valeurs des paramètres reproduisant les mesures expérimentales

$$\rho_p(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{r-R}{0,228a}\right)} \quad \text{avec} \quad \rho_p(r=R) = \frac{\rho_0}{2} \quad \text{et} \quad \rho_0 \text{ tel que} \quad \int \rho_p(r) d^3\vec{r} = Z$$



- densité de charge constante à « l'intérieur » du noyau
- à la « surface », la densité décroît

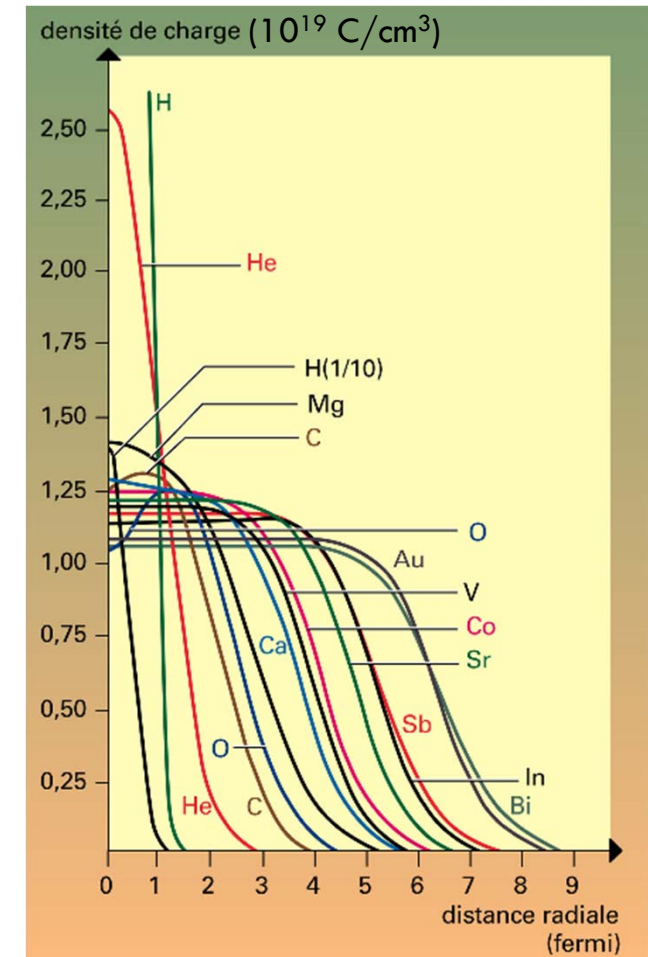
⇒ le noyau peut être représenté par une sphère de rayon R uniformément chargée en volume mais à bord diffus (la densité de charge ne s'annule pas brusquement)

Propriétés générales du noyau

12

noyau	Z	A	ρ_0 (fm ⁻³)	R	a
¹⁶ O	8	16	0,078	2,61	2,25
¹⁰⁹ Ag	47	109	0,068	5,33	2,29
²⁰⁸ Pb	82	208	0,063	6,65	2,3

- ▣ bord diffus : $a \sim \text{Cte}$
- ▣ « densité centrale » : $\rho_p(0) \sim \rho_0 \searrow$ quand $A \nearrow$
- ▣ $R \propto A^{1/3} \Rightarrow$ volume occupé par les Z protons $\propto A$
- \Rightarrow densité des protons : $\rho_p(r) \propto \frac{Z}{A}$
- ☛ A et donc le volume \nearrow plus vite que Z
 $\rightarrow \rho_p \searrow$ quand $Z \nearrow$



Propriétés générales du noyau

13

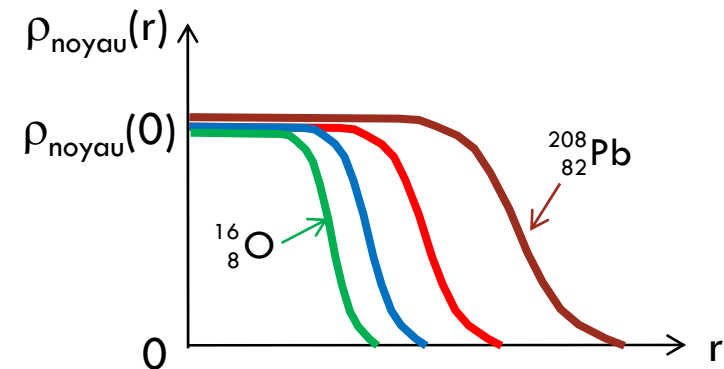
□ Quid des neutrons ?

→ on suppose qu'ils occupent le même volume que les protons : $\rho_N(r) \propto \frac{N}{A}$

⇒ La densité de matière nucléaire :

$$\rho_{\text{noyau}} = \rho_p + \rho_n = \rho_p \left(1 + \frac{N}{Z} \right) = \rho_p \frac{A}{Z}$$

$$\Rightarrow \rho_{\text{noyau}}(0) = 0,16 \text{ nucléon/fm}^3$$



un nucléon ne ressent la présence que de ses plus proches voisins et non pas des $(A - 1)$ autres nucléons (sinon $\rho_{\text{noyau}}(0) \propto A^\alpha$)

⇒ la force nucléaire est donc à courte portée

□ estimation du rayon du noyau

■ noyau \sim sphère à bord abrupt, de masse totale A et de densité $\rho_{\text{noyau}}(0)$ tel que :

$$\frac{4}{3} \pi R^3 \rho_{\text{noyau}}(0) = A$$

$$\Rightarrow \text{rayon de la sphère : } R = \left(\frac{3}{4\pi\rho_0} \right)^{1/3} A^{1/3} = r_0 A^{1/3} = 1,14 A^{1/3} (\text{fm})$$

On utilise couramment $r_0 = 1,2 \text{ fm}$ pour prendre en compte le bord diffus

□ Principe d'équivalence masse \leftrightarrow énergie

□ l'énergie "ultime" que l'on peut extraire d'un système de masse M : $E = Mc^2$

■ $M_{\text{proton}} = 938,272 \text{ MeV}/c^2$; $M_{\text{neutron}} = 939,550 \text{ MeV}/c^2$; $m_{\text{électron}} = 0,511 \text{ MeV}/c^2$

□ Energie de liaison, chimique ou nucléaire = variation d'énergie de masse

→ La masse M d'un système \neq la masse de ses constituants pris séparément :

$$Mc^2 = \sum_{i \text{ constituants}} m_i c^2 - E_l$$

où E_l est l'énergie de liaison entre les constituants du système

□ énergie de liaison d'un noyau $B(A,Z)$ = énergie nécessaire pour séparer les nucléons :

$$B(A,Z) = [ZM_p + (A-Z)M_n - M_{\text{noyau}}(A,Z)]c^2 > 0$$

► en mesurant la masse des noyaux, on mesure leur énergie de liaison : pour un A donné, plus la masse du noyau est petite, plus le noyau est lié

Propriétés générales du noyau

15

□ les différentes unités

- unité de masse atomique : u.m.a définie à partir de la masse atomique de ^{12}C

$$M_{\text{atome}}(^{12}\text{C}) = 12 \text{ uma} = 12 m_u \leftrightarrow 1 m_u = 10^{-3}/N_{\text{Avogadro}} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{kg} = 931,494 \text{ MeV}/c^2$$

- $M_{\text{proton}} = 1,00728 \text{ uma} ; M_{\text{neutron}} = 1,00865 \text{ uma} ; M(^1\text{H}) = 1,007825 \text{ uma}$
avec $c = 2,99792 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$, $N_{\text{Avogadro}} = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mole}^{-1}$ et $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

- excès de masse en uma : $\Delta M_{\text{atome}}(A,Z)_{\text{uma}} = M_{\text{atome}}(A,Z)_{\text{uma}} - (A \times 1 \text{ uma})$ tel que $\Delta(^{12}\text{C}) = 0$

- excès de masse en MeV/c^2 : $\Delta M_{\text{atome}}(A,Z)_{\text{MeV}/c^2} = M_{\text{atome}}(A,Z)_{\text{MeV}/c^2} - 931,494 A$

- Ex : Ruthénium $^{100}_{44}\text{Ru}$ et Technétium $^{100}_{43}\text{Tc}$

- $M_{\text{atome}}(100,44) = 99,904219 \text{ uma} = 93\,060,18 \text{ MeV}/c^2$
- $M_{\text{atome}}(100,43) = 99,907657 \text{ uma} = 93\,063,38 \text{ MeV}/c^2$
- $M_{\text{atome}}(100,43) - M_{\text{atome}}(100,44) = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ uma (ou } 3,2 \text{ MeV}/c^2) : \sim 10^{-5} \text{ de } M_{\text{atome}}$

Excès de masse

- $\Delta M_{\text{atome}}(100,44) = -0,095781 \text{ uma} = -89,21946 \text{ MeV}/c^2$
- $\Delta M_{\text{atome}}(100,43) = -0,092343 \text{ uma} = -86,01698 \text{ MeV}/c^2$

⇒ l'intérêt de l'excès de masse est de faire apparaître les chiffres significatifs pertinents

Propriétés générales du noyau

16

□ les différentes unités

▣ masse d'un noyau/masse d'un atome

$$M_{\text{atome}}(A,Z) c^2 = M_{\text{noyau}}(A,Z) c^2 + Z m_e c^2 - E_{l,e}$$

avec $E_{l,e} \sim \text{qq eV} - \text{qq keV}$ négligeable / $Z m_e c^2$

$$\Rightarrow M_{\text{atome}}(A,Z) c^2 \sim M_{\text{noyau}}(A,Z) c^2 + Z m_e c^2$$

$$\Rightarrow M_{\text{noyau}}(A,Z) c^2 \sim M_{\text{atome}}(A,Z) c^2 - Z m_e c^2$$

■ Ex : Ruthénium $^{100}_{44}\text{Ru}$ et Technétium $^{100}_{43}\text{Tc}$

- $M_{\text{atome}}(100,44) = 99,904219 \text{ uma} = 93\,060,18 \text{ MeV}/c^2 \rightarrow M_{\text{noyau}}(100,44) = 93\,037,696 \text{ MeV}/c^2$
- $M_{\text{atome}}(100,43) = 99,907657 \text{ uma} = 93\,063,38 \text{ MeV}/c^2 \rightarrow M_{\text{noyau}}(100,43) = 93\,041,407 \text{ MeV}/c^2$

Propriétés générales du noyau

17

- énergie de liaison du noyau/masse d'un atome

$$M_{\text{atome}}(A,Z) c^2 = M_{\text{noyau}}(A,Z) c^2 + Z m_e c^2 = [Z M_p c^2 + (A-Z) M_n c^2 - B(A,Z)] + Z m_e c^2$$

En combinant les Z électrons avec les Z protons, on fait apparaître Z atomes ^1H

$$\Rightarrow M_{\text{atome}}(A,Z) c^2 \sim Z M(^1\text{H}) c^2 + (A-Z) M_n c^2 - B(A,Z)$$

$$\Rightarrow B(A,Z) \sim [Z M(^1\text{H}) + (A-Z) M_n - M_{\text{atome}}] c^2$$

- $M_{\text{atome}}(^1\text{H}) = 938,7829 \text{ MeV}/c^2$

- $M_n = 939,55 \text{ MeV}/c^2$

- énergie de liaison du noyau/excès de masse

$$B(A,Z) \sim [Z \Delta M_H + (A-Z) \Delta M_n - \Delta M_{\text{atome}}(A,Z)] c^2$$

- Avec $\Delta M_H = 0,007825 \text{ uma} = 7,2889 \text{ MeV}/c^2$

- $\Delta M_n = 0,008648 \text{ uma} = 8,056 \text{ MeV}/c^2$

□ énergie de liaison du noyau

□ expression “directe”

$$B(A,Z) = [ZM_p + (A-Z)M_n - M_{\text{noyau}}(A,Z)]c^2$$

□ à partir de l'excès de masse de l'atome

$$B(A,Z) = [Z\Delta M_H + (A-Z)\Delta M_n - \Delta M_{\text{atome}}(A,Z)]c^2$$

$B(A,Z)$ augmente avec le nombre de nucléons A

■ Ex : Ruthénium $^{100}_{44}\text{Ru}$ et Technétium $^{100}_{43}\text{Tc}$

- $\Delta M_{\text{atome}}(100,44) = -89,21946 \text{ MeV}/c^2 \rightarrow B(100,44) = 861,0676 \text{ MeV}$
- $\Delta M_{\text{atome}}(100,43) = -86,01698 \text{ MeV}/c^2 \rightarrow B(100,43) = 858,6347 \text{ MeV}$

□ énergie de liaison moyenne/nucléon

▣ Ex : Ruthénium $^{100}_{44}\text{Ru}$ et Technétium $^{100}_{43}\text{Tc}$

■ $B(100,44) = 861,0676 \text{ MeV} \rightarrow B(100,44)/A = 8,6107 \text{ MeV}$

■ $B(100,43) = 858,6347 \text{ MeV} \rightarrow B(100,43)/A = 8,5863 \text{ MeV}$

□ énergie de liaison moyenne/nucléon : $B(A,Z)/A$

$$\frac{B(A,Z)}{A} = \frac{Z}{A} \Delta M(^1\text{H}) + \left(1 - \frac{Z}{A}\right) \Delta M_n - \frac{\Delta M_{\text{atome}}(A,Z)}{A} = \Delta M_n + \frac{Z}{A} (\Delta M(^1\text{H}) - \Delta M_n) - \frac{\Delta M_{\text{atome}}(A,Z)}{A}$$

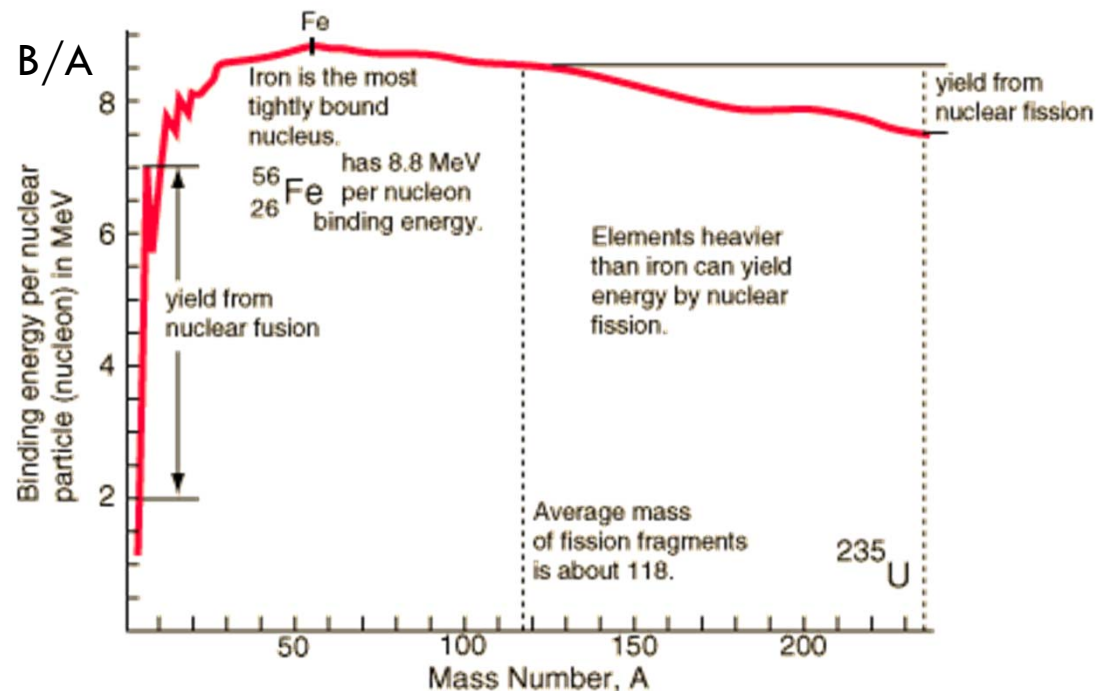
$$\frac{B(A,Z)}{A} = 8,056 - 0,767 \frac{Z}{A} - \frac{\Delta M_{\text{atome}}(A,Z)}{A}$$

Propriétés générales du noyau

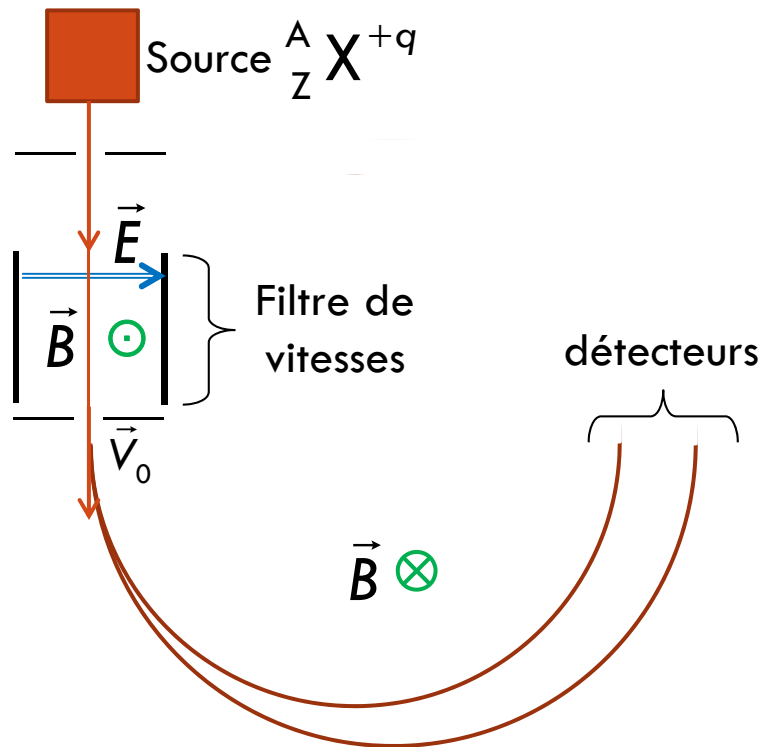
20

- pour $A > 20$: $B/A \sim \text{Cte} \sim 8 \text{ MeV/nucléon}$
 - ➡ **Saturation des forces nucléaires**
- l'élément Fer est le plus stable : $B/A \sim 8,8 \text{ MeV}$
- noyaux lourds, $A > 120$: masse des noyaux > 2 fois la masse d'un noyau $A/2$
 - processus de fission libère de l'énergie
- 2 noyaux "légers" ($A < 10$) qui fusionnent produisent un noyau plus lié
 - processus de fusion libère de l'énergie

Noyau	$\Delta(\text{MeV})$	B (MeV)	B/A (MeV)
^2H	13.136	2.224	1.11
^3H	14.9499	8.4819	2.827
^4He	2.424	28.2959	7.074
^{12}C	0	92.16	7.68
^{56}Fe	-60.605	492.2	8.79
^{62}Ni	-66.746	545.3	8.794
^{232}Th	35.448	1767	7.921
^{235}U	40.915	1783	7.587
^{238}U	47.309	1801	7.567
^{239}Pu	48.590	1807	7.561
^{244}Cm	58.454	1837	7.529



- mesure directe par spectrométrie de masse : principe



① Filtre de vitesses $\vec{F}_{elec} + \vec{F}_{mag} = M \frac{d\vec{V}}{dt}$ $\vec{F}_{elec} = q\vec{E}$
 $\vec{F}_{mag} = q\vec{V} \wedge \vec{B}$
 $\vec{E} \perp \vec{B} \Rightarrow qE - qVB = M \frac{dV}{dt}$

Seuls les ions ayant la vitesse V_0 telle que : $qE = qV_0B$ ne sont pas déviés et passent la fente pour entrer dans une région où règne un champ magnétique uniforme

② Champ magnétique uniforme

$$\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_N = \frac{dV}{dt} \vec{u}_t + \frac{V^2}{R} \vec{u}_N \Rightarrow M \frac{V_0^2}{R} = qV_0B$$

\Rightarrow Le rayon de courbure : $R = \frac{MV_0}{qB}$