

Comprendre le noyau

Pourquoi étudier les noyaux atomiques ?

▶ La raison qui tue...

parce que les atomes représentent **99% de la matière visible** de l'Univers et.... on ne comprend pas tout (ou presque rien) !

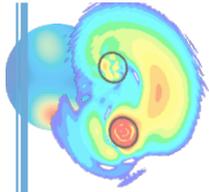
et les noyaux représentent **99% de la masse des atomes...** (rien que ça !)

▶ D'autres raisons tout au long de ce cours...

Les grandes questions :

- ▶ Comment la matière visible est-elle apparue et a évolué ?
→ **astrophysique nucléaire**
- ▶ Comment la matière subatomique est-elle organisée ? Est-ce que des structures émergent ?
→ **la structure nucléaire**
- ▶ Est-ce que les interactions qui sont à la base de la matière nucléaire sont bien comprises ?
→ **la structure nucléaire & lien avec la QCD (quarks)**

Marlène Assié, IPN
assie@ipno.in2p3.fr



Comprendre le noyau : le programme

*« Celui qui trouve sans chercher est celui qui a longtemps cherché sans trouver » **Bachelard** »*

Premier cours : Qu'est-ce que c'est un noyau ?

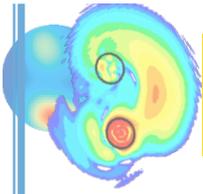
- I. Les échelles de la physique nucléaire et comment voir le noyau ?
- II. La « glue » du noyau et ses conséquences
- III. Ça pèse combien un noyau ? Masse et énergie de liaison
- IV. Les noyaux instables. Combien y en a ? Comment on les fabrique ?

Deuxième cours : En théorie ça se passe comment ?

- I. Les modèles macroscopique (la goutte liquide)
- II. Les modèles microscopiques (le modèle en couche)
- III. Teaser : « oubliez tout ce que je vous ai dit ! »

Troisième cours : La trousse à outils du physicien nucléaire

- I. Comment on étudie les noyaux ?
- II. Comment on fabrique les noyaux pour les étudier ?
- III. Les réactions directes
- IV. Bonus : astrophysique nucléaire



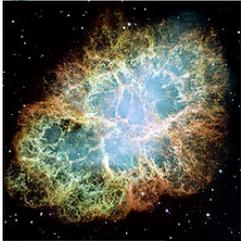
DE L'INFINIMENT GRAND À L'INFINIMENT PETIT

$10^{-20}m$

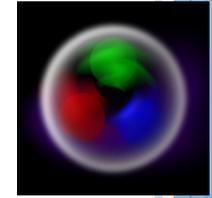
On a découvert de nombreux systèmes complexes....

.... De l'infiniment grand...

.... à l'infiniment petit



$10^{40}kg$



$10^7 m$



$10^{27}kg$

$10^{-8}m$

$10^{-27}kg$

L'atome

Le noyau

— 1 Fermi

$10^{-15}m$

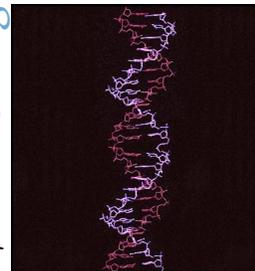
$10^{-1} m$



$10^{-3}kg$

$10^{-15}kg$

$10^{-5}m$



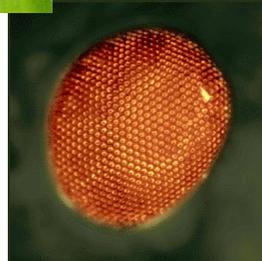
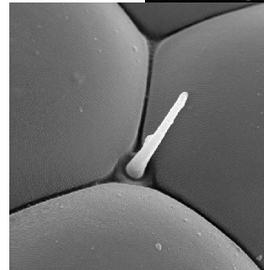
$10^{-10}m$

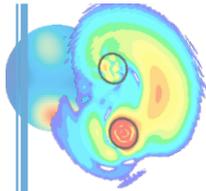


$10^{-2} m$



$10^{-3}m$





QU'EST-CE QU'UN NOYAU ?

Nombre de masse = nb total de nucléons

N : nombre de neutrons
 $N = A - Z$



Numéro atomique = Nombre de protons = nb d'électrons de l'atome

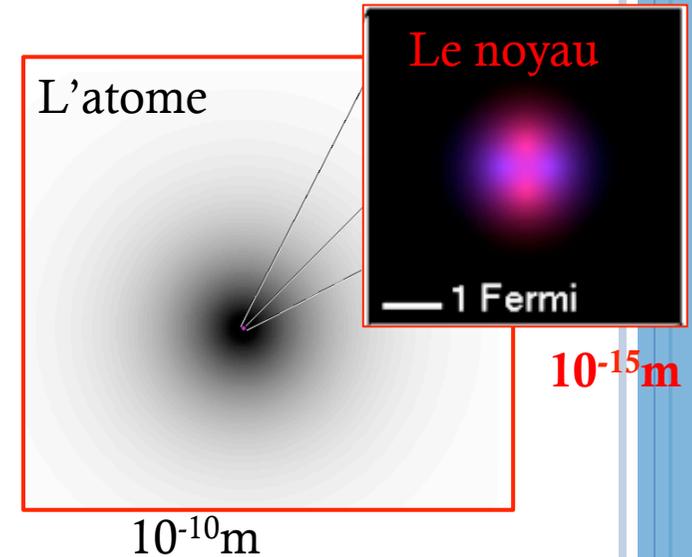


TABLE 2.2 Some of the Isotopes of Carbon ^a			
Symbol	Number of Protons	Number of Electrons	Number of Neutrons
¹¹ C	6	6	5
¹² C	6	6	6
¹³ C	6	6	7
¹⁴ C	6	6	8

^a Almost 99% of the carbon found in nature is ¹²C.

- **Isotope** : noyaux avec le même nombre de **protons** (ex : ¹²₆C, ¹⁴₆C)
- **Isotone** : noyaux avec le même nombre de **neutrons** (ex : ¹²₆C, ¹⁴₈O)
- **Isobare** : noyaux de même nombre de nucléons mais avec des numéros atomiques différents (ex : ¹⁴₆C, ¹⁴₈O)

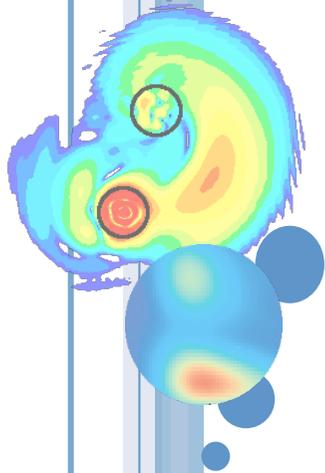
LE NOYAU : UN KALÉIDOSCOPE

Plusieurs façons de le regarder :

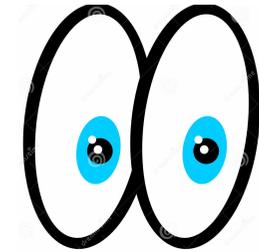
- sa masse
- son rayon
- sa densité
- ses désintégrations
- comment il se désexcite ?
- comment il réagit avec d'autres noyaux ?
- quelles particules sont émises quand il se casse
- comment il fissionne ?
- comment il fusionne ?
- ...

Comment interpréter les observations ?

- le modèle de la goutte liquide
- le gaz de Fermi
- le modèle en couche
- les calculs ab initio
- les modèles de réaction ...



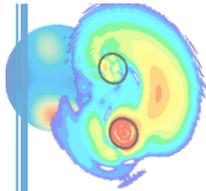
COMMENT VOIR LE NOYAU ?



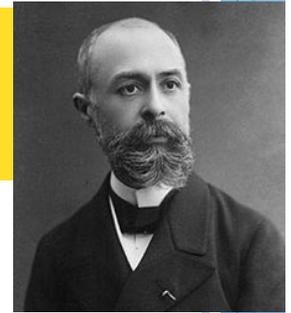
- ▶ **Première méthode** (première méthode historique) :
par ses désintégrations ! (quand il est instable)
- ▶ **Deuxième méthode** (2^{ème} révolution historique de la physique nucléaire) :
en le bombardant avec des particules (voir Rutherford)

Et aujourd'hui ?

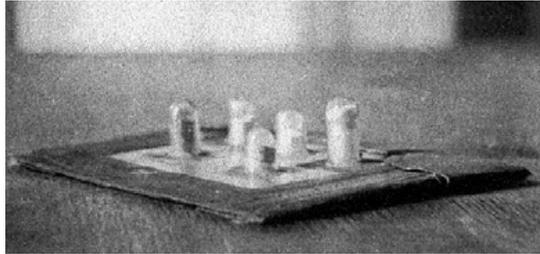
- on cherche des radioactivités « exotiques »
 - on utilise les décroissances β pour étudier certains noyaux ...
 - ça s'appelle la diffusion Rutherford (ou diffusion élastique) et on en mesure toujours !
- ▶ **Que nous dit la mécanique quantique ?**



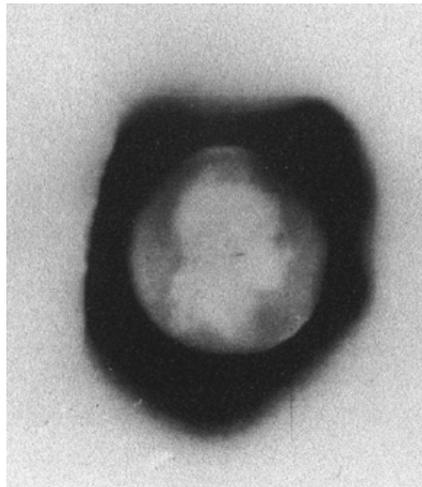
1896 : DÉCOUVERTE DE LA RADIOACTIVITÉ PAR BECQUEREL



Expérience de phosphorescence

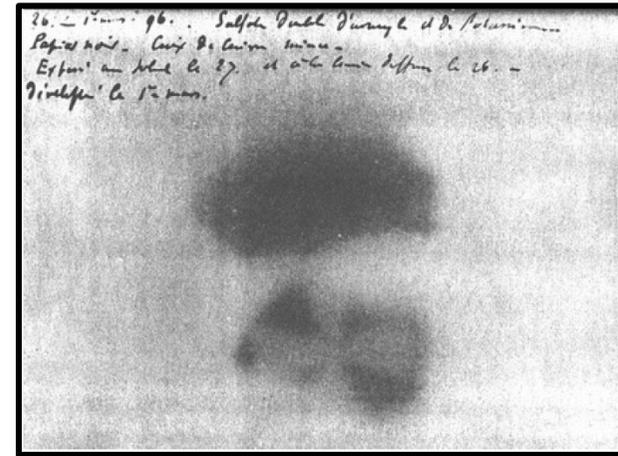


Dispositif expérimental : sels d'uranium dans tubes de verre et plaque photo emballée dans du carton noir exposés à la lumière



Impression de la plaque photo après développement (médaille métallique)

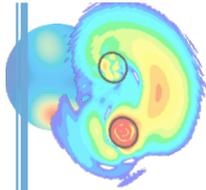
Découverte de la radioactivité



Cliché développé après être resté dans un tiroir

« J'insisterai particulièrement sur le fait suivant, qui me paraît tout à fait important et en dehors des phénomènes que l'on pouvait s'attendre à observer: Les mêmes lamelles cristallines, placées en regard de plaques photographiques, dans les mêmes conditions et au travers des mêmes écrans~ mais à l'abri de l'excitation des radiations incidentes et maintenues à l'obscurité produisent encore les mêmes impressions photographiques. »

Becquerel



1898 : DÉCOUVERTE DU RADIUM

PHYSIQUE. — *Sur une nouvelle substance fortement radio-active, contenue dans la pechblende* (²). Note de M. **P. CURIE**, de M^{me} **P. CURIE** et de M. **G. BÉMONT**, présentée par M. Becquerel.

Marie Curie découvre que le Thorium émet des « rayons Becquerel » ainsi que la pechblende et la chalcopite.

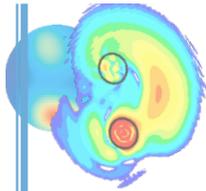
Elle ajoute qu'il faut admettre que c'est « forcément dans l'atome » que quelque chose se modifie puisque c'est à l'atome et non à la molécule qu'est liée la radioactivité

Pierre et Marie Curie isolent le radium et le polonium

Le radium est 1 000 000 de fois plus radioactif que l'uranium !!



1903 : Prix Nobel Pierre, Marie Curie et Becquerel



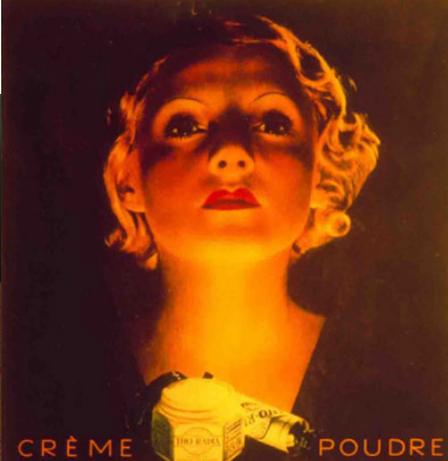
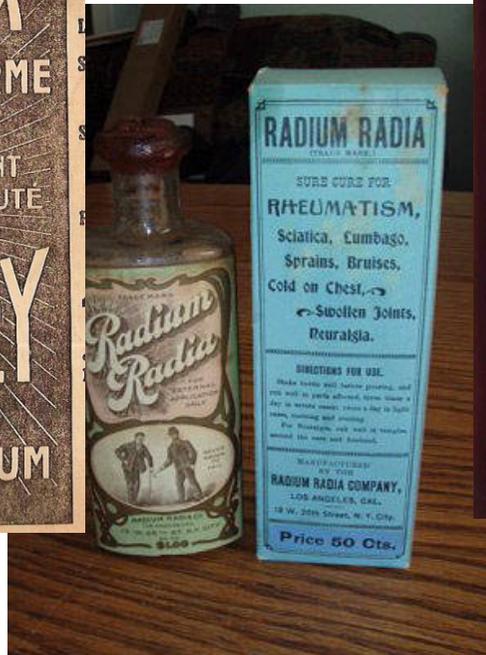
LA RADIOACTIVITÉ C'EST TONIQUE !

LE RADIUM
RÉGÈNÈRE L'ÉPIDERME

PLUS DE RIDES TEINT VELOUTÉ



LA CRÈME RAMEY
RADIACÉE
CONTIENT DU RADIUM



CRÈME POUVRE

THO-RADIA

EMBEUSSIANTES PARCE QUE CURATIVE

à base de thorium et de radium selon la formule de

DOCTEUR ALFRED CURIE

EXCLUSIVEMENT CHEZ LES PHARMACIENS

PROCEURE GRATUITE SUR DEMANDE À THO-RADIA, 20 RUE DES CARROUES, PARIS

« Un grain du mystérieux radium sera montré à l'exposition universelle. Sa puissance est inimaginable. Avec ce métal, tous les arsenaux du monde pourraient être détruits. Il pourrait rendre la guerre impossible ! »

St-Louis Post Dispatch

On trouve chez

RADIGUET & MASSIOT

Constructeurs d'Instruments pour les Sciences

13, 15, Boul. des Filles-du-Calvaire
(Paris, 3^e)

LE SPINTHARISCOPE
de Crookes

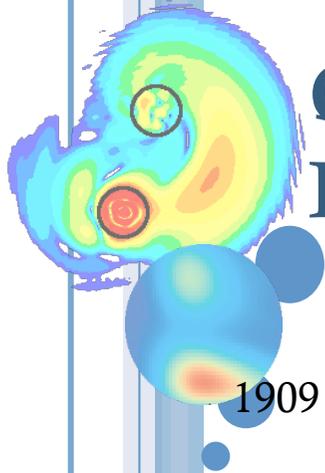
~~~~~

Appareil de démonstration permettant de voir directement sur un écran les effets lumineux du bombardement des émissions spontanées du **RADIUM**.

Voir description dans le journal le **RADIUM** de février, n° 2.

~~~~~

Envoi franco contre mandat-poste de 25 francs.



QU'EST-CE QUE C'EST UN ATOME ?

LA CHRONOLOGIE

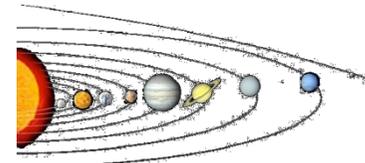
1909

Le Plum-pudding de Thomson
... une theorie qui ne vivra qu'un an !



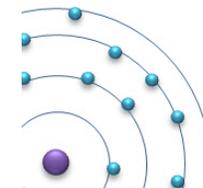
1910

Le modèle planétaire de Rutherford
... un modèle qui a la dent dure
puisque'il persiste encore...

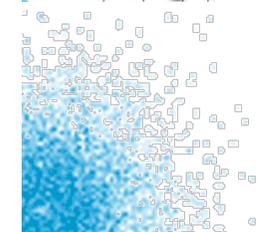


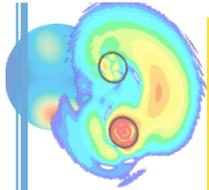
1913

Le modèle de Bohr : une amélioration quantique



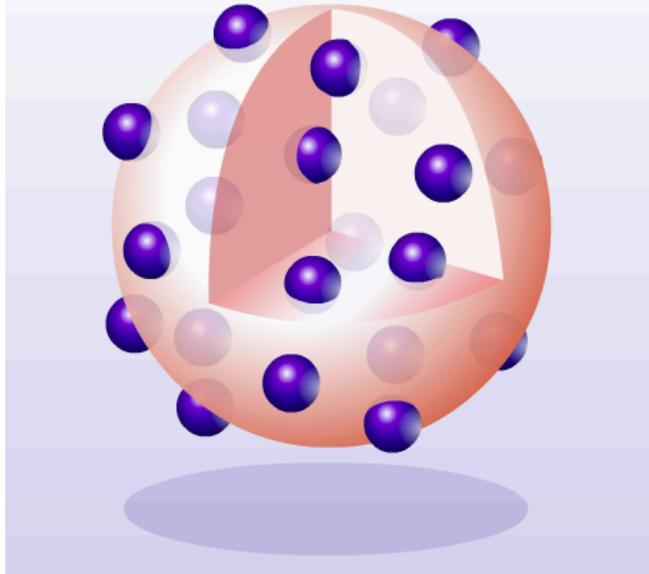
La vision quantique du noyau





PREMIÈRE VISION DE L'ATOME (1909)

"Le pudding de Thomson"



Observation : On peut arracher des électrons à l'atome....

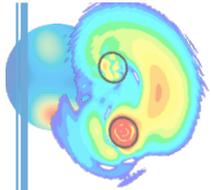
Idée de Thomson :

Les électrons représentent une petite fraction de la masse de l'atome et sont donc probablement aussi responsables d'une petite partie de la taille de l'atome.

→ L'atome est une sphère uniforme positive dans laquelle des électrons sont intégrés
C'est le « **plum-pudding** »

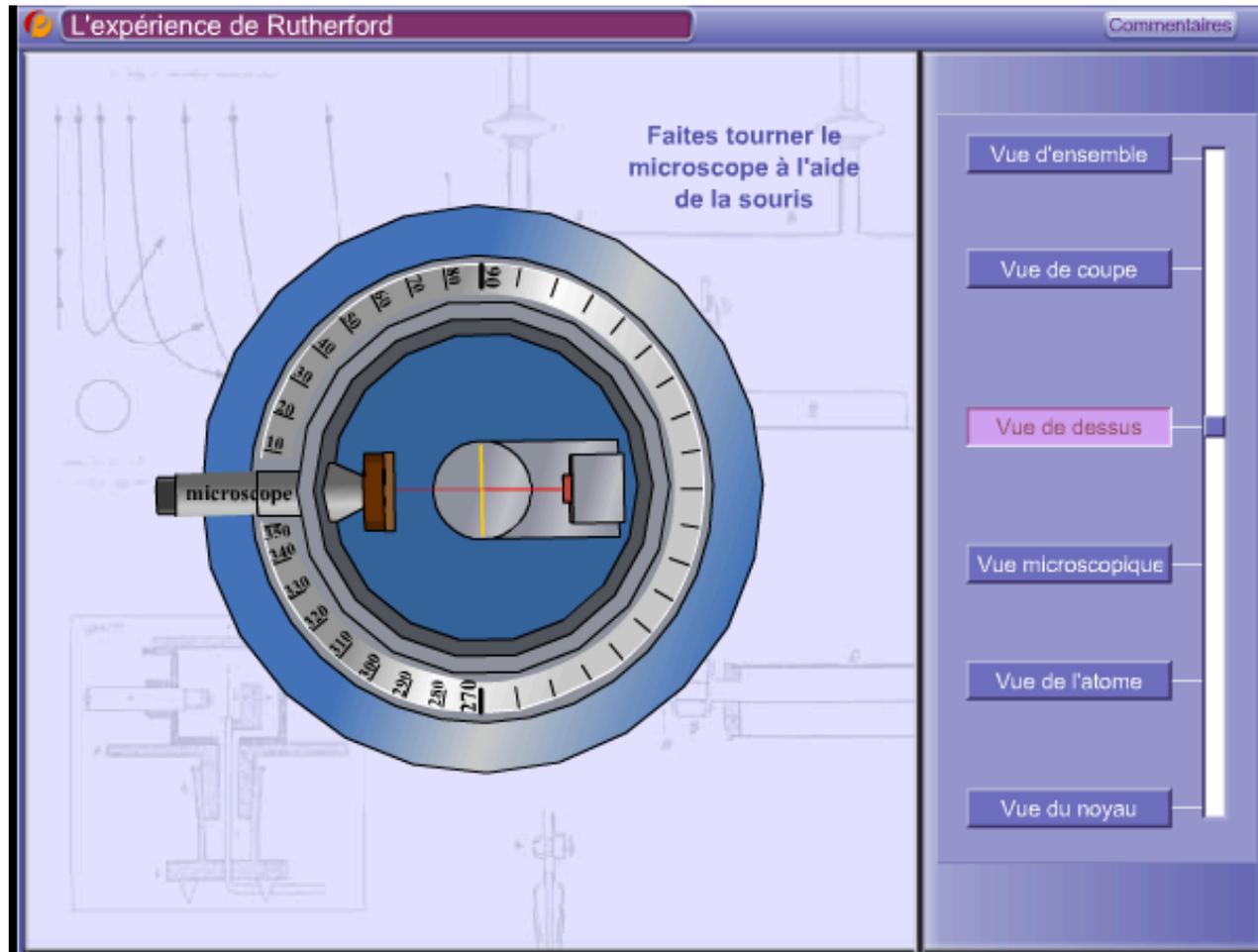
Comment tester ce modèle ?

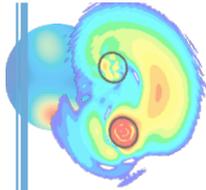
-> par une réaction nucléaire, la première de l'histoire de la physique !



COMMENT SAIT-ON QUE L'ATOME EST VIDE ? EXPERIENCE DE RUTHERFORD

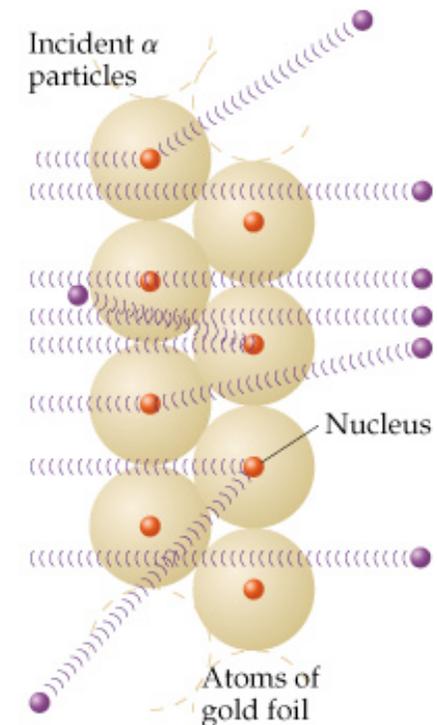
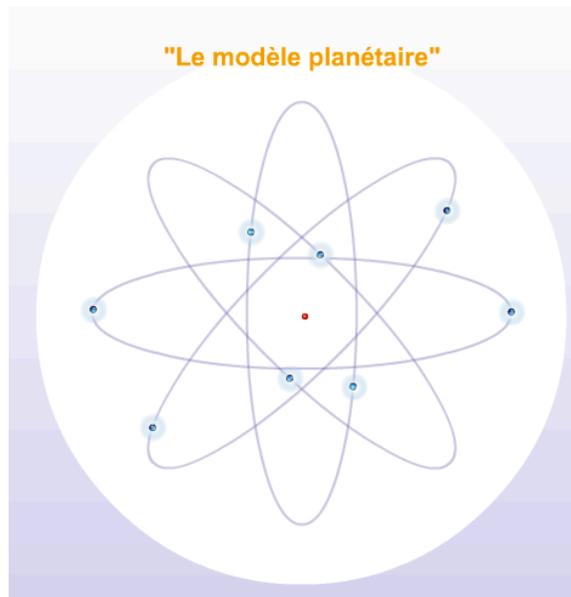
- La première réaction de la physique nucléaire : l'expérience de Rutherford



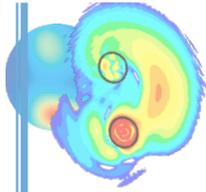


LE MODÈLE DE RUTHERFORD

« C'était comme si vous aviez tiré un obus de 15 pouces sur une feuille de papier de soie et qu'il ait rebondi et vous ait atteint. »

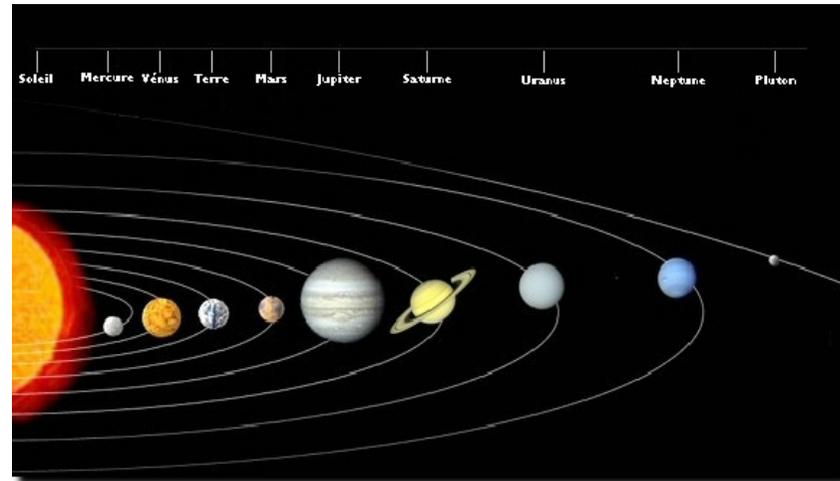
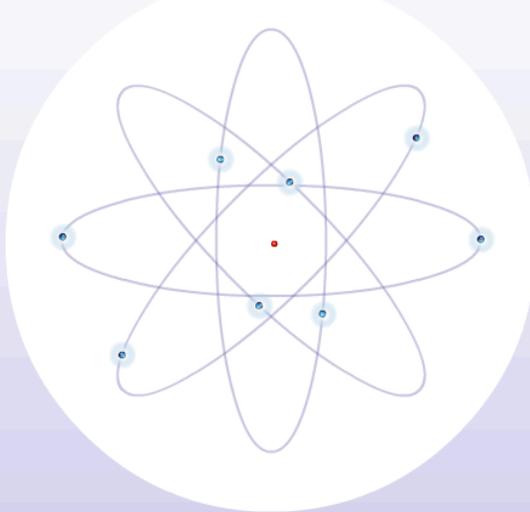


- . L'atome est principalement **vide**
- . La presque totalité de la masse de l'atome est située au centre dans le noyau
- . Le noyau est constitué de **charges positives entassées**
- . Les électrons gravitent autour du noyau dans l'espace vide autour de celui-ci
- . L'atome est **neutre** : autant de protons que d'électrons
- . La **taille** de l'atome est déterminée par l'électron qui gravite le plus loin
- . L'atome de Rutherford est divisible (les électrons peuvent être arrachés)



COMMENT NOTRE VISION DE L'ATOME ET DU NOYAU A-T-ELLE EVOLUÉ ?

"Le modèle planétaire"



Mais en infiniment plus petit :

Distance Soleil–Pluton: $D_{\odot-P} = 6$ Milliards Kms

Distance Noyau–électron: $D_{N-e^-} = 1 / 10$ Milliardième m ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$)

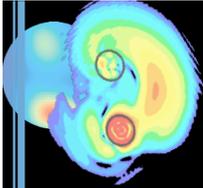
$D_{N-e^-} / R_N = 10 \times D_{\odot-P} / R_{\odot}$ (15 si Neptune au lieu de Pluton)

et tout aussi (voire plus) "central" :

Le soleil contient plus de 99% de la matière du système solaire

Le noyau contient plus de 99% de la matière de l'atome

densité noyau = $1.7 \cdot 10^8$ tonnes/cm³ \gg densité moyenne Soleil = 1,4 tonnes/m³



LA MECANIQUE QUANTIQUE ARRIVE !

- 1900 Planck fait l'hypothèse des quantas (grains) d'énergie
- 1905 Einstein invente le photon (quanta de lumière et d'énergie)
- 1913 **Modèle de Bohr**

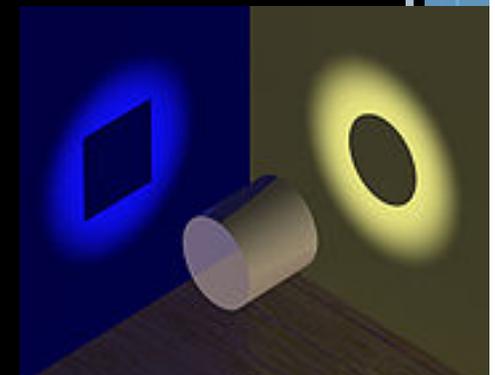
Quand le modèle de la particule ponctuelle faiblit...

1924 De Broglie : dualité onde corpuscule $\lambda = \frac{h}{p}$

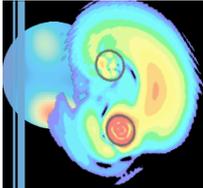
ex : nous $m \sim 70\text{kg}$, $V = 4 \text{ km/h} = \text{m/s} \rightarrow \lambda = \text{m}$
 α (Rutherford) $E = 5 \text{ MeV} \rightarrow \lambda = 10^{-15}\text{m}$ (taille du noyau!)

Corollaire : $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$

+ l'énergie de la particule est grande,
+ elle est une sonde fine



« L'idée fondamentale était la suivante : « Le fait que, depuis l'introduction par Einstein des photons dans l'onde lumineuse, l'on savait que la lumière contient des particules qui sont des concentrations d'énergie incorporée dans l'onde, suggère que toute particule, comme l'électron, doit être transportée par une onde dans laquelle elle est incorporée »... **Mon idée essentielle était d'étendre à toutes les particules la coexistence des ondes et des corpuscules** découverte par Einstein en 1905 dans le cas de la lumière et des photons. » « À toute particule matérielle de masse m et de vitesse v doit être « associée » une onde réelle » reliée à la quantité de mouvement par la relation : $\lambda = \frac{h}{p}$.



LA MECANIQUE QUANTIQUE ARRIVE !

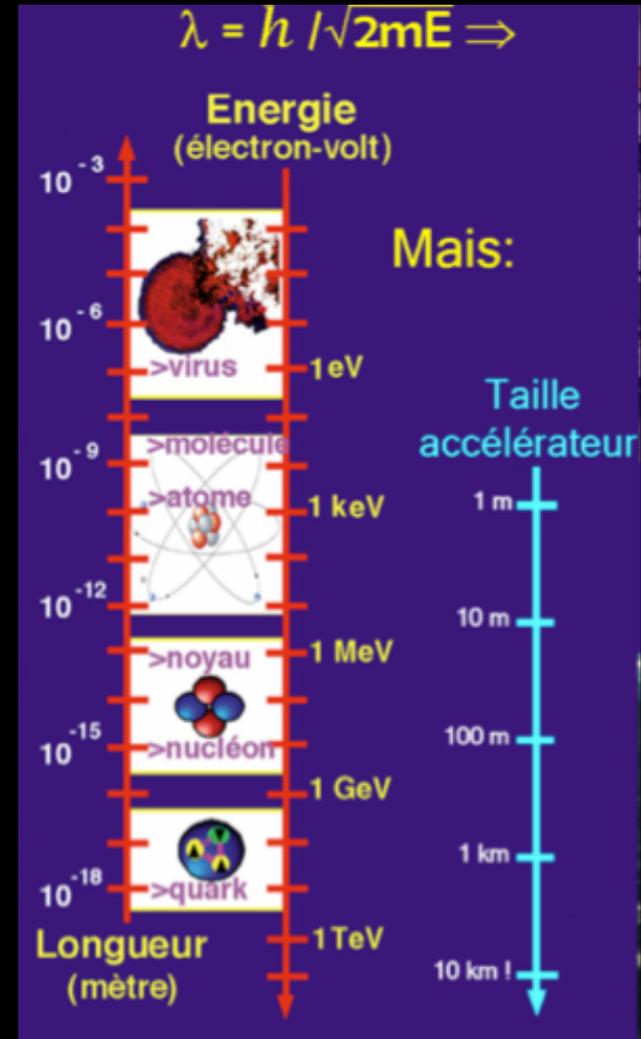
- 1900 Planck fait l'hypothèse des quantas (grains) d'énergie
- 1905 Einstein invente le photon (quanta de lumière et d'énergie)
- 1913 **Modèle de Bohr**

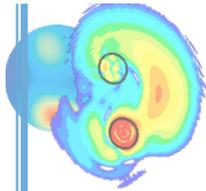
Quand le modèle de la particule ponctuelle faiblit...

- 1924 De Broglie : dualité onde corpuscule $\lambda = \frac{h}{p}$

Corollaire :
$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$$

+ l'énergie de la particule est grande,
+ elle est une sonde fine



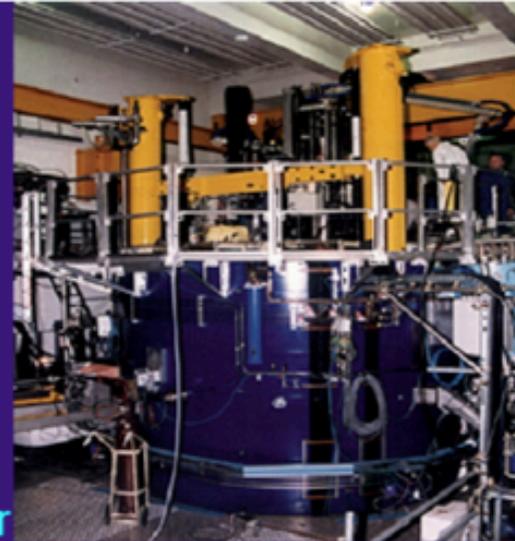
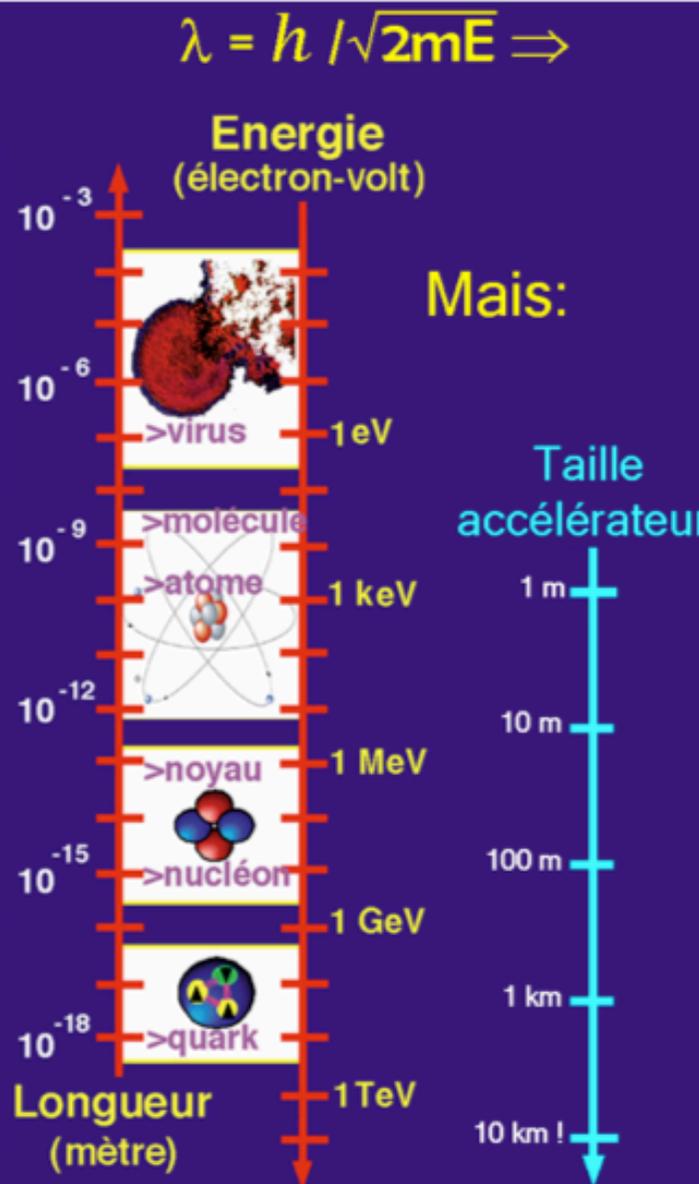


INTERMEDE: LA COURSE À L'ÉNERGIE



Microscope électronique

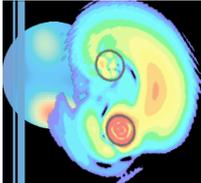
Accélérateur linéaire (SLAC)



Cyclotron (AGOR)

Synchrotron (LHC)





LA MECANIQUE QUANTIQUE ARRIVE !

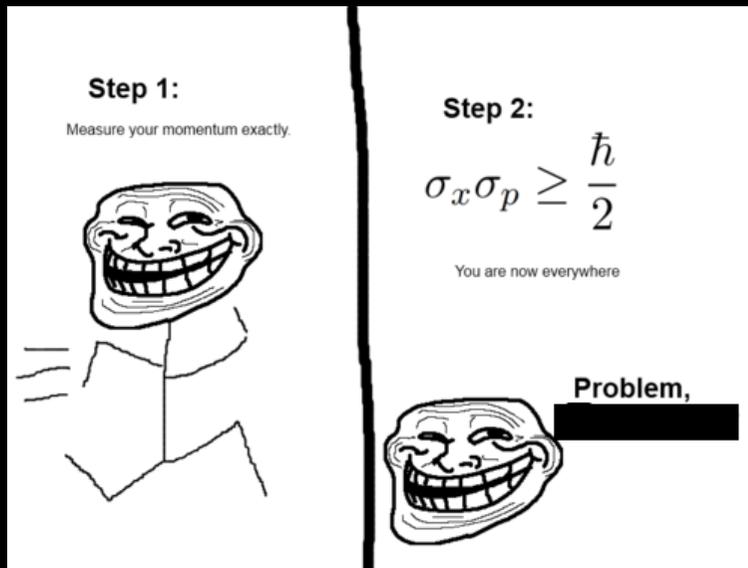
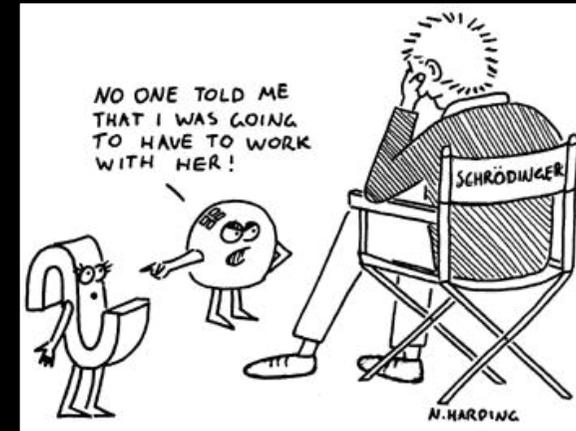
- 1900 Planck fait l'hypothèse des quantas (grains) d'énergie
- 1905 Einstein invente le photon (quanta de lumière et d'énergie)
- 1913 **Modèle de Bohr**

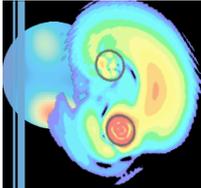
Quand le modèle de la particule ponctuelle faiblit...

- 1924 De Broglie dualité onde corpuscule $\lambda = \frac{h}{p}$

Vision probabiliste

- 1926 Schrödinger décrit les particules comme des **fonctions d'onde**
- 1927 Heisenberg établit le **principe d'incertitude**





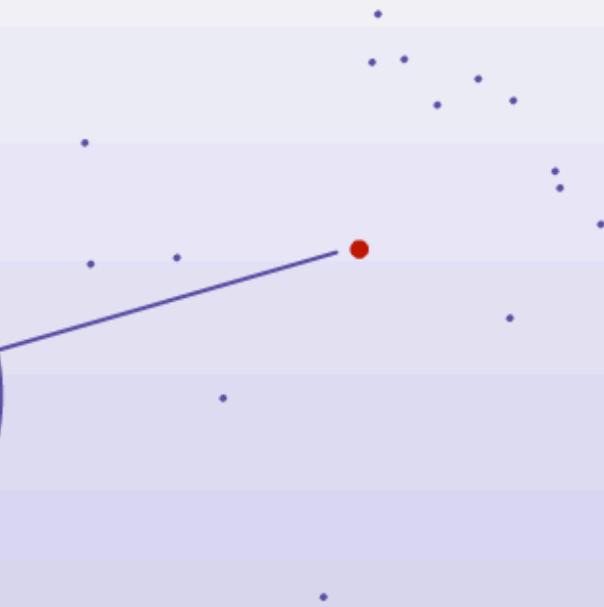
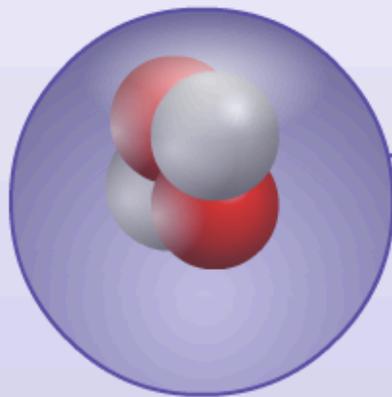
COMMENT NOTRE VISION DE L'ATOME ET DU NOYAU A-T-ELLE EVOLUÉ ?

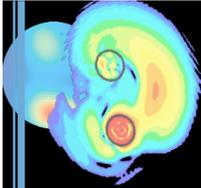
La vision quantique

Probabilité instantanée
de présence

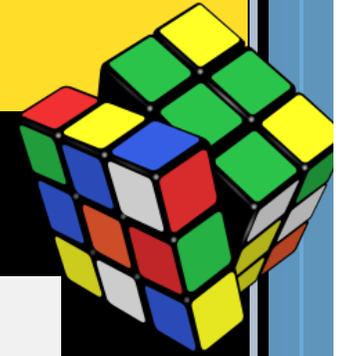
Cumul des probabilités
de présence

"Le modèle probabiliste de l'atome"
(vue en coupe)





COMMENT REPRÉSENTER LE NOYAU ?

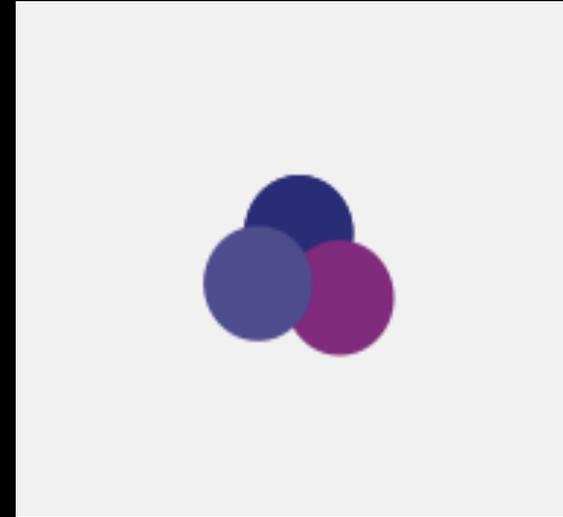


Vrai :

- Flou (vision probabiliste)
- forme ellipsoïdale

Faux :

- Les noyaux n'ont pas de couleur
- Certains noyaux ont d'autres formes



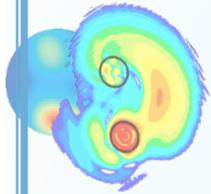
Vrai :

- Seulement la composition

Faux :

- Les nucléons ne sont pas localisés
- Ils n'ont pas de contours définis
- Ils n'ont pas de couleur visible

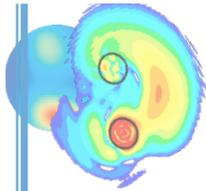
QUELLE EST LA GLUE DU NOYAU ?
QU'EST-CE QUI LIE LES NEUTRONS ET PROTONS
ENSEMBLE ?
L'INTERACTION NUCLÉAIRE



- ▶ La puce à l'oreille : **l'énergie énorme libérée** dans les désintégrations



- ▶ La théorie : **interaction forte de Yukawa**
- ▶ Mais alors pourquoi le noyau décroît ?
l'interaction faible



SEULEMENT 2 FORCES CONNUES EN 1896...

A la fin du XIX^{ème} siècle, 2 forces :
gravité & électromagnétique (**physique classique**)

Energie libérée par 1g de radium =
20000 x énergie libérée pour créer
une molécule d'eau



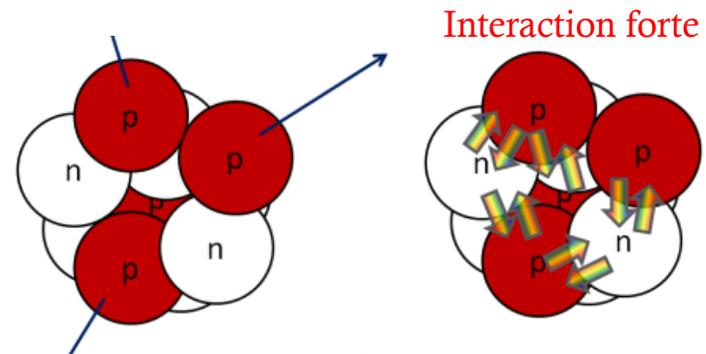
La gravité

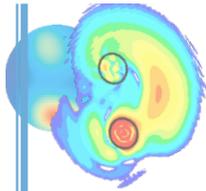
L'interaction
Électromagnétique
(responsable des
phénomènes magnétiques
et électriques, de l'émission
de lumière...)

« L'énergie de la transformation radioactive doit donc
être au **moins vingt mille fois, et peut être un
million de fois**, plus grande que l'énergie de
n'importe quelle transformation moléculaire »
Rutherford



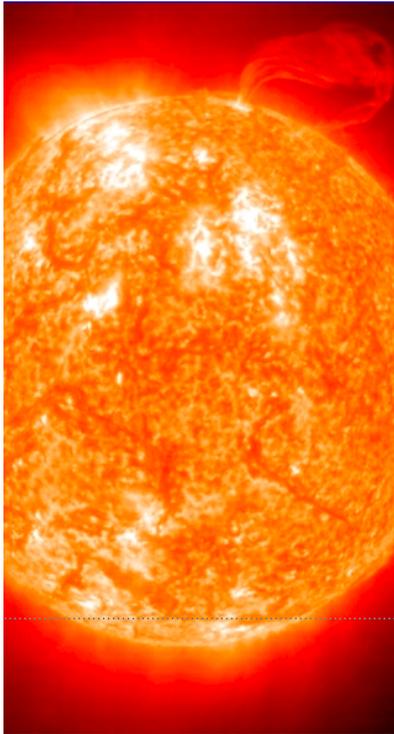
La mayonnaise: *Émulsion huile et eau liée par liaison
hydrogène (électrostatique) et grâce protéines œufs
(tensioactives) qui jouent le rôle d'interaction forte.*



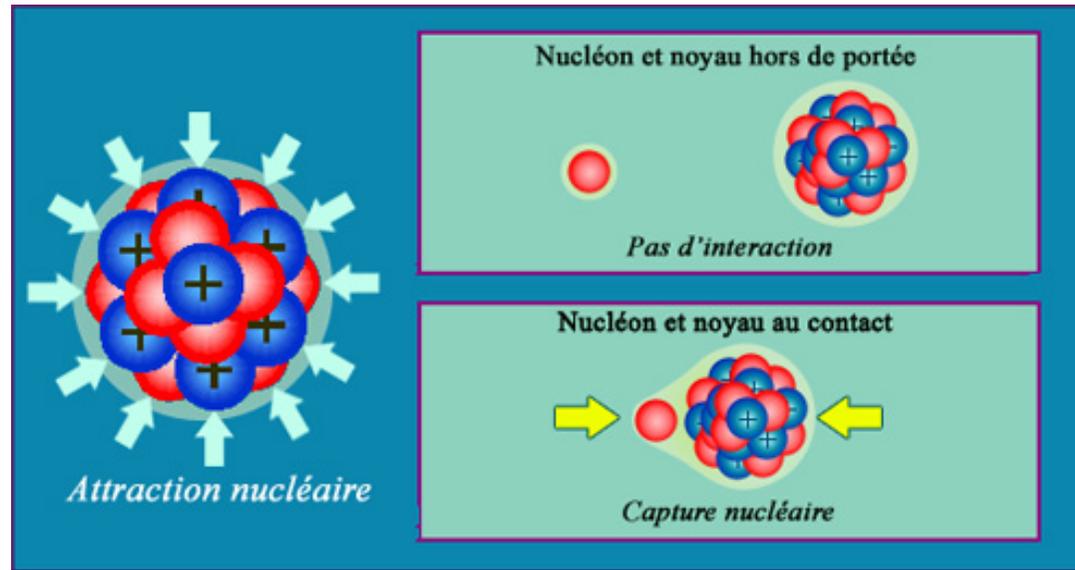


LES PRINCIPES DE LA FORCE FORTE (SUPER-GLUE DU NOYAU)

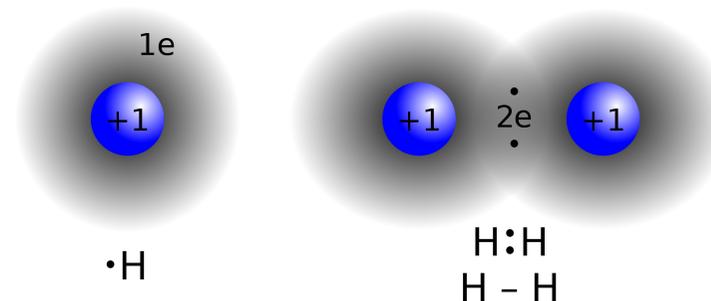
- La force nucléaire est de **courte portée**
 - elle ne concerne que **quelques nucléons** (~10)
 - elle permet l'**émission d'alpha**

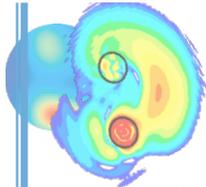


L'interaction forte
aui fournit l'énergie à
l'Univers



- Interaction résiduelle entre les quarks qui constituent les nucléons
Similaire aux liaison covalente entre atomes (interaction résiduelle entre nuage d'électrons)





UNE NOUVELLE FORCE DE COURTE PORTÉE...

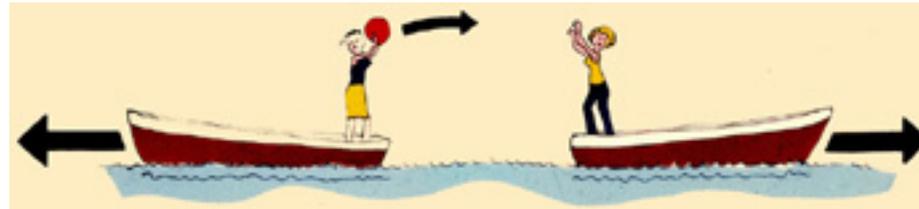
Épilogue :

1935 Yukawa première théorie de l'interaction forte

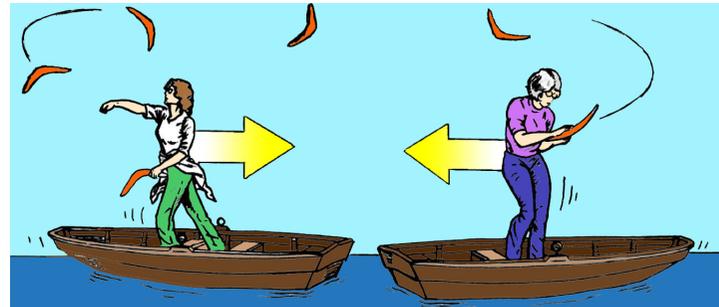
1964-1970 : QCD, quarks

L'interaction forte agit par échange particules (les mésons)

Répulsion (électromagnétisme)

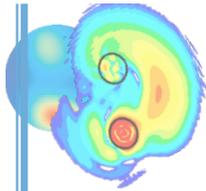


Attraction (nucléaire)



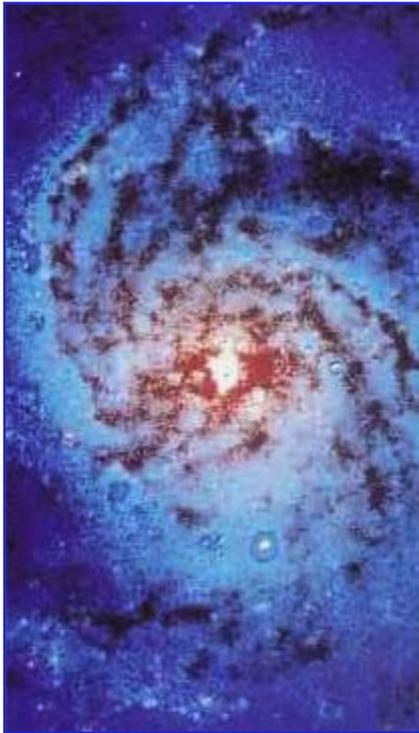
L'interaction nucléaire opère dans la partie à basse énergie de la QCD, là où l'interaction est la plus complexe. Les études sur le noyau permettent de comprendre mieux la QCD

Analogie avec la chimie : Toutes les interactions moléculaires sont de nature électromagnétiques. Pourtant on ne peut pas calculer la structure de l'ADN en partant des équations de Maxwell !



3 FORCES...

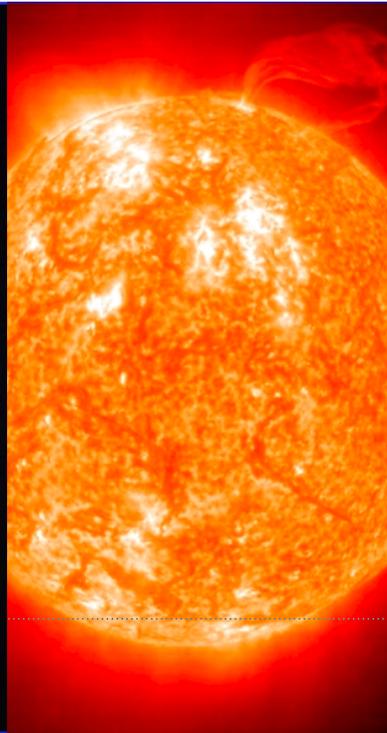
A la fin du XIX^{ème} siècle, 2 forces :
gravité & électromagnétique (**physique classique**)



La gravité



L'interaction
Électromagnétique
(responsable des
phénomènes magnétiques
et électriques, de l'émission
de lumière...)

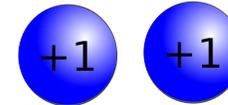


L'interaction forte
qui fournit l'énergie à
l'Univers

Rapports de force :



$10^{-15}m$

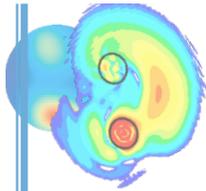


nucléaire 100 fois > électromag.

$10^{-14}m$

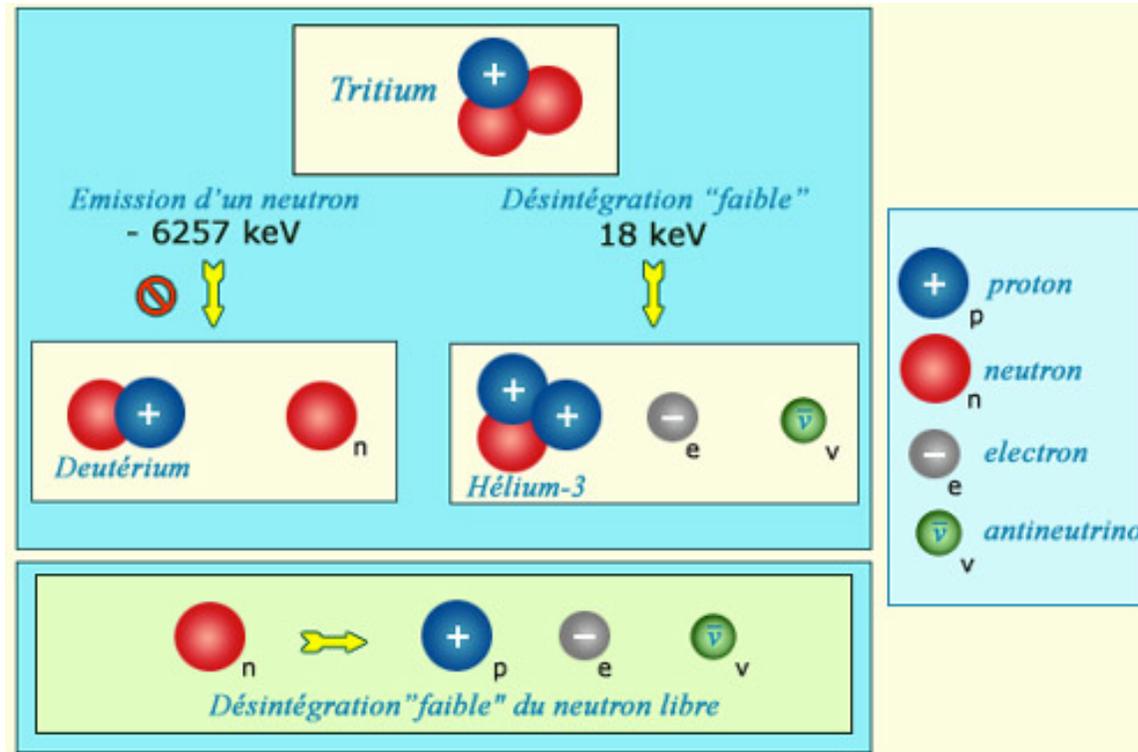


nucléaire = électromag



INTERACTION FAIBLE

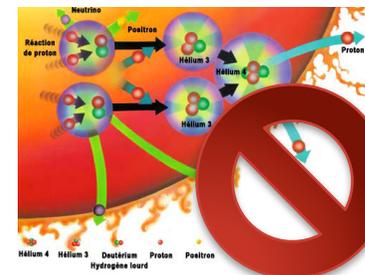
- Exemple du tritium

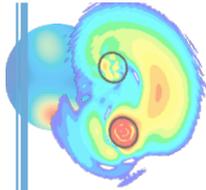


- L'interaction faible est de **courte portée** (comme l'interaction forte)
- Elle est **100 000 fois plus faible** que l'interaction forte
- Sa portée est **1000 fois plus petite**

Sans elle,

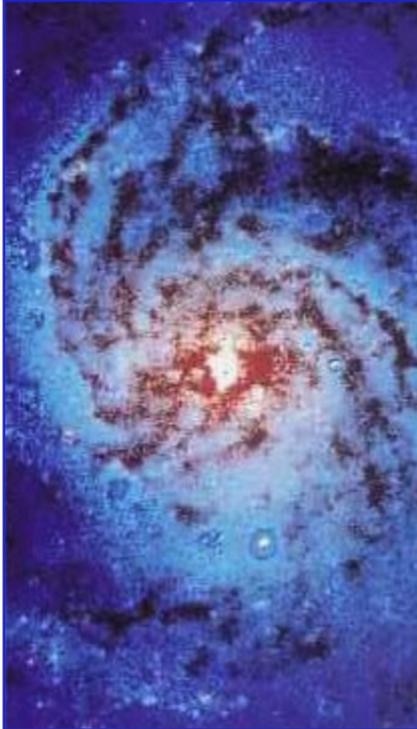
pas de transformation du proton en neutron
pas de fusion dans le soleil !!!





LE TABLEAU COMPLET : LES 4 FORCES POUR COMPRENDRE LES NOYAUX

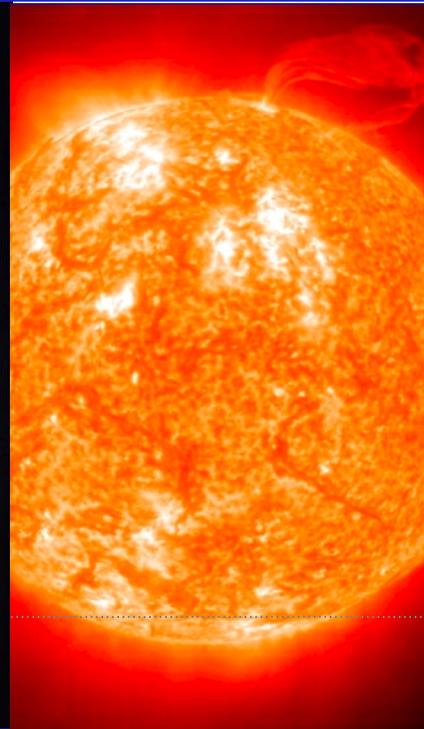
Portée	∞	∞	10^{-15}	10^{-18}
Force relative	10^{-38}	1/137	1	10^5



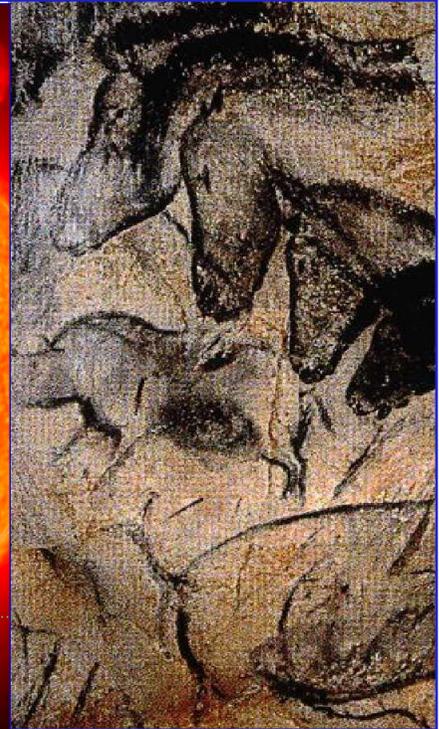
La gravité



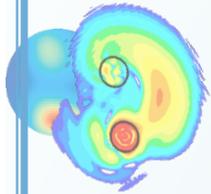
L'interaction
Électromagnétique
(responsable des
phénomènes
magnétiques et
électriques, de
l'émission de lumière...)



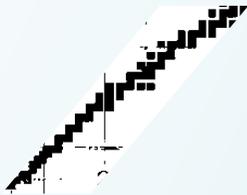
L'interaction forte
qui fournit l'énergie à
l'Univers



L'interaction faible
(décroissance
radioactive comme le
 ^{14}C)



QUELLE EST LA FORCE DE LA FORCE NUCLÉAIRE ? COMBIEN PÈSE UN NOYAU ?



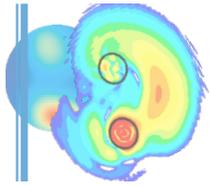
- ▶ Ce que la carte des noyaux nous apprend...



- ▶ Elle est forte comment la glue du noyau ?
 - la **masse** des noyaux
 - l'**énergie de liaison** des nucléons dans le noyau



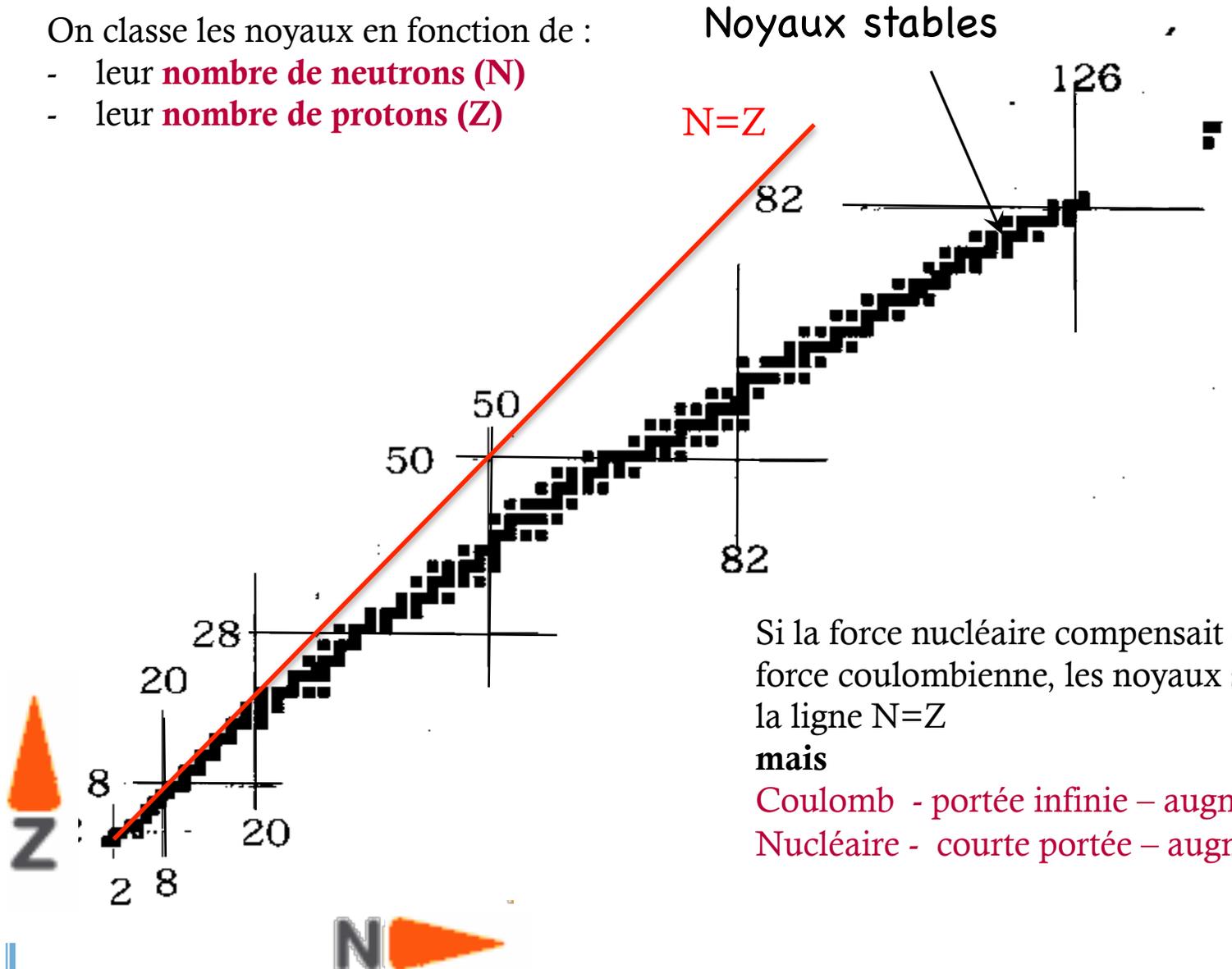
- ▶ Ca pèse combien un noyau ?
- ▶ Pourquoi le noyau ne s'effondre-t-il pas ?
- ▶ La taille des noyaux



LA CARTE DES NOYAUX (STABLES)

On classe les noyaux en fonction de :

- leur **nombre de neutrons (N)**
- leur **nombre de protons (Z)**

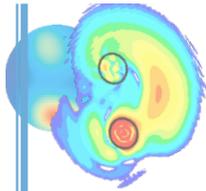


Si la force nucléaire compensait exactement la force coulombienne, les noyaux stables suivraient la ligne $N=Z$

mais

Coulomb - portée infinie – augmente comme Z^2

Nucléaire - courte portée – augmente comme A

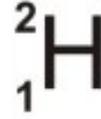
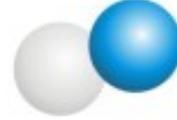


L'EXEMPLE DES ISOTOPES DE L'HYDROGÈNE

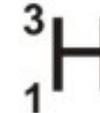
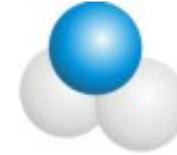
		⁶ Li	⁷ Li
	³ He	⁴ He	
¹ H	² H	³ H	



Hydrogène



Deutérium



Tritium

- *Masse :*

$m_p + m_n = 2.01594 \text{ u.m.a}$	$m_p + 2m_n = 3.0246075 \text{ u.m.a}$
$M({}^2\text{H}) = 2.01355 \text{ u.m.a}$	$M({}^3\text{H}) = 3,0160492 \text{ u.m.a}$
- *Réaction de formation :*

$n + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + \gamma$	$n + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{H} + \gamma$
$\gamma = 2.225 \text{ MeV}$	$\gamma = 6.2504 \text{ MeV}$

$$M({}^A_Z\text{X}) < N m_N + Z m_p$$

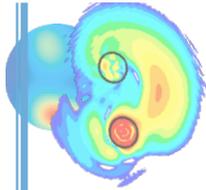
$$M({}^A_Z\text{X}) = N m_N + Z m_p - B(N, Z)$$

Il y a un **défaut de masse !**
 associé à une **énergie de liaison $B(N, Z)$**
 qui correspond à l'énergie qu'il faut apporter au noyau
 pour dissocier tous les nucléons

Masse du noyau

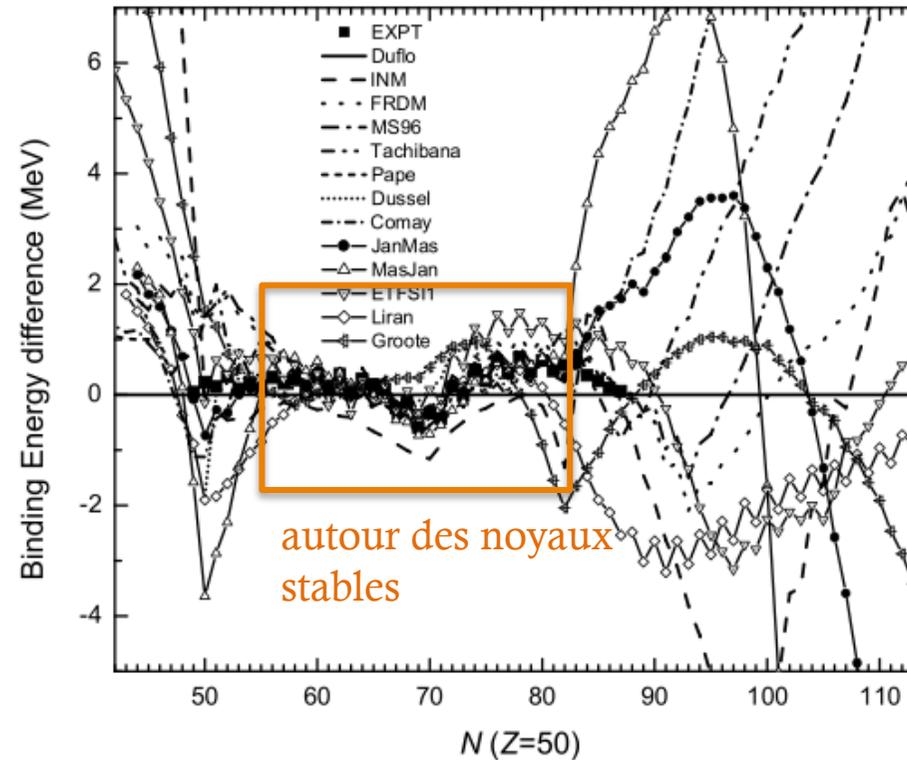


Masse de ses
constituants
(neutrons &
protons)



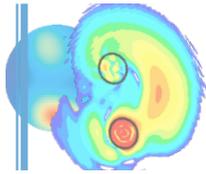
POURQUOI MESURER DES MASSES ?

En dehors des zones de noyaux bien connus (autour de la vallée de stabilité) **les modèles divergent !!**



Besoin de faire des mesures de grande précision !

10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
-	-	-
astrophysique	fermeture de couches	appariement halos



MESURE DE MASSE AVEC SPECTROMETRE ET FAISCEAUX ACCÉLÉRÉS

si ion transmis mvt circulaire

$$F_m \equiv \text{force centrifuge } F_c = M v^2 / \rho$$

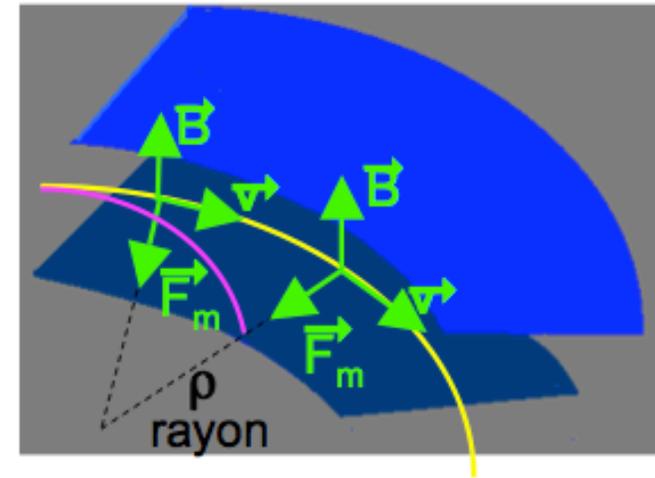
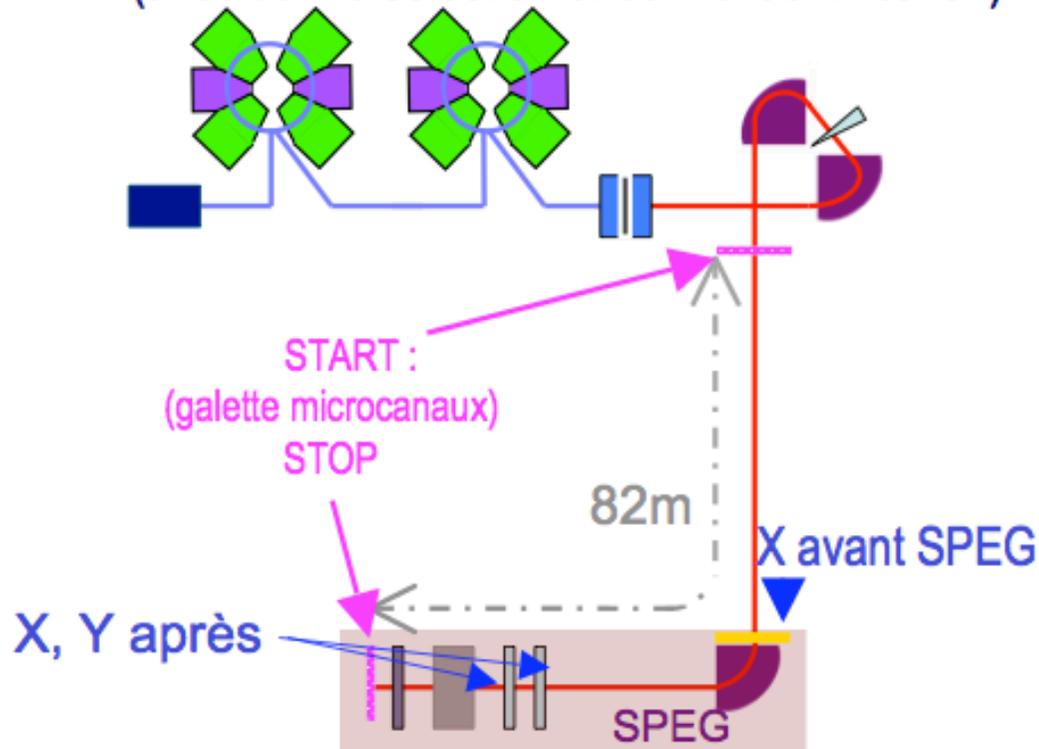
$$\Rightarrow QvB = M v^2 / \rho \quad (M = Ac^2, A = Z+N)$$

$$\Rightarrow B \rho = (M/Q) v \quad (B \rho = \text{rigidité magnétique})$$

$$\Rightarrow M = B \rho v / Q$$

\Rightarrow il suffit de mesurer ρ et v

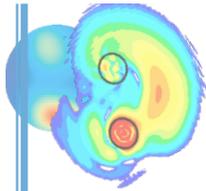
(avec bonne sélection et bonne identification)



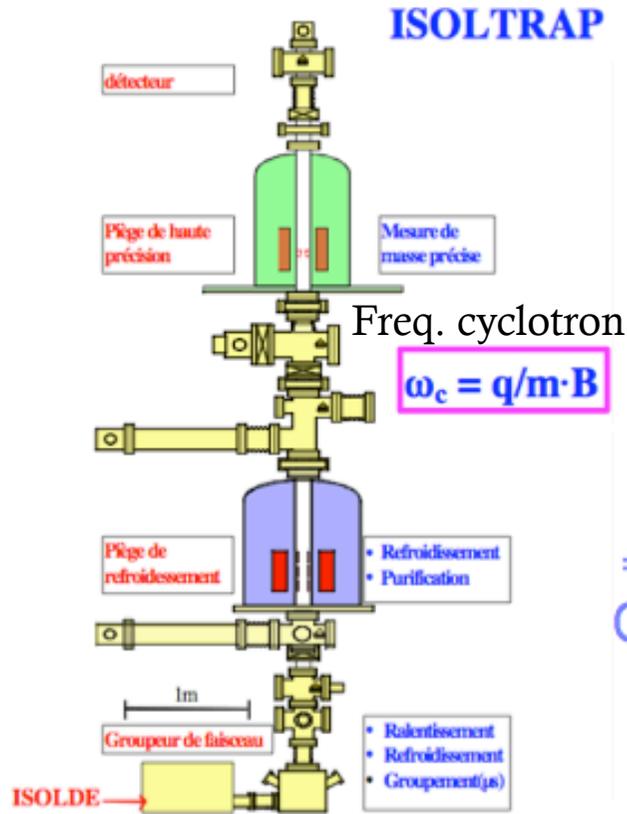
Start-Stop = t ($\sim 1 \mu\text{s}$)
+ distance parcourue
 $\Rightarrow v$

X initial et X (+ Y) final
+ optique magnétique
 $\Rightarrow \rho$

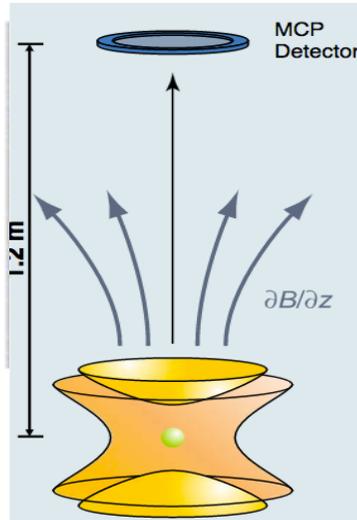
$\Rightarrow M \pm \delta M$
avec $\delta M/M \approx 2-4 \cdot 10^{-4}$



MESURE DE MASSE DANS PIEGE DE PENNING SANS POST-ACCELERATION

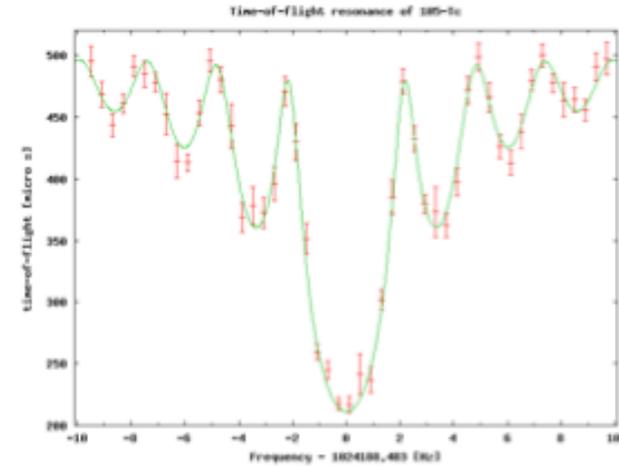


Piège de Penning



⇒ excitation avec E_{RF}
 Qd fréquence cyclotron
 Energie max

Champ électrique (quadripol.)
 Champ magnétique uniforme



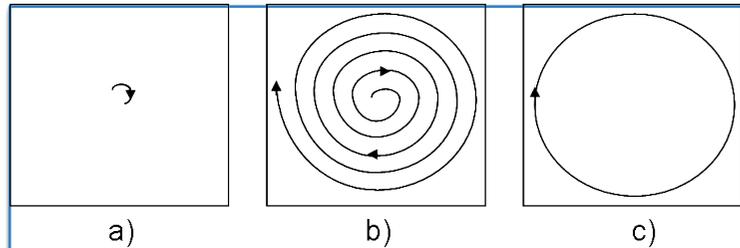
Mesure de temps de vol

si $f_{HF} = F_{cyclotron}$ $E = E_{max}$, $v = v_{max}$

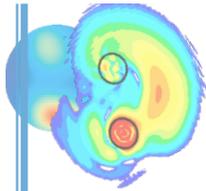
$T_{1/2} > 50$ ms

⇒ $M \pm \delta M$

avec $\delta M/M \approx 10^{-7} \text{ } 10^{-8}$



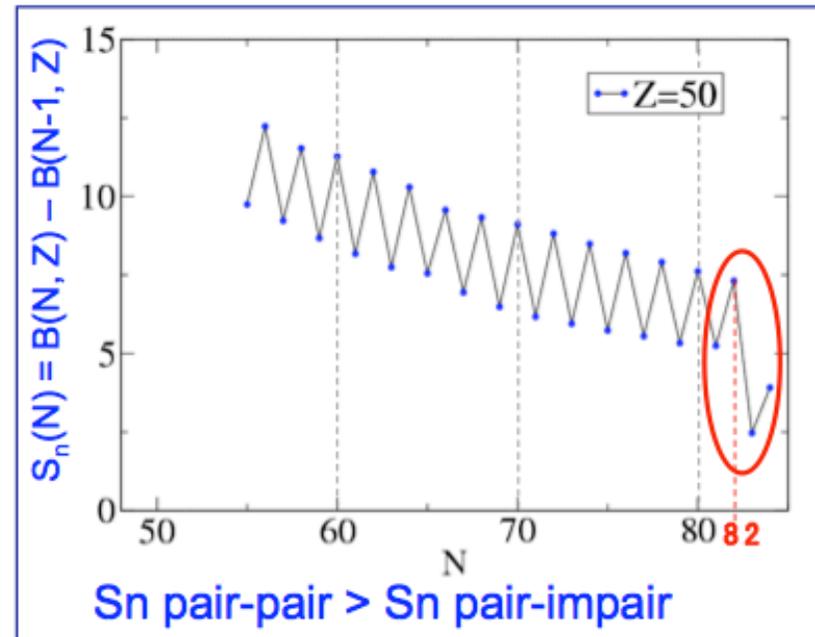
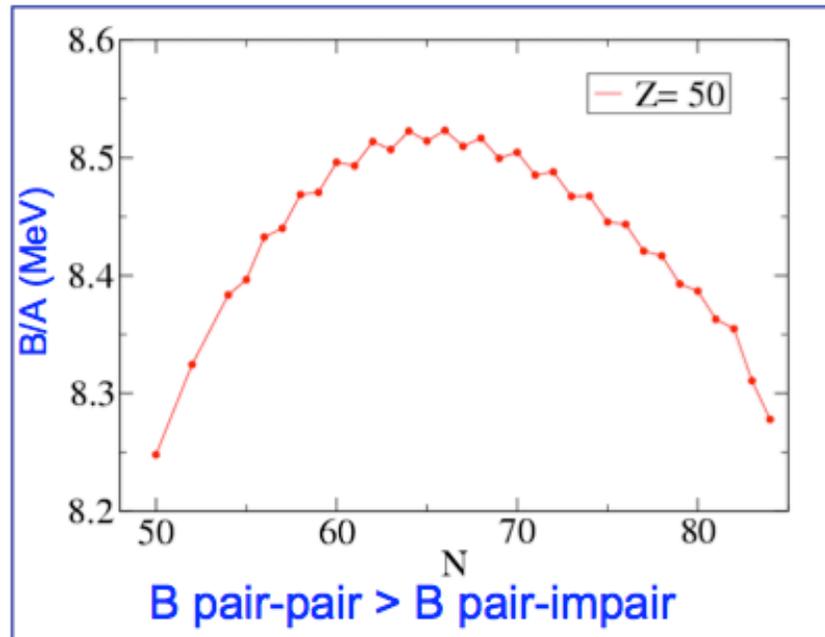
--> ejection le long
 des lignes de champ
 magnétique (Eradiale
 convertie en Eaxiale)



UN PETIT DÉTAIL : L'EFFET D'APPARIEMENT !

$B_{\text{pair-pair}} > B_{\text{pair-impair}} > B_{\text{impair-impair}}$

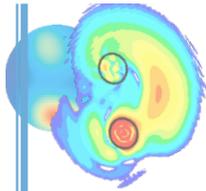
Illustration avec isotopes d'étain ($Z=50$ pair):



S_n est l'énergie de séparation d'1 neutron, car nécessaire pour libérer le "dernier" neutron

Fluctuations systématiques par rapport à la tendance générale :
(idem en Z pour N fixé)

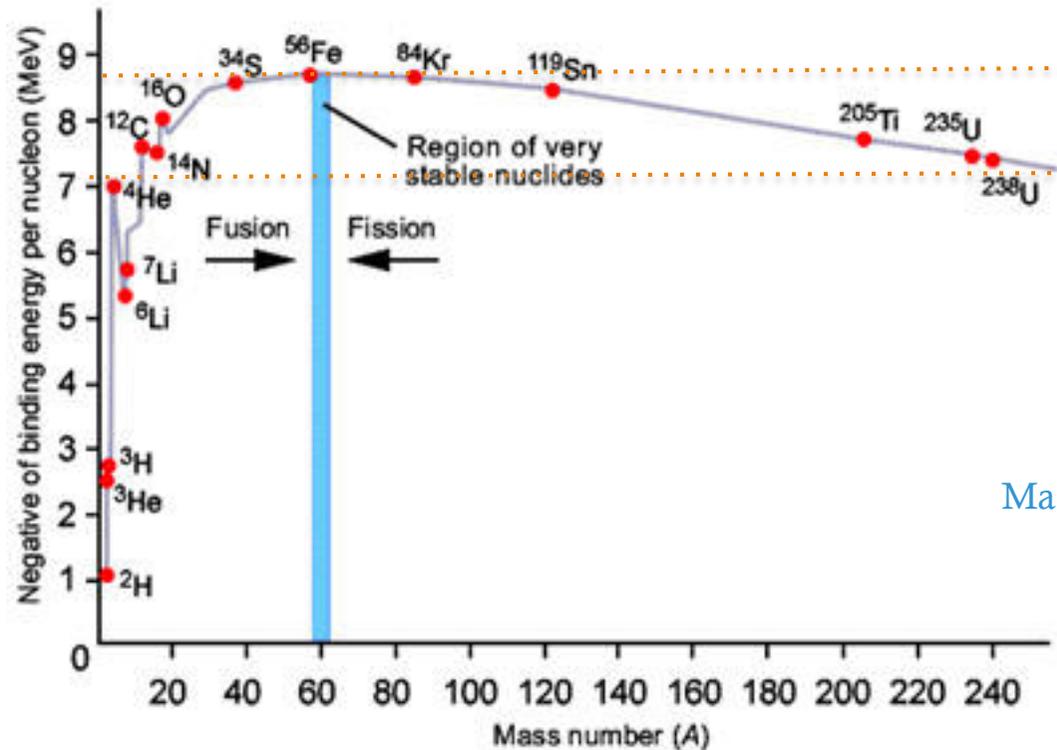
⇒ Nombre impair diminue l'énergie de liaison, les nucléons en # pairs sont + liés



LA FORCE DE L'INTERACTION FORTE...

- ▶ Combien de neutrons et de protons peut-on mettre dans un noyau ?
- ▶ Comment le nucléon est-il lié ?

Energie de liaison / nucléon



$E/A \text{ max} = 8 \text{ MeV}$

$E/A = 7 \text{ MeV}$

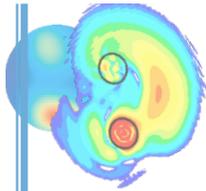


Masse du noyau

Masse de ses
constituants
(neutrons &
protons)

- ▶ Les noyaux les plus liés ($A < 16$) sont des multiples de 1^4He

$$B(N,Z) - B(2,2) \times n = \begin{matrix} -0,09 \text{ MeV} & n=2 \\ 7,27 \text{ MeV} & n=3 \\ 14,44 \text{ MeV} & n=4 \end{matrix}$$



QU'EST-CE QUE ÇA NOUS APPREND SUR LE NOYAU ?

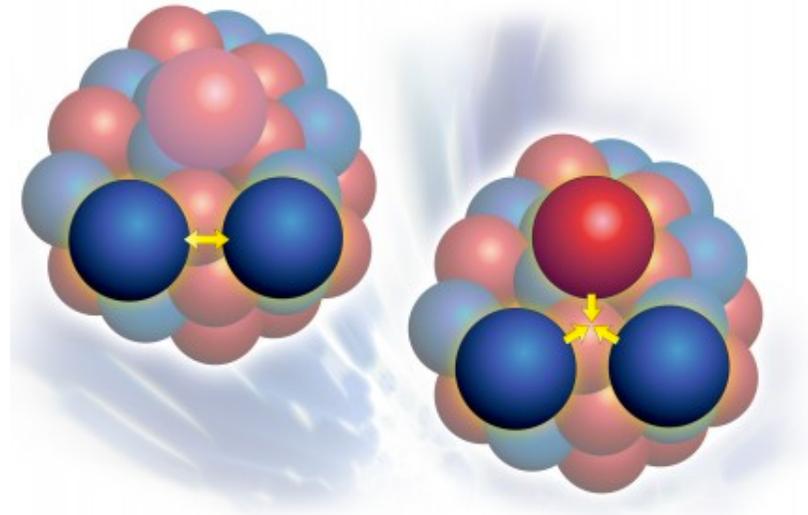
E/A constant pour $A > 20$

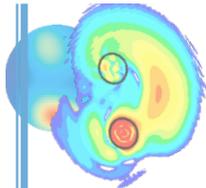
→ l'interaction nucléaire est principalement une force à **2 corps** avec une moindre contribution des forces à 3 et 4 corps.

→ pas de force à 1 corps !

Analogie avec l'électron de l'atome :

ils sont liés par un potentiel central électrostatique créé par les protons du noyau
il y a donc une force qui agit sur l'électron même s'il est seul (cas de l'H)





COMMENT COMPRENDRE LA SATURATION DE LA FORCE NUCLÉAIRE ?

$E =$ énergie par liaison

Force à 2 corps (max) Énergie/nucleon

$A = 2$



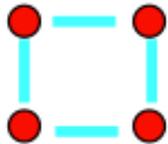
$$E/2$$

$A = 3$



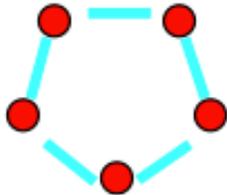
$$3E/3 = E$$

$A = 4$



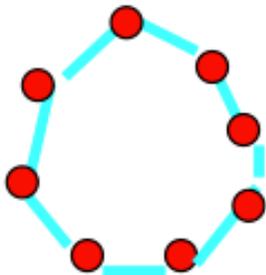
$$4E/4 = E$$

$A = 5$



$$5E/5 = E$$

$A = 8$



$$8E/8 = E$$

saturation à E

Force à 3 corps (max) Énergie/nucleon

$A = 2$



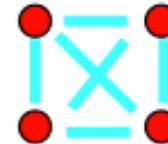
$$E/2$$

$A = 3$



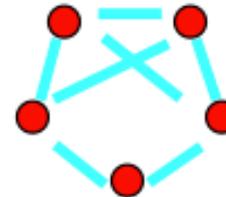
$$3E/3 = E$$

$A = 4$



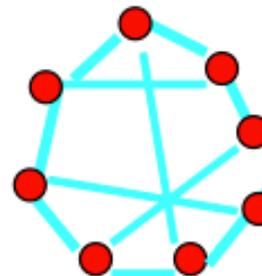
$$6E/4 = 1,5E$$

$A = 5$



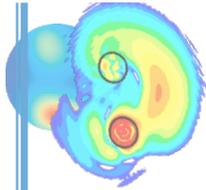
$$10E/5 = 1,5E$$

$A = 8$



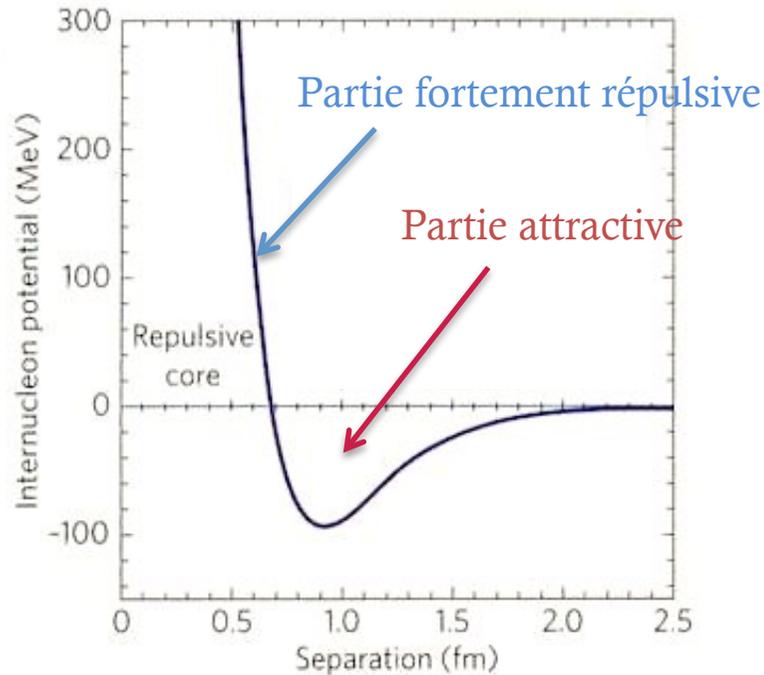
$$12E/8 = 1,5E$$

saturation à $1,5E$



POURQUOI LE NOYAU NE S'EFFONDRE-T-IL PAS SUR LUI-MÊME ?

L'interaction nucléaire



► Compression des nucléons :

Avec une force forte seulement **attractive**, les nucléons pourraient s'ajouter les uns sur les autres donc la densité du noyau devrait augmenter avec A Mais ça n'est pas le cas !

- grâce au **principe de Pauli**
- grâce à la répulsion à très faible distance (<0.5 fm)

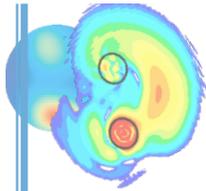
Les nucléons dans le noyau sont donc aussi proches que possible ! (mais pas les uns sur les autres!)

► La taille du noyau :

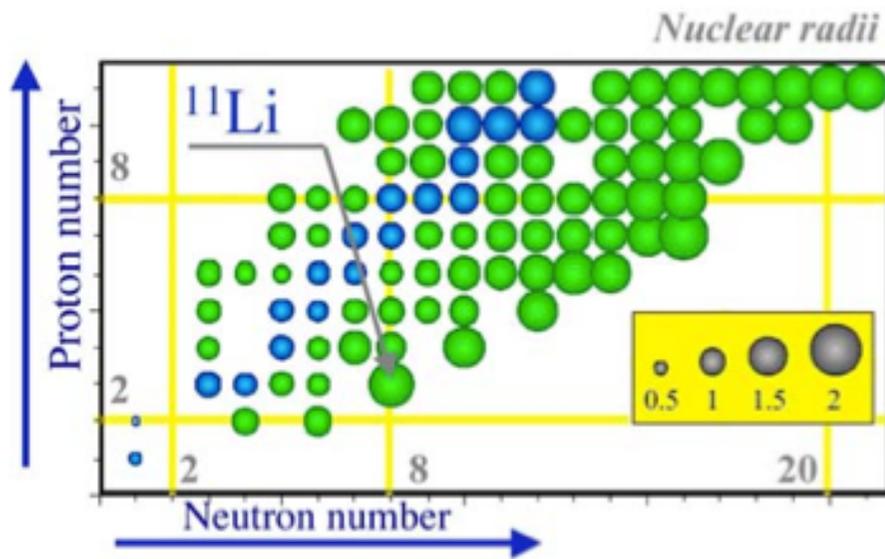
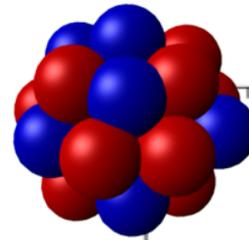
Le volume du noyau est proportionnel au nombre de nucléons A (pas de compression)

$$\text{Volume d'une sphère : } V = \frac{4}{3} \pi r^3$$

donc le rayon $r = r_0 A^{1/3}$ avec $r = 1.2 \text{ fm}$ (~ taille d'un nucléon)



LE RAYON DU NOYAU ET SES ANOMALIES !



Les noyaux à halos !

On va en reparler... (cours 2 & 3)

