

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) !

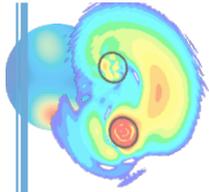
et les noyaux représentent **99% de la masse des atomes...** (rien que ça !)

▶ 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 ?

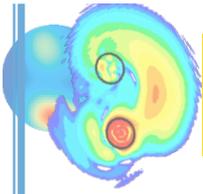
- I. Les échelles de la physique nucléaire et comment voir le noyau ?
- II. La « glue » du noyau et ses conséquences
- III. Ça pèse combien un noyau ? Masse et énergie de liaison
- IV. Les noyaux instables. Combien y en a ? Comment on les fabrique ?

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



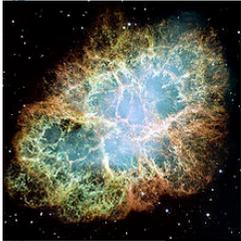
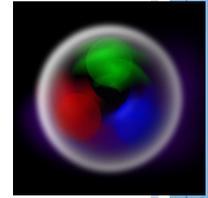
DE L'INFINIMENT GRAND À L'INFINIMENT PETIT

On a découvert de nombreux systèmes complexes....

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

.... à l'infiniment petit

10^{-20}m



10^{40}kg



10^7m

10^{27}kg



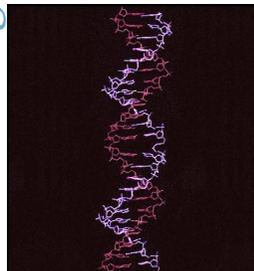
10^{-3}kg

10^{-1}m



10^{-5}m

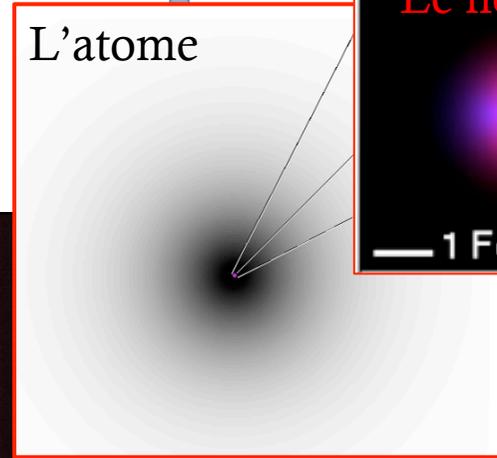
10^{-15}kg



10^{-8}m

10^{-27}kg

L'atome



Le noyau

— 1 Fermi

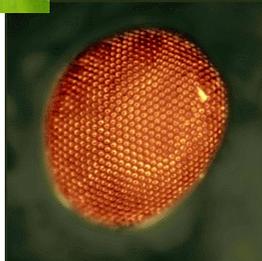
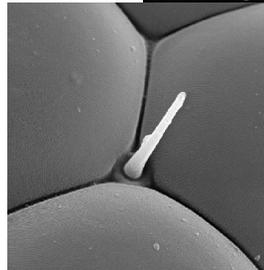
10^{-15}m

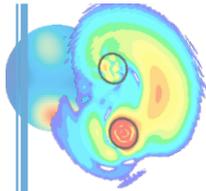
10^{-10}m

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

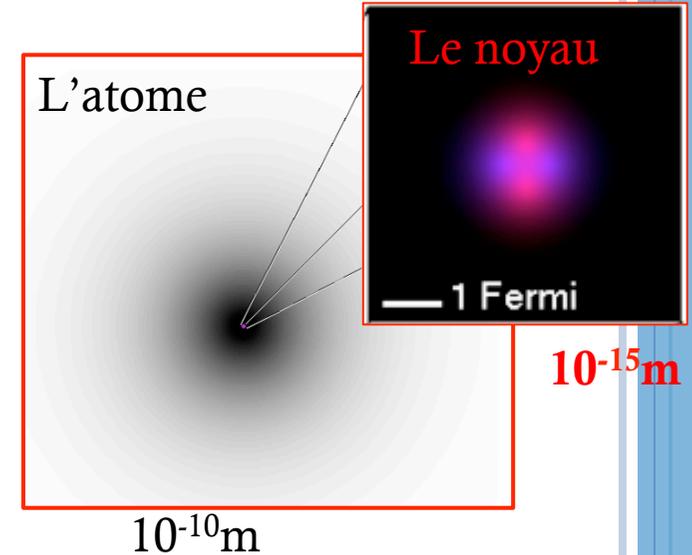
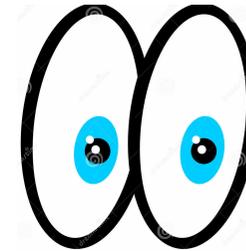
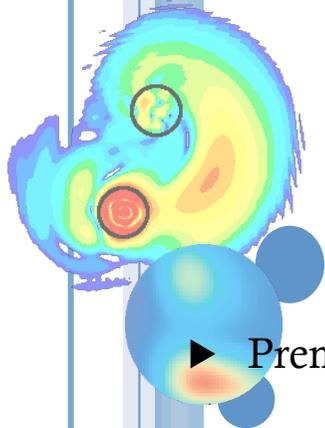


TABLE 2.2 Some of the Isotopes of Carbon ^a			
Symbol	Number of Protons	Number of Electrons	Number of Neutrons
¹¹ C	6	6	5
¹² C	6	6	6
¹³ C	6	6	7
¹⁴ C	6	6	8

^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)



- ▶ 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)

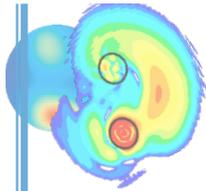
Et aujourd'hui ?

- on cherche des radioactivités « exotiques »
- on utilise les décroissances λ pour étudier certains noyaux...

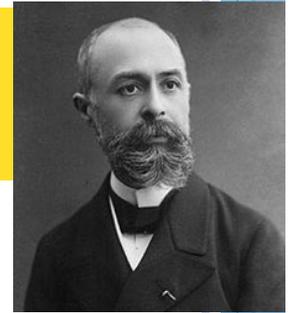
COMMENT VOIR LE NOYAU ?

- ça s'appelle la diffusion Rutherford (ou diffusion élastique) et on en mesure toujours !

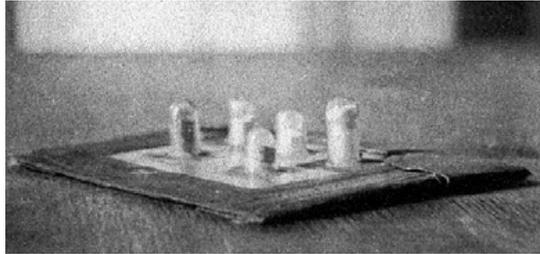
- ▶ Que nous dit la mécanique quantique ?



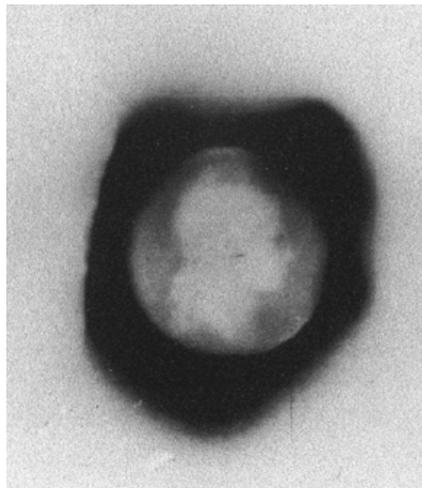
1896 : DÉCOUVERTE DE LA RADIOACTIVITÉ PAR BECQUEREL



Expérience de phosphorescence

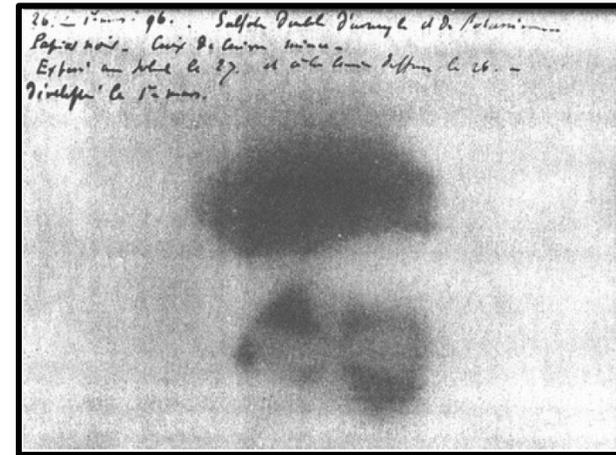


Dispositif expérimental : sels d'uranium dans tubes de verre et plaque photo emballée dans du carton noir exposés à la lumière



Impression de la plaque photo après développement (médaille métallique)

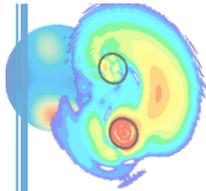
Découverte de la radioactivité



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.

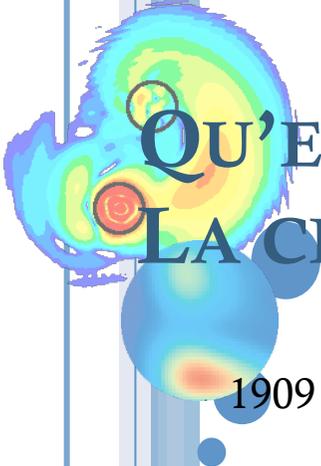
Elle ajoute qu'il faut admettre que c'est « forcément dans l'atome » que quelque chose se modifie puisque c'est à l'atome et non à la molécule qu'est liée la radioactivité

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

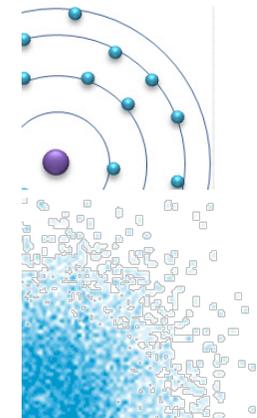
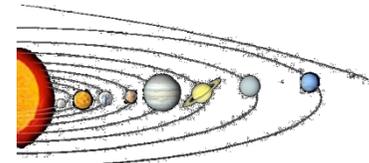


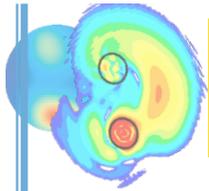
QU'EST-CE QUE C'EST UN ATOME ?

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
puisqu'il persiste encore...
- 1913 Le modèle de Bohr : une amélioration quantique

La vision quantique du noyau

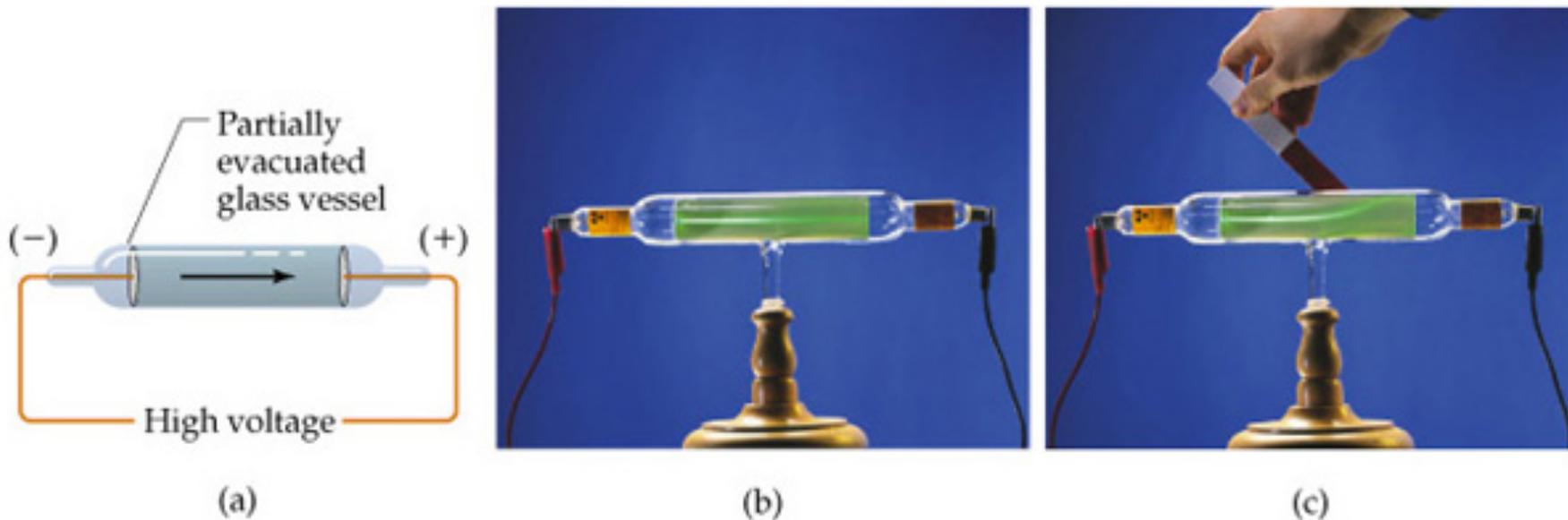




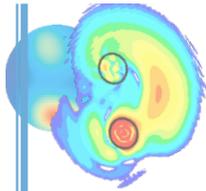
1897 : DÉCOUVERTE DE L'ÉLECTRON PAR THOMSON



Mise en évidence des « rayons cathodiques »

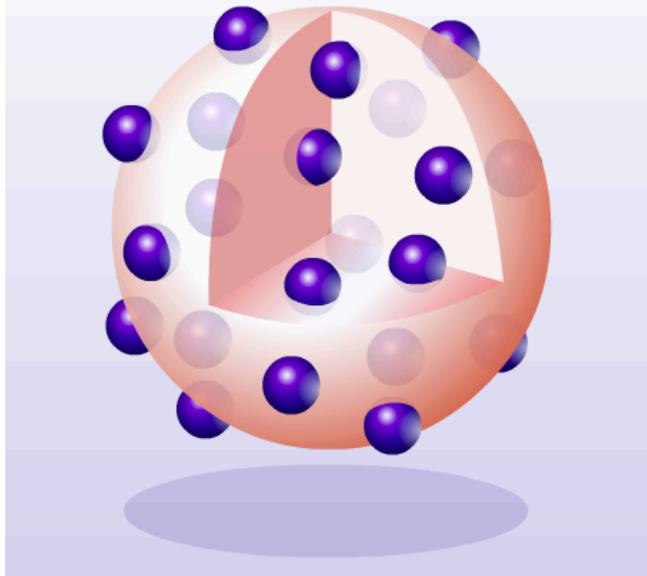


- Les rayons cathodiques sont déviés par les champs magnétiques et électriques
→ Ils sont **chargés (négativement)**
- Ils sont de même nature quels que soient les matériaux utilisés pour la cathode ou la plaque métallique



PREMIÈRE VISION DE L'ATOME (1909)

"Le pudding de Thomson"



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

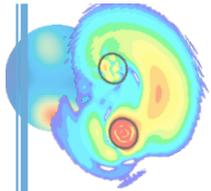
Idée de Thomson :

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** »

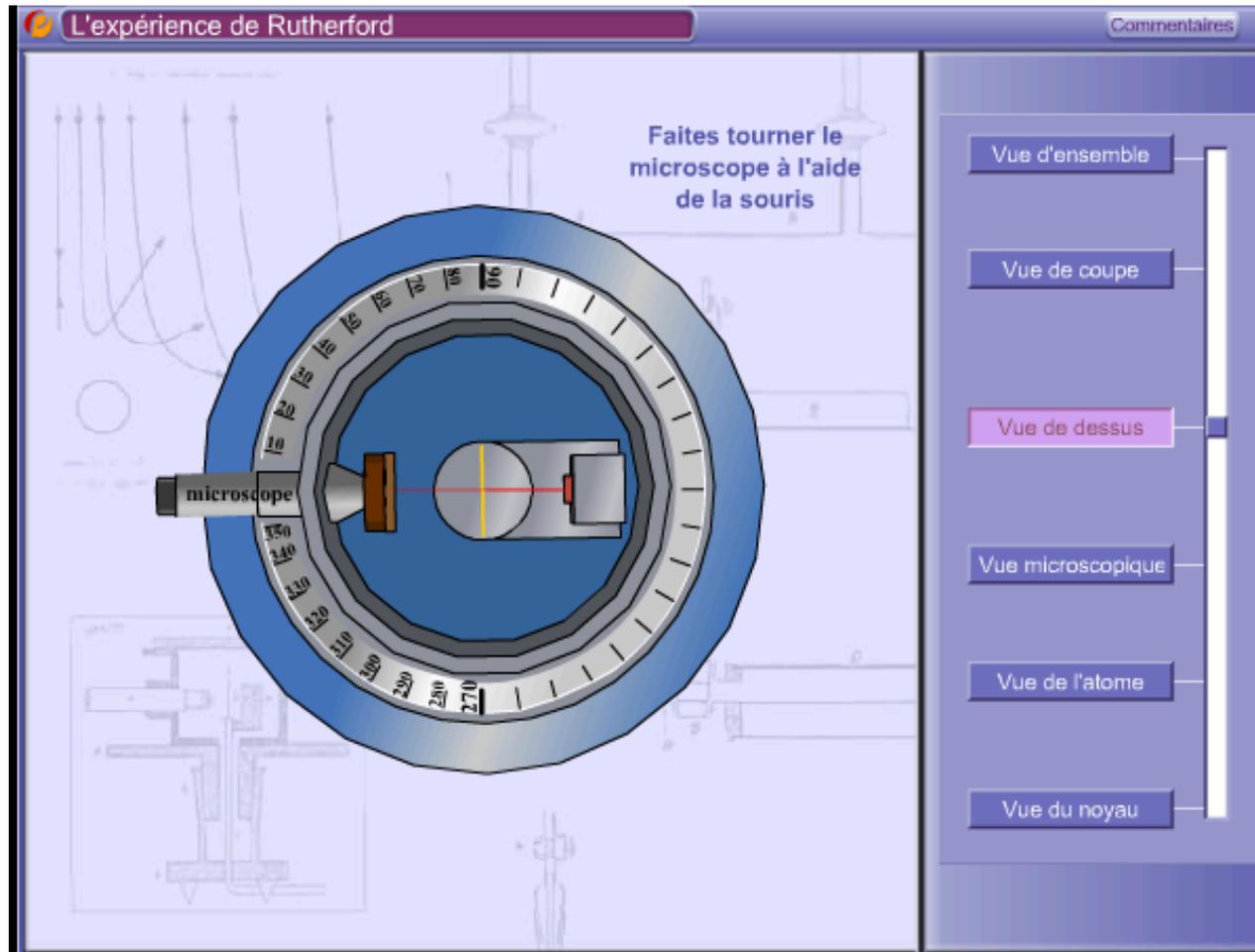
Comment tester ce modèle ?

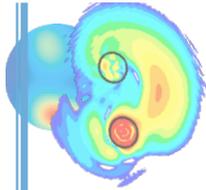
-> par une réaction nucléaire, la première de l'histoire de la physique !



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

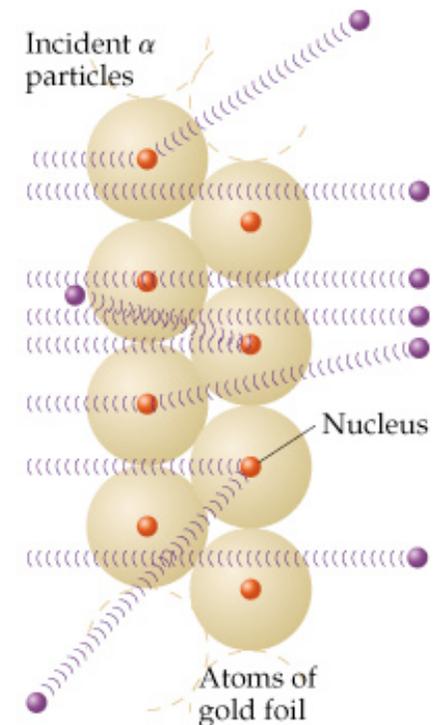
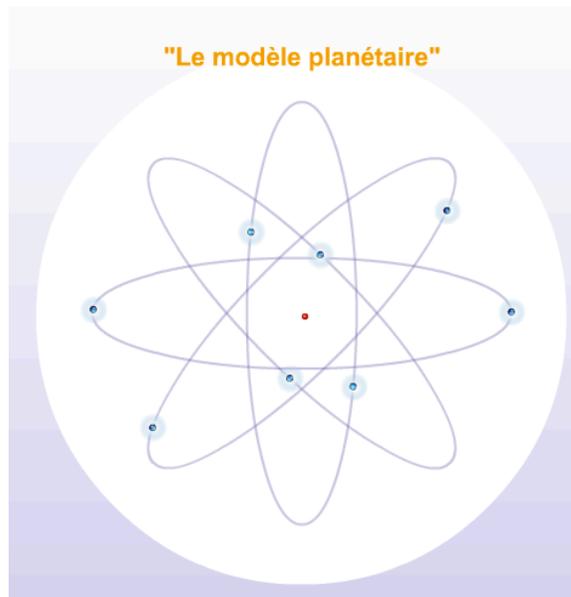
- La première réaction de la physique nucléaire : l'expérience de Rutherford



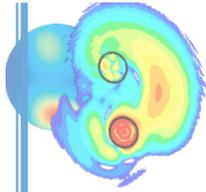


LE MODÈLE DE RUTHERFORD

« 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. »

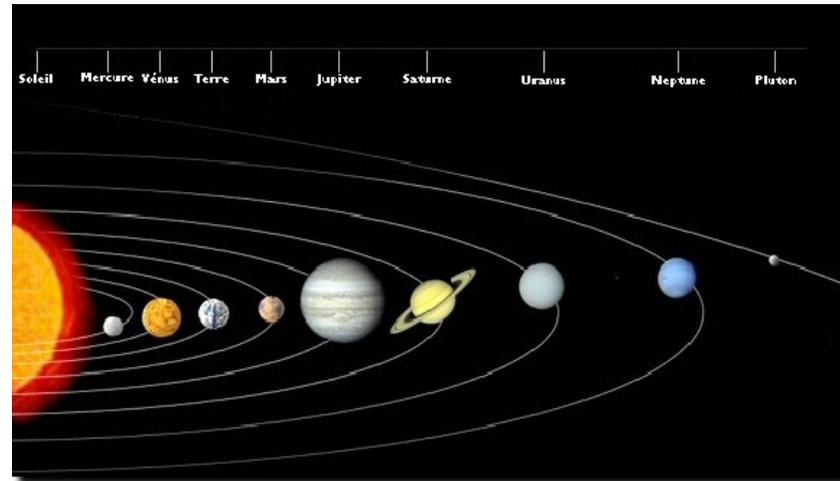
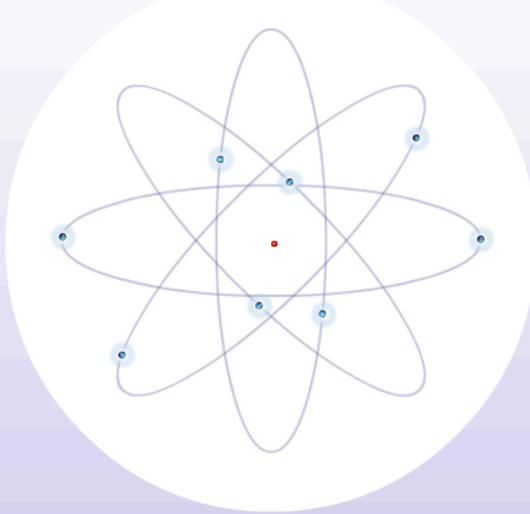


- . L'atome est principalement **vide**
- . La presque totalité de la masse de l'atome est située au centre dans le noyau
- . Le noyau est constitué de **charges positives entassées**
- . Les électrons gravitent autour du noyau dans l'espace vide autour de celui-ci
- . L'atome est **neutre** : autant 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 ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$)

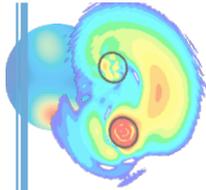
$D_{N-e^-} / R_N = 10 \times D_{\odot-P} / R_{\odot}$ (15 si Neptune au lieu de Pluton)

et tout aussi (voire plus) "central" :

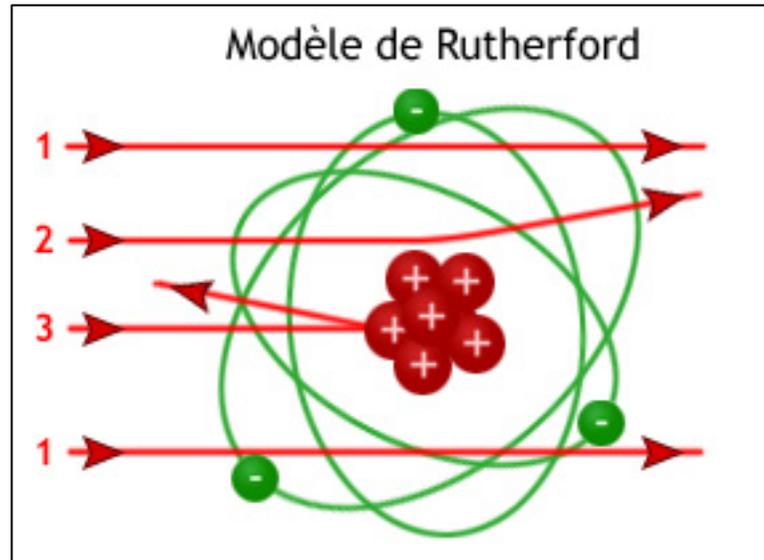
Le soleil contient plus de 99% de la matière du système solaire

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



LES LIMITES DU MODÈLE PLANÉTAIRE



Problèmes de ce modèle :

Selon les lois de la physique classique :

Un électron qui tourne autour du noyau devrait dégager de la lumière

-> **il tournerait en spirale jusqu'au noyau**

-> destruction de l'atome

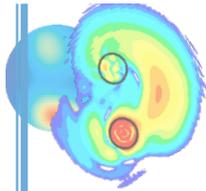
Loi fausse car seuls les éléments radioactifs sont instables

Pour expliquer la masse de 1^4He :

introduction du neutron=

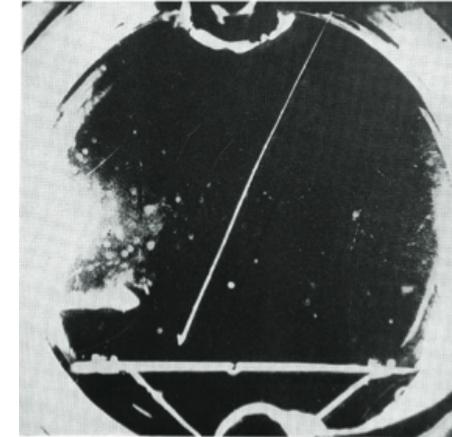
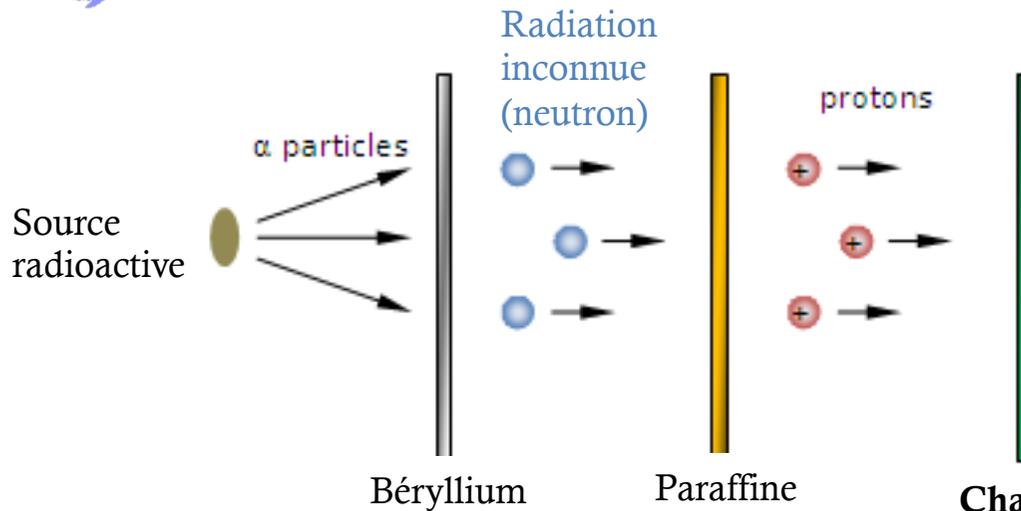
doublet neutron (proton+electron)

par Rutherford (1920)



LA DÉCOUVERTE DU NEUTRON

Expérience des Joliot-Curie



Chambre de Wilson (Joliot-Curie)
Chambre à Ionisation de Chadwick

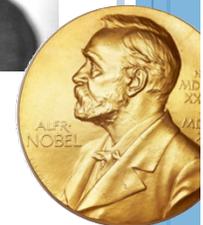


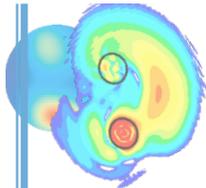
It is to be expected that many of the effects of a neutron in passing through matter should resemble those of a quantum of high energy, and it is not easy to reach the final decision between the two hypotheses. Up to the present, all the evidence is in favour of the neutron, while the quantum hypothesis can only be upheld if the conservation of energy and momentum be relinquished at some point.

J. CHADWICK.

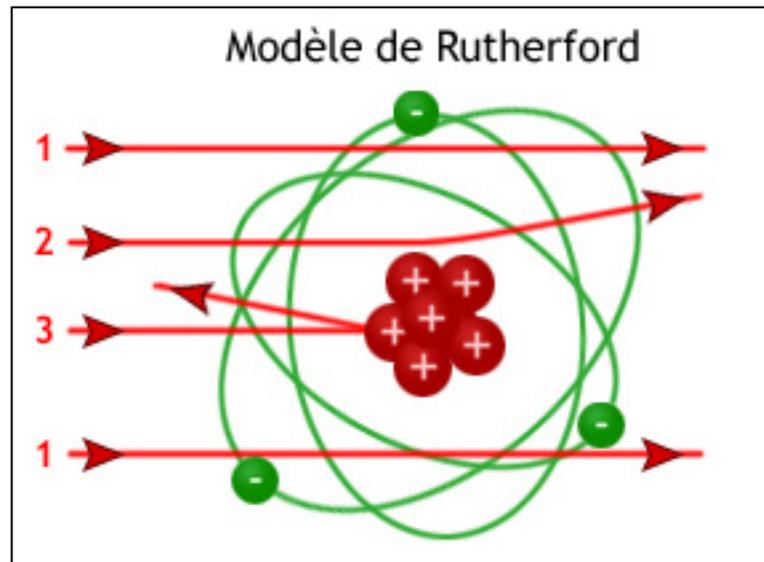


Chadwick





LES LIMITES DU MODÈLE PLANÉTAIRE



Problèmes de ce modèle :

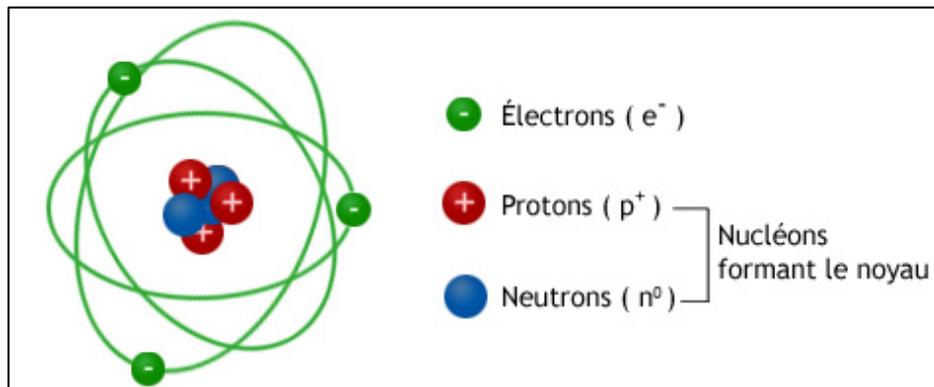
Selon les lois de la physique classique :

Un électron qui tourne autour du noyau devrait dégager de la lumière

-> **il tournerait en spirale jusqu'au noyau**

-> destruction de l'atome

Loi fausse car seuls les éléments radioactifs sont instables

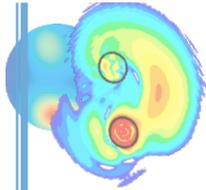


Pour expliquer la masse de 1^4He :

**introduction du neutron =
doublet neutron (proton+electron)**

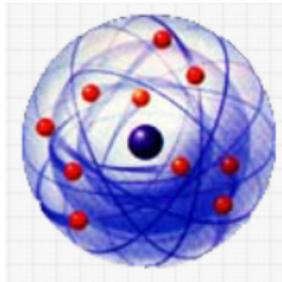
Rutherford (1920)

**Découverte du neutron en 1932
(seulement !)**



LA MECANIQUE QUANTIQUE ARRIVE !

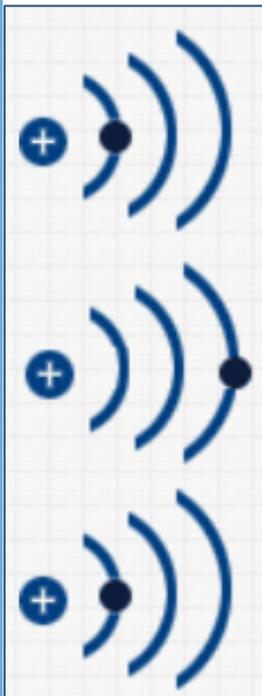
- 1900 Planck fait l'hypothèse des quantas (grains) d'énergie
- 1905 Einstein invente le photon (quanta de lumière et d'énergie)
- 1913 Modèle de Bohr



➔ Le problème : si l'atome émet de la lumière, c'est qu'il perd de l'énergie !
Or les électrons ne s'écrasent pas sur le noyau!

Solution de Bohr

- Orbites des électrons **quantifiées**
= *tous les électrons sur la même orbite ont la même énergie*
- Lorsqu'il saute d'une orbite à l'autre il peut émettre de la lumière



L'électron tourne autour du noyau, sur une couche électronique bien définie.

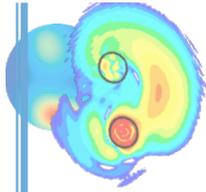
L'électron est sur une couche électronique plus énergétique. Cette situation est **instable** et le besoin de stabilité l'amène à perdre cette énergie pour se rapprocher du noyau.

L'électron est à nouveau sur sa couche électronique définie.



Sous l'effet de l'énergie thermique (chaleur) ou électrique ou encore par une onde électromagnétique (photon), **l'électron est excité** par cette énergie qu'il absorbe et **saute sur une couche électronique plus énergétique.**

L'électron revient sur sa couche électronique, à son état fondamental. Lors de son retour, **il libère, sous forme d'énergie lumineuse (photons),** l'énergie thermique ou électrique qu'il avait absorbée.

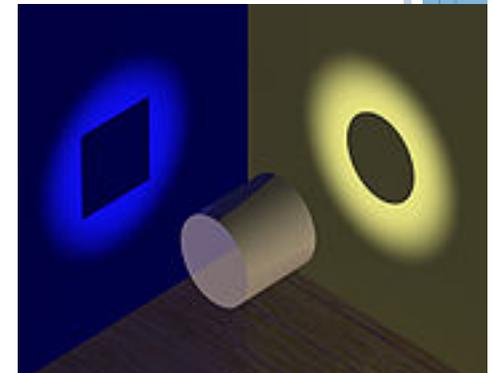


LA MECANIQUE QUANTIQUE ARRIVE !

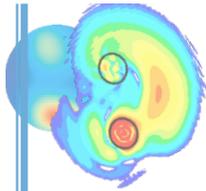
Quand le modèle de la particule ponctuelle faiblit...

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m.E}} \rightarrow$$

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



$$\lambda = \frac{h}{p}$$

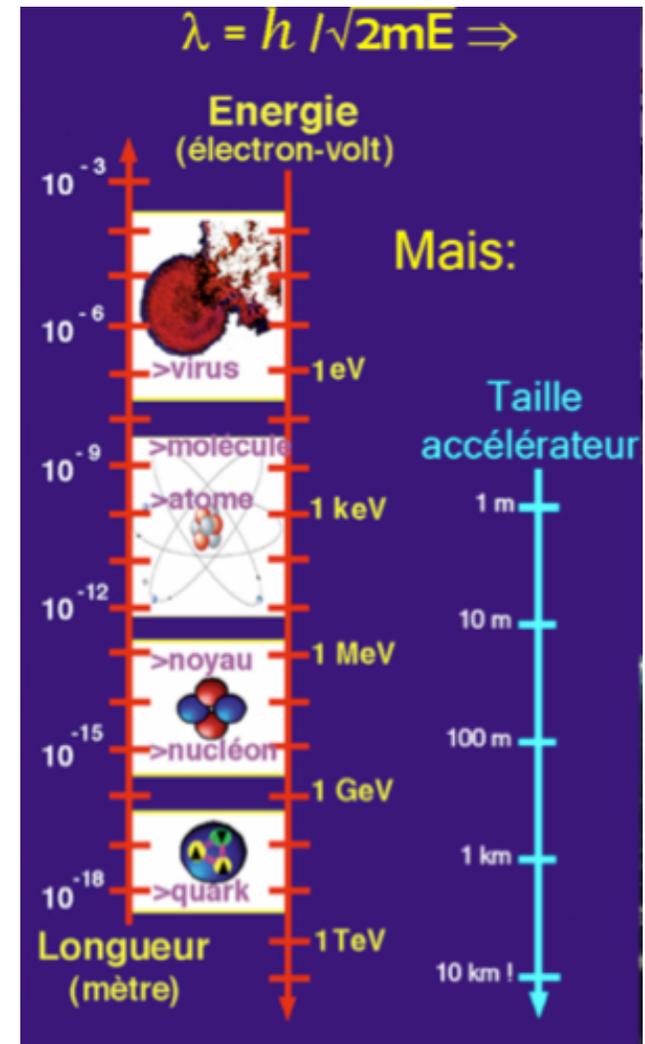


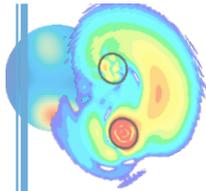
LA MECANIQUE QUANTIQUE ARRIVE !

Quand le modèle de la particule ponctuelle faiblit...

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m.E}} \rightarrow$$

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



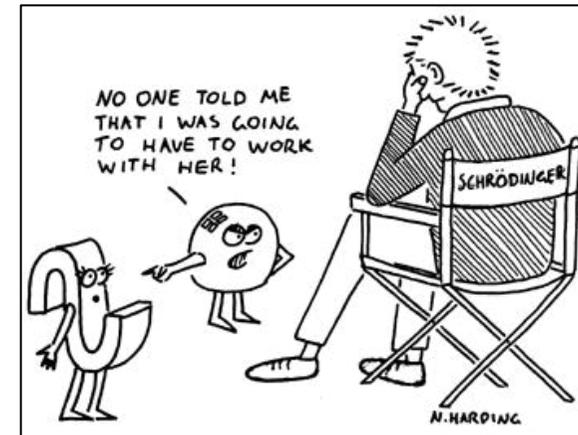


LA MECANIQUE QUANTIQUE ARRIVE !

Quand le modèle de la particule ponctuelle faiblit...

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Vision probabiliste



Step 1:

Measure your momentum exactly.



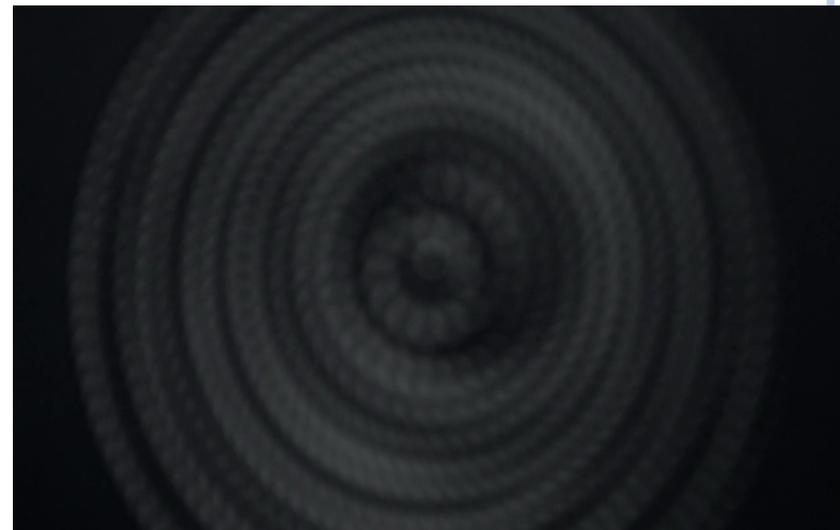
Step 2:

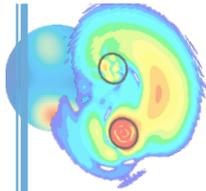
$$\sigma_x \sigma_p \geq \frac{\hbar}{2}$$

You are now everywhere



Problem,



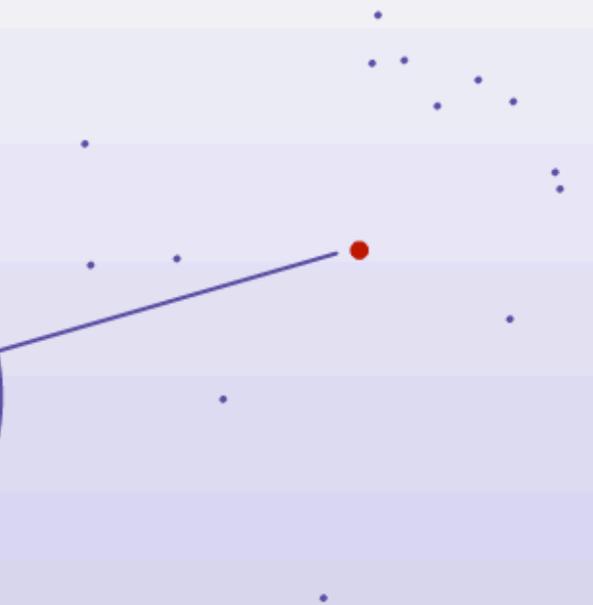
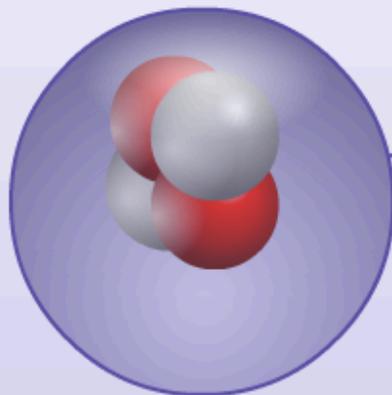


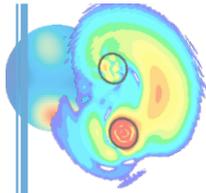
COMMENT NOTRE VISION DE L'ATOME ET DU NOYAU A-T-ELLE EVOLUÉ ?

Probabilité instantanée
de présence

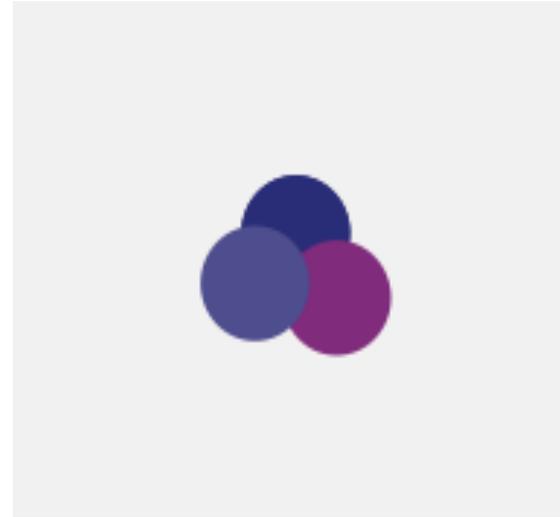
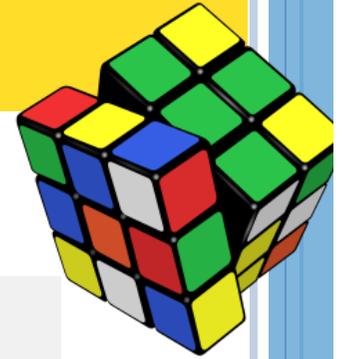
Cumul des probabilités
de présence

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

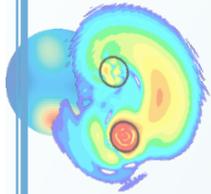




COMMENT REPRÉSENTER LE NOYAU ?



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



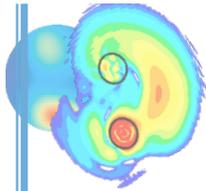
- ▶ La puce à l'oreille : **l'énergie énorme libérée** dans les désintégrations

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

l'interaction faible



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



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



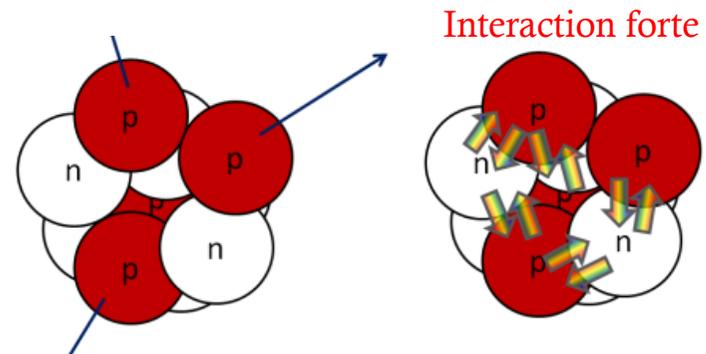
La gravité

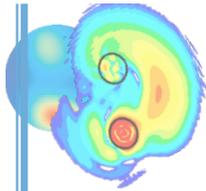
L'interaction
Électromagnétique
(responsable des
phénomènes magnétiques
et électriques, de l'émission
de lumière...)

« 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



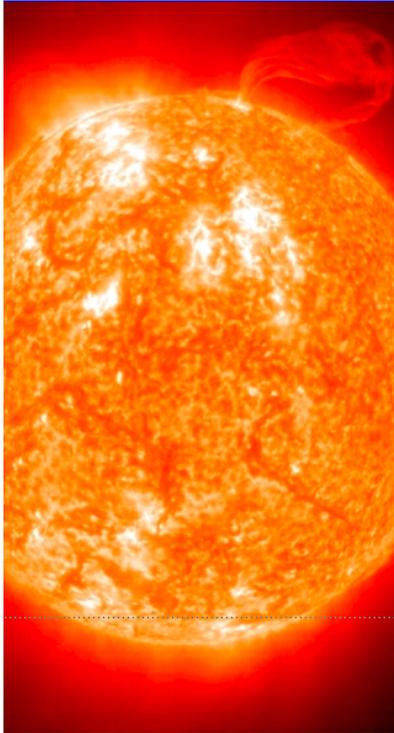
La mayonnaise: *Émulsion huile et eau liée par liaison
hydrogène (électrostatique) et grâce protéines œufs
(tensioactives) qui jouent le rôle d'interaction forte.*



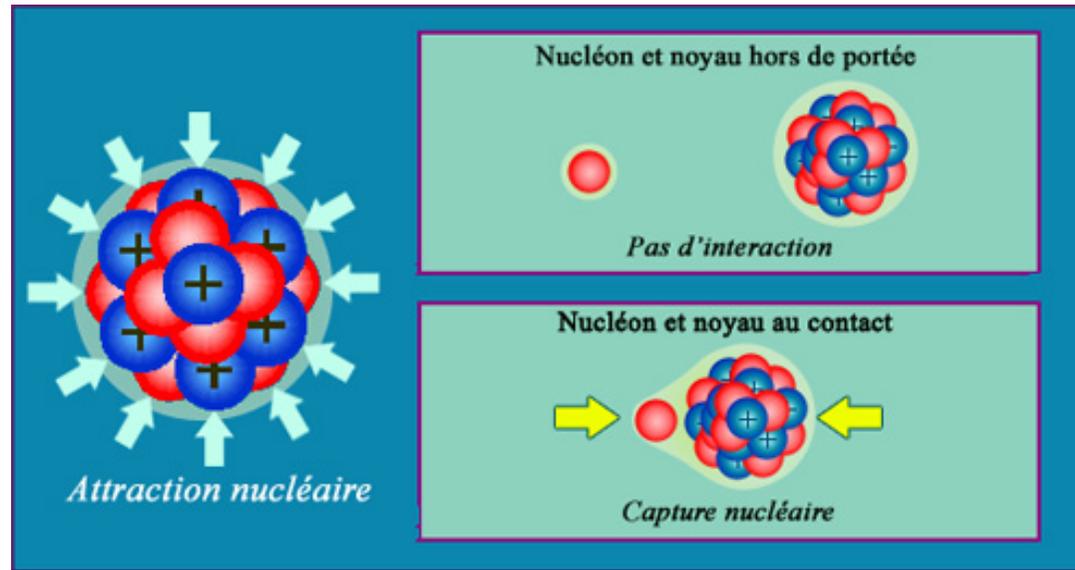


LES PRINCIPES DE LA FORCE FORTE (SUPER-GLUE DU NOYAU)

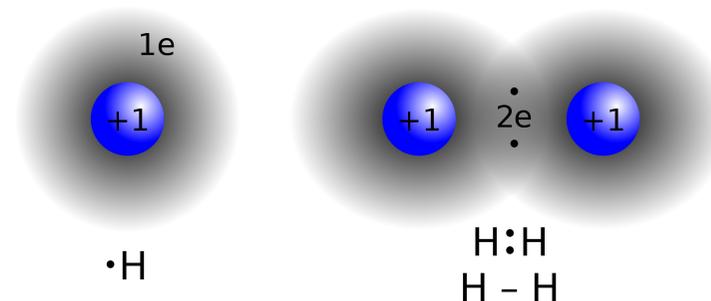
- La force nucléaire est de **courte portée**
 - elle ne concerne que **quelques nucléons** (~10)
 - elle permet l'**émission d'alpha**

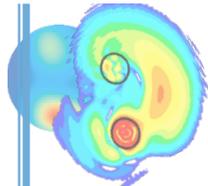


L'interaction forte
aui fournit l'énergie à
l'Univers



- 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...

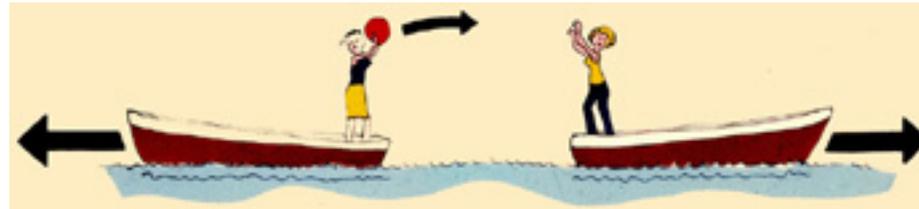
Épilogue :

1935 Yukawa première théorie de l'interaction forte

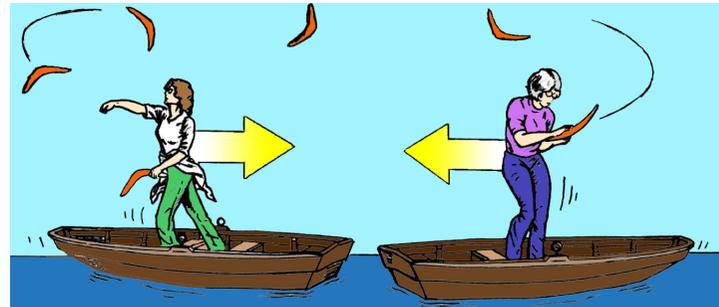
1964-1970 : QCD, quarks

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

Répulsion (électromagnétisme)

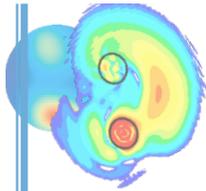


Attraction (nucléaire)



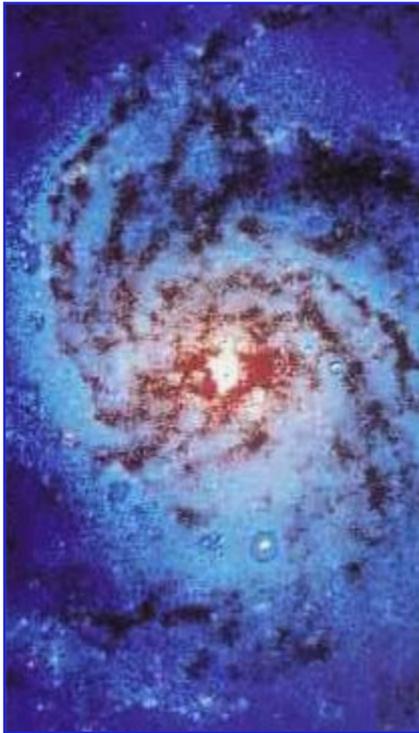
L'interaction nucléaire opère dans la partie à basse énergie de la QCD, là où l'interaction est la plus complexe. Les études sur le noyau permettent de comprendre mieux la QCD

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...

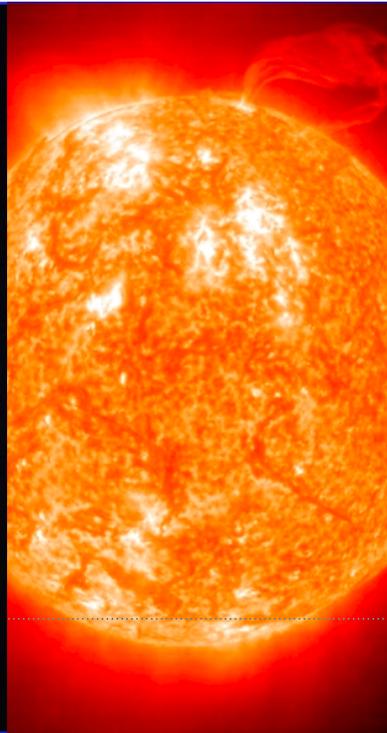
A la fin du XIX^{ème} siècle, 2 forces :
gravité & électromagnétique (**physique classique**)



La gravité



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

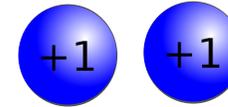


L'interaction forte
qui fournit l'énergie à
l'Univers

Rapports de force :



$10^{-15}m$

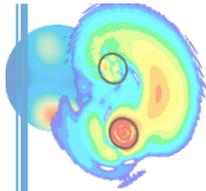


nucléaire 100 fois > électromag.

$10^{-14}m$

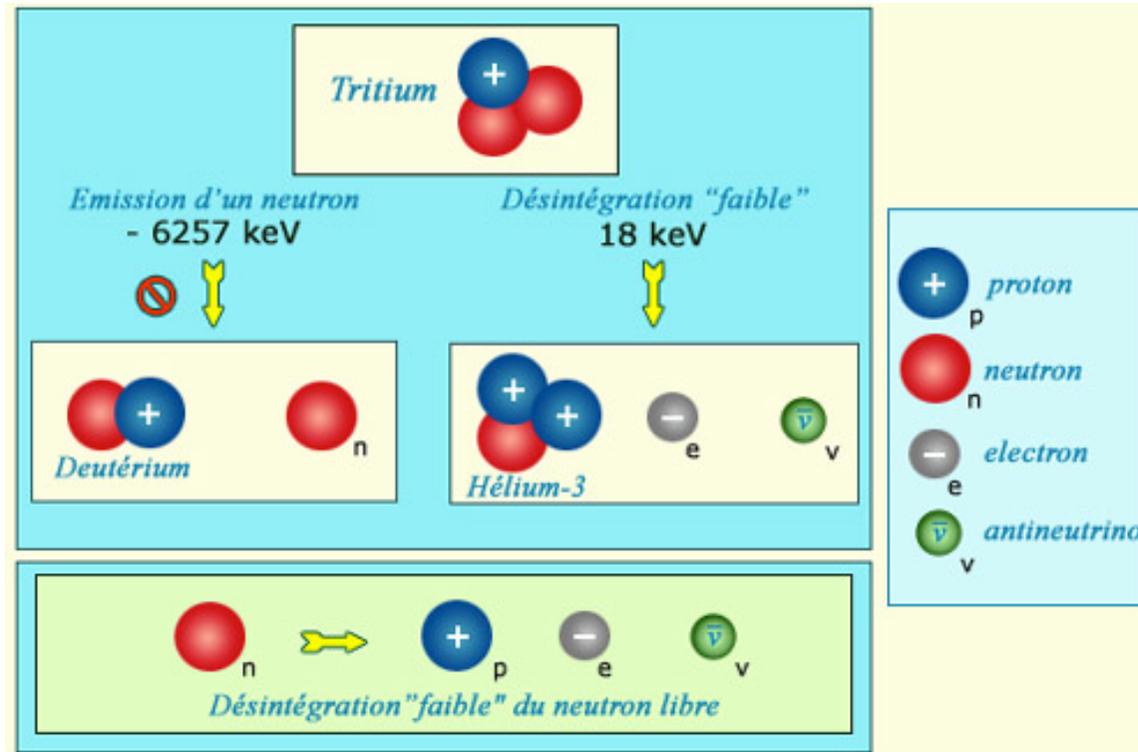


nucléaire = électromag



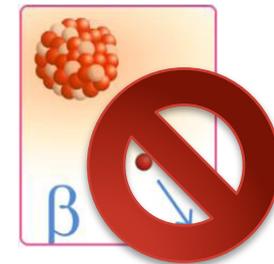
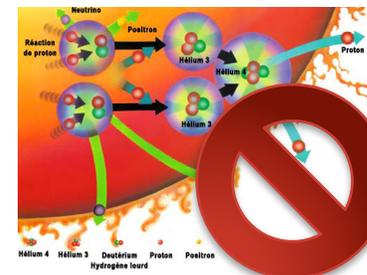
INTERACTION FAIBLE

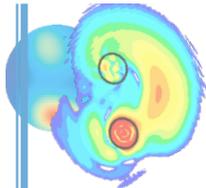
- Exemple du tritium



- 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 fusion d'hydrogènes dans le Soleil
réduit le nombre de noyaux stables





LE TABLEAU COMPLET : LES 4 FORCES POUR COMPRENDRE LES NOYAUX

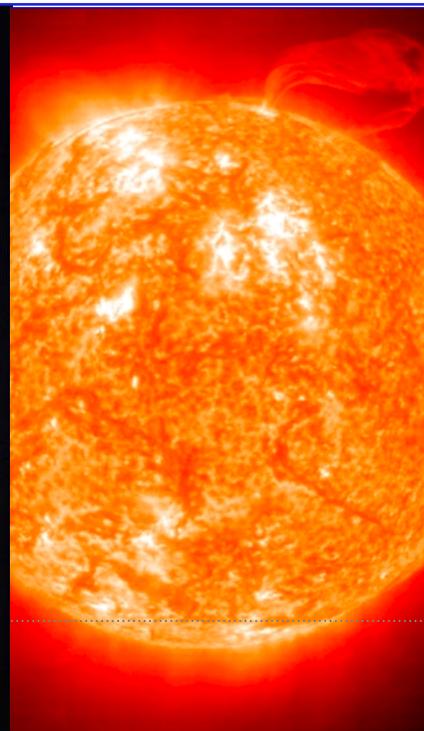
Portée	∞	∞	10^{-15}	10^{-18}
Force relative	10^{-38}	1/137	1	10^5



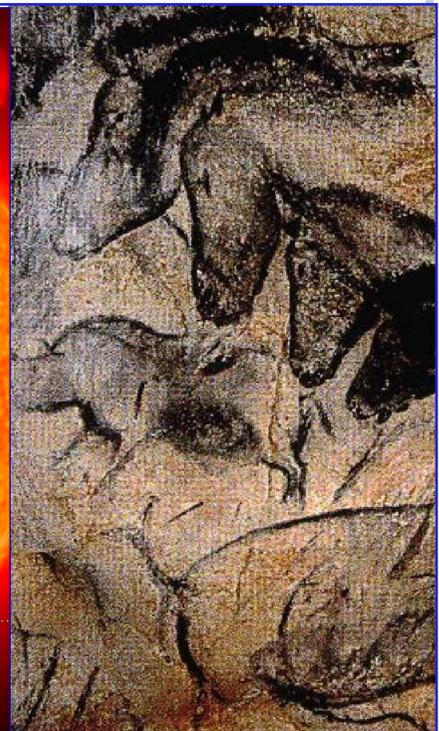
La gravité



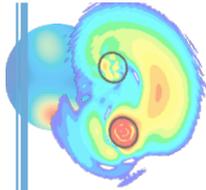
L'interaction
Électromagnétique
(responsable des
phénomènes
magnétiques et
électriques, de
l'émission de lumière...)



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

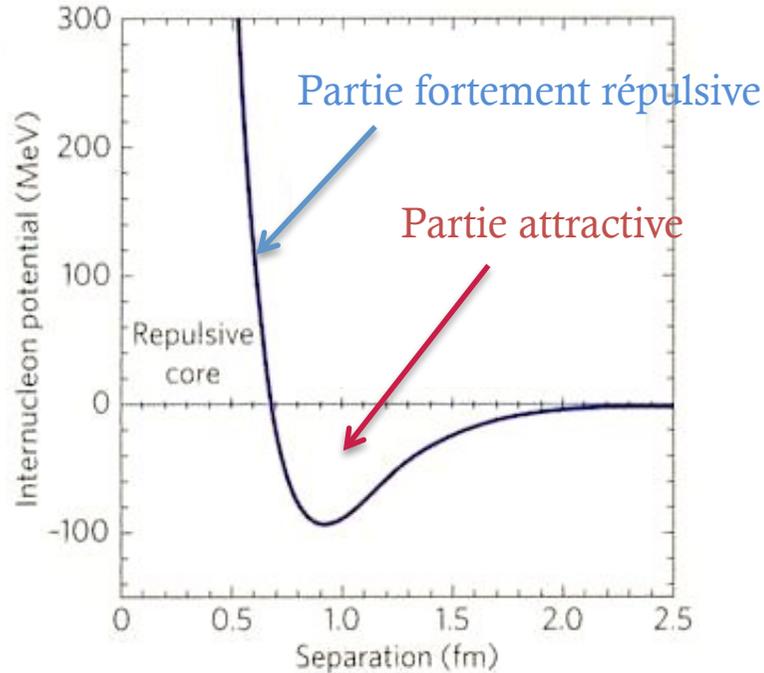


L'interaction forte
qui fournit l'énergie à
l'Univers



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)

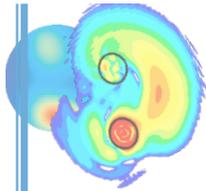
Les nucléons dans le noyau sont donc aussi proches que possible ! (mais pas les uns sur les autres!)

► La taille du noyau :

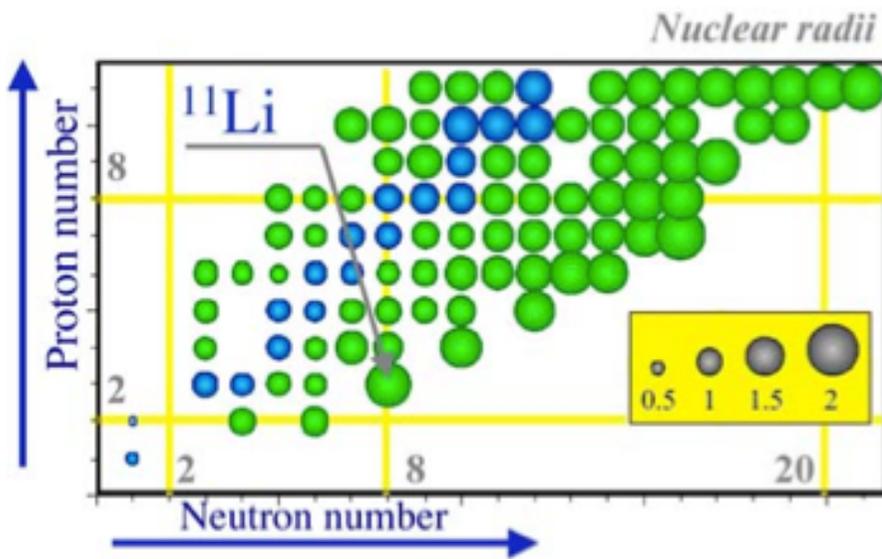
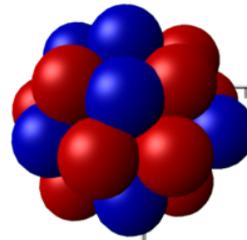
Le volume du noyau est proportionnel au nombre de nucléons A (pas de compression)

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

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

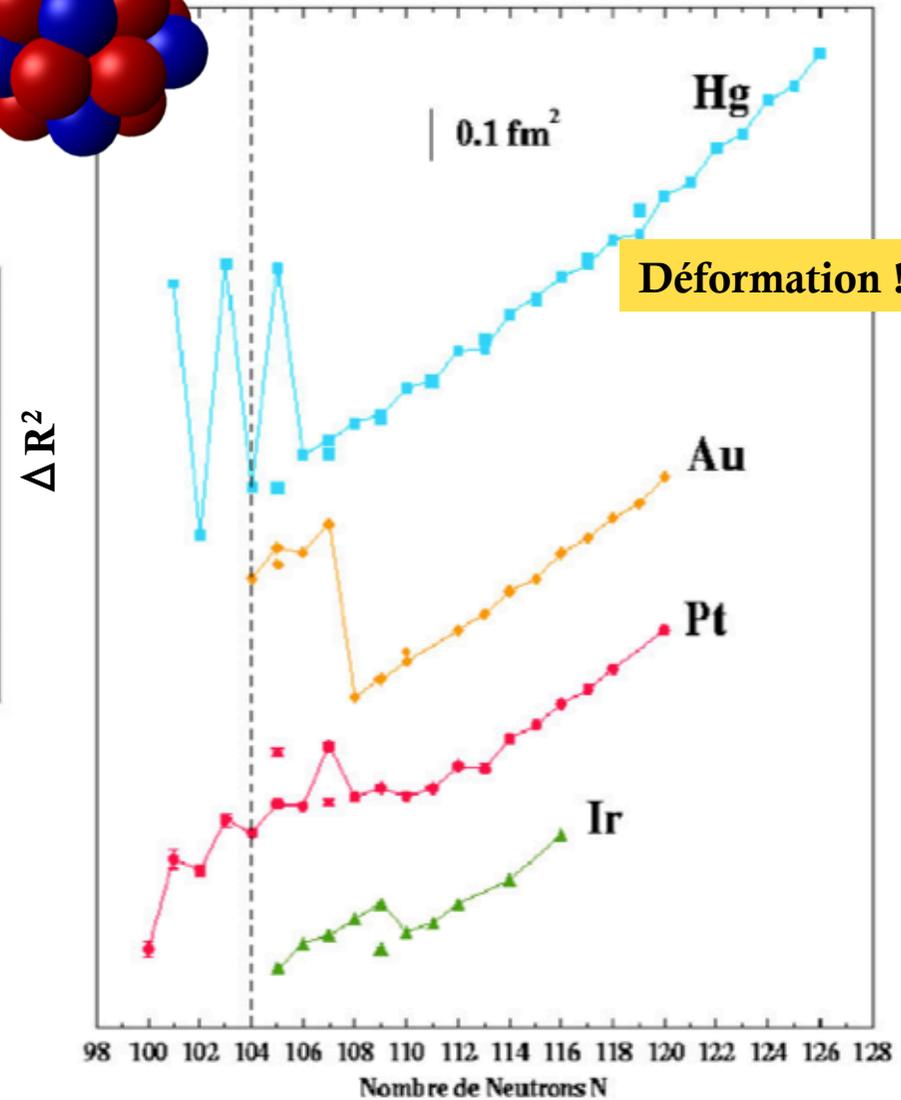


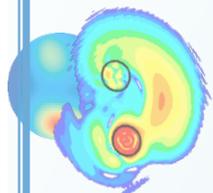
LE RAYON DU NOYAU ET SES ANOMALIES !



Les noyaux à halos !

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





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



► Ce que la carte des noyaux nous apprend...



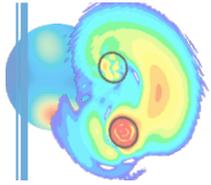
► Ca pèse combien un noyau ? La masse des noyaux



► Elle est forte comment la glue du noyau ?

- la **masse** des noyaux

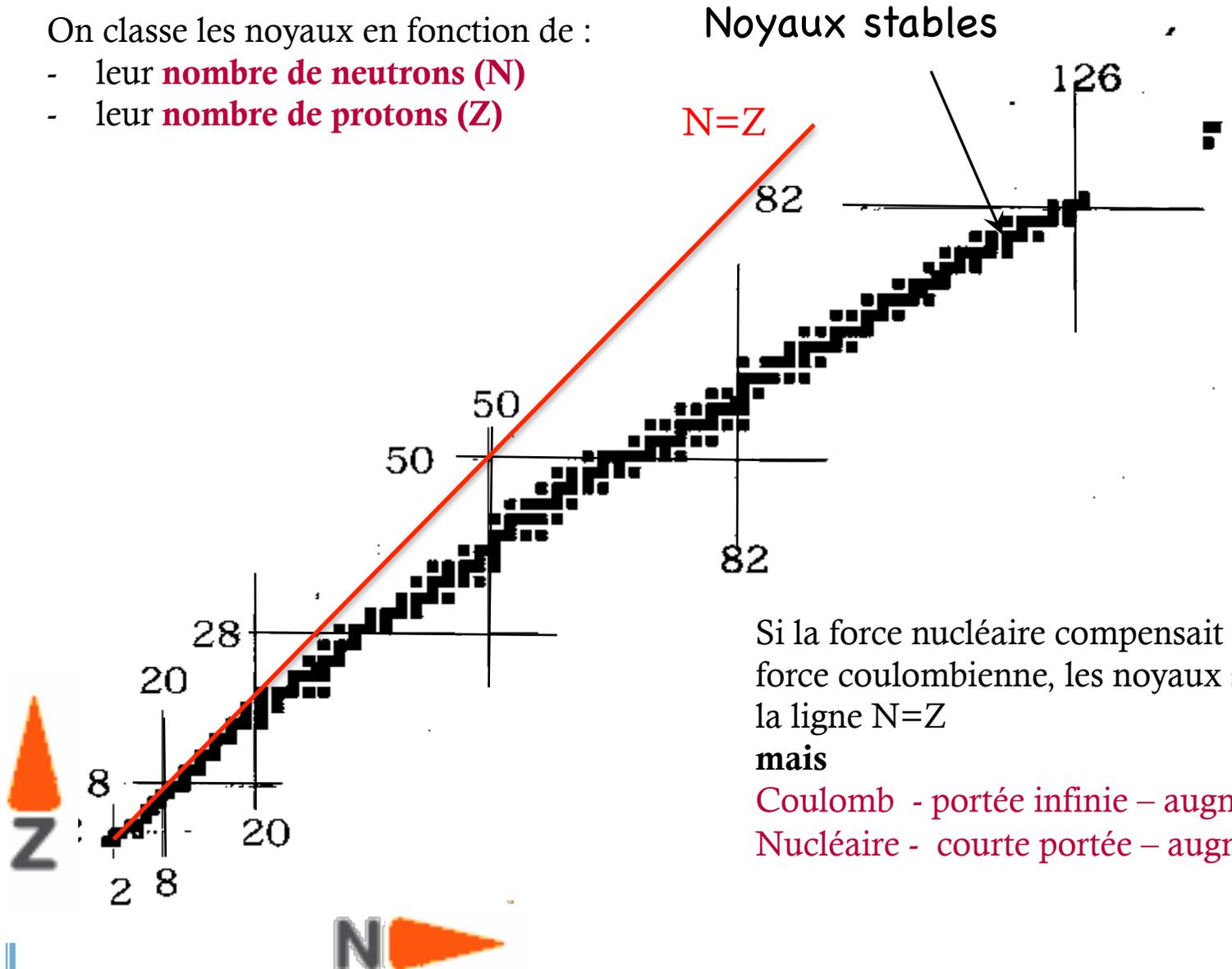
- l'**énergie de liaison** des nucléons dans le noyau



LA CARTE DES NOYAUX (STABLES)

On classe les noyaux en fonction de :

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

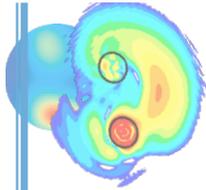


Si la force nucléaire compensait exactement la force coulombienne, les noyaux stables suivraient la ligne $N=Z$

mais

Coulomb - portée infinie – augmente comme Z^2

Nucléaire - courte portée – augmente comme A



CA PÈSE COMBIEN UN NOYAU ?

- ➔ On parle pas de poids mais de **masse** pour les noyaux
- ➔ Depuis Einstein, la masse est équivalente à une énergie **$E = mc^2$** , « énergie de masse »
- ➔ La masse est exprimée en **eV (ou MeV)** électro-Volt



>>> *C'est l'énergie cinétique d'un électron qui se déplace du côté négatif au côté positif d'une pile de 1V
C'est l'énergie délivrée par une lampe de 1 Watt pendant 1s.*

ou en unité de masse atomique (**u.m.a**) : $1 \text{ u.m.a.} = 1/12 \times \text{masse du } ^{12}\text{C}$

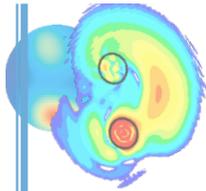
>>> *c'est utile car dans 1 u.m.a., on sait qu'il y a $6 \cdot 10^{23}$ atomes*

LA MOLE

Masse du proton = $938 \text{ MeV}/c^2 = 1,0072765 \text{ u.m.a}$

Masse du neutron = $939 \text{ MeV}/c^2 = 1,0086655 \text{ u.m.a}$

➔ *Maintenant on peut calculer la masse d'un noyau ?*

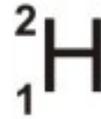
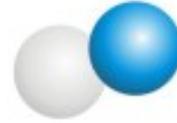


L'EXEMPLE DES ISOTOPES DE L'HYDROGÈNE

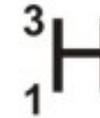
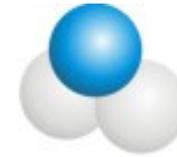
		⁶ Li	⁷ Li
	³ He	⁴ He	
¹ H	² H	³ H	



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)