

Part 2 - Echelles Nucléaires

Résumé du cours I

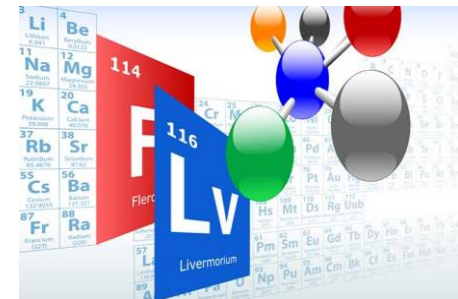
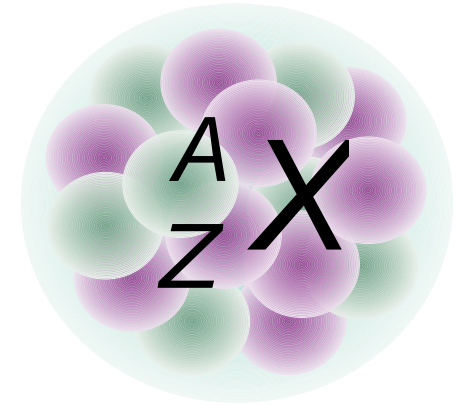
Le noyau

Découvertes d'isotopes, nouveaux éléments & nouvelles radioactivités

Découverte de l'électron et de la radioactivité

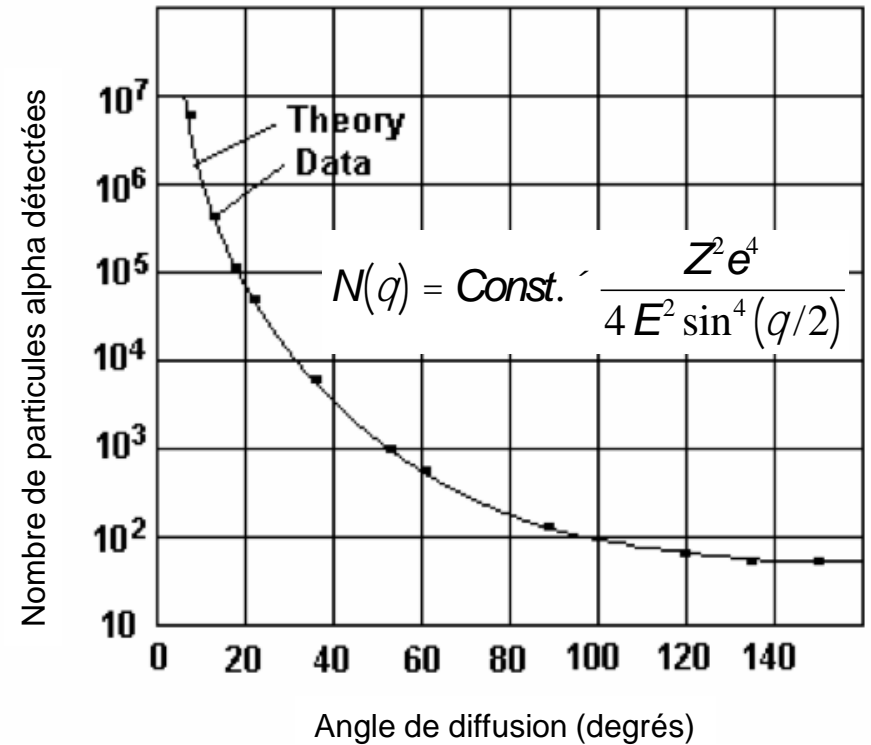
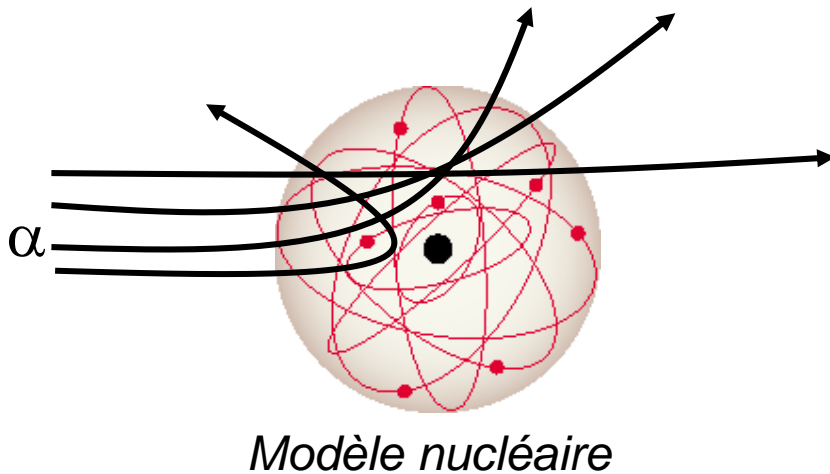
Radioactivité: propriétés, énergie & datation

Découverte du noyau

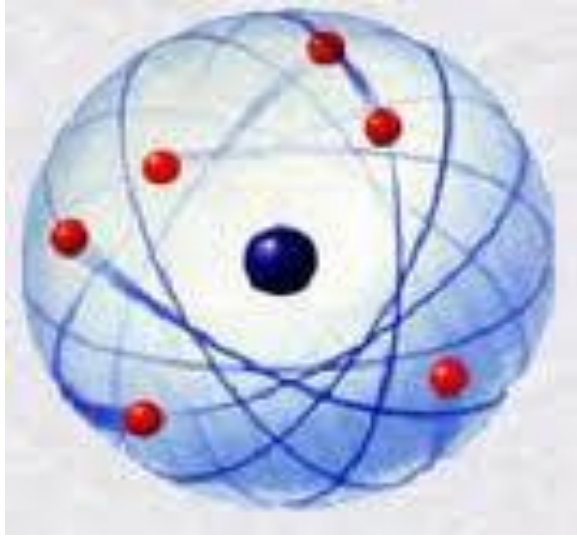


Le noyau est né !

Philosophical Magazine Series 6,
vol. 21 May 1911, p. 669-688



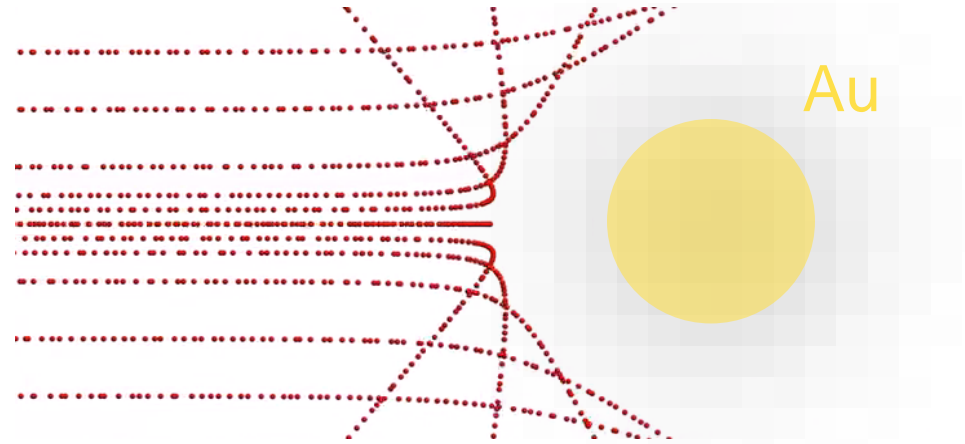
Conséquences du modèle de Rutherford



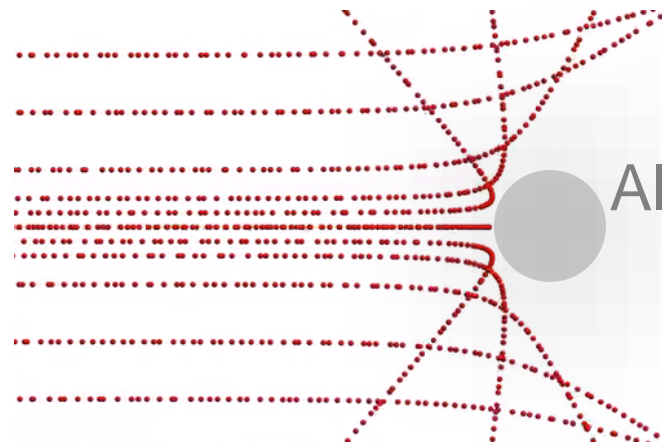
↔
 10^{-14} m

←→
 10^{-10} m

La matière est vide !



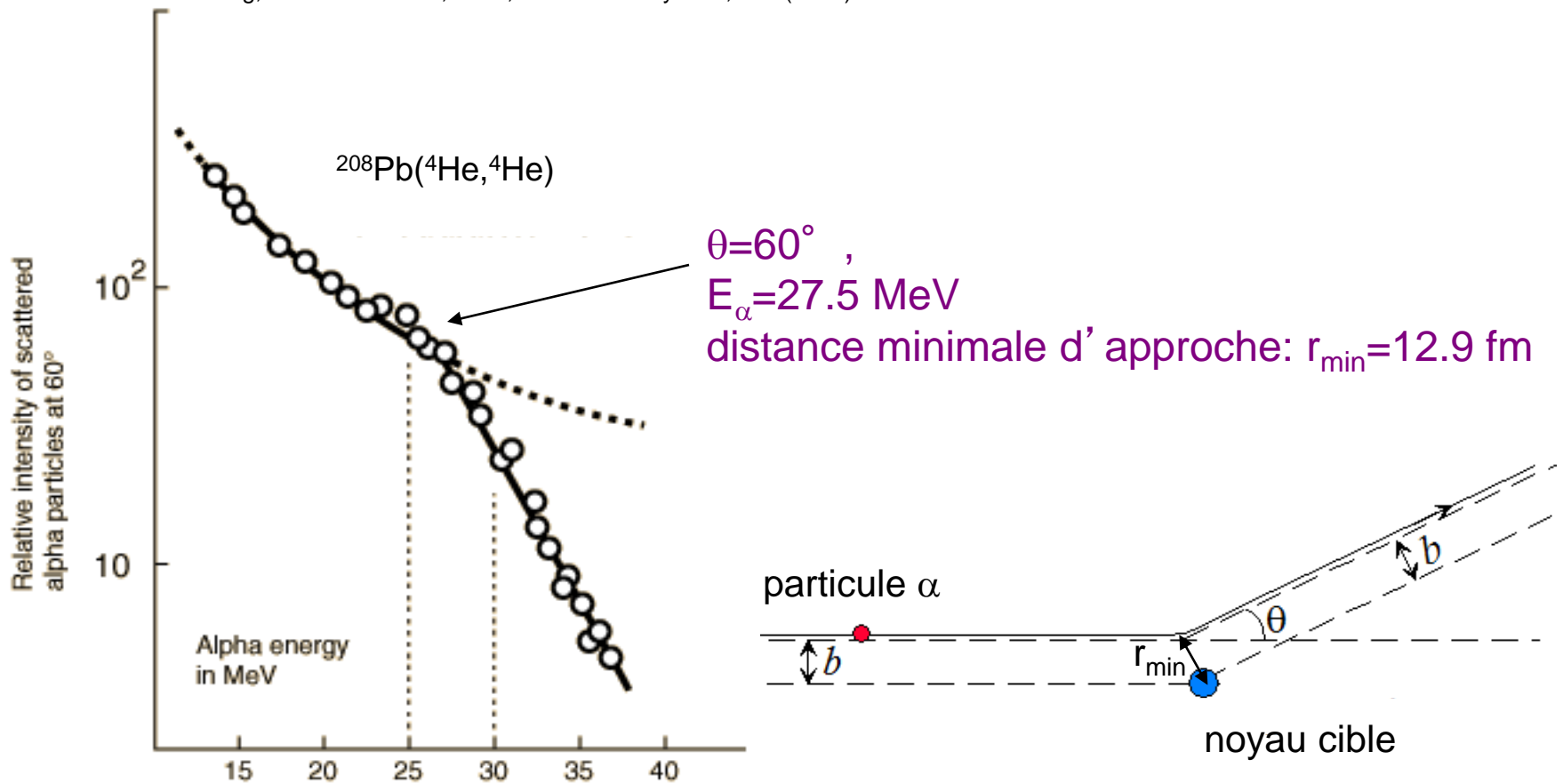
$E_{\alpha}(\text{source}) < 7.7$ MeV



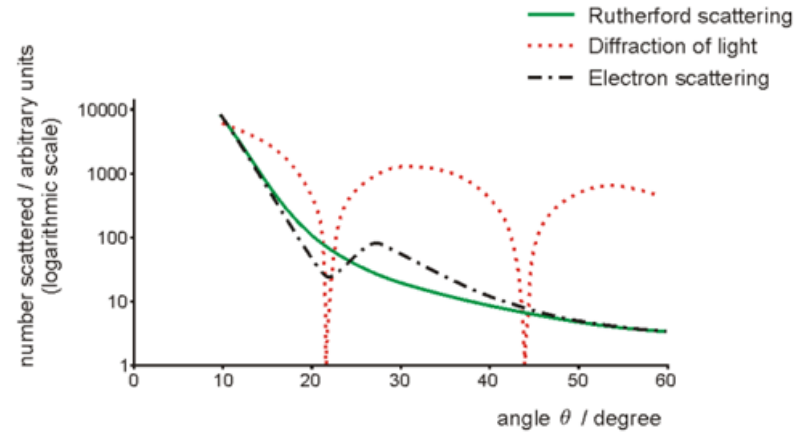
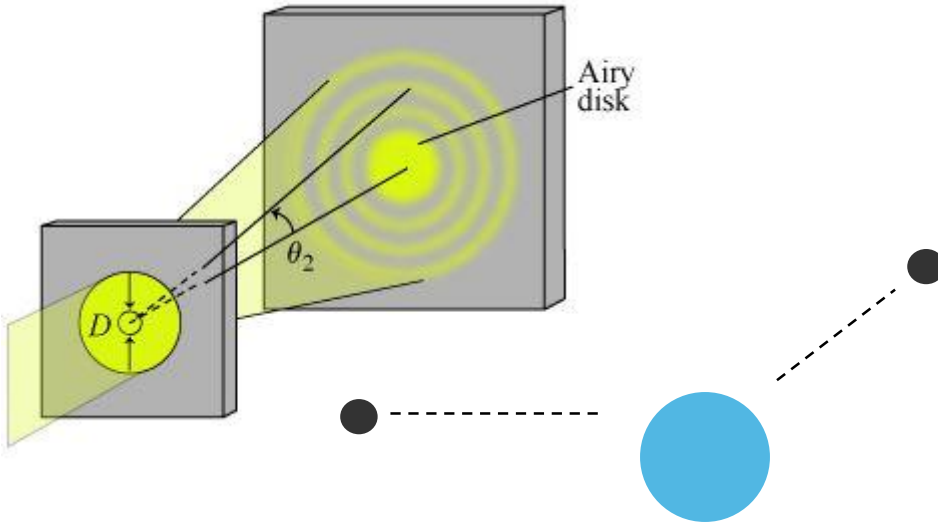
Au plus près du noyau

A plus haute énergie, les particules α peuvent s'approcher au plus près du noyau et ressentir les effets du noyau

Eisberg, R. M. and Porter, C. E., Rev. Mod. Phys. 33, 190 (1961)



Expériences de diffusion avec e-



Cas de l' ^{16}O à 360 MeV:

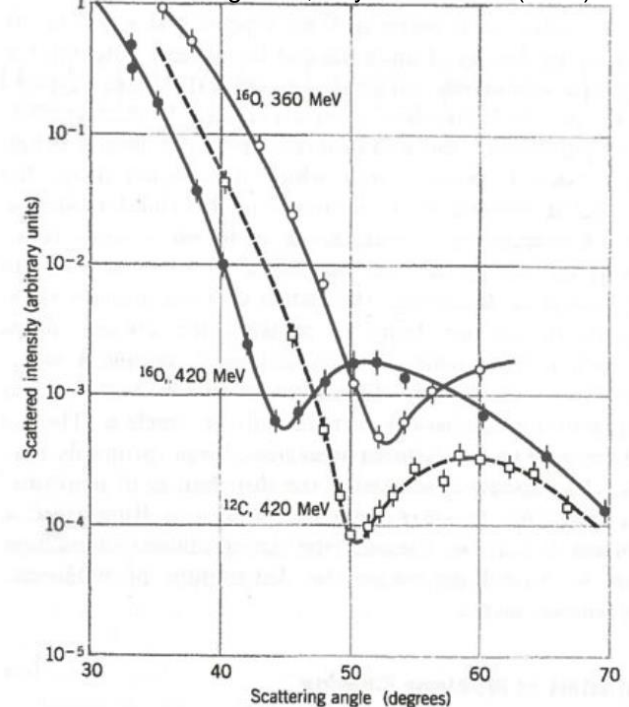
1er minimum à $\theta = 52^\circ = \sin^{-1}(1.22 \lambda/D)$

$E_e = 360 \text{ MeV} = 5.76 \cdot 10^{-11} \text{ J}$

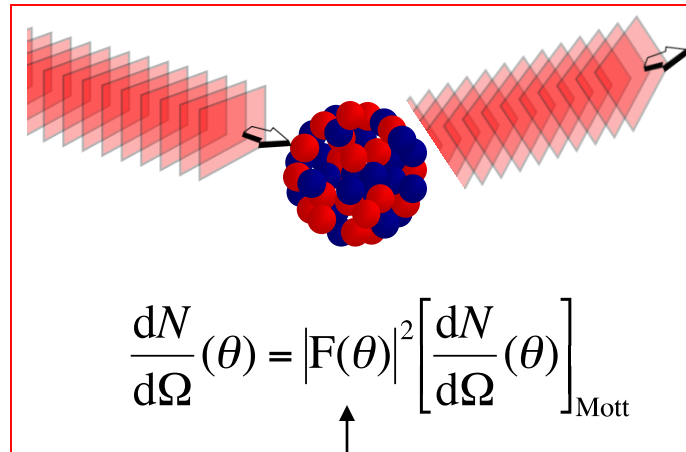
$p = E/c = 1.92 \cdot 10^{-20} \text{ kg m/s}$

$\lambda = h/p = 3.43 \cdot 10^{-15} \text{ m} \Rightarrow R = D/2 = 2.6 \text{ fm}$

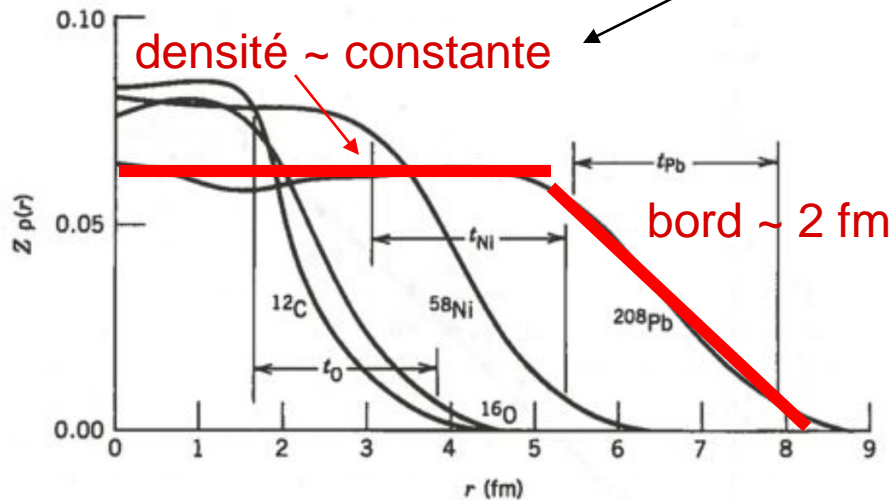
H.F. Ehrenberg et al., Phys. Rev. 113 (1959) 666



Distribution de charge

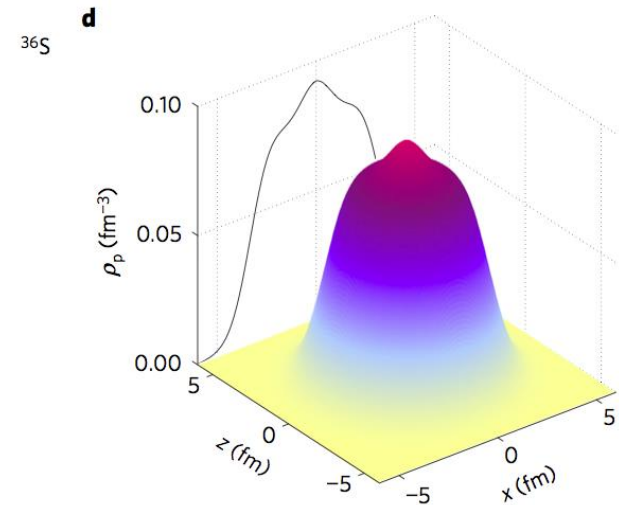
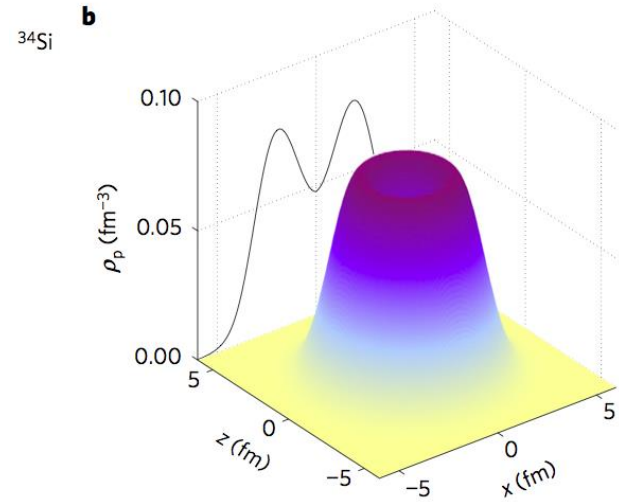
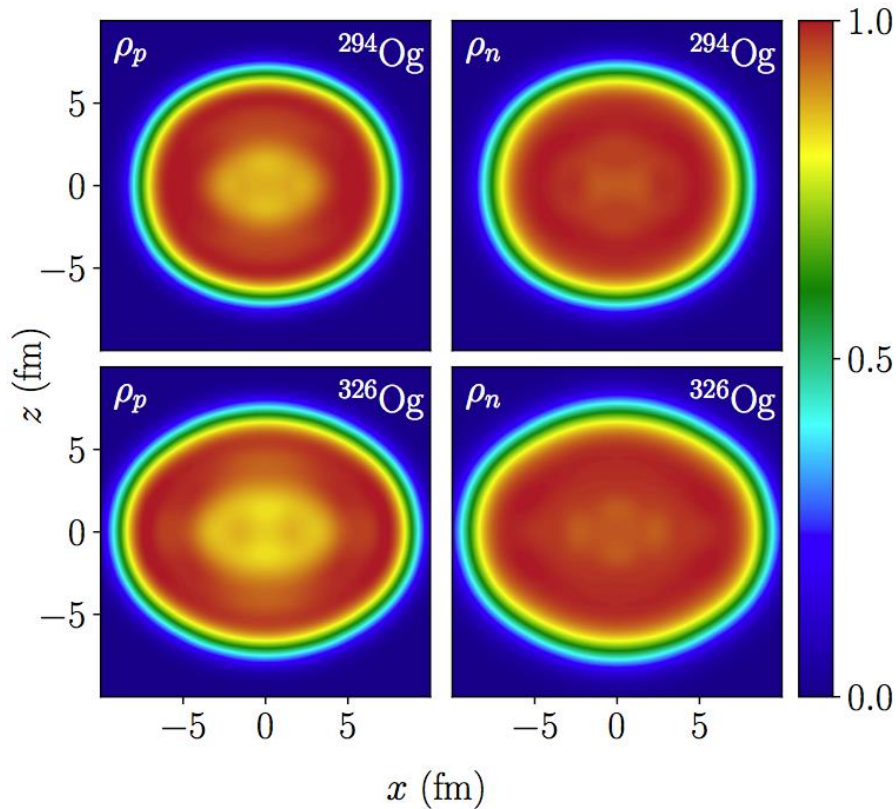


facteur de forme



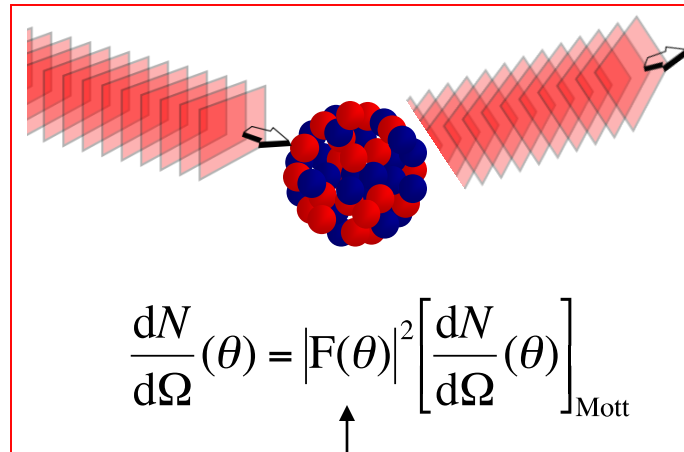
Dépression centrale et noyau bulle ?

B. Schuetrumpf et al., Phys. Rev. C 96 (2017) 024306

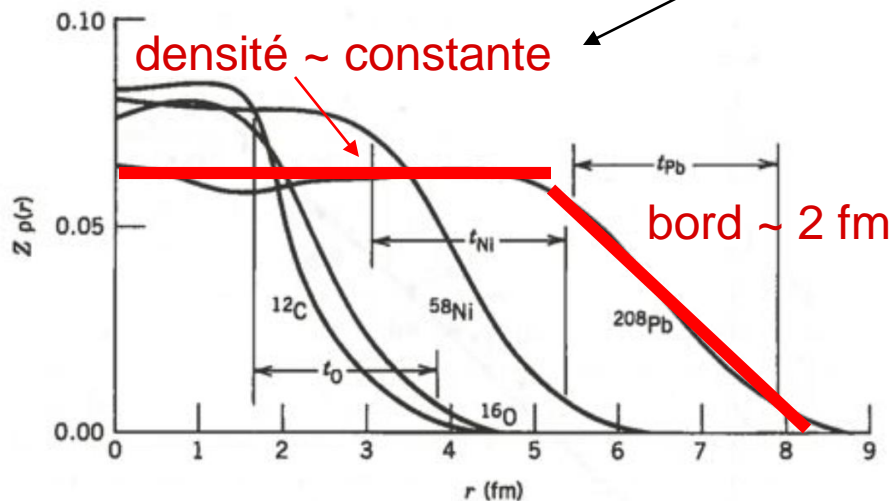


A. Mutschler et al., Nature Physics 13 (2017) 152

Distribution de charge

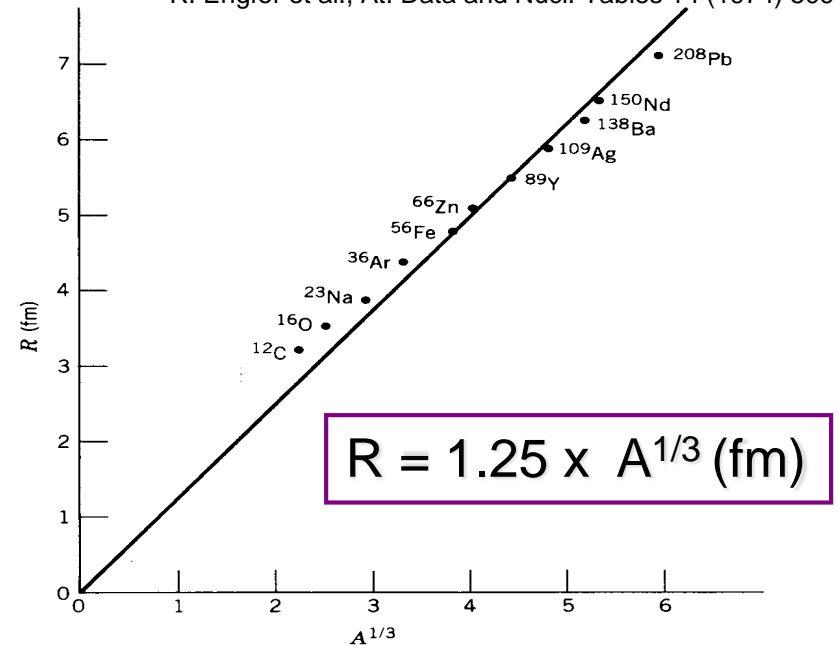


facteur de forme

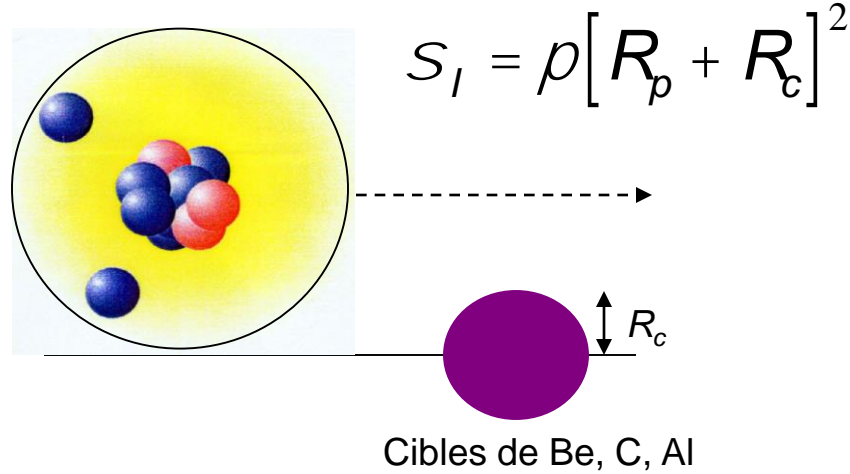


K. S. Krane, Introductory Nuclear Physics, John Wiley & Sons

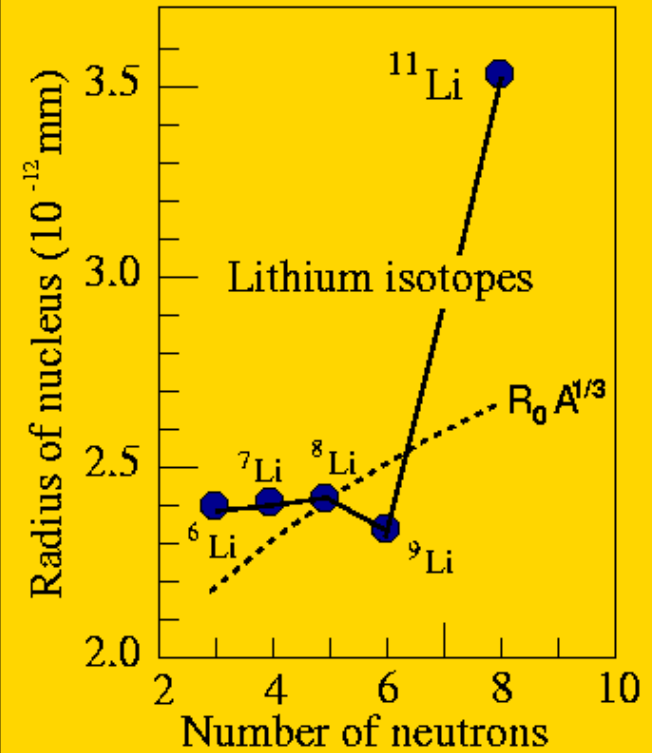
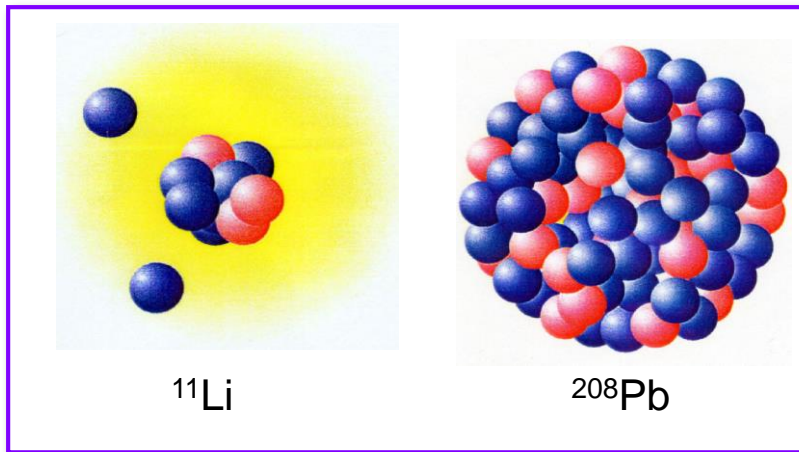
R. Engfer et al., At. Data and Nucl. Tables 14 (1974) 509



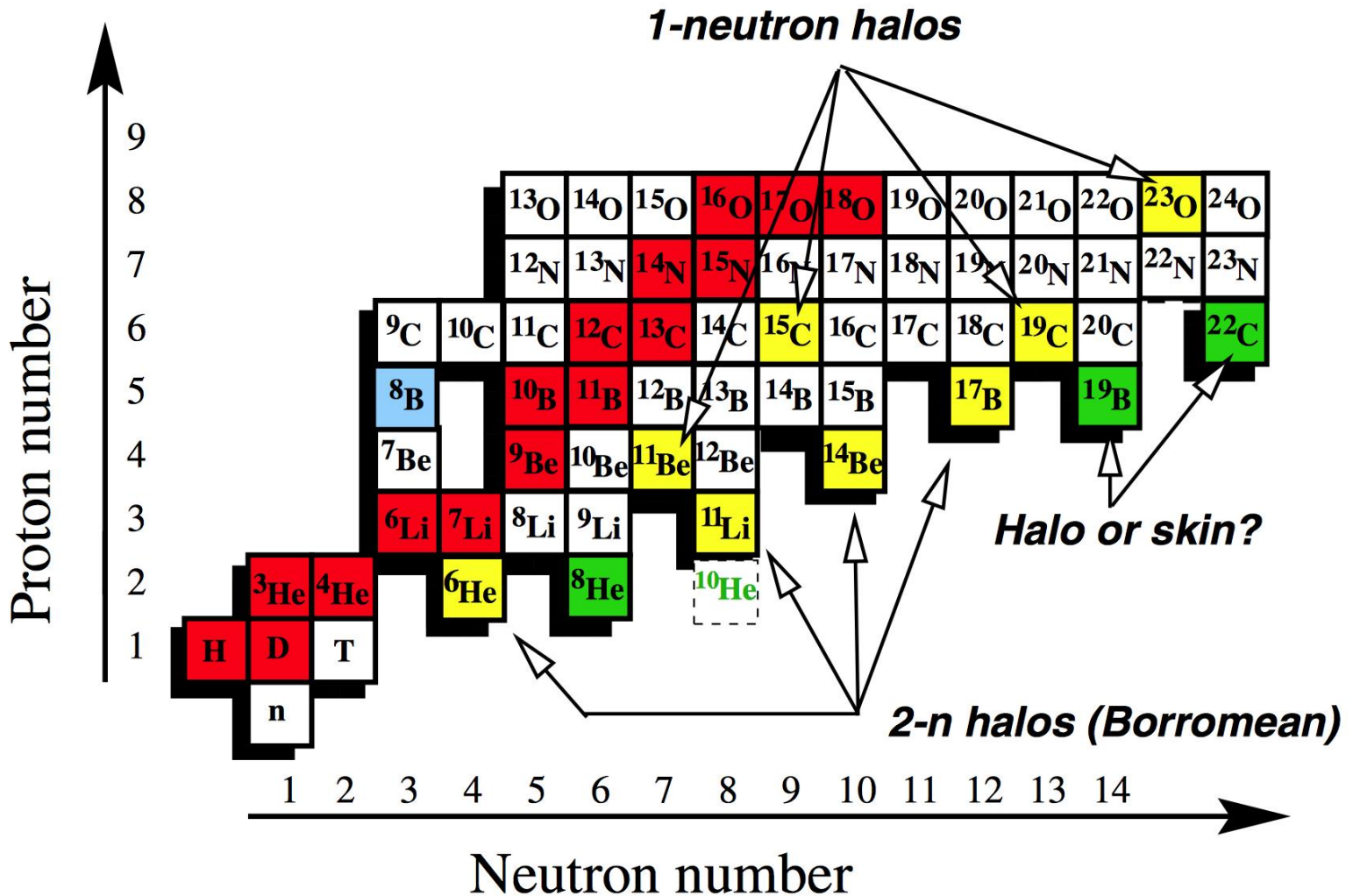
Section efficace d'interaction



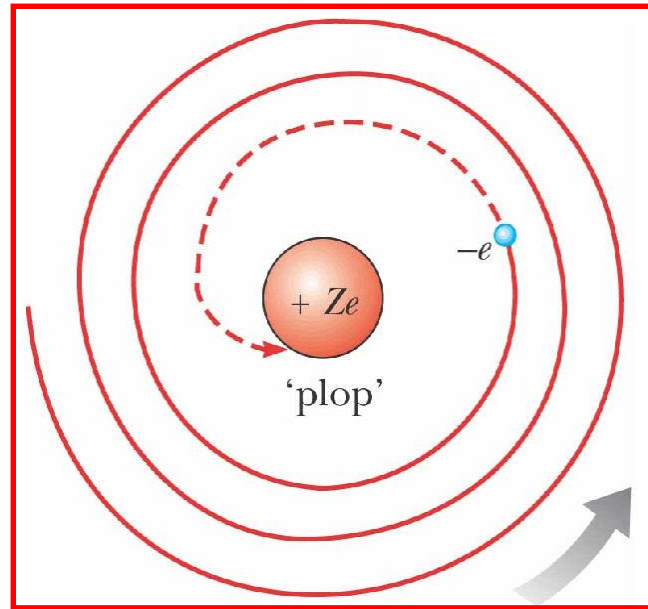
I. Tanihata et al., PRL 55 (1985) 2676



Noyaux Halos



Conséquences du modèle de Rutherford



l'atome est instable !

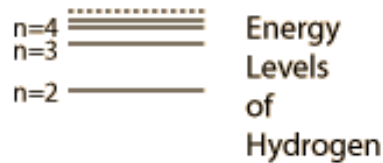
Bohr résout le problème avec les quantas de Planck

- le moment cinétique des électrons est quantifié \Leftrightarrow seules certaines orbites (**couches**) d'énergie E_n ($n=1,2,3,\dots$) sont autorisées
- n est le nombre quantique principal
- le saut électronique d'un niveau à un autre s'accompagne de l'émission (ou l'absorption) d'un photon de longueur d'onde particulière

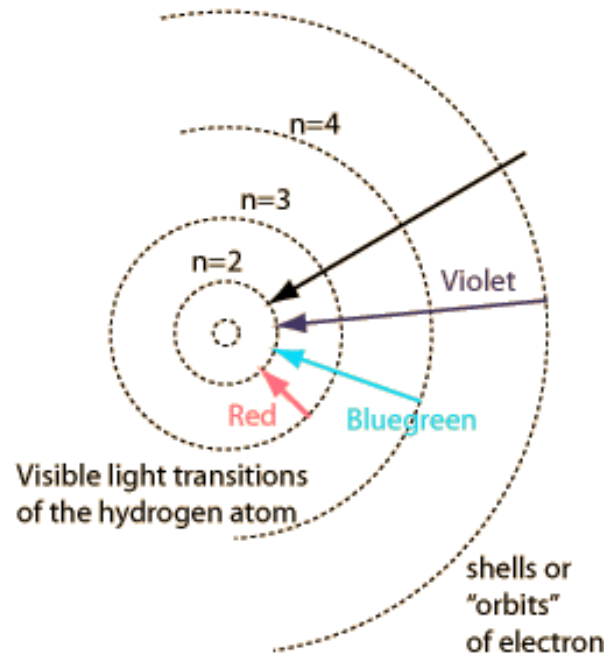
Philosophical Magazine 26, 1-25 (1913)

particulière

$$E_n \propto -Q^2/n^2$$

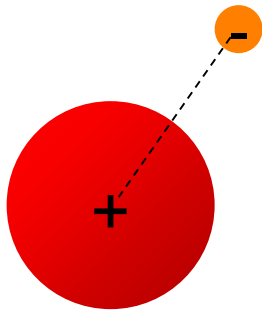


n=1

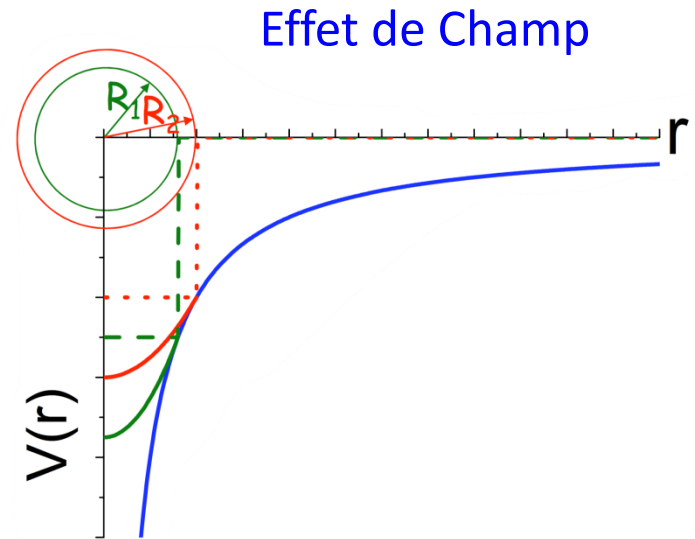


Niels Bohr

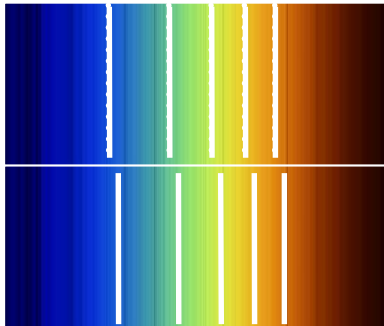
Déplacements isotopiques



Effet de Masse



Isotope A

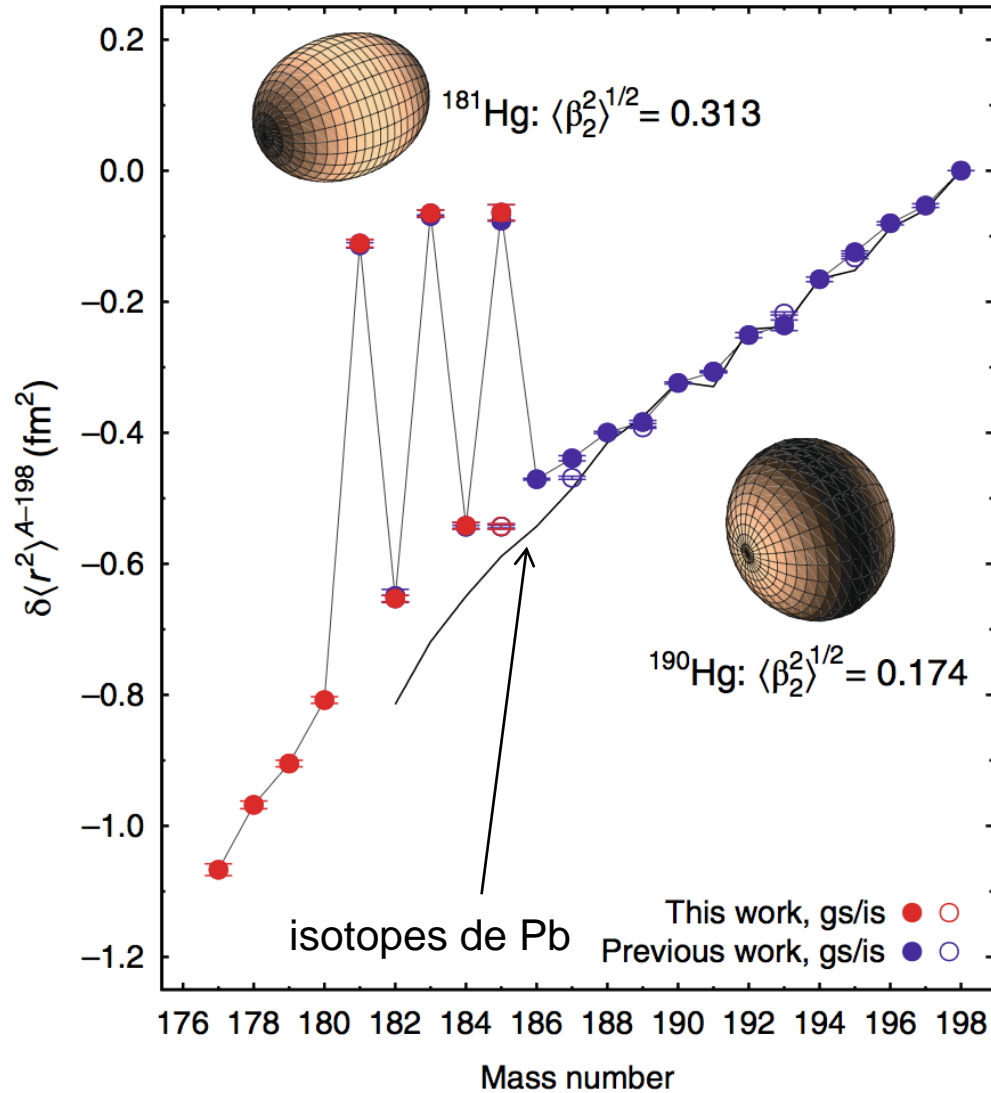


Isotope A'

$$dn^{A,A'} = \underbrace{M}_{\text{facteurs atomiques}} \frac{A' - A}{AA'} + \underbrace{Fd \langle r^2 \rangle^{A,A'}}_{\text{effet de champ}}$$

effet de masse
facteurs atomiques

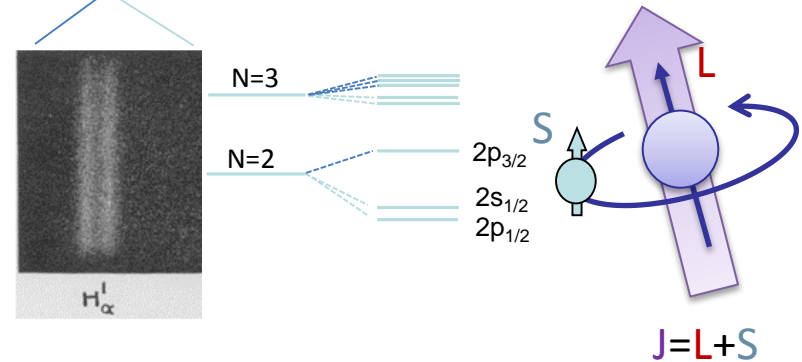
Variations du rayon carré moyen



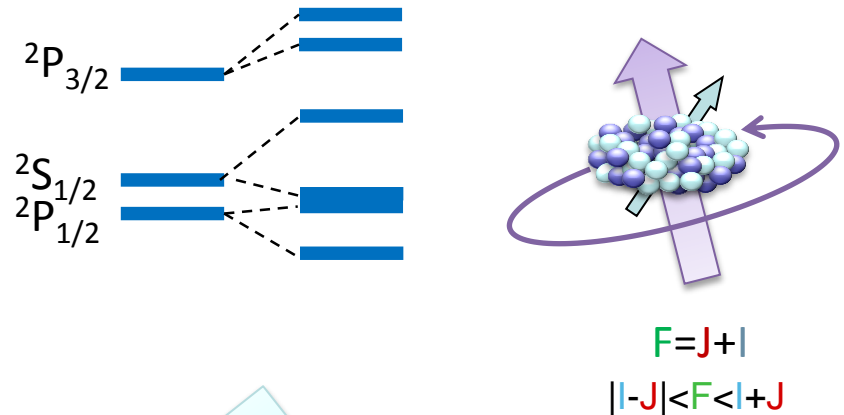
Structure Fine et Hyperfine



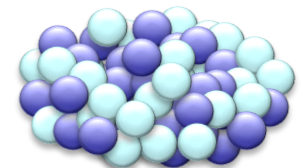
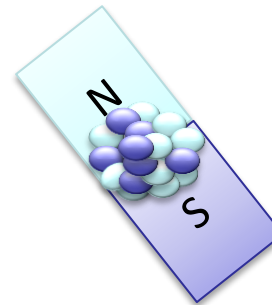
- Une résolution ~ 5000 plus élevée révèle une structure fine du spectre de l'Hydrogène due à l'interaction SPIN-ORBIT



- Un facteur 1000 plus en résolution fait apparaître une structure encore plus fine due au couplage du noyau avec l'orbite de l'électron



→ La structure hyperfine des spectres atomiques donne accès au spin et aux moments magnétiques et électriques du noyau



Le spin du noyau

PRL **110**, 172503 (2013)

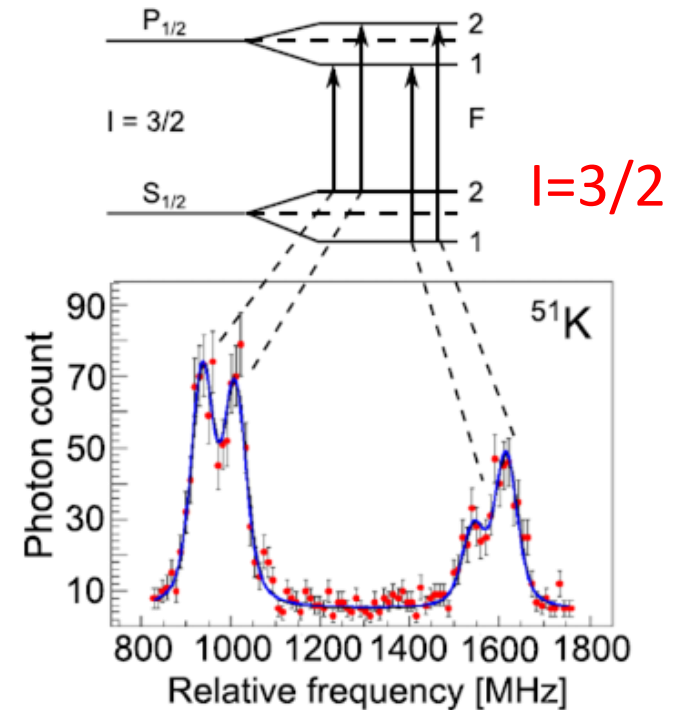
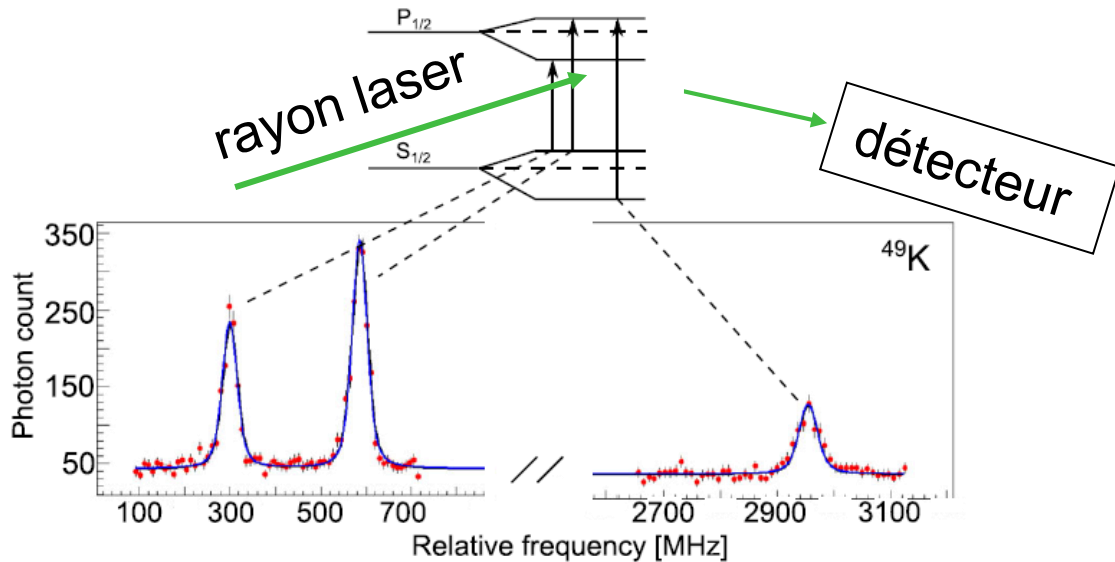
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
26 APRIL 2013

J. Papuga et al.,

Spins and Magnetic Moments of ^{49}K and ^{51}K : Establishing the $1/2^+$ and $3/2^+$ Level Ordering Beyond $N = 28$

$I=1/2$: seules 3 transitions sont autorisées
car la transition $F_i=0 \rightarrow F_j=0$ est interdite



La déformation du noyau

PRL **110**, 192501 (2013)

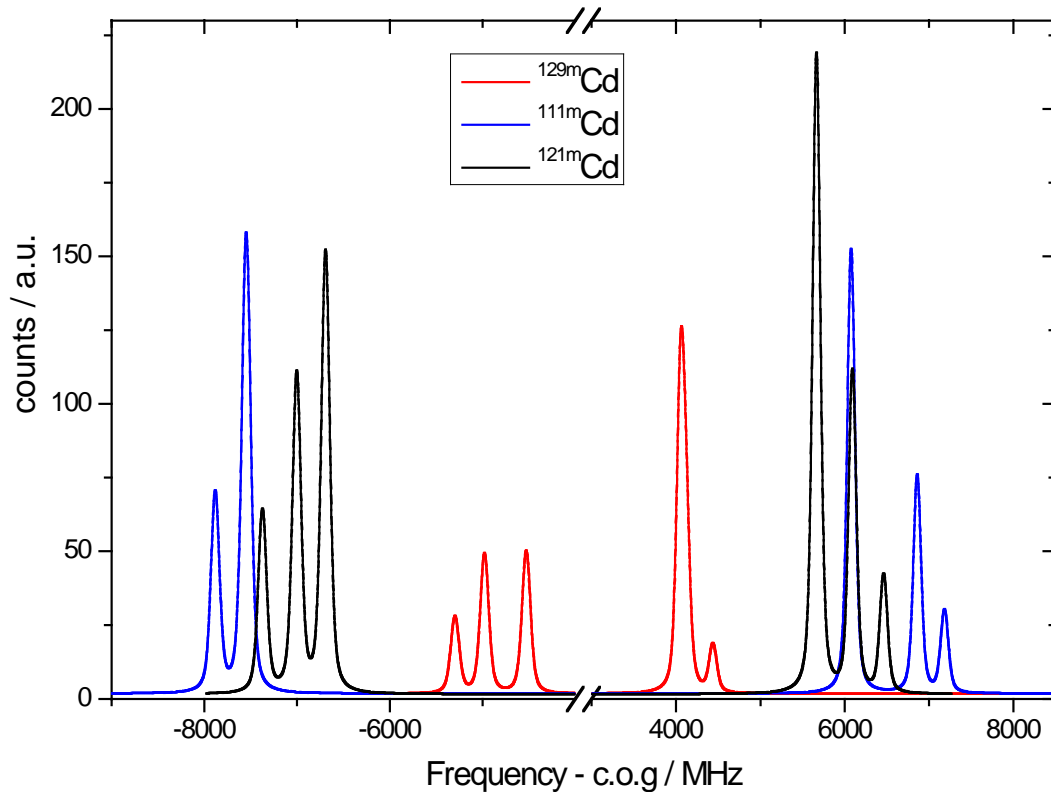
Selected for a **Viewpoint** in *Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
10 MAY 2013

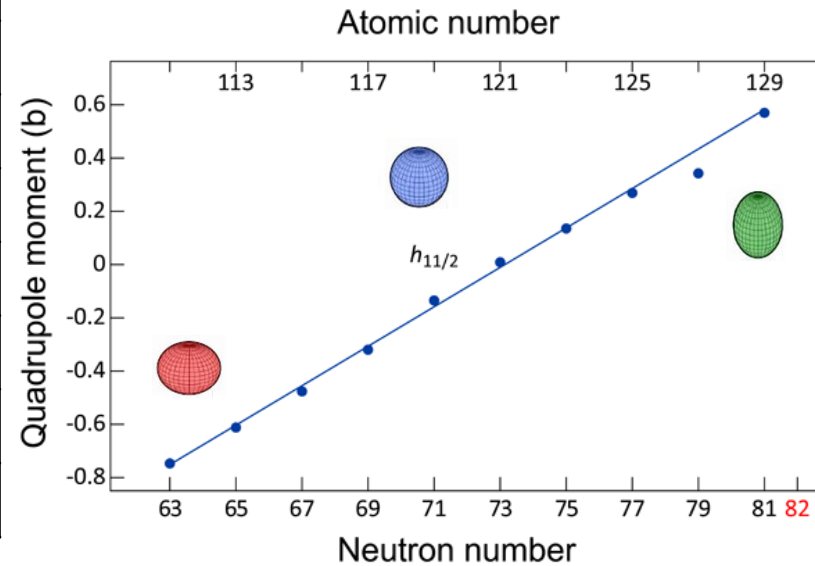


D. T. Yordanov et al.,

Spins, Electromagnetic Moments, and Isomers of $^{107-129}\text{Cd}$

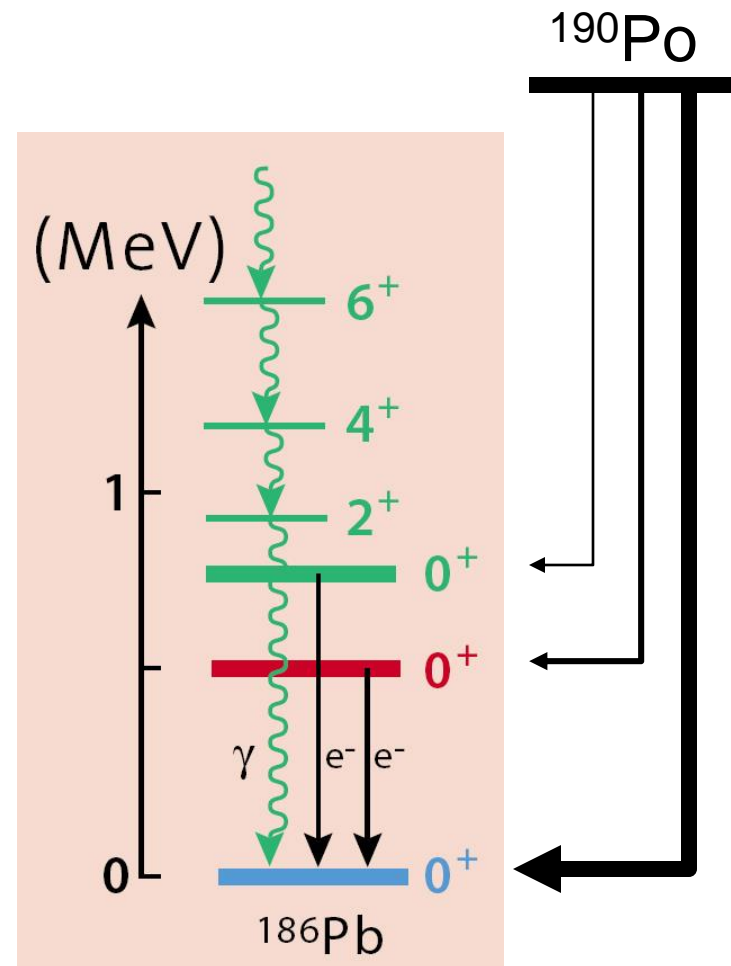
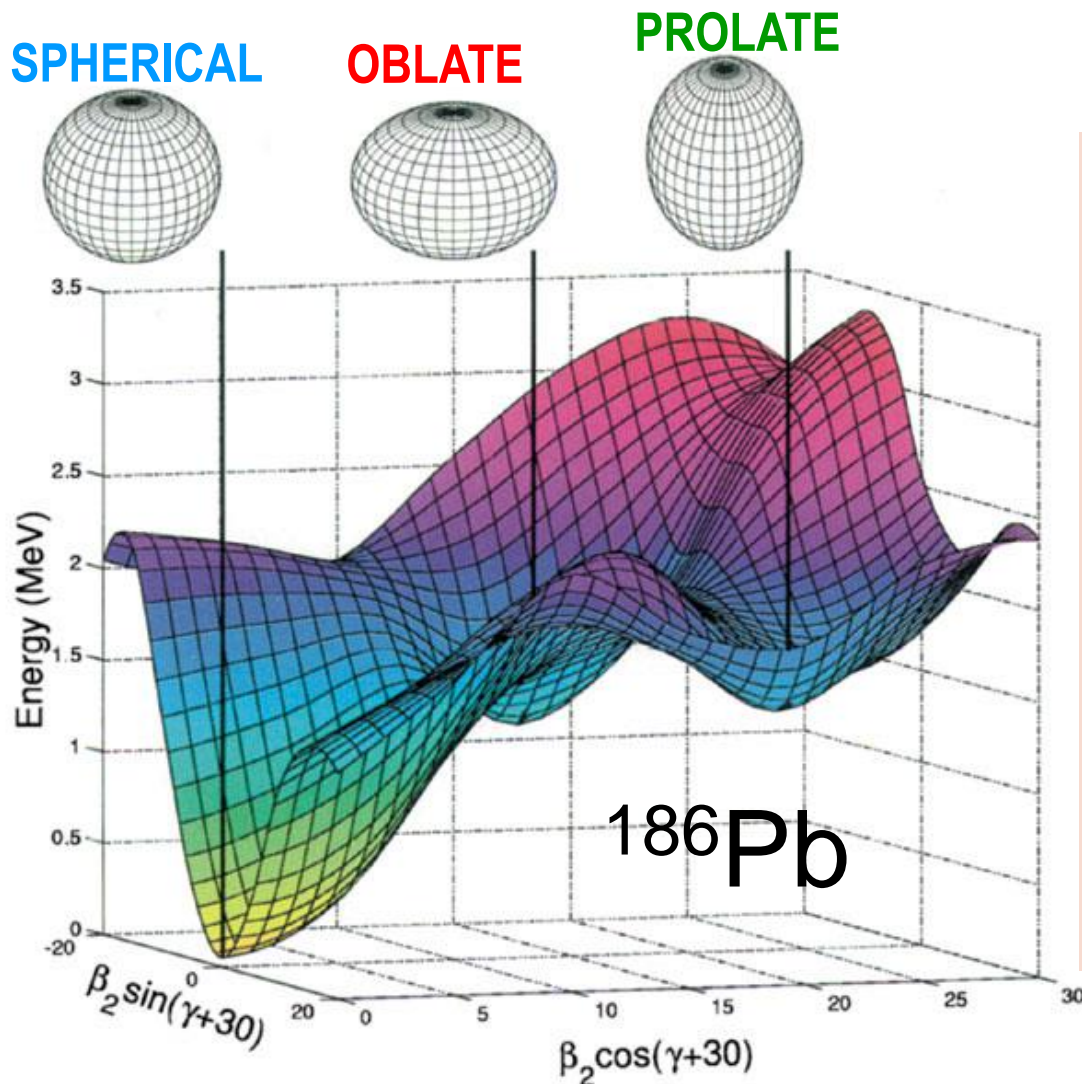


état isomérique $11/2^-$

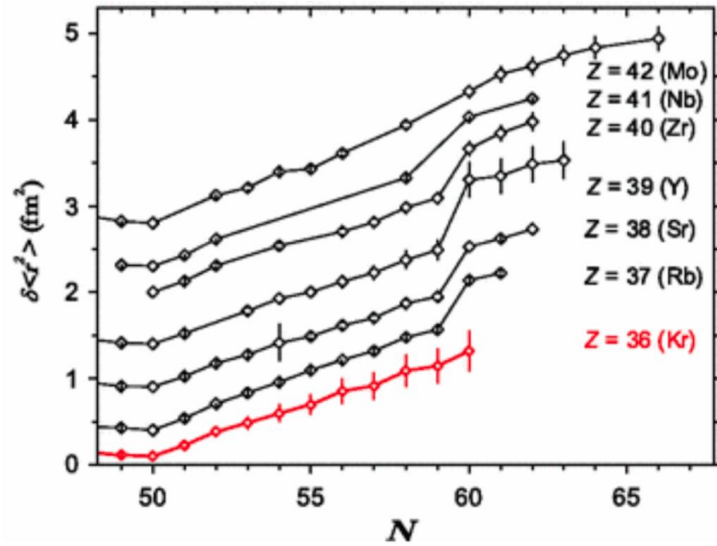


Formes coexistantes

3 états 0^+ de basse énergie observés dans la décroissance α du ^{190}Po



Changements de forme



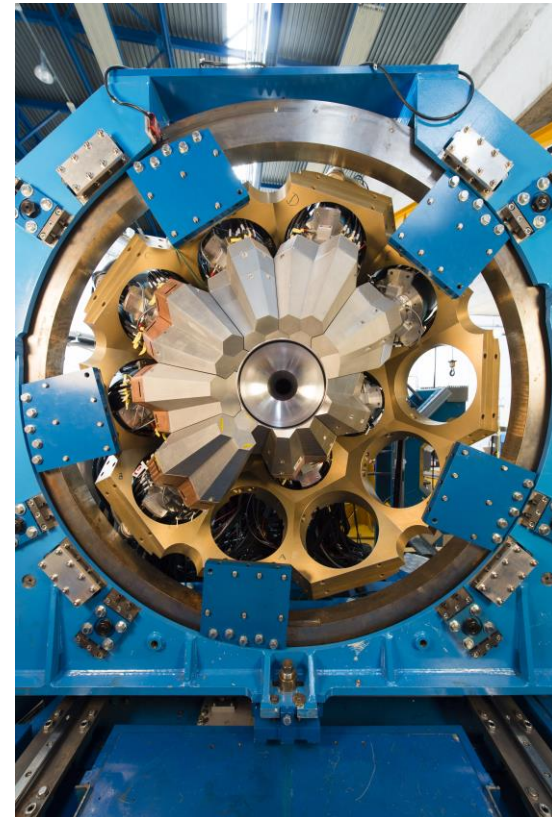
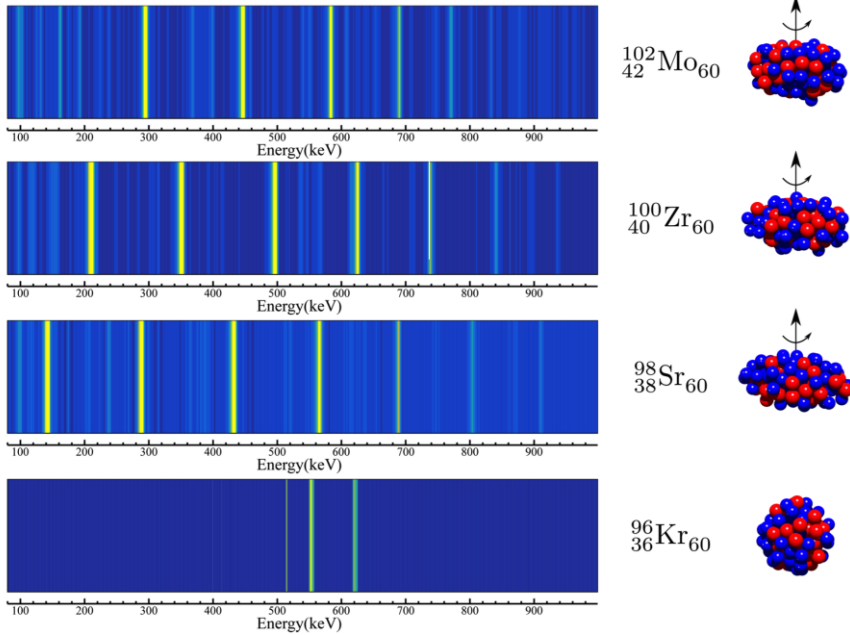
S. Naimi *et al.*, Phys. Rev. L 105, 032502 (2010)

Mesure de masse/rayon de charge:
 changement de forme à $N=60$ du Mo \rightarrow Rb

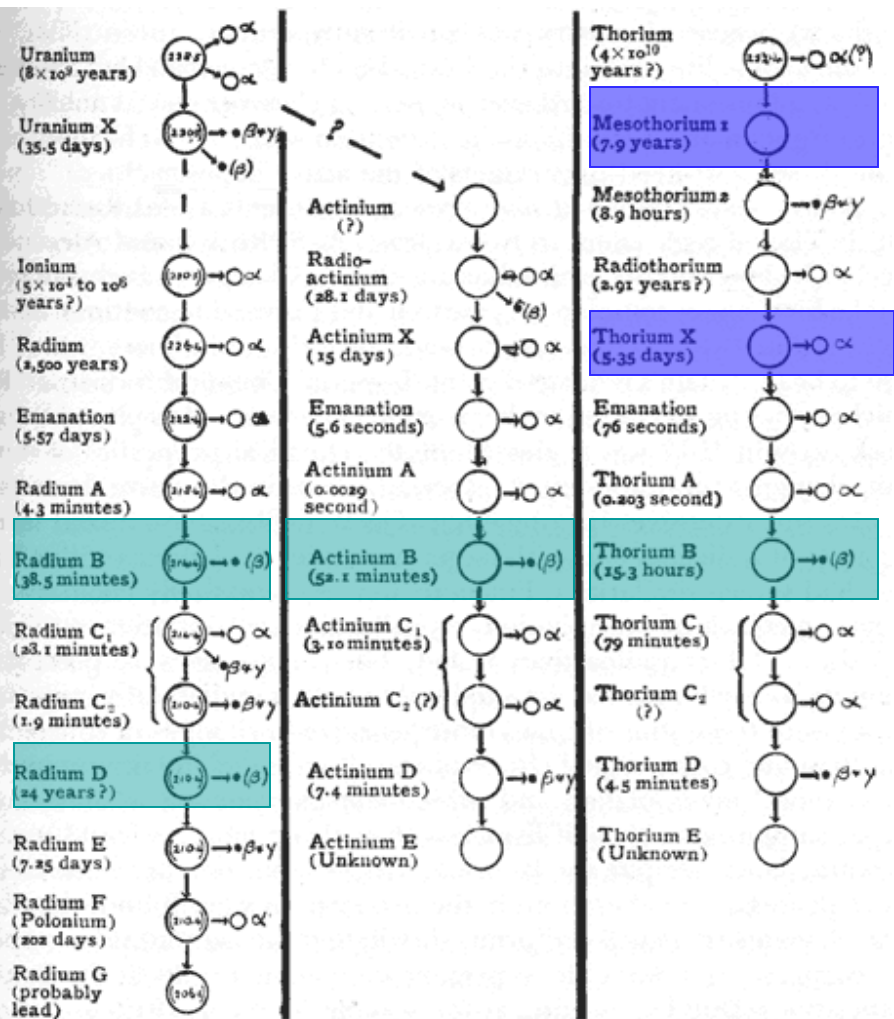
Quid du Kr ?

Spectroscopie γ du ^{96}Kr avec AGATA

J. Dudouet *et al.*, Phys. Rev. Lett. 118, 162501 (2017)



L'atome de Dalton mis à mal



Plus de 40 radioéléments découverts en 15 ans

Problème: seules 7 cases inoccupées dans le tableau périodique entre Bi et U !

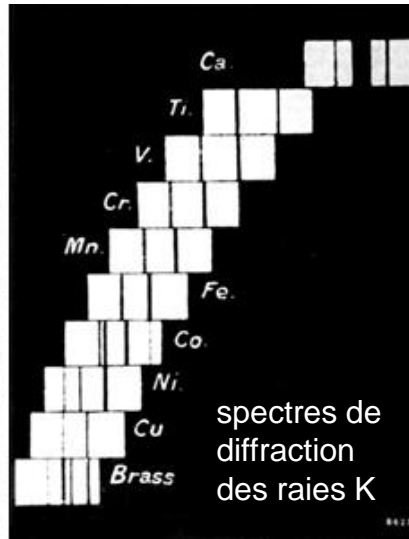
Inséparabilité de certains radioéléments

1913 Frederick Soddy

Concept d'isotope: éléments radioactifs ayant différentes masses atomiques mais les mêmes propriétés chimiques

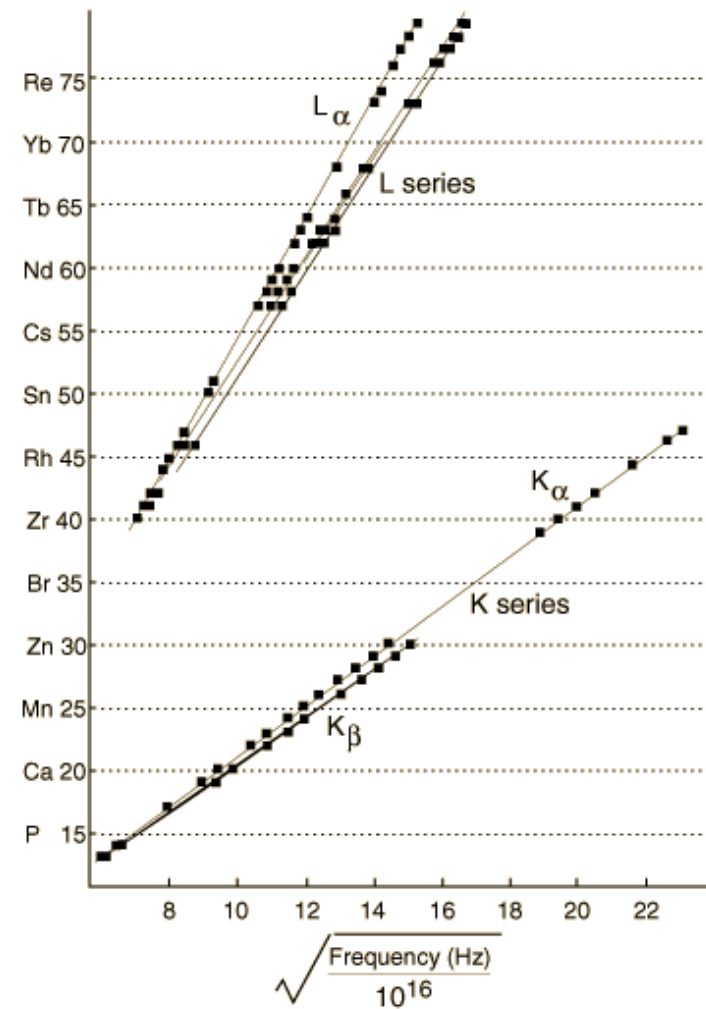
'The Chemistry of Radio-Elements', F. Soddy (1911)

Le tableau périodique trouve enfin son fil conducteur



1914 Henry Moseley

Mesure de la fréquence du rayonnement X de nombreux éléments

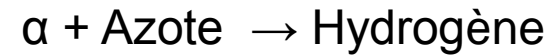


Adapted from Moseley's original data (H. G. J. Moseley, Philos. Mag. (6) 27:703, 1914)

Les alchimistes du 20^{ème} siècle

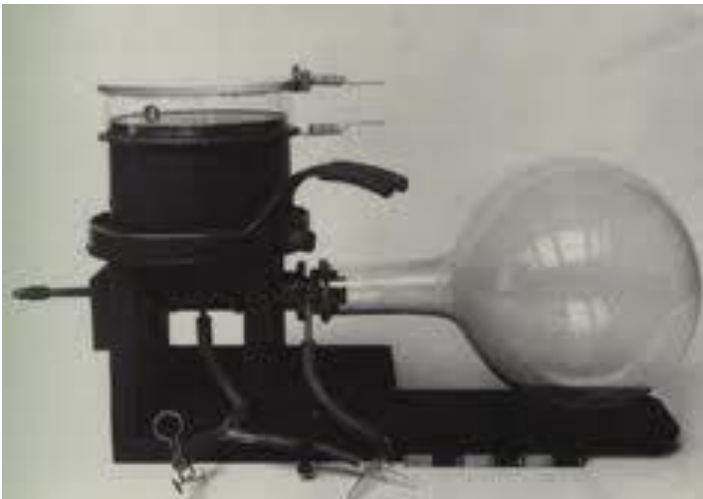
1919 E. Rutherford

1^{ère} transmutation en laboratoire

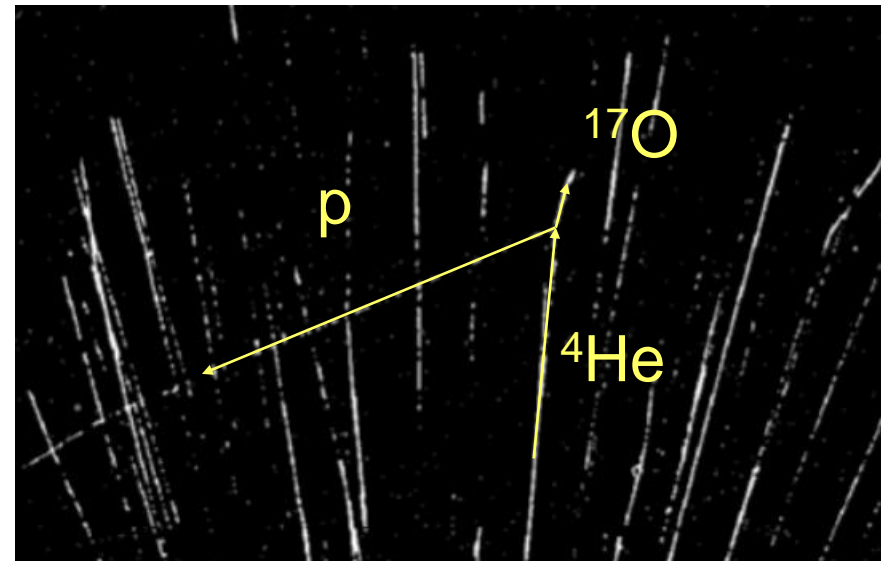


Rutherford appelle H^+ proton

1924 P. Blackett visualise la transmutation



chambre à brouillard (C.T.R. Wilson, 1912)

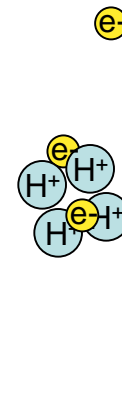


Structure du noyau

On pense alors que le noyau est composé de A protons et $(A-Z)$ électrons

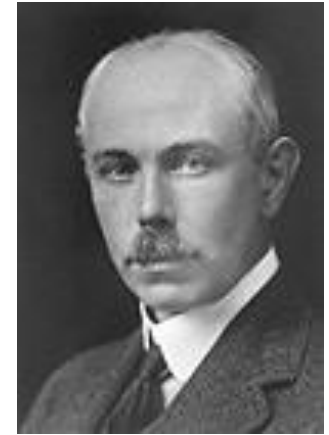
E. Rutherford suggère l'existence d'une paire e^-p qui aurait toutes les caractéristiques d'une particule neutre

Bakerian Lecture, Proc. Roy. Soc. A, 97, 374 (1920)



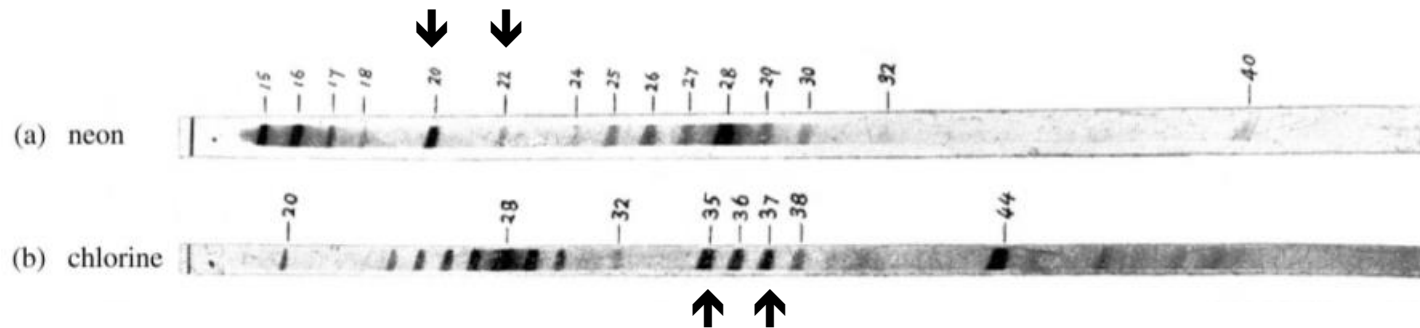
Cette information passe inaperçue du reste du monde, sauf à Cambridge au Cavendish Laboratory où E. Rutherford est nommé directeur...

Les débuts de la spectrométrie de masse



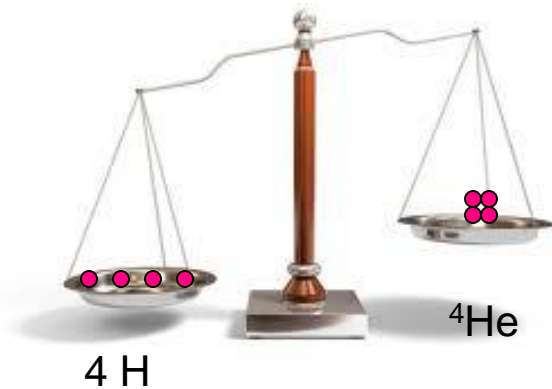
Francis Aston

1919: Avec le premier spectromètre de masse, F. Aston apporte la preuve expérimentale du concept d'isotope



Il mesure des abondances isotopiques et observe que les masses relatives des isotopes ($M(^{16}\text{O})=16$) sont des nombres entiers à l'exception de l'hydrogène (1.008)

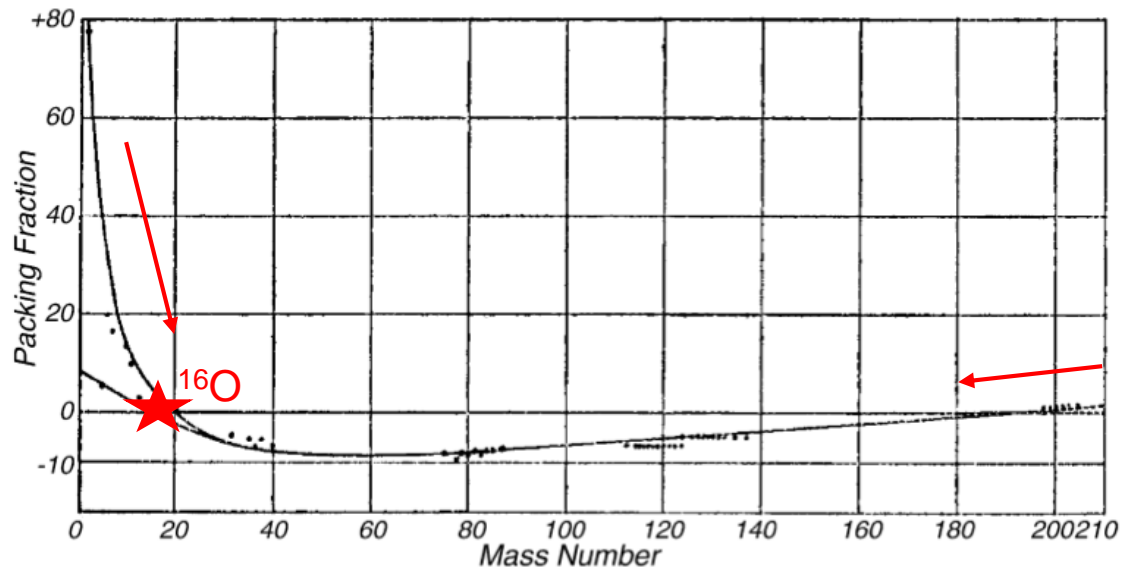
Excès de masse



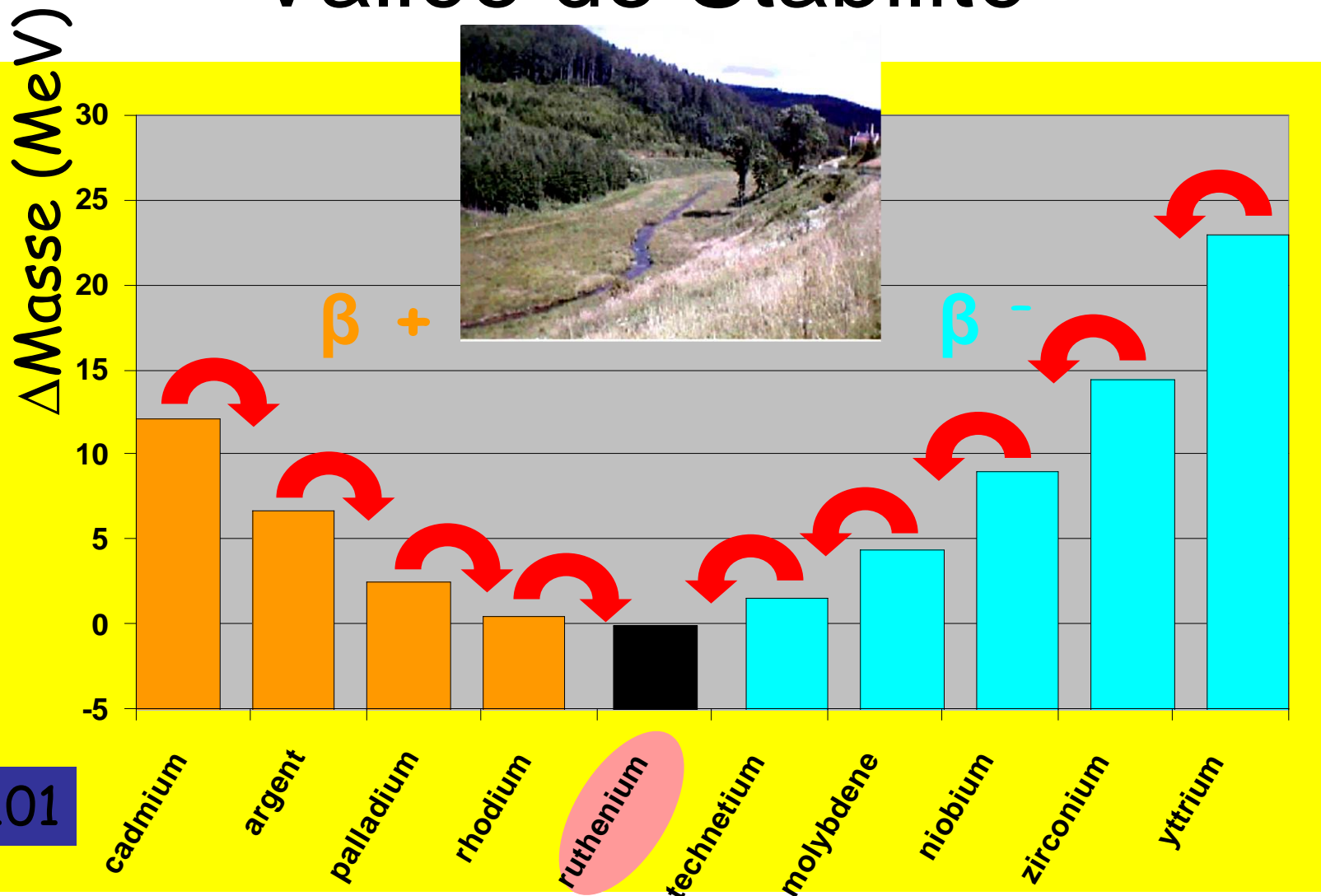
F. Aston propose que la masse est perdue pour former les noyaux

1927: Avec un spectromètre amélioré, il découvre que les masses relatives des ions plus lourds ne sont pas tout à fait des nombres entiers

'packing fraction' = $10\,000 (M - A)/A$



Vallée de Stabilité



A=101

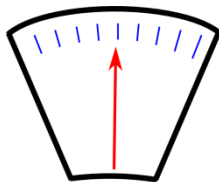
protons	48	44	39
neutrons	53	57	62

Des mesures de masse toujours plus précises.....

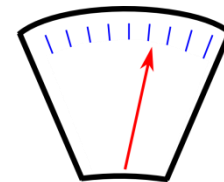
Précision $\sim 1/10^8$



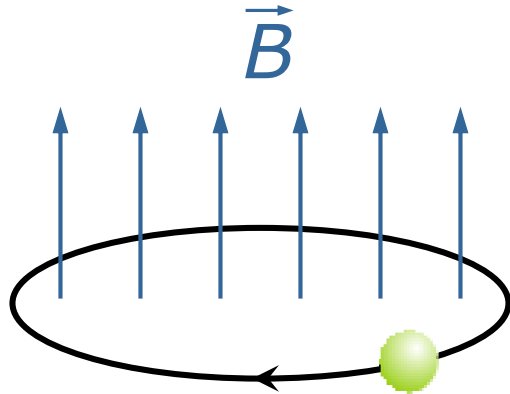
Airbus A380-800F:
252.2 tonnes (à vide)



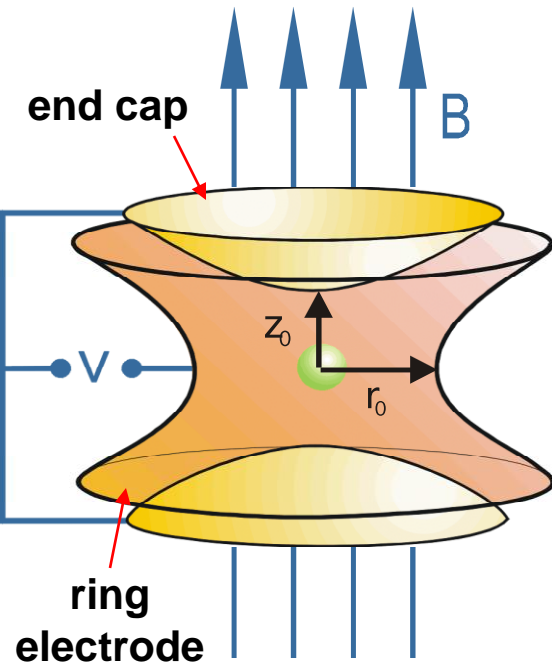
Airbus A380-800F +
1 mini-carambar (4 g)



Mesure de masses par piègeage



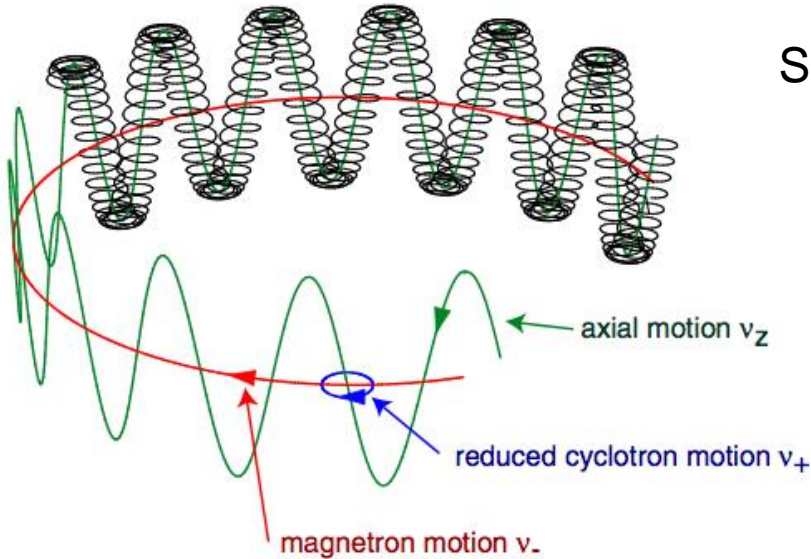
JYFLTRAP facility in Jyväskylä



piège de PENNING

- Intense champ magnétique homogène
- Faible champ électrique 3D quadripolaire

Mouvements dans le piège



Superposition de 3 mouvements :

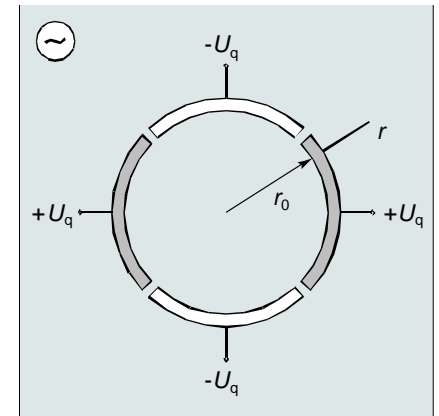
- 1 oscillation axiale (fréquence f_z)
- 2 oscillations radiales:
 - » mouvement magnétron (fréquence f_-)
 - » mouvement cyclotron modifié (fréquence f_+)

Les fréquences des oscillations radiales obéissent la relation:

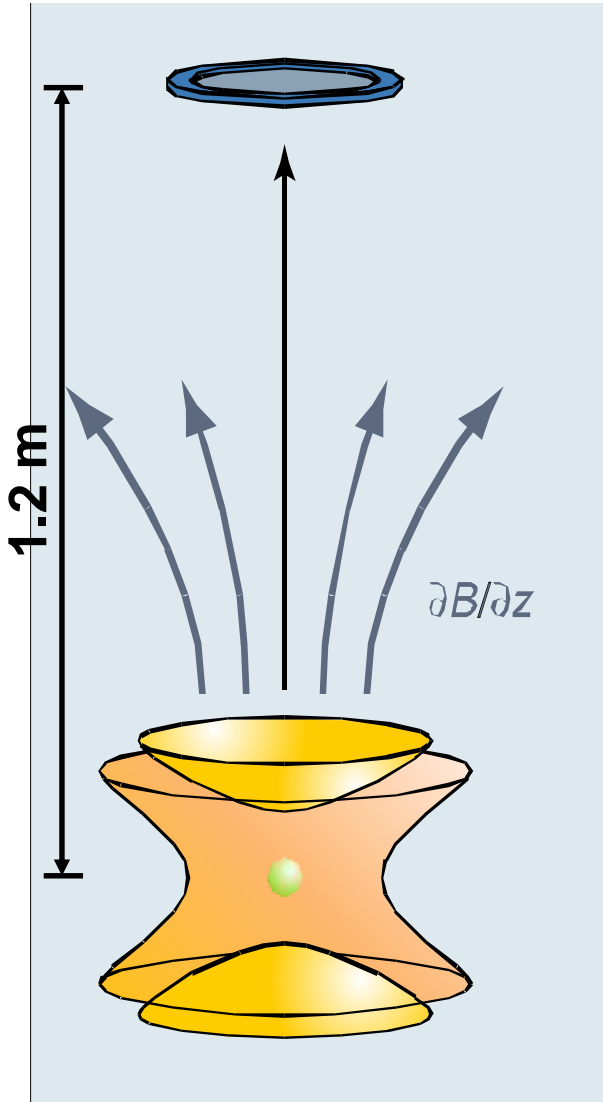
$$f_+ + f_- = f_c$$

$$\text{Fréquence cyclotron : } f_c = \frac{1}{2p} \times \frac{q}{m} \times B$$

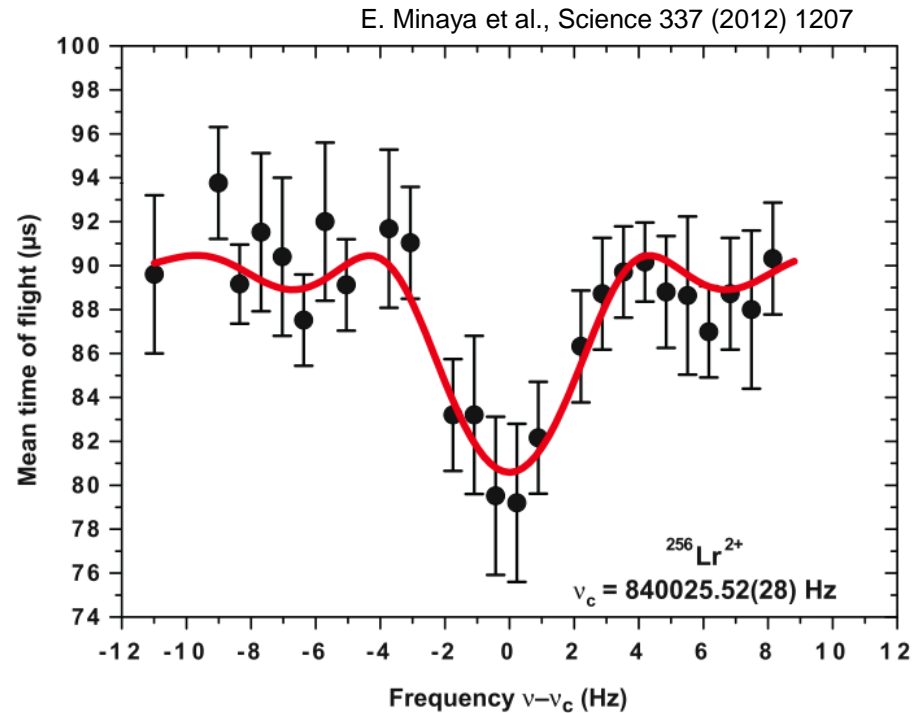
Une excitation quadripolaire des ions couple les oscillations magnétron et cyclotron modifiée



Record à battre: masse du Lr ($Z=103$)



Ejection le long des lignes de champ magnétique
 \Rightarrow l'énergie radiale est convertie en énergie axiale
 \Rightarrow temps de vol au détecteur minimal à f_c



$$\nu_c(^{133}\text{Cs}^+)/\nu_c(^{255}\text{Lr}^{2+}) = 0.95969174(6)$$

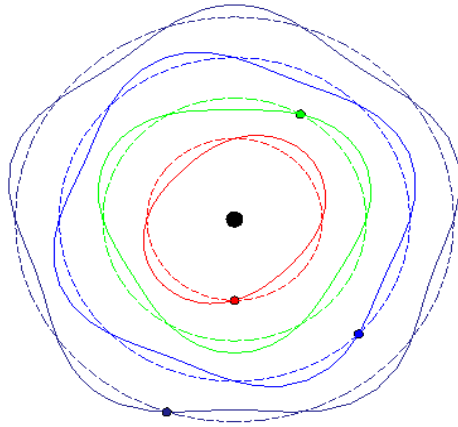
$$\text{Excès de masse}(^{255}\text{Lr}) = m - Au = 89958(13) \text{ keV}/c^2$$

Mécanique Quantique et Fonction d'Onde

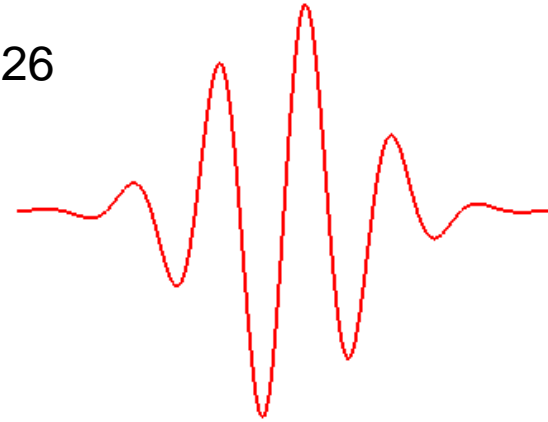
1924



L. de Broglie



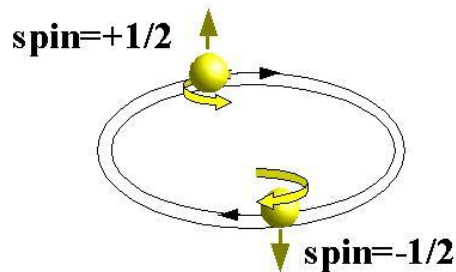
1926



1924-1925



W. Pauli



M. Born



W. Heisenberg



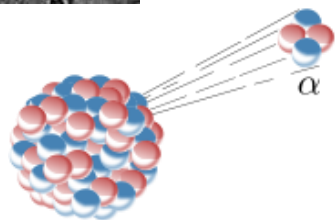
E. Schrödinger

La radioactivité α expliquée

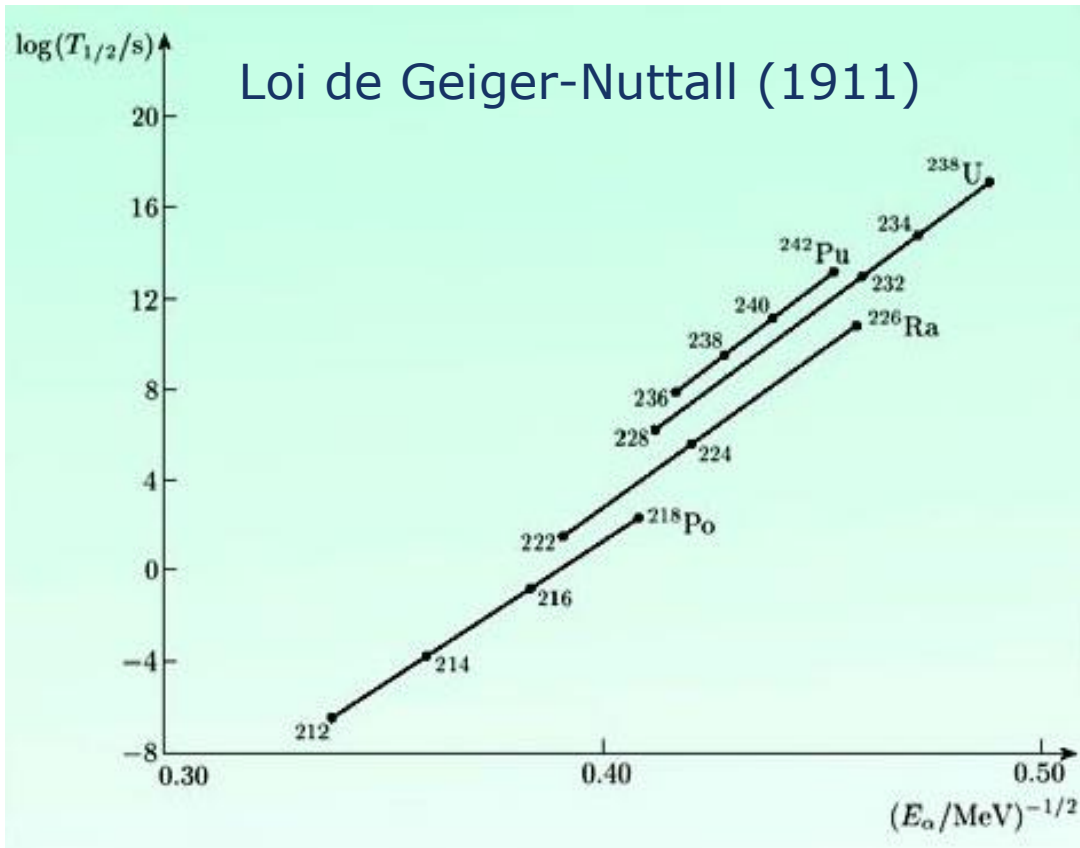
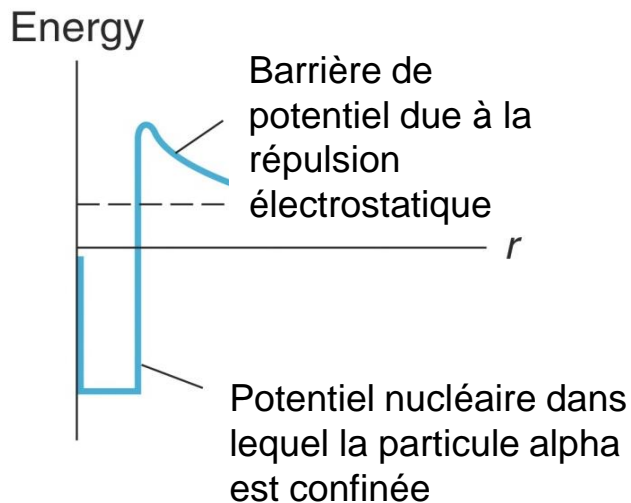


1928:

G. Gamow propose un modèle de la radioactivité α basé sur la Mécanique Quantique *Z. Physik* 51, 204 (1928)



^{212}Po
 $E_\alpha = 8.78 \text{ MeV}$
 $E_B \sim 25 \text{ MeV}$



L'Antimatière

Relativité Restreinte

Mécanique Quantique

électron relativiste




1929 : Equation de Dirac


L'équation de Dirac a 2 solutions !

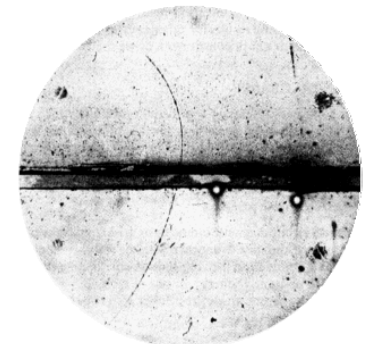
{ l'électron
????

1930: P. Dirac invente l'anti-électron

1932 : C. Anderson découvre l'anti-électron
et l'appelle positron

e^-

électron

e^+

anti-électron

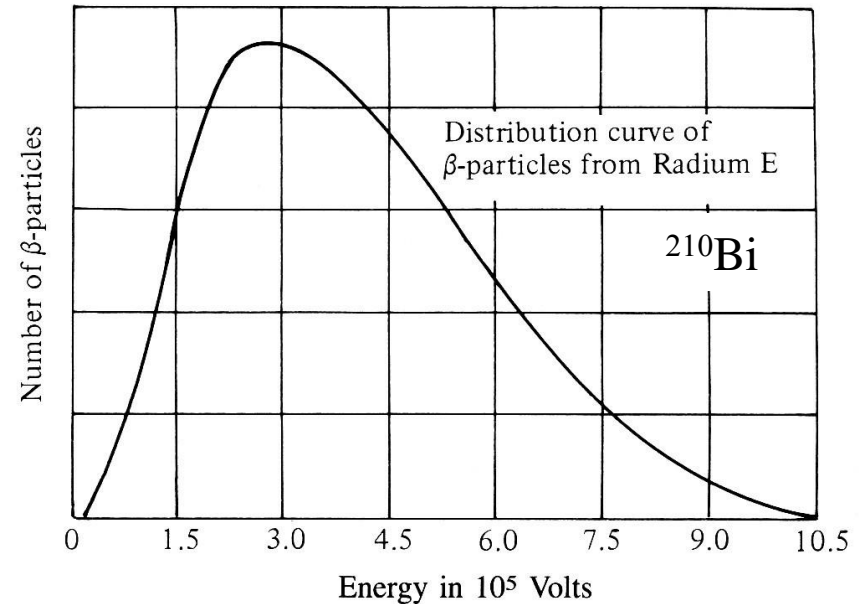


Radioactivité β et l'hypothèse du neutrino

1914 J. Chadwick met en évidence le spectre continu du rayonnement beta (très différent du spectre du rayonnement alpha et gamma)



la loi de la conservation d'énergie est-elle violée ?



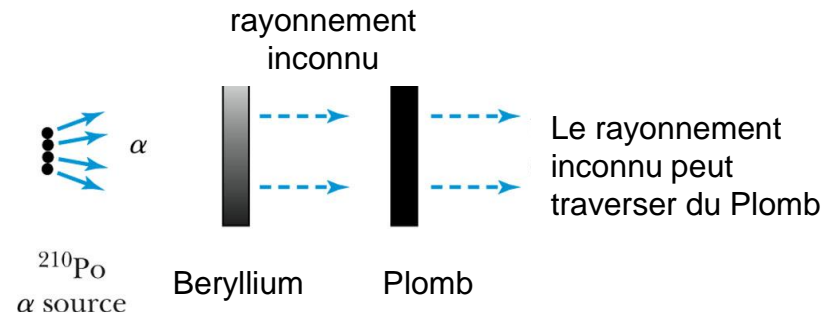
Chadwick à Rutherford: “Je ne trouve pas l'ombre d'une raie. Il y probablement une erreur stupide quelque part...!”

1930: W. Pauli suggère l'existence d'une nouvelle particule neutre de masse ~ 0 qu'il appelle 'neutronen' et qui partagerait l'énergie de désintégration β avec l' e^-

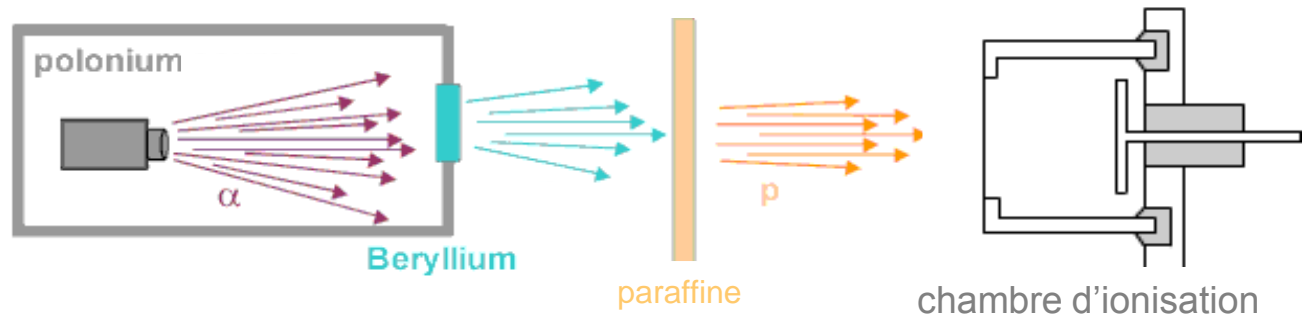
Découverte du neutron

1930-32

W. Bothe & H. Becker
découvrent une étrange
réaction



James
Chadwick



J. Chadwick démontre que le rayonnement correspond à une
particule de masse ~ 1 : le neutron

Conséquences de la découverte du neutron

1932: D. Ivanenko, W. Heisenberg et E. Majorana : le noyau est composé de Z protons et N neutrons

Heisenberg introduit la notion d'**isospin**: le proton et le neutron sont 2 aspects de la même particule qui s'échangent de la charge

1935: Yukawa va plus loin que Heisenberg et invente une nouvelle particule que les nucléons s'échangent:
le méson



Hideki Yukawa

Quelle masse pour le méson ?

principe d'incertitude: $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$

Du fait de sa masse, le méson ne peut pas exister plus longtemps que

$$\Delta t \sim \hbar/2 \Delta E = \hbar/2mc^2$$

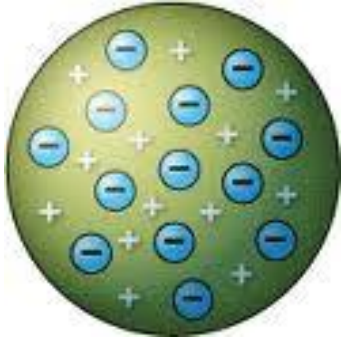
Le méson doit parcourir la distance entre un proton et un neutron (~ 1 fm) en Δt

$$1\text{fm} \sim c\Delta t = \hbar c/2mc^2 \Rightarrow mc^2 \sim 100 \text{ MeV}$$

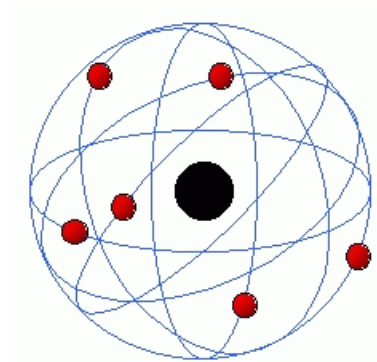
On découvre le méson en 1947 avec une masse de ~ 140 MeV

Le noyau au complet

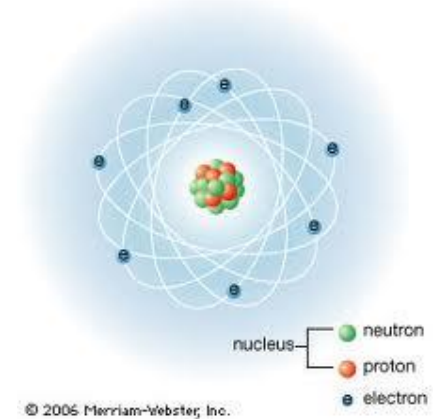
1898



1911



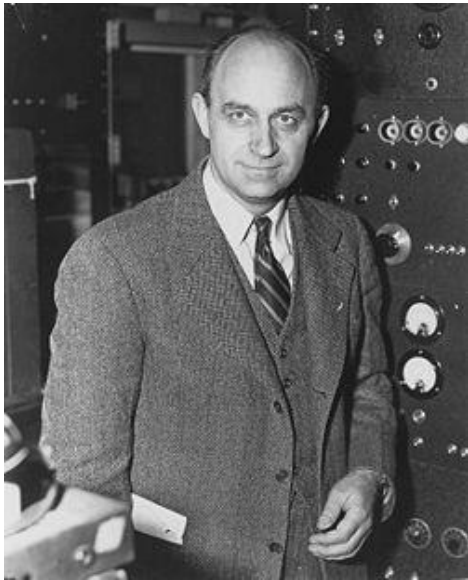
1932



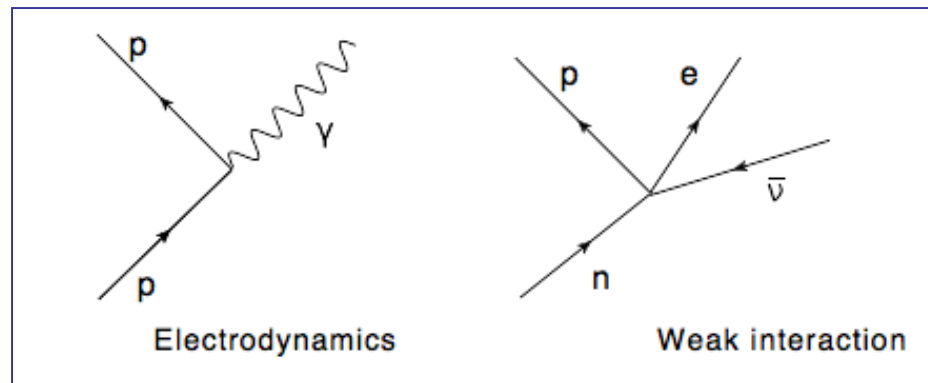
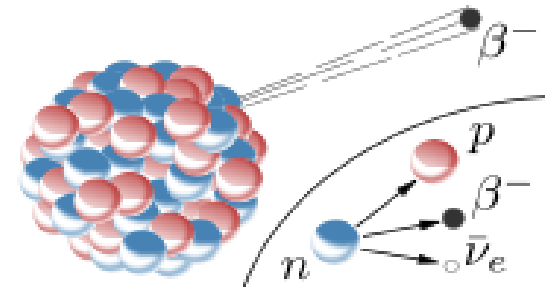
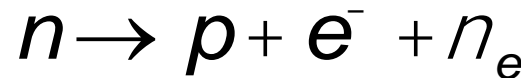
La présence des neutrons dans le noyau explique l'isotopie et résout certains problèmes de spin, moment magnétique et confinement des e⁻

Origine des e^- de la radioactivité β^- ?

1934: E. Fermi propose l'existence d'une nouvelle force, la force faible, et énonce sa théorie de la décroissance β^-



Enrico Fermi



Analogie de Fermi

Il soumet ces travaux à la revue Nature - mais le papier sera rejeté sous prétexte qu'il contient "des spéculations trop éloignées de la réalité"

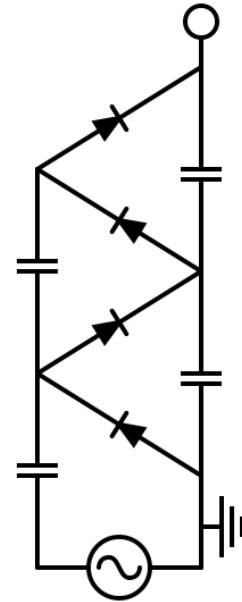
Des accélérateurs pour sonder le noyau



Ernest Walton, Ernest Rutherford, John Cockcroft

J. Cockcroft se lance avec E. Walton dans la construction d'une machine capable de produire une tension de 800 kV

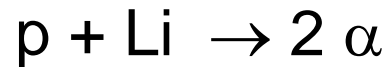
Nature 129, Février 1932, 242



multiplicateur de tension de Cockcroft-Walton

Cockroft et Walton cassent l'atome

1932: En bombardant du Li avec des protons d'énergie **250 keV**, Cockroft et Walton observent la réaction:



Li

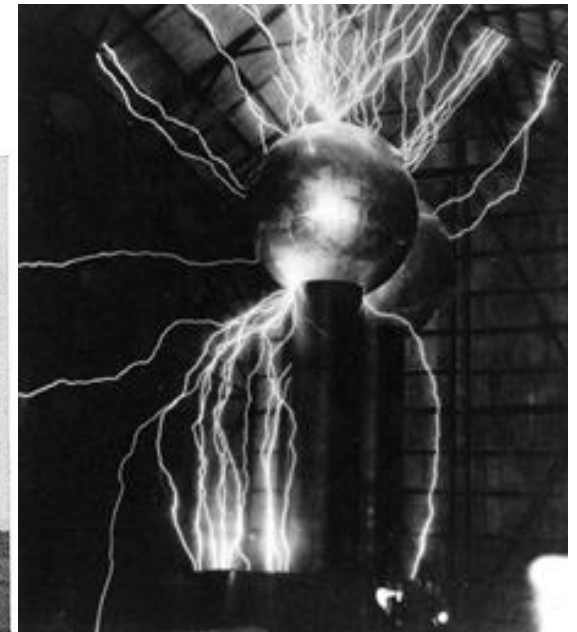
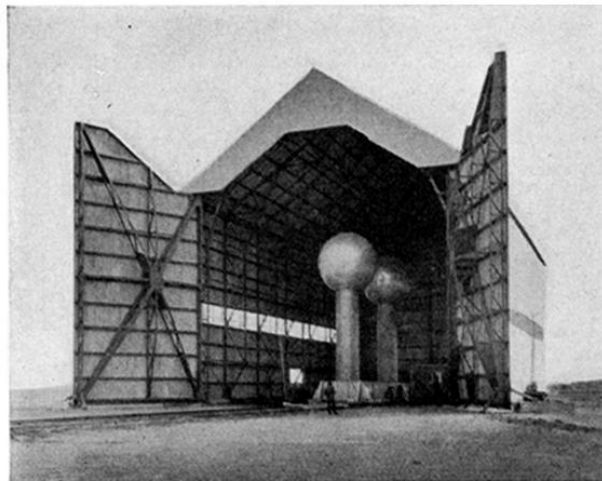
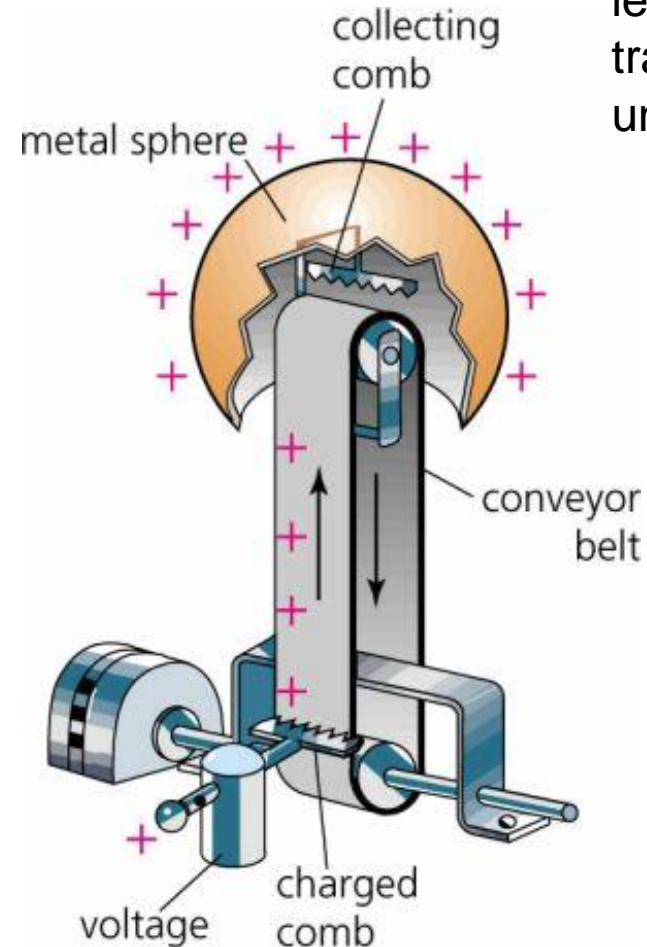


L'énergie des 2 particules alpha est mesurée: **~17 000 keV**

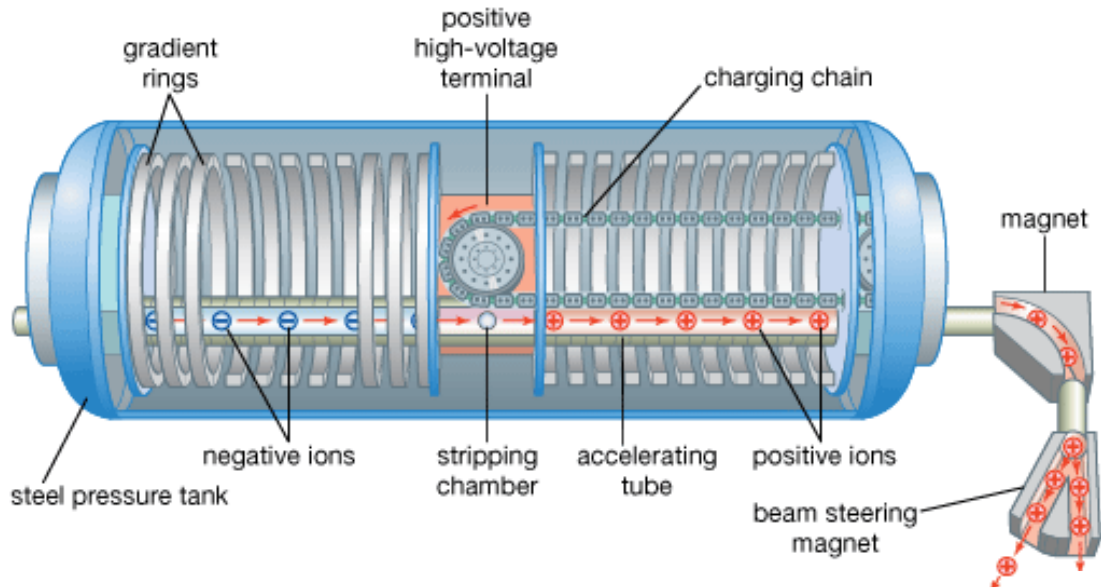
Première confirmation expérimentale de $E = mc^2$: l'énergie est préservée si **mc^2** est considéré comme une forme d'énergie

Générateur de Van de Graaff

1929: **R. Van de Graaff** invente un autre type d'accélérateur dans lequel les charges sont mécaniquement transportées à un terminal pour créer une différence de potentiel



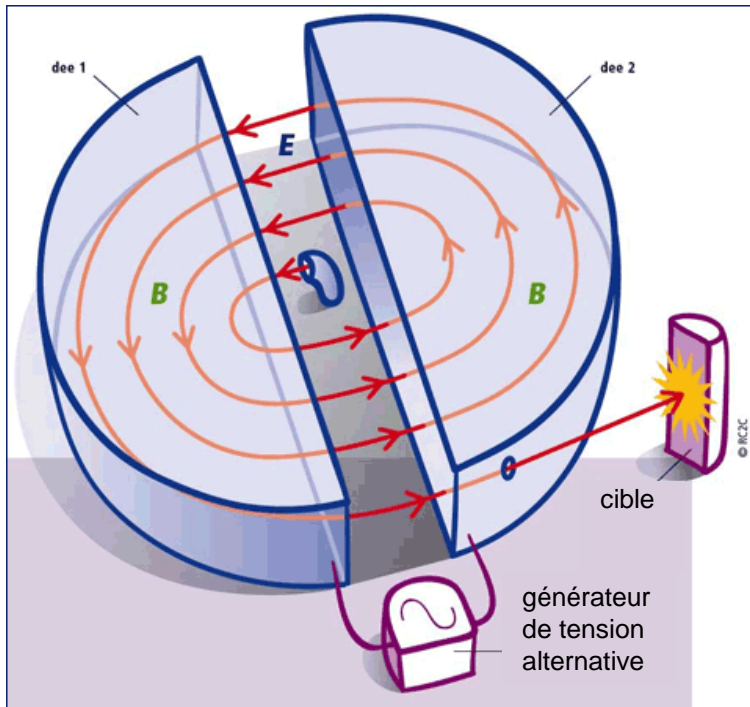
Tandem de l'IPN-Orsay



© 2008 Encyclopædia Britannica, Inc.



L'invention du cyclotron



1931: E. Lawrence s'affranchit des problèmes liés à l'utilisation de hautes tensions en utilisant une plus petite tension accélératrice plusieurs fois (R. Wideroe, 1928)



1er cyclotron en 1931, $V=1.8\text{KV}$, $d\sim 12\text{ cm}$
accélération de protons à 80 keV

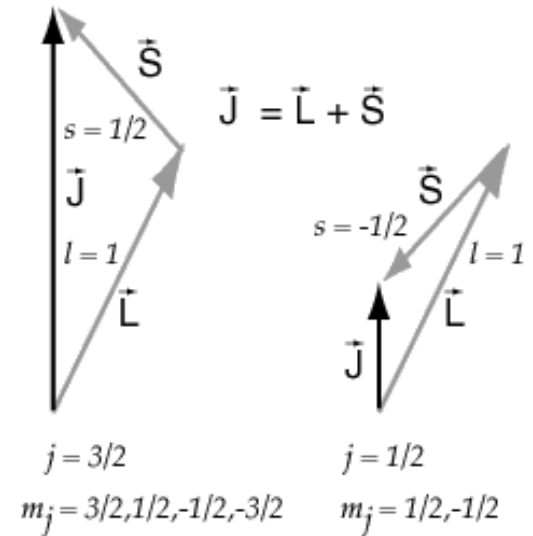
2ème cyclotron en 1932, $V=1.8\text{KV}$, $d\sim 27\text{ cm}$
accélération de protons jusqu'à 1 MeV

1936: $d\sim 93\text{ cm}$, accélération de deuteron (8 MeV) et particules alpha (16 MeV)

Fin de la 2^{ème} partie

Spin & Parité

- L** - moment cinétique orbital - **nombre entier**
- S** - spin intrinsèque - **nombre demi-entier**
- J** - spin total du nucléon - **nombre demi-entier, 2j+1 sous-états magnétiques**



La **parité** est la transformation:

$$\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$$

$$y(\vec{r}) = y(-\vec{r}) \quad y(-x, -y, -z) = y(x, y, z)$$

parité +ve

$$y(\vec{r}) = -y(-\vec{r}) \quad y(-x, -y, -z) = -y(x, y, z)$$

parité -ve

L'interaction électromagnétique et l'interaction forte conservent la parité