

# Part 2 - Echelles Nucléaires

# Résumé du cours I

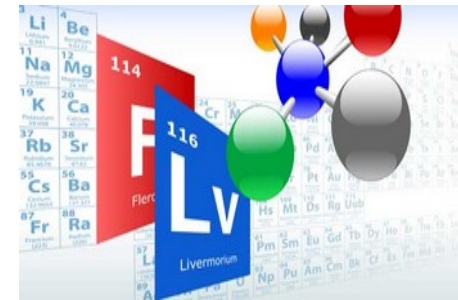
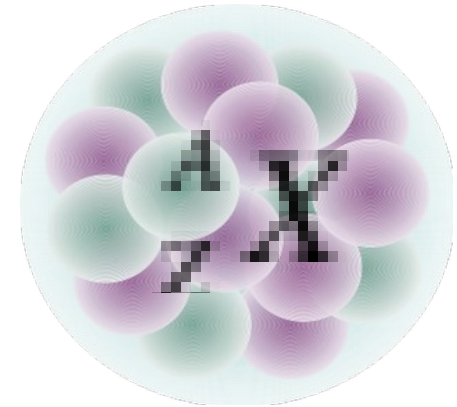
Le noyau

Découvertes d'isotopes, nouveaux éléments & nouvelles radioactivités

Découverte de l'électron et de la radioactivité

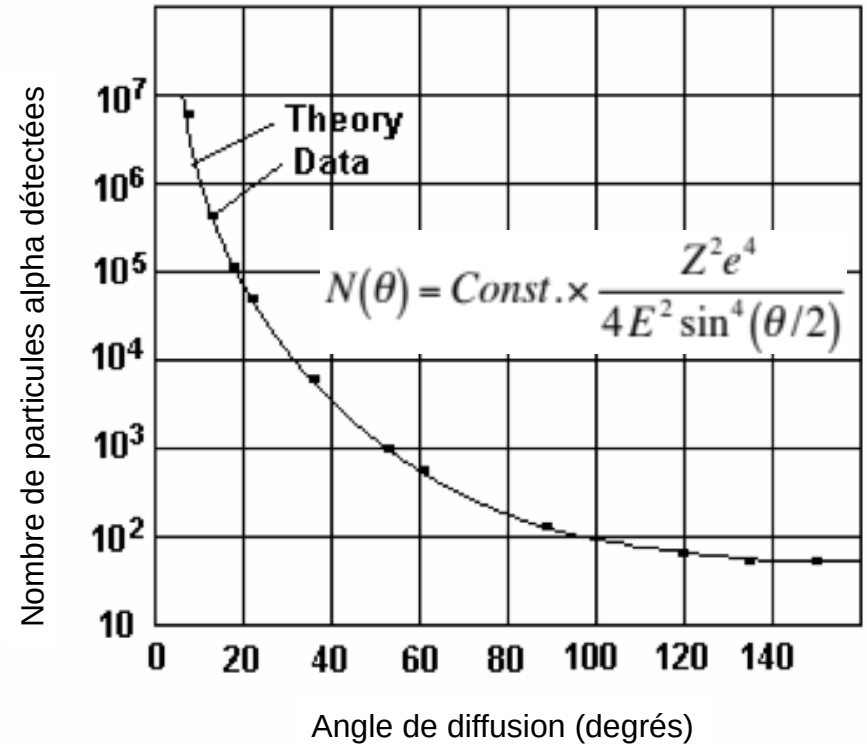
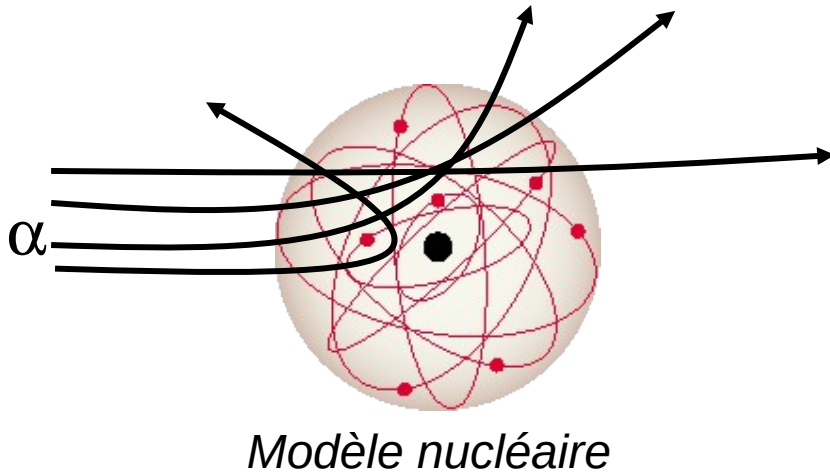
Radioactivité: propriétés, datation & énergie

Découverte du noyau

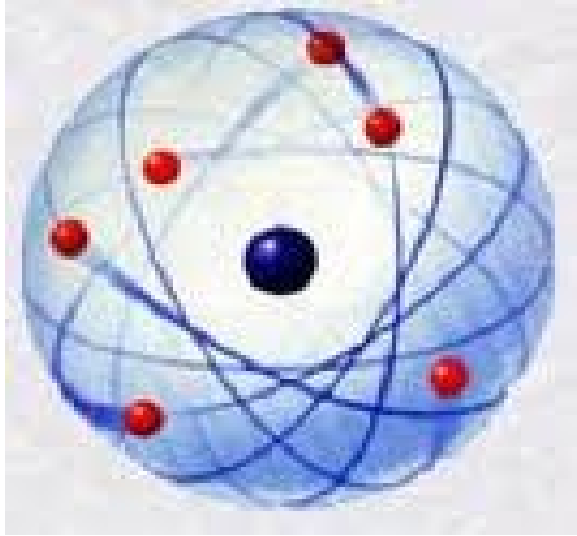


# Le noyau est né !

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



# Conséquences du modèle de Rutherford



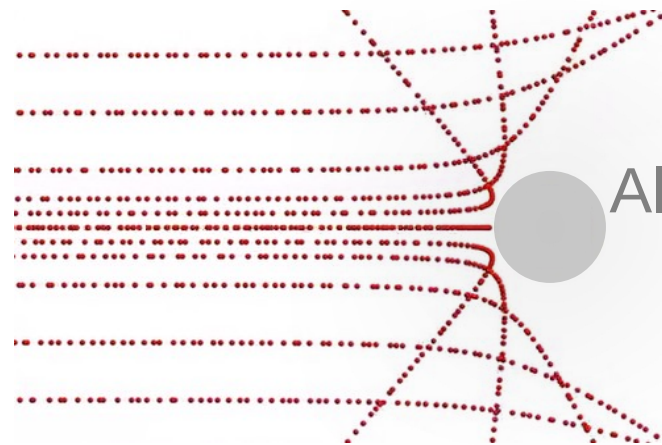
↔  
 $10^{-14}$  m

←→  
 $10^{-10}$  m

La matière est vide !



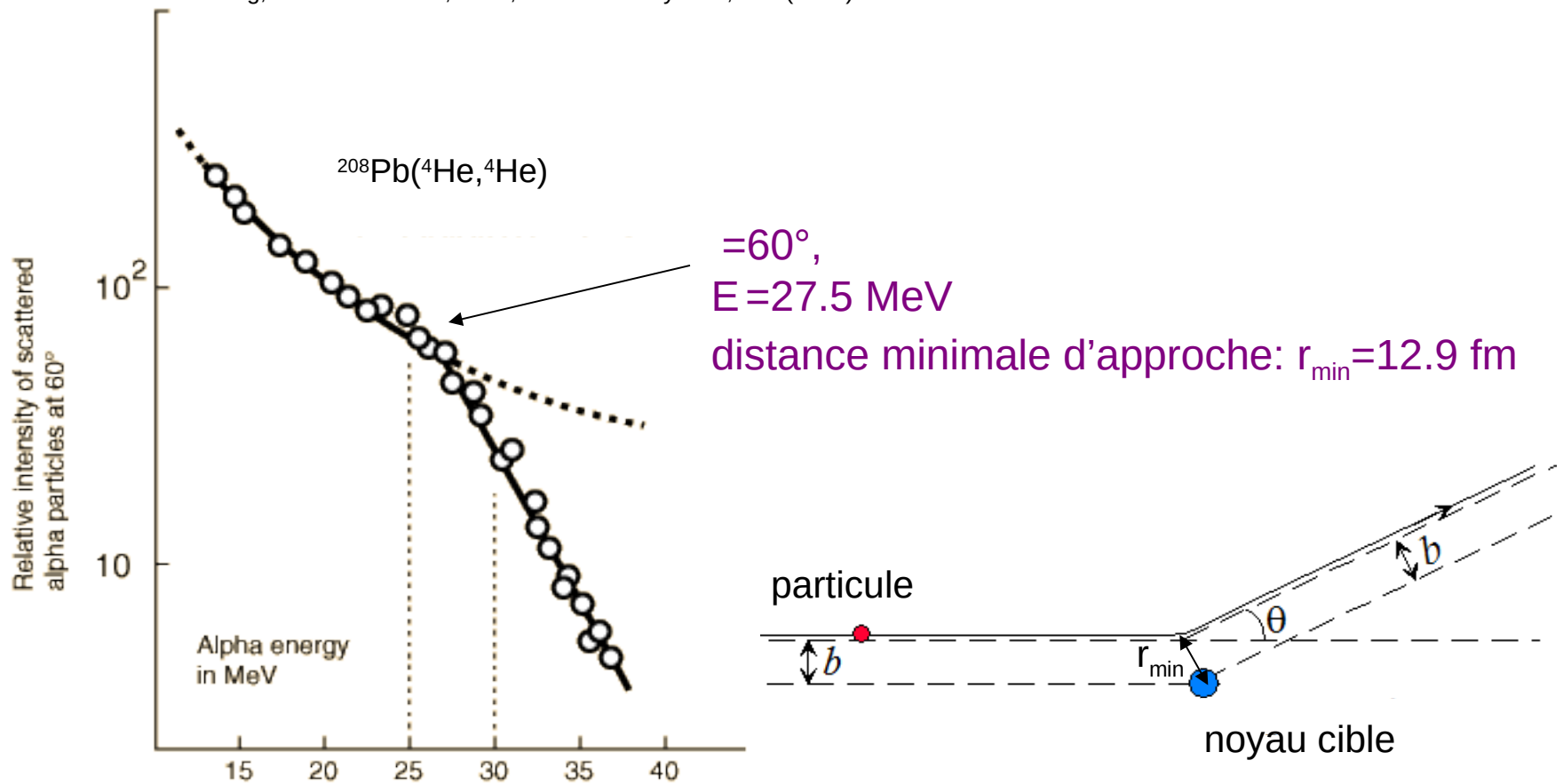
$E(\text{source}) < 7.7$  MeV



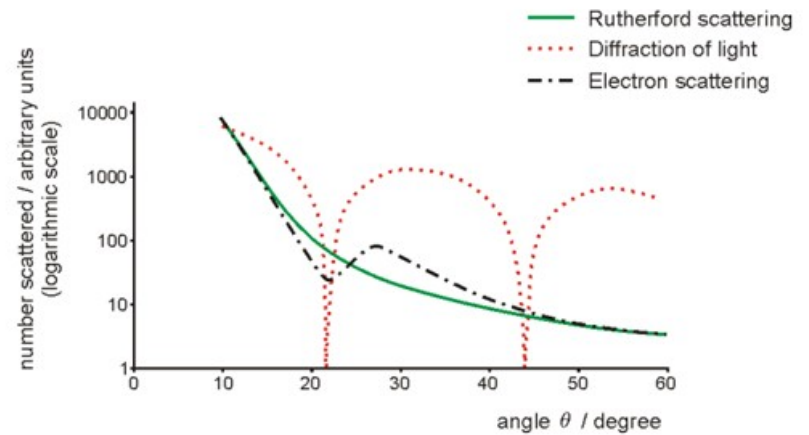
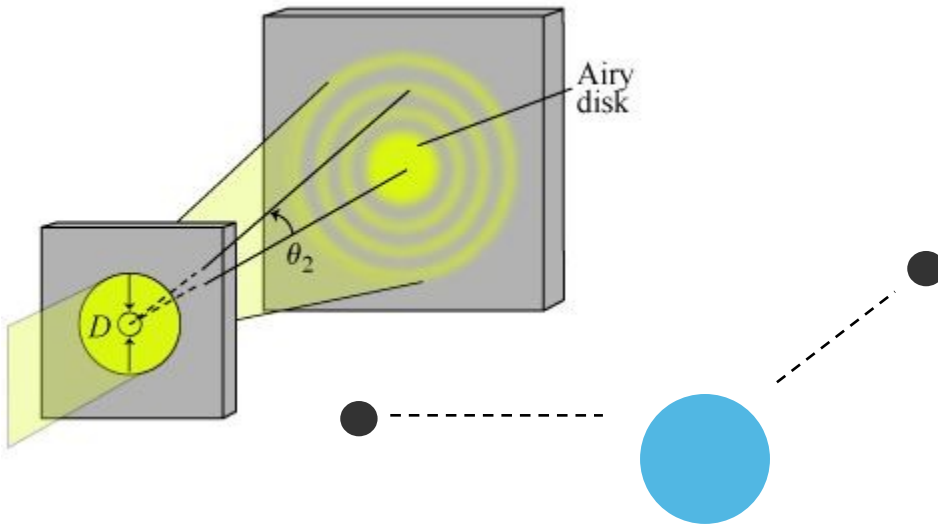
# Au plus près du noyau

A plus haute énergie, les particules 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' $^{16}\text{O}$  à 360 MeV:

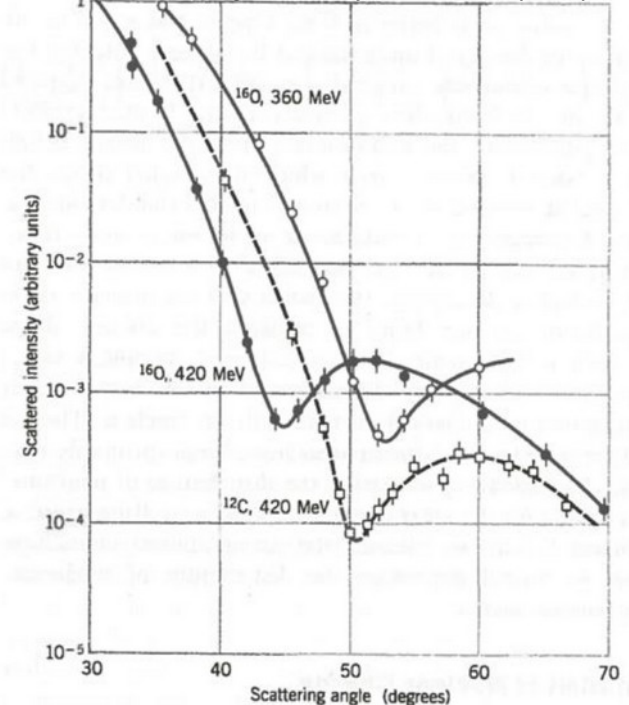
1er minimum à  $\theta = 52^\circ = \sin^{-1}(1.22 \lambda / D)$

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

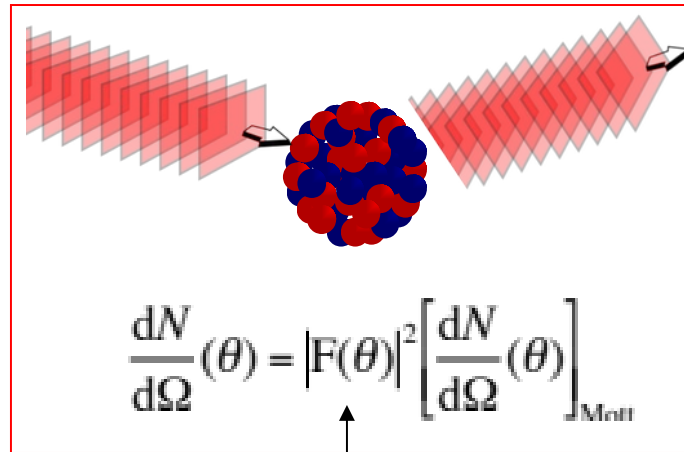
$p = E/c = 1.92 \cdot 10^{-20} \text{ kg m/s}$

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

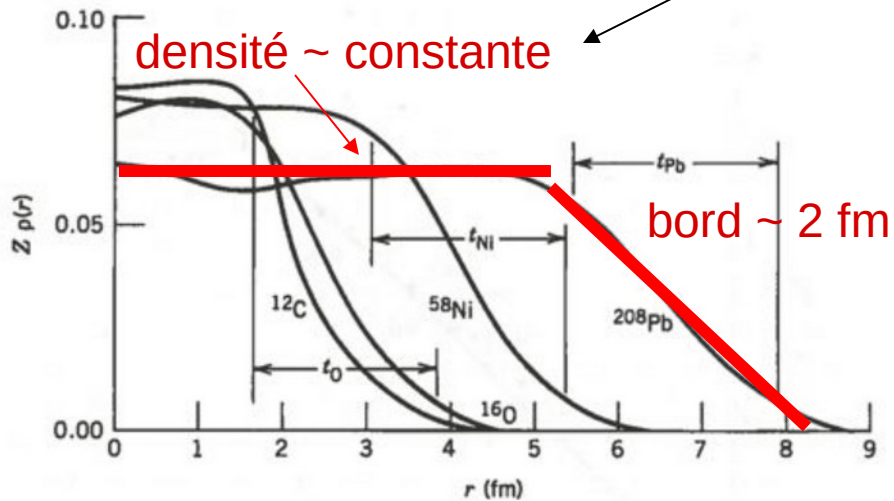
H.F. Ehrenberg et al., Phys. Rev. v. 113 (1959) 666



# Distribution de charge

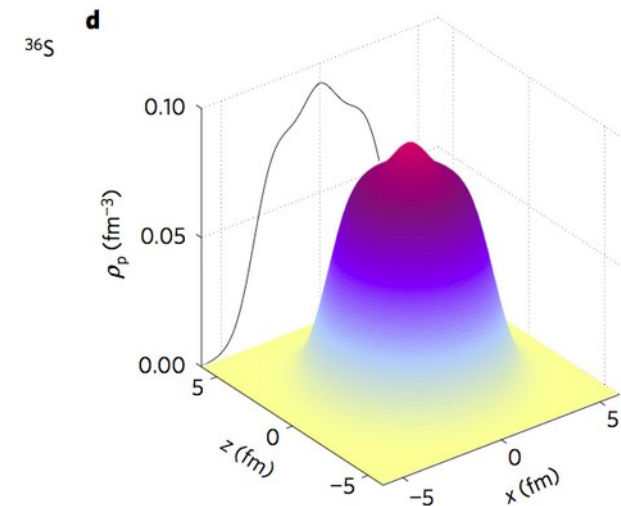
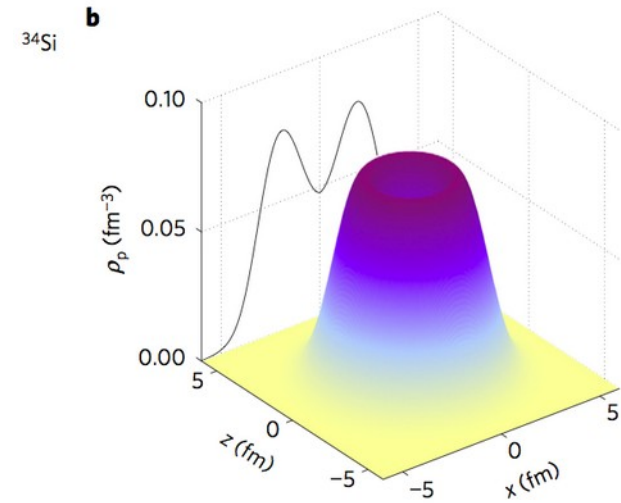
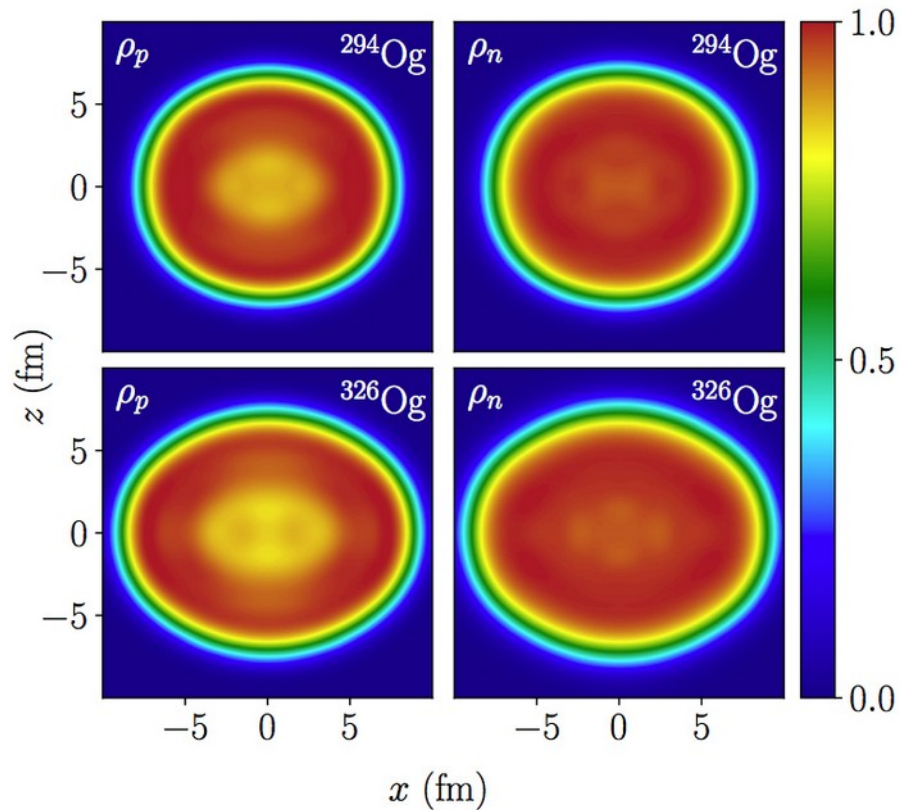


facteur de forme



# Dépression centrale et noyau bulle ?

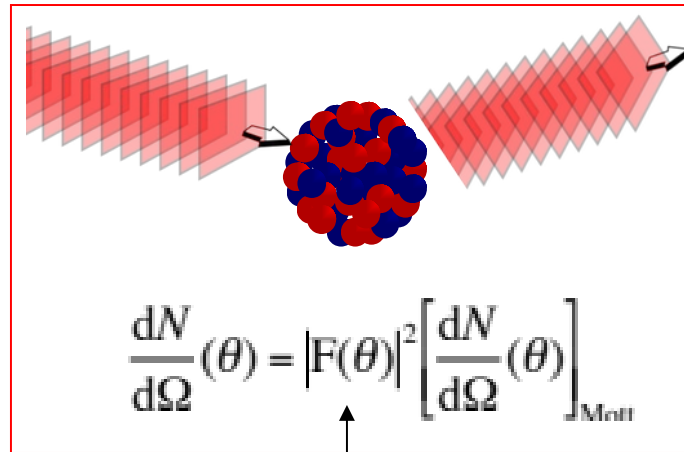
B. Schuetrumpf et al., Phys. Rev. C 96 (2017) 024306



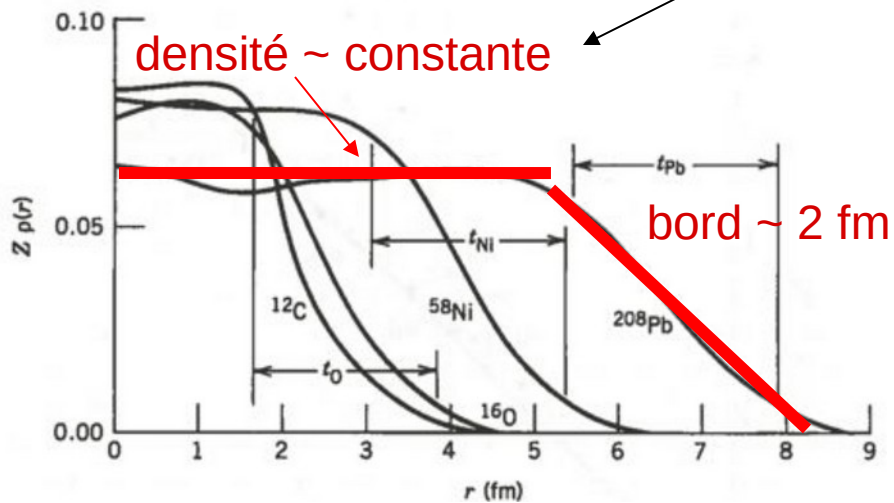
A. Mutschler et al., Nature Physics 13 (2017) 152



# Distribution de charge

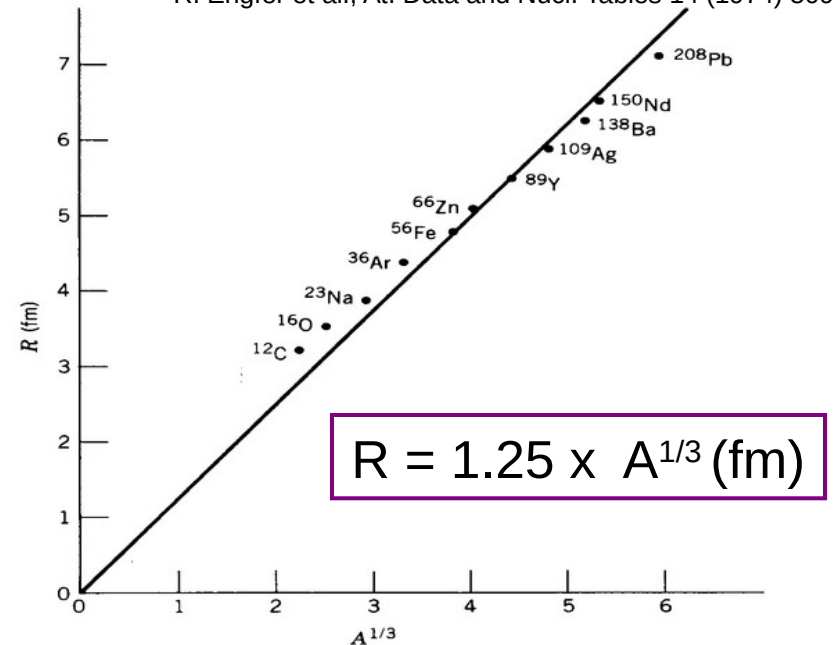


facteur de forme

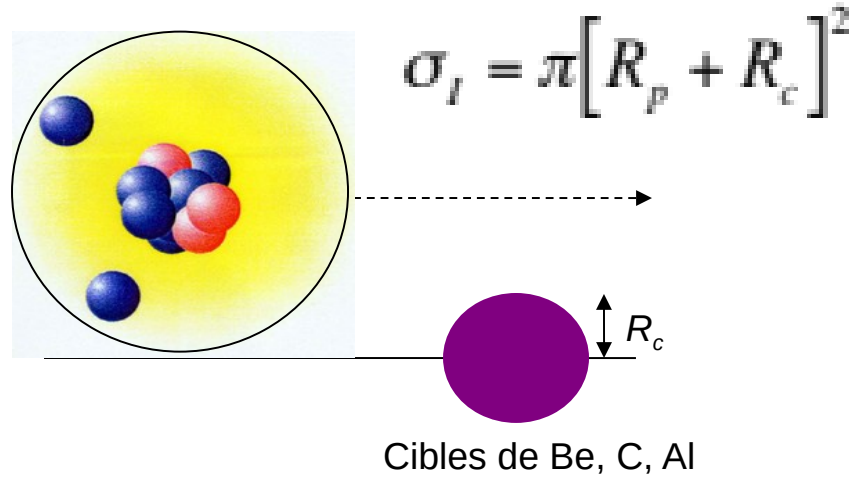


K. S. Krane, Introductory Nuclear Physics, John Wiley & Sons

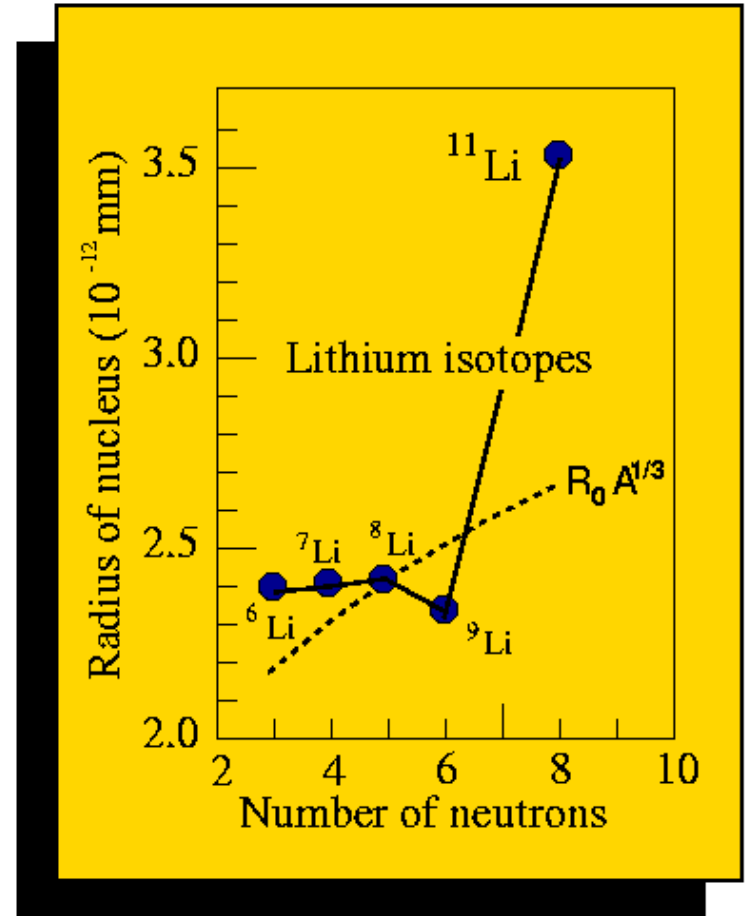
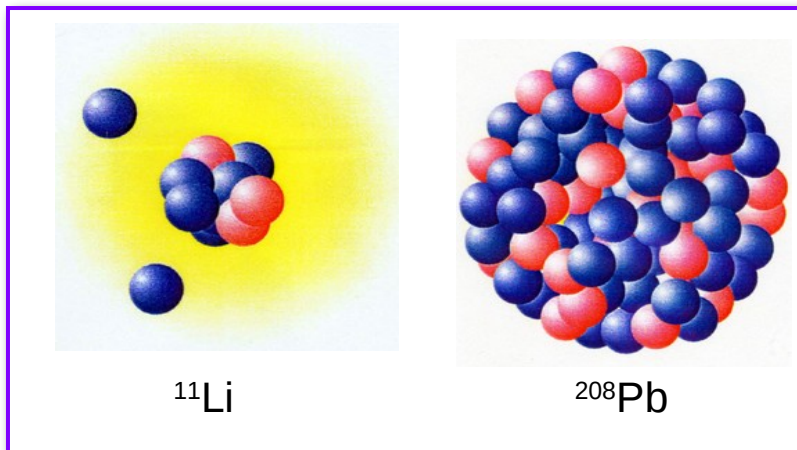
R. Engfer et al., At. Data and Nucl. Tables 14 (1974) 509



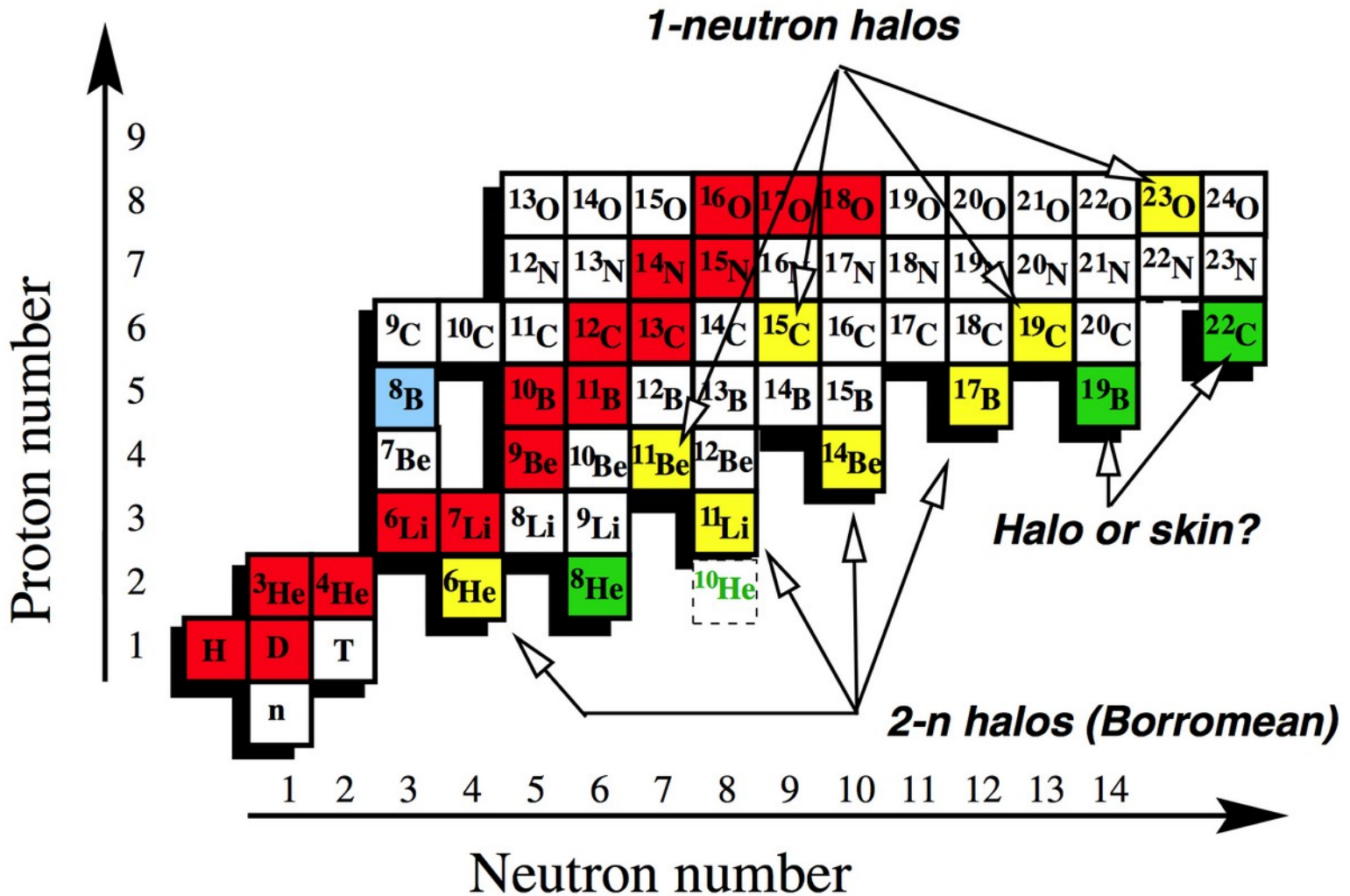
# Section efficace d'interaction



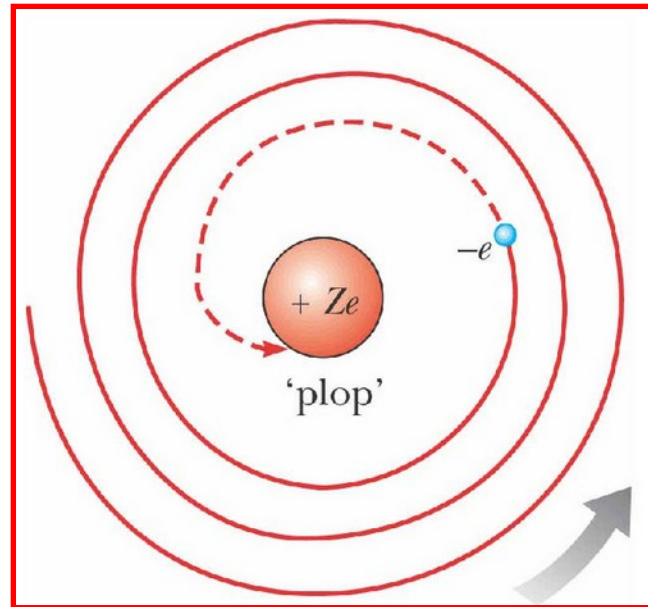
I. Tanihata et al., PRL 55 (1985) 2676



# Noyaux Halos



# Conséquences du modèle de Rutherford



l'atome est instable !

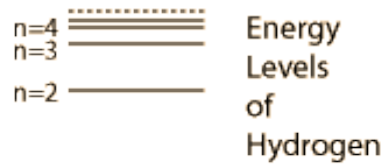
# Bohr résout le problème avec les quantas de Planck

- le moment cinétique des électrons est quantifié  $\square$  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

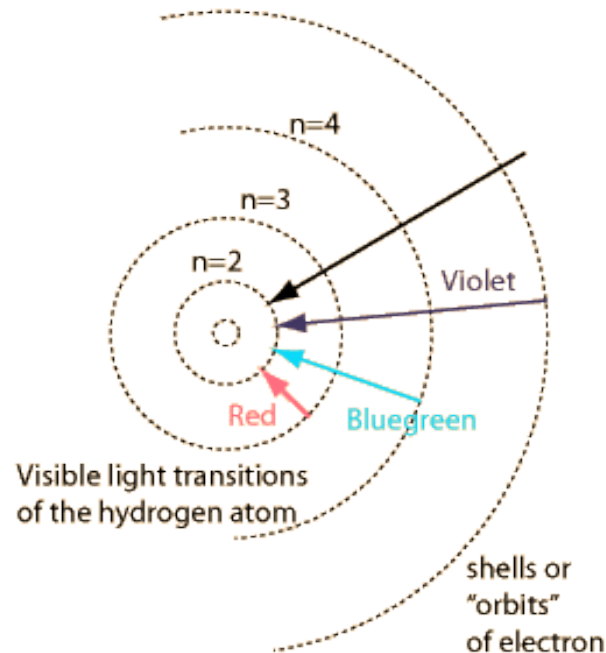
*Philosophical Magazine* 26, 1-25 (1913)

particulière

$$E_n = -Q^2/n^2$$

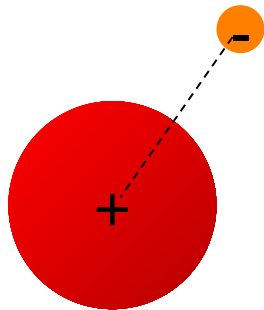


n=1

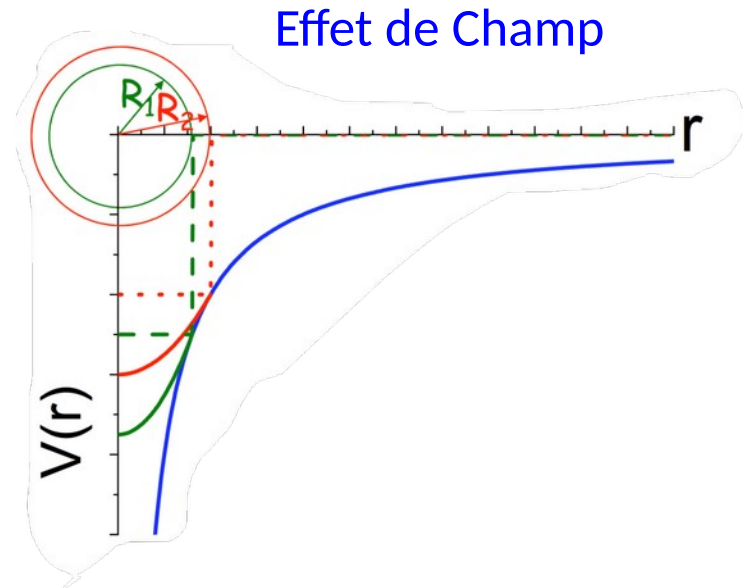


*Niels Bohr*

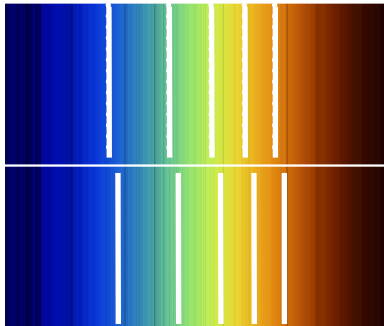
# Déplacements isotopiques



Effet de Masse



Isotope A

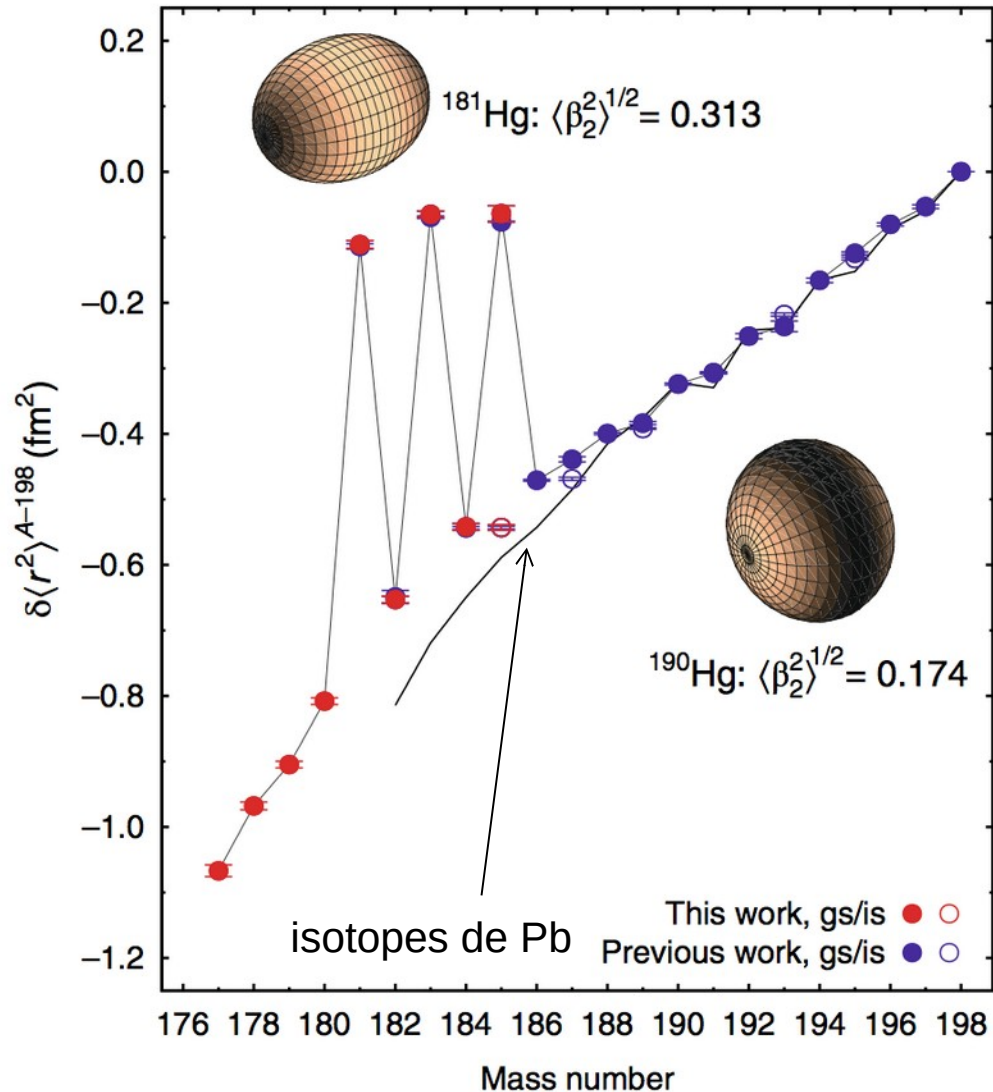


Isotope A'

$$\delta V^{A,A'} = M \frac{A' - A}{AA'} + F \delta \langle r^2 \rangle^{A,A'}$$

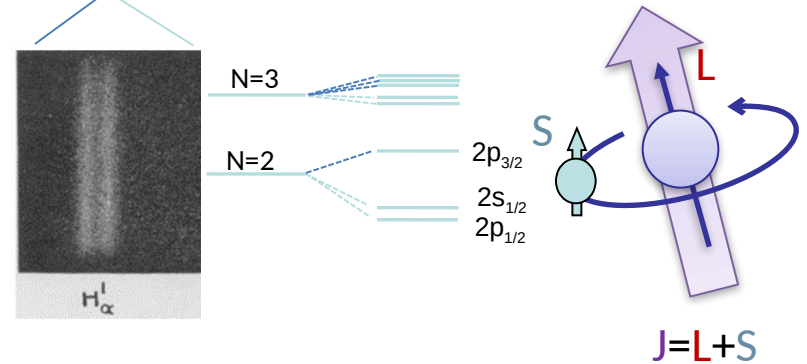
effet de masse  
 facteurs atomiques  
 effet de champ

# Variations du rayon carré moyen

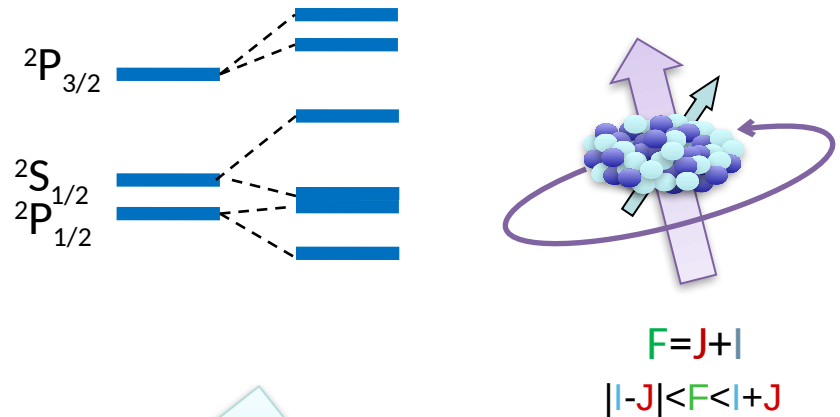


# Structure Fine et Hyperfine

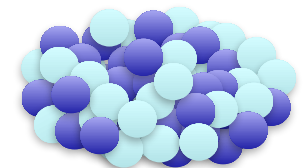
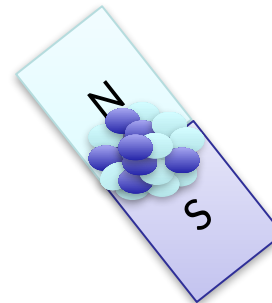
- Une résolution  $\sim 5000$  plus élevée révèle une structure fine du spectre de l'Hydrogène due à l'interaction SPIN-ORBIT



- 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)

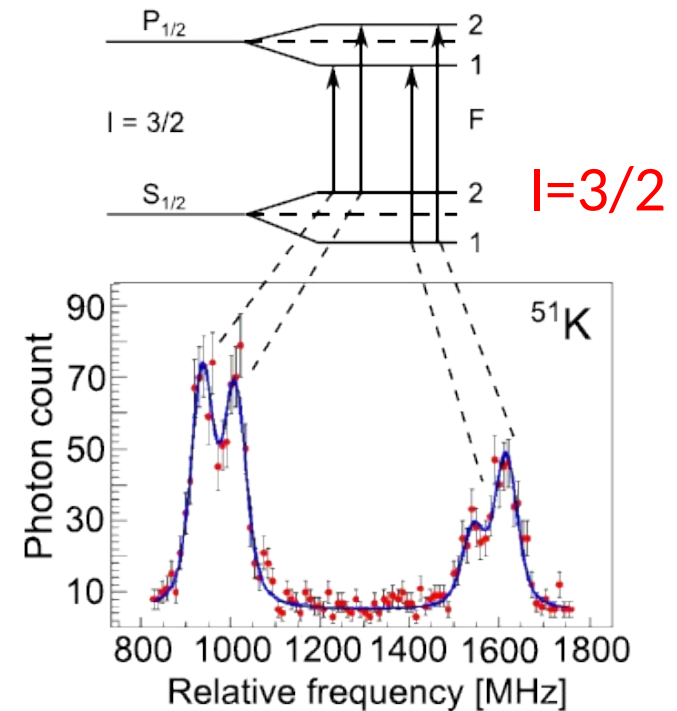
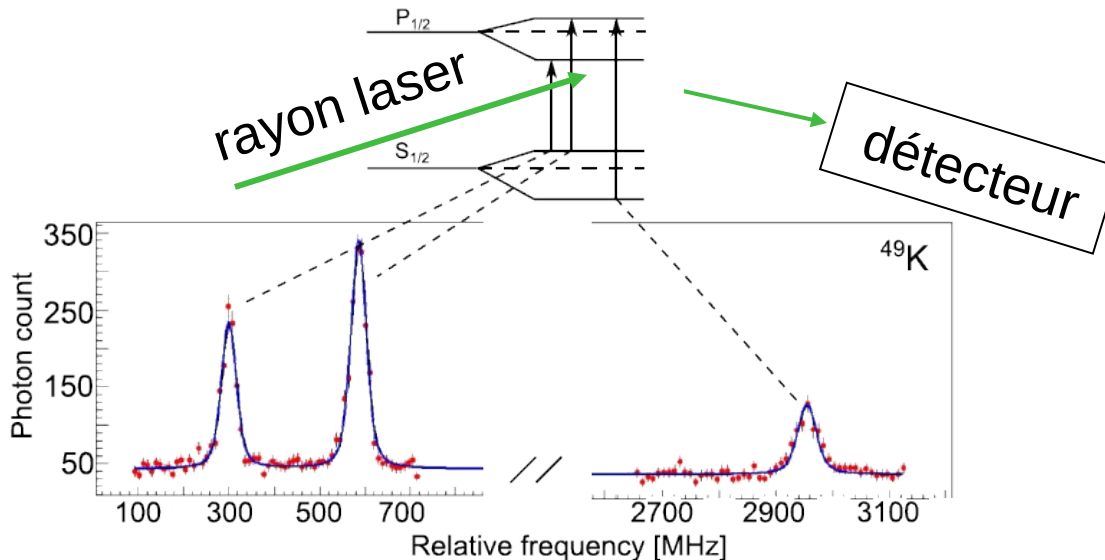
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending  
26 APRIL 2013

J. Papuga et al.,

Spins and Magnetic Moments of  $^{49}\text{K}$  and  $^{51}\text{K}$ : 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)

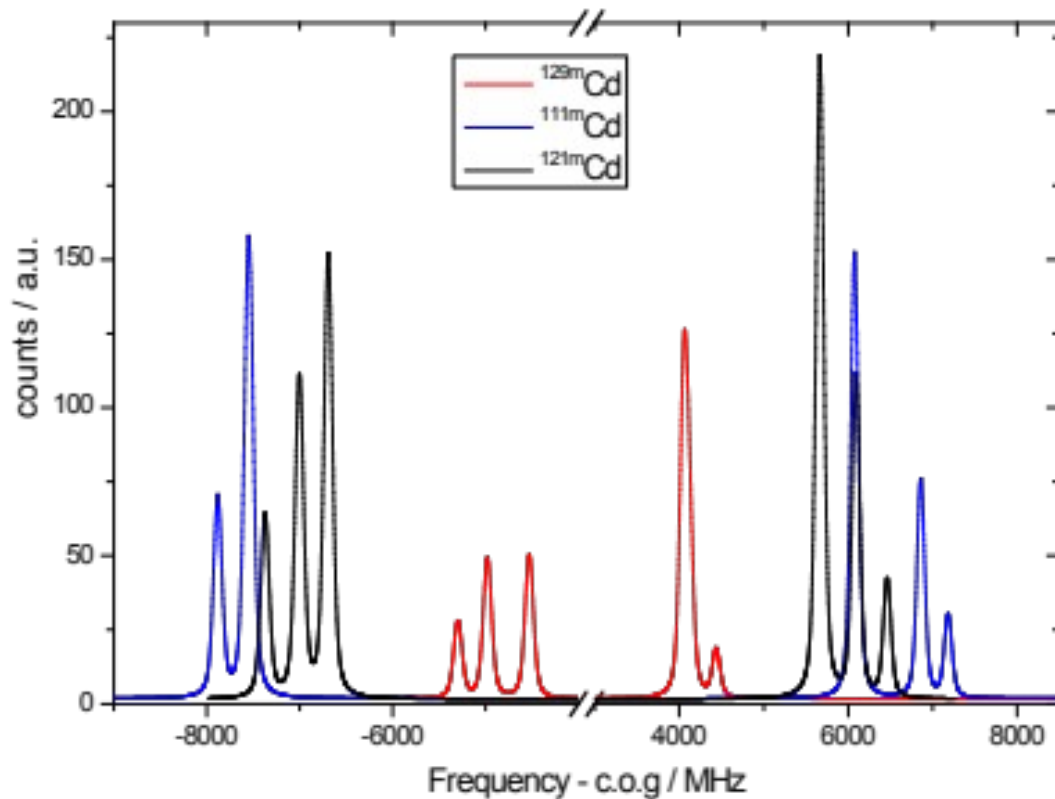
Selected for a **Viewpoint** in *Physics*  
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending  
10 MAY 2013

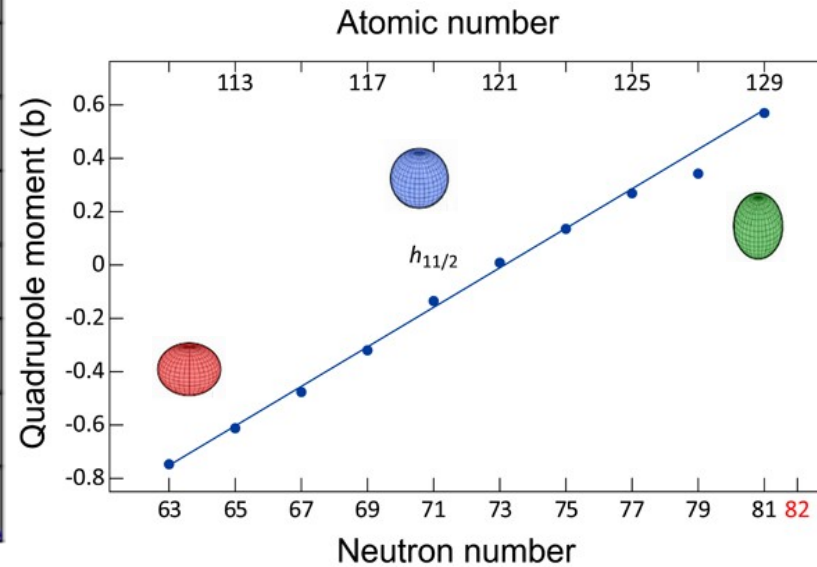


D. T. Yordanov et al.,

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

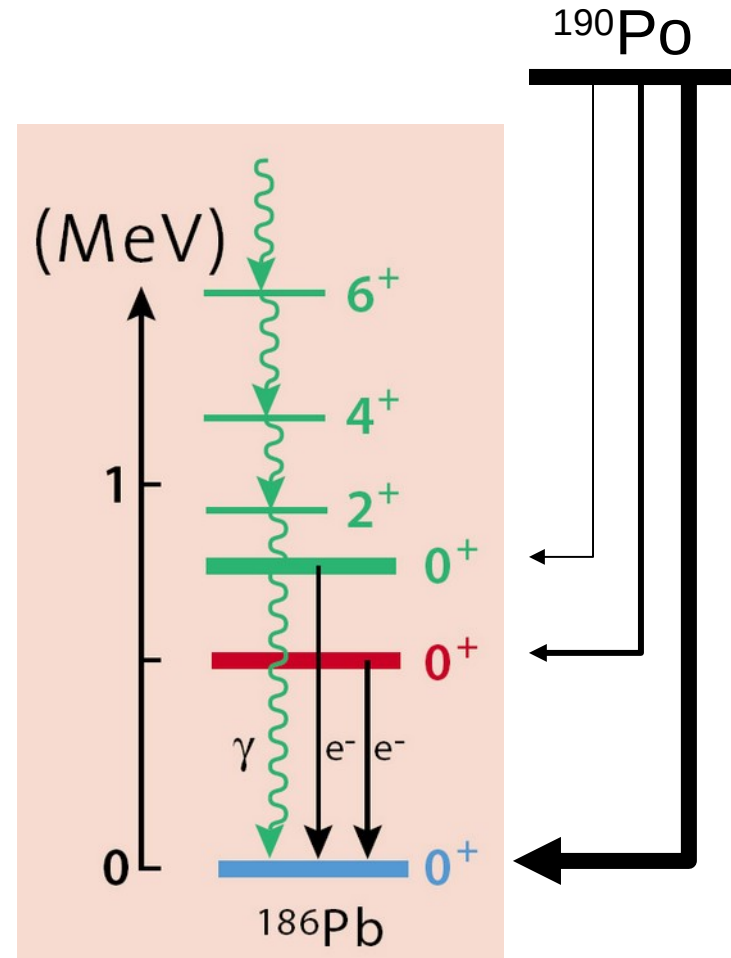
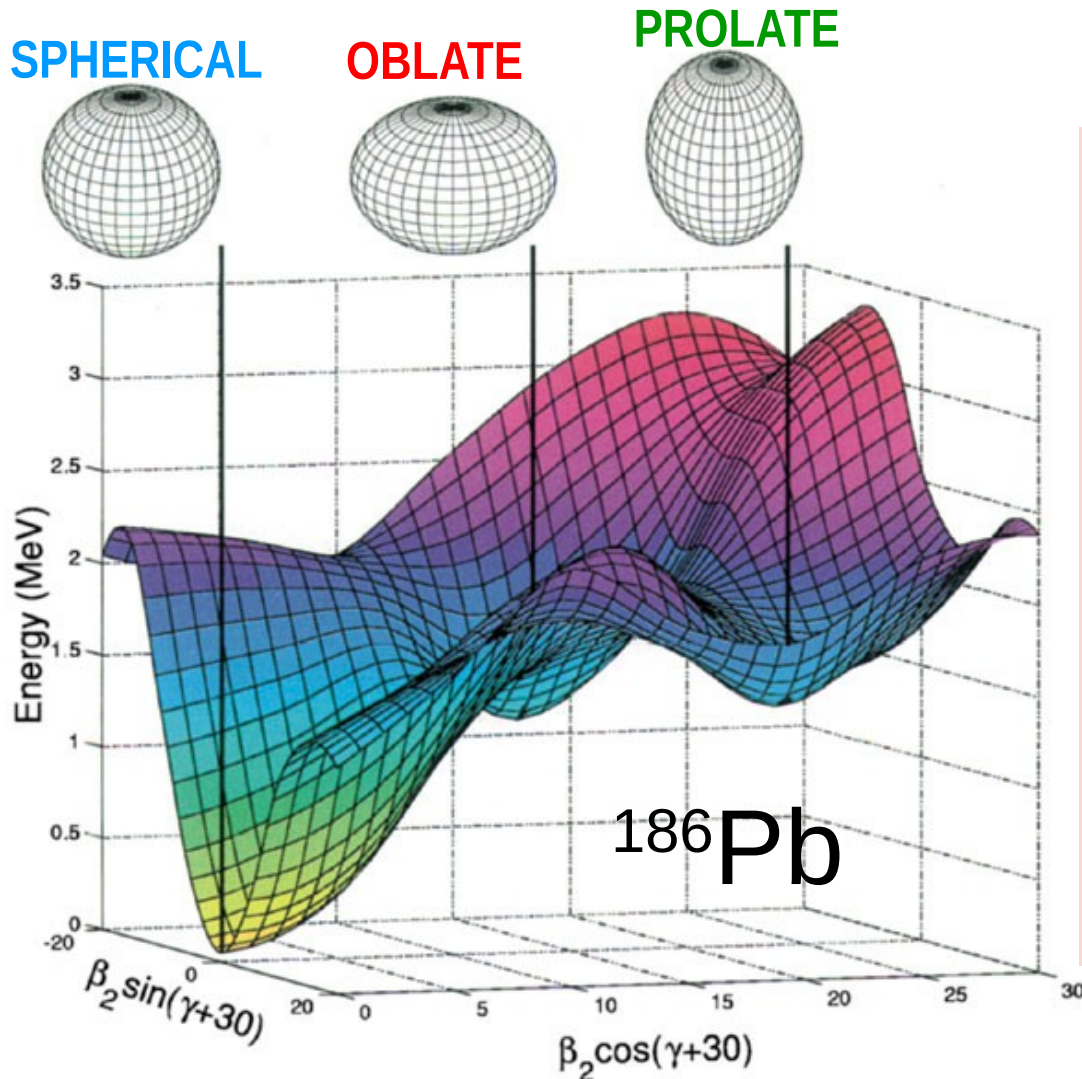


état isomérique  $11/2^-$

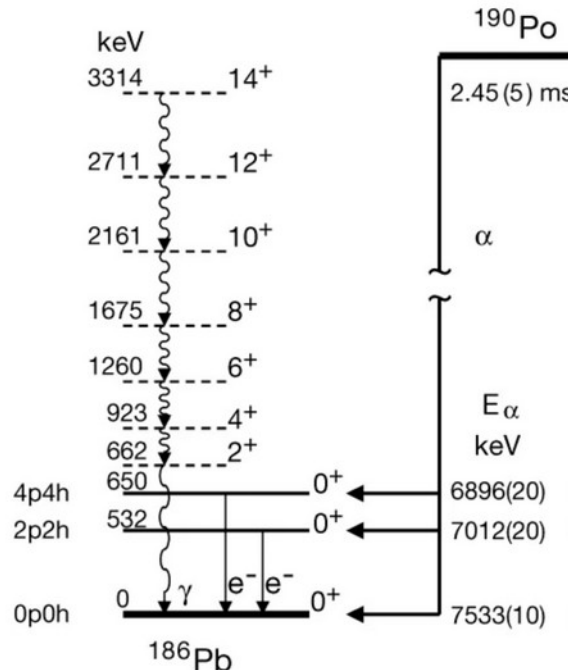
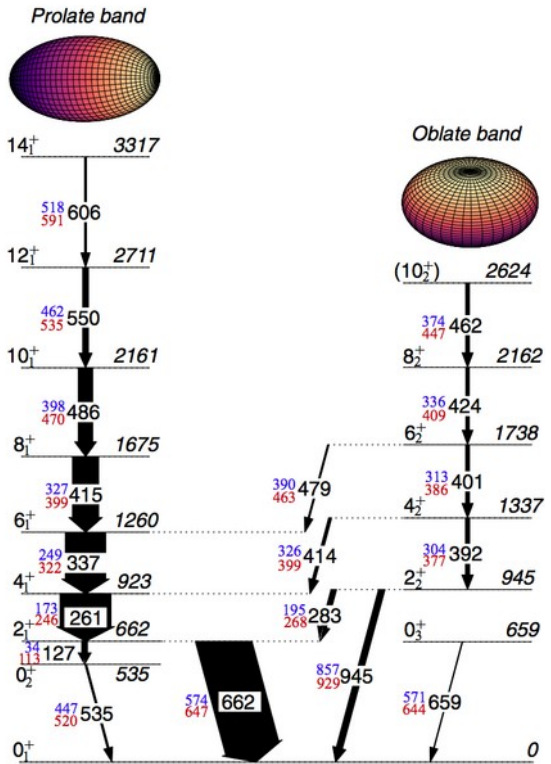
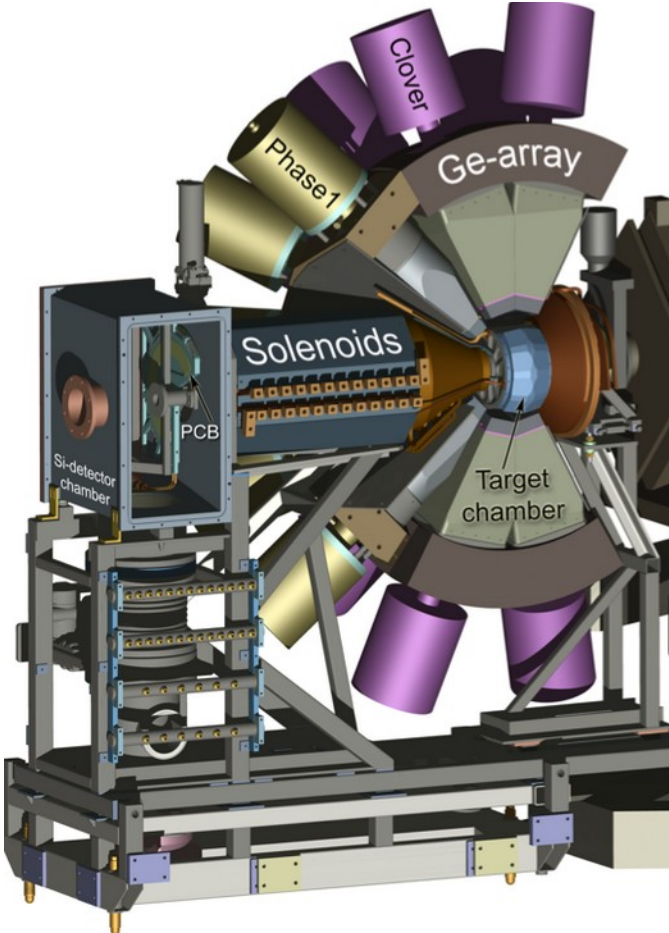


# Formes coexistantes

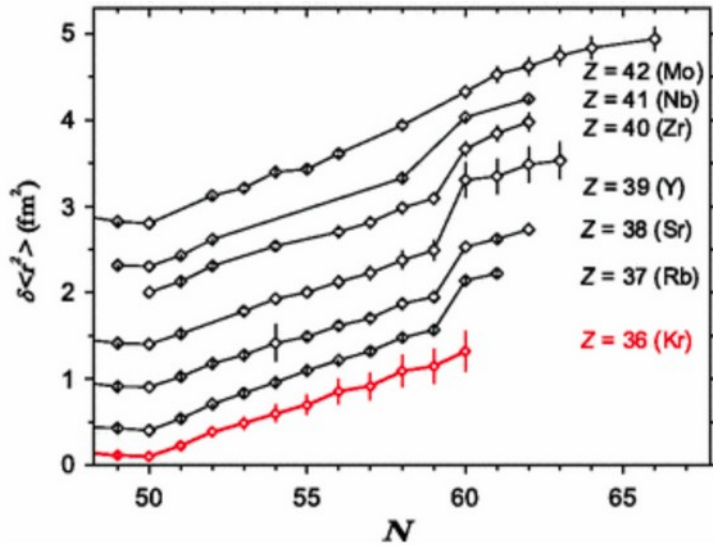
3 états  $0^+$  de basse énergie observés dans la décroissance du  $^{190}\text{Po}$



# Réaffectation des formes du $^{186}\text{Pb}$



# Changements de forme



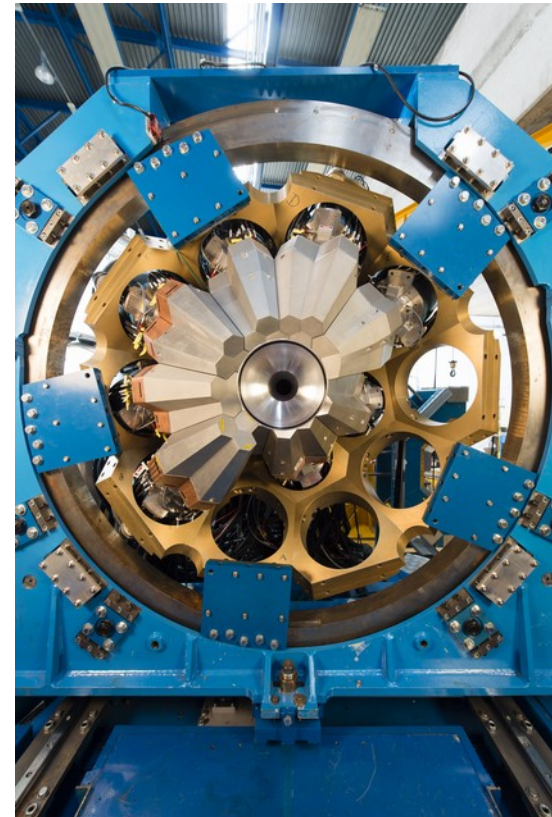
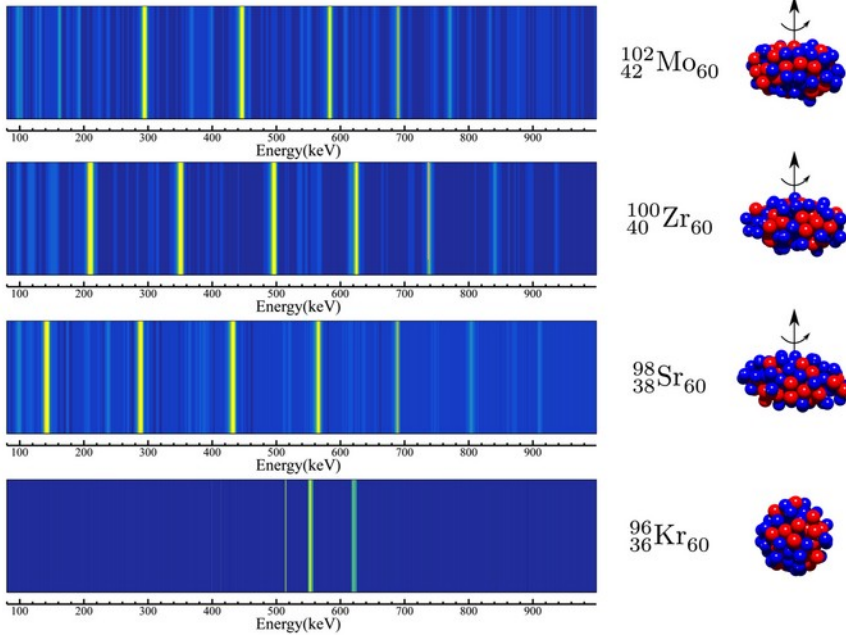
S. Naimi *et al.*, Phys. Rev. L 105, 032502 (2010)

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

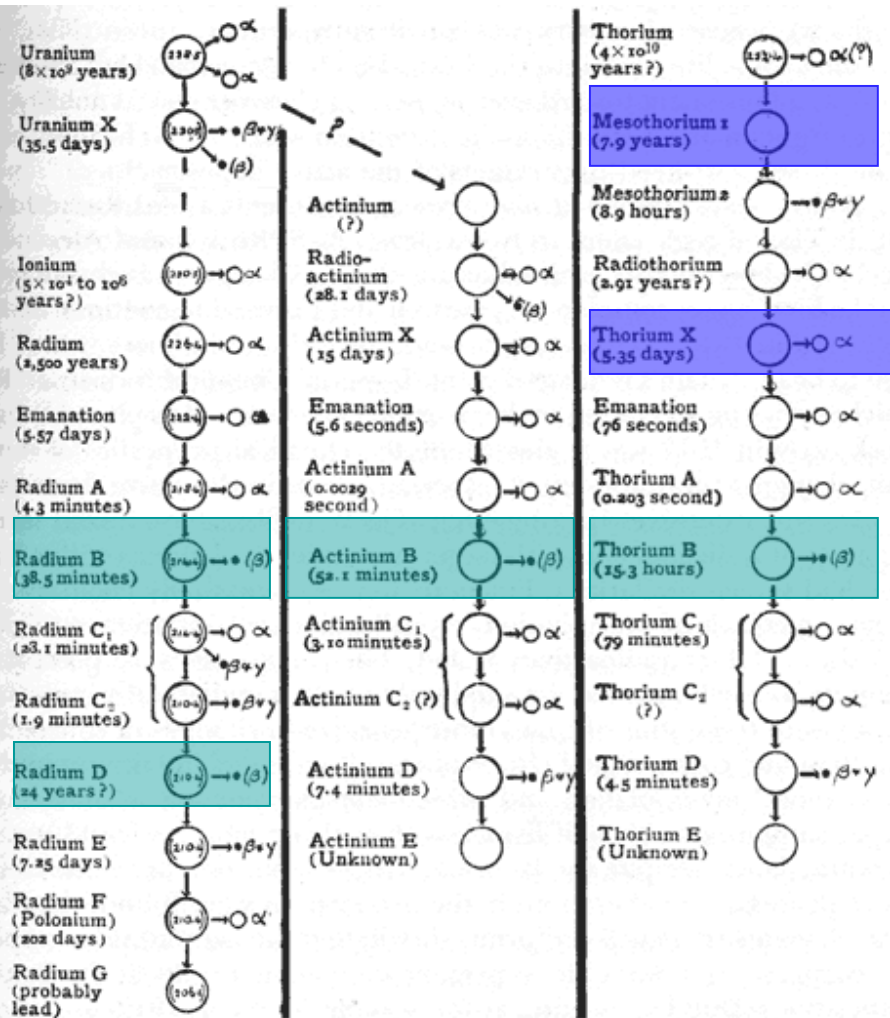
Quid du Kr ?

Spectroscopie  $\gamma$  du  $^{96}\text{Kr}$  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

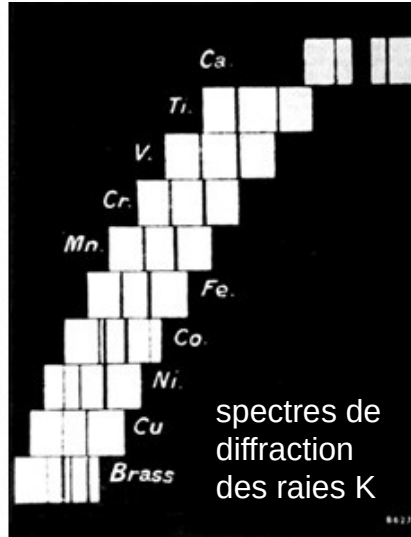
Problème: seules 7 cases inoccupées dans le tableau périodique entre Bi et U !

Inséparabilité de certains radioéléments

1913 Frederick Soddy

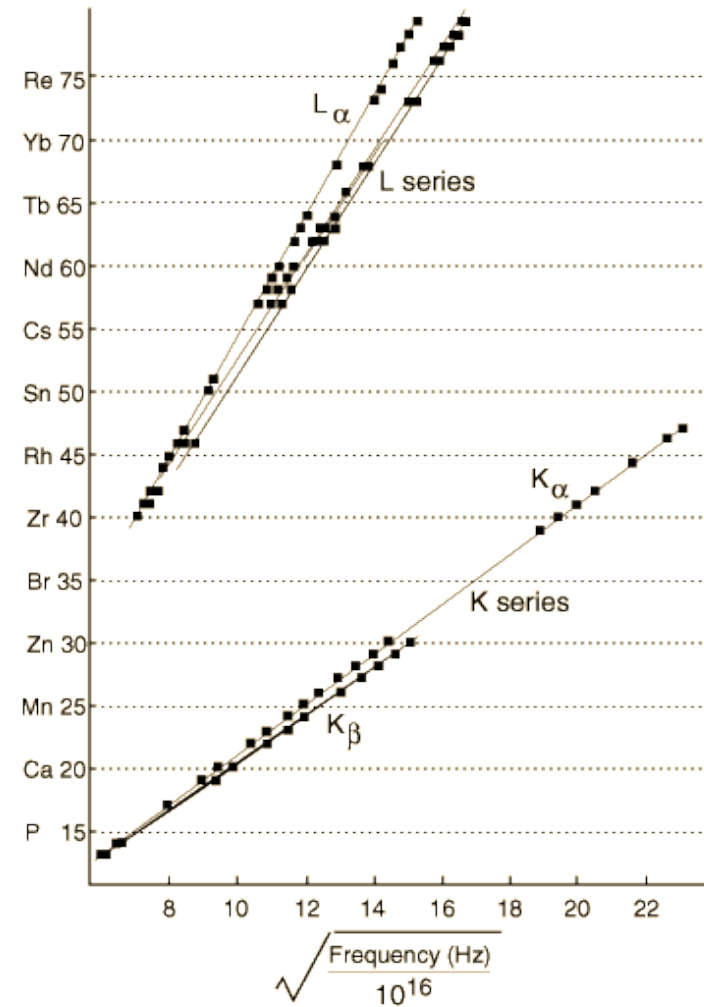
Concept d'isotope: éléments radioactifs ayant différentes masses atomiques mais les mêmes propriétés chimiques

# Le tableau périodique trouve enfin son fil conducteur



1914 Henry Moseley

Mesure de la fréquence du rayonnement X de nombreux éléments

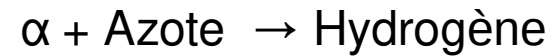


Adapted from Moseley's original data (H. G. J. Moseley, Philos. Mag. (6) 27:703, 1914)

# Les alchimistes du 20<sup>ème</sup> siècle

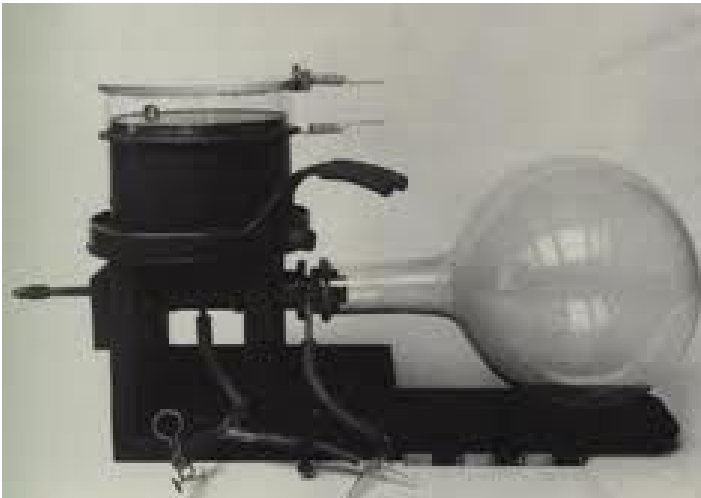
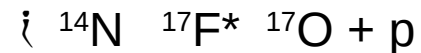
1919 E. Rutherford

1ère transmutation en laboratoire

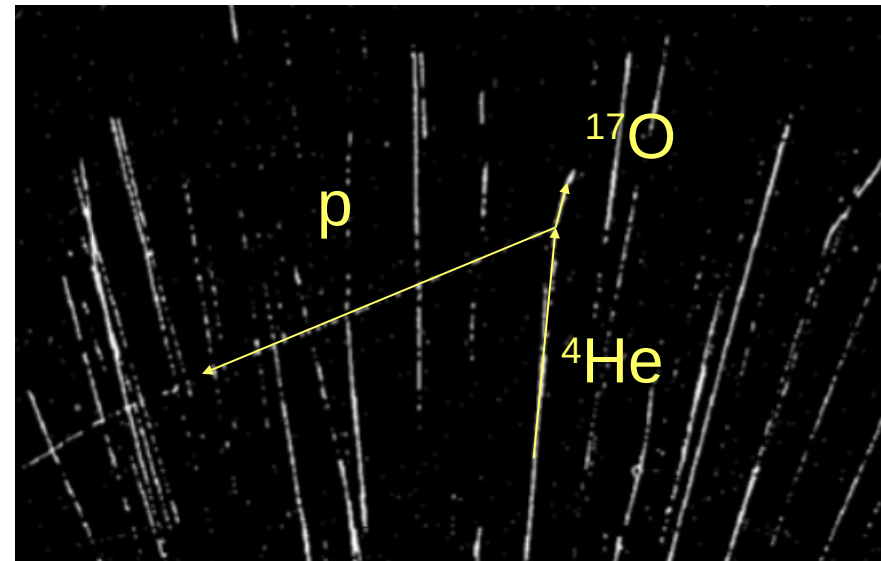


Rutherford appelle  $\text{H}^+$  proton

1924 P. Blackett visualise la transmutation



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



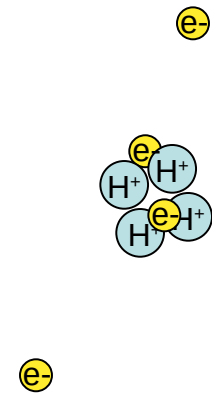


# Structure du noyau

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

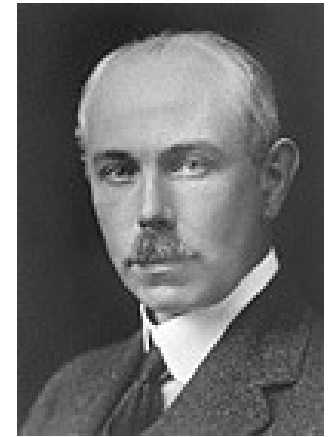
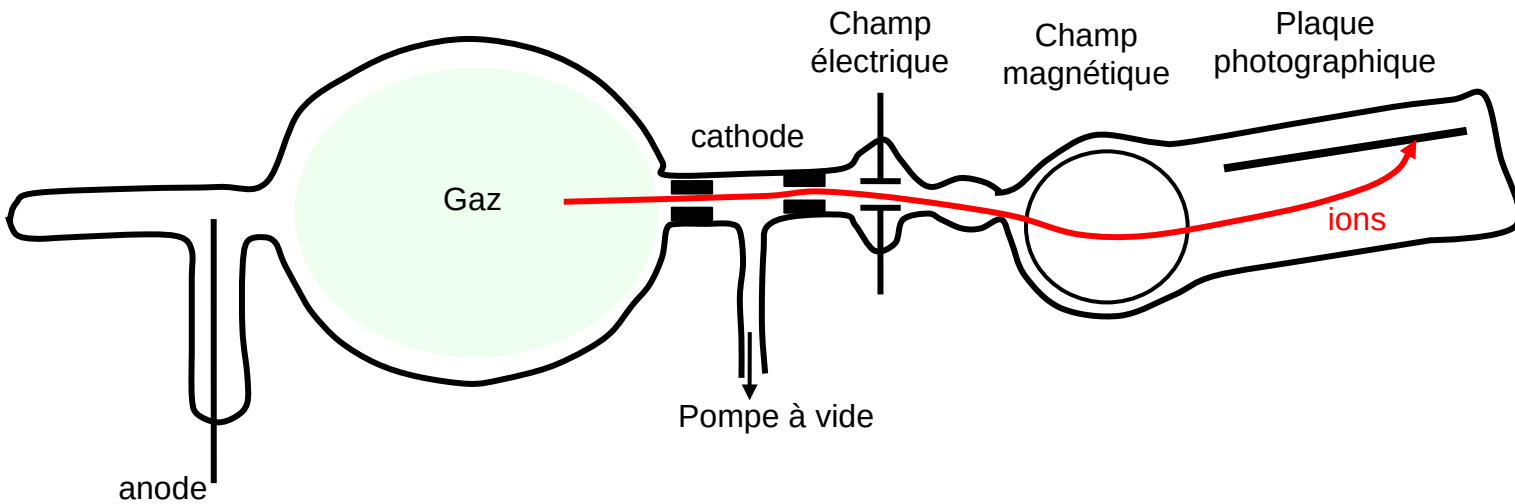
E. Rutherford suggère l'existence d'une paire  $e^-p$  qui aurait toutes les caractéristiques d'une particule neutre

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



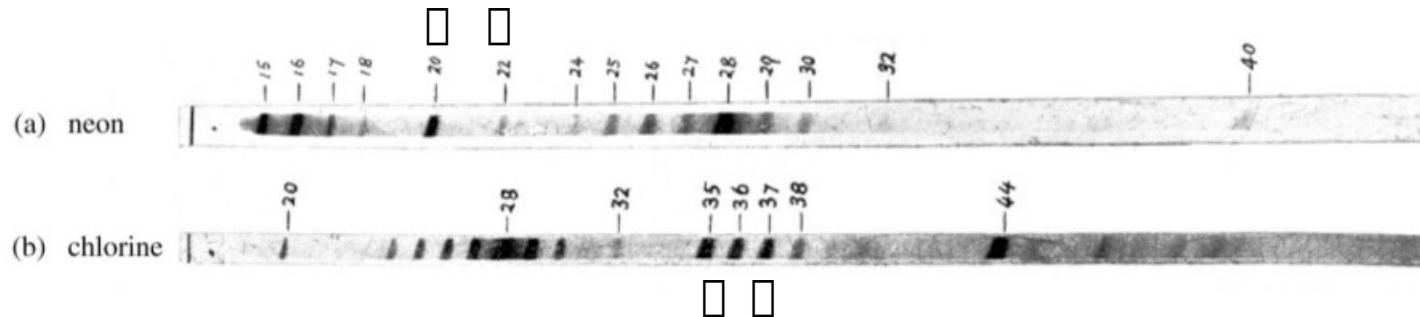
Cette information passe inaperçue du reste du monde, sauf à Cambridge au Cavendish Laboratory où E. Rutherford est nommé directeur...

# 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

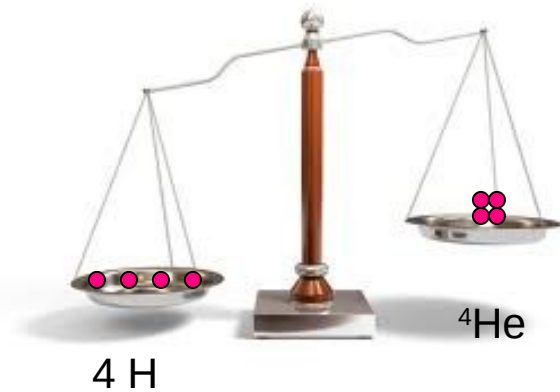


Il mesure des abondances isotopiques et observe que les masses relatives des isotopes ( $M(^{16}\text{O})=16$ ) sont des nombres entiers à l'exception de l'H (1.008)

# Excès de masse

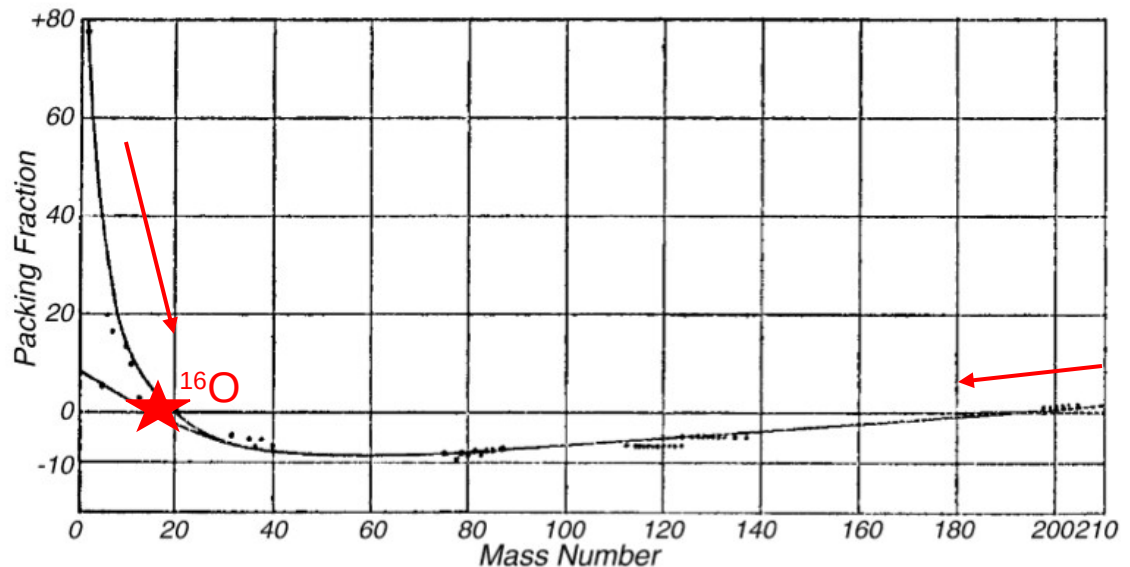
F. Aston propose que la masse est perdue pour former les noyaux

A. Eddington et J. Perrin suggèrent que la transformation d'H en He est la source de l'énergie du soleil

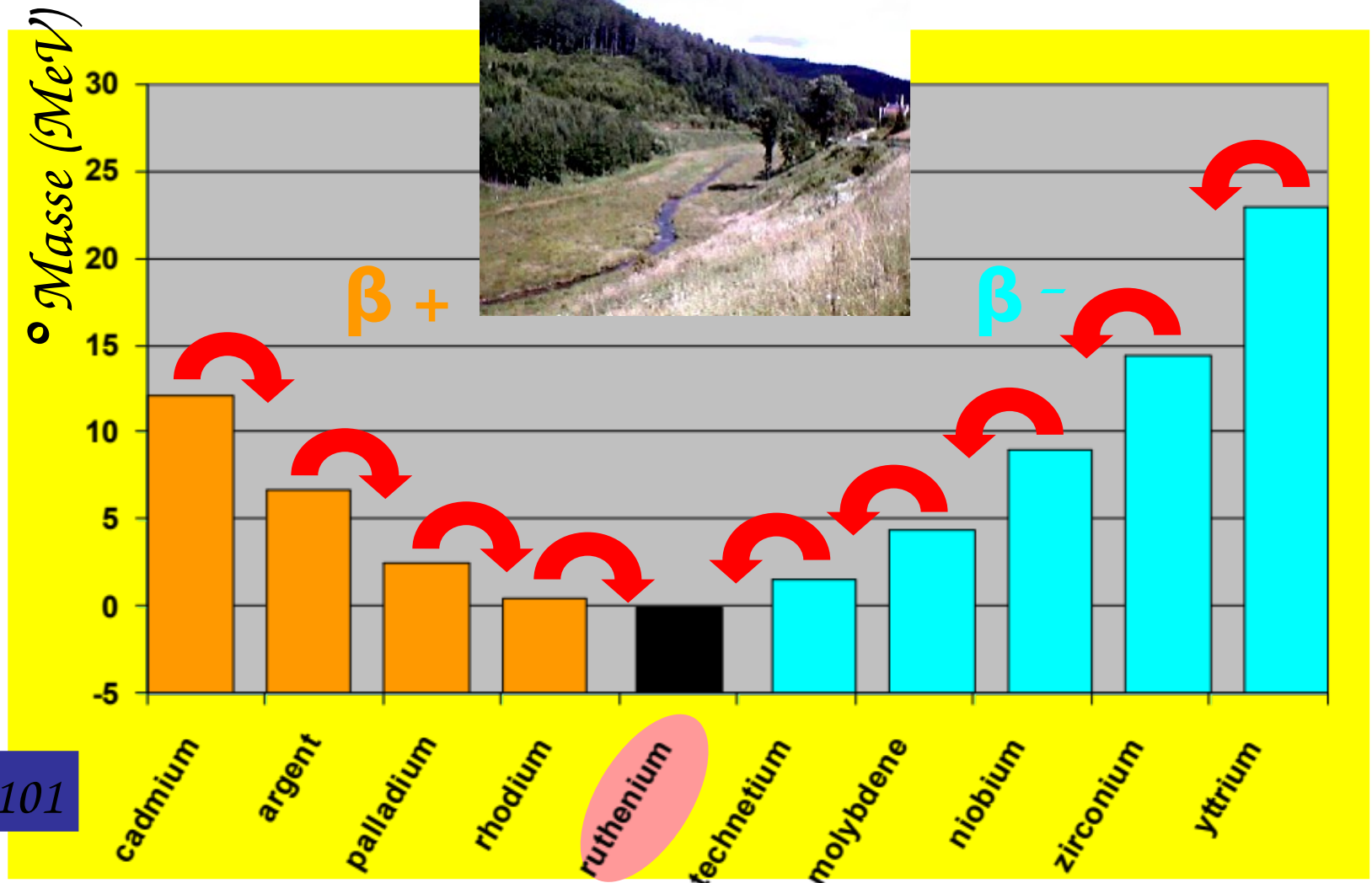


1927: Avec un spectromètre amélioré, il découvre que les masses relatives des ions plus lourds ne sont pas tout à fait des nombres entiers

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



# Vallée de Stabilité



protons 48

44

39

neutrons 53

57

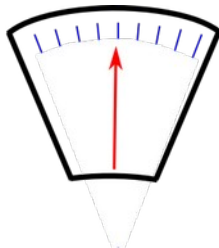
62

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

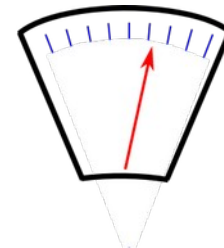
Précision  $\sim 1/10^8$



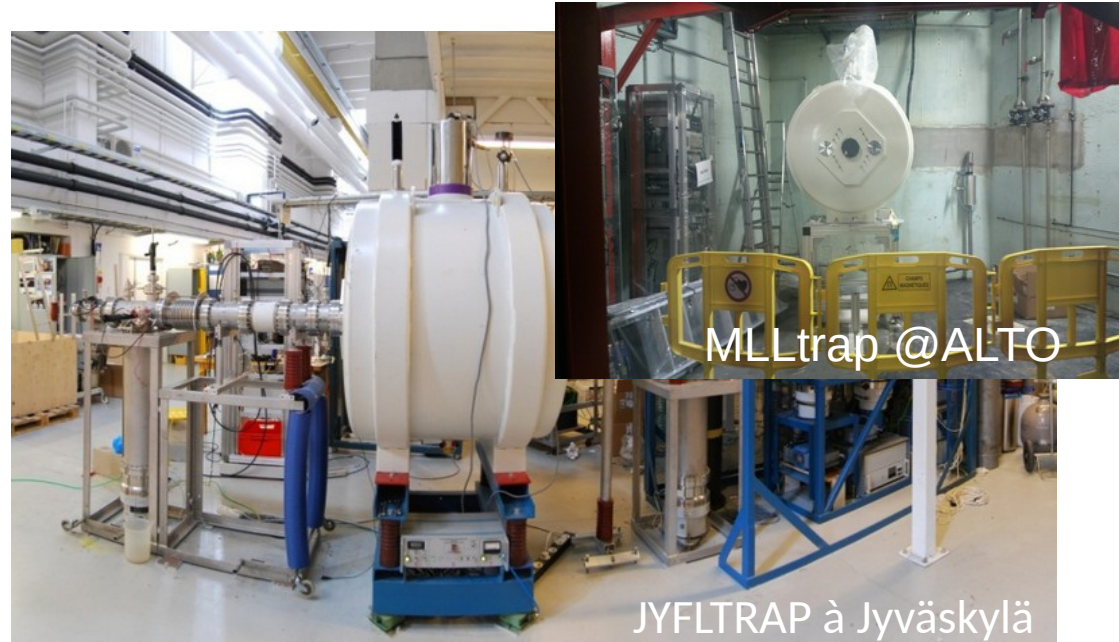
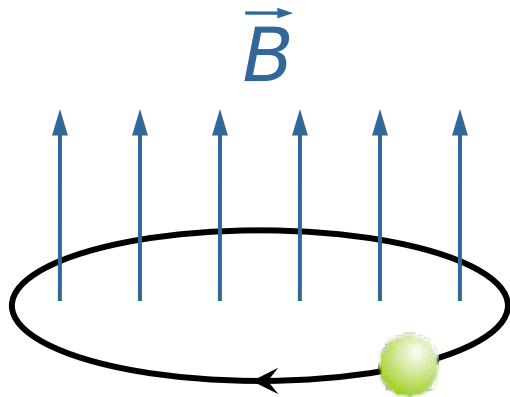
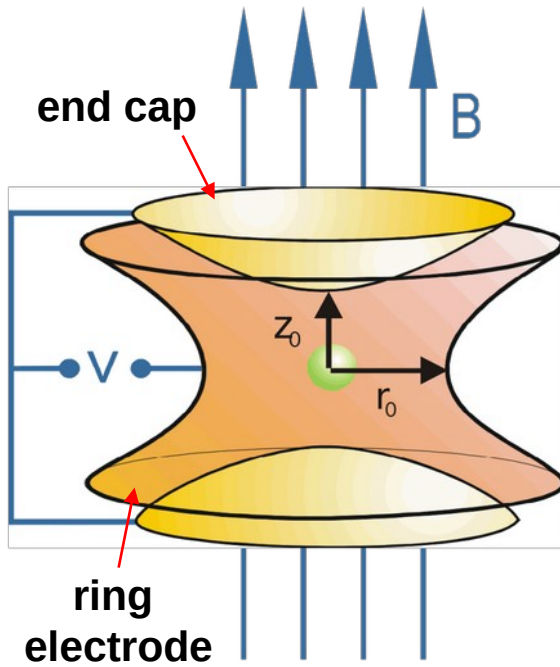
Airbus A380-800F:  
252.2 tonnes (à vide)



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



# Mesure de masses par piègeage



## piège de PENNING

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

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

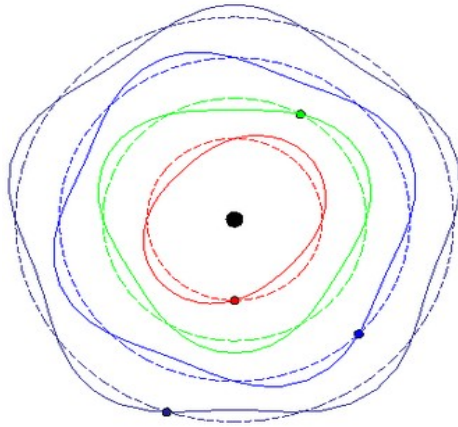
$$f_c(^{133}\text{Cs}^+)/f_c(^{255}\text{Lr}^{2+}) = 0.95969174(6)$$

# Mécanique Quantique et Fonction d'Onde

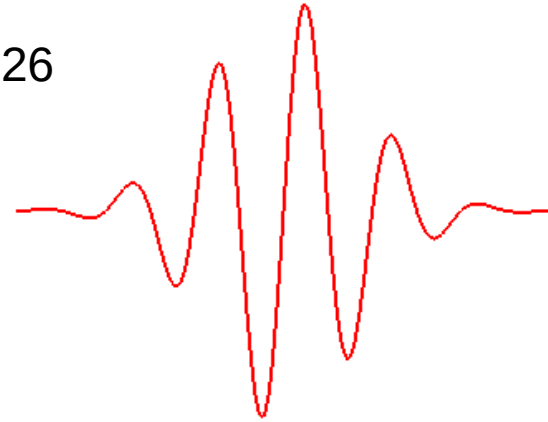
1924



L. de Broglie



1926

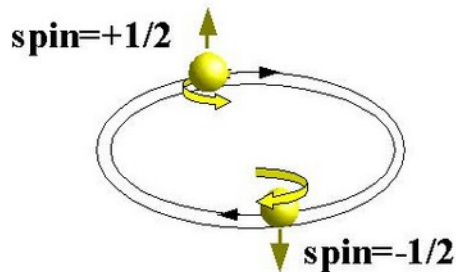


E. Schrödinger

1924-1925



W. Pauli



M. Born

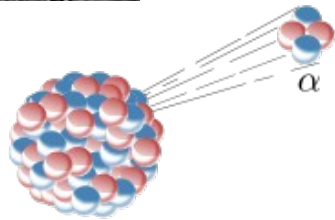


W. Heisenberg

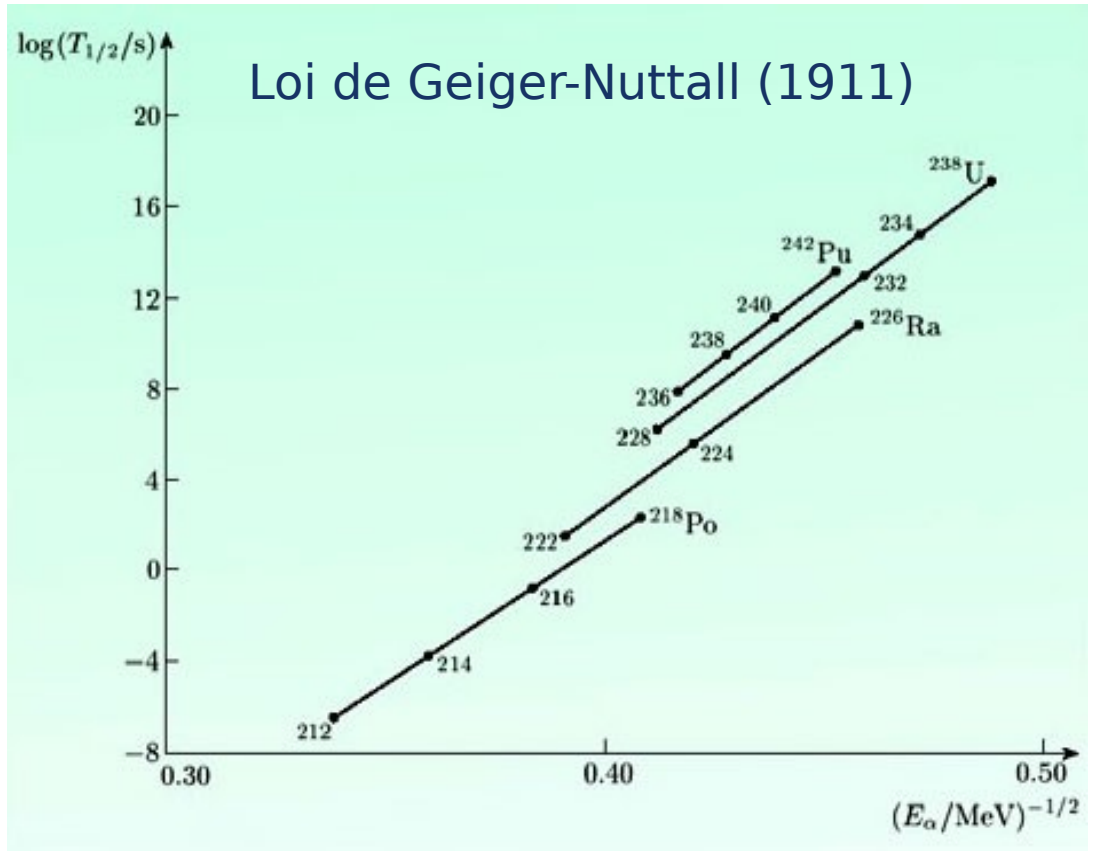
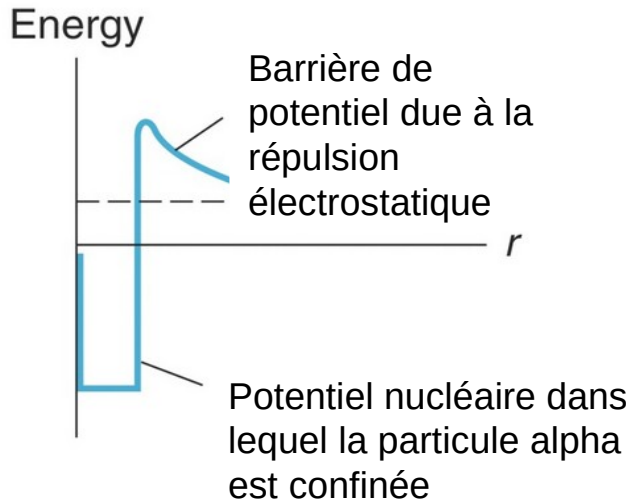
# La radioactivité expliquée

1928:

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



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





# L'Antimatière

Relativité Restreinte

Mécanique Quantique

électron relativiste



**1928 : Equation de Dirac**


L'équation de Dirac a 2 solutions !

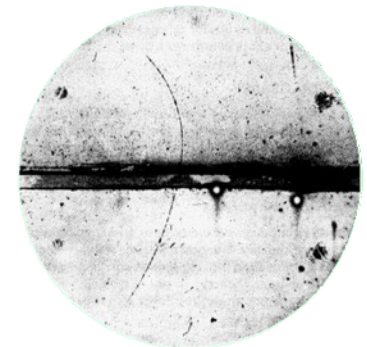
l'électron  
????

1931: P. Dirac invente l'anti-électron

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

$e^-$   
  
électron

$e^+$   
  
anti-électron

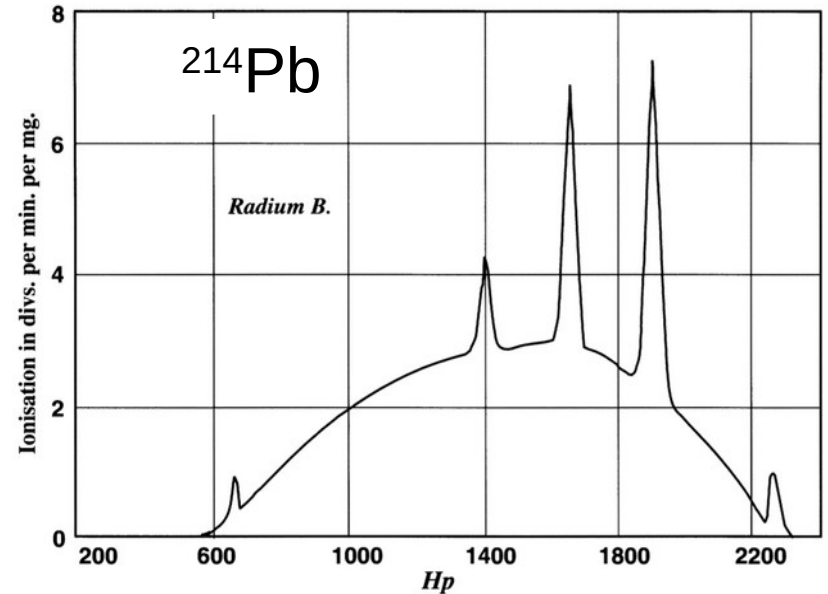


# Radioactivité et l'hypothèse du neutrino

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 ?



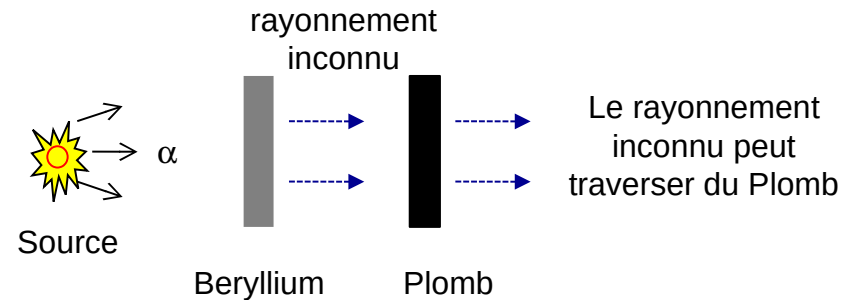
Chadwick à Rutherford: “Je ne trouve pas l'ombre d'une raie. Il y probablement une erreur stupide quelque part...!”

1930: W. Pauli suggère l'existence d'une nouvelle particule neutre de masse  $\sim 0$  qu'il appelle 'neutronen' et qui partagerait l'énergie de désintégration avec l'e<sup>-</sup>

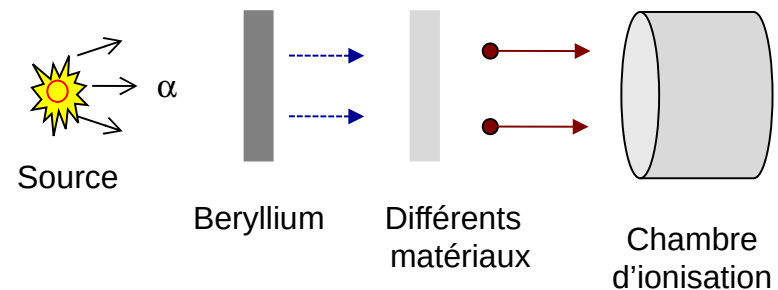
# Découverte du neutron

1930-32

W. Bothe & H. Becker  
découvrent une étrange  
réaction



James  
Chadwick



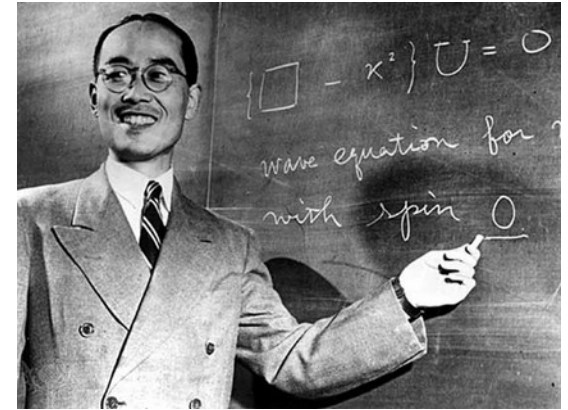
J. Chadwick démontre que le rayonnement correspond à une  
particule de masse  $\sim 1$ : le neutron

# 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

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

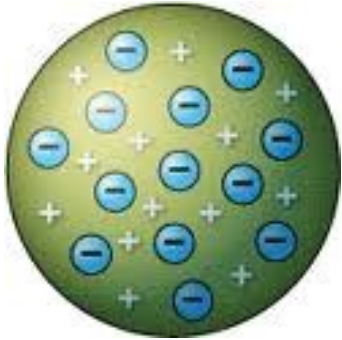
Le méson doit parcourir la distance entre un proton et un neutron ( $\sim 1$  fm) en  $\Delta t$

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

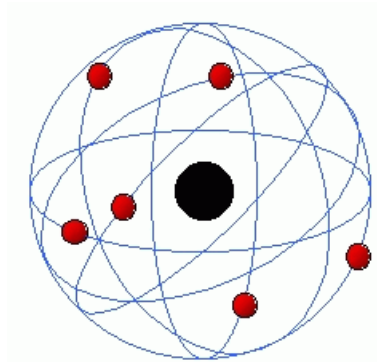
On découvre le méson en 1947 avec une masse de  $\sim 140$  MeV

# Le noyau au complet

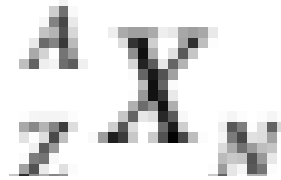
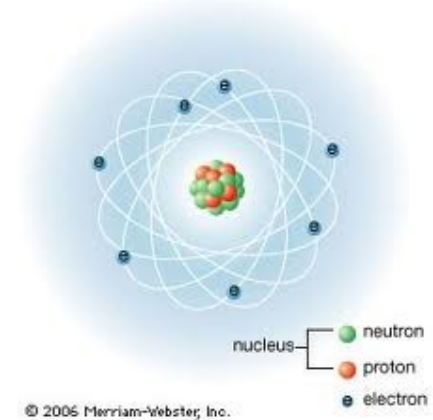
1898



1911



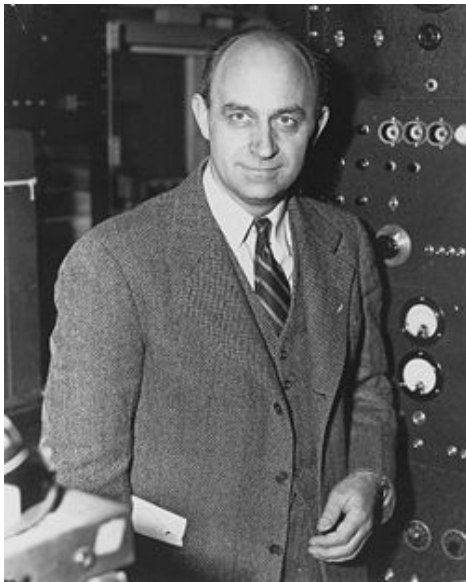
1932



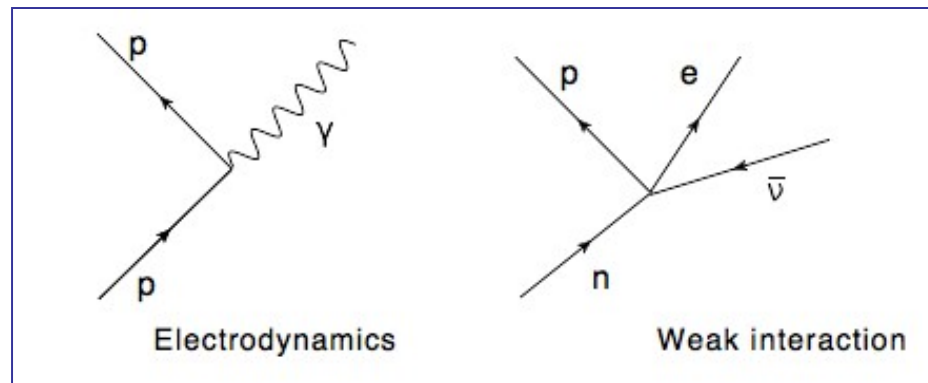
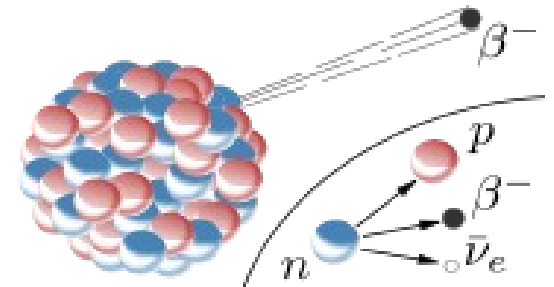
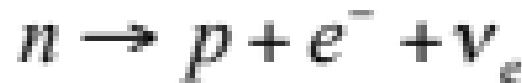
La présence des neutrons dans le noyau explique l'isotopie et résout certains problèmes de spin, moment magnétique et confinement des e<sup>-</sup>

# Origine des $e^-$ de la radioactivité ?

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



*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"

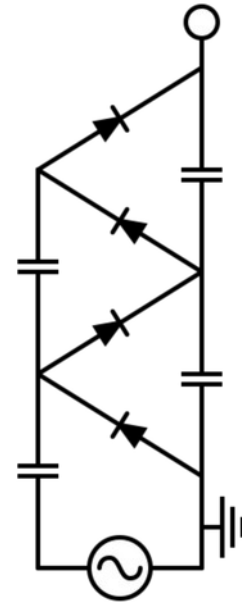
# Des accélérateurs pour sonder le noyau



*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



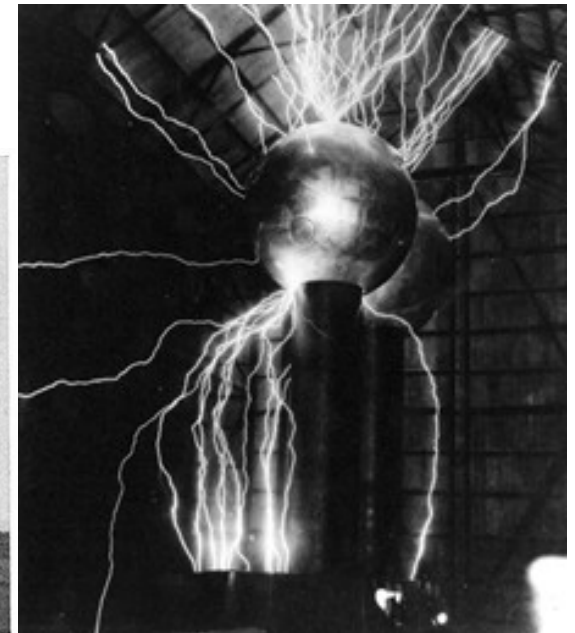
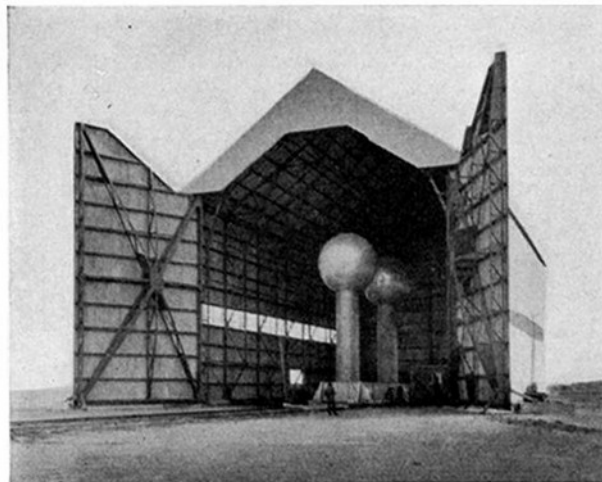
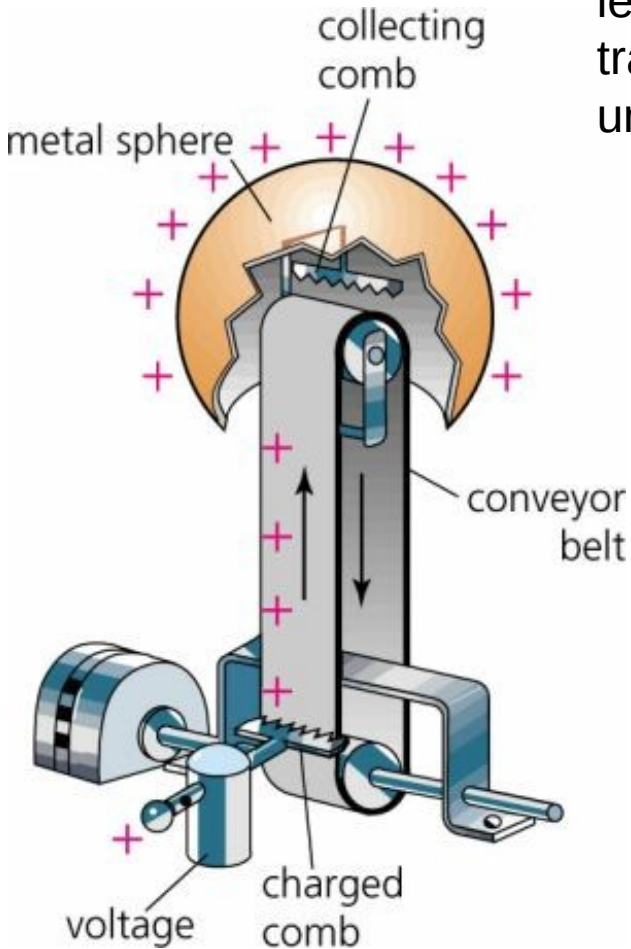
L'énergie des 2 particules alpha est mesurée: **~17 000 keV**

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

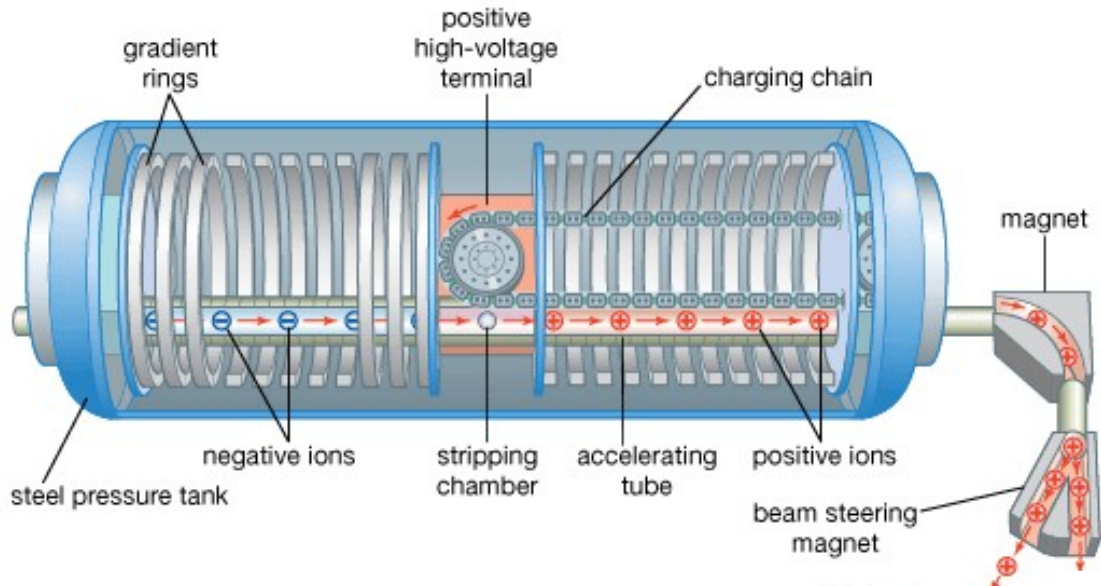


# Générateur de Van de Graaff

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



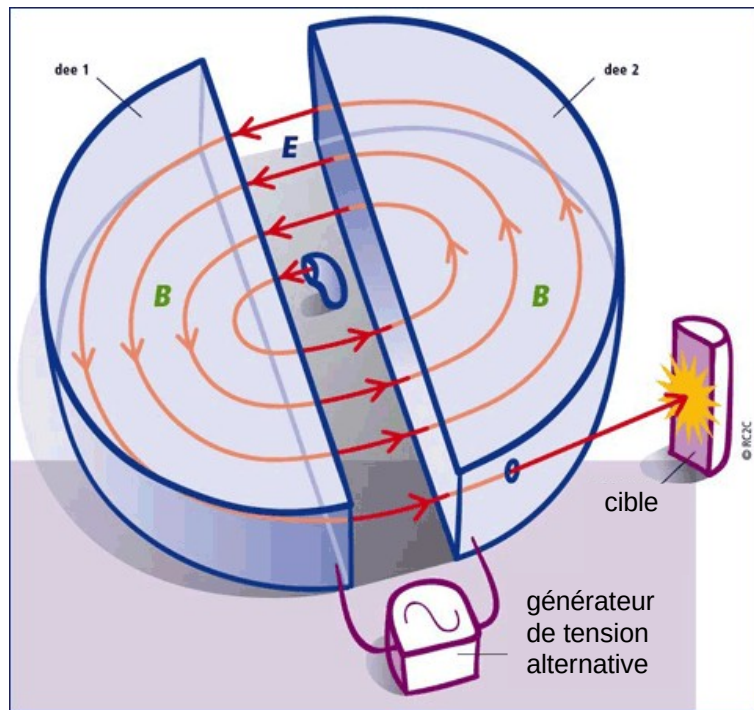
# Tandem d'IJCLab



© 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  $80\text{ keV}$

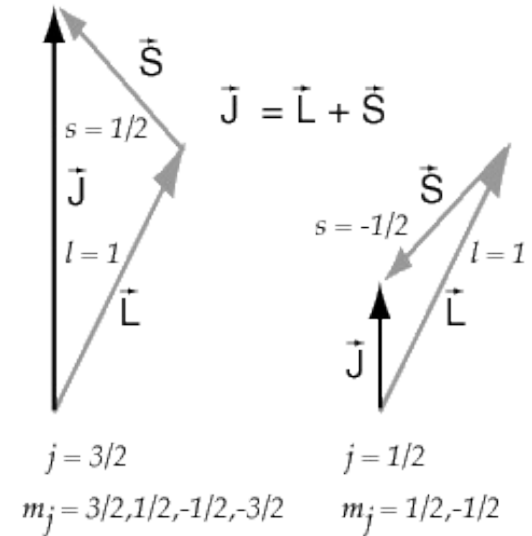
2ème cyclotron en 1932,  $V=1.8\text{KV}$ ,  $d\sim 27\text{ cm}$   
accélération de protons jusqu'à  $1\text{ MeV}$

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

Fin de la 2<sup>ème</sup> 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:

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

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

parité +ve

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

parité -ve

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