



De découverte en découverte,
de fil en aiguille:
100 ans d'étude du noyau atomique

A. Lopez-Martens

CSNSM

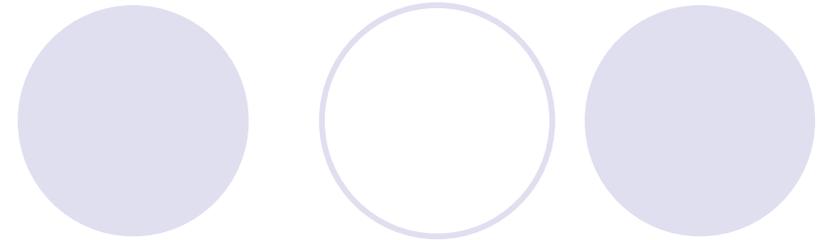
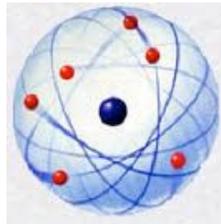


Comprendre le monde,
construire l'avenir®

Il y a 100 ans.....

“ The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom ”

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



Le prix Nobel de Chimie 1911 est attribué à Marie Curie

“ en reconnaissance des services pour l'avancement de la chimie par la découverte de nouveaux éléments : le radium et le polonium, par l'étude de leur nature et de leurs composés ”



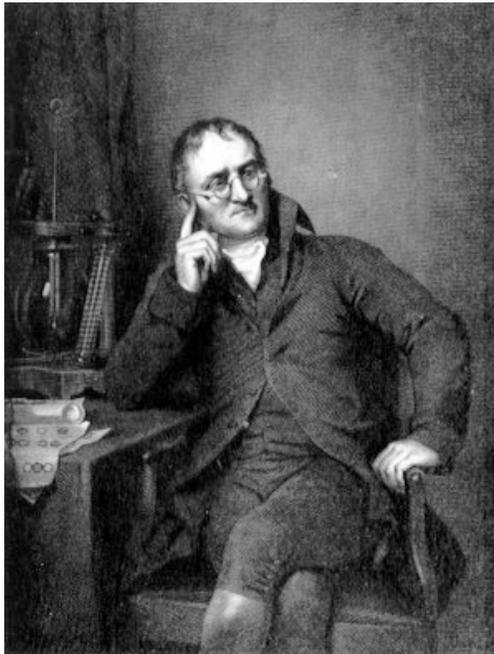
A l'aube du 20^{ème} siècle



“Désormais, il n’y a plus rien de nouveau à découvrir en physique. Ce qui reste à faire, ce sont des mesures de plus en plus précises.”

William Thomson (Lord Kelvin), 1900
British Association for the advancement of Science

Composition de la matière



John Dalton

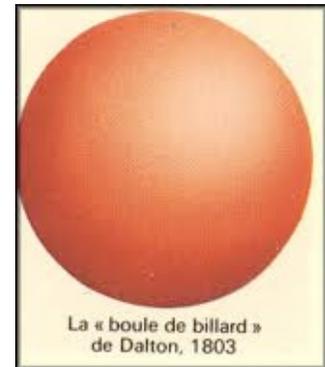
1803 :

-La matière est faite de d'**atomes**
(du grec ατομος = indivisible)

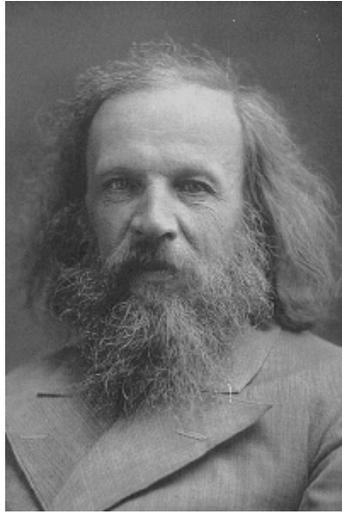
-Les atomes d'un même élément
sont identiques

-Les atomes d'un élément peuvent se combiner à
ceux d'un autre pour former un composé chimique

-Les atomes d'éléments différents ont des masses
différentes



Classification des éléments



Dmitri Ivanovich
Mendeleev

Périodicité des propriétés chimiques des éléments

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

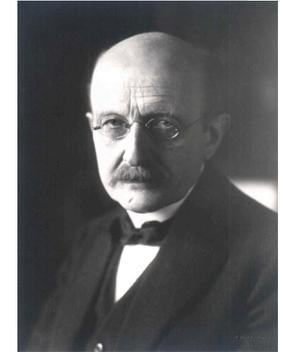
ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180.			
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182.			
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186.			
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,1.			
			Fe = 56	Rn = 104,4	Ir = 198.			
			Ni = Co = 59	Pi = 106,6	O = 199.			
			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200.			
H = 1			Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112		
			B = 11	Al = 27,9	Ga? = 68	Ur = 116	Au = 197?	
			C = 12	Si = 28	Ge? = 70	Sn = 118		
			N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?	
			O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?		
			F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	I = 127		
			Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204.
					Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207.
					Sc? = 45	Ce = 92		
					?Er = 56	La = 94		
					?Yt = 60	Di = 95		
					?In = 75,6	Th = 118?		

L'emplacement dans le tableau est donné par **Z** (= numéro atomique, de AtomZahl)

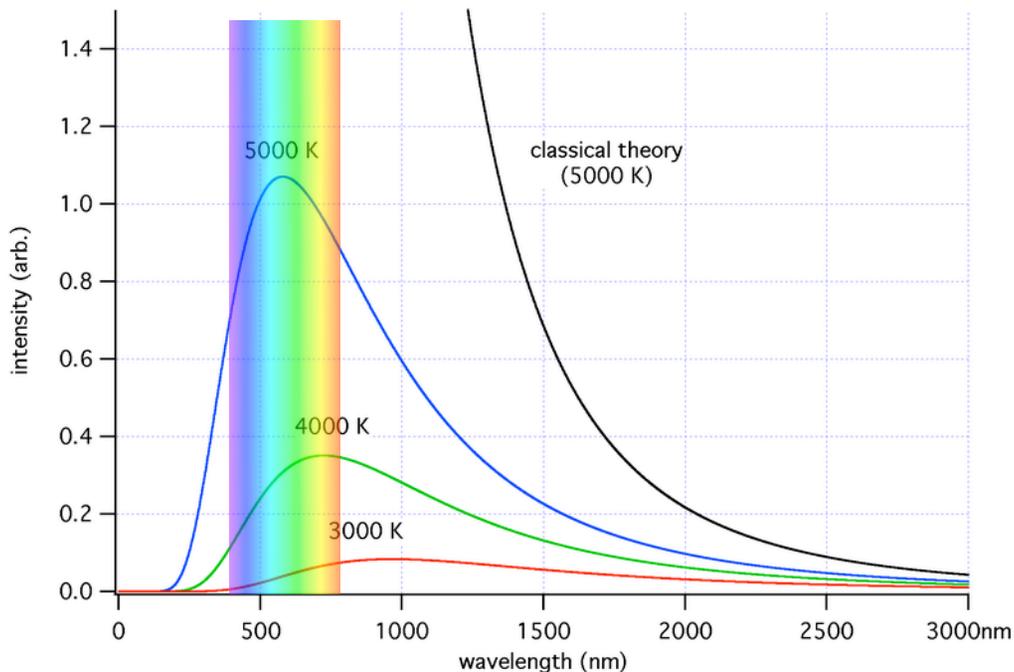
Д. Менделѣевъ (1869)

Quelques nuages dans le ciel de la physique théorique.....

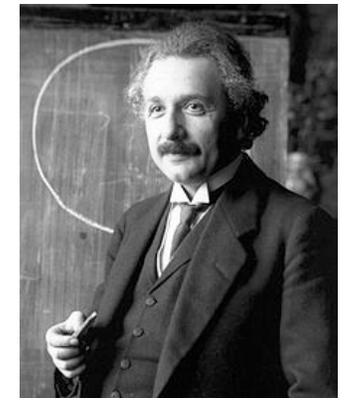


Max Planck

La catastrophe ultraviolette: Répartition spectrale du rayonnement thermique des corps



La matière ne peut absorber ou émettre d'énergie lumineuse que par paquets finis proportionnels à la fréquence de la lumière, les **quanta** d'énergie

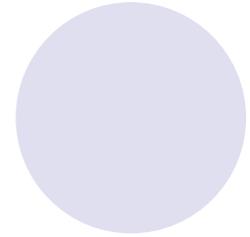
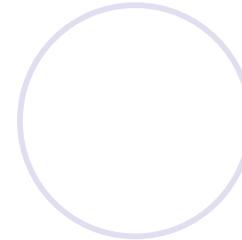
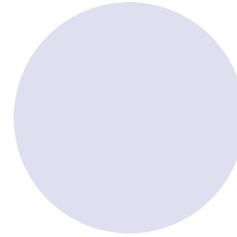


Albert Einstein

Selon A. Einstein la discontinuité de Planck provient de la structure granulaire de la lumière: la lumière est composée de **photons**

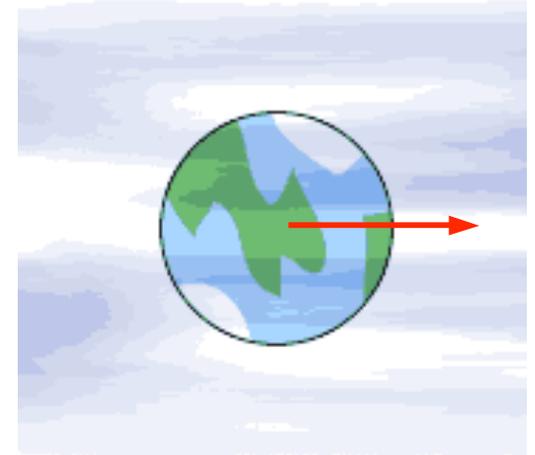


L'éther



La lumière doit se propager dans un milieu: l'éther
La vitesse de la lumière c obtenue à partir des équations de Maxwell est celle mesurée par rapport à l'éther

⇒ tout objet en mouvement par rapport à l'éther doit donc mesurer une vitesse de la lumière différente

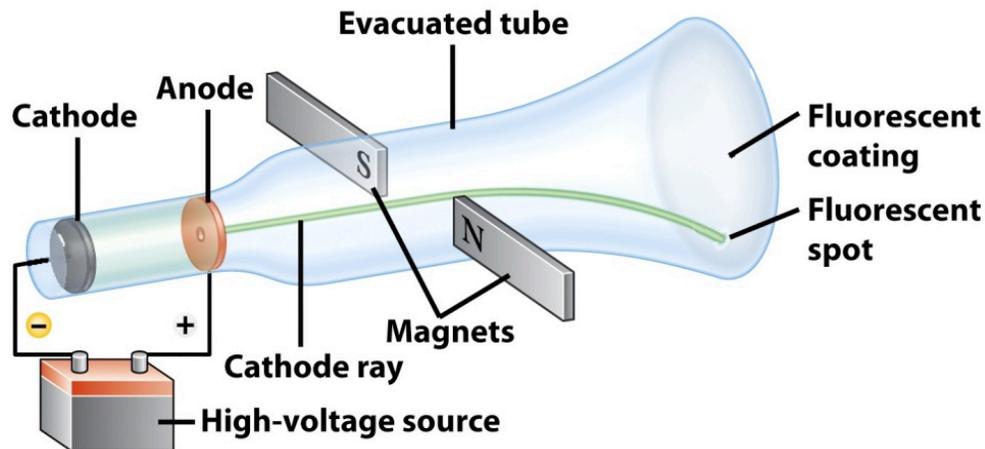
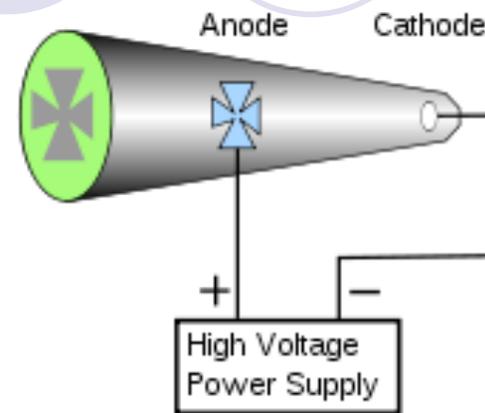


1887: échec de l'expérience d'interférométrie de Michelson-Morley

A. Einstein réconcilie la mécanique de I. Newton avec l'électromagnétisme de J.C. Maxwell en énonçant la théorie de la relativité restreinte

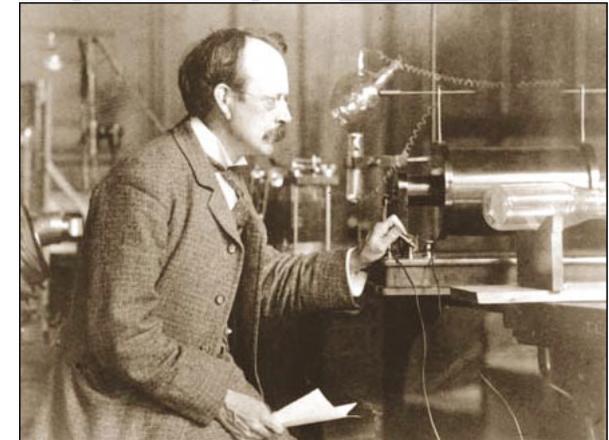
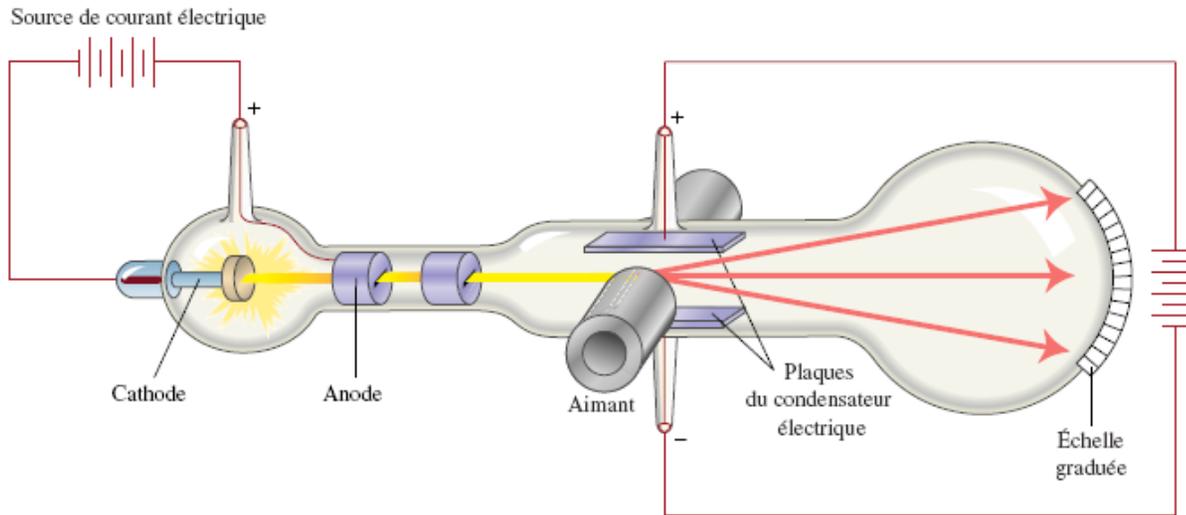
$$E = mc^2$$

La révolution du tube cathodique



1895: Jean Perrin démontre que les rayons cathodiques sont des particules chargées négativement

Les corpuscules

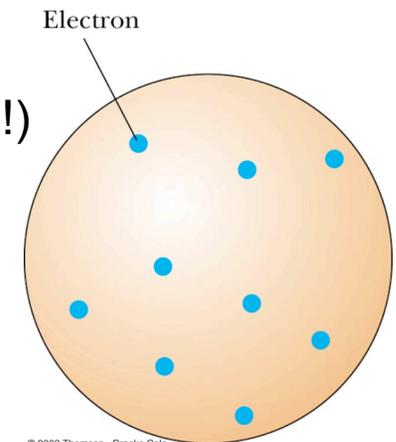


John Joseph Thomson

J.J. Thomson mesure le rapport charge/masse des particules composant les rayons cathodiques

1898: J.J. Thomson en conclut que les 'corpuscules' (= électrons) sont les constituants des atomes (qui ne sont donc pas indivisibles !)

Modèle 'plum pudding'



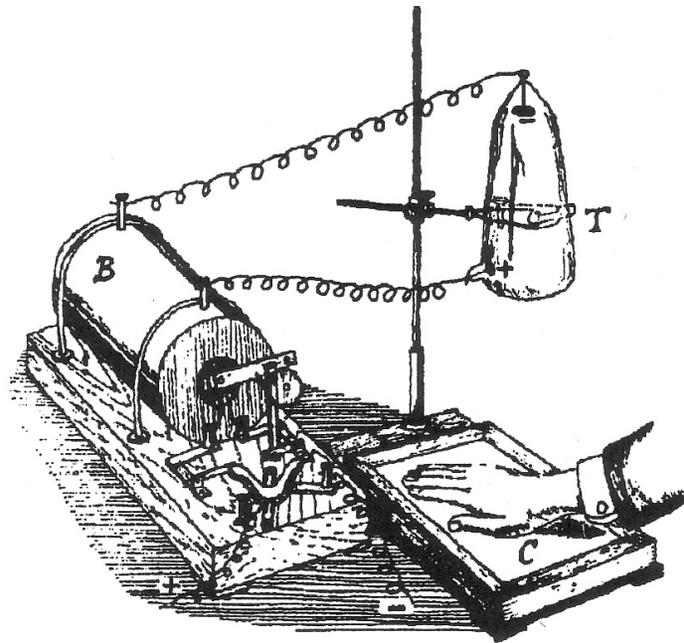
Des rayons cathodiques aux rayons X

1895 W. Röntgen

découverte des rayons X



Wilhelm Röntgen



W. Röntgen reçoit le 1^{er} prix Nobel de Physique en 1901



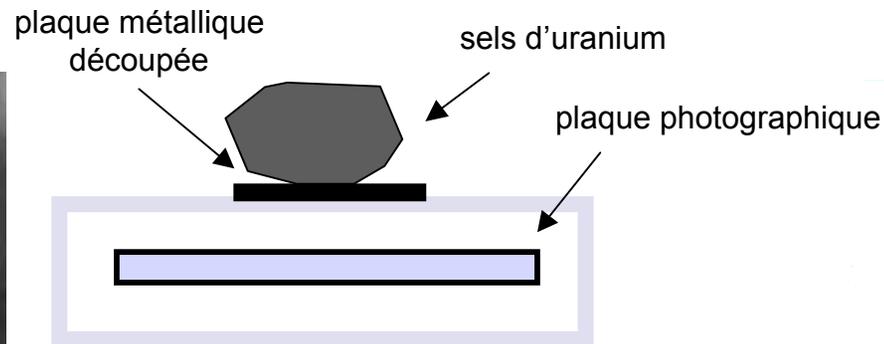
Des rayons X aux rayons uraniques

1896 H. Becquerel

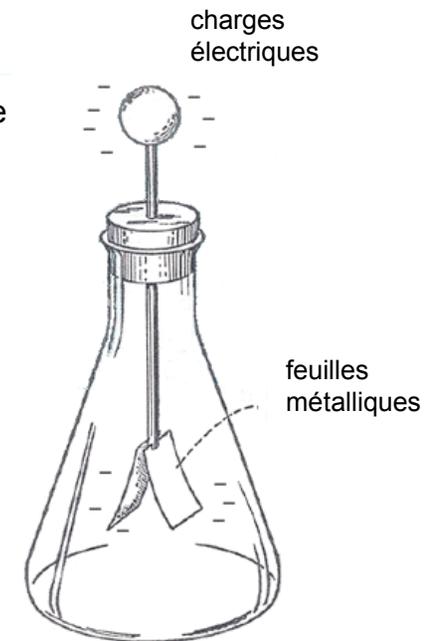
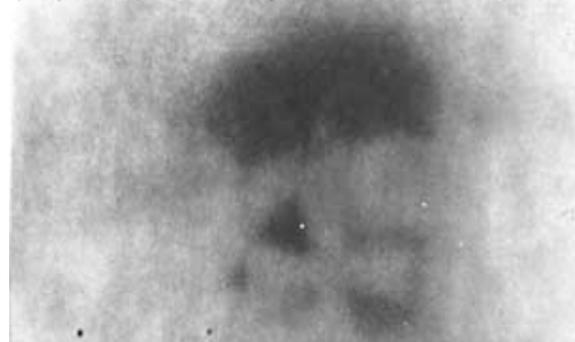
découverte d'un nouveau rayonnement émis par l'Uranium



Henri Becquerel



*40 - 1700 - 96. Sulfate double d'uranyle et de Potasse...
Papier noir. Couvré de l'uranium...
Exposé au soleil le 27. et dans le noir depuis le 28. -
Ninetyfour' le 1er mars.*



Les rayons uraniques ionisent l'air et provoquent la décharge d'un électroscope

Des rayons uraniques à la radioactivité

1898 Marie & Pierre Curie



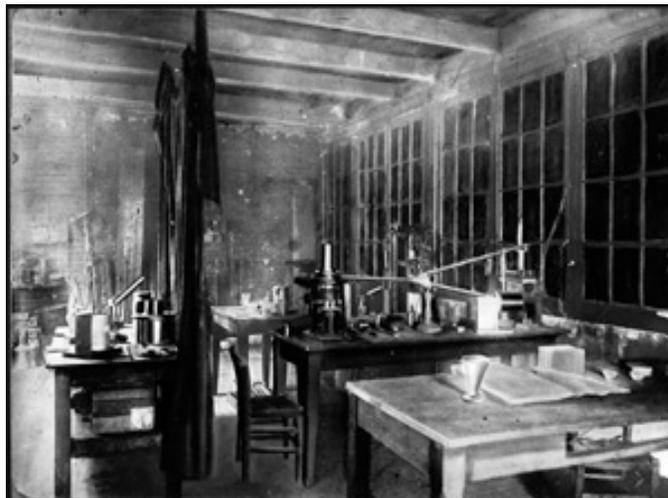
Marie Curie



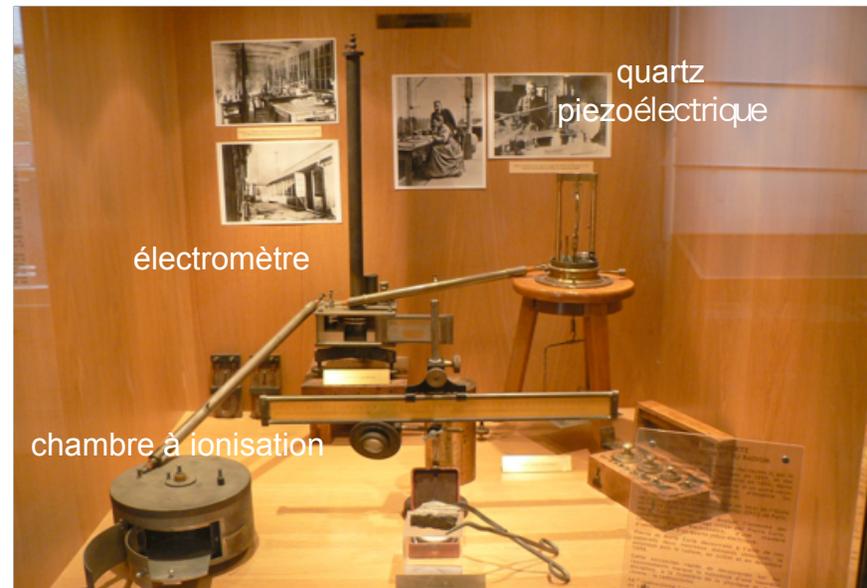
Pierre Curie

extraction du polonium (dans la fraction de Bismuth) et du radium (fraction du Baryum)

M. Curie appelle le rayonnement:
'radioactivité'



Laboratoire à l'Ecole de Physique et Chimie industrielle de Paris



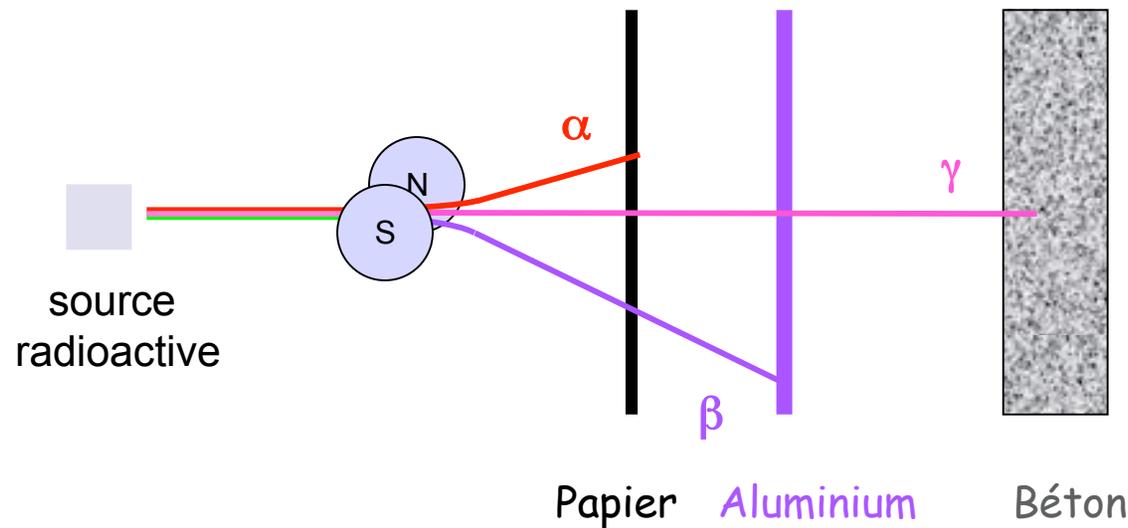
La radioactivité est multiple

1898 E. Rutherford

rayonnement alpha, beta

1900 P. Villard

rayonnement gamma



α = ion d'hélium He^{2+}

β = e^- de grande énergie

γ = photons - comme les X



Ernest Rutherford

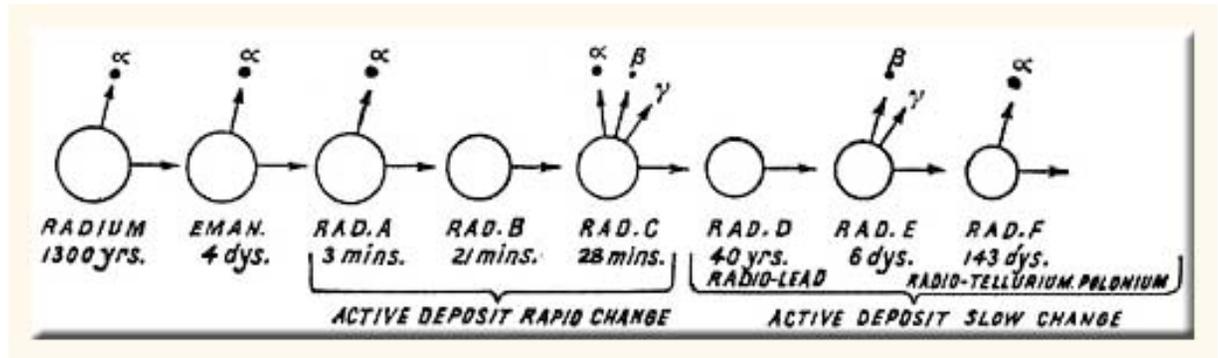
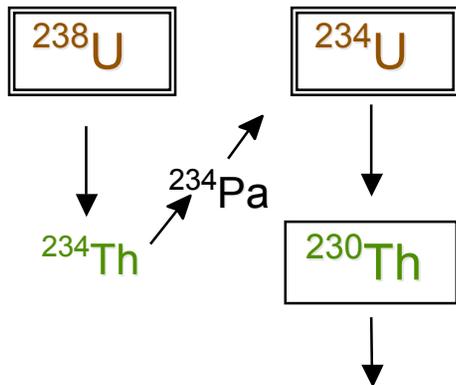


Paul Villard

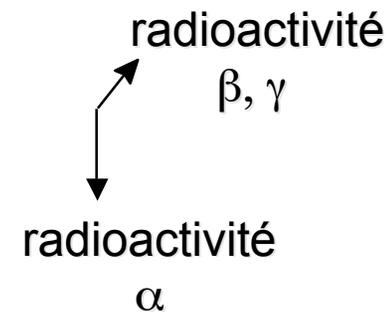
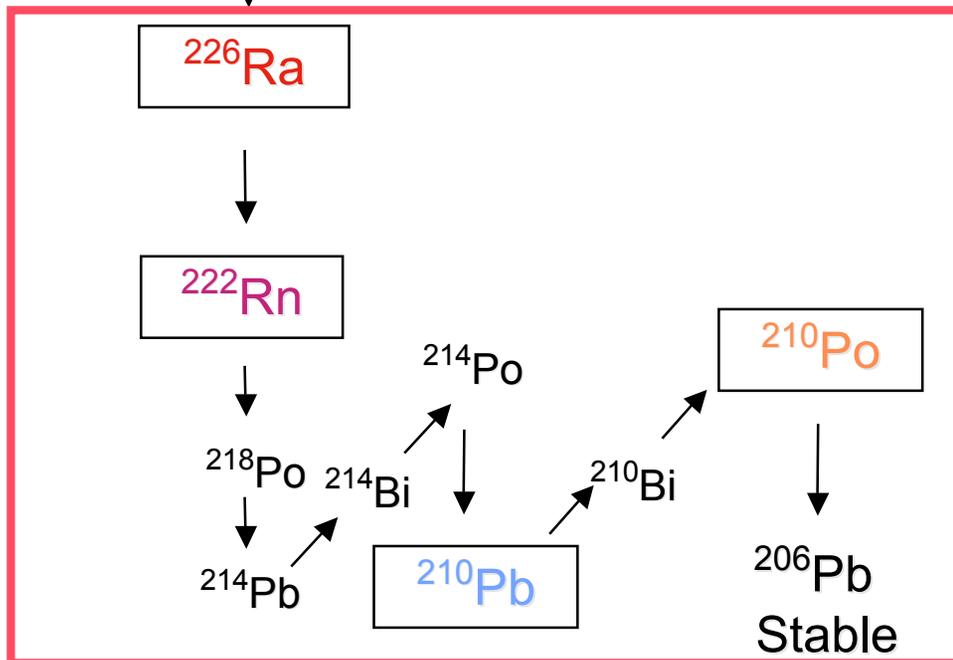
Les atomes se transforment !

1902 E. Rutherford & F. Soddy

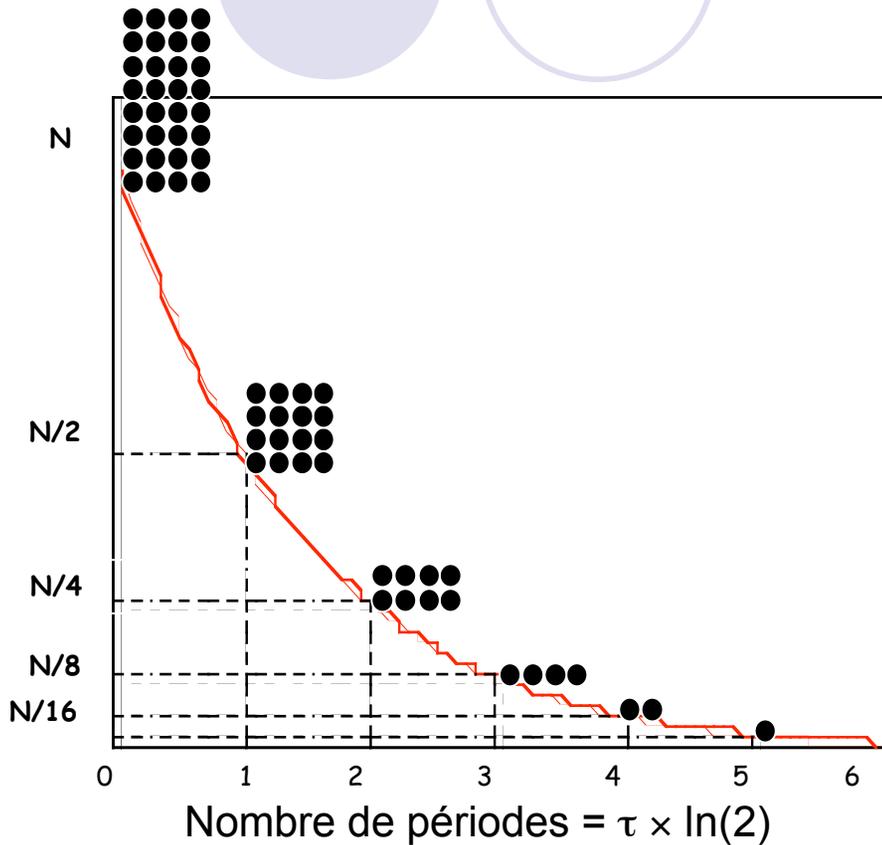
transmutation des atomes



Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1905



Décroissance radioactive



Nombre de
noyaux
au temps t

Nombre initial
de noyaux

Constante de
décroissance

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t)$$

$$Activité = \lambda N(t) = N(t) / \tau$$

Durée de vie

Quelques exemples d'activités :

Homme : 130 Bq/kg

Maison en granit: 4 milliards de Bq

Béton: 500 Bq/kg

Lait: 80 Bq/kg

Scintigraphie thyroïdienne: 37 millions de Bq

Combustible usé de réacteur: 10 milliards de
milliards de Bq

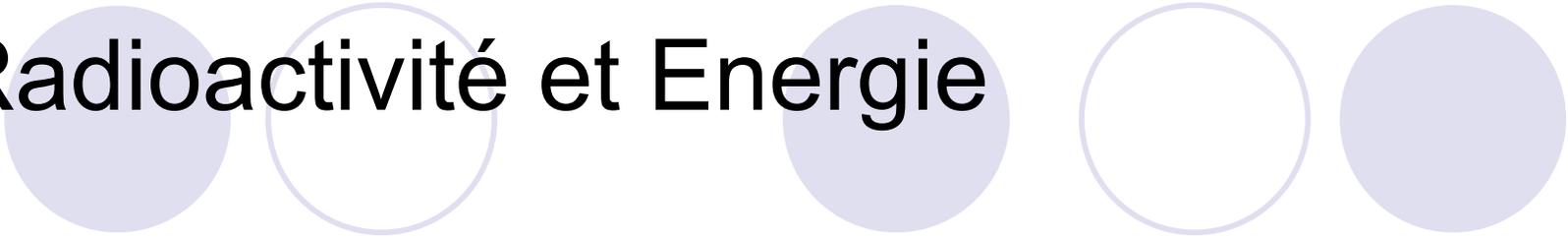
1910:

1 curie (Ci) = activité d'1g de Radium

1 Ci = 37 milliards de désintégrations/s

1 Bq = 1 désintégration/s

Radioactivité et Energie



1903: Pierre Curie et son collaborateur Albert Laborde annoncent que le radium dégage en permanence tant de chaleur qu'il peut faire fondre plus que son poids de glace en 1 heure.

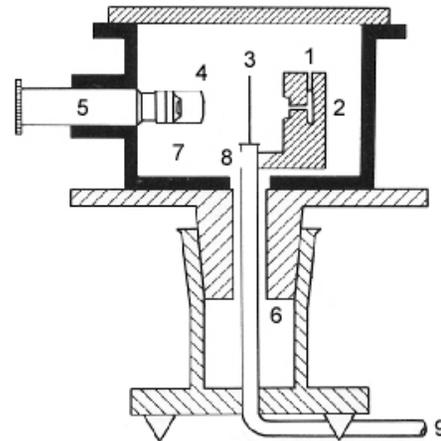
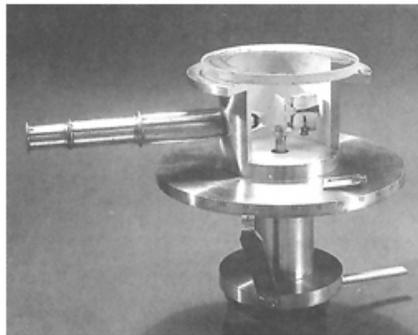
D'où vient l'énergie des rayonnements ?

« Il y a tout lieu de croire que les atomes des éléments radioactifs renferment une énorme quantité d'énergie latente... Si on parvenait à contrôler la vitesse à laquelle se désintègrent ces éléments, une petite quantité de matière libèrerait une masse colossale d'énergie. »

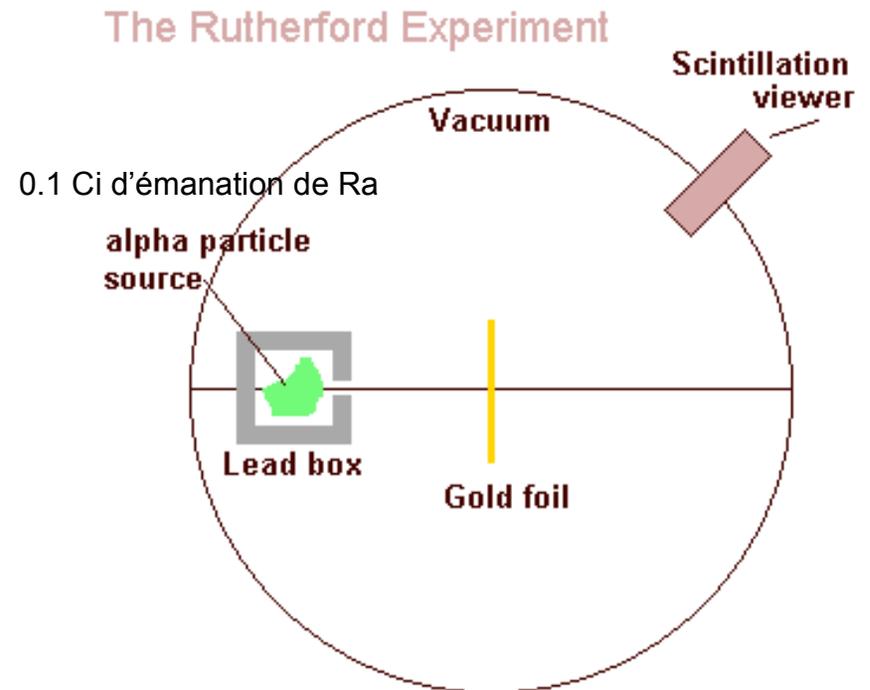
'Radioactivity', E. Rutherford, Ed. Cambridge at the University Press (1904)

1914: H.G. Wells publie "The world set free" ("La destruction libératrice")

La diffusion de particules alpha



Expérience réalisée par H. Geiger et E. Marsden
(1909, Université de Manchester)

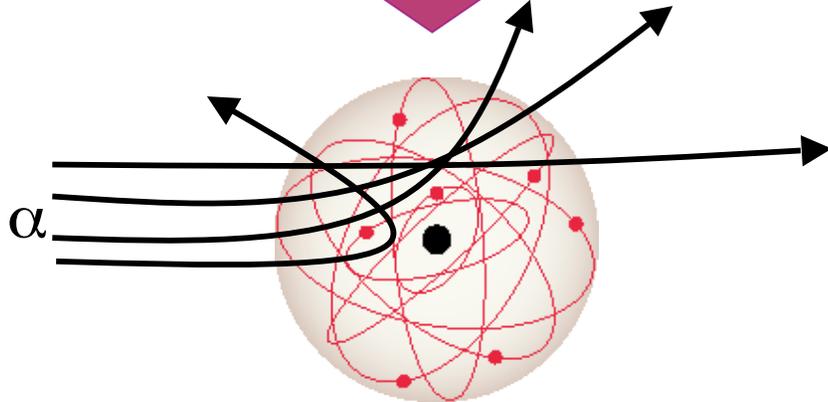
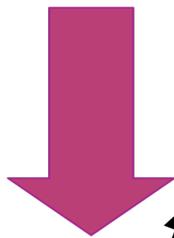
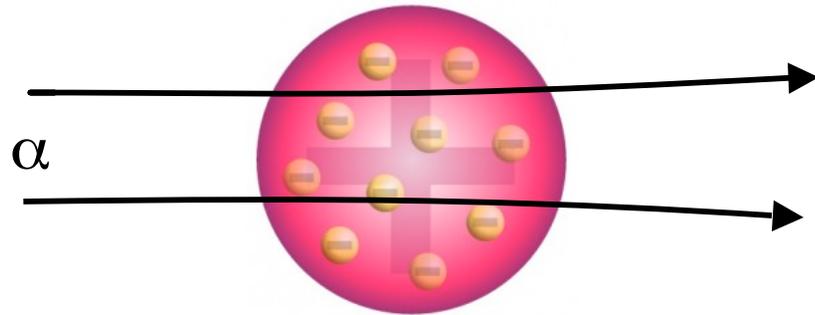


©1999 Science Joy Wagon

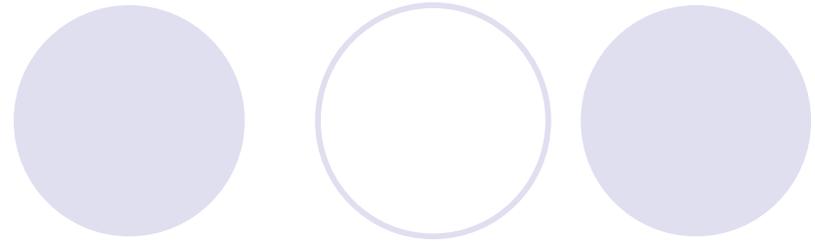
« C'est aussi peu croyable que si nous avons tiré un obus sur du papier de soie et que l'obus nous soit revenu en pleine figure ! »

Le noyau est né !

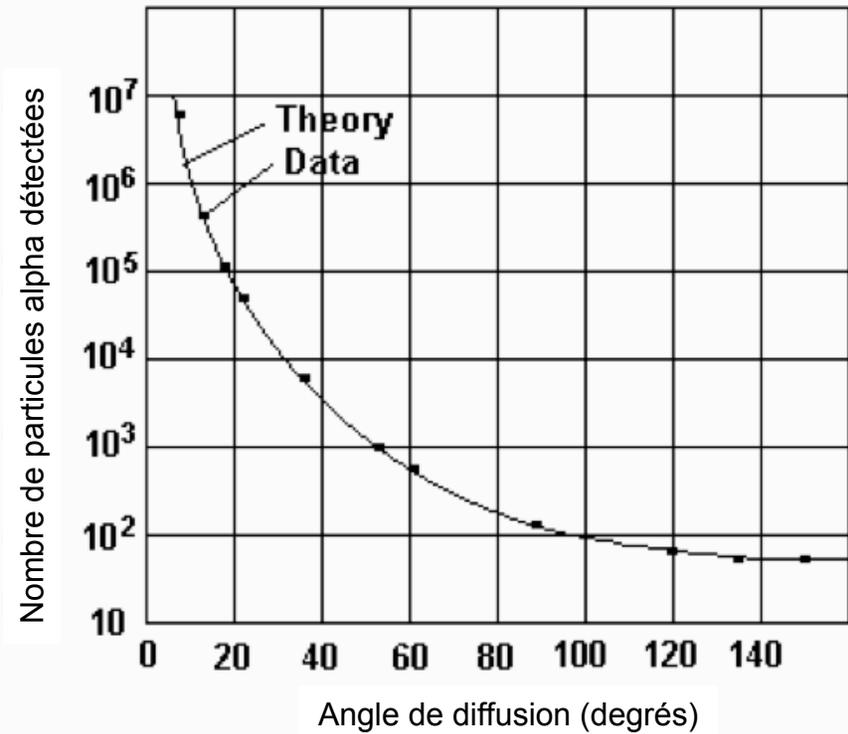
Modèle 'plum pudding'



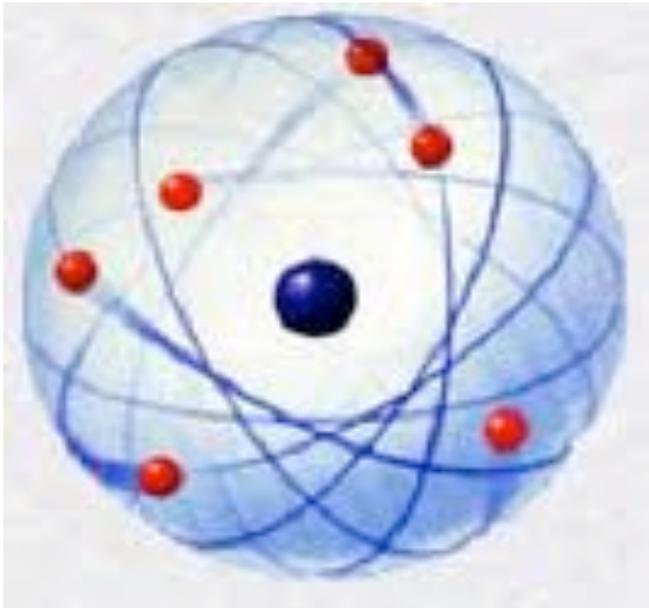
Modèle nucléaire



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



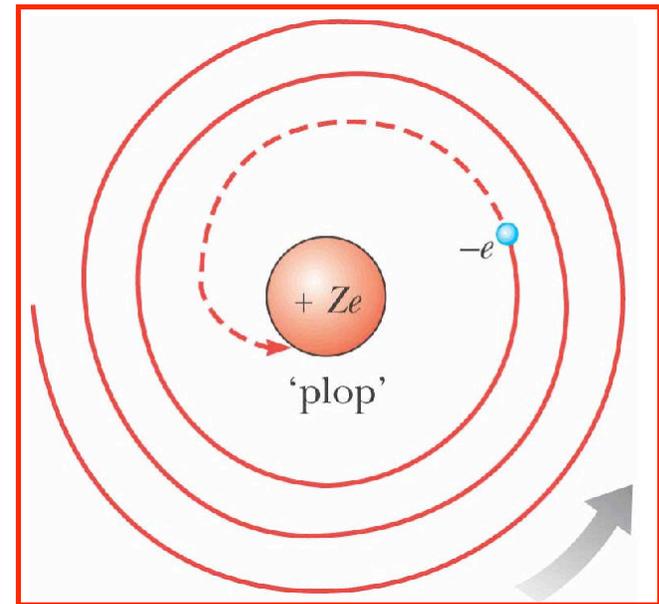
Conséquences du modèle de Rutherford



10^{-14} m

10^{-10} m

La matière est vide !



l'atome est instable !

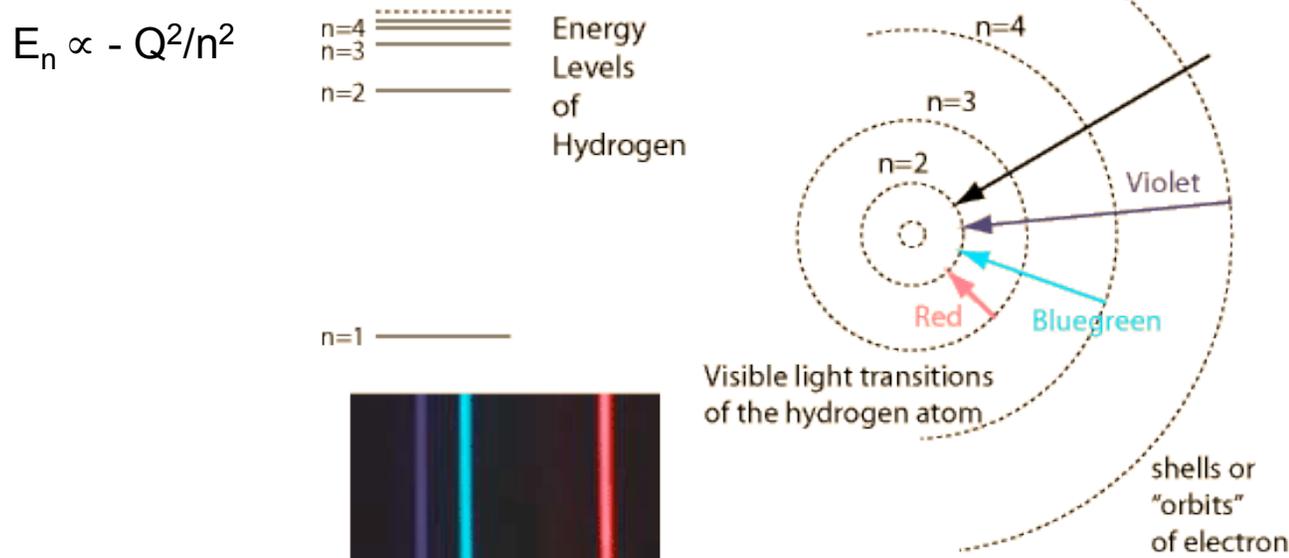
Bohr résout le problème avec les quantas de Planck

- 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

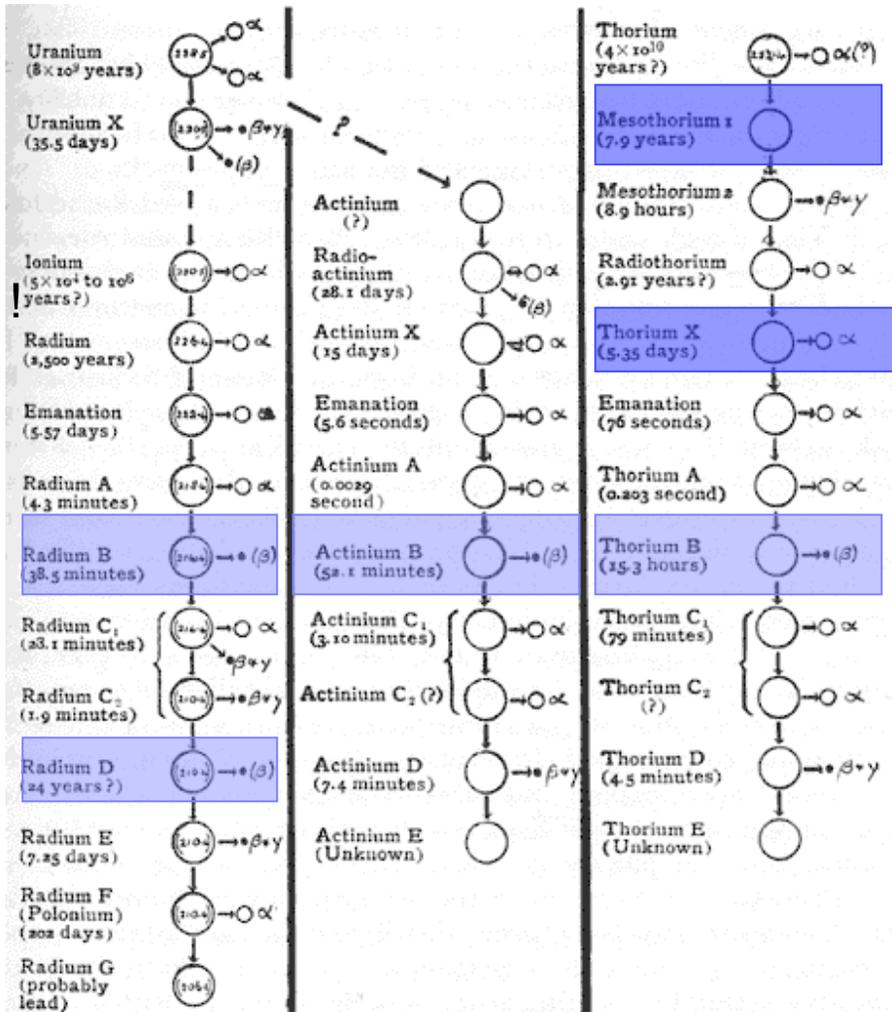
Philosophical Magazine 26, 1-25 (1913)



Niels Bohr



L'atome de Dalton mis à mal



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

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

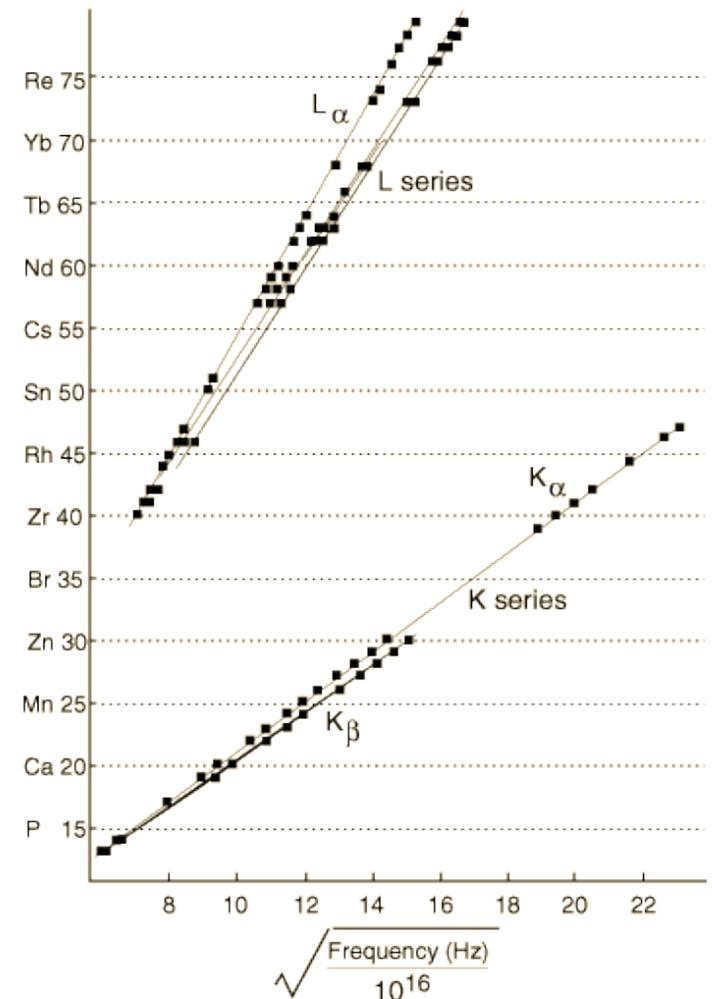
Concept d'isotope: éléments radioactifs ayant différentes masses atomiques mais les mêmes propriétés chimiques

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^{ème} siècle

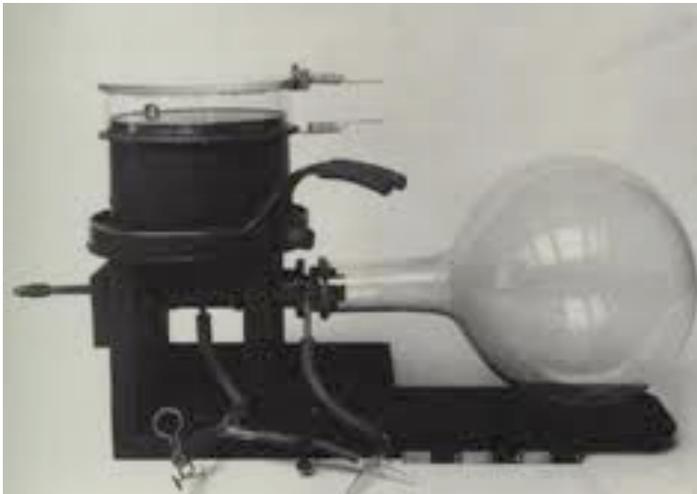
1919 E. Rutherford

1^{ère} transmutation en laboratoire

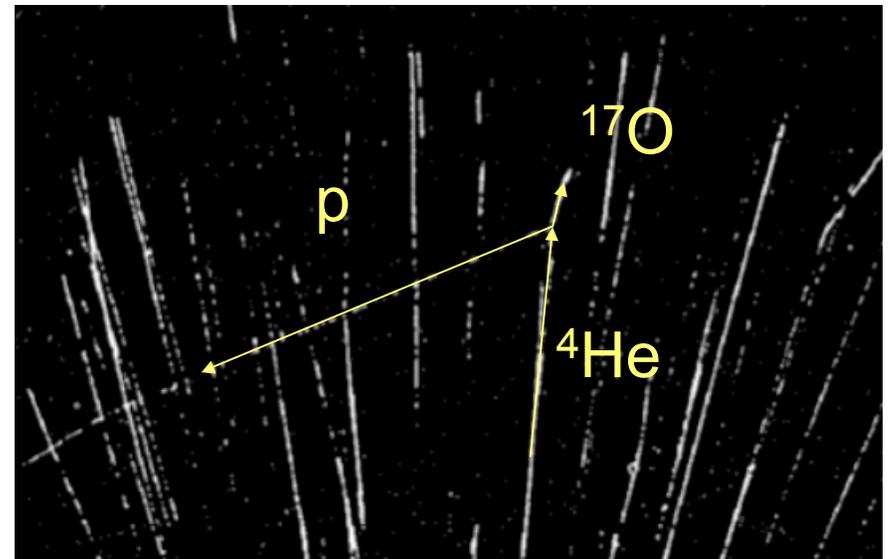


Rutherford appelle H^+ proton

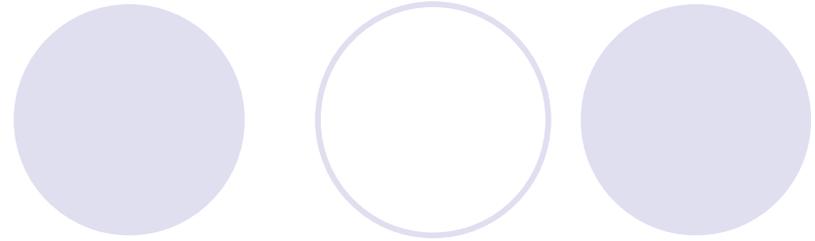
1924 P. Blackett visualise la transmutation



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



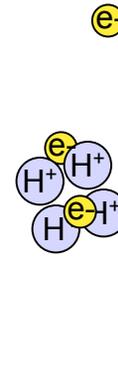
Structure du noyau



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

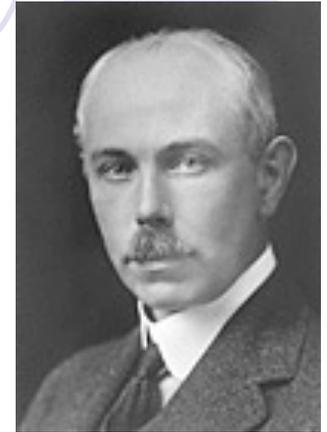
E. Rutherford suggère l'existence d'une paire e^-p qui aurait toutes les caractéristiques d'une particule neutre

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



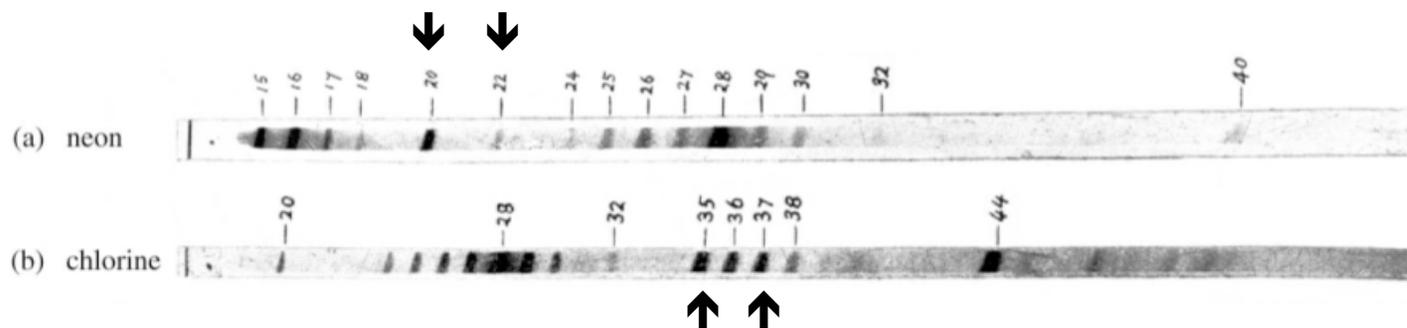
Cette information passe inaperçue du reste du monde, sauf à Cambridge au Cavendish Laboratory où E. Rutherford est nommé directeur...

Les débuts de la spectrométrie de masse



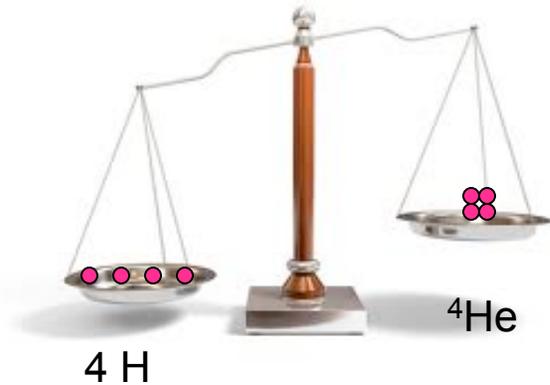
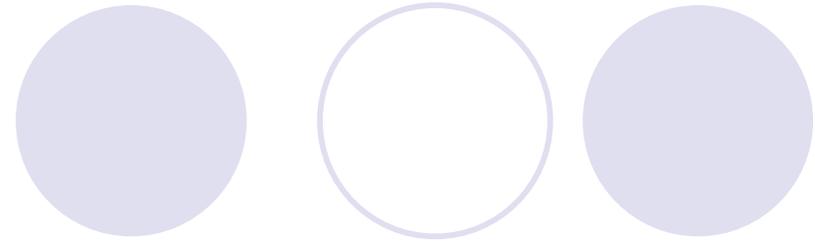
Francis Aston

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)

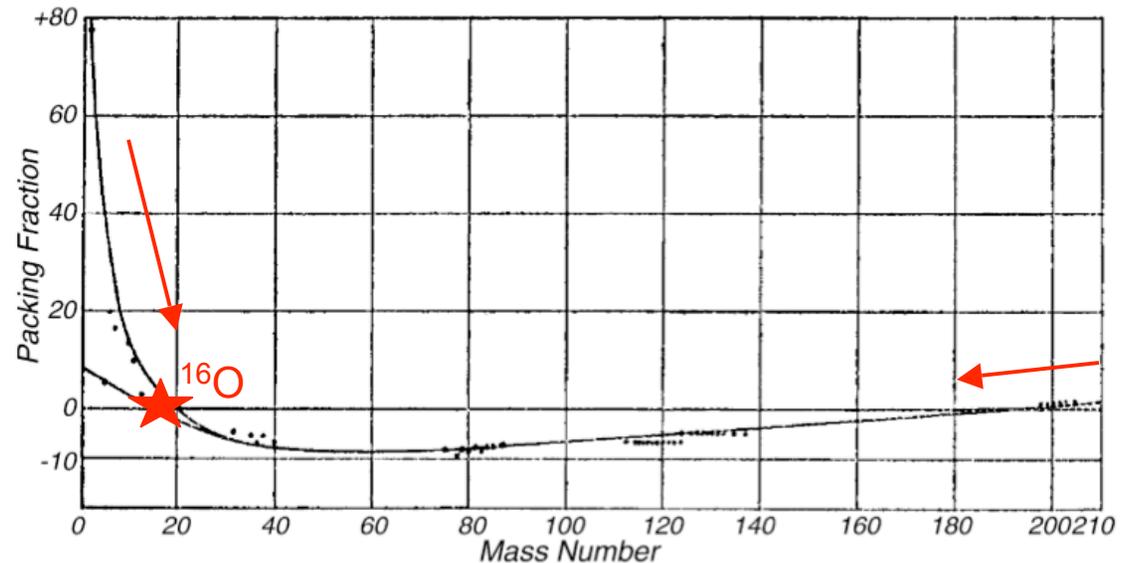
Excès de masse



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

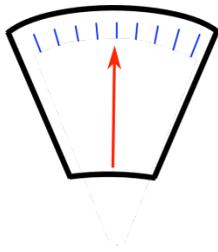
'packing fraction' = $10\,000 (M - A)/A$



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



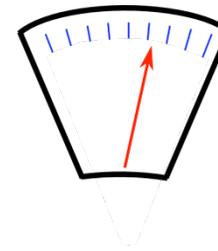
Airbus A380-800F:
252.2 tonnes (à vide)



Airbus A380-800F (252.2 tonnes)

+

1 mini-carambar (4 g)

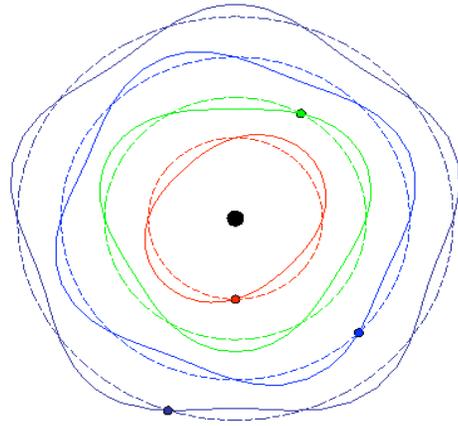


Mécanique Quantique et Fonction d'Onde

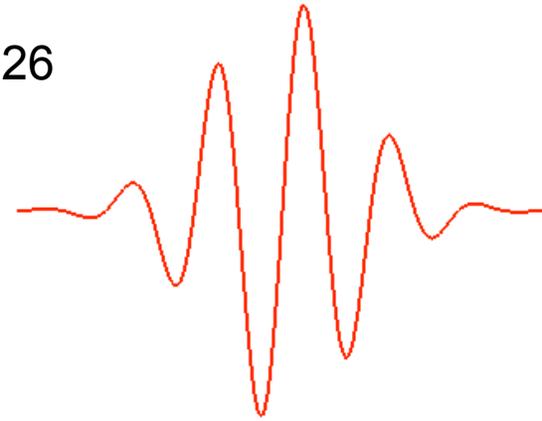
1924



L. de Broglie



1926

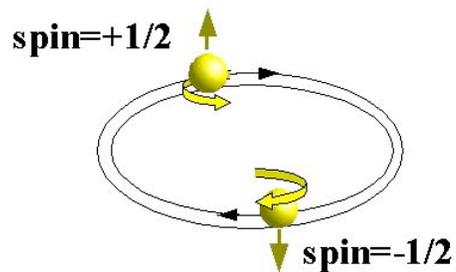


E. Schrödinger

1924-1925



W. Pauli



M. Born



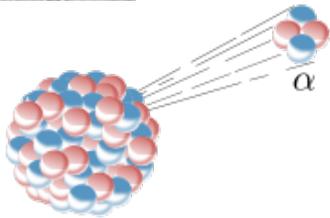
W. Heisenberg

La radioactivité α expliquée

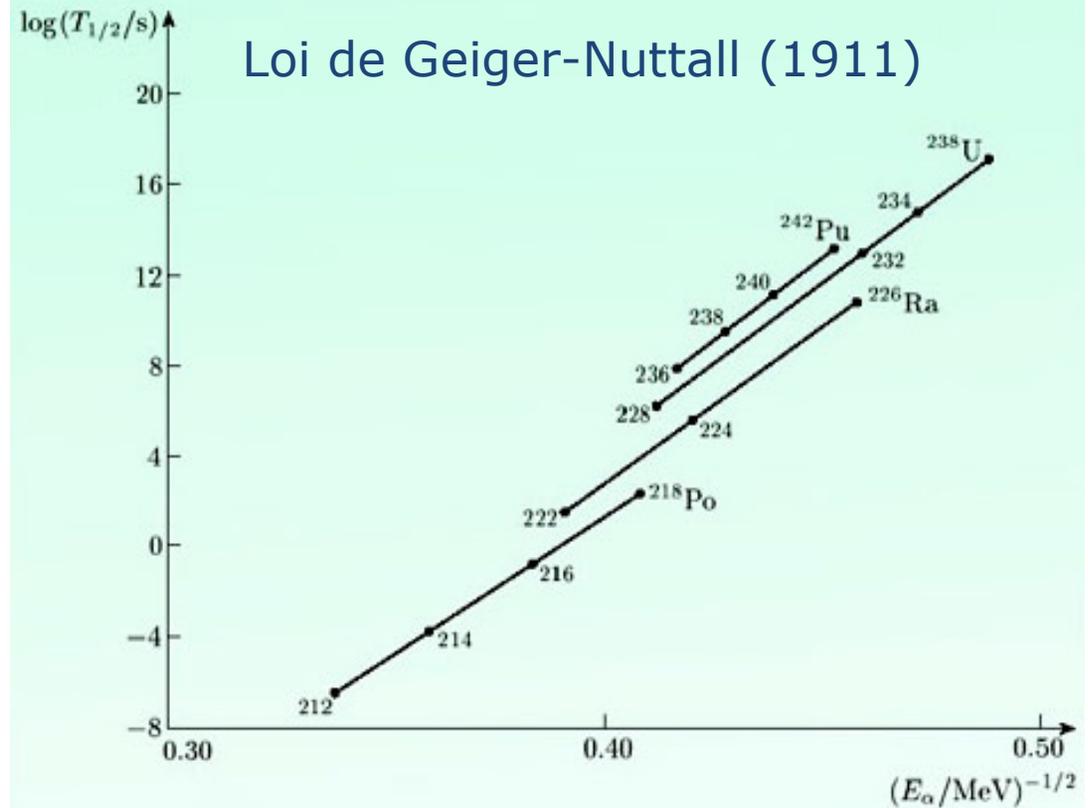
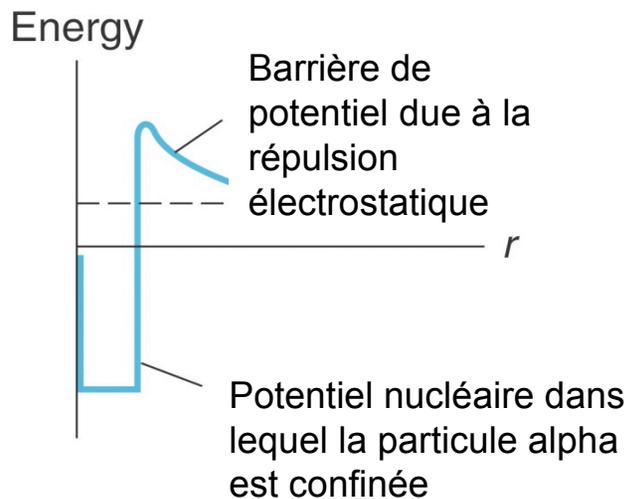


1928:

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



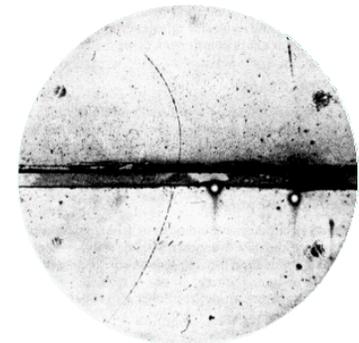
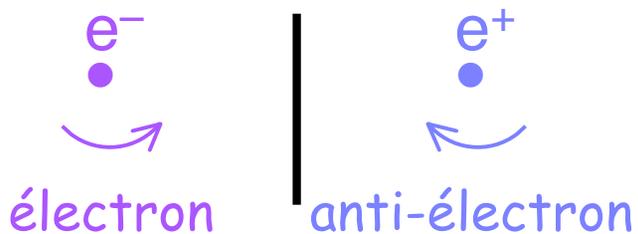
1929 : Equation de Dirac

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

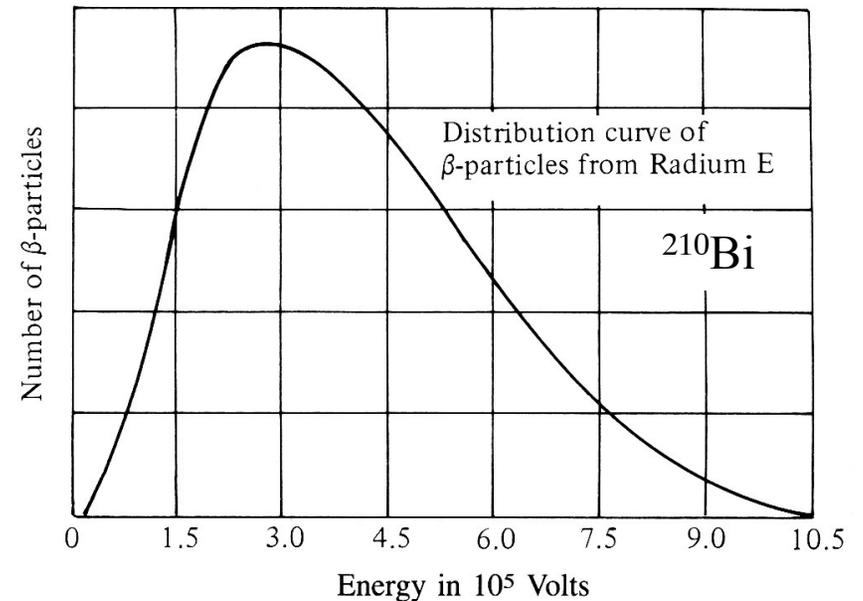


Radioactivité β et l'hypothèse du neutrino

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 ?



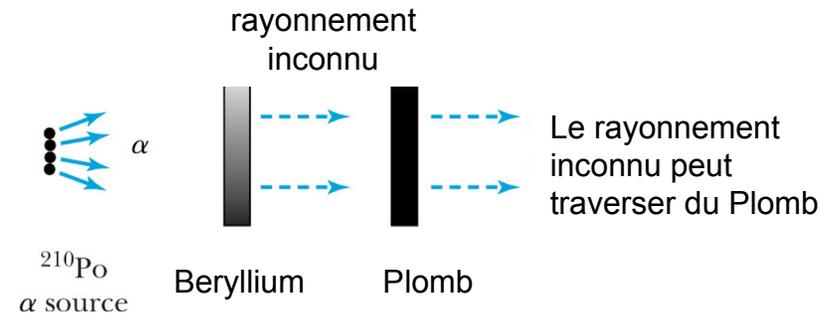
Chadwick à Rutherford: “Je ne trouve pas l'ombre d'une raie. Il y probablement une erreur stupide quelque part...!”

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^-

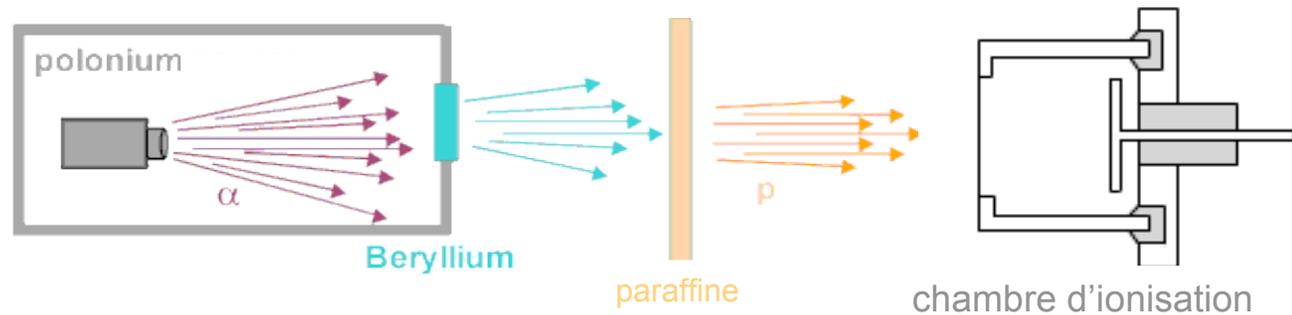
Découverte du neutron

1930-32

W. Bothe & H. Becker
découvrent une étrange
réaction



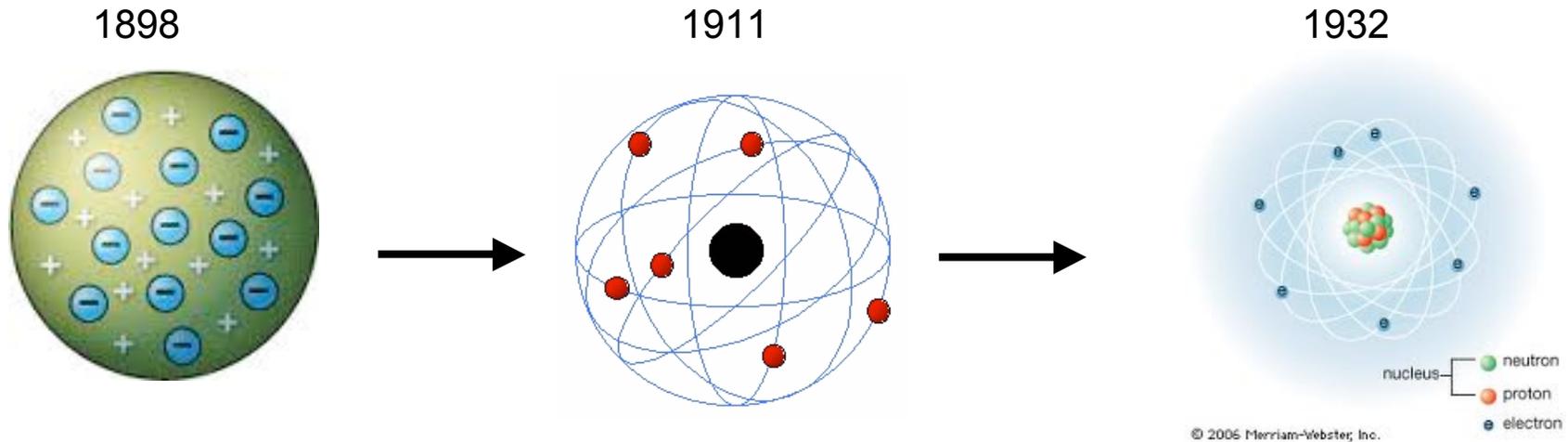
James
Chadwick



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

Le noyau au complet

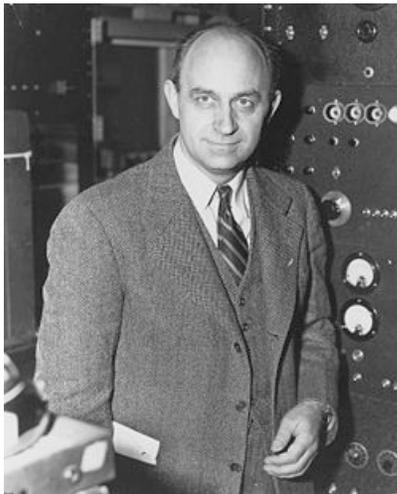
1932: D. Ivanenko, W. Heisenberg et E. Majorana : le noyau est composé de Z protons et N neutrons



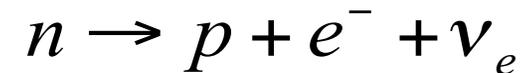
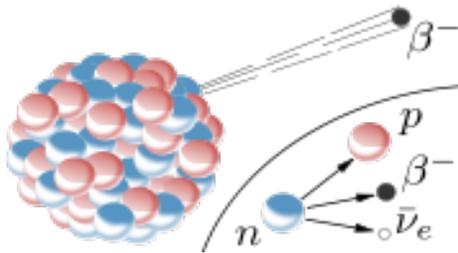
La présence des neutrons dans le noyau explique l'isotopie et résout certains problèmes de spin, moment magnétique et confinement des e⁻

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



les électrons de la radioactivité β sont créés à l'instant de la décroissance : un neutron se transforme en un proton avec émission d'un électron et de la particule imaginée par Pauli qu'il appelle 'neutrino'

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"

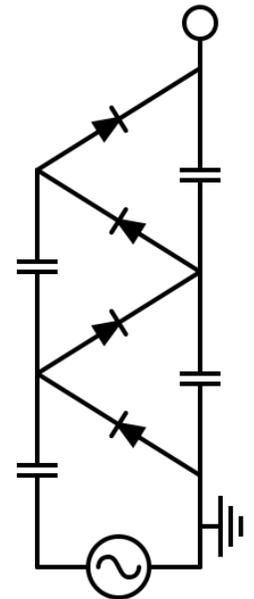
Des accélérateurs pour sonder le noyau



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

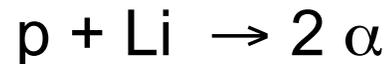
Nature 129, Février 1932, 242



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:

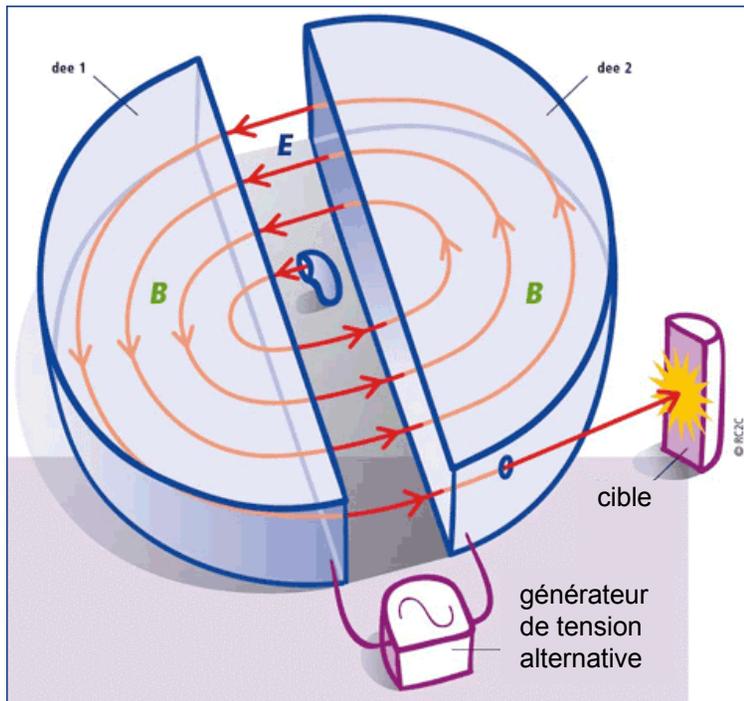


L'énergie des 2 particules alpha est mesurée: **~17 000 keV**

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

Nature 129, Avril 1932, 649

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 deutérons (8 MeV) et particules alpha (16 MeV)

L'interaction nucléaire

Interaction attractive forte (> répulsion électrostatique entre les protons)
de courte portée, répulsive à courtes distances et indépendante du type
de nucléon

similarité avec la force qui lie les molécules d'eau dans une goutte
liquide

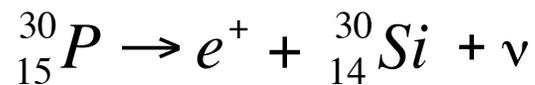
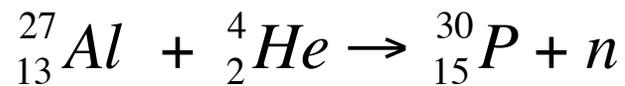
*W. Heisenberg, Congrès de Solvay 1933 d'après une idée
originale de G. Gamow (Proc. Roy. Soc. 126 (1930) 637)*



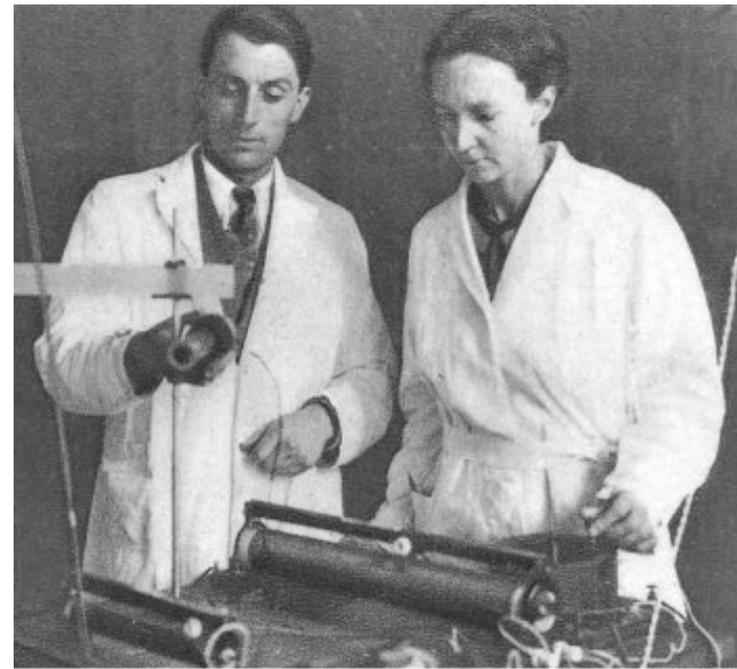
Radioactivité artificielle

1934 I. Curie et F. Joliot

découverte de la radioactivité artificielle



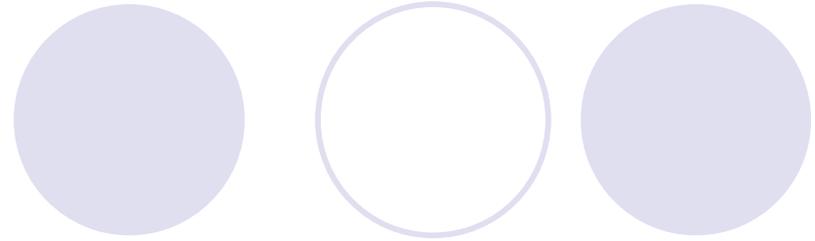
↑
radio-phosphore !



Irène Curie et
Frédéric Joliot

1936: John H. Lawrence est le premier à utiliser un radioélément artificiel à des fins thérapeutiques: ${}^{32}\text{P}$ pour traiter la leucémie

L'ère du neutron

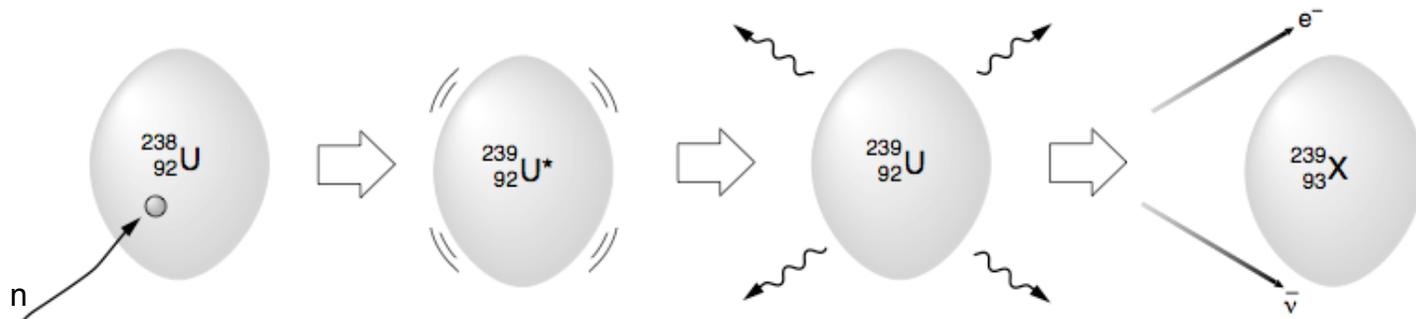


1934 E. Fermi propose de bombarder des matériaux avec des neutrons

Il découvre que l'irradiation aux neutrons lents est plus apte à provoquer des transmutations

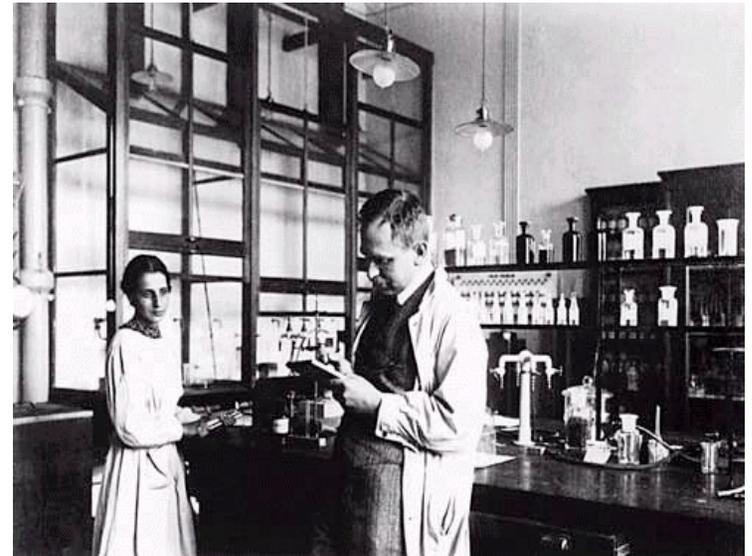
Son groupe découvre 40 nouveaux isotopes en 3 ans !

Il propose d'irradier des noyaux lourds pour synthétiser des éléments transuraniens et pense avoir découvert les éléments $Z=93$ et 94 (Ausonium et Hesperium)



La quête des transuraniens...

1935-1938: Otto Hahn, Lise Meitner et Fritz Strassmann comptabilisent plus de 10 nouveaux radio-isotopes transuraniens (jusqu'à $Z=96$)



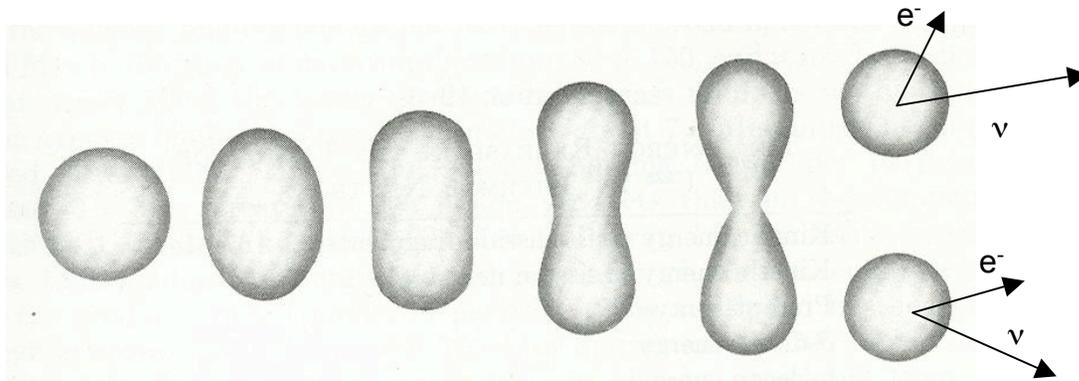
Lise Meitner et Otto Hahn (1918)

“Nous devons appeler Baryum, Lanthane et Cerium ce que nous avons appelé précédemment Radium, Actinium et Thorium. C’est une décision difficile qui contredit toutes les expériences de physique nucléaire menées jusqu’à présent.”

La fission

1939: L. Meitner donne une explication à cette découverte avec son neveu Otto Frisch: **la fission** de l'uranium

L. Meitner and O. Frisch, Nature 143 (1939) 239



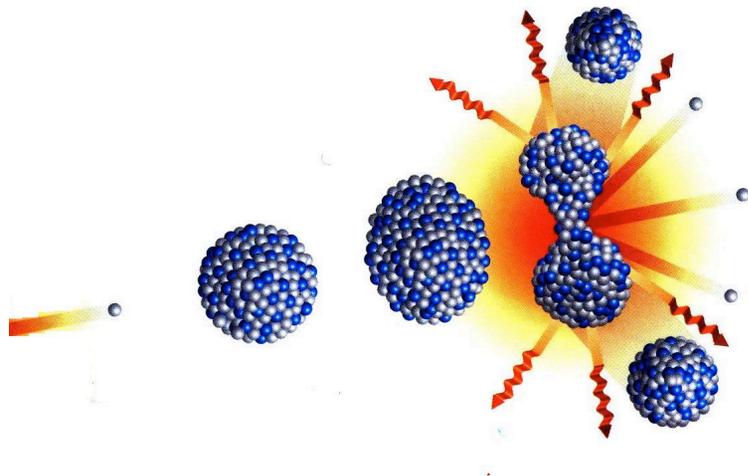
L'hypothèse est tout de suite confirmée expérimentalement par O. Frisch puis par d'autres (F. Joliot)

O. Frisch, Nature 143 (1939) 276

N. Bohr et J.A. Wheeler élaborent une théorie de la fission basée sur la goutte liquide

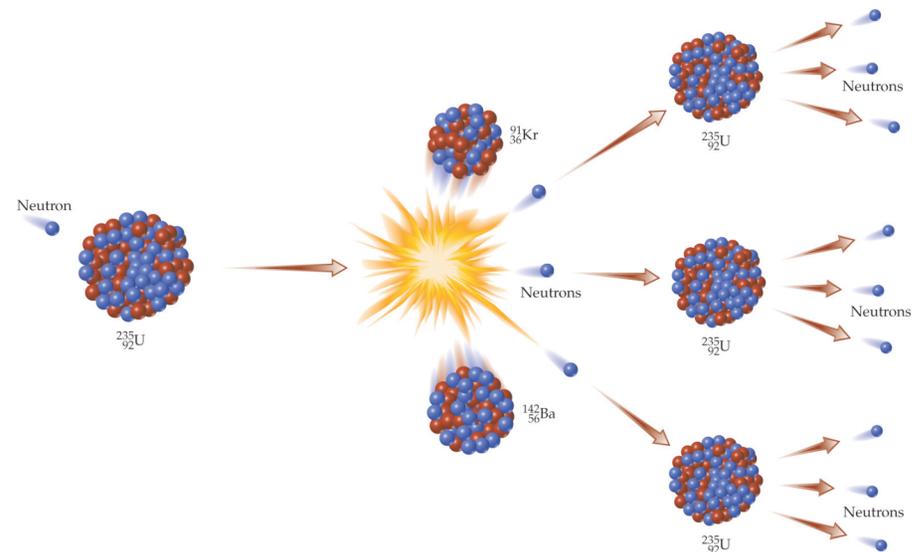
N. Bohr et A. Wheeler, Phys. Rev. 56 (1939) 426

Propriétés de la fission



Chaque fission de l'Uranium produit des neutrons

Hans Von Halban, Frédéric Joliot et Lew Kowarski, Nature 143 (1939) 470



Copyright © 2007 Pearson Prentice Hall, Inc.

F. Joliot voit la possibilité d'une réaction en chaîne

Francis Perrin introduit la notion de masse critique et de modérateur

Des brevets sont déposés

Le projet Manhattan et C_{hicago} P_{ile}-1

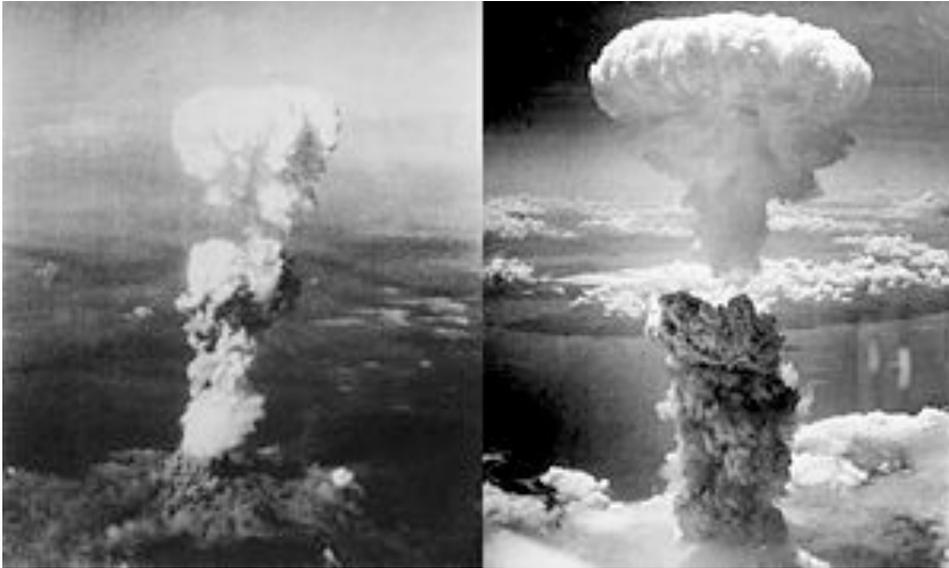
Leo Szilard fait signer à A. Einstein une lettre au président Franklin D. Roosevelt en 1939 sur la possibilité d'une bombe atomique.



La première pile atomique est inaugurée en décembre 1942

La réaction en chaîne est maintenue pendant 28 minutes

La fission pour la guerre et la paix....



Hiroshima et Nagasaki les 6 et 9 Août 1945



1948: Inauguration de la première pile atomique française: ZOE



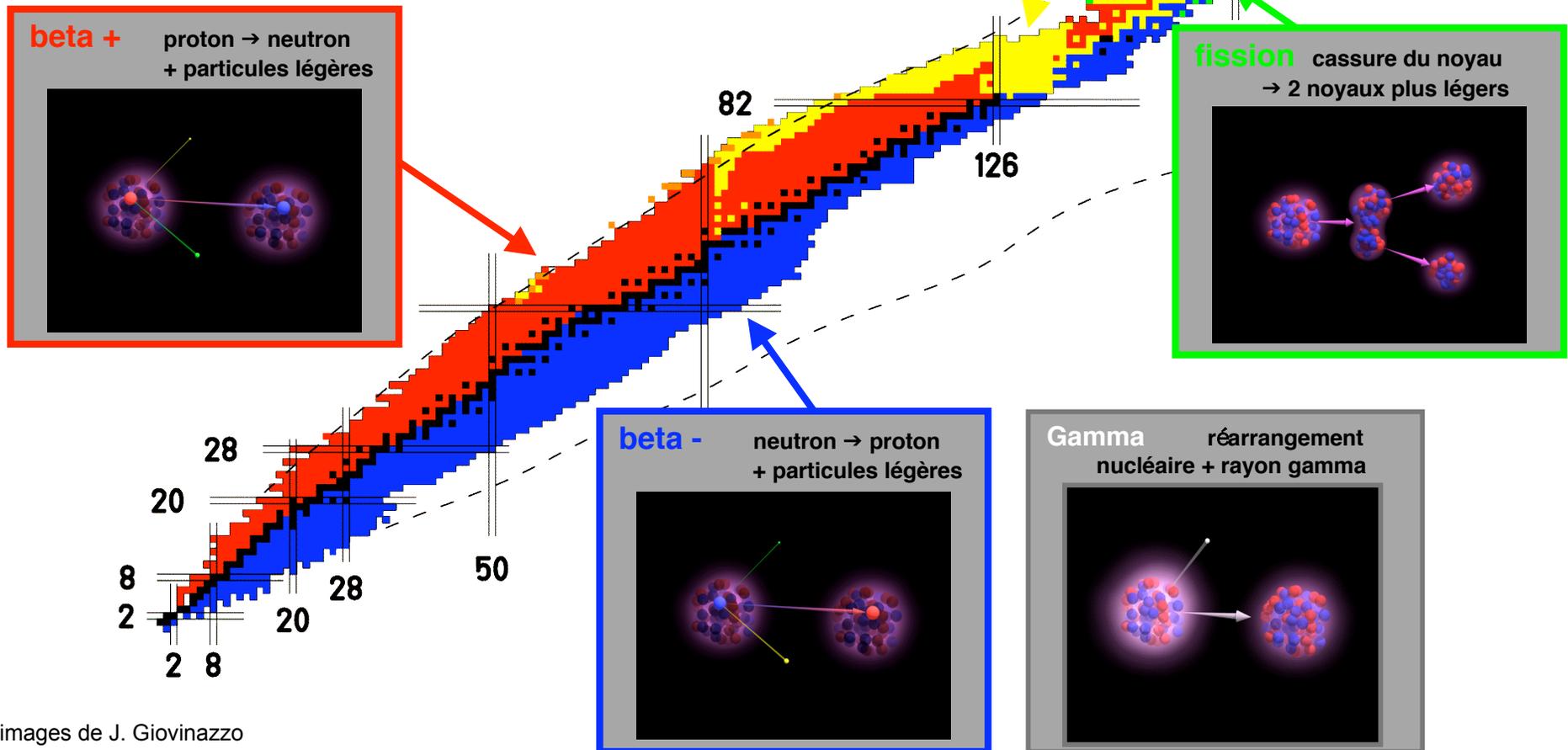
1951: Première production d'électricité nucléaire à EBR-I dans l'Idaho (USA)

1954: Premiers kWh d'une centrale nucléaire: Obninsk AES-1 (URSS)



Nouvelles découvertes

1940: G. Flerov et K. Petrzhak découvrent la fission spontanée en travaillant sur des noyaux d'Uranium



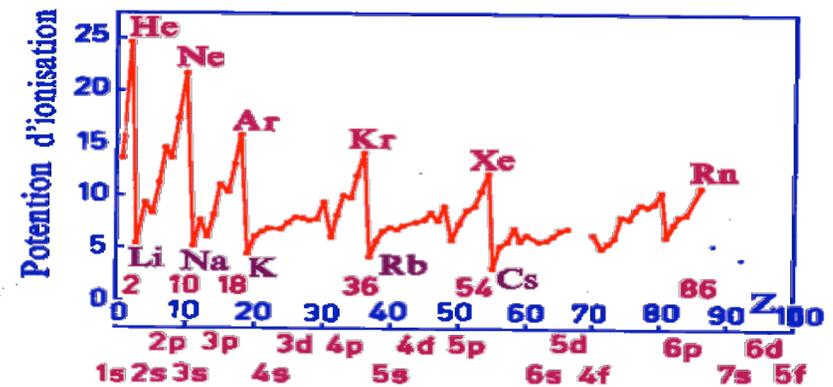
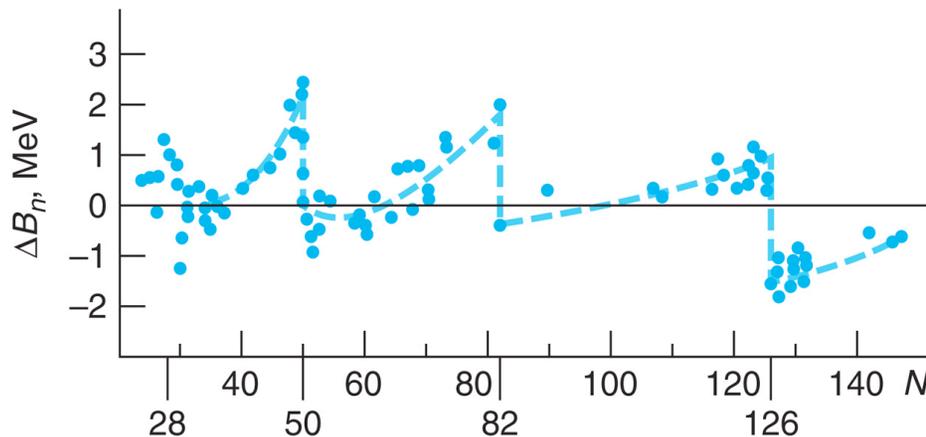
Nombres Magiques



Maria G. Mayer

M. Goeppert Mayer remarque que les noyaux ayant un nombre de neutrons et/ou de protons égal à 20, 50, 82, 126 sont relativement plus abondants que leurs voisins

Les noyaux associés à ces nombres sont également particulièrement liés et génèrent des discontinuités par rapport à l'énergie de la goutte liquide



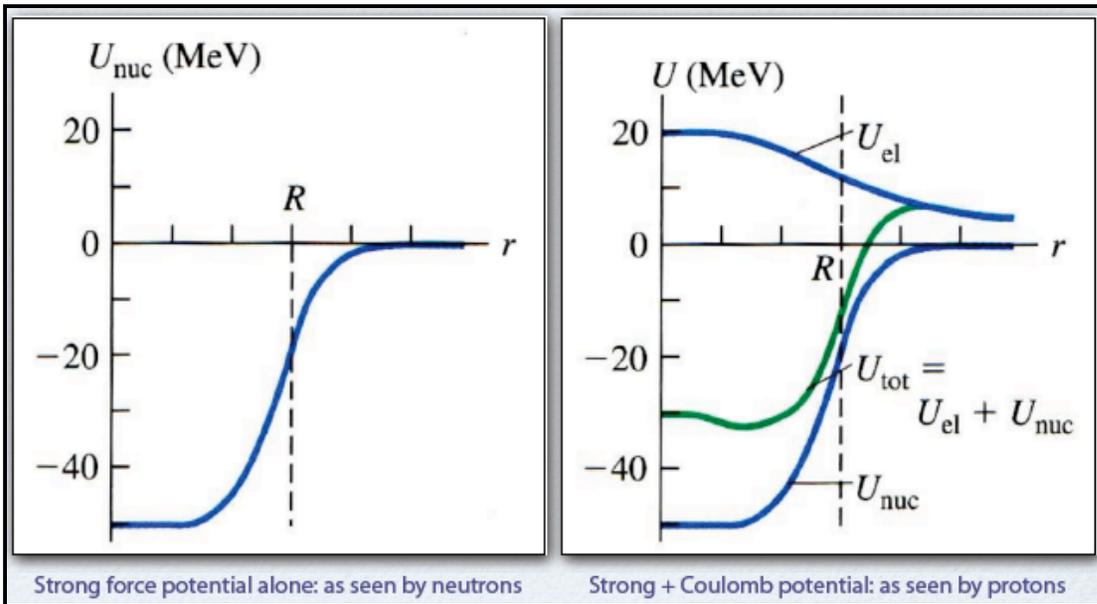
⇒ structure périodique dans le noyau ?

'On closed shells in nuclei', M G. Mayer *Phys. Rev.* 74 (1948) 235

La mécanique quantique ne reproduit pas ces nombres au delà de 20 ...

potentiel nucléaire moyen ressenti par les nucléons

⇒ niveaux d'énergie



2p	=====	6	40
1f	=====	14	
2s	=====	2	20
1d	=====	10	
1p	●●●●●●	6	8
1s	●●	2	2

Nombre total de neutrons (ou protons) que peuvent accommoder les couches:

2, 8, 20, 40, 58, 92, 138

La question qui fait tilt !

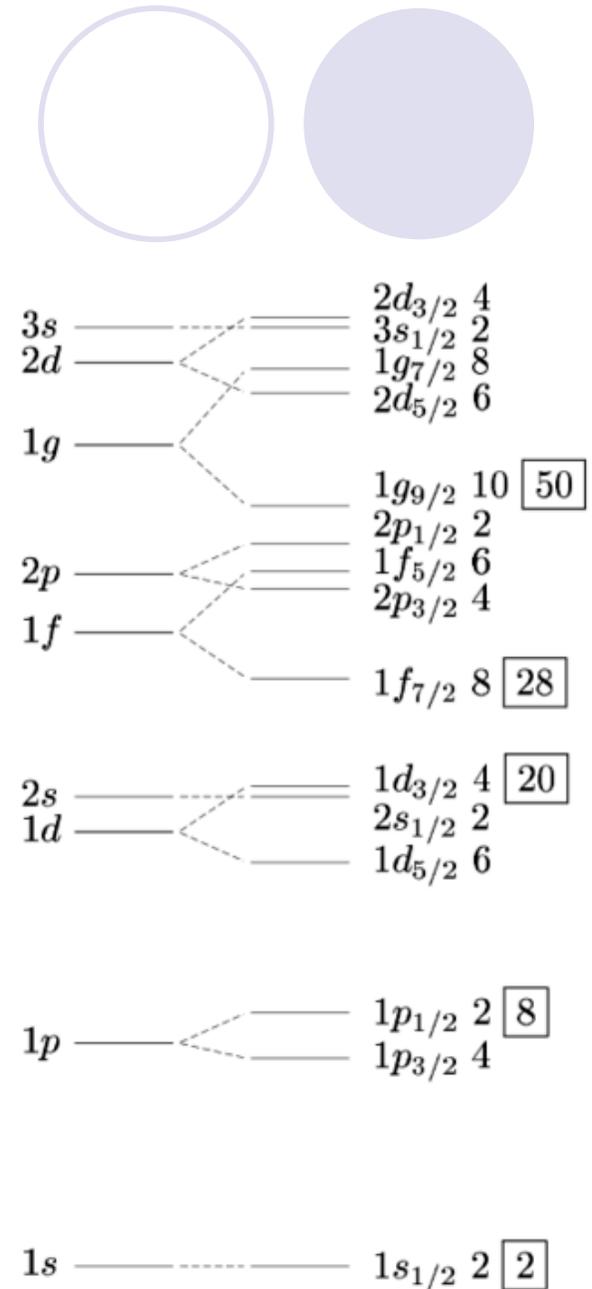
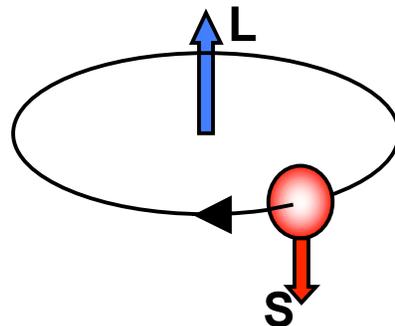
Thanks are due to Enrico Fermi for the remark, "Is there any indication of spin-orbit coupling?" which was the origin of this paper.

'On closed shells in nuclei. II',
M. G. Mayer *Phys. Rev.* 75 (1949) 1969



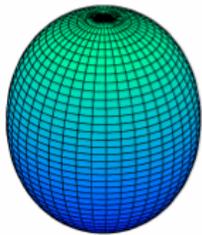
Hans Jensen

M.G. Mayer et H.D. Jensen 'Elementary Theory of Nuclear Shell Structure', 1955

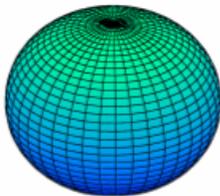


Distribution de charge dans le noyau

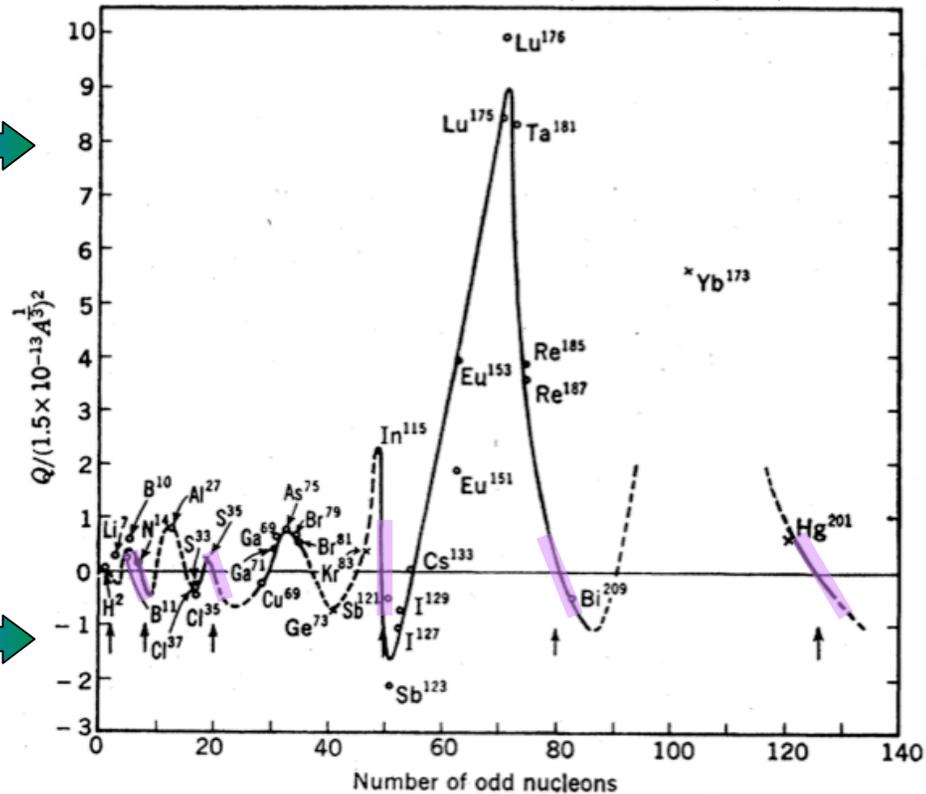
'prolate'



'oblate'



C.H. Townes et al., Phys. Rev. 76 (1949) 1415



Certains moments sont jusqu'à 30 fois plus élevés que les prédictions !

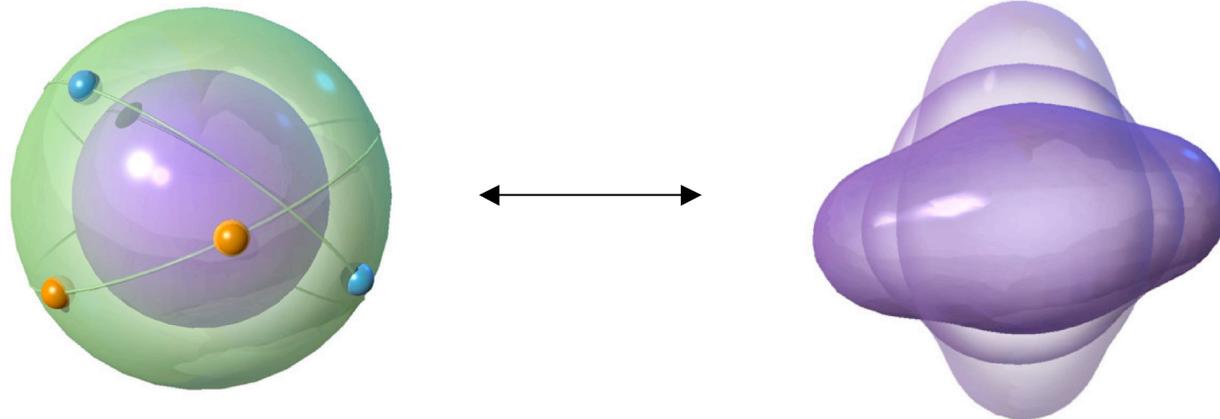
Et si le noyau gagnait à se déformer....?



James Rainwater

Distorsion de la goutte liquide sous l'influence des trajectoires des nucléons de valence pour gagner en stabilité

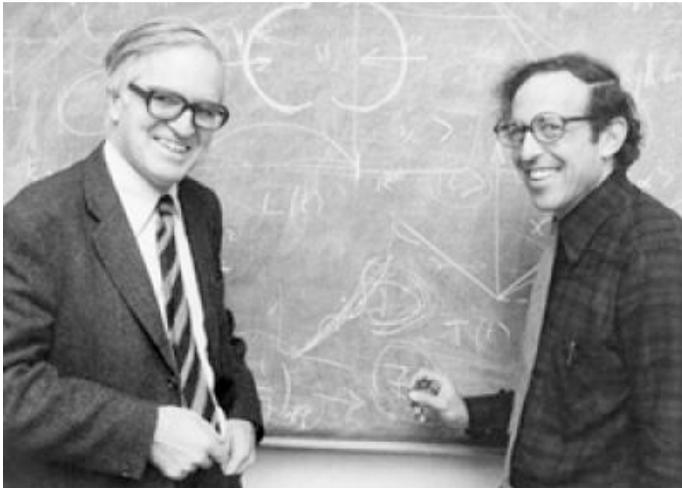
J. Rainwater, Phys. Rev. 79 (1950) 432



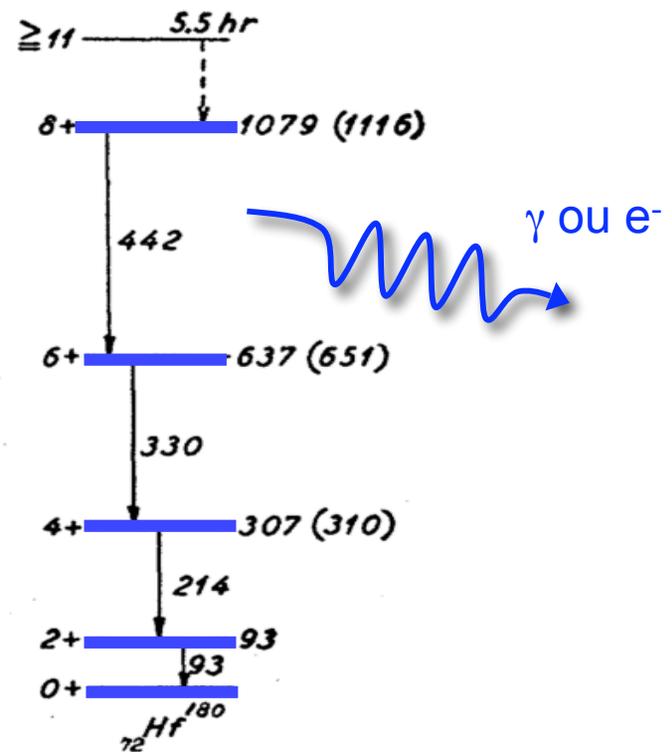
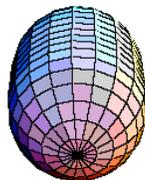
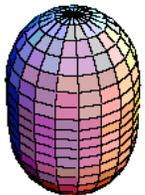
Etats individuels et collectifs du noyau

Le modèle unifié couple les oscillations et rotations de la goutte aux mouvements des nucléons individuels

A. Bohr et B. Mottelson, Kgl. Danske Videnskab. Selskab, Mat.-fys. Medd. 27 (1953) 16

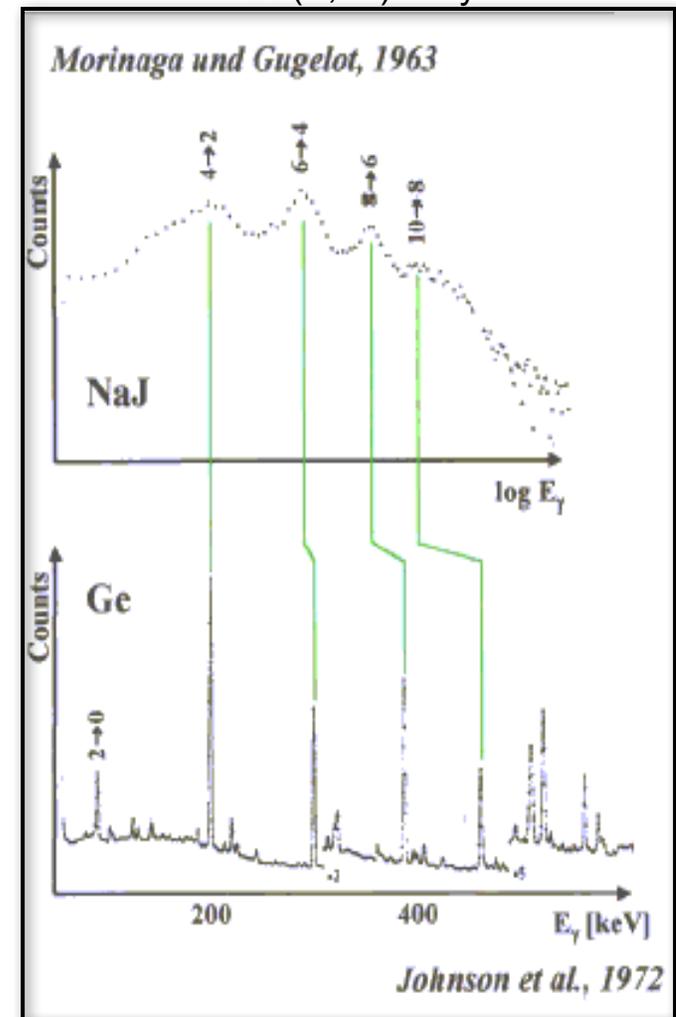


Aage Bohr et Ben Mottelson

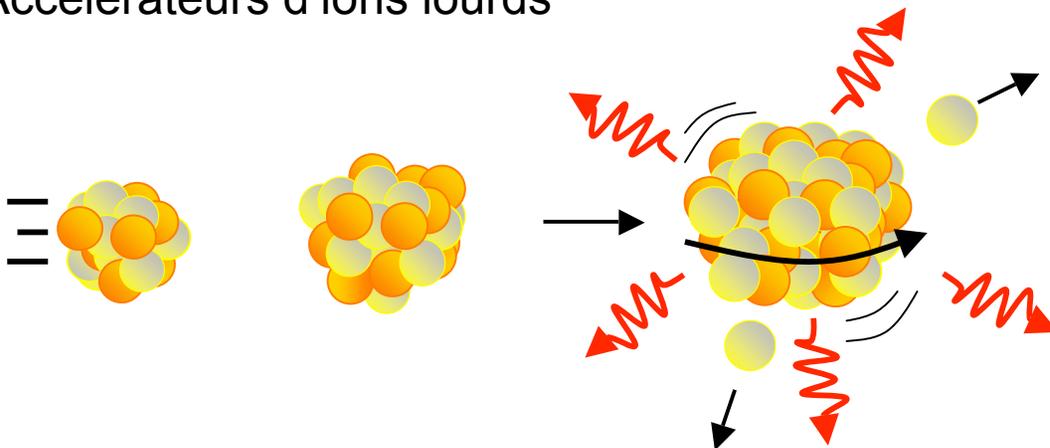


Développements des années 1950-70

Détecteurs scintillateurs puis semi-conducteurs

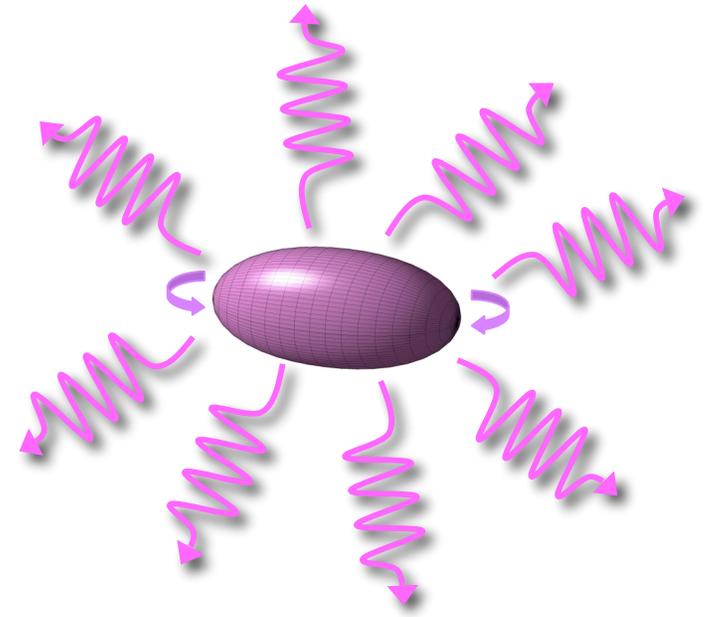
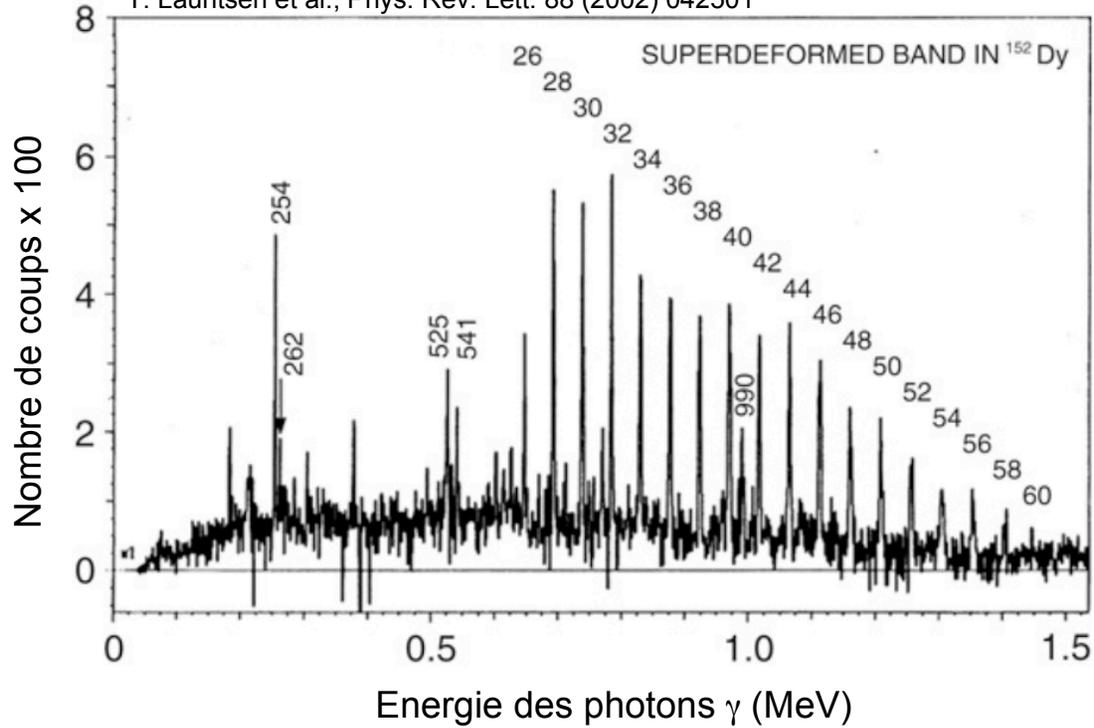


Accélérateurs d'ions lourds



Des formes extrêmes

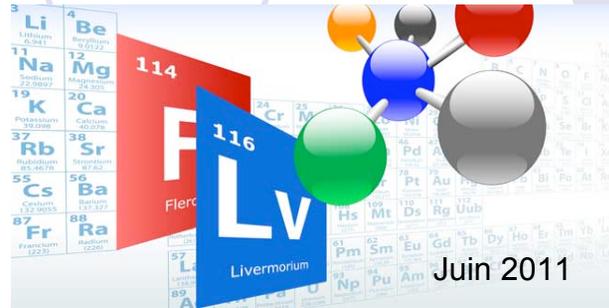
P.J. Twin et al., Phys. Rev. Lett. 57 (1986) 811
T. Lauritsen et al., Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 042501



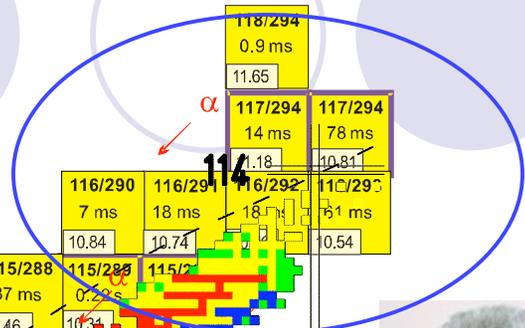
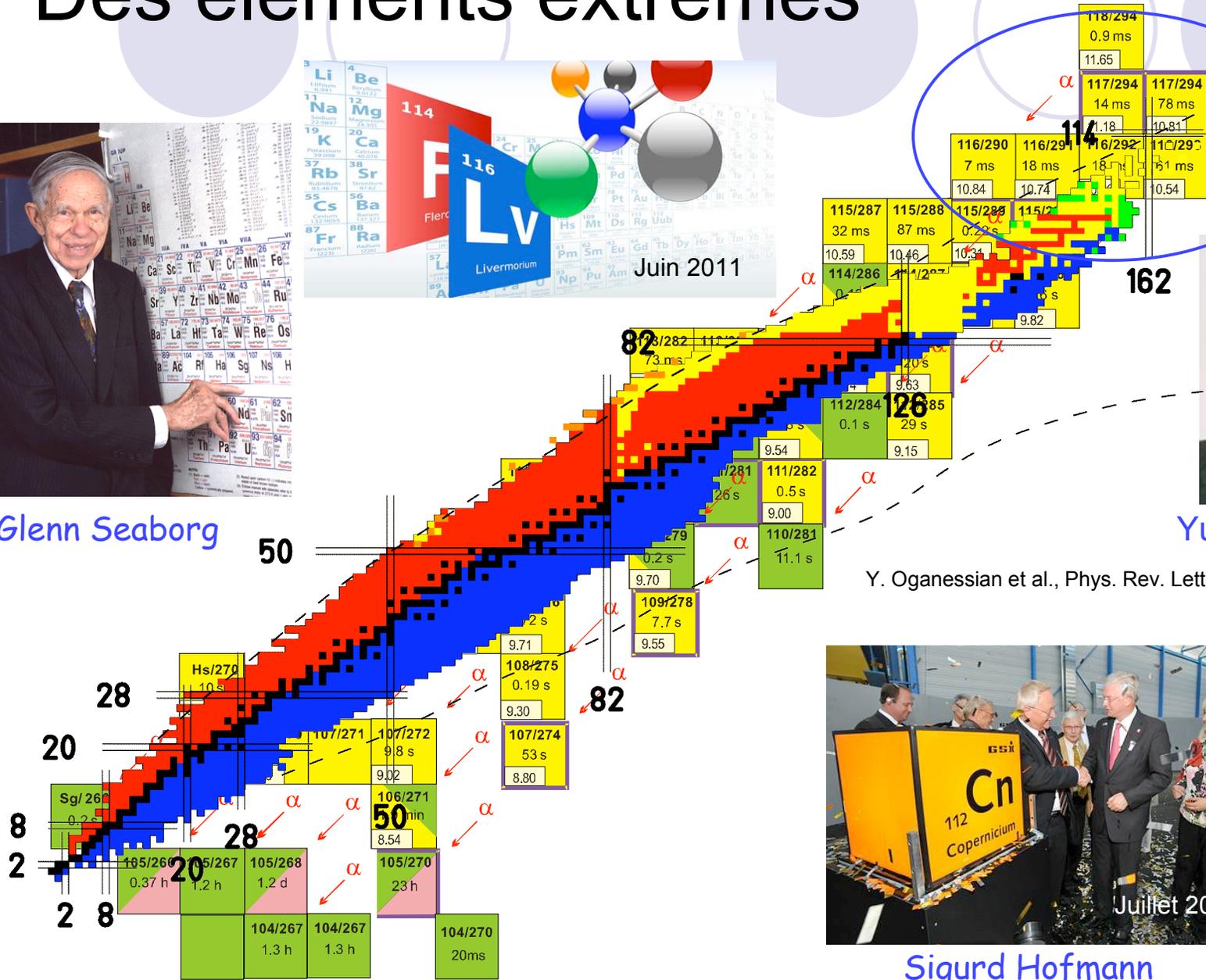
Des éléments extrêmes



Glenn Seaborg



Juin 2011



Yuri Oganessian

Y. Oganessian et al., Phys. Rev. Lett. 104, 142502 (2010)

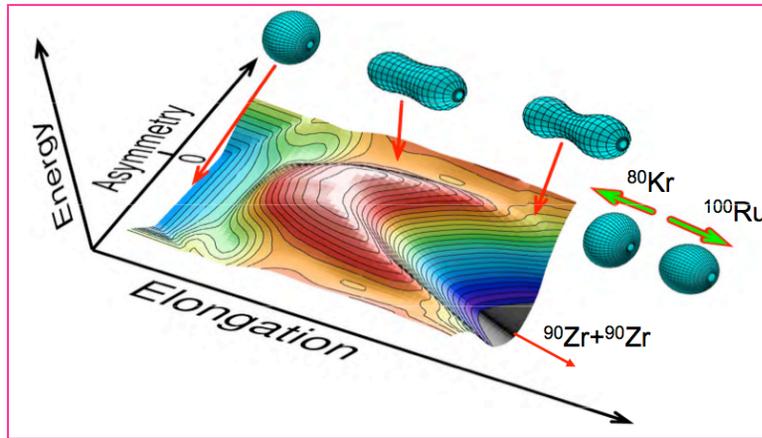


Juillet 2010

Sigurd Hofmann

Noyaux exotiques: nouveaux phénomènes

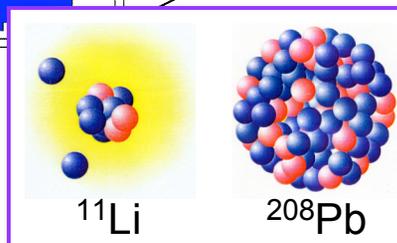
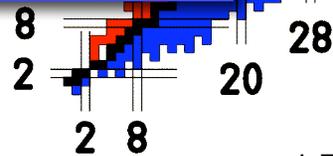
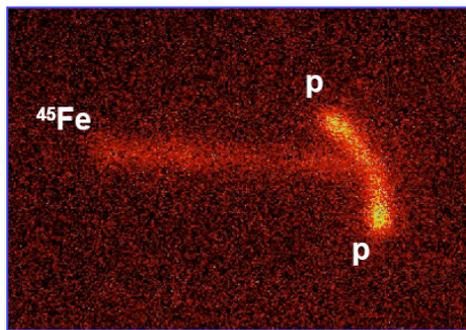
A. Andreyev et al., Phys.Rev. Lett. 105 (2010) 252502



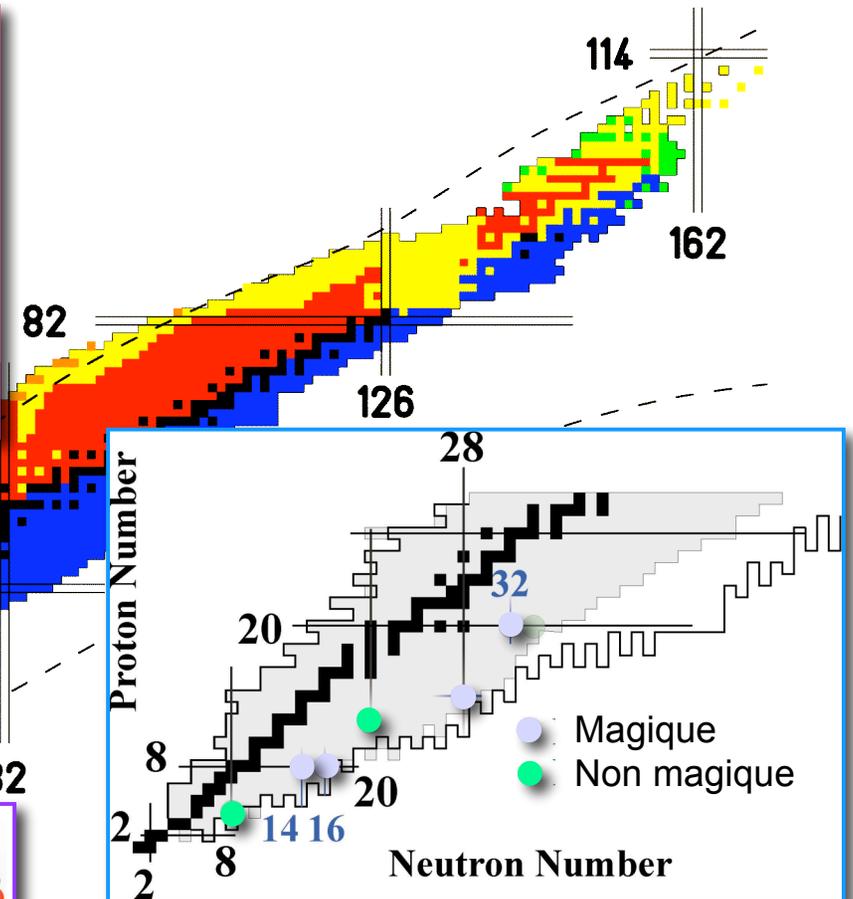
J. Giovinazzo et al., Phys. Rev. Lett. 89, 102501 (2002)

M. Pfützner et al., Eur. Phys. J. A14, 279 (2002)

K. Miernik et al., Phys. Rev. Lett. 99, 192501 (2007)

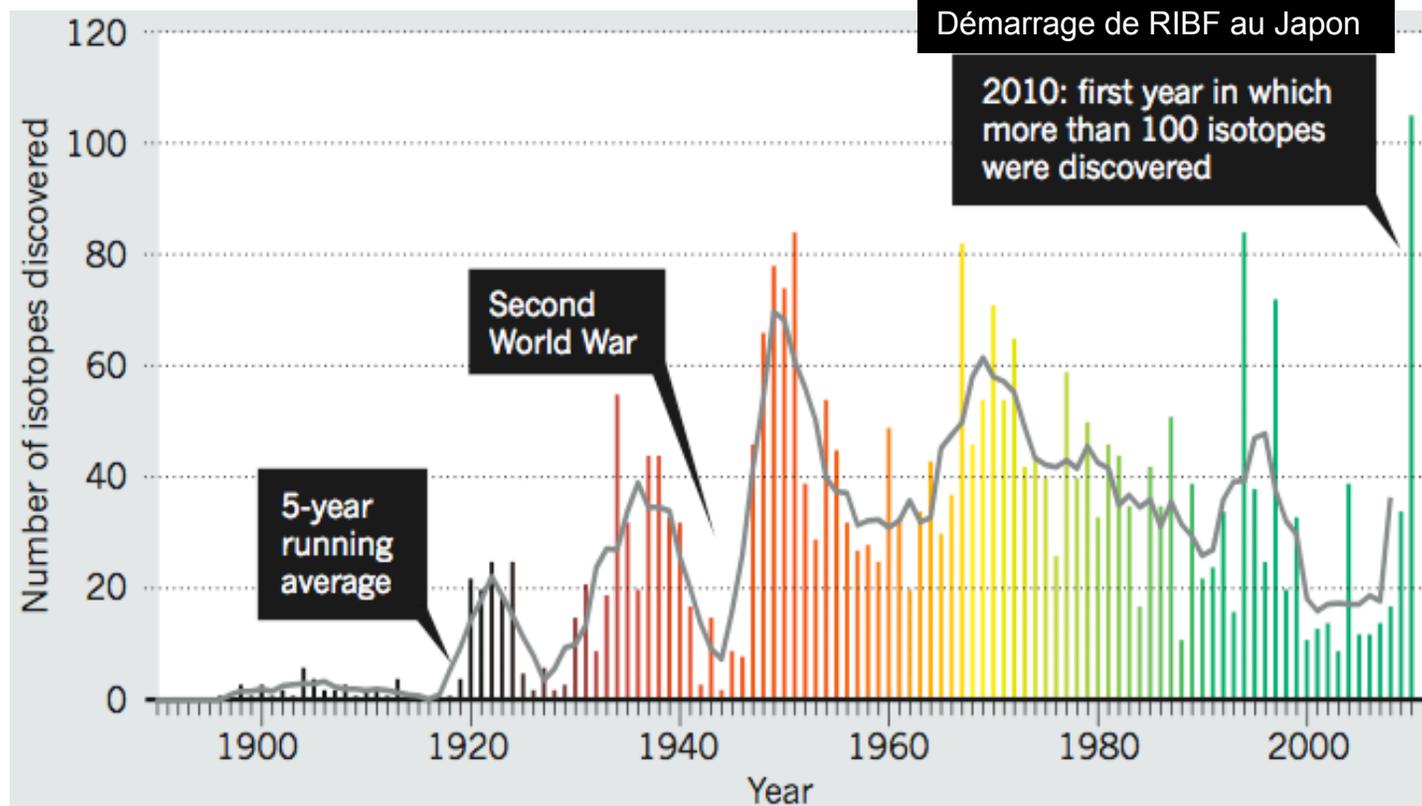


I. Tanihata et al., Phys. Rev. Lett. 55, 2676 (1985)



Futur

Mise en route de nouveaux accélérateurs de faisceaux d'ions stables et radioactifs (SPIRAL2, RIA, FAIR,...) et de nouveaux détecteurs et spectromètres



M. Thoennessen et B. Sherrill, Nature 473 (2011) 25

A l'aube du 21ème siècle, le noyau n'a pas fini de nous surprendre !