

α β γ

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

A. Lopez-Martens



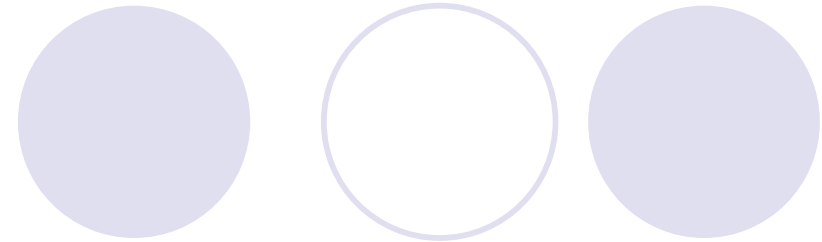
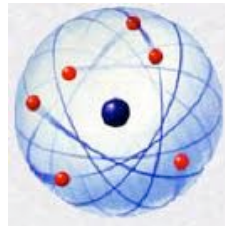
CSNSM



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 ”



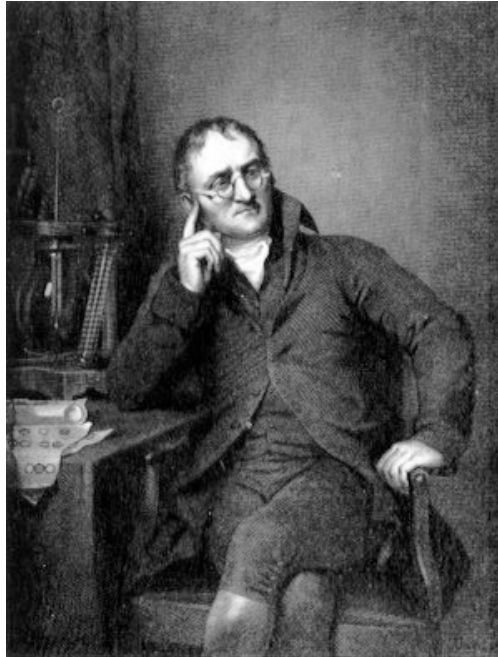
A l'aube du 20^{ème} siècle



“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**

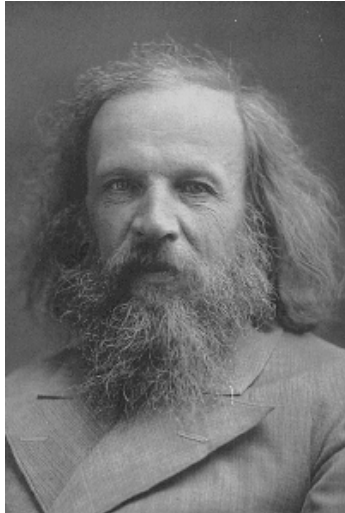
-Les atomes d'un même élément sont identiques

-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.

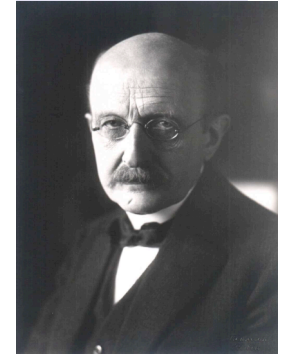
ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

		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	Ru = 104,4	Ir = 198.	
		Ni = Co = 59	Pd = 106,6	Os = 199.	
H = 1		Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200.	
	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?		

Д. Менделѣевъ (1869)

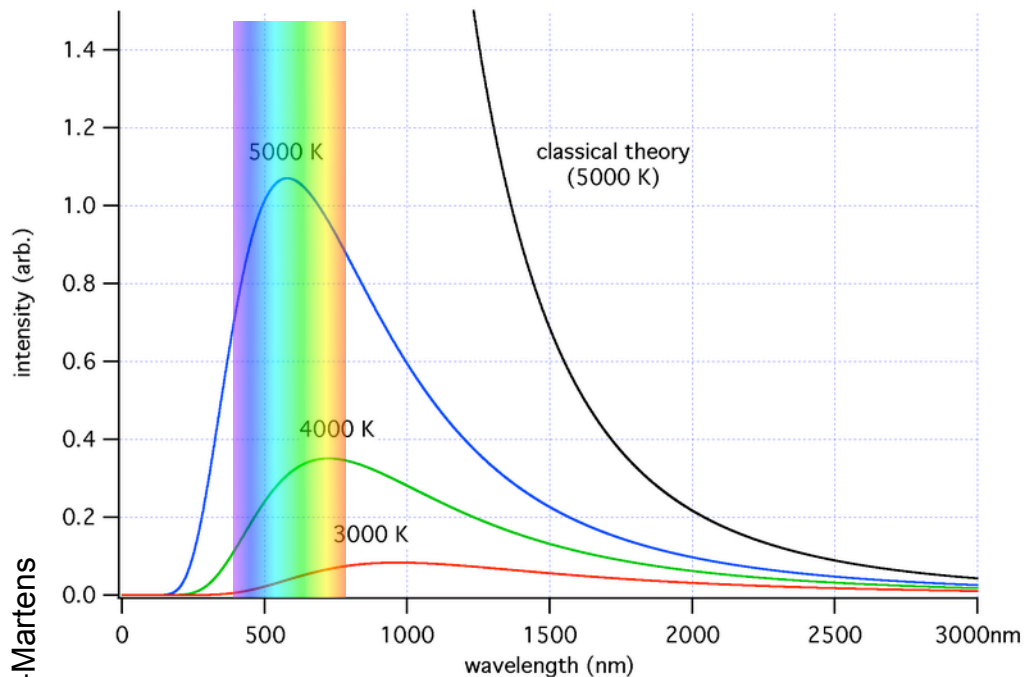
L'emplacement dans le tableau est donné par **Z** (= numéro atomique, de AtomZahl)

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

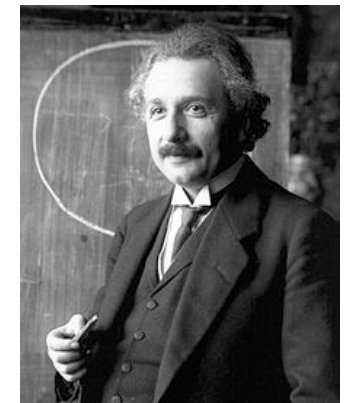


Max Planck

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

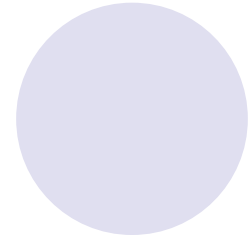
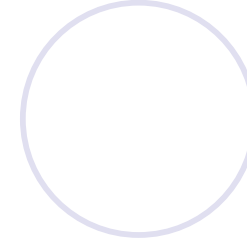
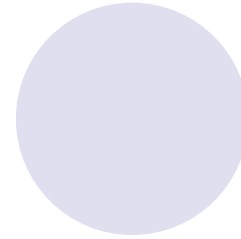


Albert Einstein

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

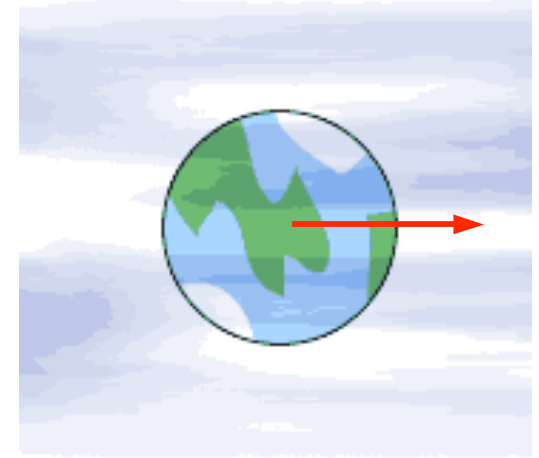


L'éther



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

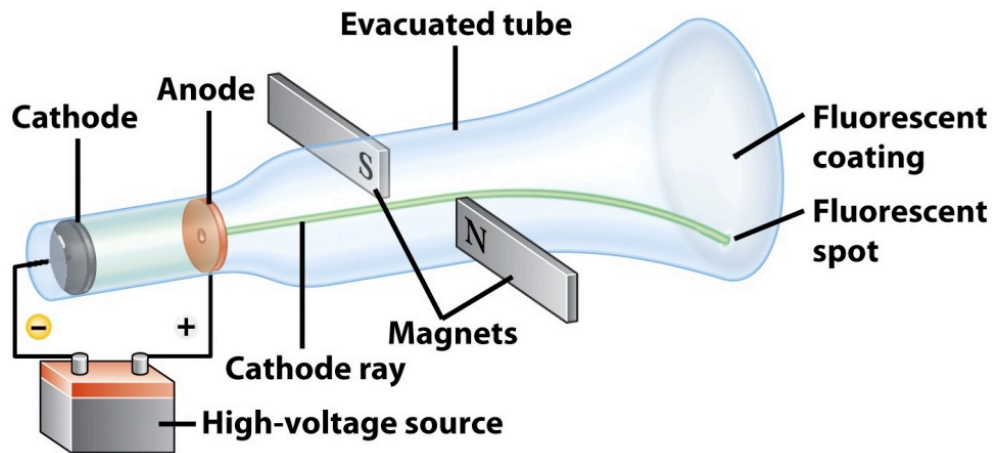
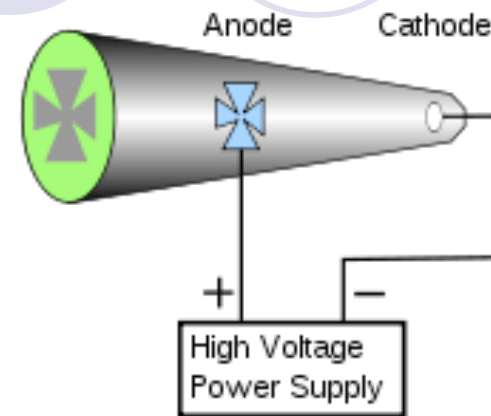
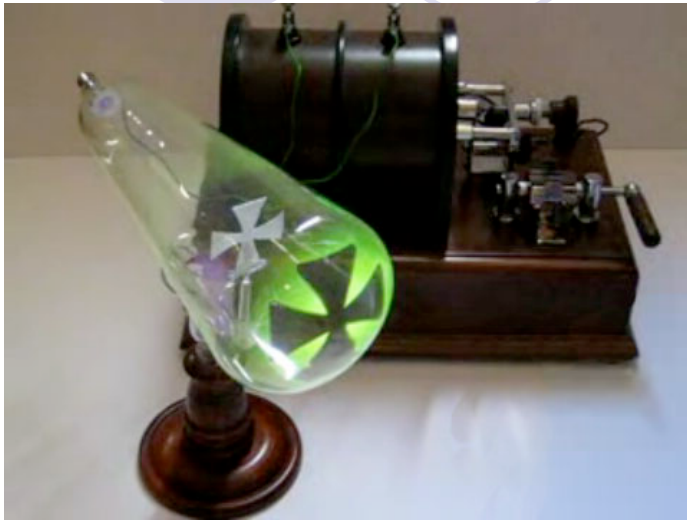


1887: échec de l'expérience d'interférométrie de Michelson-Morley

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

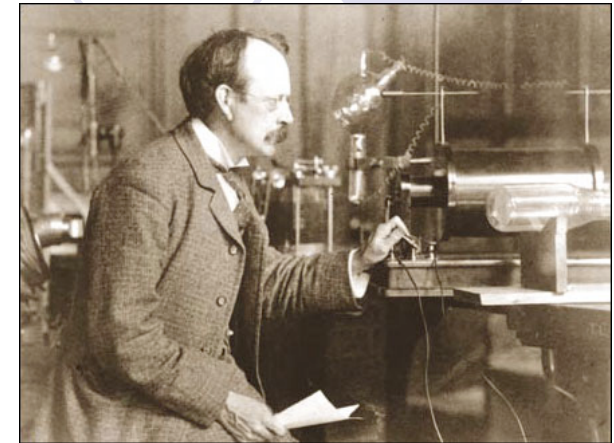
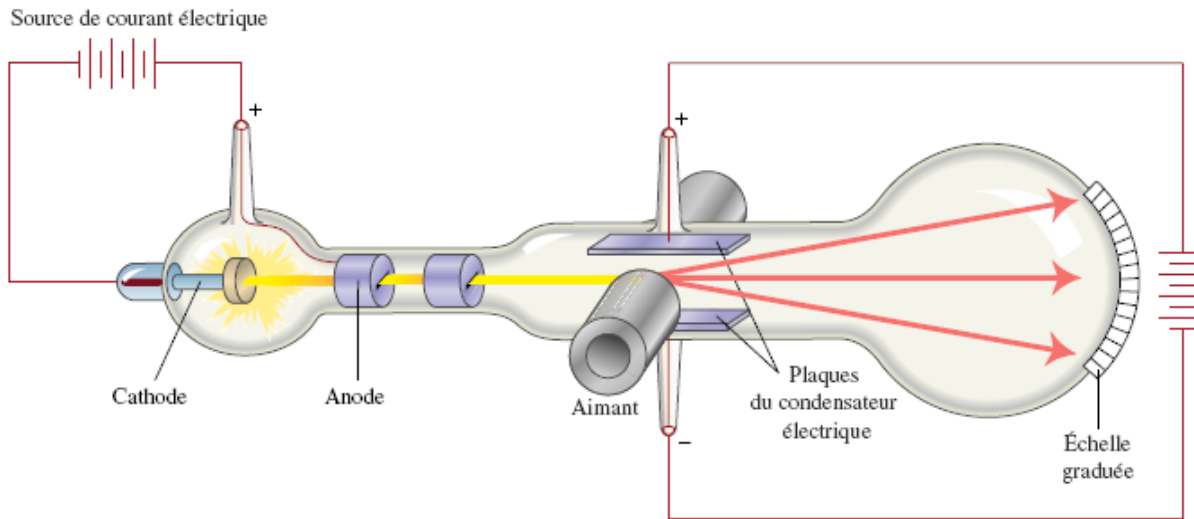
$$E = mc^2$$

La révolution du tube cathodique



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

Les corpuscules

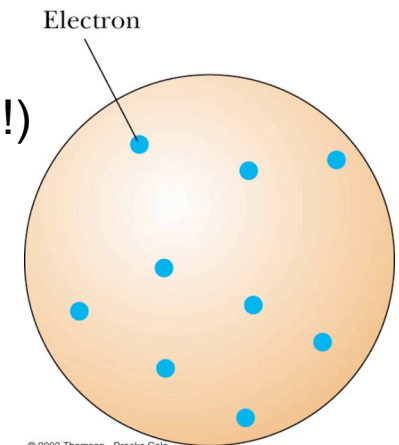


John Joseph Thomson

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'



© 2003 Thomson - Brooks Cole

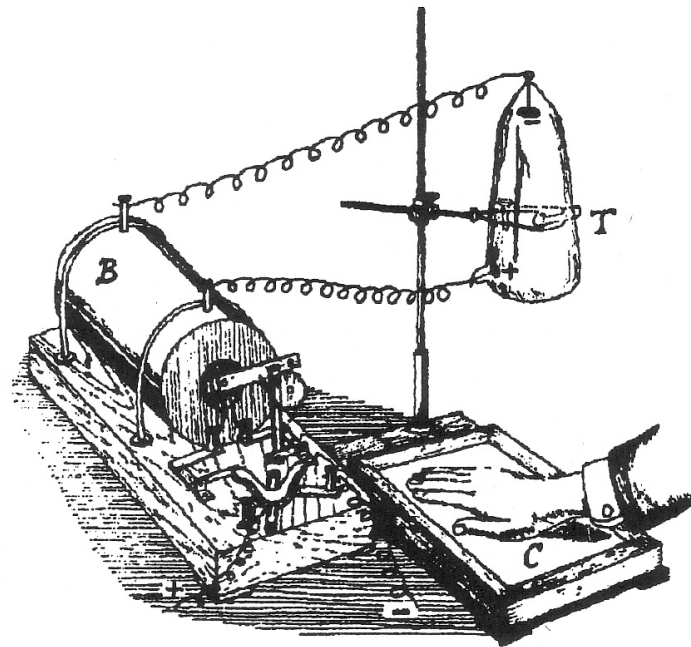
Des rayons cathodiques aux rayons X

1895 W. Röntgen

découverte des rayons X



Wilhelm Röntgen



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



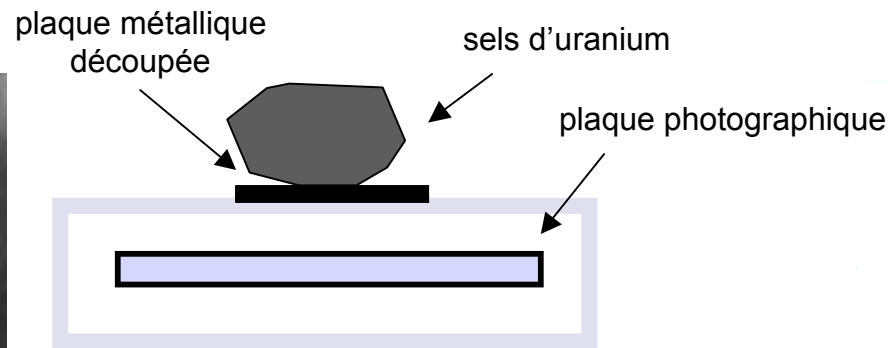
Des rayons X aux rayons uraniques

1896 H. Becquerel

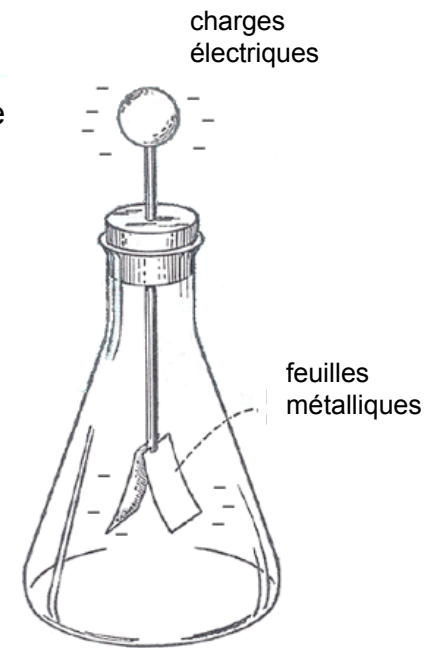
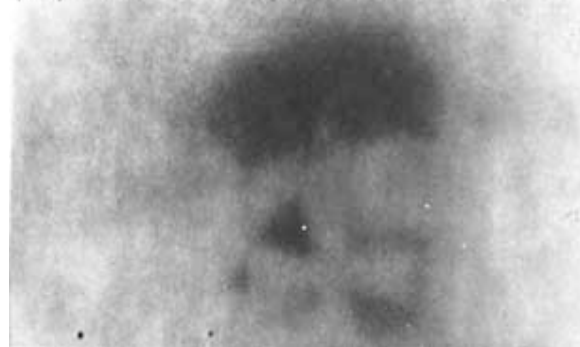
découverte d'un nouveau rayonnement émis par l'Uranium



Henri Becquerel



*40 - 1700 - 96. Sulfate double d'uranyle et de Potasse...
Papier noir. Couvré de l'autre côté...
Exposé au soleil le 27. et dans l'obscurité le 28. -
Ninetyfour' 6 1700.*



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

Des rayons uraniques à la radioactivité

1898 Marie & Pierre Curie

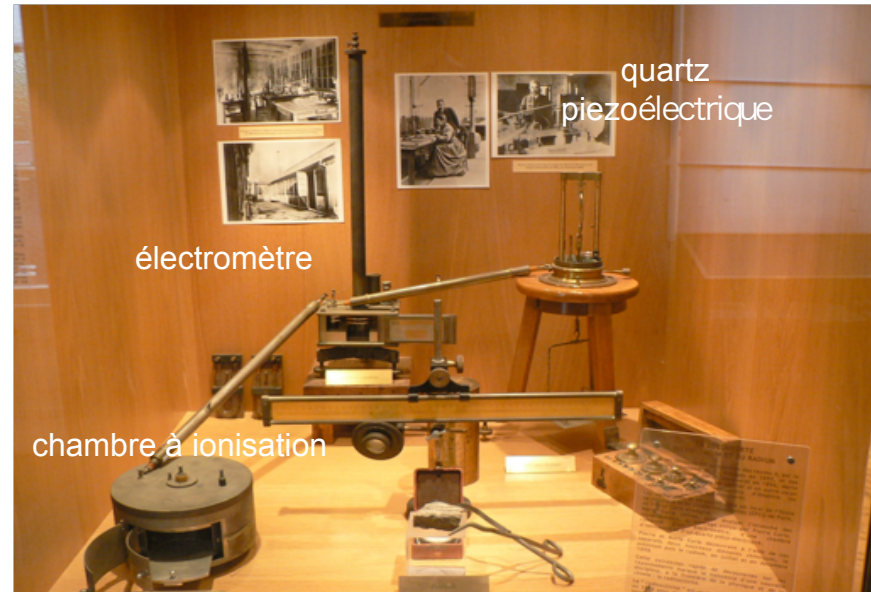
extraction du polonium et du radium



Marie Curie



Pierre Curie



M. Curie appelle le rayonnement:
'radioactivité'



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

La radioactivité est multiple

1898 E. Rutherford

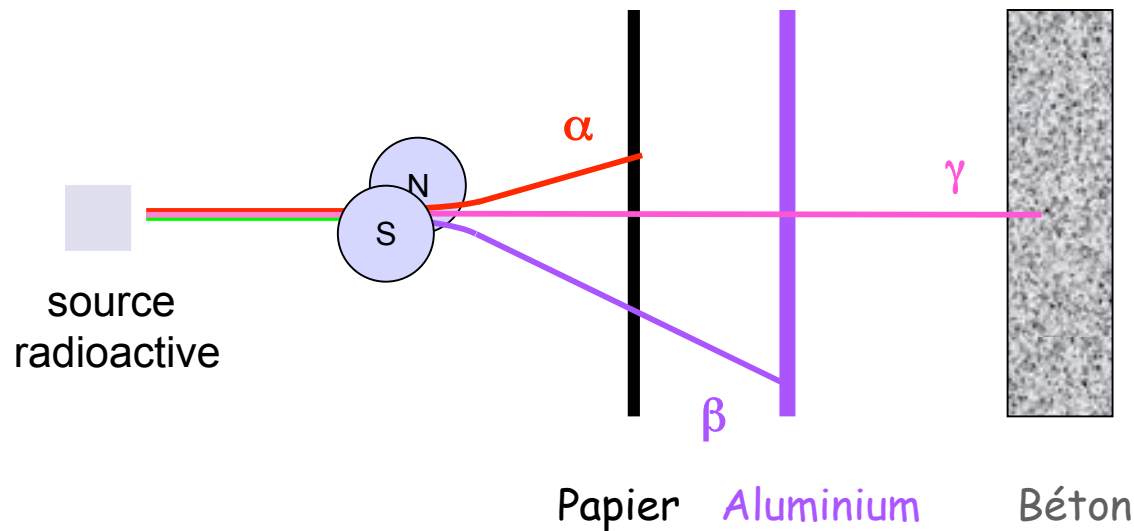
rayonnement alpha, beta

1900 P. Villard

rayonnement gamma



Ernest Rutherford



α = ion d'hélium He^{2+}

β = e^- de grande énergie

γ = photons - comme les X

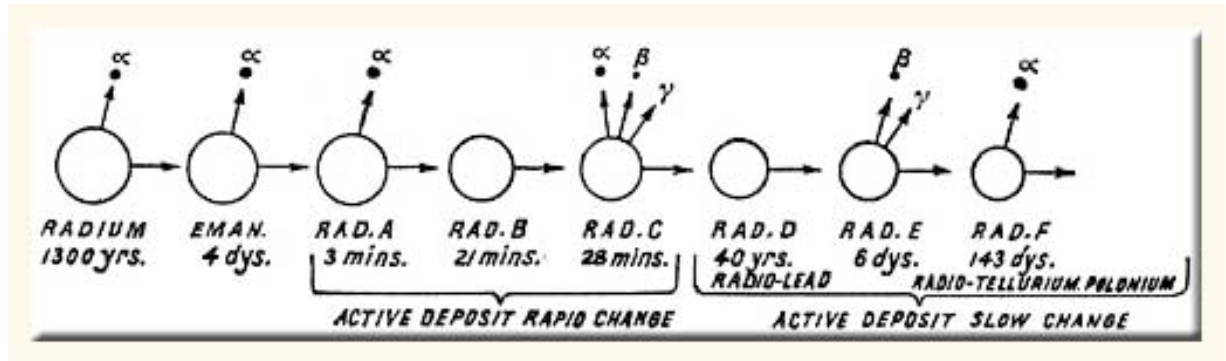
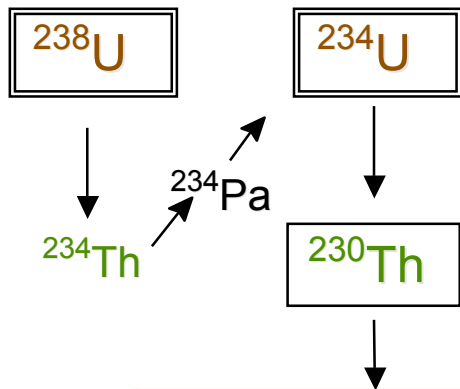


Paul Villard

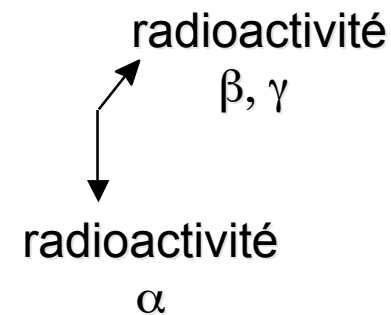
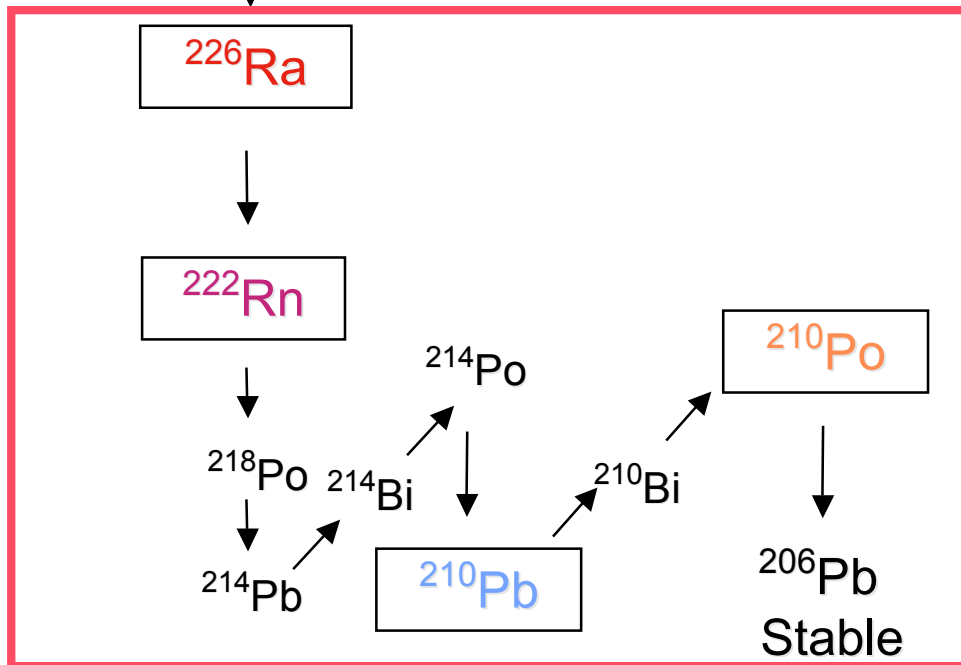
Les atomes se transforment !

1902 E. Rutherford & F. Soddy

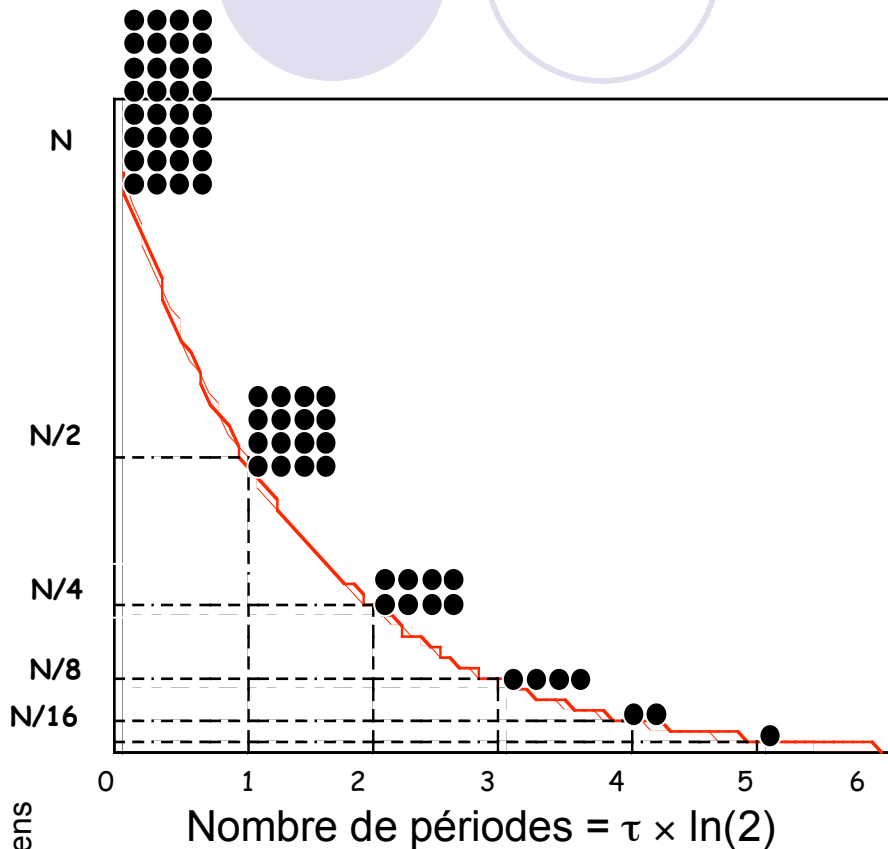
transmutation des atomes



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



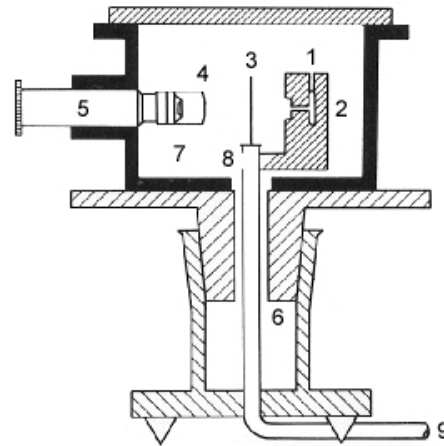
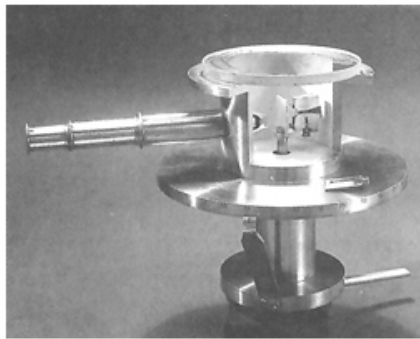
1903: Pierre Curie et son collaborateur Albert Laborde annoncent que le radium dégage en permanence tant de chaleur qu'il peut faire fondre plus que son poids de glace en 1 heure.

D'où vient l'énergie des rayonnements ?

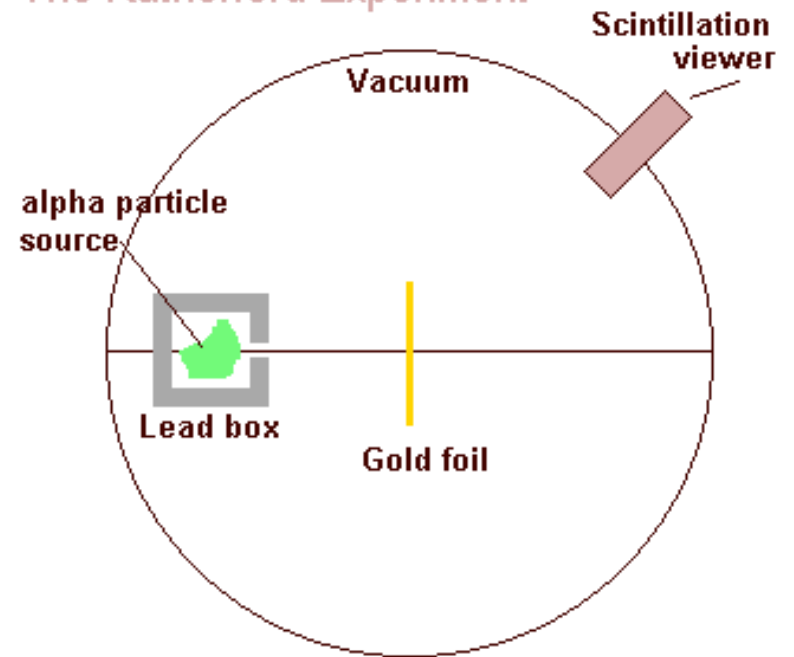
« Il y a tout lieu de croire que les atomes des éléments radioactifs renferment une énorme quantité d'énergie latente... Si on parvenait à contrôler la vitesse à laquelle se désintègrent ces éléments, une petite quantité de matière libèrerait une masse colossale d'énergie. »

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

La diffusion de particules alpha



The Rutherford Experiment

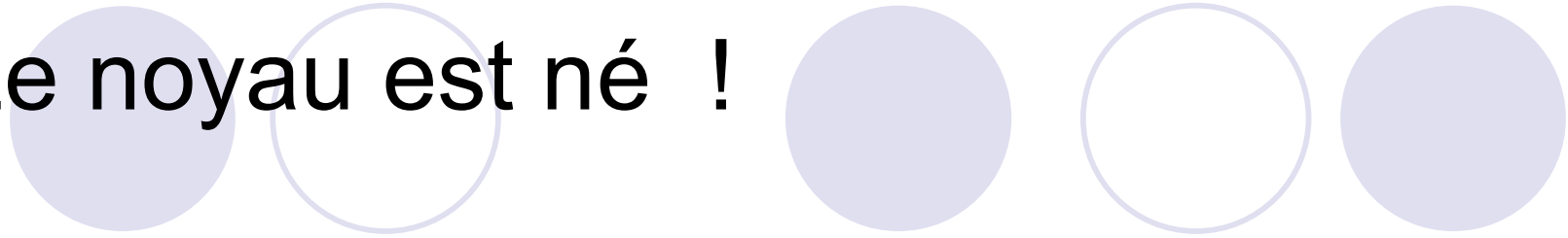


©1999 Science Joy Wagon

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

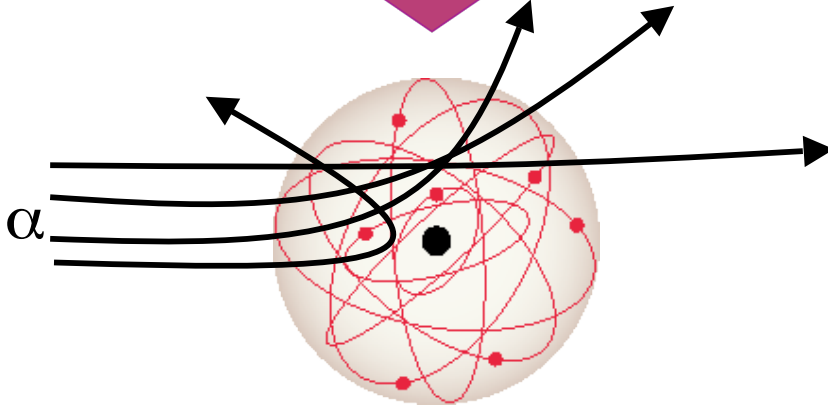
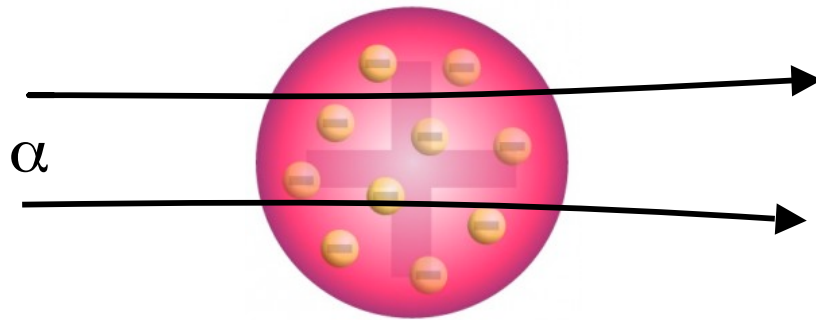
« C'est aussi peu croyable que si nous avons tiré un obus sur du papier de soie et que l'obus nous soit revenu en pleine figure ! »

Le noyau est né !

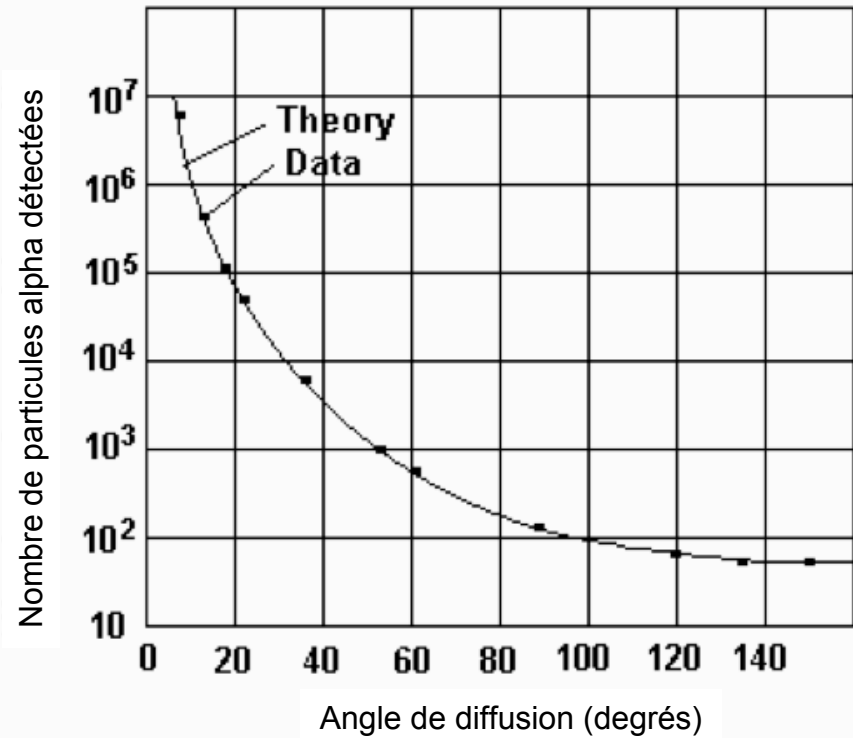


Modèle 'plum pudding'

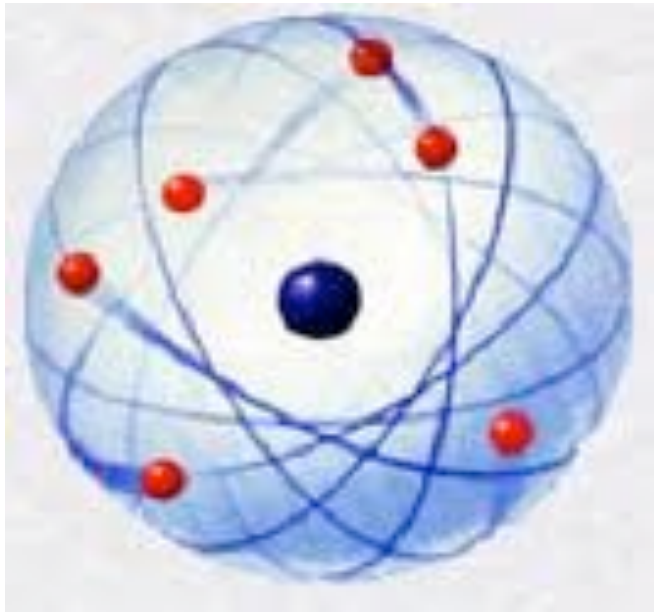
Philosophical Magazine Series 6,
vol. 21 May 1911, p. 669-688



Modèle nucléaire



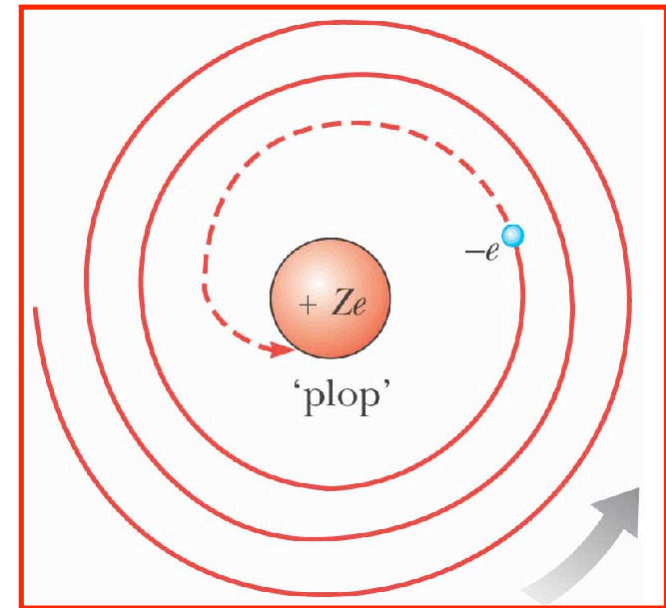
Conséquences du modèle de Rutherford



10^{-14} m

10^{-10} m

La matière est vide !



l'atome est instable !

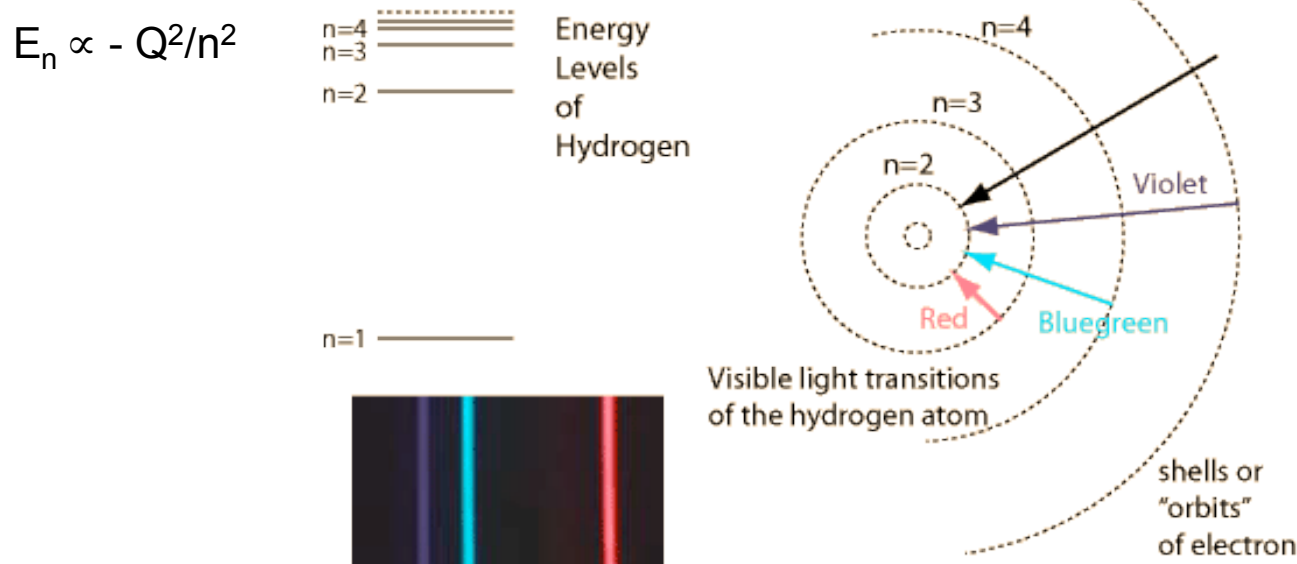
Bohr résout le problème avec les quantas de Planck

- 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

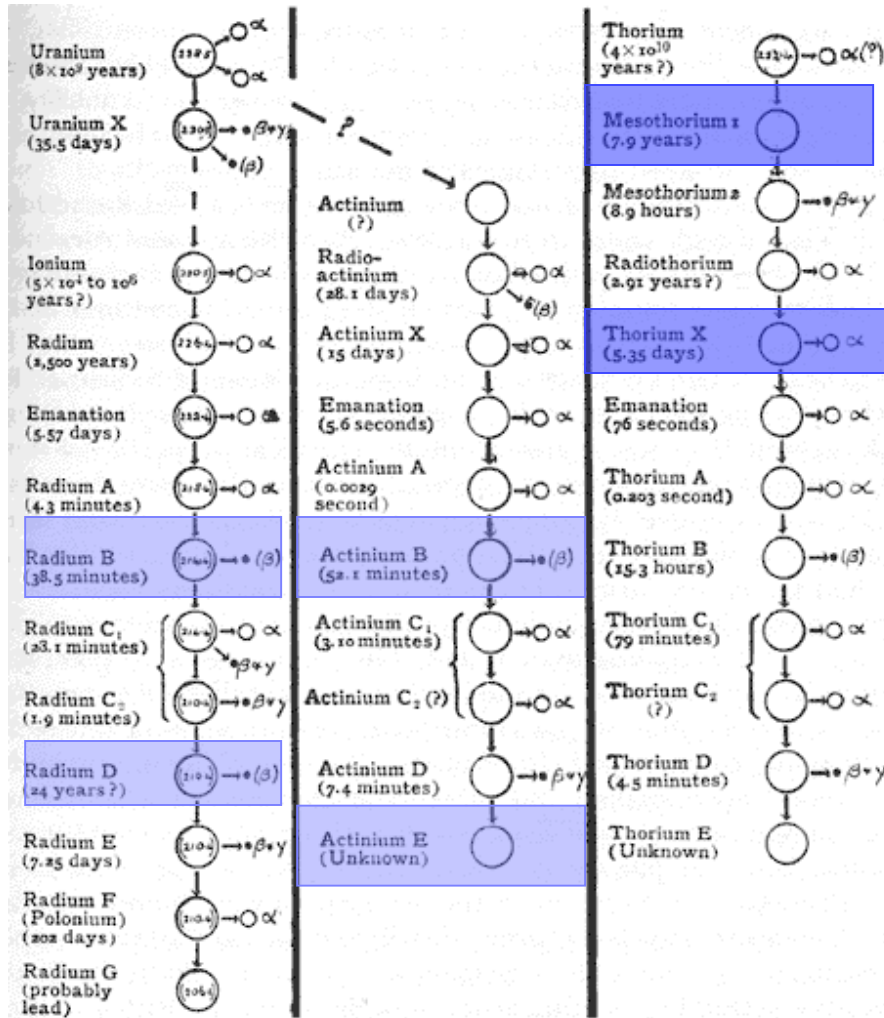
Philosophical Magazine 26, 1-25 (1913)



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

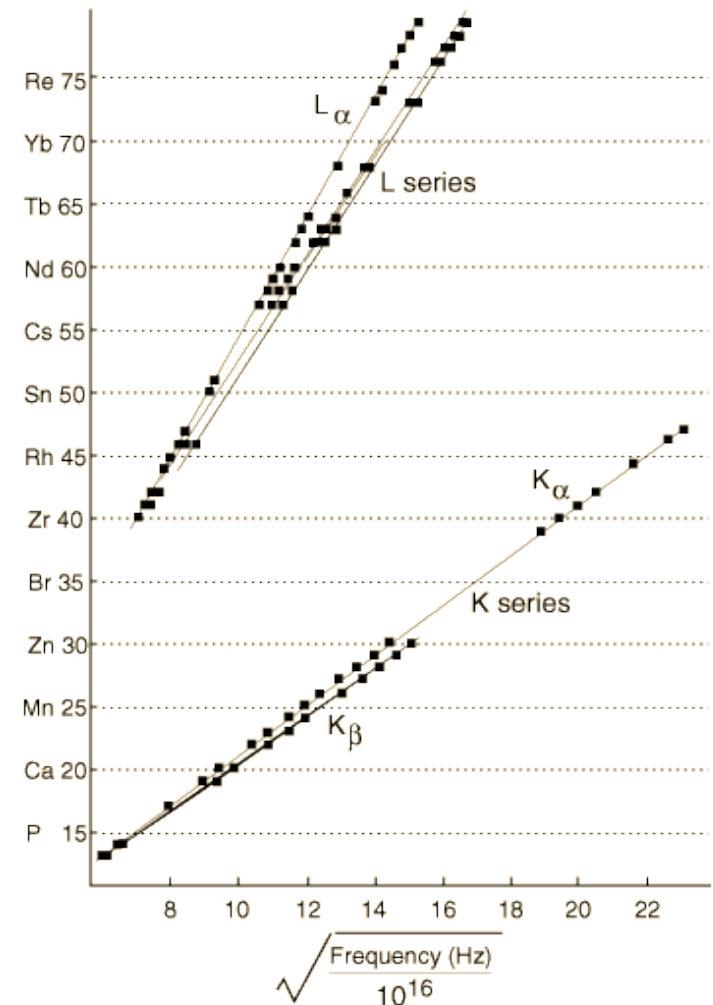
Problème: seules 7 cases inoccupées dans le tableau périodique entre Bi et U !

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



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

1914 Henry Moseley

Mesure de la fréquence du rayonnement haute fréquence de nombreux éléments

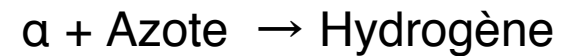
⇒ numéro atomique Z = charge du noyau

⇒ périodicité du tableau comprise en termes de remplissage de couches électroniques

Les alchimistes du 20^{ème} siècle

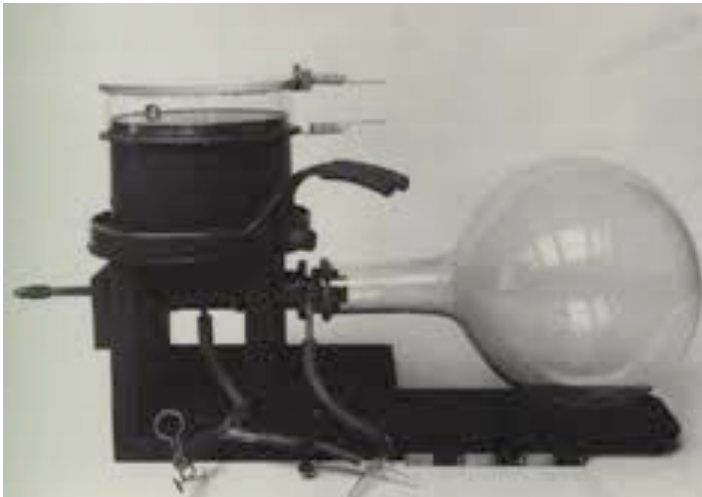
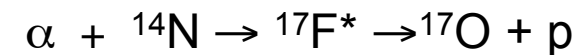
1919 E. Rutherford

1^{ère} transmutation en laboratoire

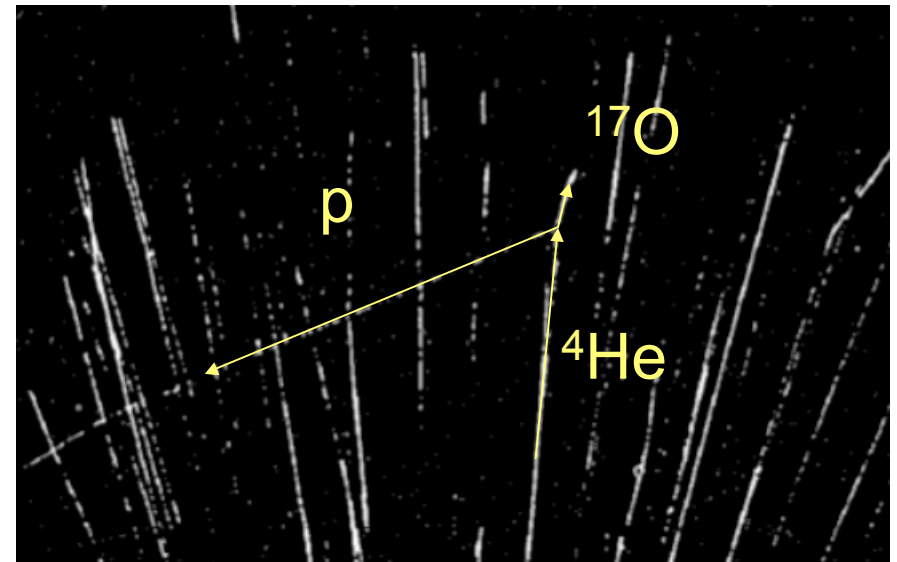


Rutherford appelle H^+ proton

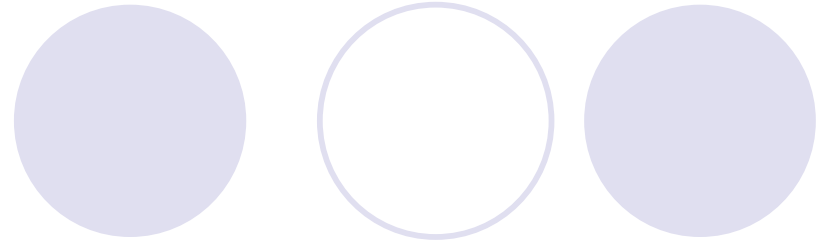
1924 P. Blackett visualise la transmutation



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



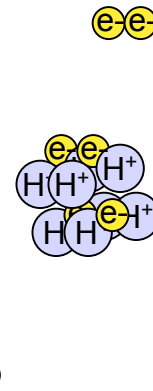
Structure du noyau



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

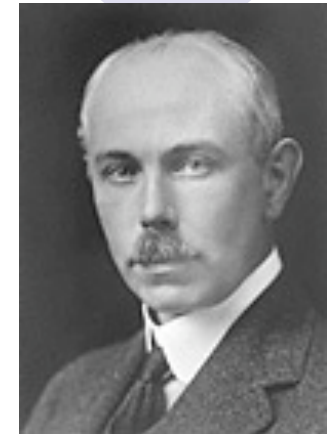
E. Rutherford suggère l'existence d'une paire e^-p qui aurait toutes les caractéristiques d'une particule neutre

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

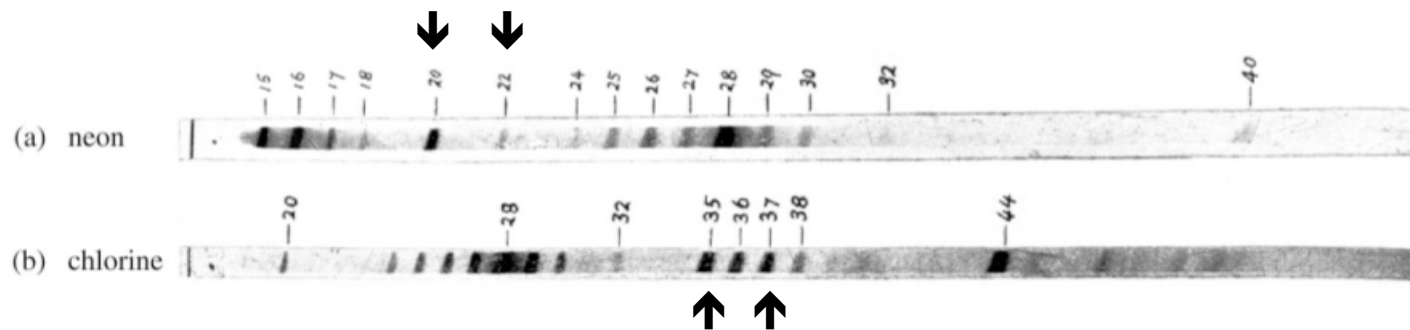


Cette information passe inaperçue du reste du monde, sauf à Cambridge au Cavendish Laboratory où E. Rutherford est nommé directeur...

Les débuts de la spectrométrie de masse



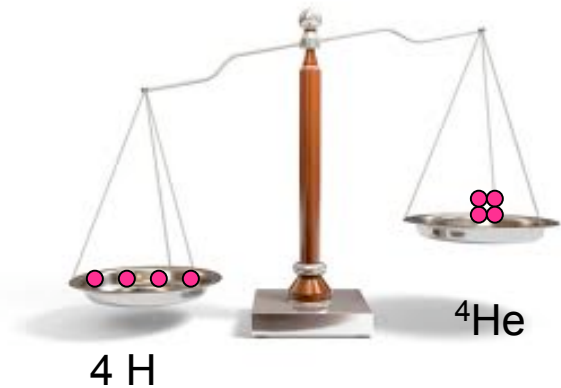
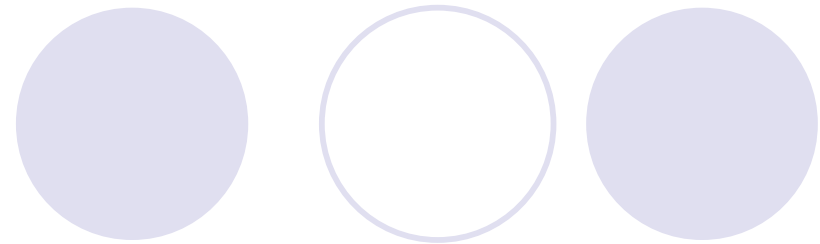
Francis Aston



1919: F. Aston vérifie le concept d'isotope et mesure des abondances isotopiques

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

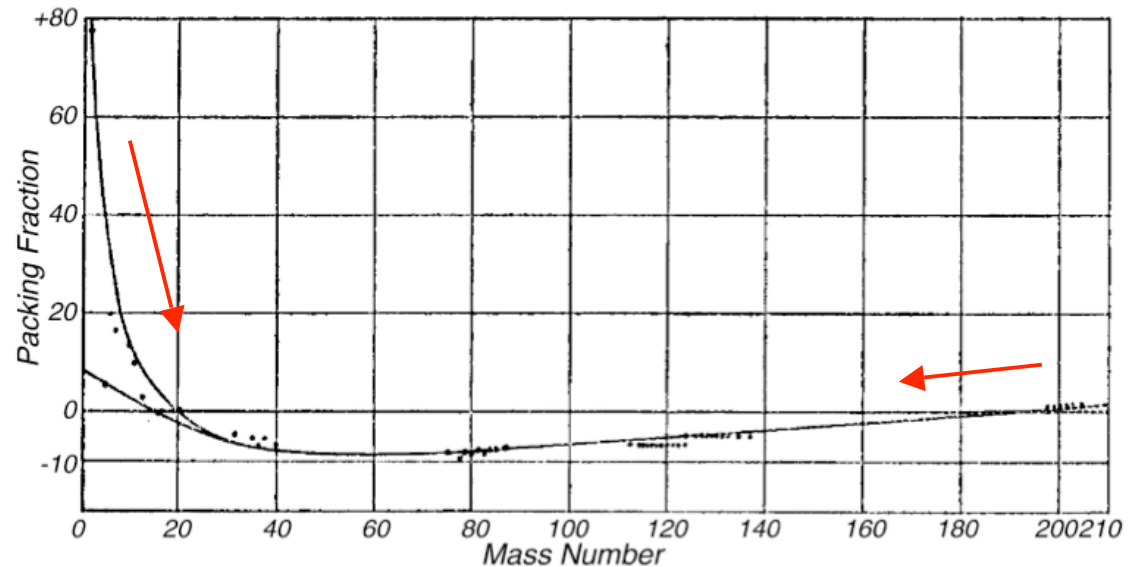
Excès de masse



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

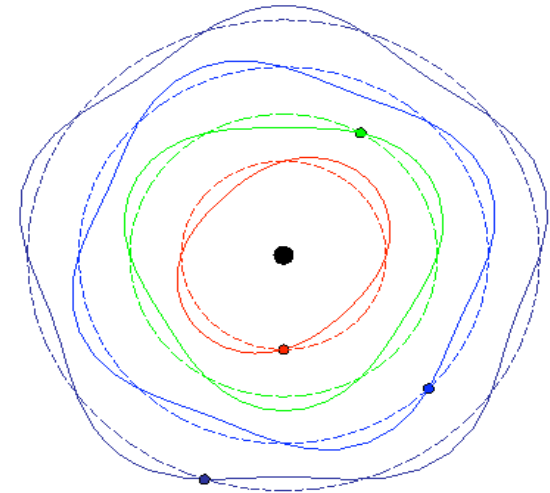
'packing fraction' = $10\,000 (M - A)/A$



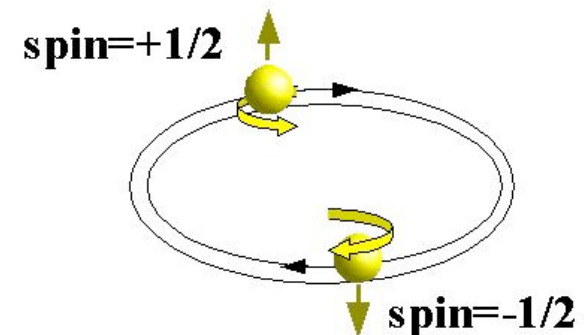
Développement de la Mécanique Quantique



1924: L. de Broglie émet l'hypothèse des ondes de matière et réinterprète la condition de Bohr comme étant la condition d'une résonance d'une onde stationnaire

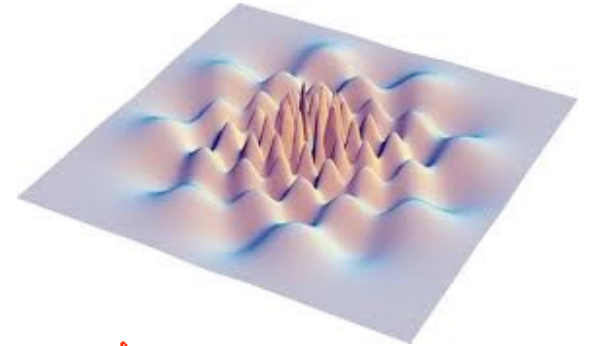


1924-1925: W. Pauli énonce le 'principe d'exclusion' selon lequel pas plus d'un électron ne peut occuper le même état quantique et postule l'existence d'une nouvelle propriété de l'électron

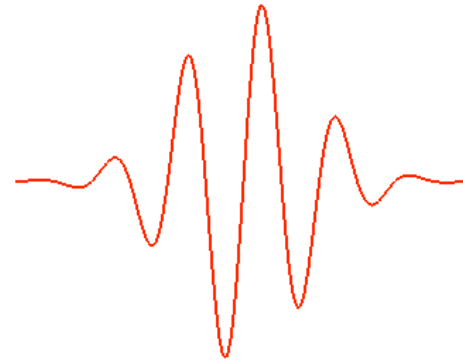


1925: G. Uhlenbeck et S. Goudsmit suggèrent que la nouvelle propriété est le spin

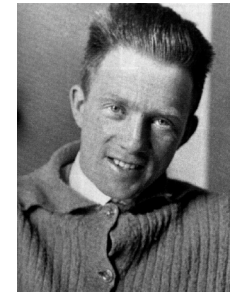
La fonction d'onde



1926 : E. Schrödinger décrit l'évolution des ondes de matière



1926: W. Heisenberg émet le Principe d'incertitude: "Plus la position est déterminée précisément, moins l'impulsion est connue précisément et vice-versa. "



M. Born concilie les notions de particule et d'onde: L'onde est un outil de prévision probabiliste du comportement de la particule

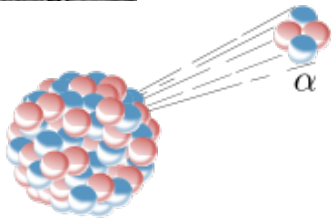


La radioactivité α expliquée

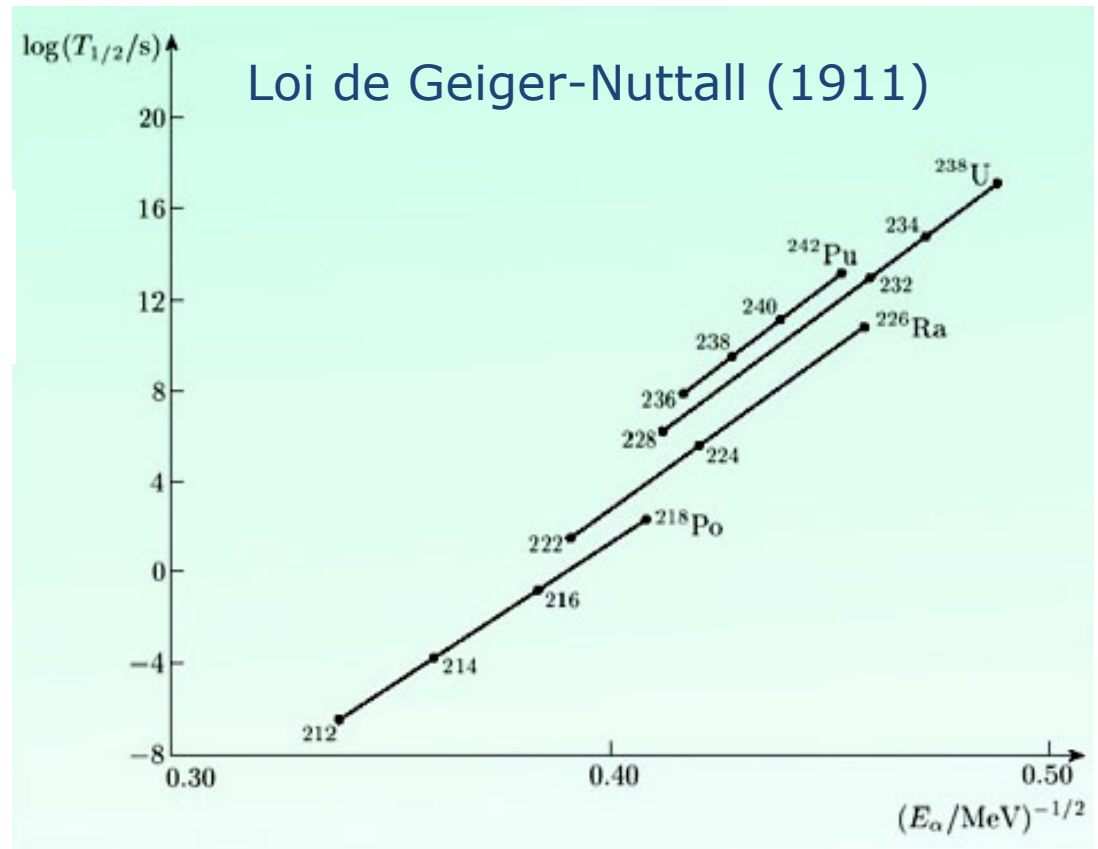
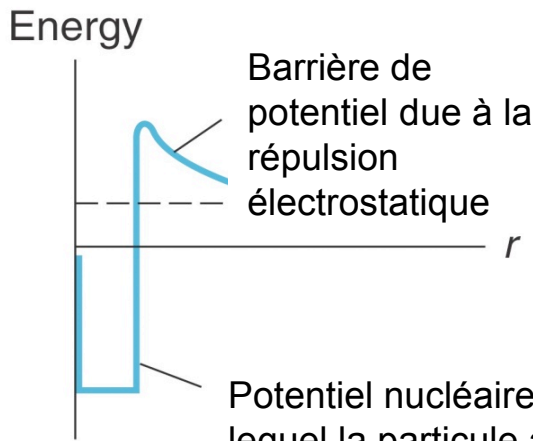


1928:

G. Gamow propose un modèle de la radioactivité α basé sur la Mécanique Quantique



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



L'Antimatière

Relativité Restreinte

Mécanique Quantique

électron relativiste



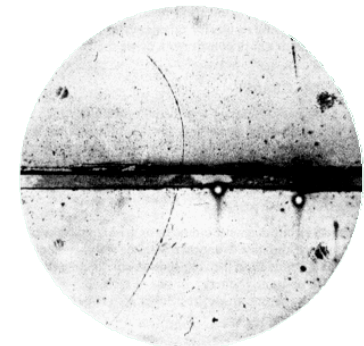
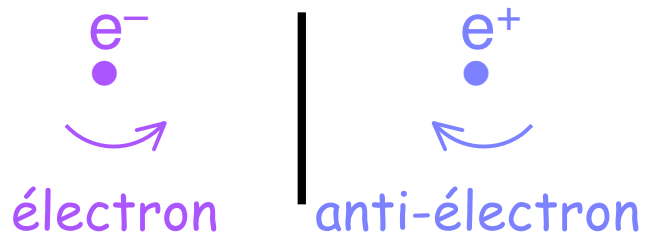
1929 : Equation de Dirac

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

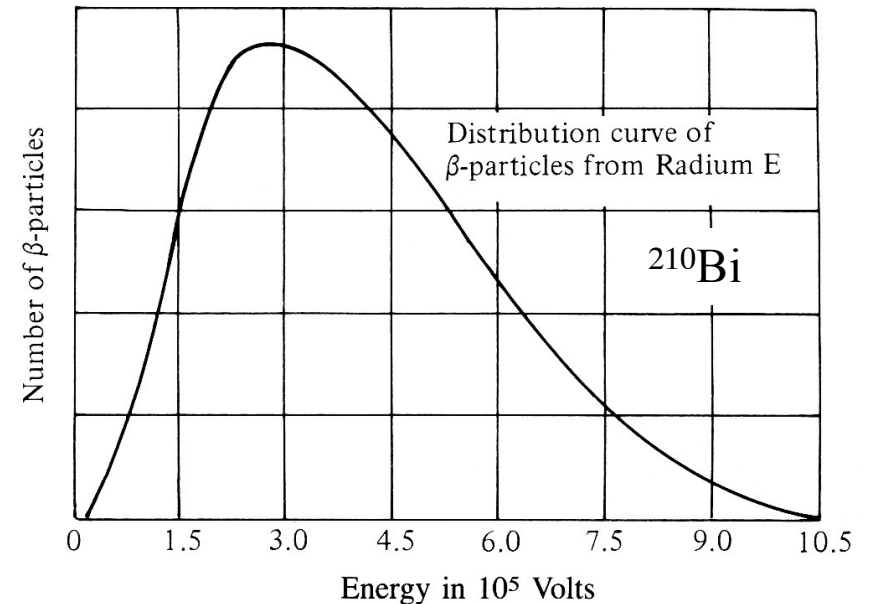


Radioactivité β et l'hypothèse du neutrino

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 ?



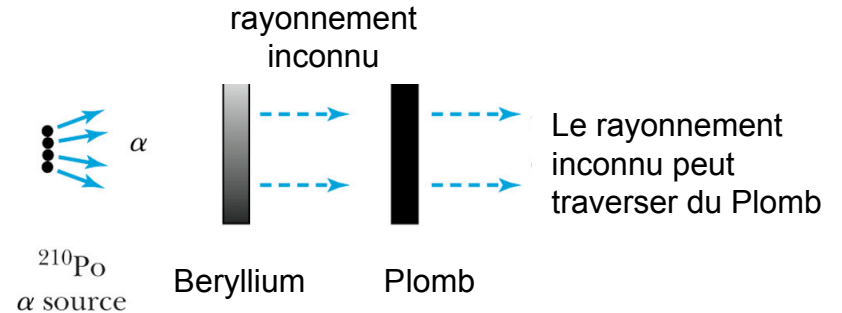
Chadwick à Rutherford: “Je ne trouve pas l'ombre d'une raie. Il y probablement une erreur stupide quelque part...!”

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^-

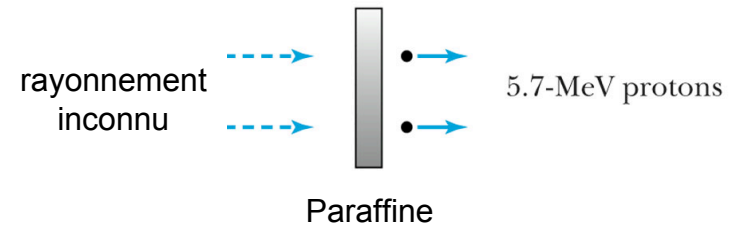
Découverte du neutron

1930-32

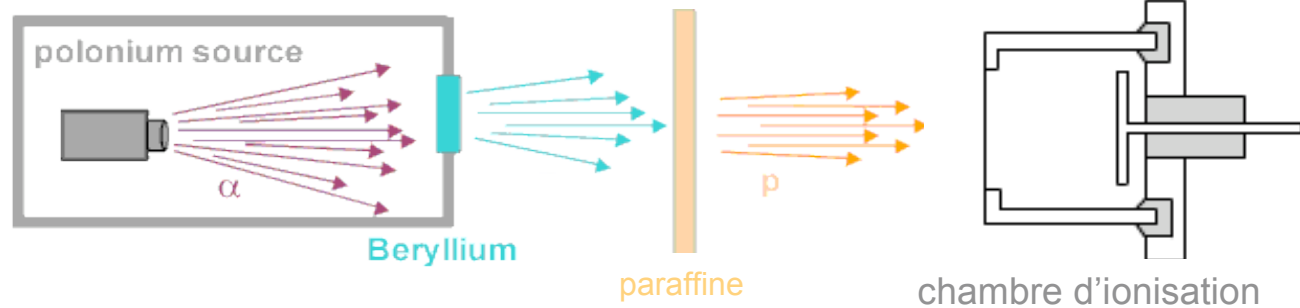
W. Bothe & H. Becker
découvrent une étrange
réaction



I. Curie & F. Joliot
observent l'éjection
de protons



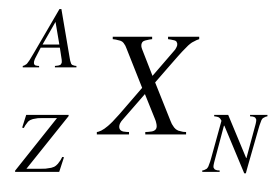
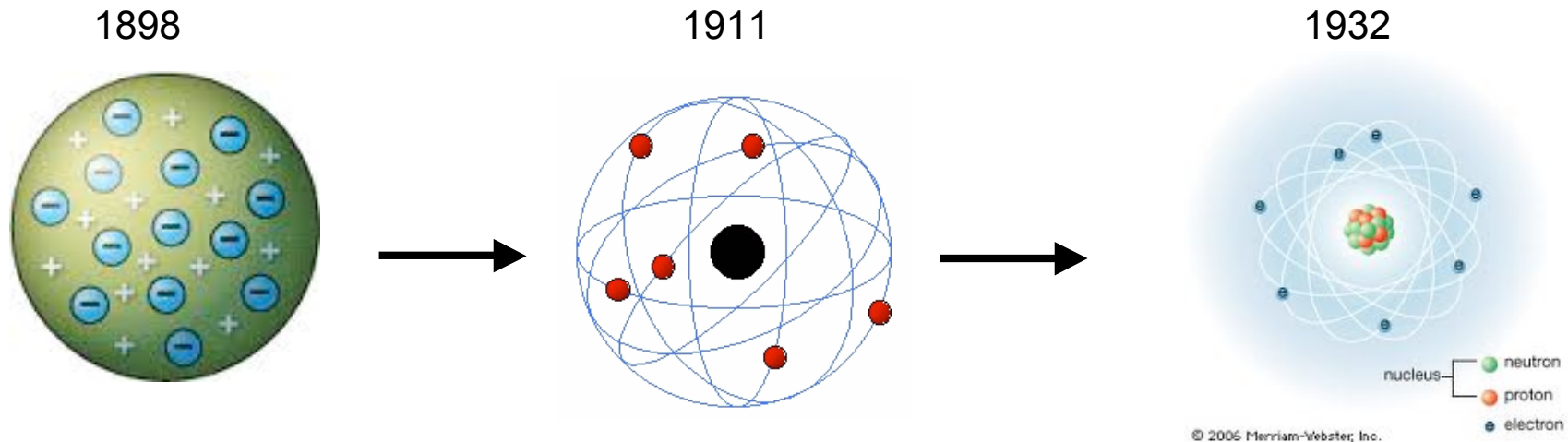
James
Chadwick



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

Le noyau au complet

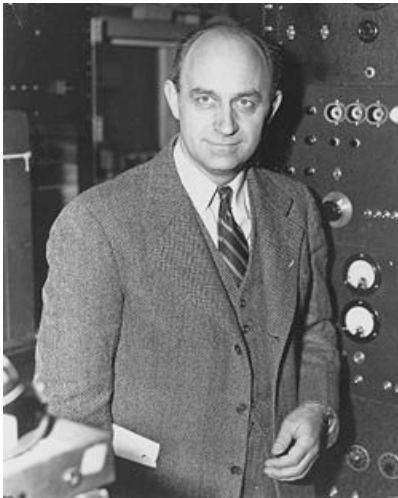
1932: D. Ivanenko, W. Heisenberg et E. Majorana : le noyau est composé de Z protons et N neutrons



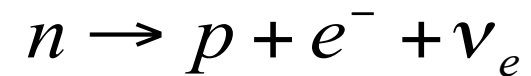
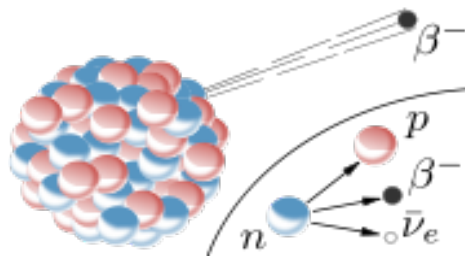
La présence des neutrons dans le noyau explique l'isotopie et résout certains problèmes de spin, moment magnétique et confinement des e⁻

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 et un électron avec émission d'une particule qu'il appelle 'neutrino'

Des accélérateurs pour sonder le noyau

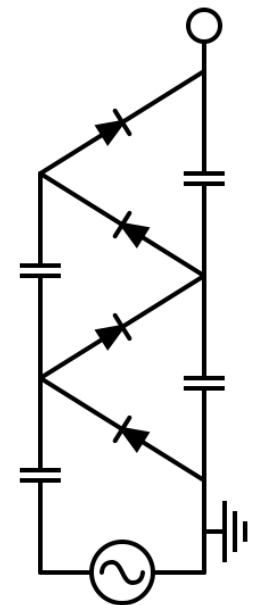


Ernest Walton, Ernest Rutherford, John Cockcroft

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

SFP2011, A. Lopez-Martens

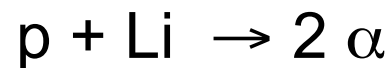
Nature 129, Février 1932, 242



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:

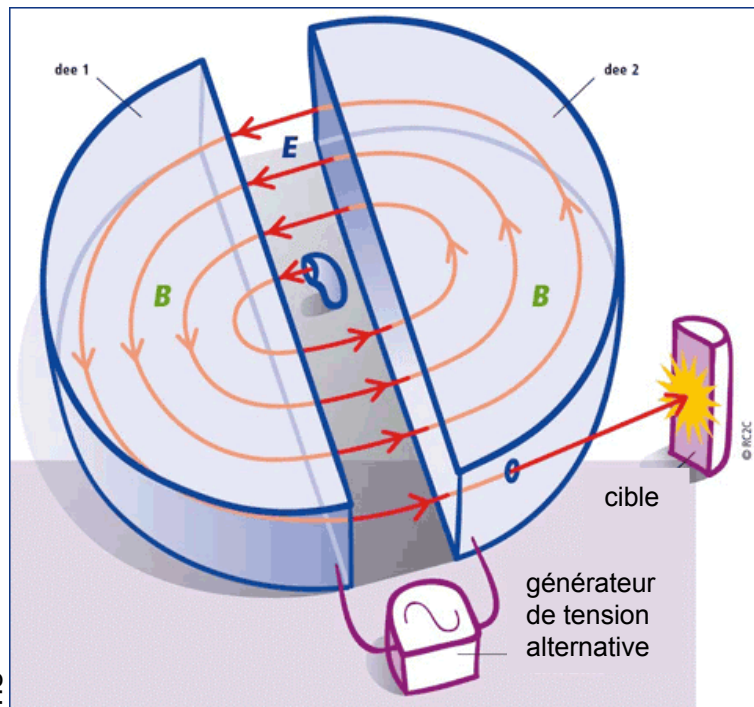


L'énergie des 2 particules alpha est mesurée: **~17 000 keV**

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

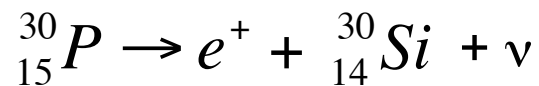
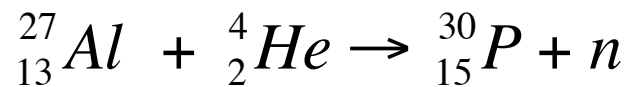
*W. Heisenberg, Congrès de Solvay 1933 d'après une idée
originale de G. Gamow (Proc. Roy. Soc. 126 (1930) 637)*



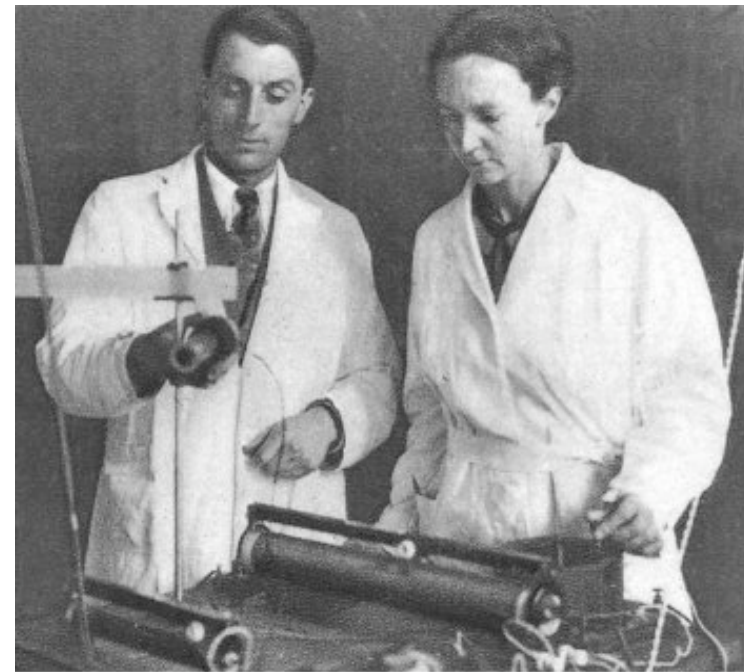
Radioactivité artificielle

1934 I. Curie et F. Joliot

découverte de la radioactivité artificielle



radio-phosphore !



Irène Curie et
Frédéric Joliot

Library of Congress

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

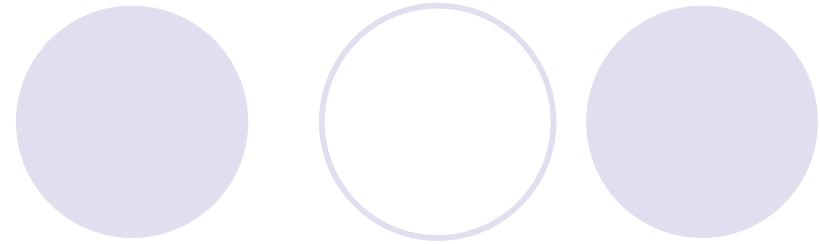
Éléments artificiels

1937: E. Segrè et C. Perrier découvrent l'élément Z=43, qu'ils appellent Technétium

Tableau Périodique (1939)

IA																												VIII A									
1	H	IIA																										2	He								
3	Li	4	Be																	5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne						
11	Na	12	Mg	IIIB		IVB		VB		VIB		VIIB		VIII		VIII		VIII		IB		IIB		13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar		
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr		
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe		
55	Cs	56	Ba	57	La	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn		
87	Fr	88	Ra	89	Ac	1945																1940															
					58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb	71	Lu					
					90	Th	91	Pa	92	U																											

L'ère du neutron

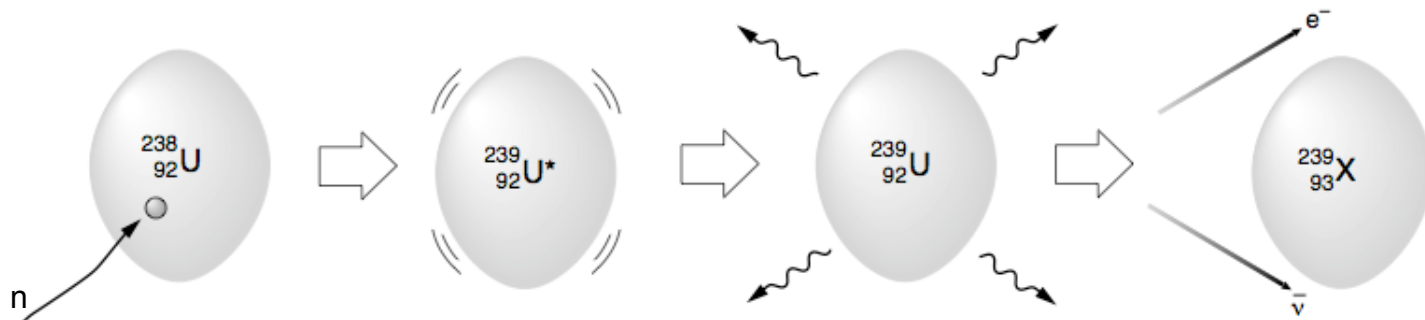


1934 E. Fermi propose de bombarder des matériaux avec des neutrons

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)

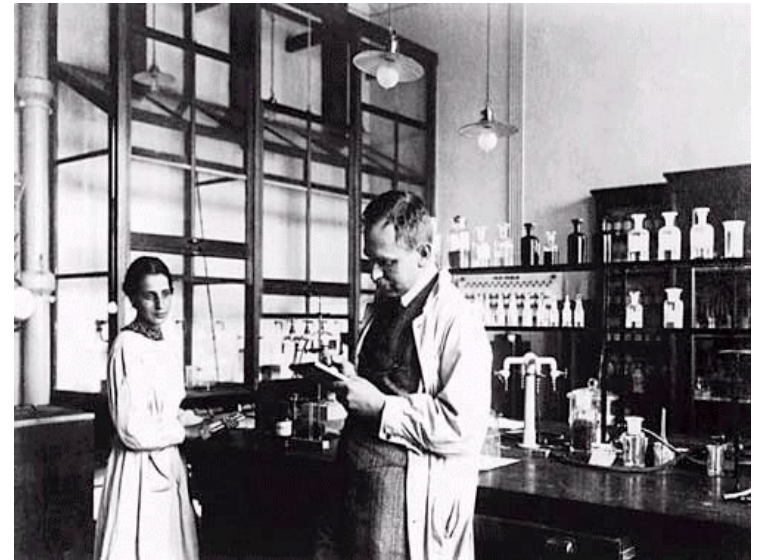


La quête des transuraniens...

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

Irène Curie et Pavel Savitch annoncent avoir identifié un élément similaire au Lanthane (Actinium, Transuranien ?)

1938 O. Hahn et F. Strassmann tentent d'expliquer les résultats français en faisant une analyse chimique détaillée - mais ils se heurtent à un problème de séparation



Lise Meitner et Otto Hahn (1918)

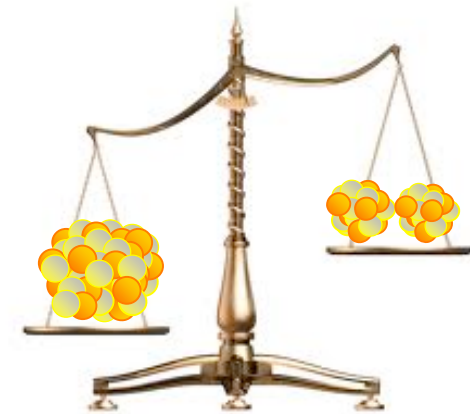
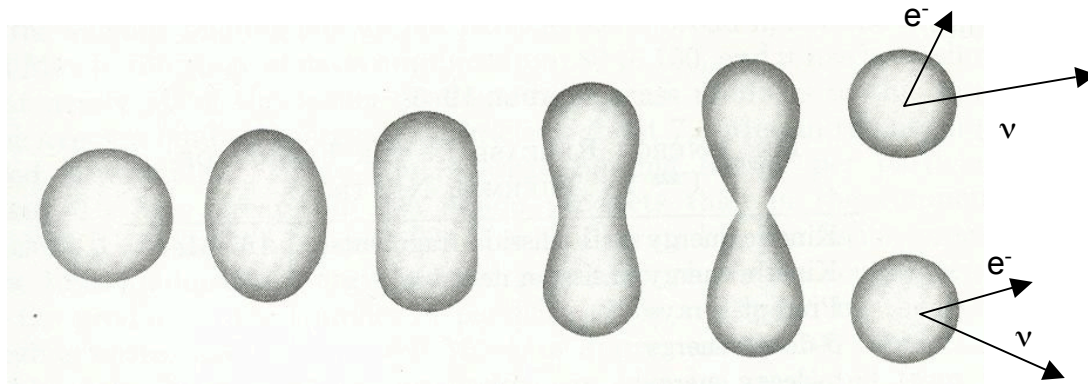
“Nous devons appeler Baryum, Lanthane et Cerium ce que nous avons appelé précédemment Radium, Actinium et Thorium. C’est une décision difficile qui contredit toutes les expériences de physique nucléaire menées jusqu’à présent.”

O. Hahn and F. Strassmann, *Naturwiss* 27 (1939) 11

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



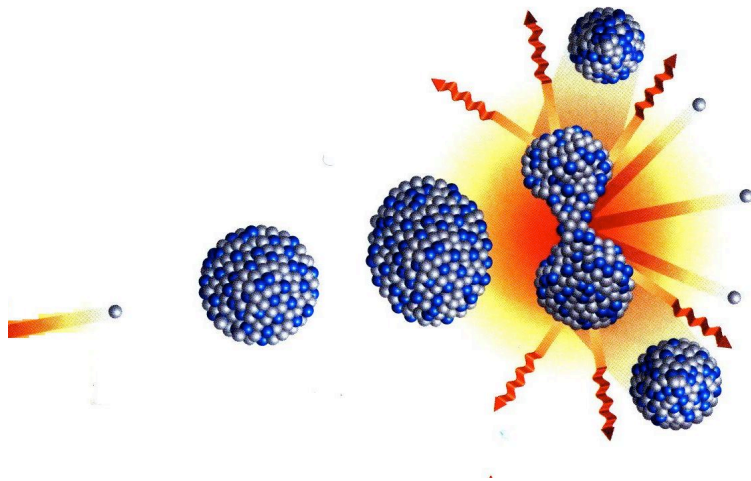
O. Frisch, Nature 143 (1939) 276

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

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

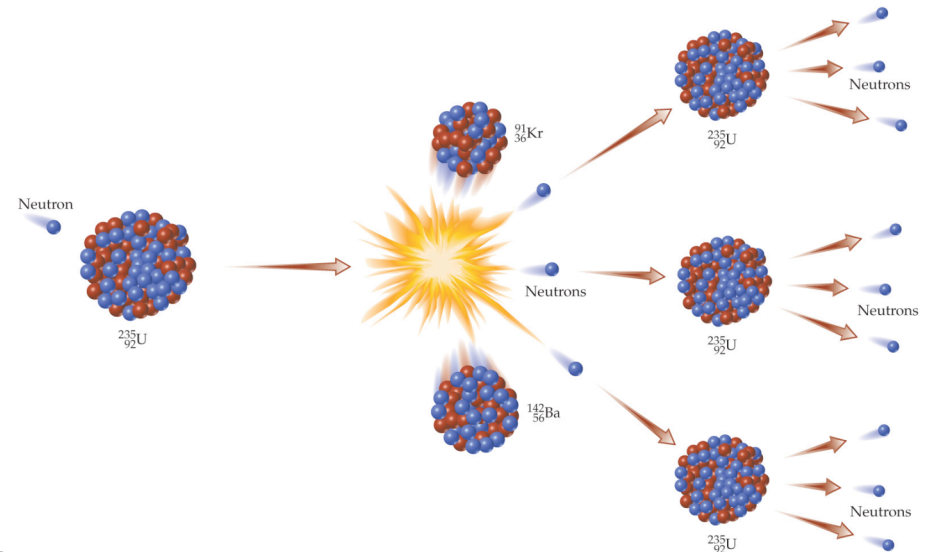
N. Bohr et A. Wheeler, Phys. Rev. 56 (1939) 426

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 pour obtenir une réaction en chaîne.
Des brevets sont déposés

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

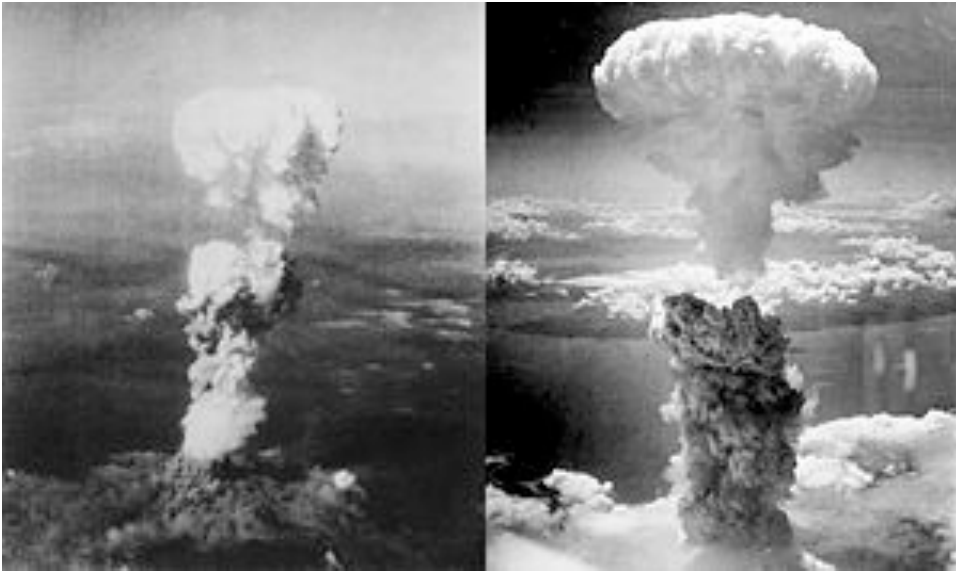
Leo Szilard fait signer à A. Einstein une lettre au président Franklin D. Roosevelt en 1939 sur la possibilité d'une bombe atomique.



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



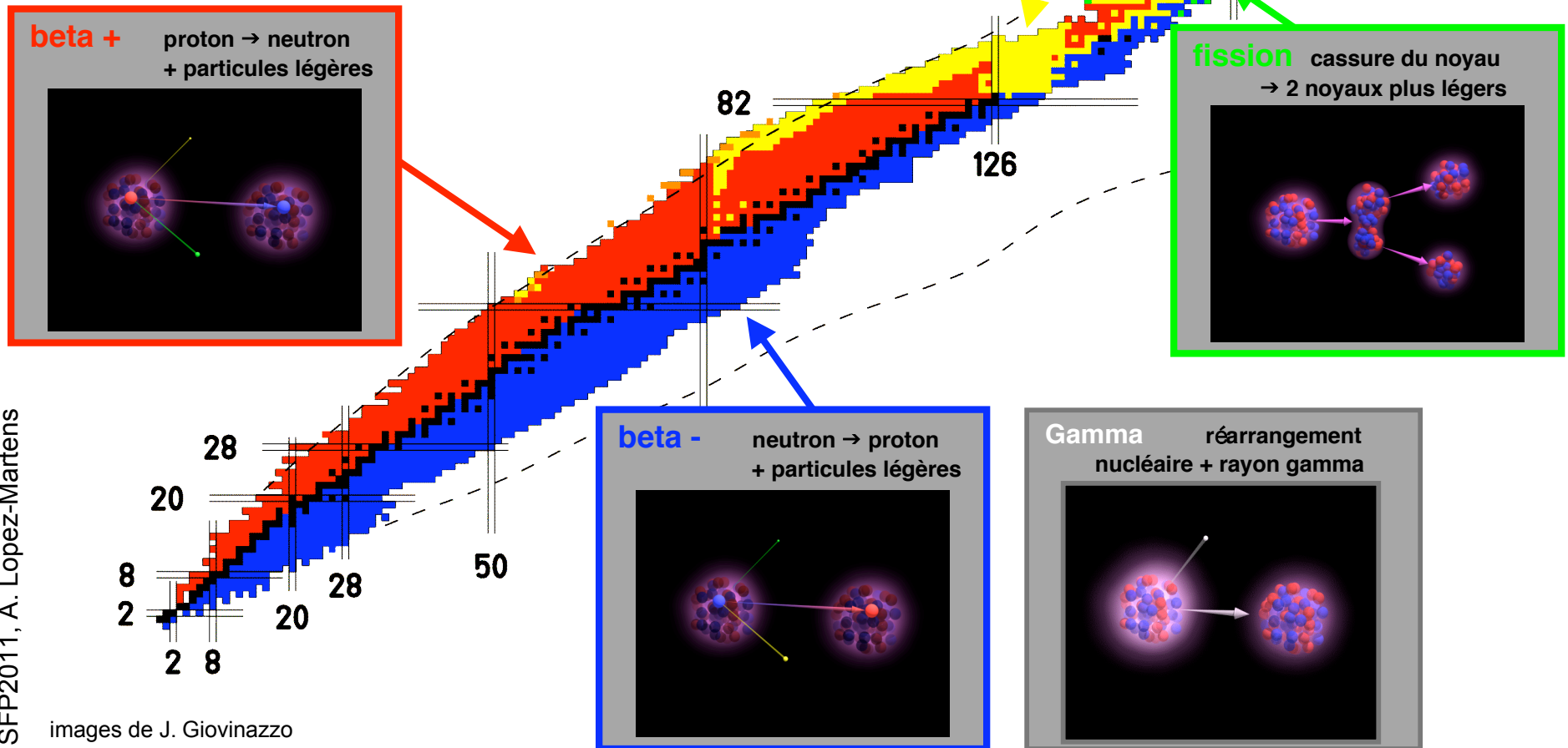
1951: Première production d'électricité nucléaire à EBR-I dans l'Idaho (USA)

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



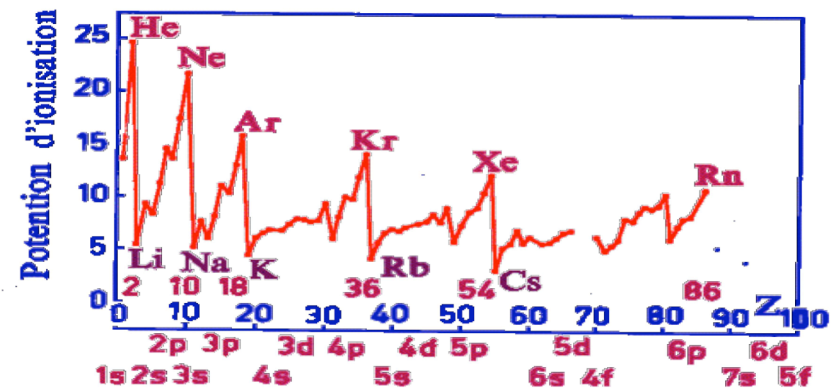
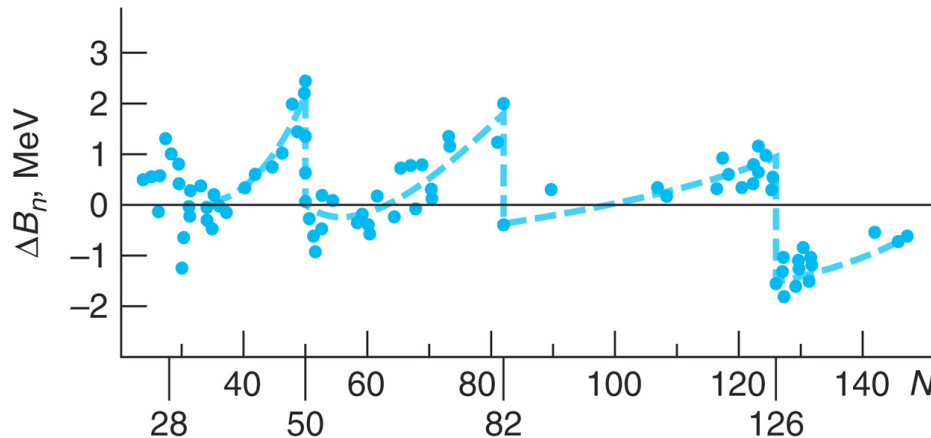
Nombres Magiques

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



Maria G. Mayer

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

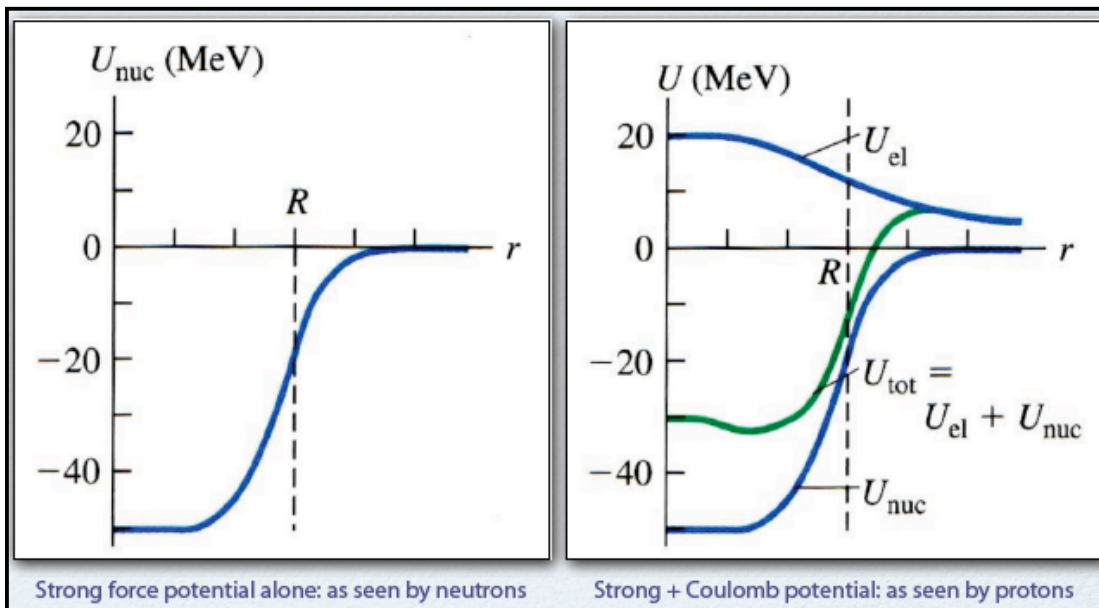


⇒ structure périodique dans le noyau ?

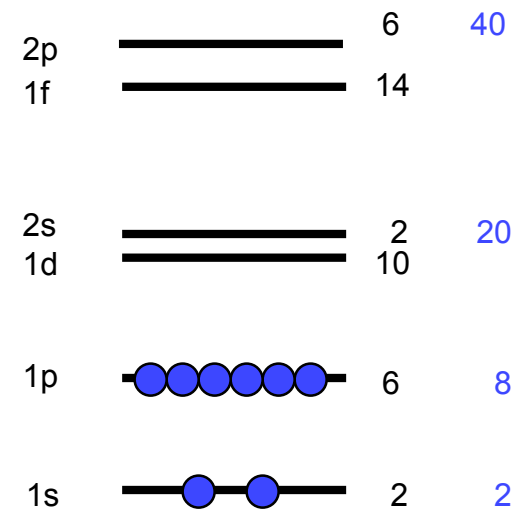
'On closed shells in nuclei', *M G. Mayer Phys. Rev. 74 (1948) 235*

La mécanique quantique ne reproduit pas ces nombres...

potentiel nucléaire moyen ressenti par les nucléons



niveaux d'énergie



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

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

La question qui fait tilt !

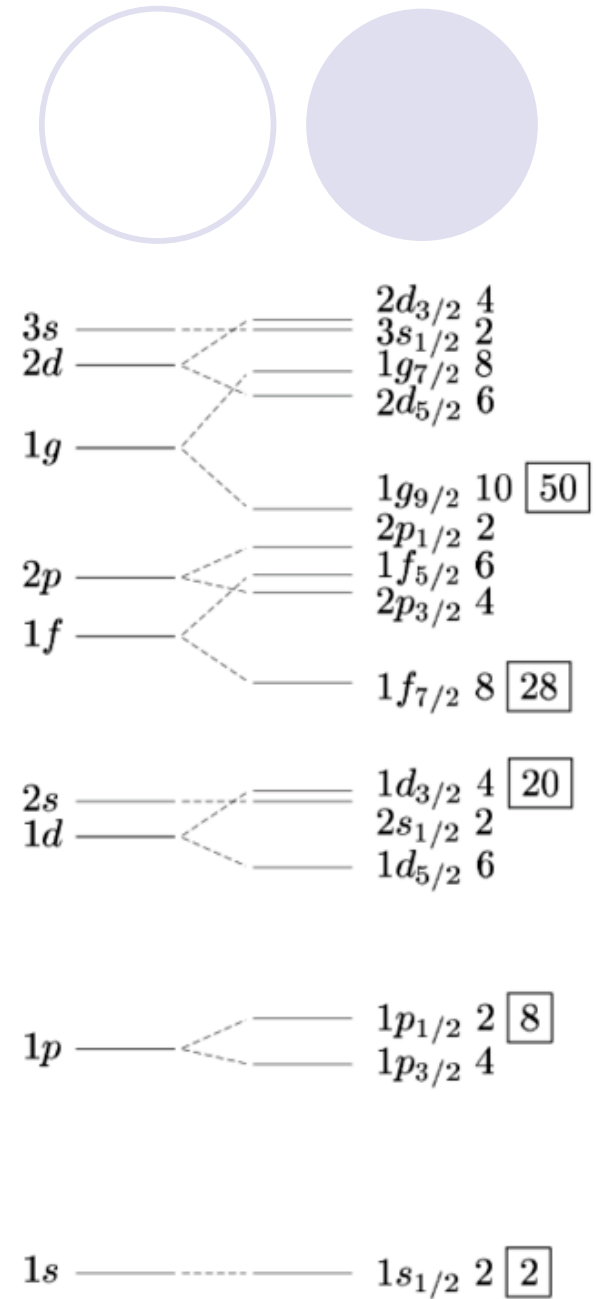
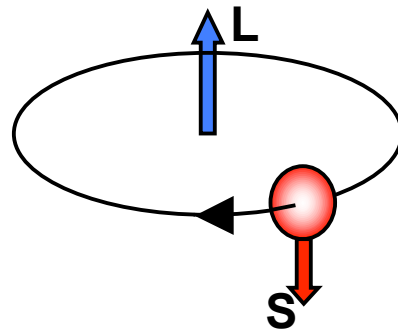
Thanks are due to Enrico Fermi for the remark, "Is there any indication of spin-orbit coupling?" which was the origin of this paper.

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

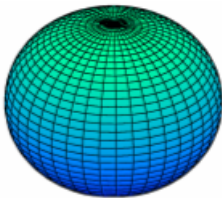
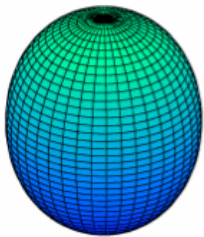


Hans Jensen

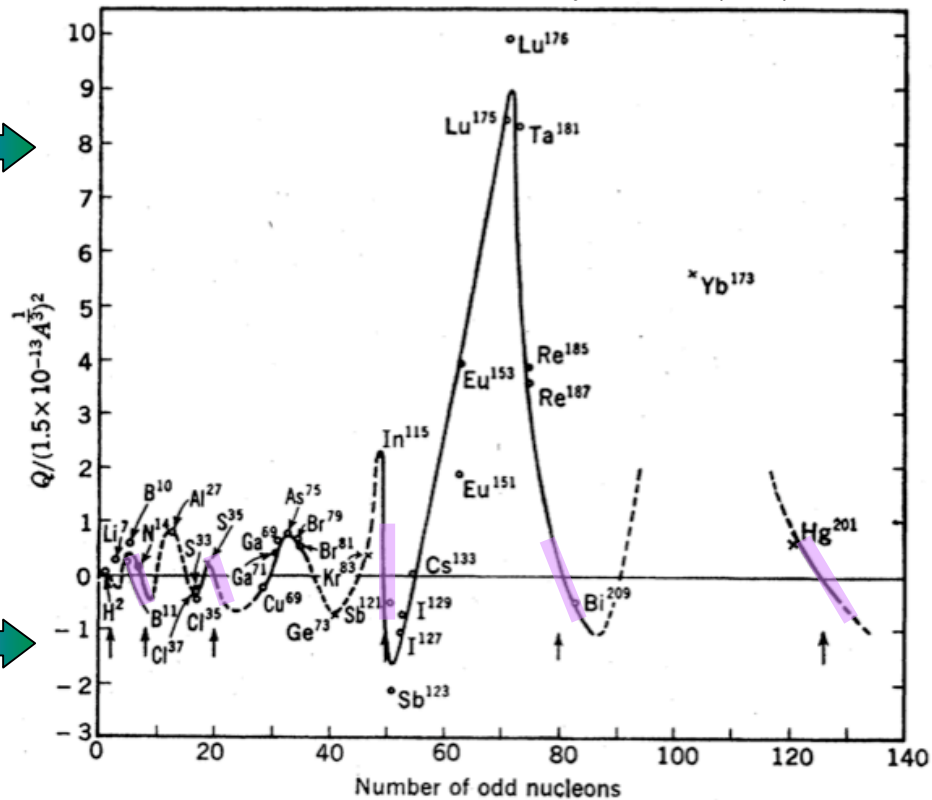
M.G. Mayer et H.D. Jensen 'Elementary Theory of Nuclear Shell Structure', 1955



Distribution de charge dans le noyau



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



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

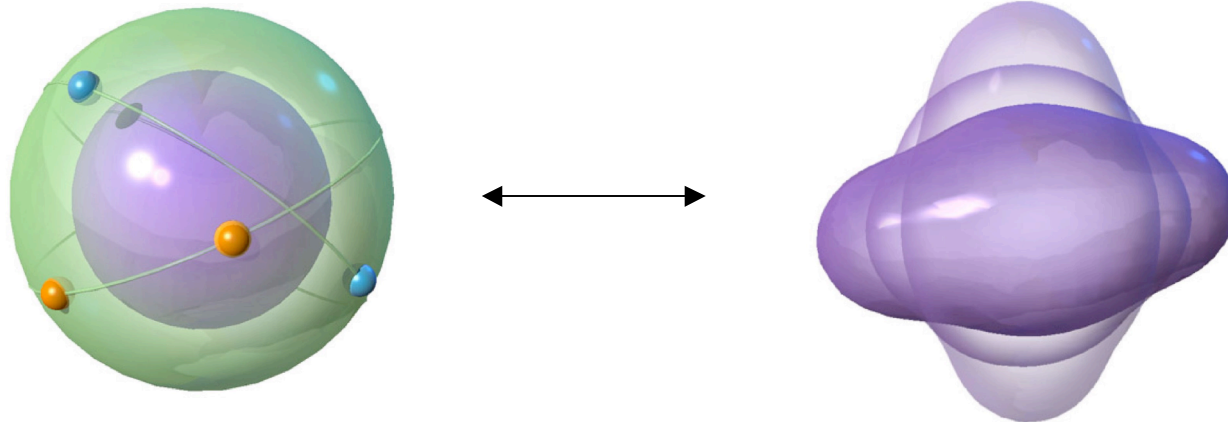
Et si le noyau gagnait à se déformer....?



James Rainwater

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

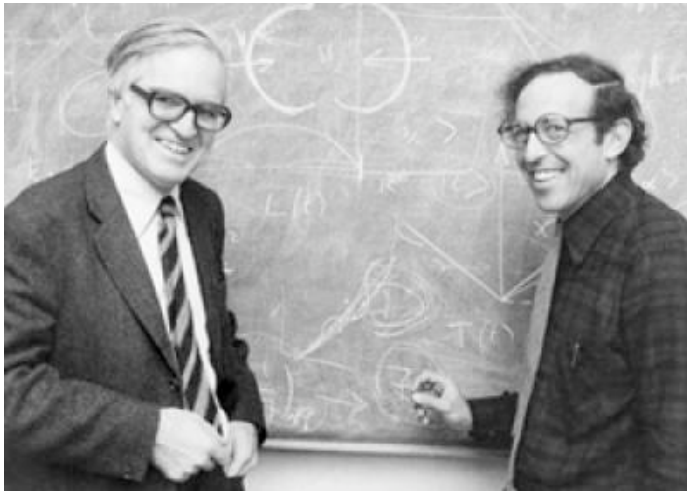
J. Rainwater, Phys. Rev. 79 (1950) 432



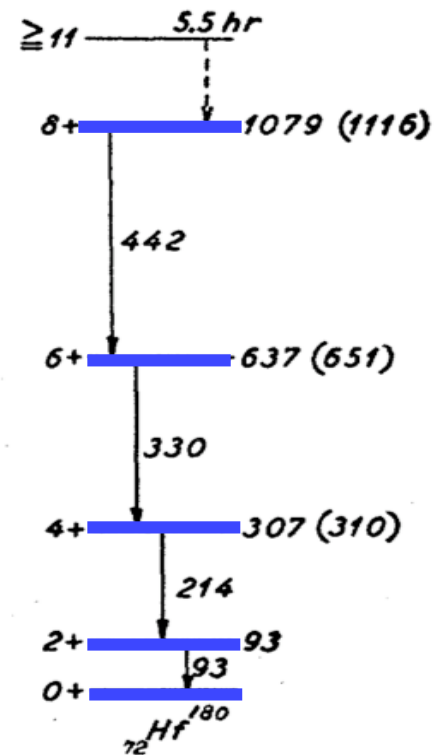
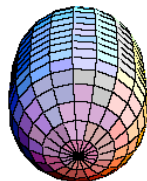
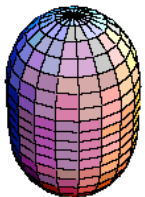
Etats individuels et collectifs du noyau

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

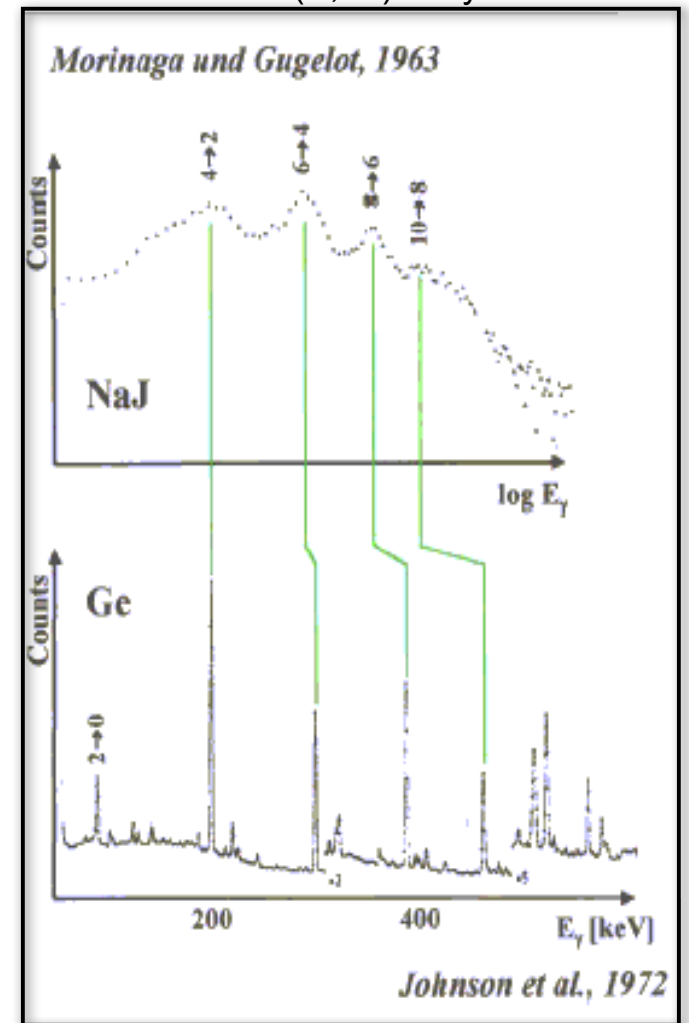
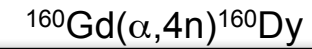
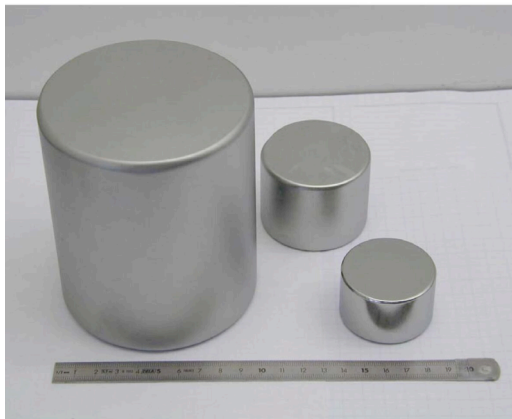


Aage Bohr et Ben Mottelson

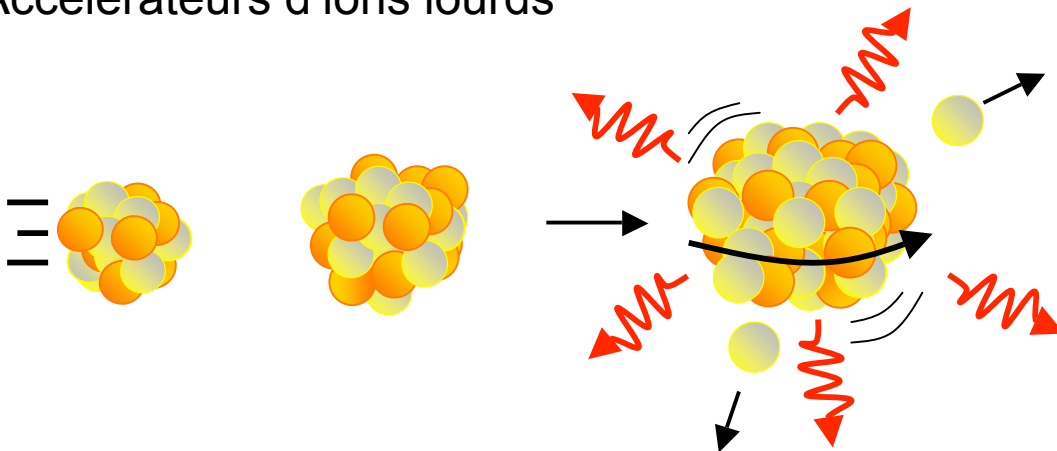


Développement des années 1950-70

Détecteurs scintillateurs puis semi-conducteurs

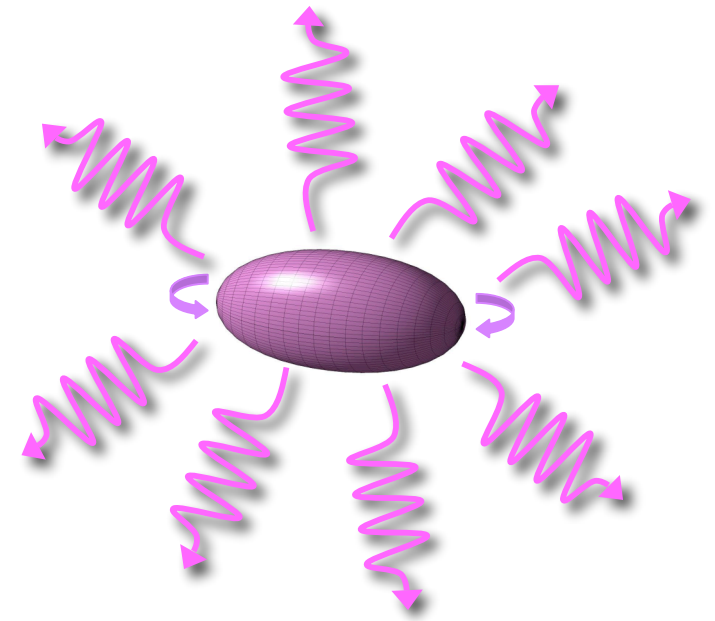
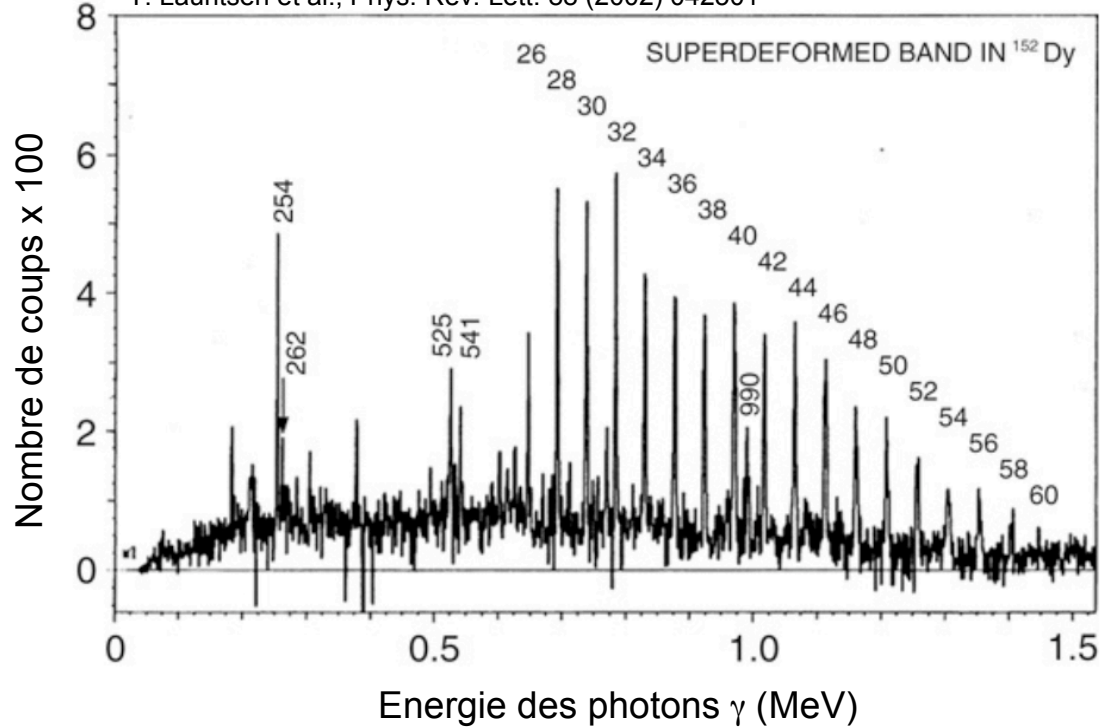


Accélérateurs d'ions lourds



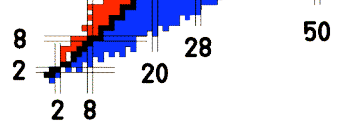
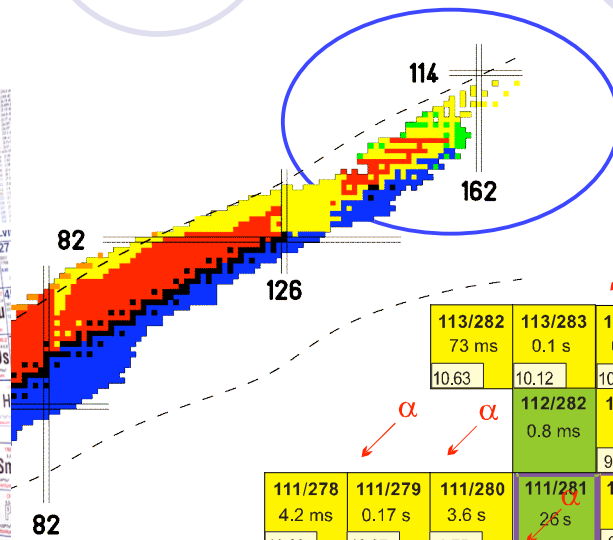
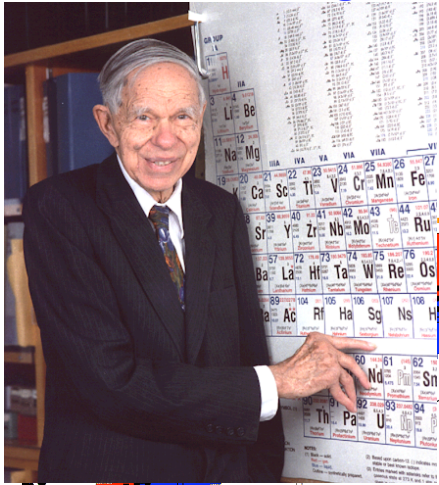
Des formes extrêmes

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

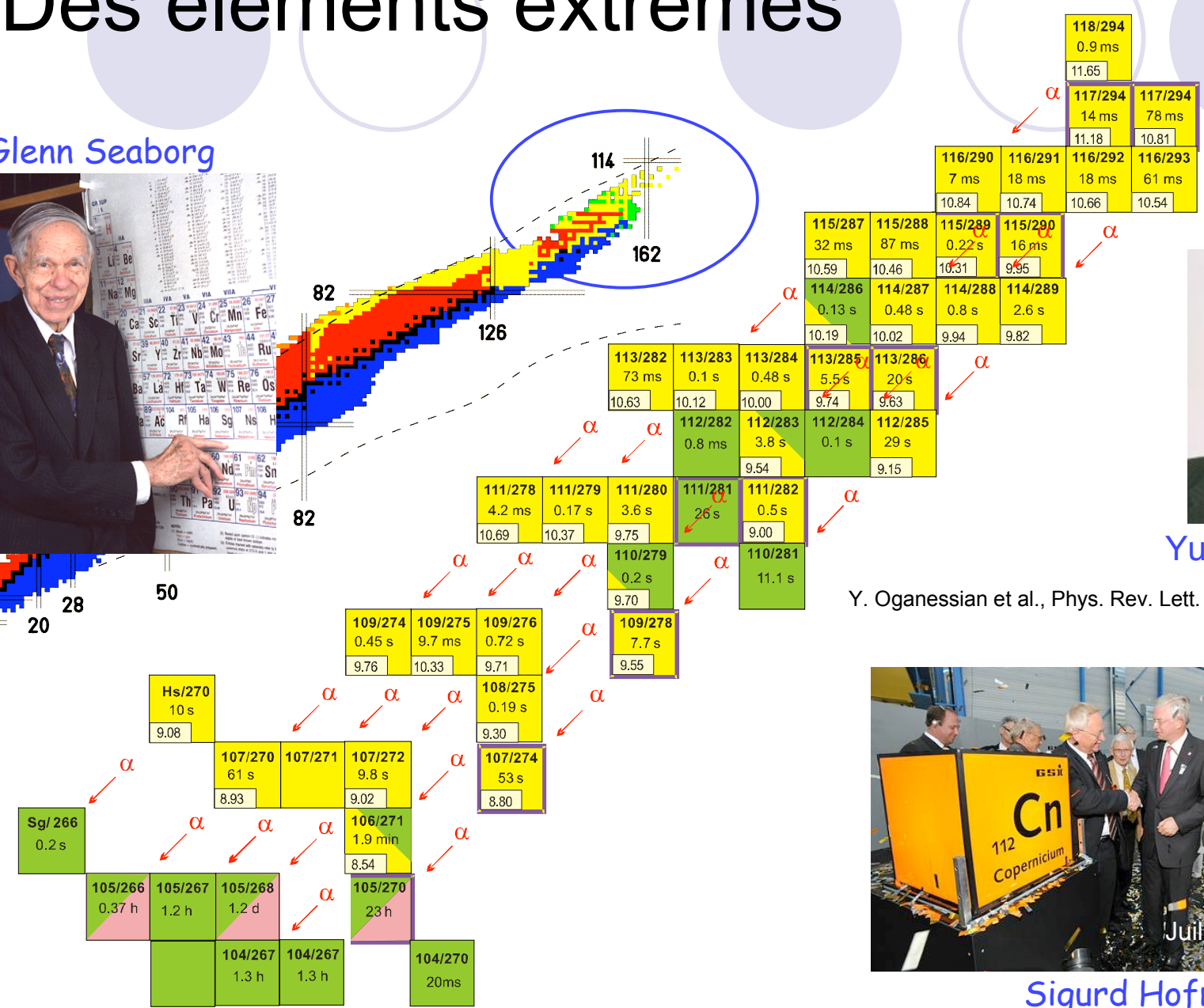


Des éléments extrêmes

Glenn Seaborg



SFP2011, A. Lopez-Martens



Yuri Oganessian

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

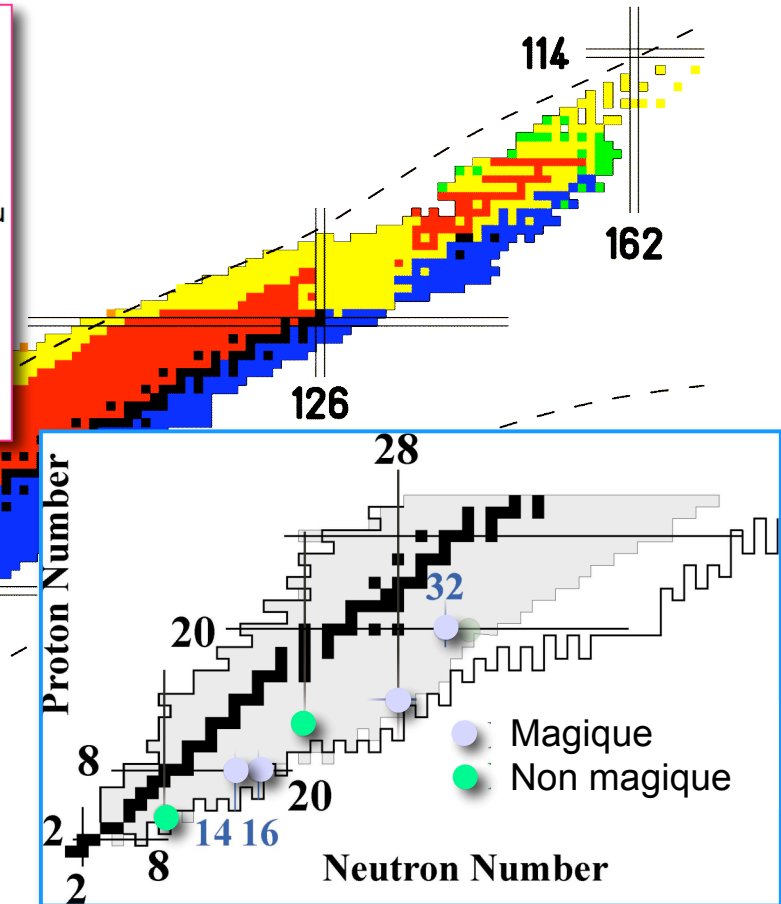
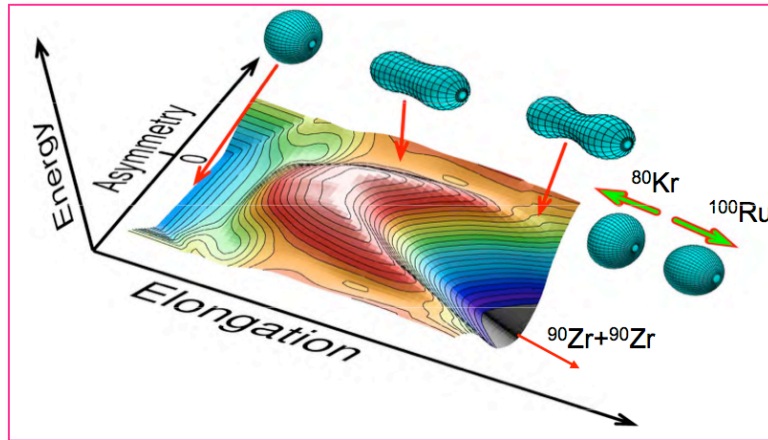


Juillet 2010

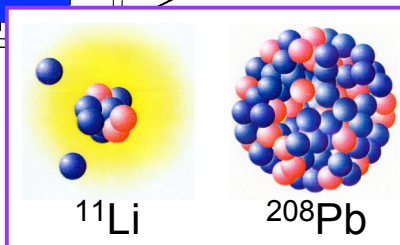
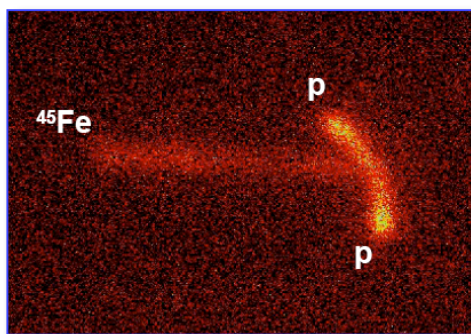
Sigurd Hofmann

Nouveaux phénomènes

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



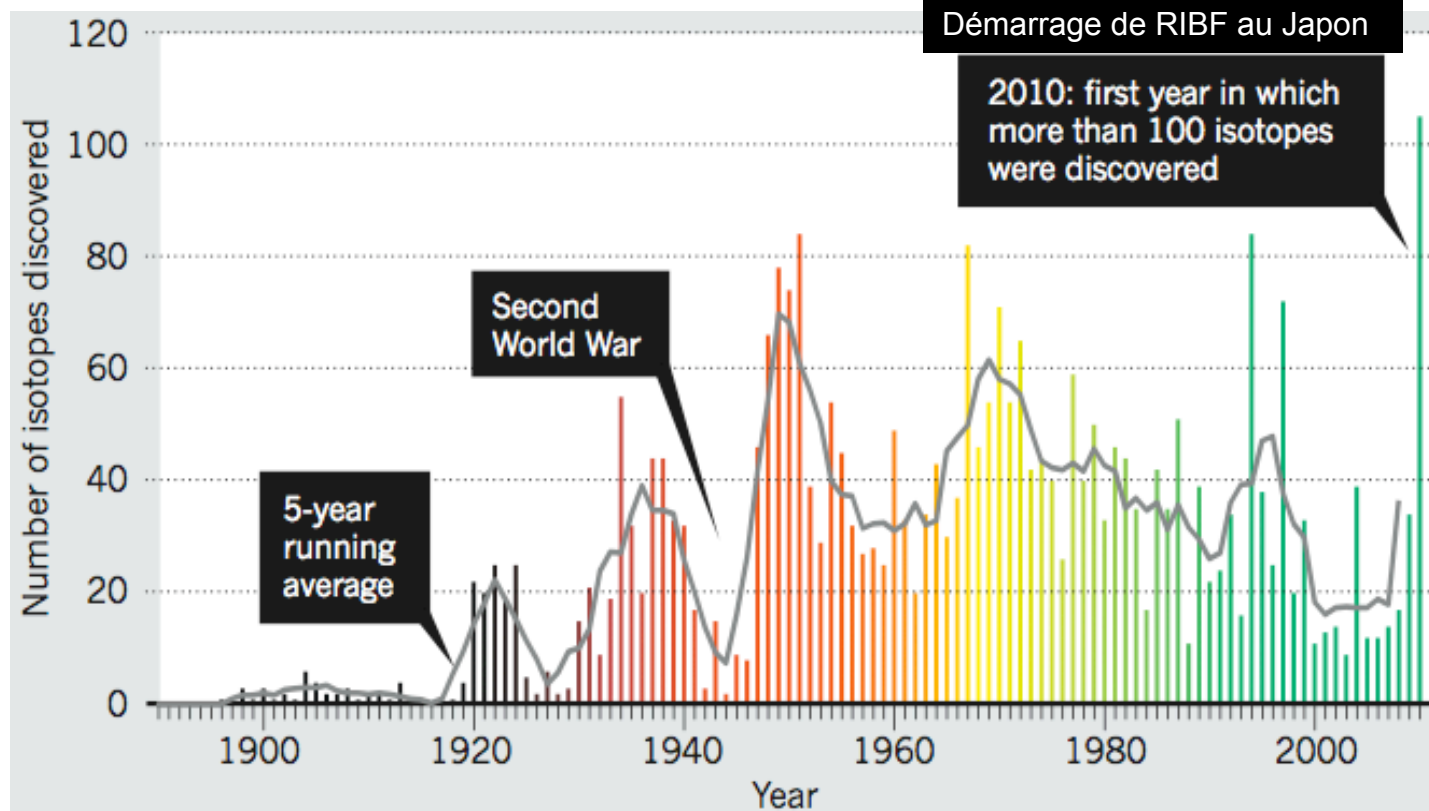
J. Giovinazzo et al., Phys. Rev. Lett. 89, 102501 (2002)
 M. Pfützner et al., Eur. Phys. J. A14, 279 (2002)
 K. Miernik et al., Phys. Rev. Lett. 99, 192501 (2007)



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)



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

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