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

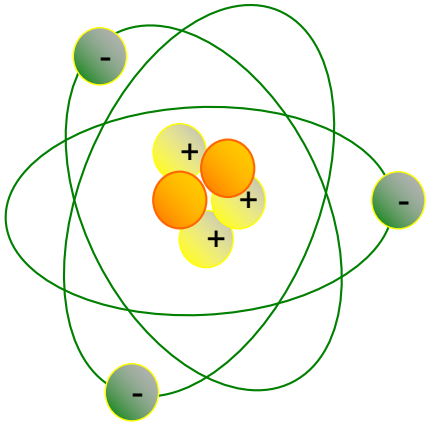
A. Lopez-Martens

cnrs dépasser les frontières IN2P3 Les deux infinis

université PARIS-SACLAY

IJCLab Irène Joliot-Curie Laboratoire de Physique des 2 Infinis

L’atome moderne

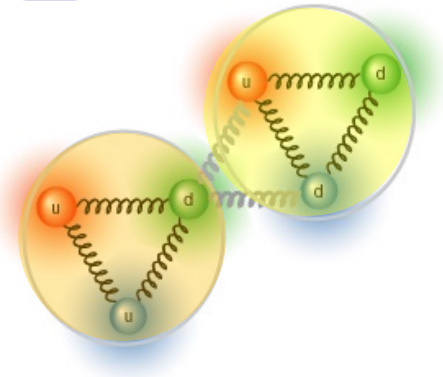


Z Electrons

Z Protons

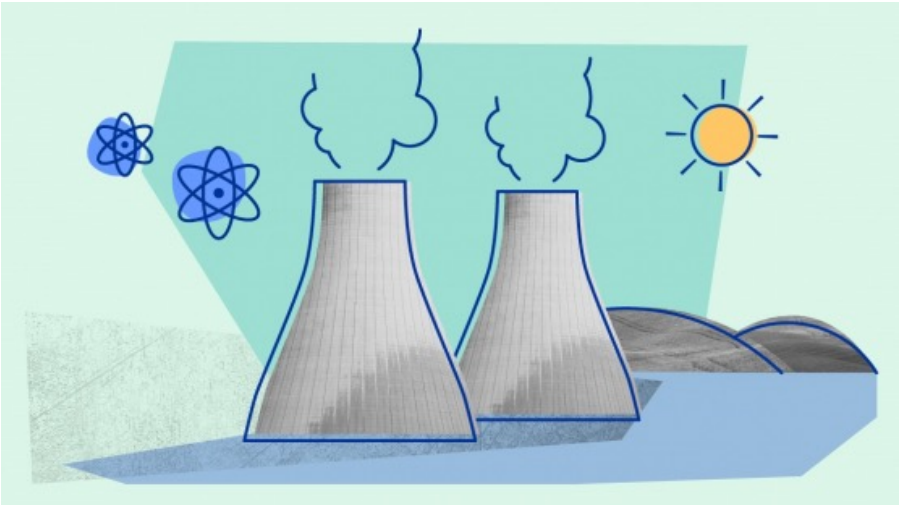
N Neutrons

A nucléons formant le noyau de l’atome



Les nucléons ne sont pas des particules élémentaires

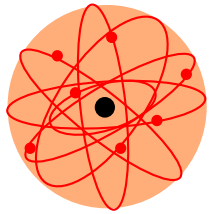
$Masse_{noyau} > 99.9\% \; Masse_{atome}$

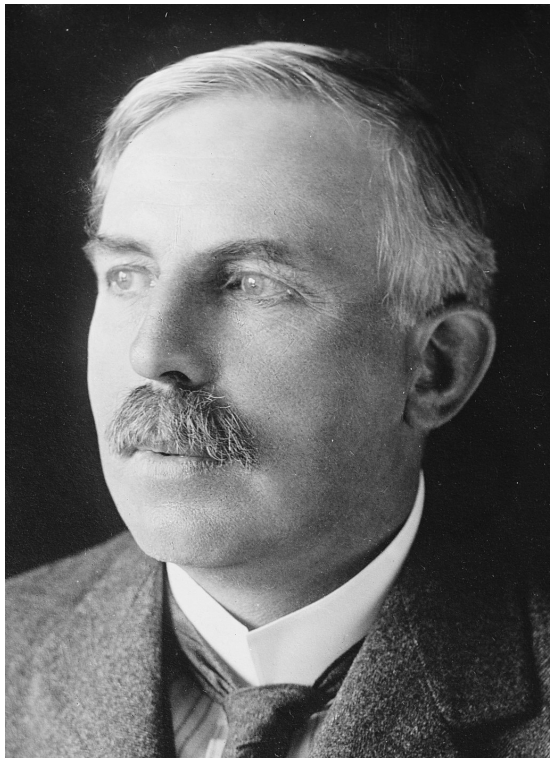


1911: Naissance de la Physique Nucléaire

Ernest Rutherford, *"The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom"*

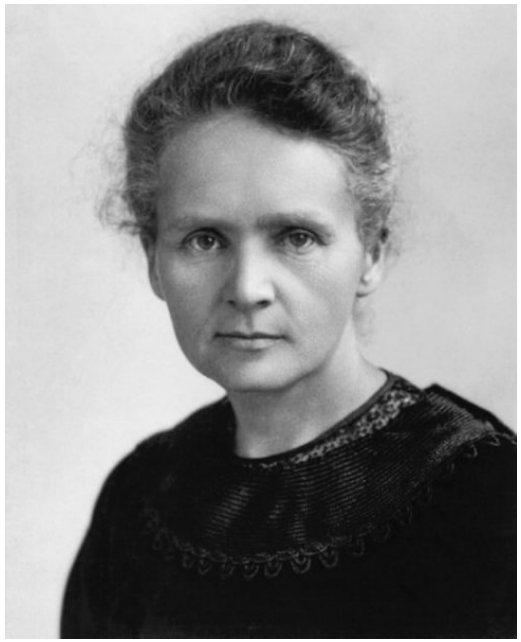
Philosophical Magazine Series 6, vol. 21 May 1911, p. 669-688



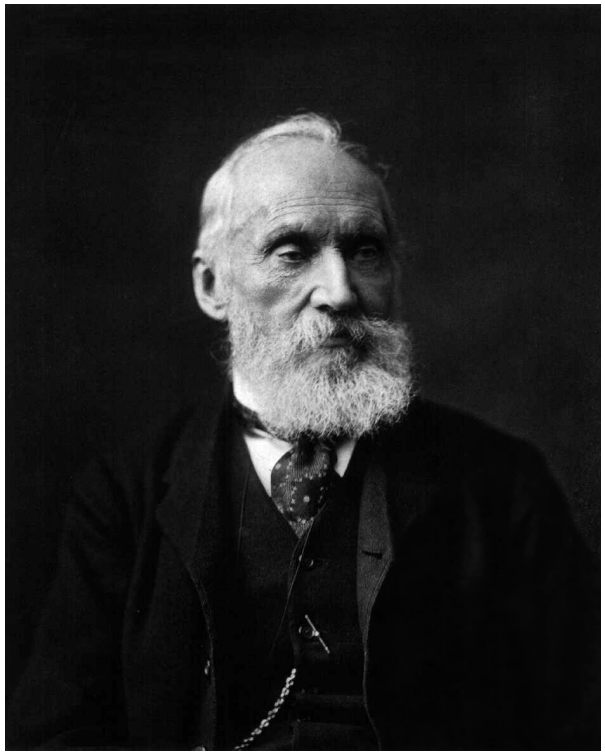


Le prix Nobel de Chimie 1911 est attribué à Mare Curie

"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 20ème siècle

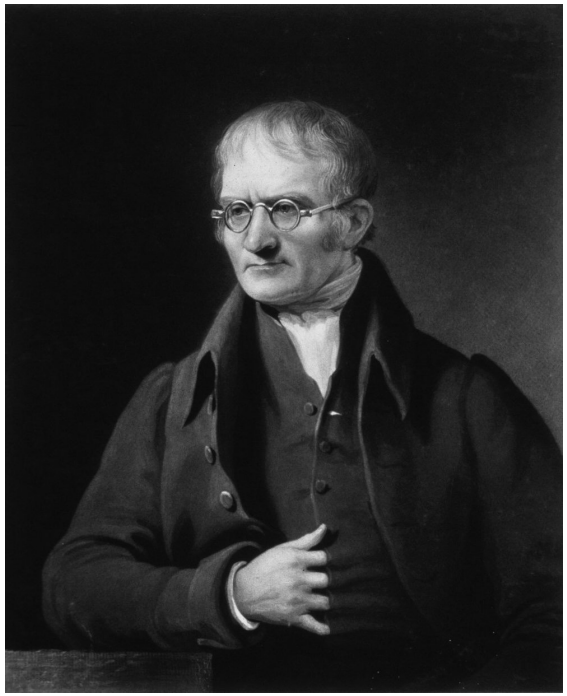


Lord Kelvin

"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."

Phrase attribuée à 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

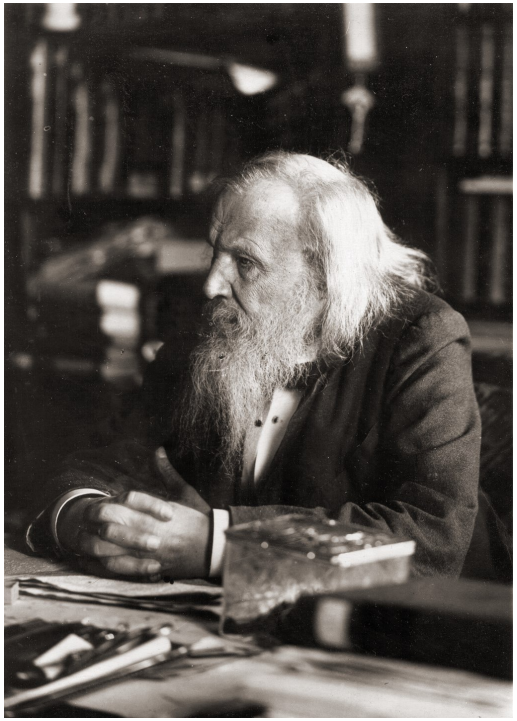
Boule de billard de Dalton

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

Périodicité des propriétés chimiques des éléments



Dmitri Ivanovich Mendeleev

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

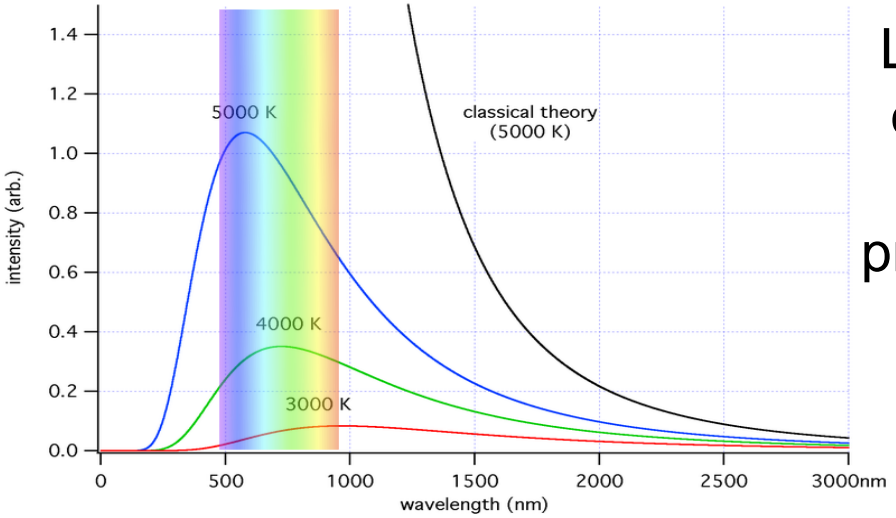
			Ti = 50	Zr = 90	? = 180.	
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182.	
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186.	
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,1.	
			Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198.	
			Ni = Co = 59	Pl = 106,6	Os = 199.	
H = 1			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200.	
	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112		
	B = 11	Al = 27,4	? = 68	Ur = 116	Au = 197?	
	C = 12	Si = 28	? = 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.	
		? = 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 Atom**Z**ahl)

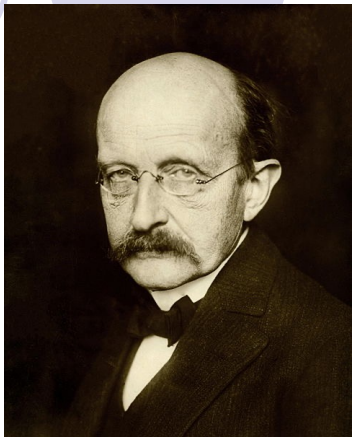
Д. Менделѣевъ (1869)

Des nuages dans le ciel…

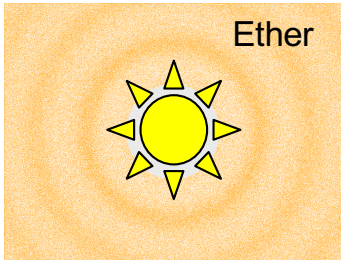
Catastrophe ultraviolette

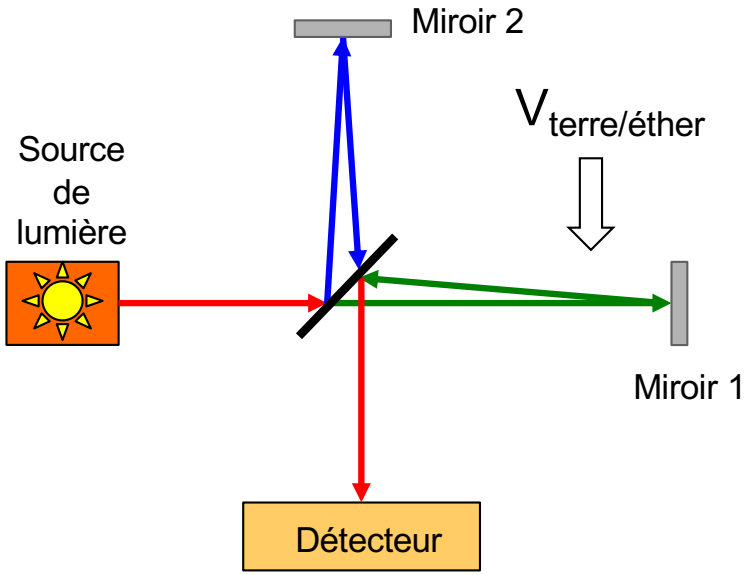


La matière ne peut absorber ou émettre de l'énergie que par petits paquets proprotionnels à la fréquence: les **quantas** d'énergie



Max Planck

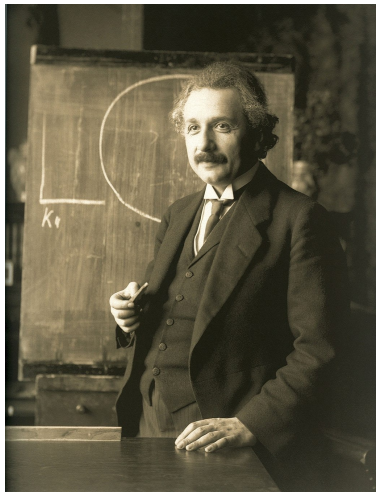




Expérience de Michelson Morley

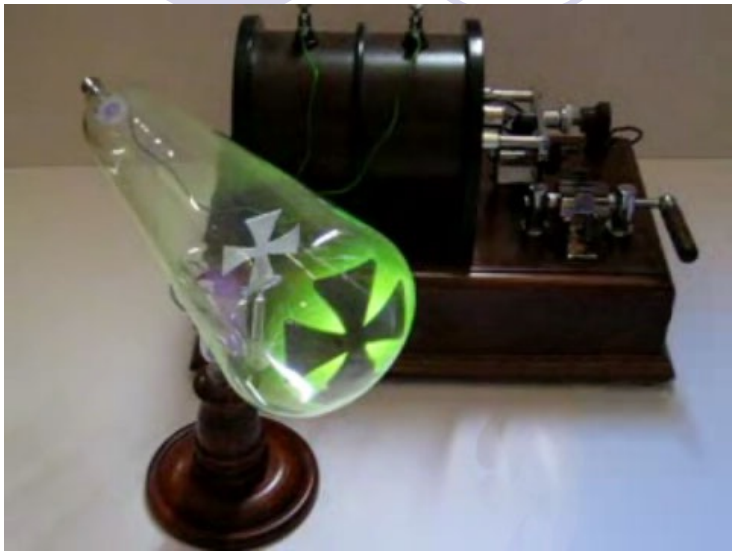
Relativité restreinte :
Les lois de la physique sont les mêmes dans tout référentiel inertiel et la vitesse de la lumière est une constante

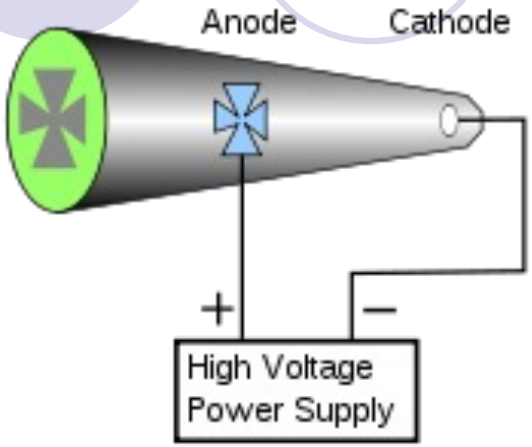
$$E=mc^2$$

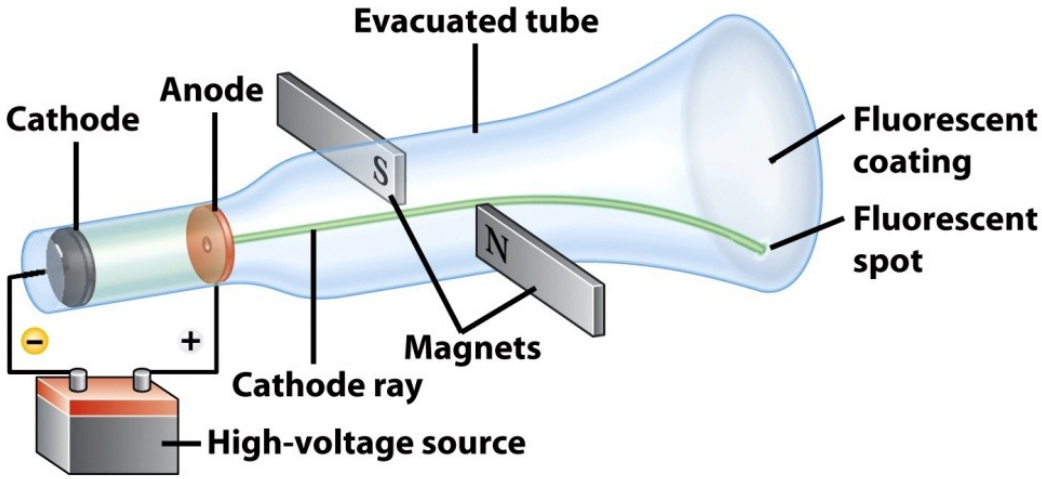


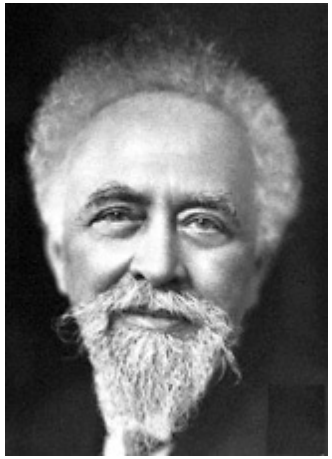
Albert Einstein

La révolution du tube cathodique



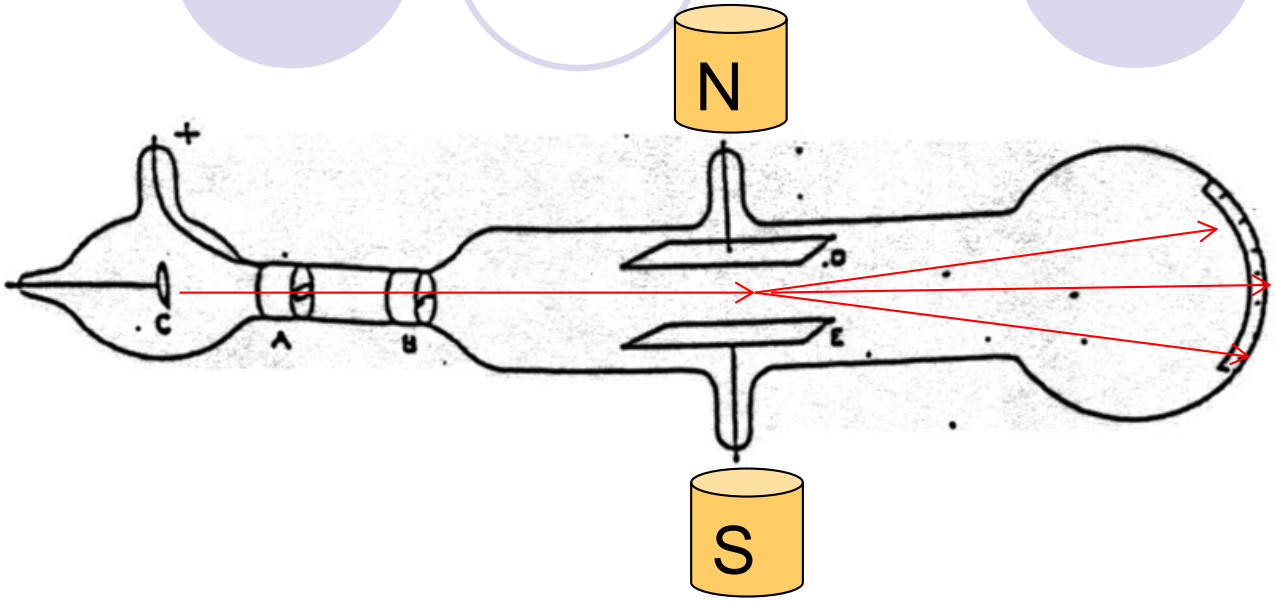






1895: Jean Perrin démontre que les rayons cathodiques sont des particules chargées négativement

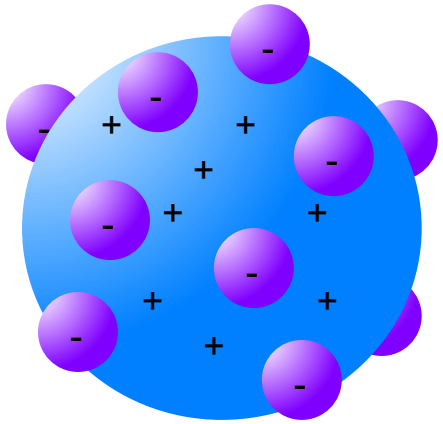
Les corpuscules



John Joseph Thomson

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

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



Modèle 'plum pudding'

Des rayons cathodiques aux rayons X

1895 Découverte des **rayons X**

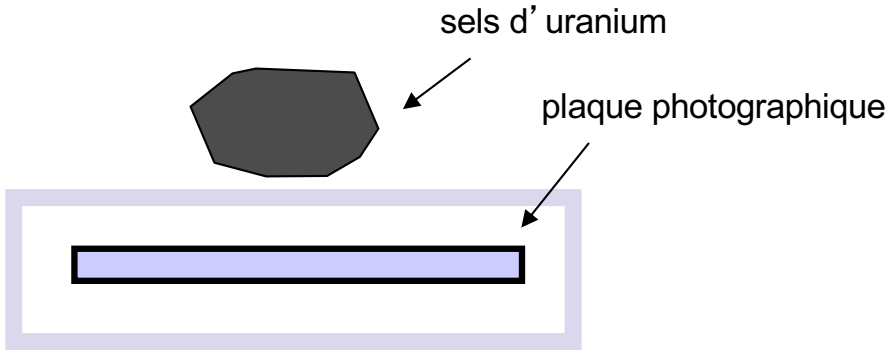
Wilhelm Röntgen

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

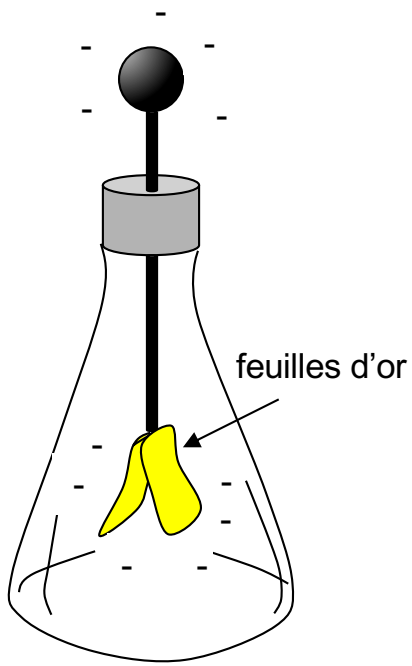
Des rayons X aux rayons uraniques

1896 Découverte d'un nouveau rayonnement émis par l'Uranium

Henri Becquerel

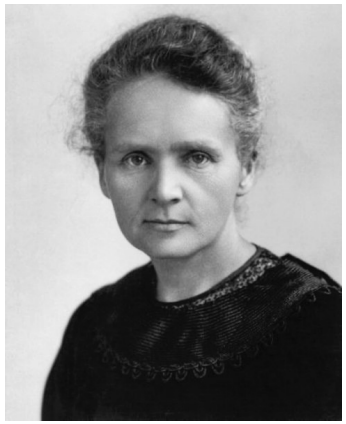


Les **rayons uraniques** ionisent l' air et provoquent la décharge d' un électroscope

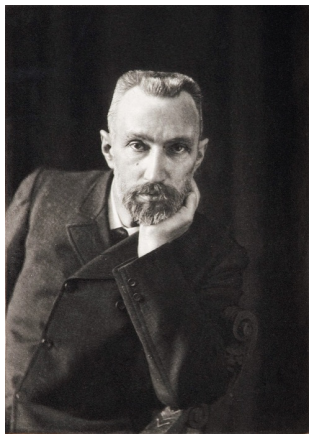


Des rayons uraniques à la radioactivité

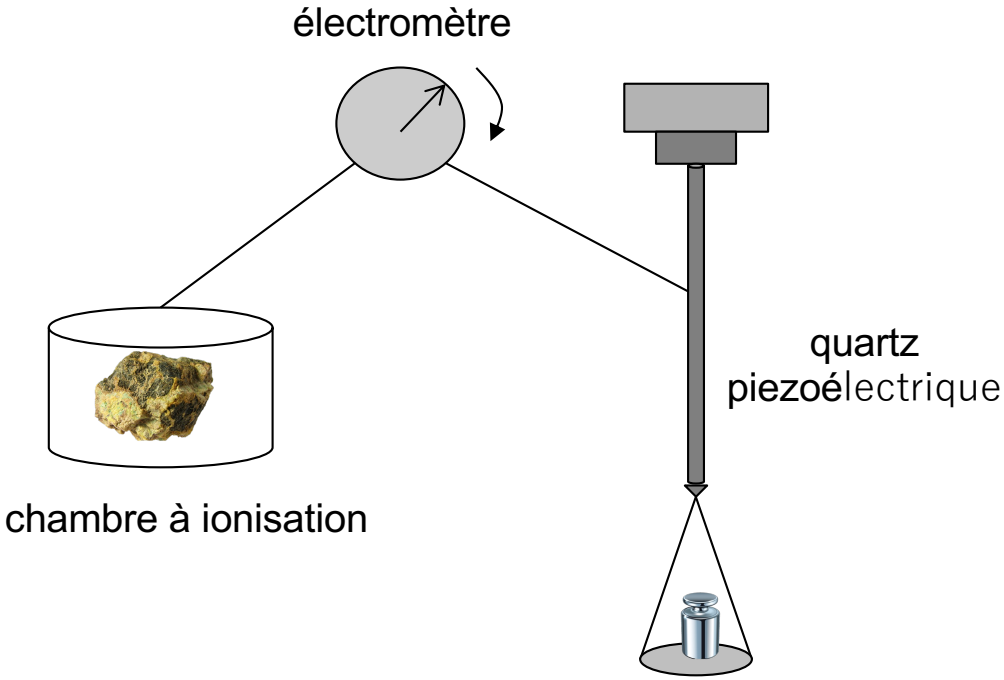
1898 Découverte du polonium et du radium

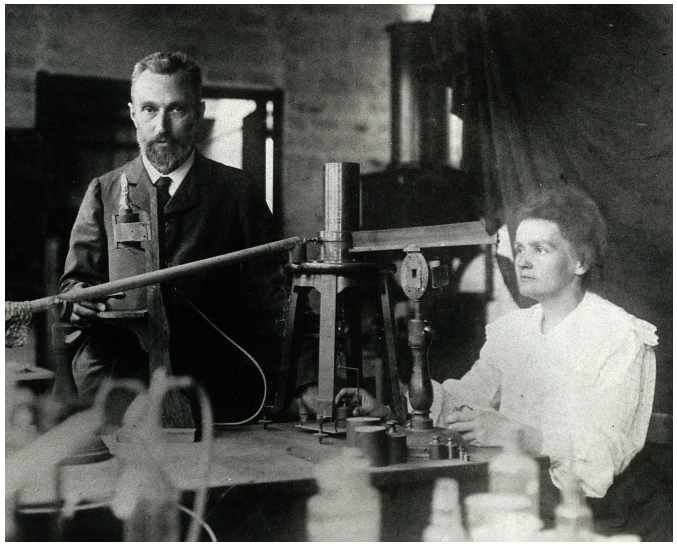


Marie Curie



Pierre Curie





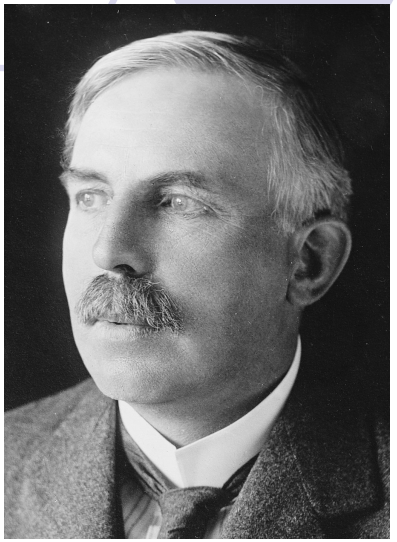
Laboratoire à l'Ecole de Physique et Chimie Industrielle de Paris

M. Curie appele le rayonnement:
'radioactivité'

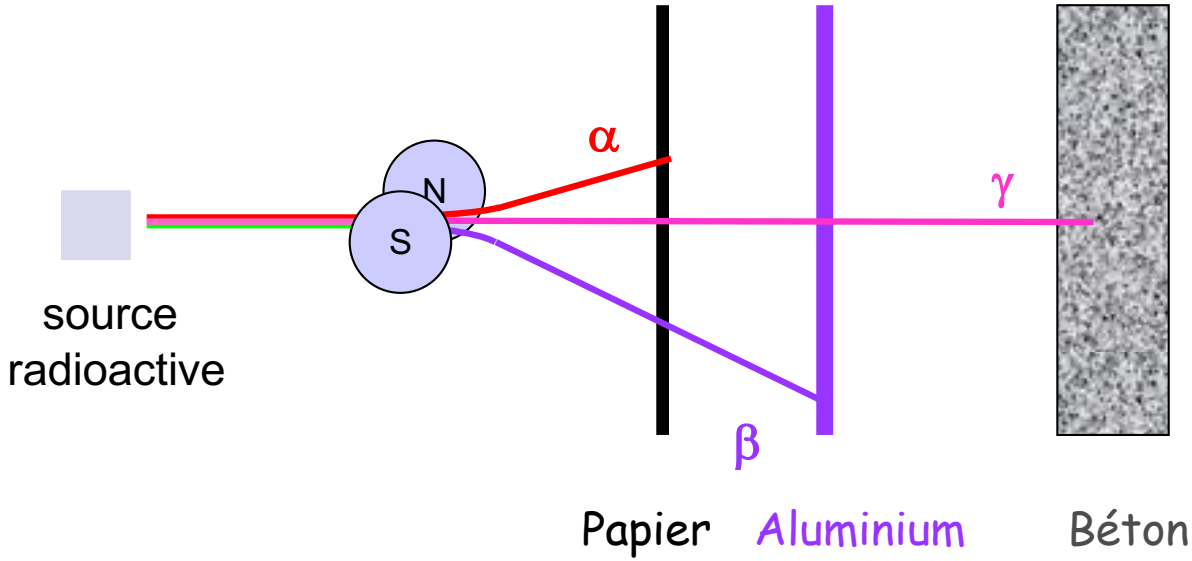
La radioactivité est multiple

1898 E. Rutherfod rayonnement **alpha, beta**

1900 P. Villard rayonnement **gamma**



Ernest Rutherford



Paul Villard

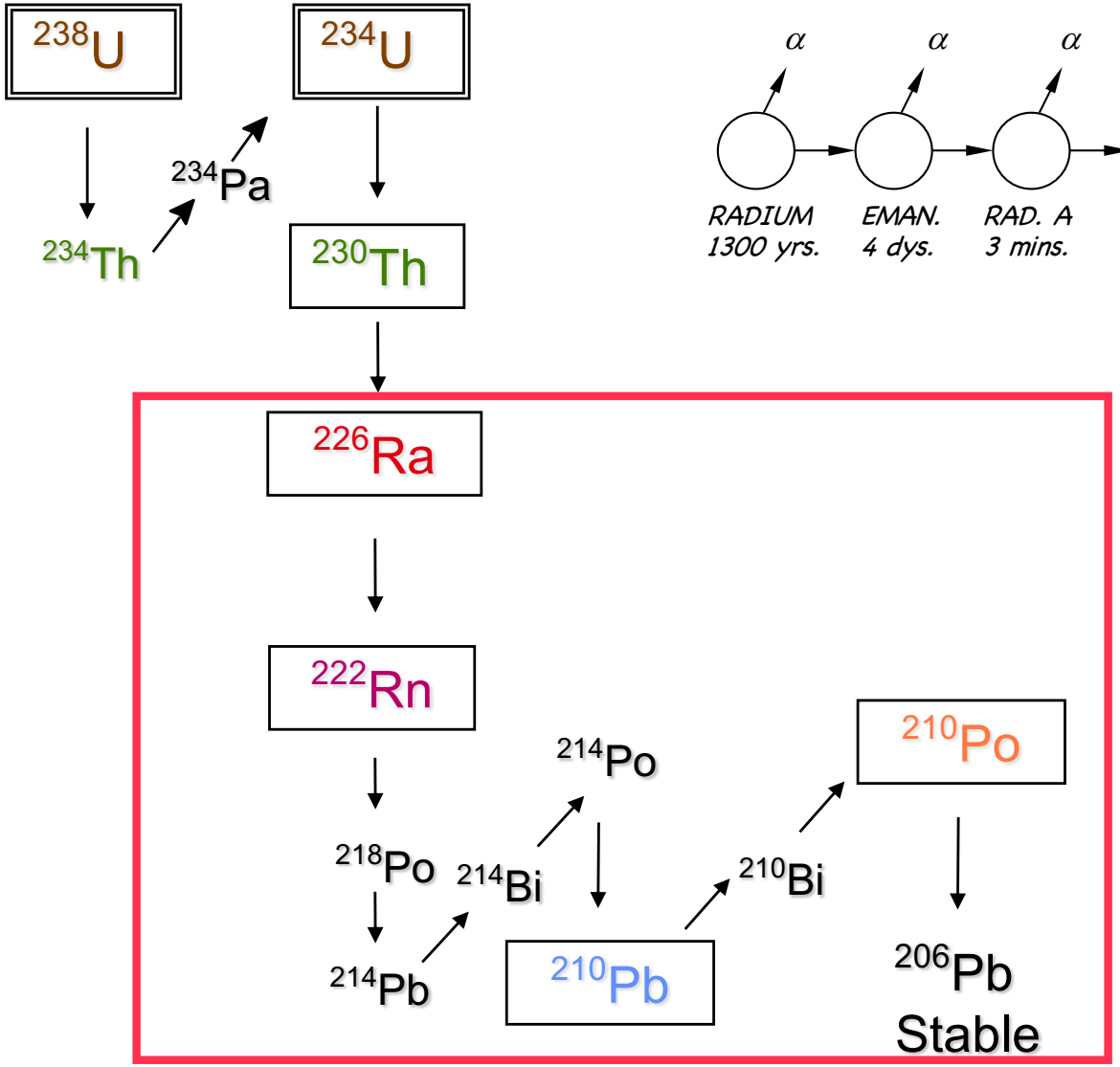
α = ion d'hélium

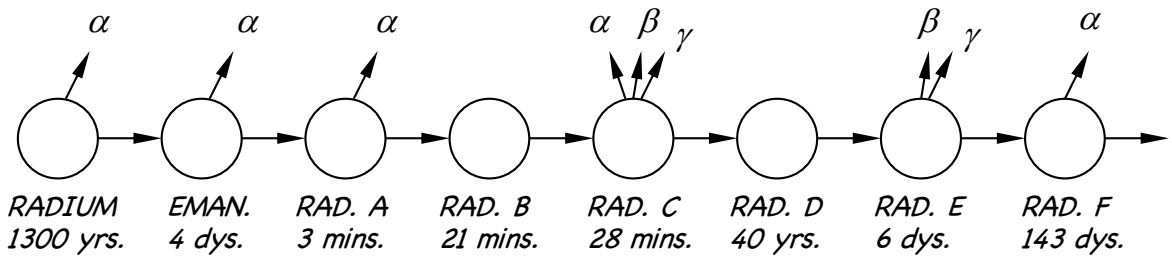
β = électron

γ = rayonnement électromagnétique de haute fréquence

Les atomes se transforment !

1902 E. Rutherford & F. Soddy transmutation des atomes

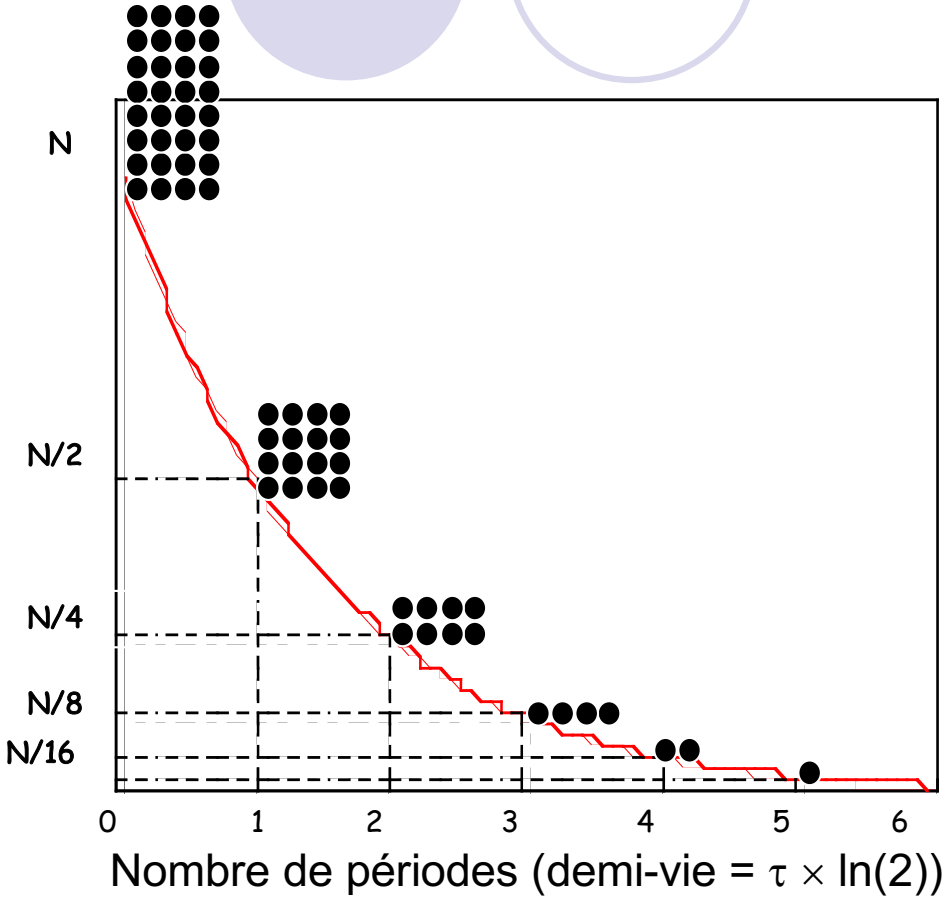




radioactivité β, γ

radioactivité α

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

1910:

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

1 Ci = 37 milliards de désintégrations/s

1 Bq = 1 désintégration/s

Quelques examples d' activités :

Homme : 130 Bq/kg

Granit: 8000 Bq/kg

Béton: 500 Bq/kg

Lait: 80 Bq/kg

Scintigraphie thyroïdienne: 37 millions de Bq

Combustible usé de réacteur: 100 millions de milliards de Bq

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.

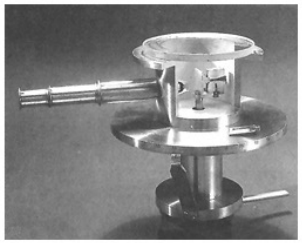
D'où vient l'énergie des rayonnements ?

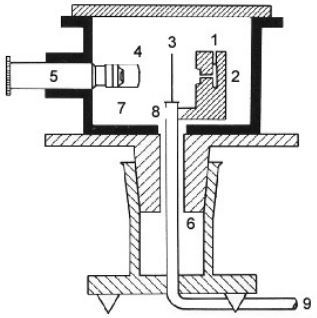
« Il y a tout lieu de croire que les atomes des éléments radioactifs renferment une énorme quantité d'énergie latente... Si on parvenait à contrôler la vitesse à laquelle se désintègrent ces éléments, une petite quantité de matière libèrerait une masse colossale d'énergie. »

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

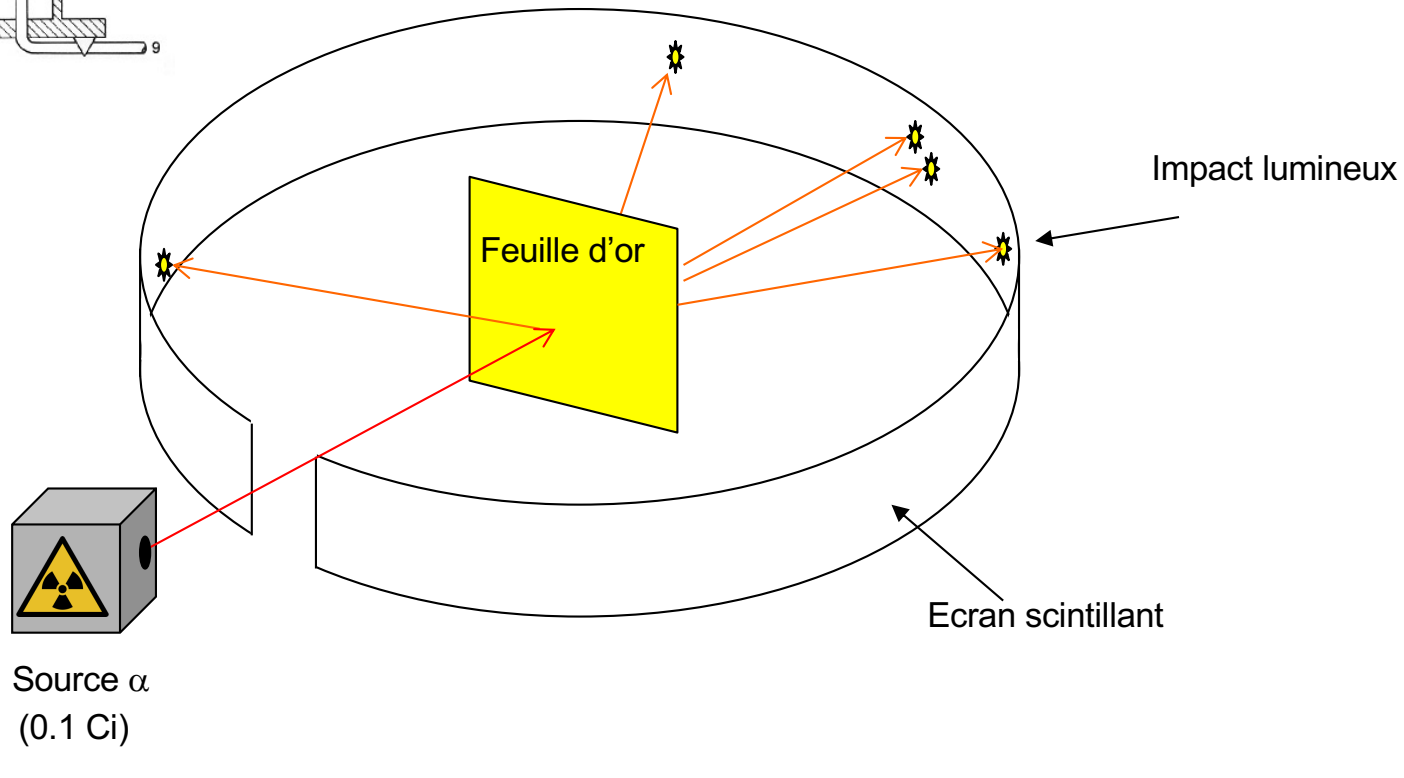
1914: H.G. Wells publie "La destruction libératrice"

La diffusion de particules alpha





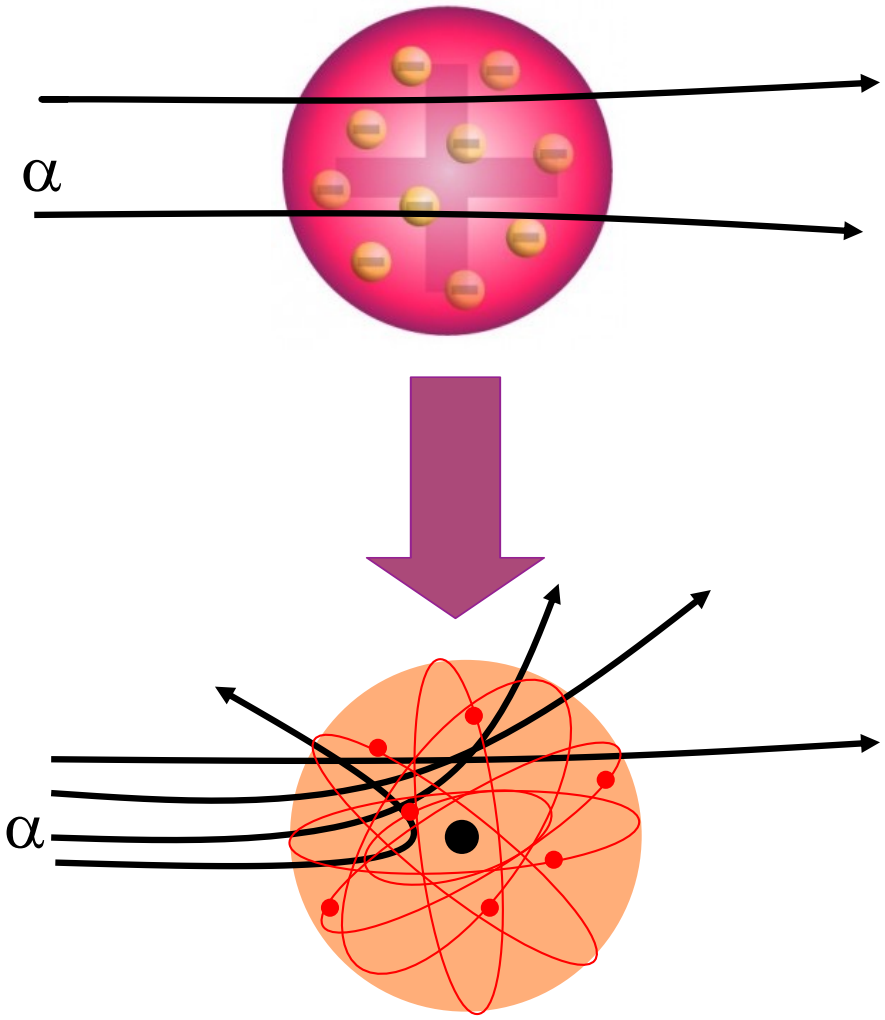
Expérience réalisée par H. Geiger et E. Marsden
(1909, Université de Manchester)



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

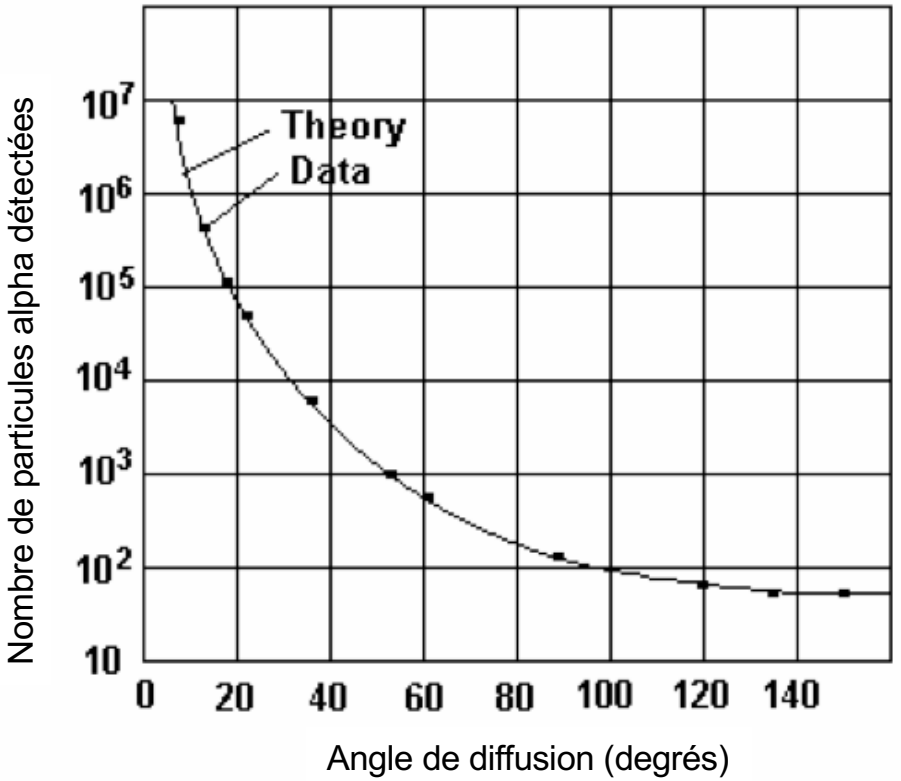
Le noyau est né !

Modèle 'plum pudding'

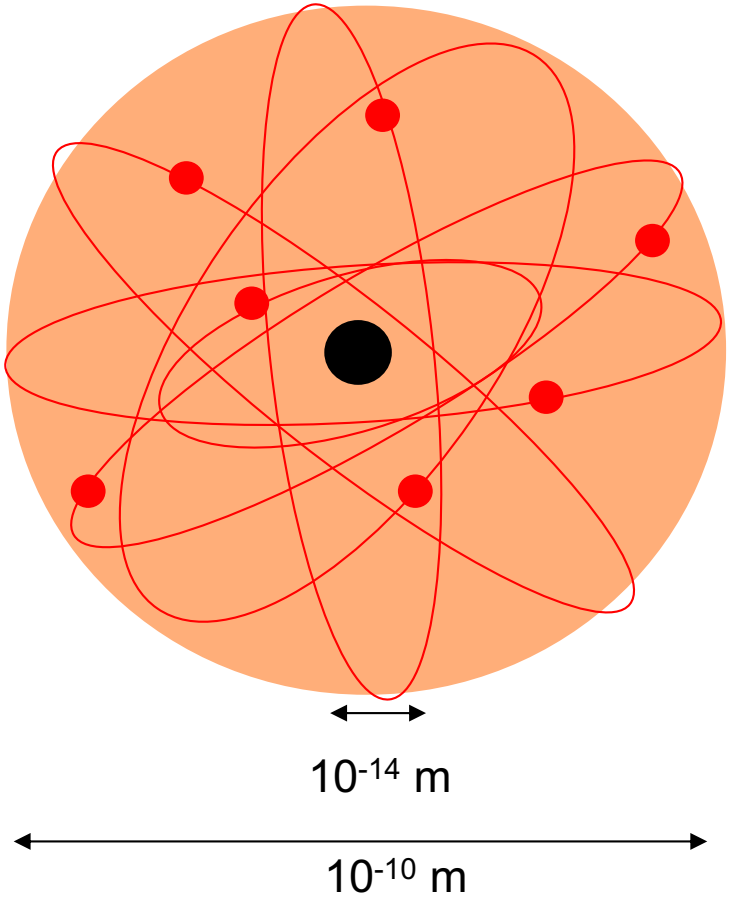


Modèle nucléaire

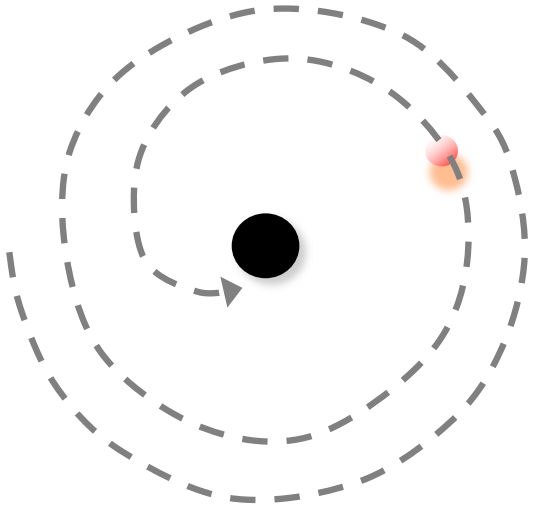
Philosophical Magazine Series 6, vol. 21 May 1911, p. 669-688



Conséquences du modèle de Rutherford



La matière est vide !



La matière est instable !

Bohr résout le problème avec les quantas de Planck

Le moment cinétique des électrons est quantifié ⇔ seules certaines orbites (couches) d'énergie E_n (n=1,2,3,...) sont autorisées

n est le nombre quantique principal

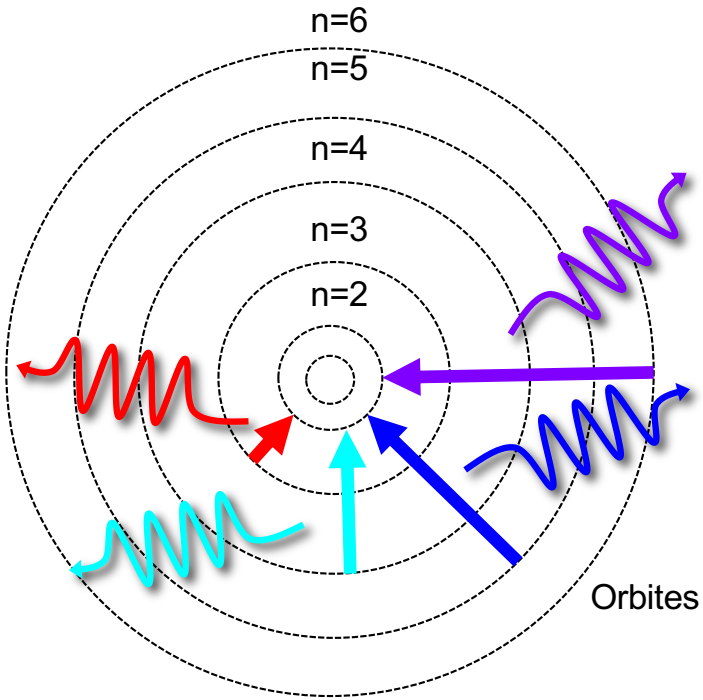
Le saut électronique d'un niveau à un autre s'accompagne de l'émission (ou l'absorption) d'un photon de longueur d'onde particulière

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

Niels Bohr

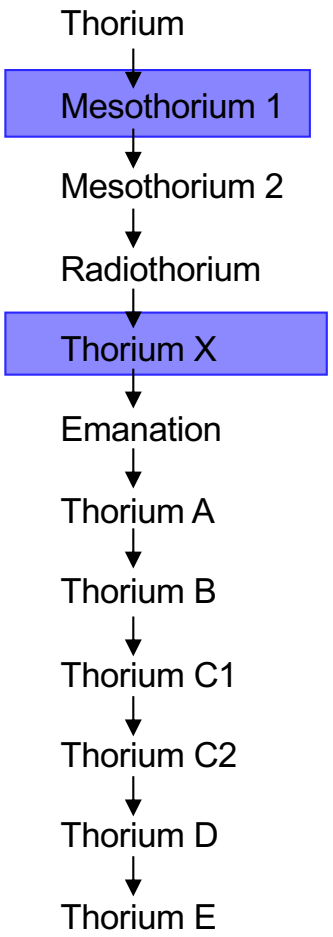
$$E_n \propto - Q^2/n^2$$

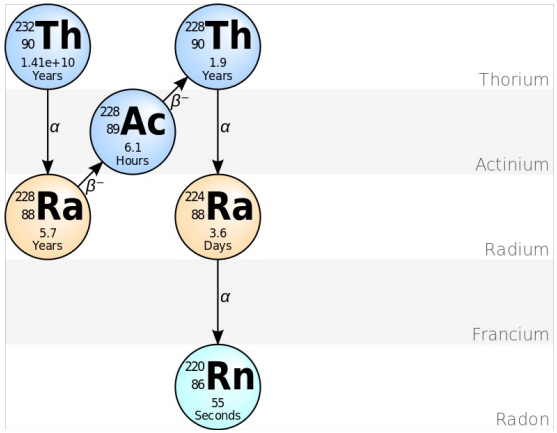
Spectre d'émission de l'hydrogène



Orbites des électrons

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

Frederick Soddy

1913: Concept d'isotope: éléments radioactifs ayant différentes masses atomiques mais les mêmes propriétés chimiques

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

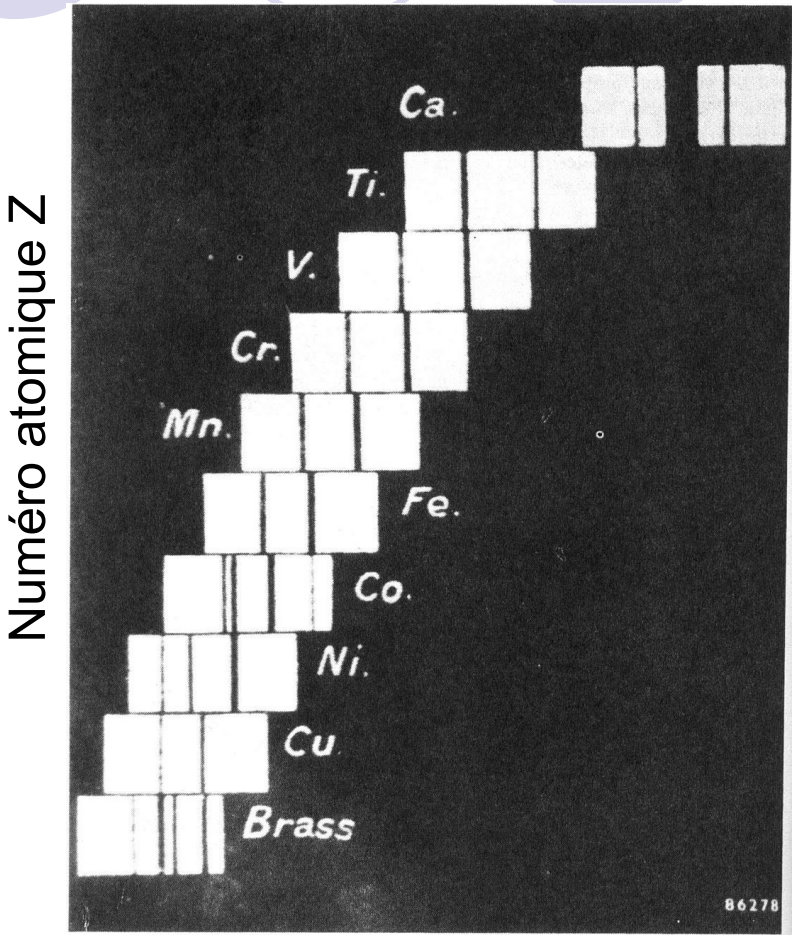
Le tableau périodique trouve enfin son fil conducteur

Henry Moseley

1914: Mesure de la fréquence des rayons X émis par de nombreux éléments: $E \propto Z^2$

⇨ numéro atomique Z = charge du noyau

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



Position ∝ Longueur d'onde

Philosophical Magazine. 6. ***27****: 703–713*

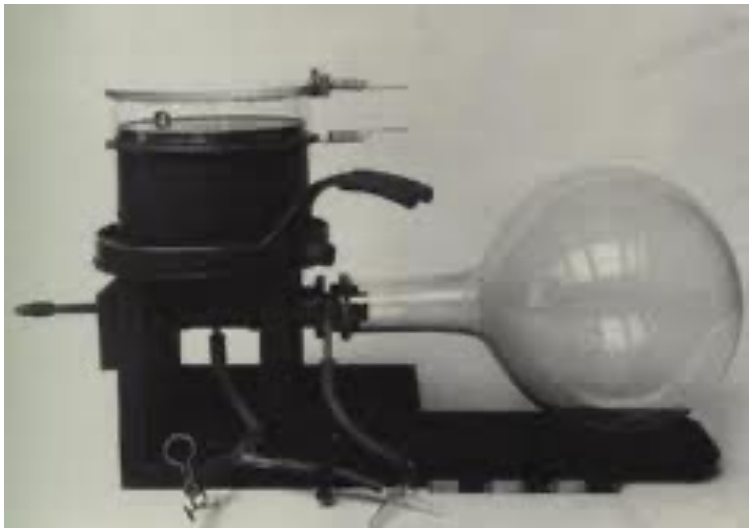
Les alchimistes du 20ème siècle

1919 E. Rutherford 1ère transmutation en laboratoire

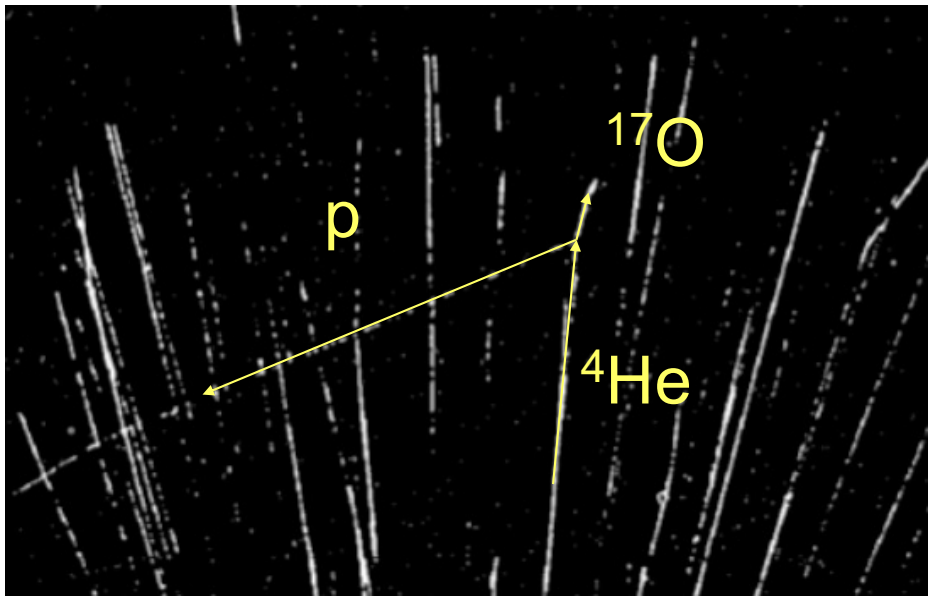
α + Azote $\rightarrow$ Hydrogène

Rutherford appelle H^+ proton

1924 P. Blackett visualise la transmutation $\alpha + {}^{14}N \rightarrow {}^{17}F^* \rightarrow {}^{17}O + p$



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

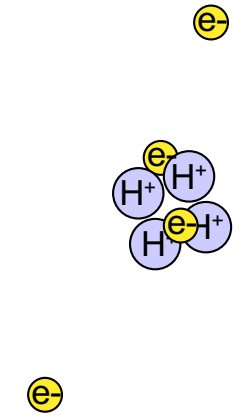


Structure du noyau

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

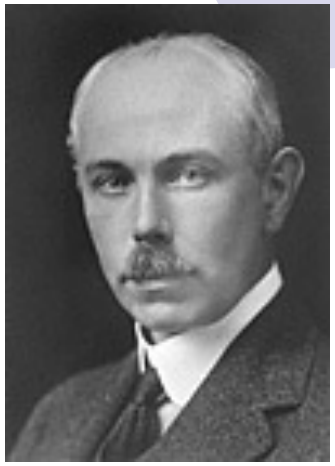
E. Rutherford suggère l'existence d'une paire e^--p qui aurait toutes les caractéristiques d'une particule neutre

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

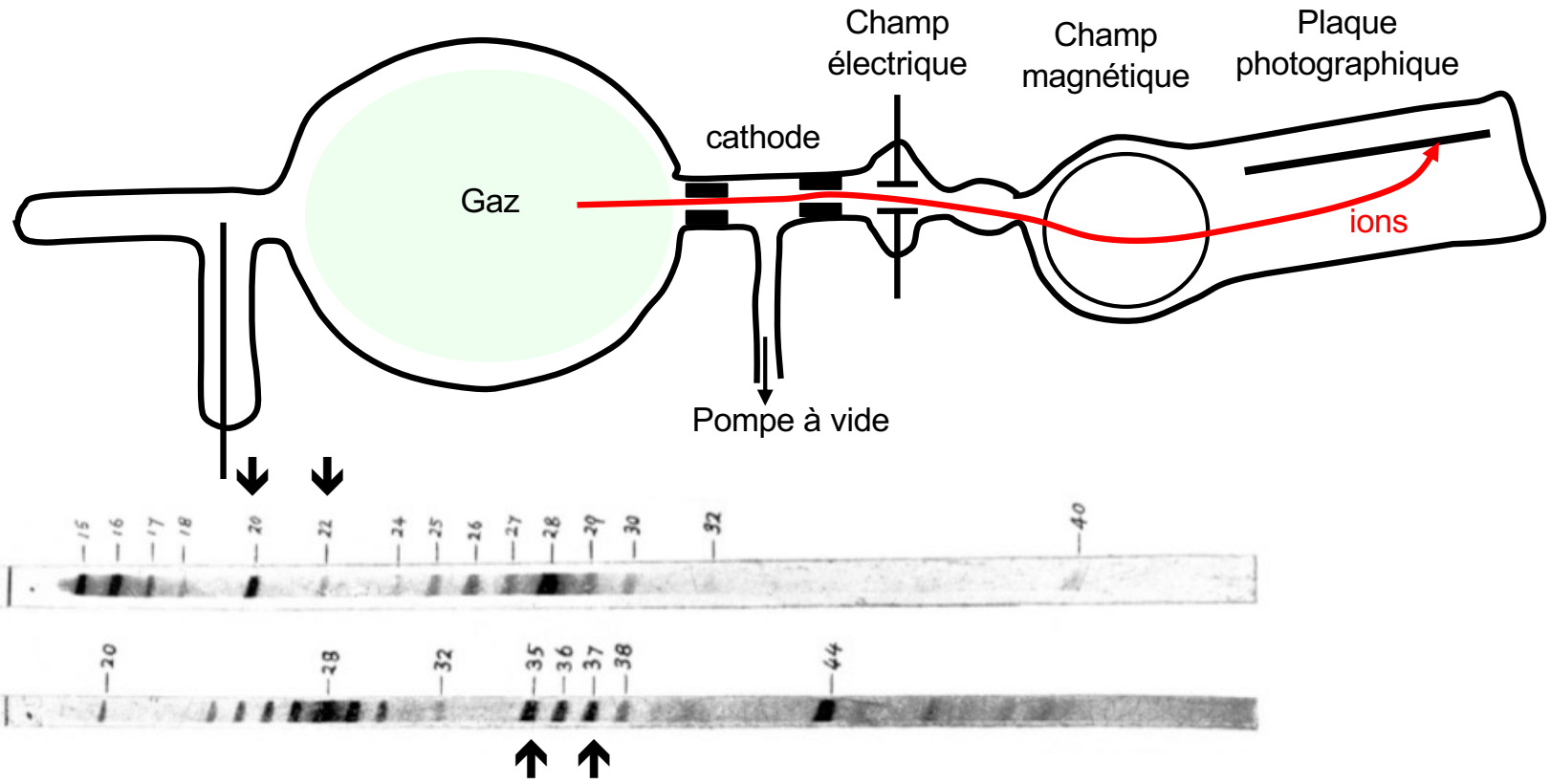


Cette information passe inaperçue du reste du monde, sauf à Cambridge au Cavendish Laboratory où E. Rutherford est nommé directeur...

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 masses relatives des isotopes (M(^{16}O)=16) sont des nombres entiers à l'exception de l'hydrogène (1.008)

Excès de masse

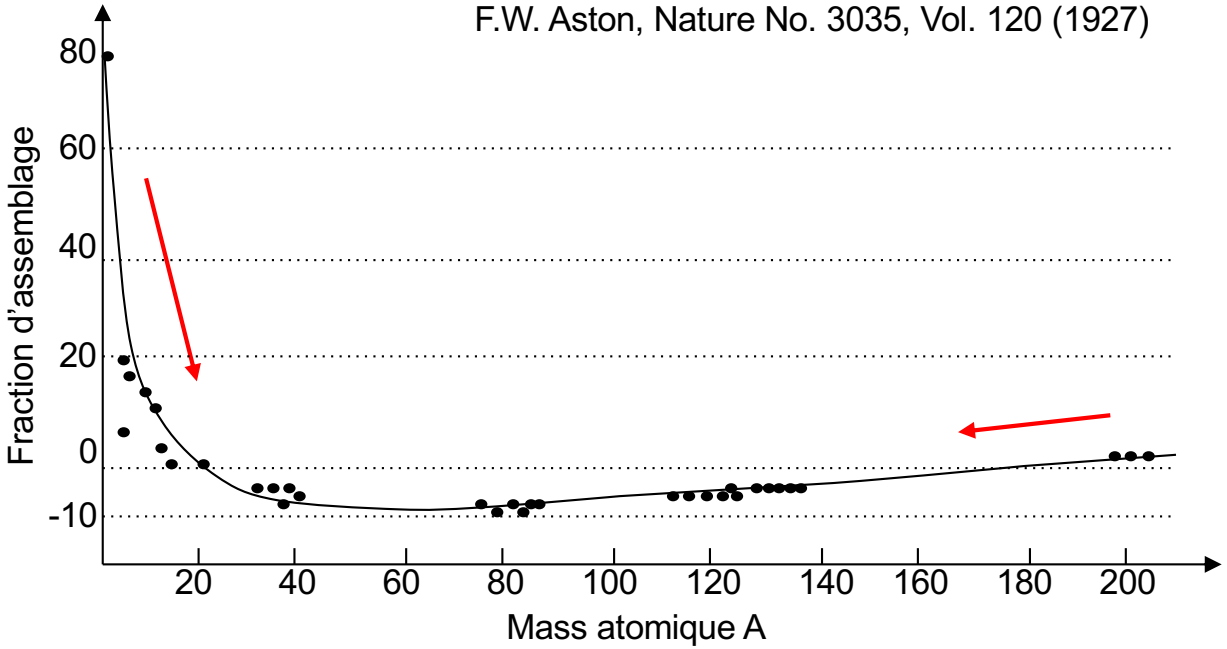
F. Aston propose que la masse est perdue pour former les noyaux

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, Aston découvre que les masses relatives des ions plus lourds ne sont pas tout à fait des nombres entiers

'fraction d'assemblage' = 10 000 (M – A)/A

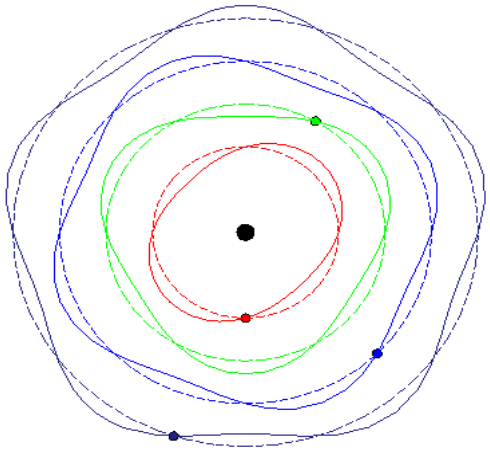
F.W. Aston, Nature No. 3035, Vol. 120 (1927)

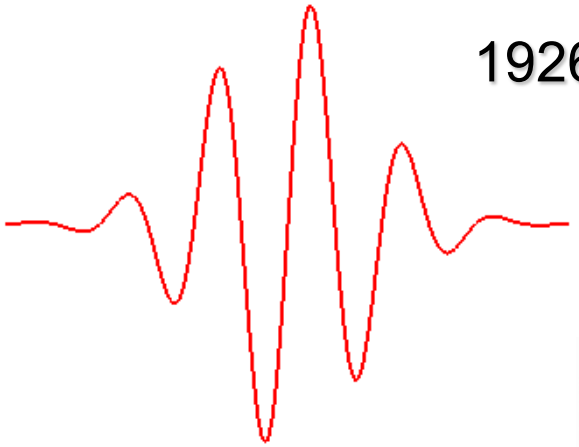


Développement de la Mécanique Quantique et Fonction d'Onde

L. de Broglie

1924



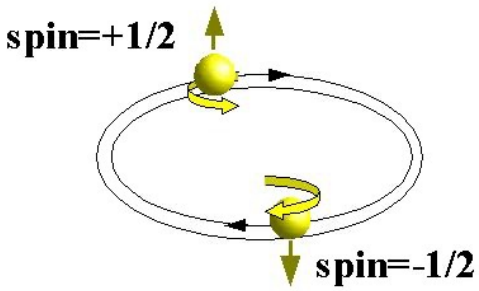


1926

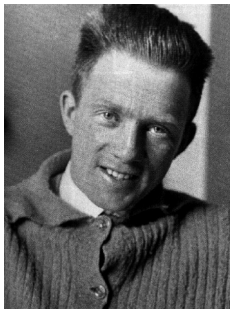
E. Schrödinger

W. Pauli

1924-1925



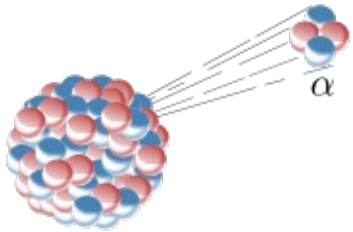
M. Born



W. Heisenberg

La radioactivité α expliquée

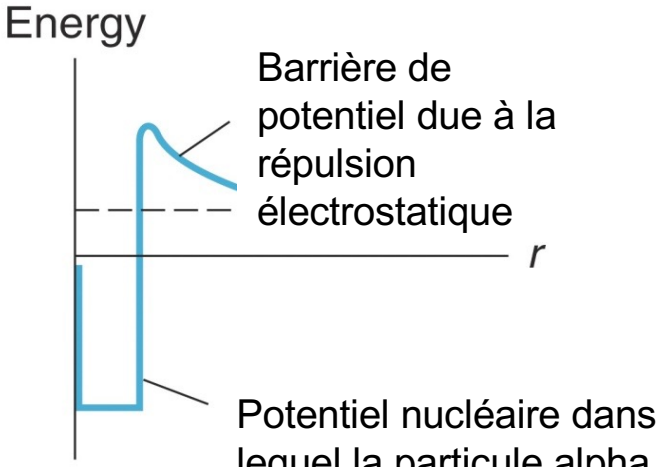
1928: G. Gamow propose un modèle de la radioactivité α basé sur la Mécanique Quantique

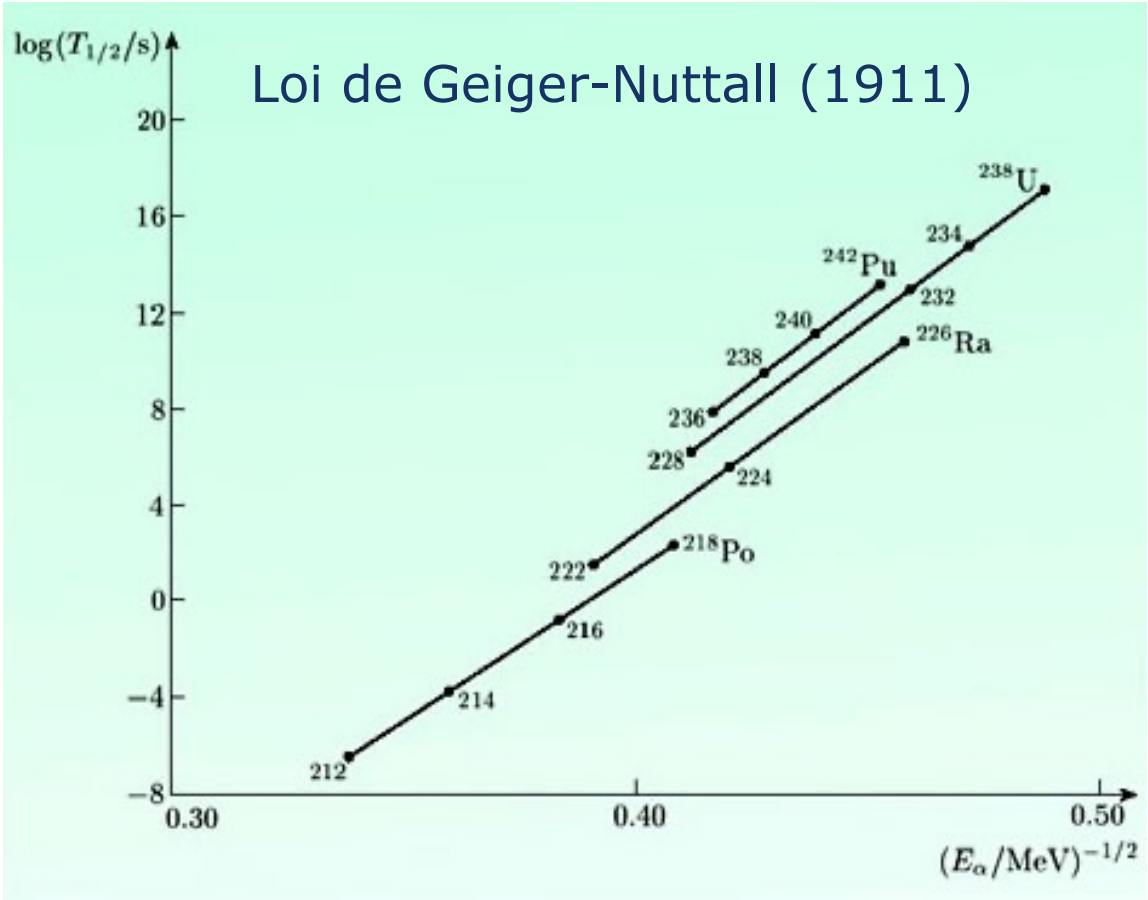


^{212}Po

E_α=8.78 MeV

E_B~ 25 MeV





L'Antimatière

Relativité Restreinte + Mécanique Quantique → électron relativiste

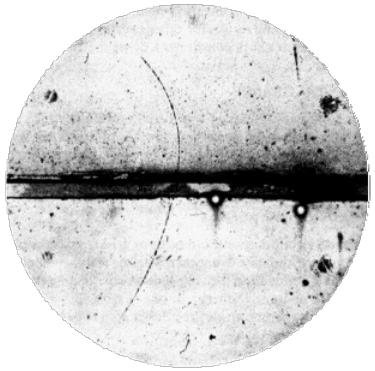
1929 : Equation de Dirac

L'équation de Dirac a 2 solutions ! { l'électron ; ????

1930: P. Dirac invente l'anti-électron

e^- ● électron | e^+ ● anti-électron

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

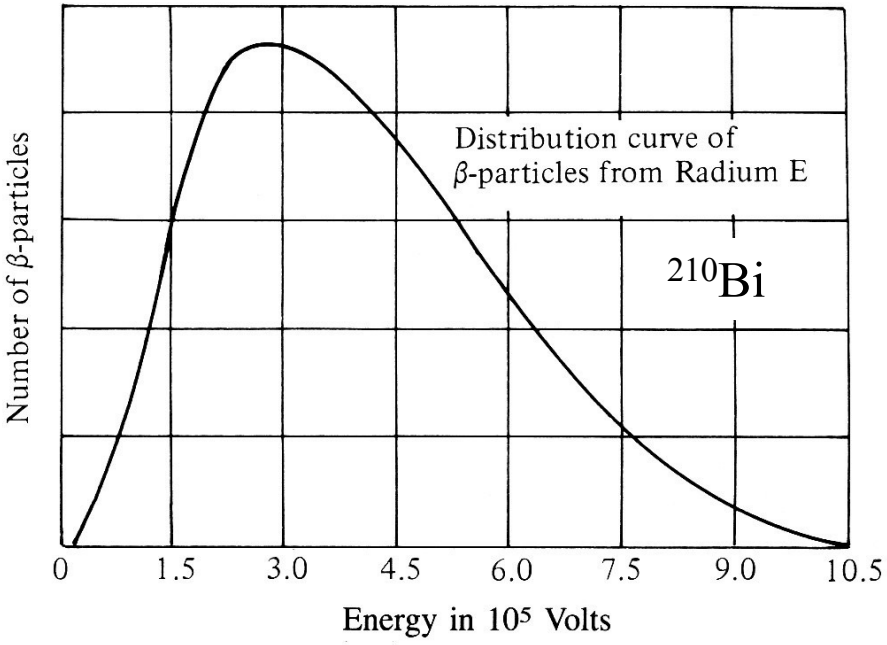


Radioactivité β et l'hypothèse du neutrino

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...!"

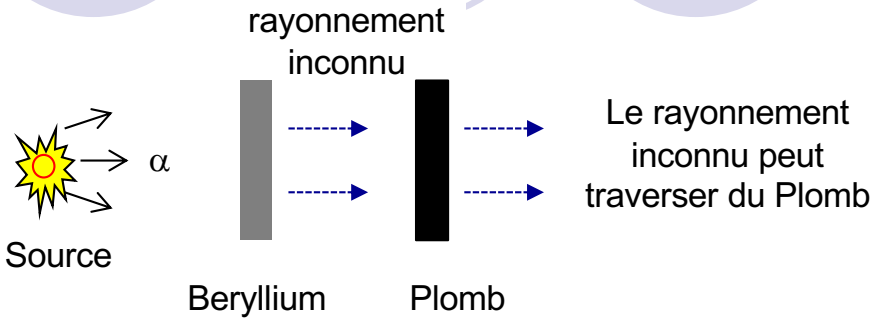
1930: W. Pauli suggère l'existence d'une nouvelle particule neutre de masse ~0 qu'il appelle 'neutronen' et qui partagerait l'énergie de désintégration β avec l'e^-

Cette particule (le neutrino) sera découvert en 1956

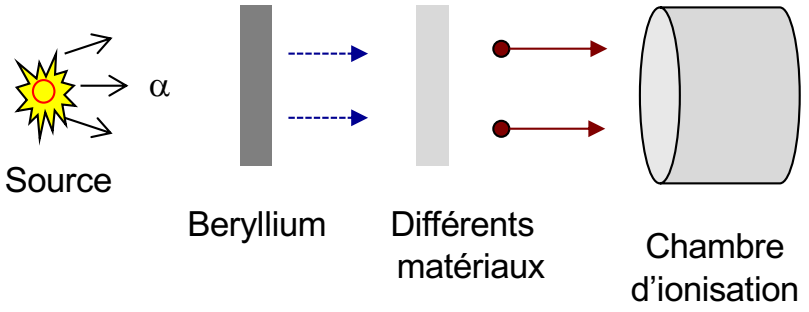
Découverte du neutron

1930-32

W. Bothe & H. Becker découvrent une étrange réaction



James Chadwick

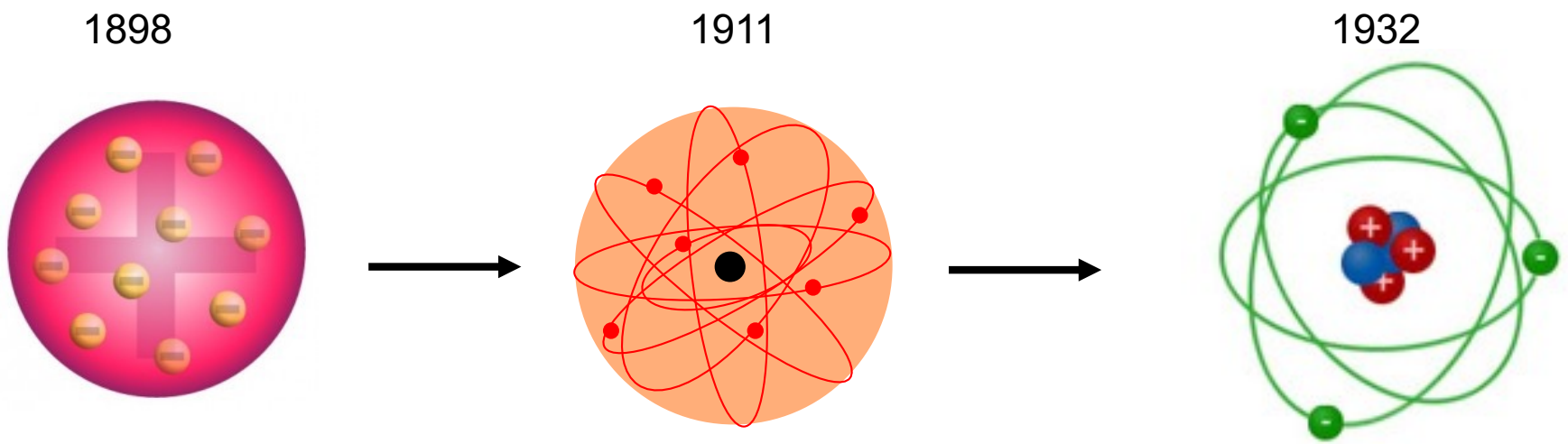


J. Chadwick démontre que le rayonnement correspond à une particule de masse ~1: le neutron

Proc. Roy. Soc., A, **136 (1932)** 692

Le noyau au complet

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



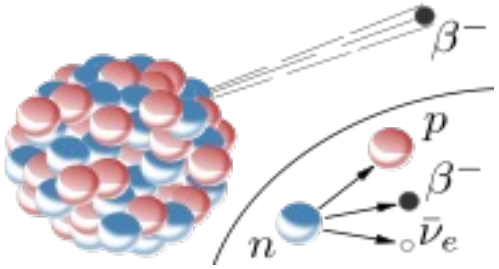
$$^{A}_{Z}X_{N}$$

La présence des neutrons dans le noyau explique l'isotopie et résout bon nombres d'autres problèmes liés à la présence d'électrons dans le noyau

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

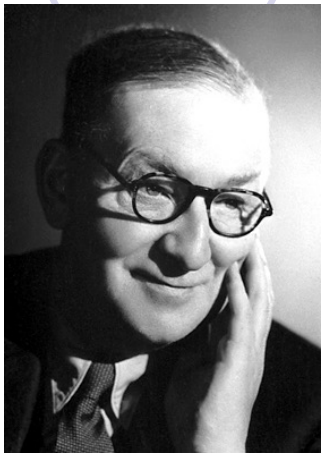


$$n \rightarrow p + e^- + \nu_e$$

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



John Cockroft

Multiplicateur de tension de Cockroft-Walton

Nature 129, Févier 1932, 242

Cyclotron de Lawrence

Physical Review. ***40*** *(1932) 19*

E.O. Lawrence

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

$$p + Li \rightarrow 2\,\alpha$$

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’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: Découverte de la radioactivité artificielle

$$^{27}_{13}Al + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{30}_{15}P + n$$

$$^{30}_{15}P \rightarrow e^{+} + {}^{30}_{14}Si + \nu$$

radio-phosphore !

Irène Curie et Frédéric Joliot

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

Eléments artificiels

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

Tableau périodique (1939)

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											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	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	57–71 La–Lu	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	At	86 Rn
(87)	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	(93)	(94)	(95)	(96)	(97)	(98)	(99)	(100)				

1940

1945

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu

XBL 769-10601

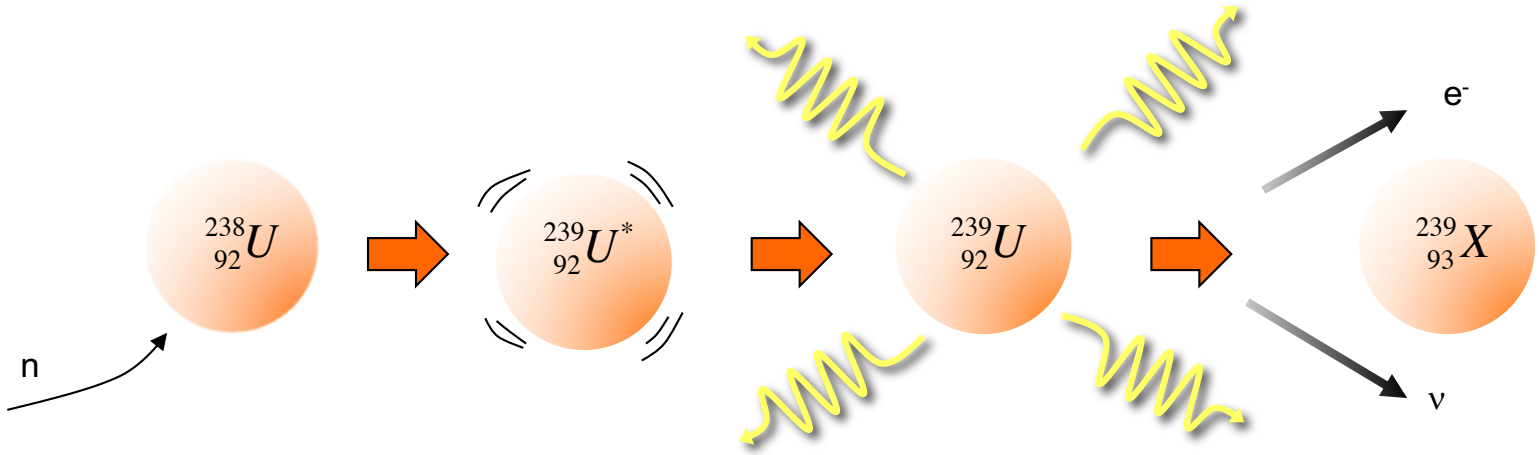
L'ère du neutron

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)

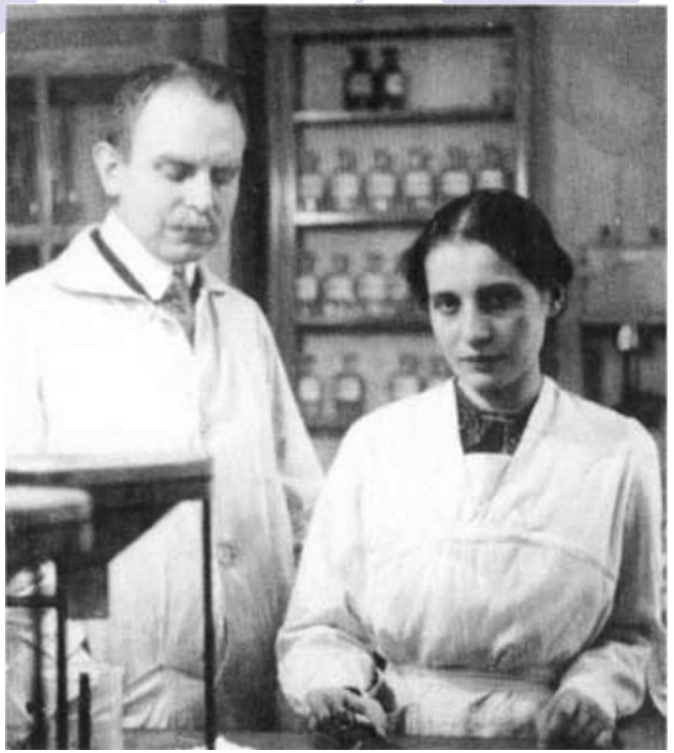


La quête des transuraniens...

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

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

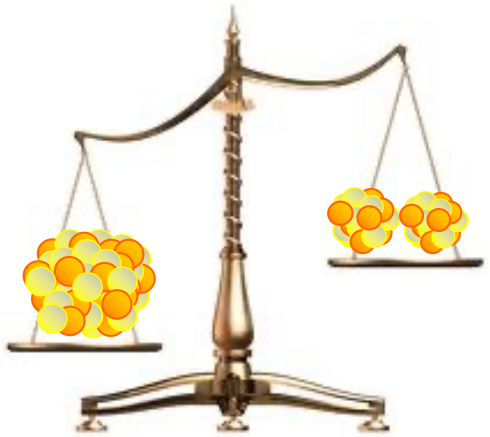
"Nous devons appeler Baryum, Lanthane et Cerium ce que nous avons appelé précédemment Radium, Actinium et Thorium.C'est une décision difficile qui contredit toutes les expériences de physique nucléaire menées jusquà présent."

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, Nautre 143 (1939) 239



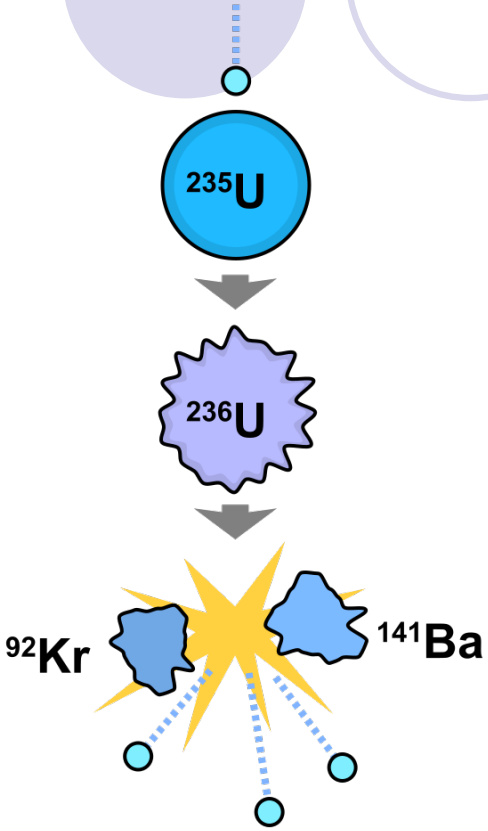
L'hypothèse est tout de suite confirmée expérimentalement par O. Frisch puis par d'autres (F. Joliot)

O. Frisch, Nature 143 (1939) 276

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

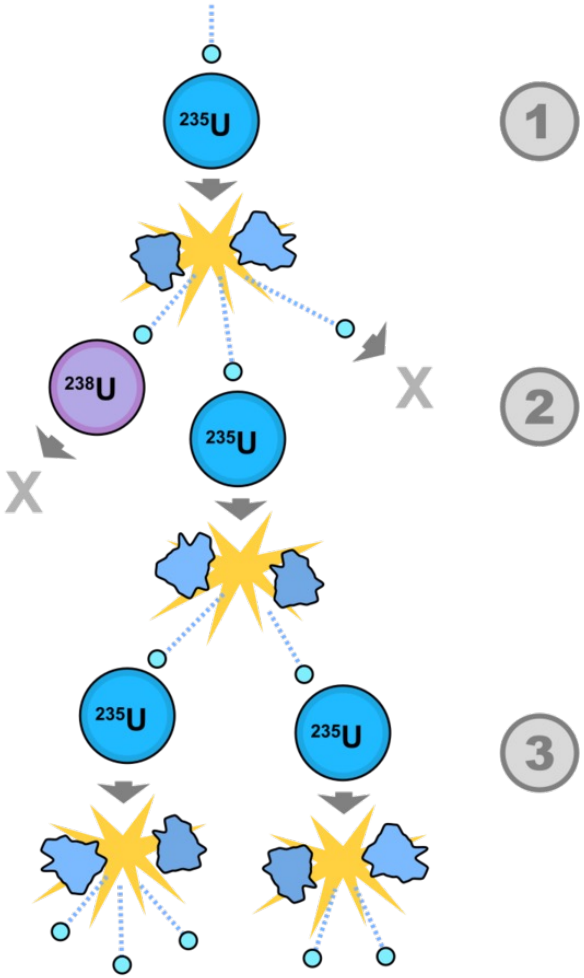
N. Bohr et A. Wheeler, Phys. Rev. 56 (1939) 426

Propriétés de la fission



Chaque fission de l'Uranium produit des neutrons

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



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

Francis Perrin introduit la notion de masse critique et de modérateur pour obtenir une réaction en chaîne

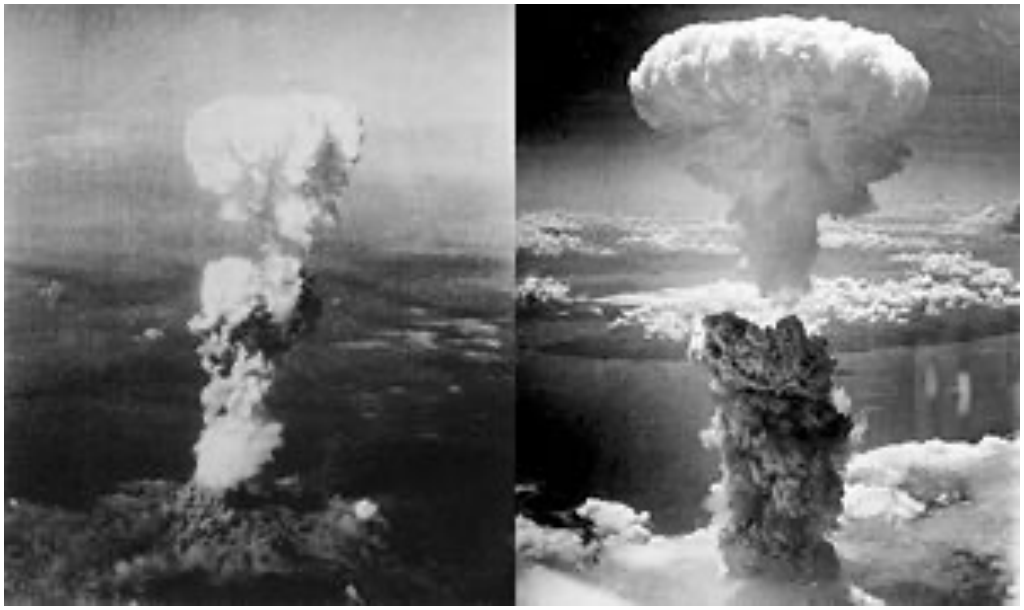
Le projet Manhattan et Chicago Pile-1

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

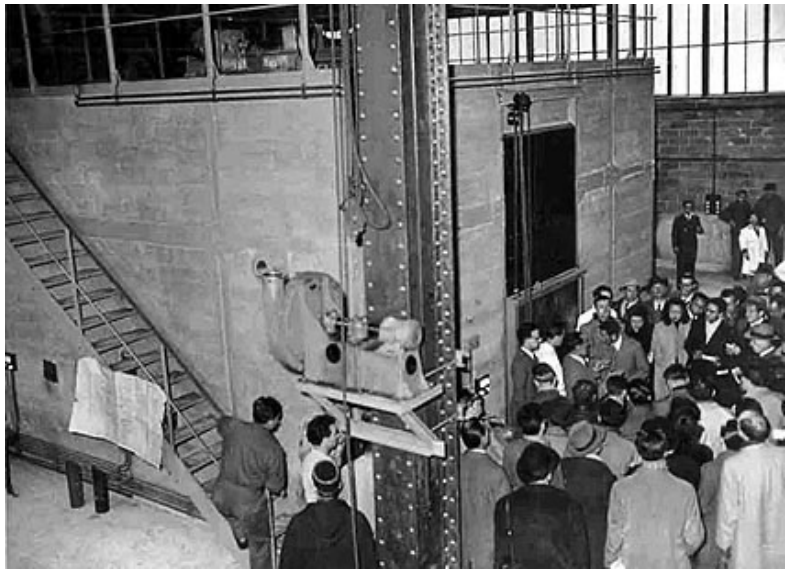
La première pile atomique est inaugurée en décembre 1942

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



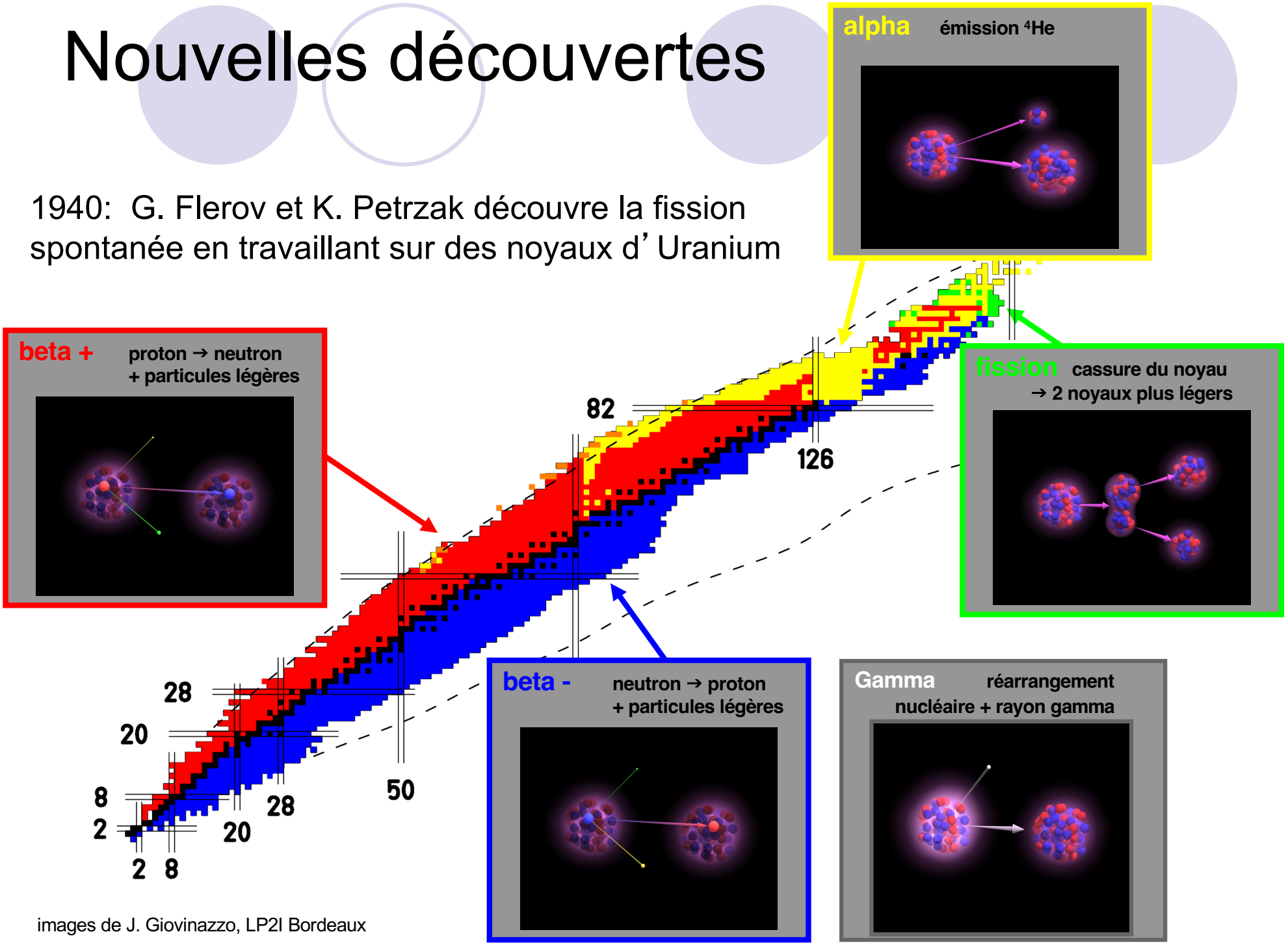
1948: Inauguration de la première pile atomique française: ZOE

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

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

Nouvelles découvertes

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



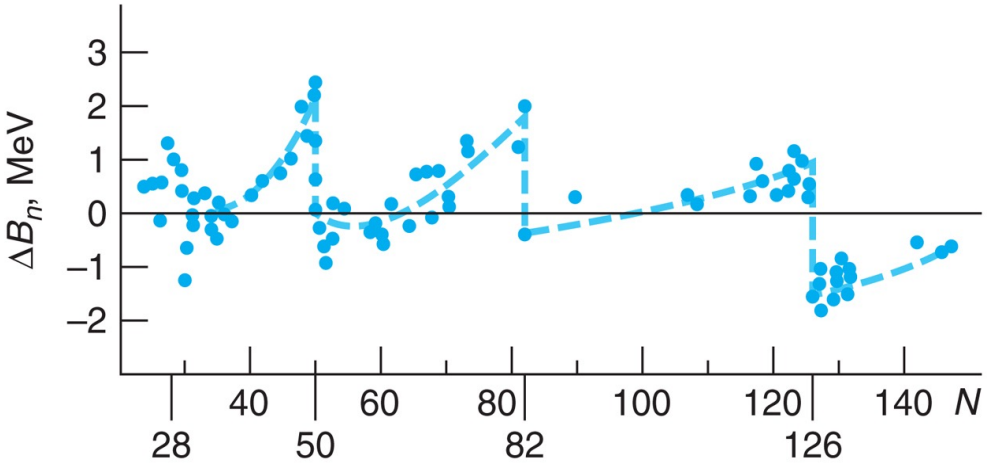
images de J. Giovinazzo, LP2I Bordeaux

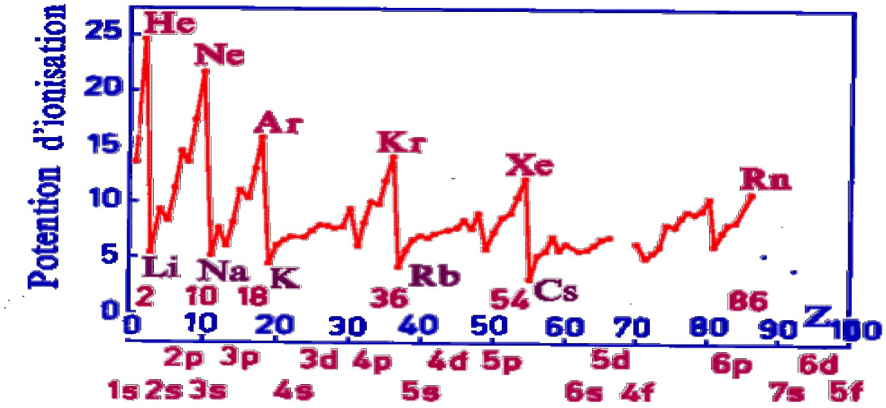
Nombres Magiques

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



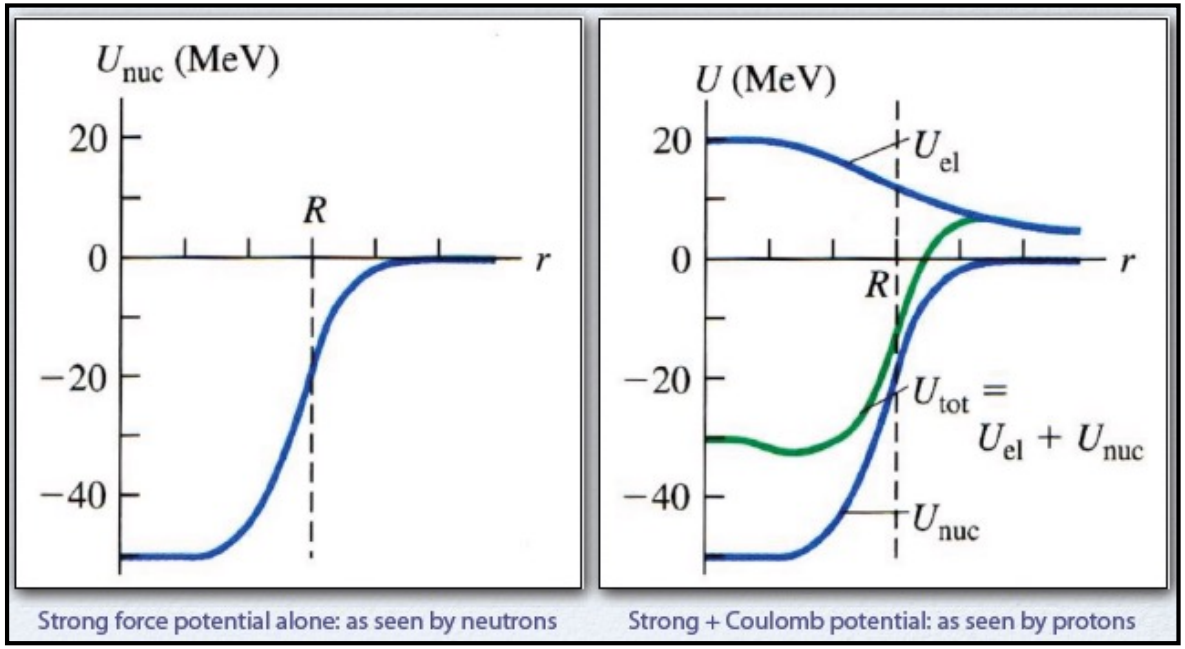


⇨ structure périodique dans le noyau ?

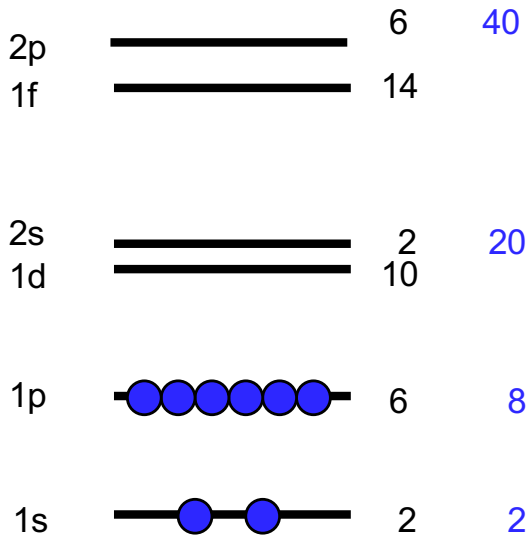
'On closed shells in nuclei', *M G. Mayer Phys. Rev. 74 (1948) 235*

La mécanique quantique ne reproduit pas ces nombres...

potentiel nucléaire moyen ressenti par les nucléons



niveaux d'énergie



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

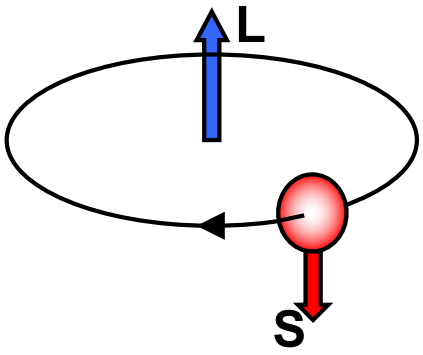
2, 8, 20, 40, 58, 92, 138

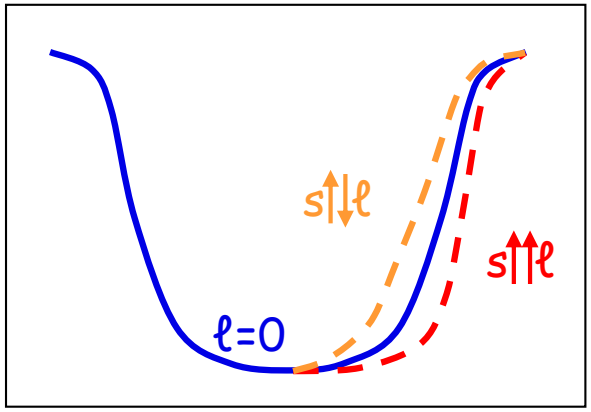
La question qui fait tilt !

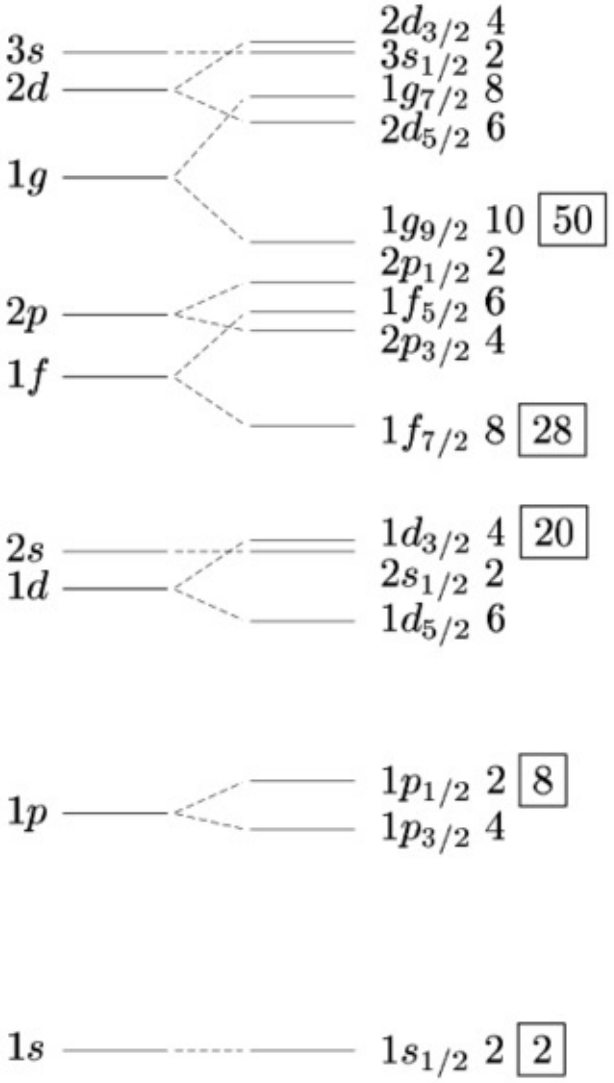
Thanks are due to Enrico Fermi for the remark, "Is there any indication of spin-orbit coupling?" which was the origin of this paper.

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

Hans Jensen

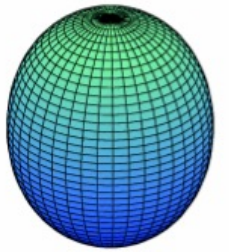


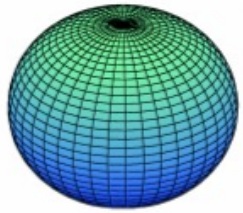




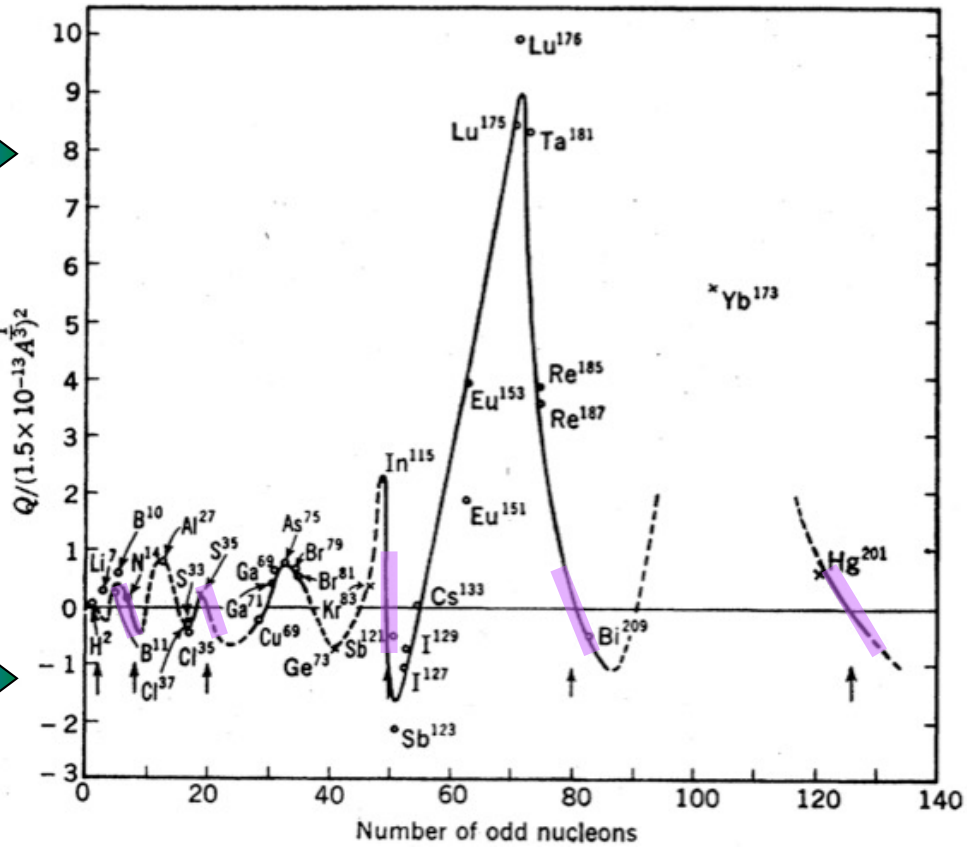
M.G. Mayer et H.D. Jensen 'Elementary Theory of Nuclear Shell Structure', 1955

Distribution de charge dans le noyau





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

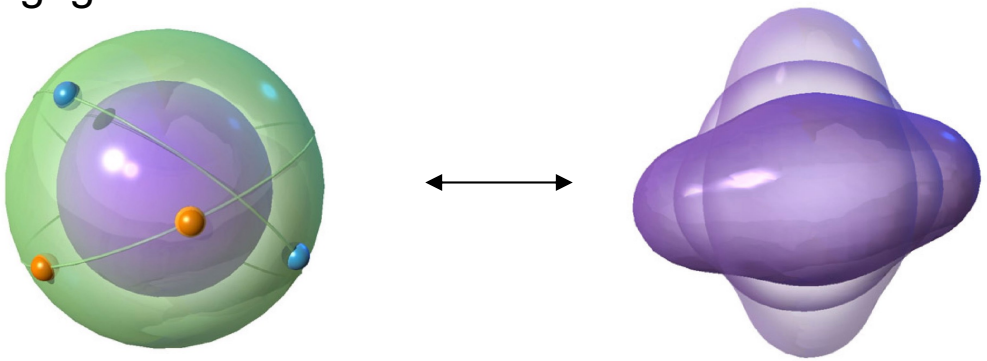


Certains moments sont jusqu'à 30 plus plus élevés que les prédictions !

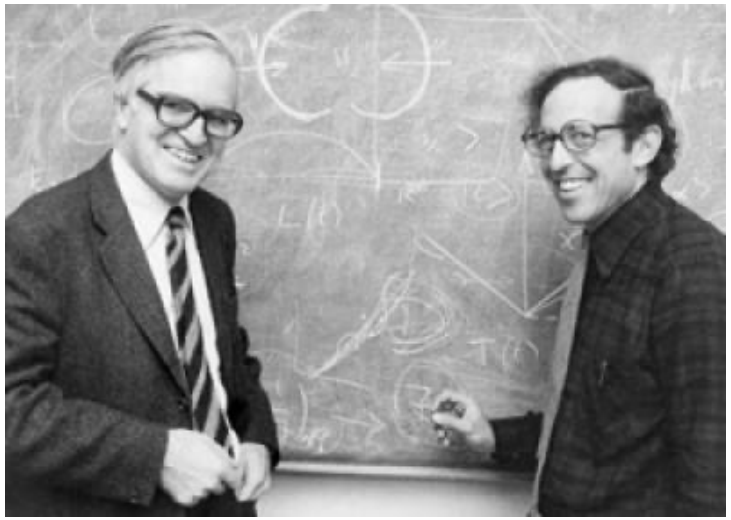
Et si le noyau gagnait à se déformer ?

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

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



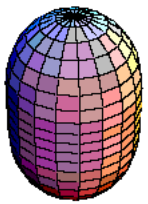
James Rainwater

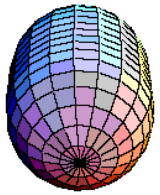


Aage Bohr et Ben Mottelson

Le modèle unifié: couplage des oscillations et rotations de la goutte liquide aux mouvements des nucléons individuels

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

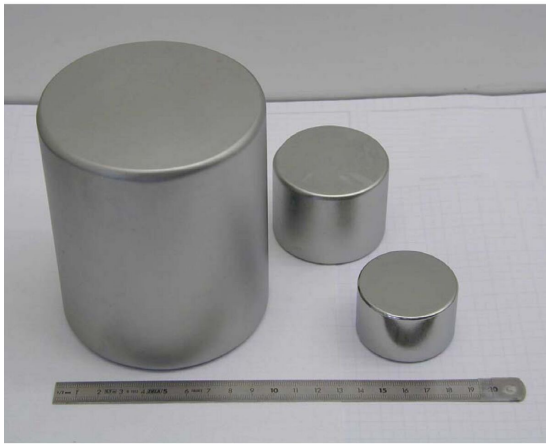




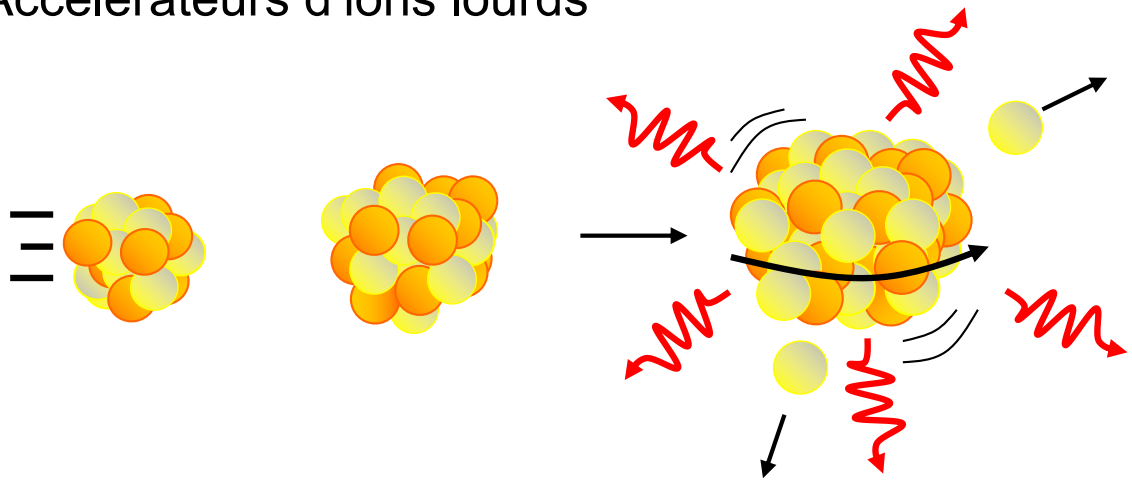
1975

Développement des années 1950-70

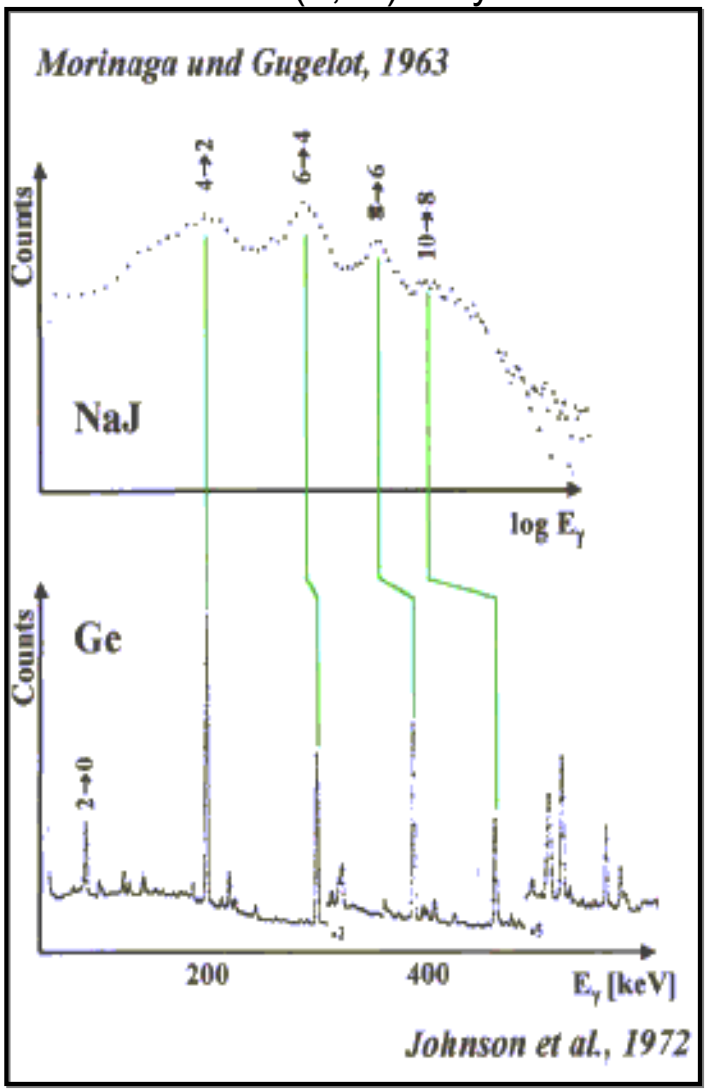
Détecteurs scintillateurs puis semi-conducteurs



Accélérateurs d'ions lourds

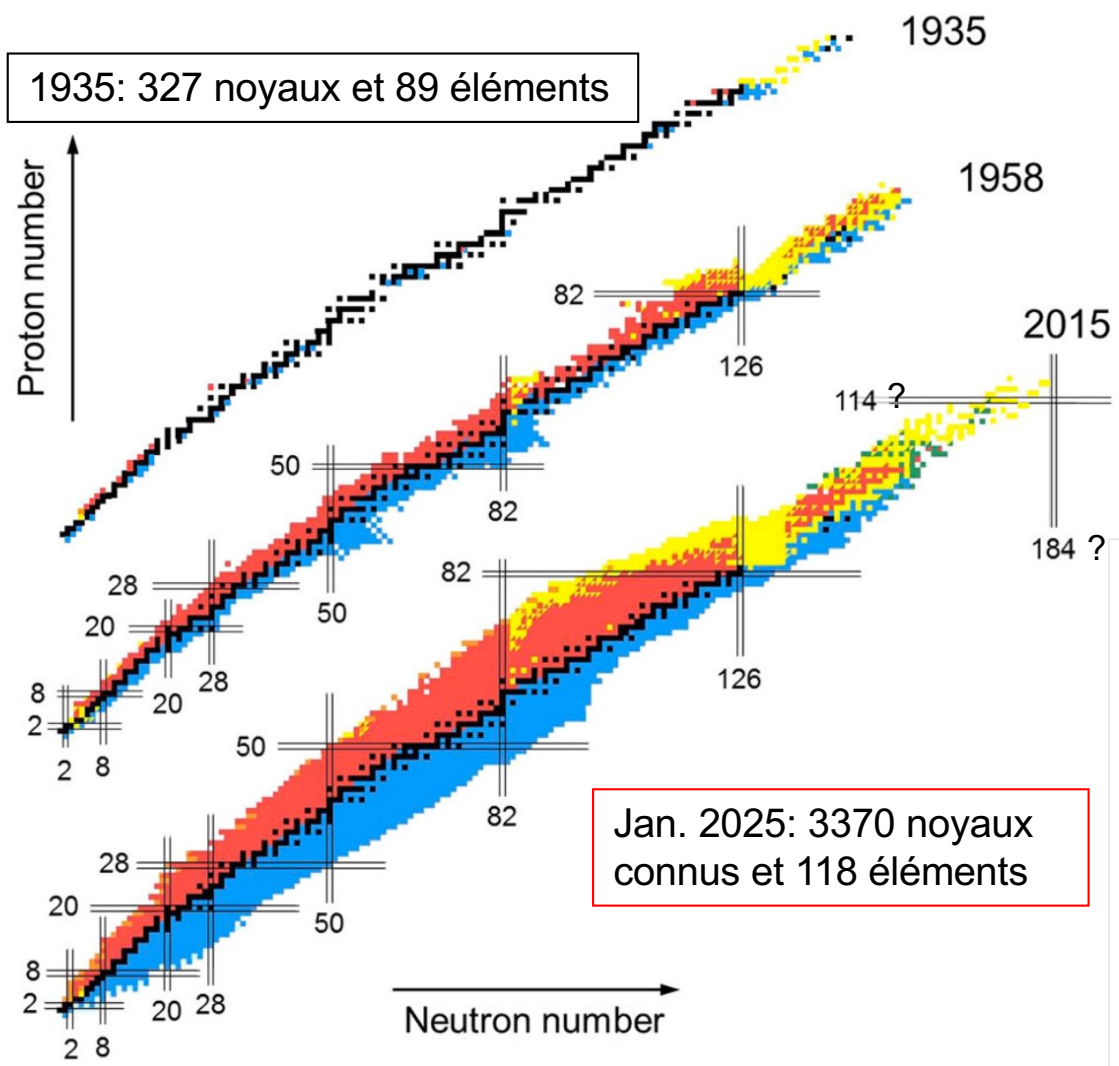


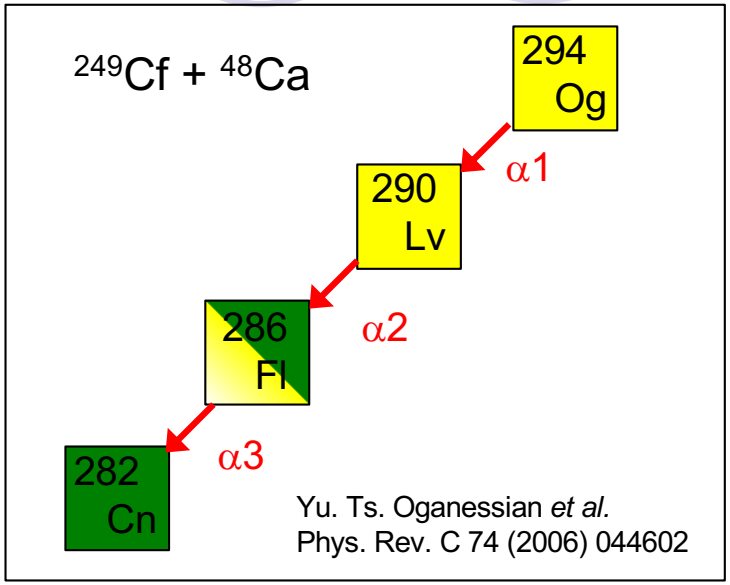
$^{160}Gd(\alpha,4n)^{160}Dy$

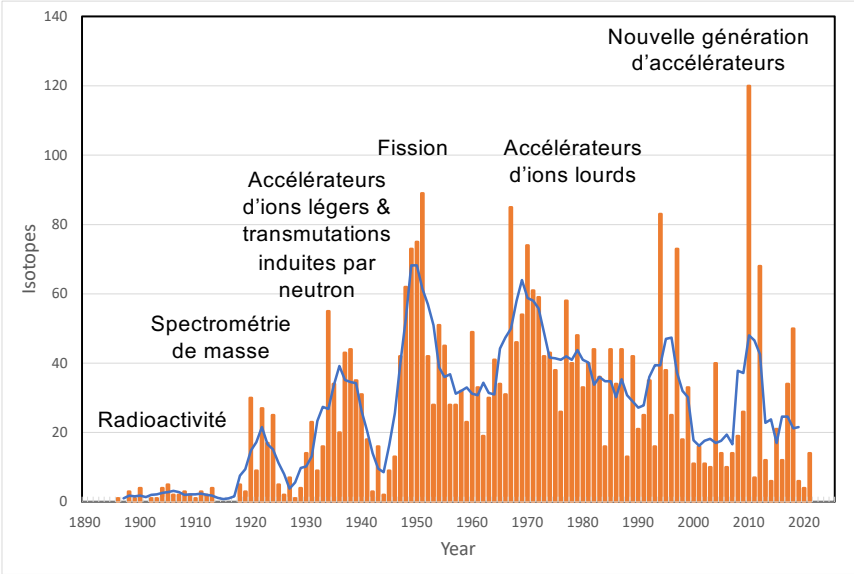


Evolution du paysage nucléaire au fil des développements technologiques

Adamian, G.G., Antonenko, N.V., Diaz-Torres, A. et al., Eur. Phys. J. A (2020) 56:47



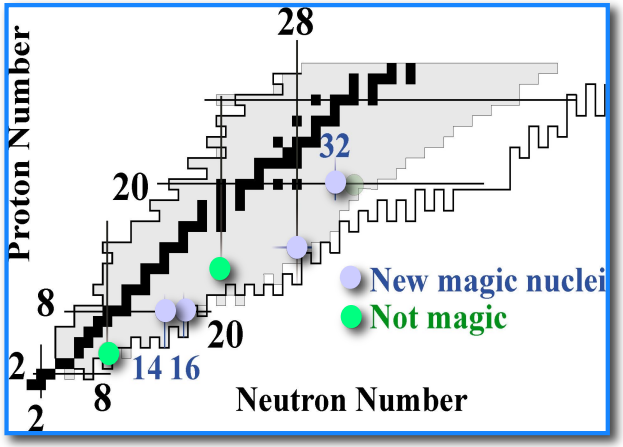




M. Thoennessen, private comm.

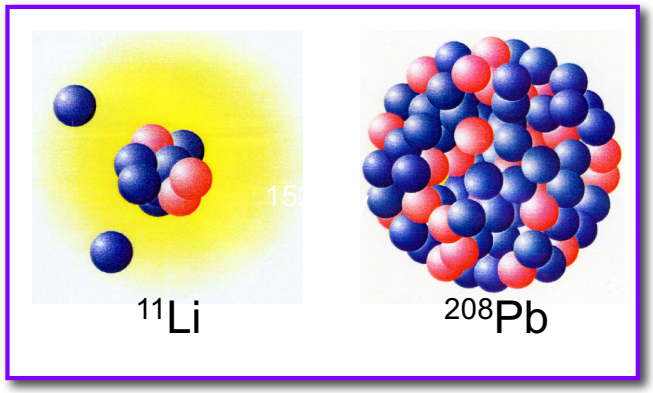
Grande variété de phénomènes nucléaires

Nouveaux nombres magiques



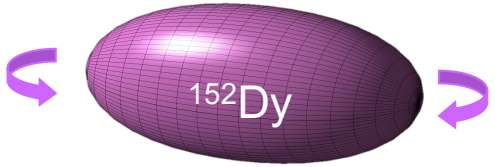
Noyaux à halo

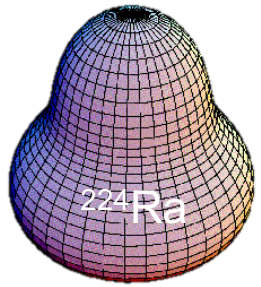
I. Tanihata et al., Phys. Rev. Lett. 55, 2676 (1985)



Déformations exotiques

P.J. Twin et al., Phys. Rev. Lett. 57 (1986) 811

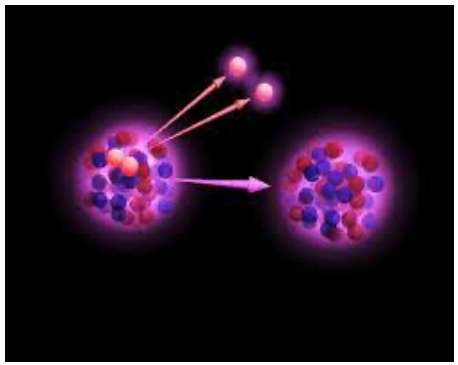


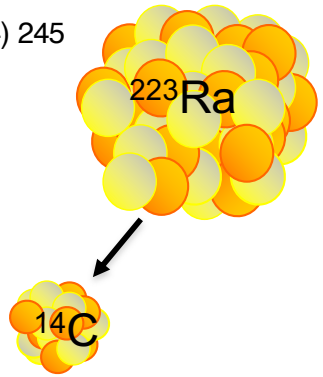


P. Butler et al., Phys. Rev. Lett. 124 (2020) 042503

Nouvelles radioactivités

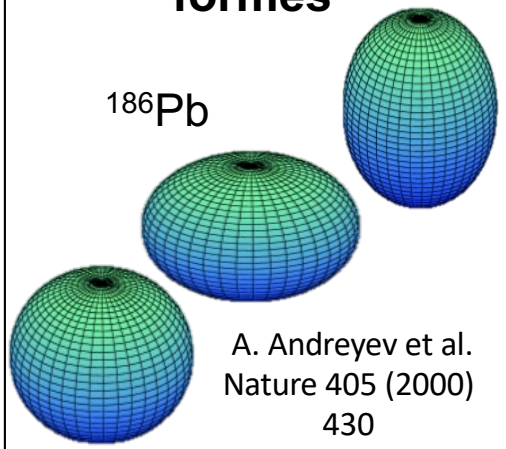
H.J. Rose et al., Nature 307 (1984) 245





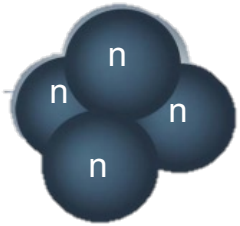
J. Giovinazzo et al., Phys. Rev. Lett. 89, 102501 (2002)

Coexistence de formes



A. Andreyev et al. Nature 405 (2000) 430

Nouvel état de la matière nucléaire



M. Duer et al., Nature 606 (2022) 678

En ce début du 21ème siècle, le noyau atomique n'a pas fini de nous surprendre !