

Les Noyaux et leurs Interactions

A. Lopez-Martens

CSNSM, IN2P3/CNRS, Université Paris Sud

Objectifs

- un peu de connaissances...
- un peu d'histoire...
- les dernières nouvelles en la matière....

Plan

- Introduction - *De la Radioactivité au Noyau*
- Echelles Nucléaires - *Du Noyau jusqu'au Neutron et les Accélérateurs*
- Intéraction Nucléaire - *D'avant 2ème guerre mondiale jusqu'à nos jours*

Part 1 - Introduction & Radioactivité

Le Noyau

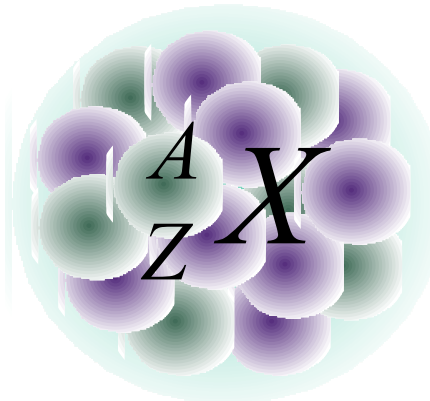
Z protons, N neutrons

Nombre de masse $A = Z + N$

Numéro atomique Z

Charge du noyau $+Ze$ ($e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C)

Les nucléons sont des **fermions**: spin $1/2$, principe d'exclusion de Pauli



A nucléons en interaction

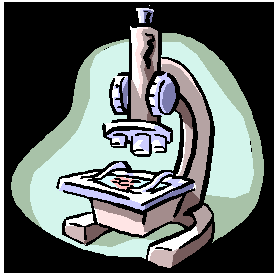
Un système complexe

Comprendre et prédire l'organisation des nucléons
au sein du noyau et les propriétés qui en découlent

=

Enjeu de la physique nucléaire

Resolution

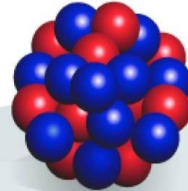


140
masse du pion



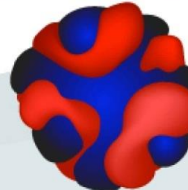
baryons, mesons

8
énergie de séparation
d'1 proton dans le Plomb



protons, neutrons

1.32
énergie de vibration
dans l'étain

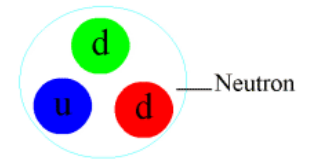
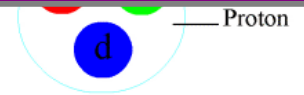


nucleonic densities
and currents

0.043
énergie de rotation
dans l'Uranium



collective coordinates



Physique des Noyaux

La Charte des Noyaux

3104 nucléides (fin 2011)

288 stables (= dont la durée de vie est plus grande que l'âge du système solaire)

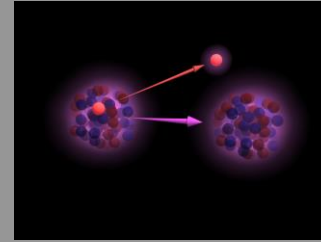
Isotope: même Z (même élément chimique), N différent

Isotone: même N, Z différent

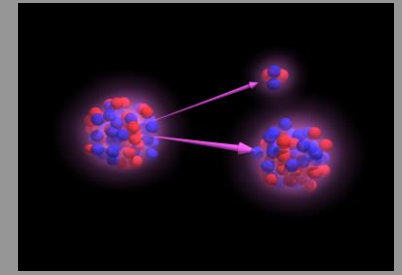
Isobar: même A, Z&N différents

radioactivité proton

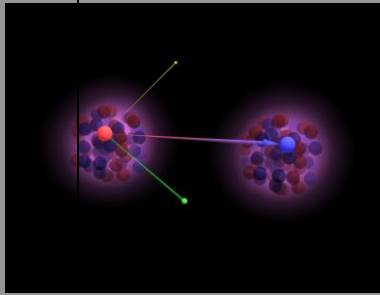
noyau \rightarrow proton + (noyau - 1 proton)



alpha émission d'⁴He



beta + proton \rightarrow neutron

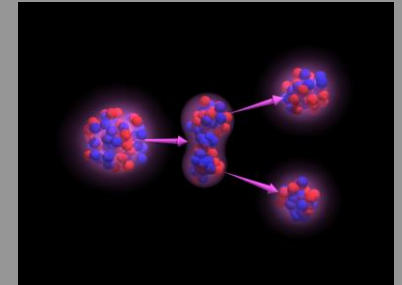


50

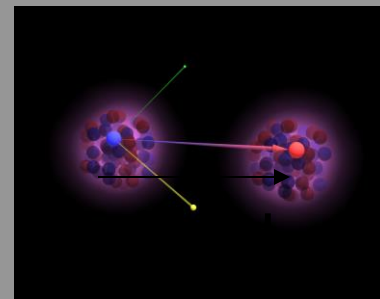
82

126

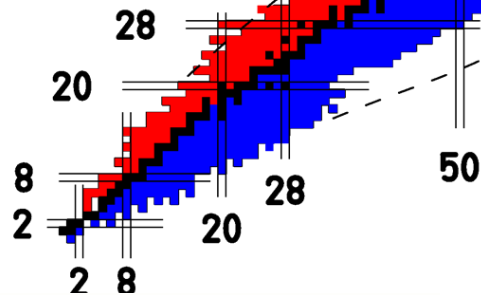
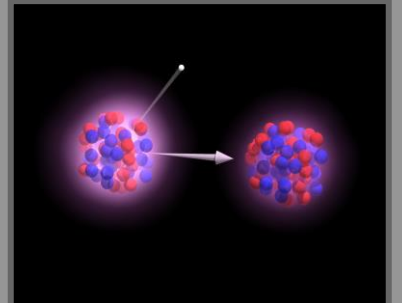
fission cassure du noyau



beta - neutron \rightarrow proton



Gamma relaxation nucléaire + rayon gamma

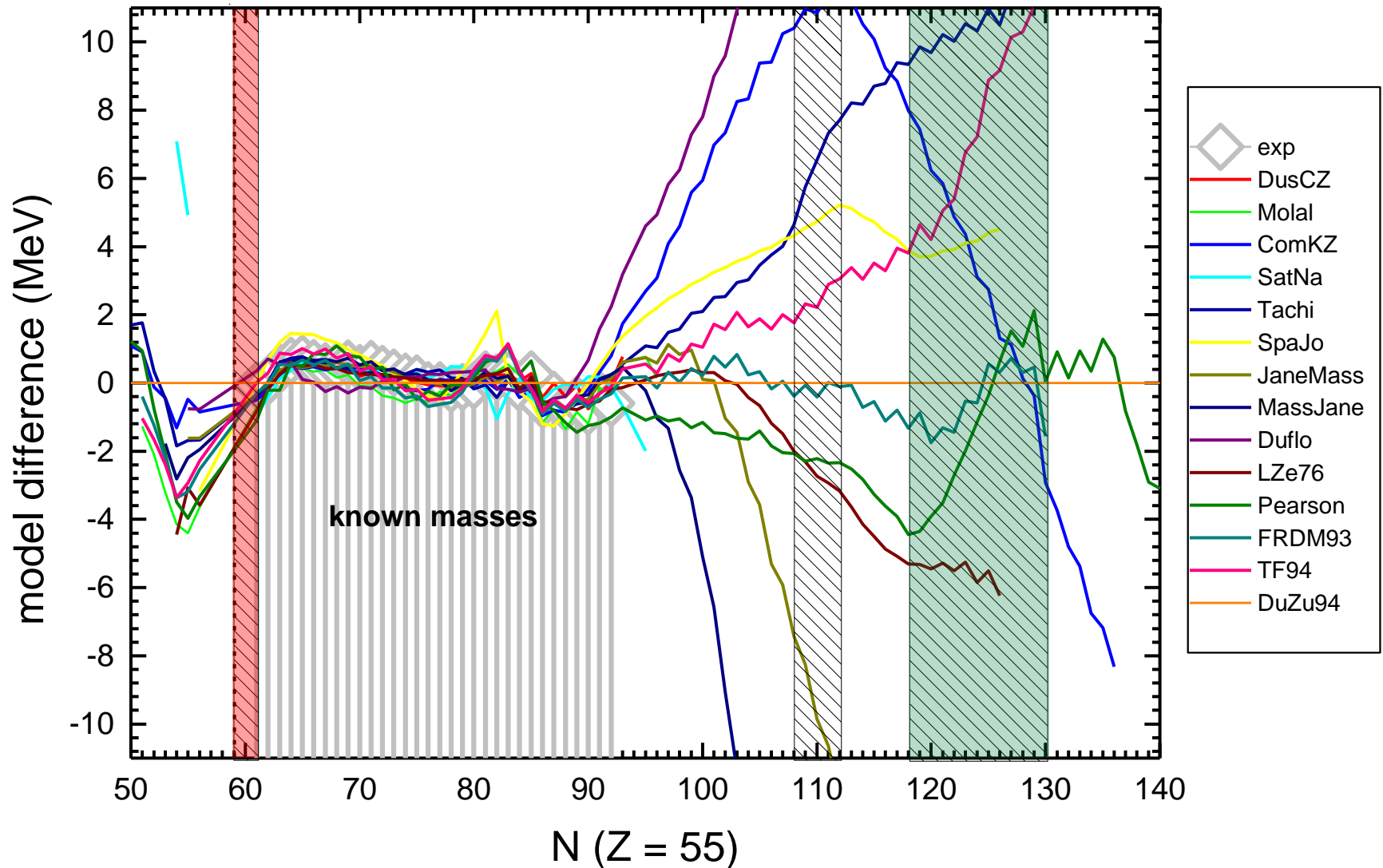


prédiction: ~7000 nucléides liés

Limites de la chartre ?

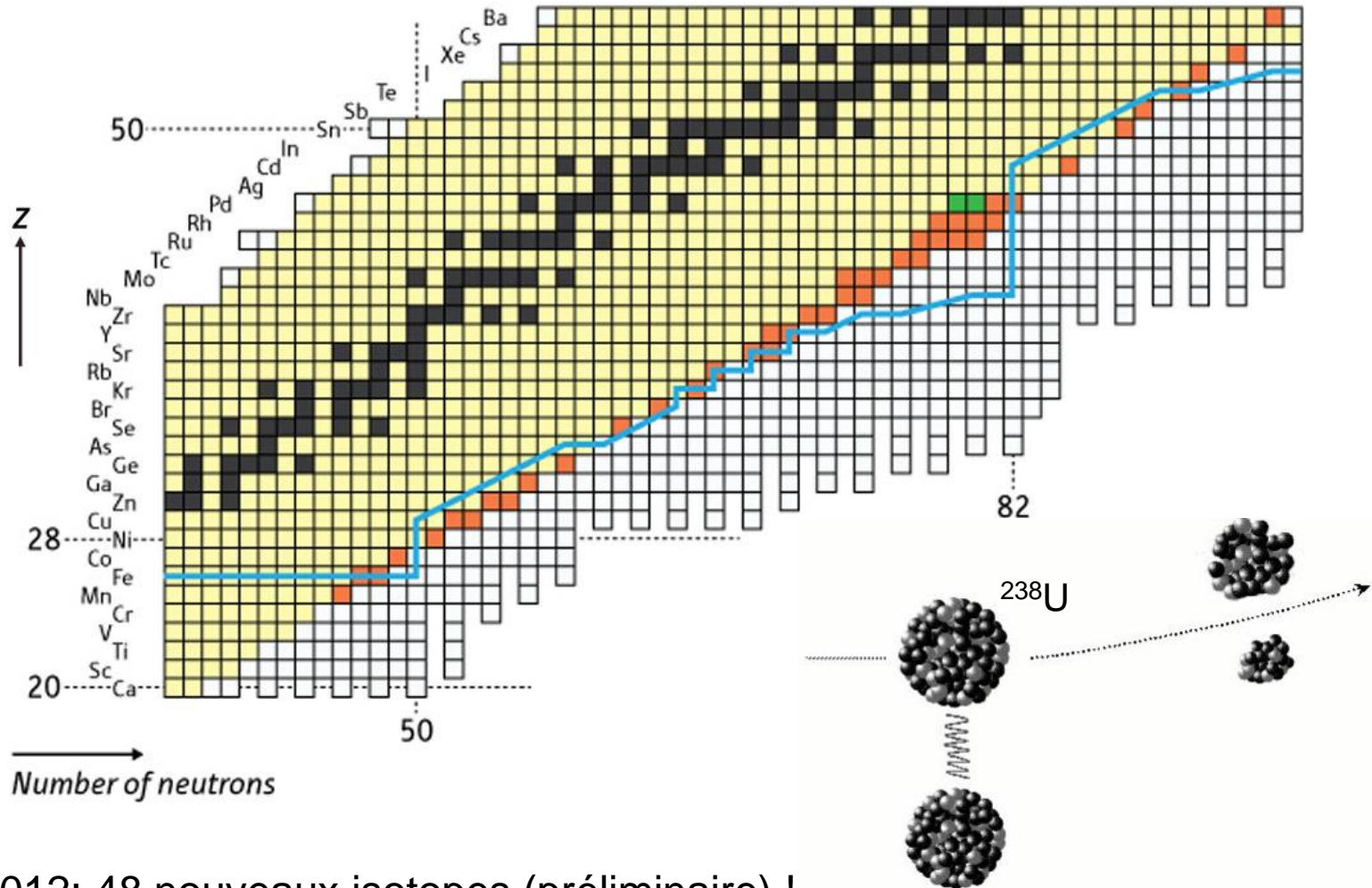
$$S_p(Z, N) = [M_{noy}(Z - 1, N) + m_p - M_{noy}(Z, N)] c^2$$

$$S_n(Z, N) = [M_{noy}(Z, N - 1) + m_n - M_{noy}(Z, N)] c^2$$



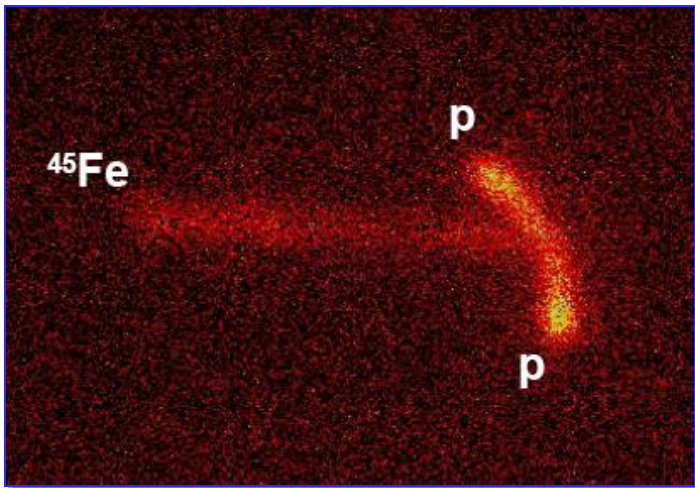
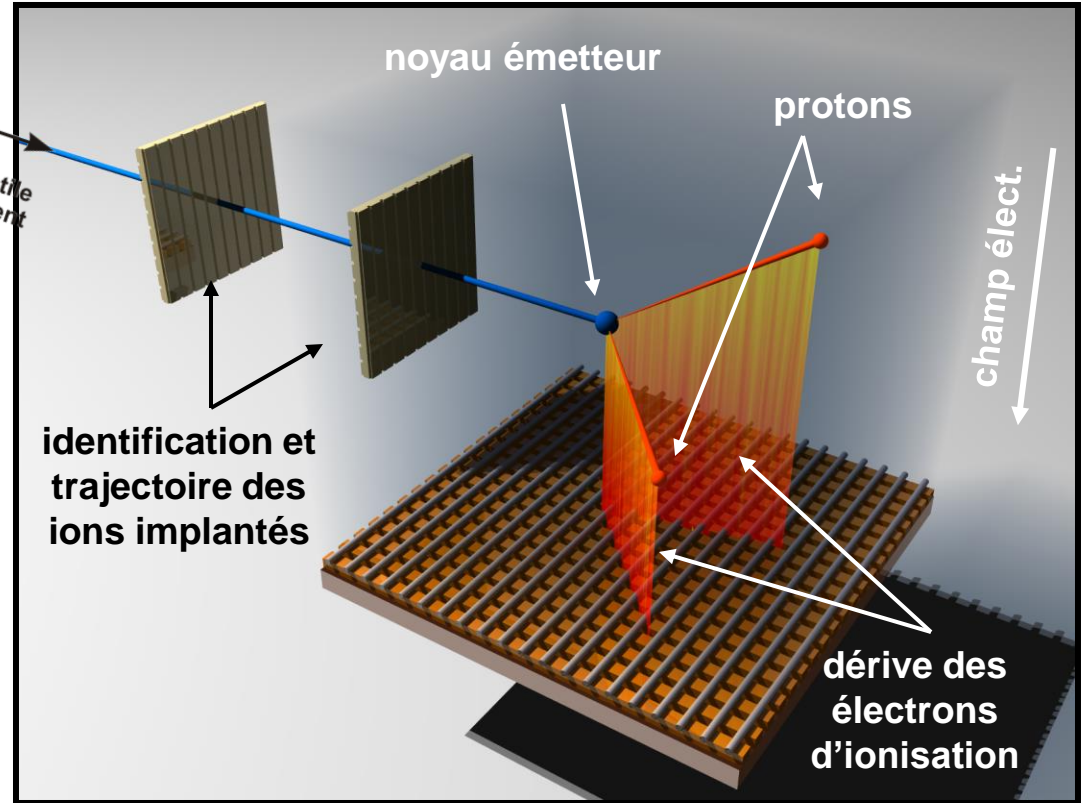
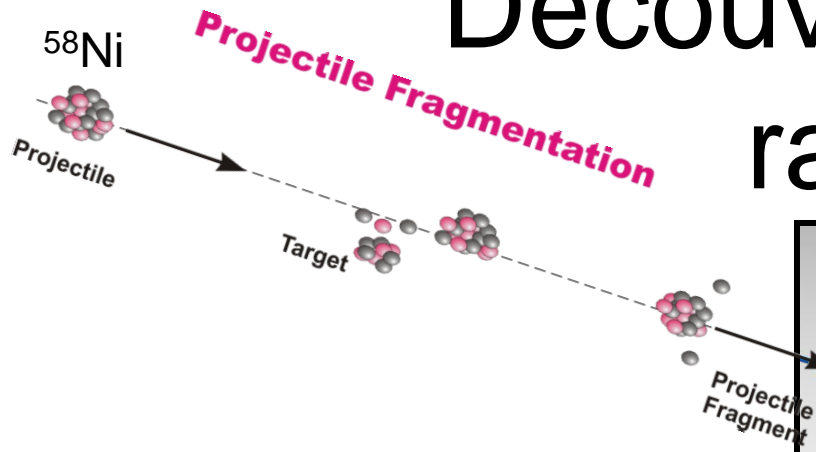
Découverte de Nouveaux Isotopes

T. Ohnishi et al. , J. Phys. Soc. Jpn. 79 (2010) 073201



2011-2012: 48 nouveaux isotopes (préliminaire) !

Découverte de nouvelles radioactivités

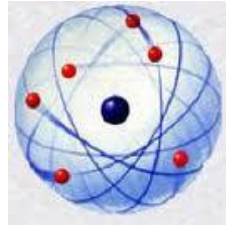


- J. Giovinazzo et al., Phys. Rev. Lett. 89, 102501 (2002)
- M. Pfützner et al., Eur. Phys. J. A14, 279 (2002)
- K. Miernik et al., Phys. Rev. Lett. 99, 192501 (2007)

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 ”



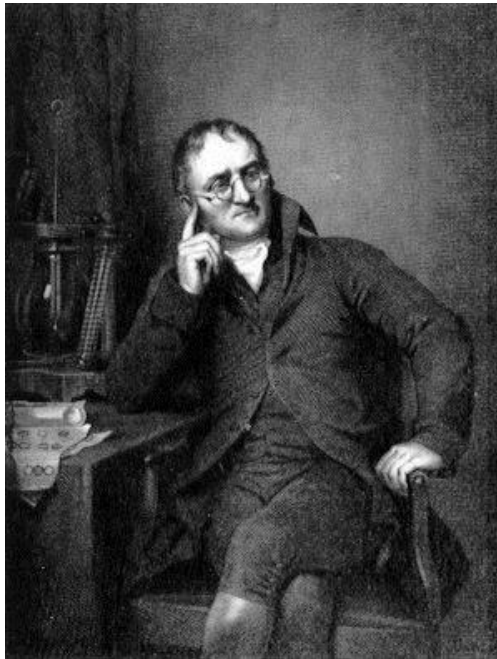
A l'aube du 20^{ème} siècle



“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)

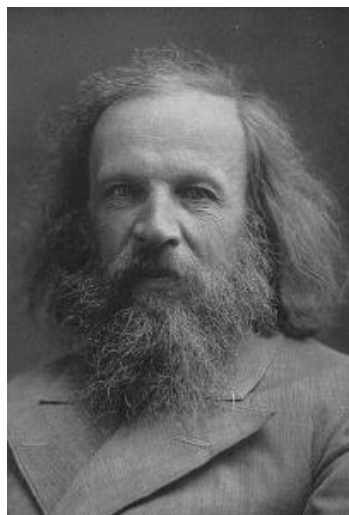
-Les atomes d'un même élément
sont identiques

-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	Ru = 104,4	Ir = 198.
		Ni = 59	Pd = 106,6	Os = 199.
		Co = 59	Pt = 197,1	
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 = 28,1	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?	

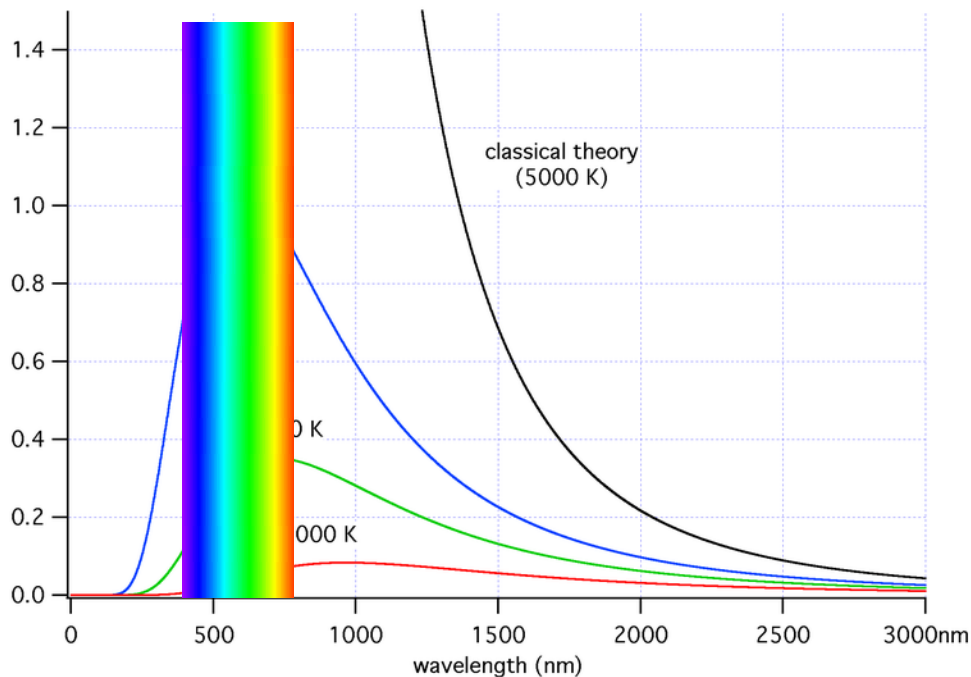
L'emplacement dans le tableau est donné par **Z** (= numéro atomique, de AtomZahl)

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

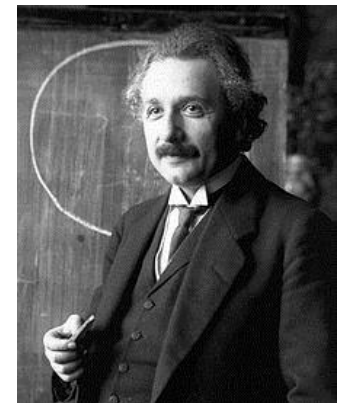


Max Planck

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

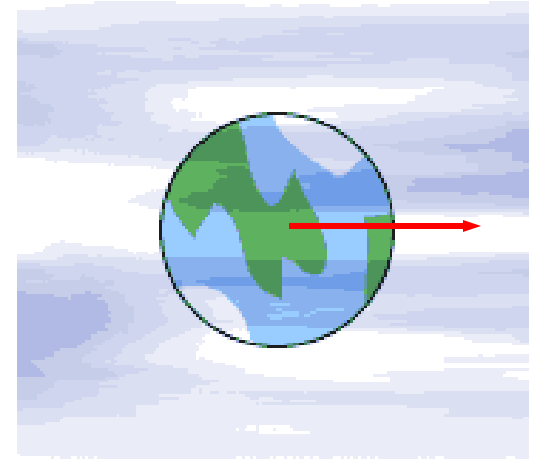
Selon A. Einstein la discontinuité de Planck provient de la structure granulaire de la lumière: la lumière est composée de **quantas lumineux = photons**



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

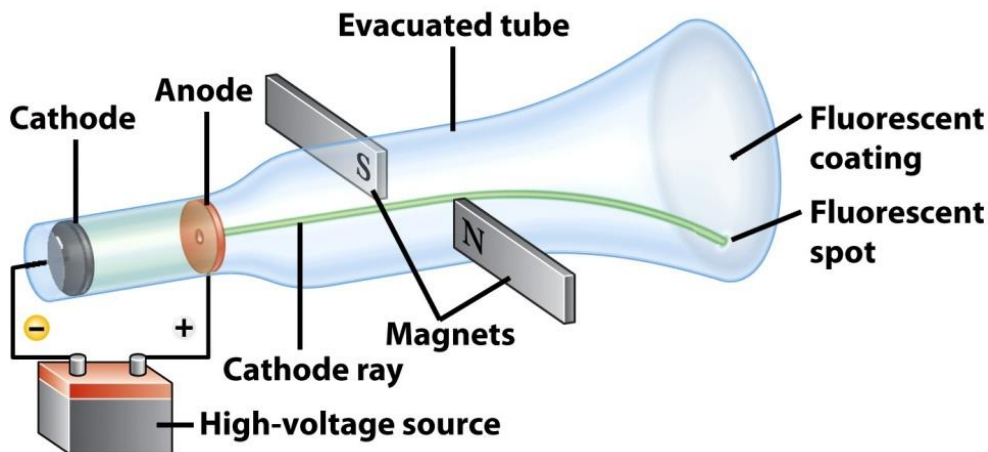
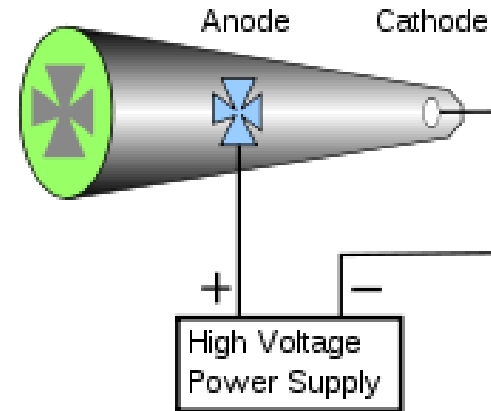


1887: échec de l'expérience d'interférométrie de Michelson-Morley

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

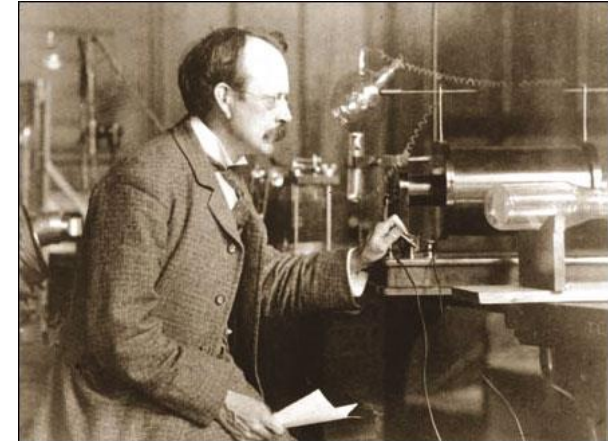
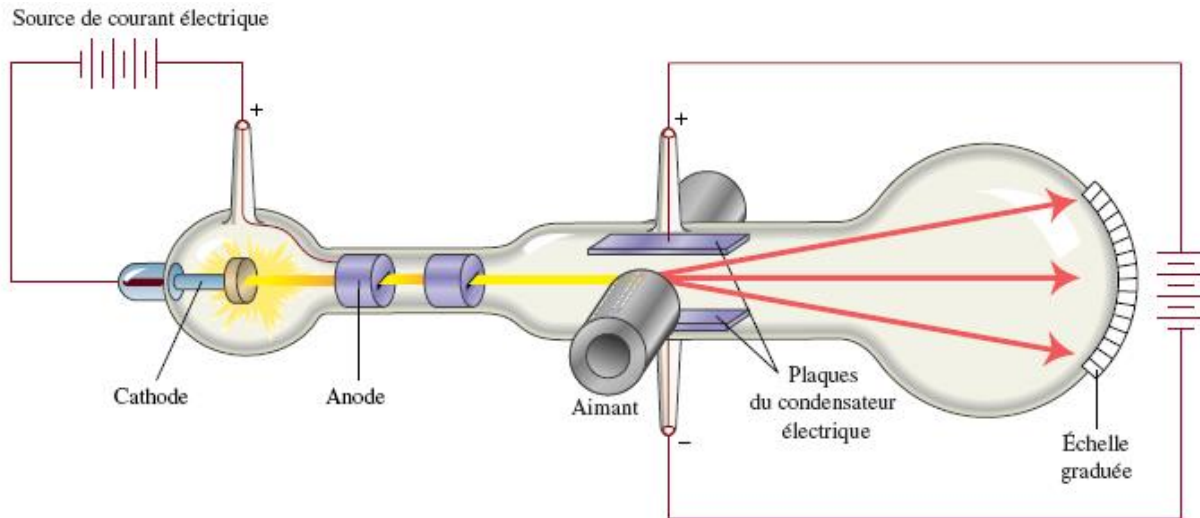
$$E = mc^2$$

La révolution du tube cathodique



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

Les corpuscules

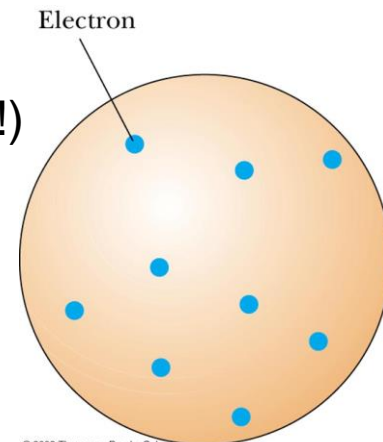


John Joseph Thomson

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'



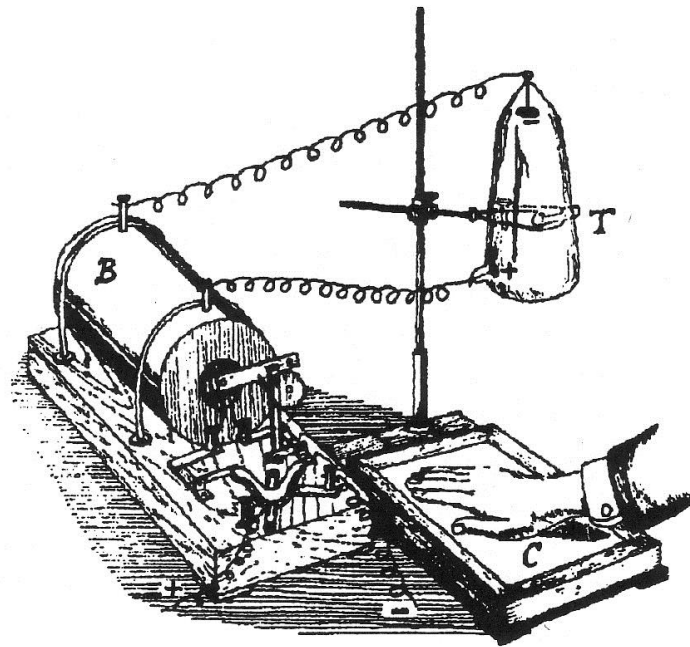
Des rayons cathodiques aux rayons X

1895 W. Röntgen

découverte des rayons X



Wilhelm Röntgen



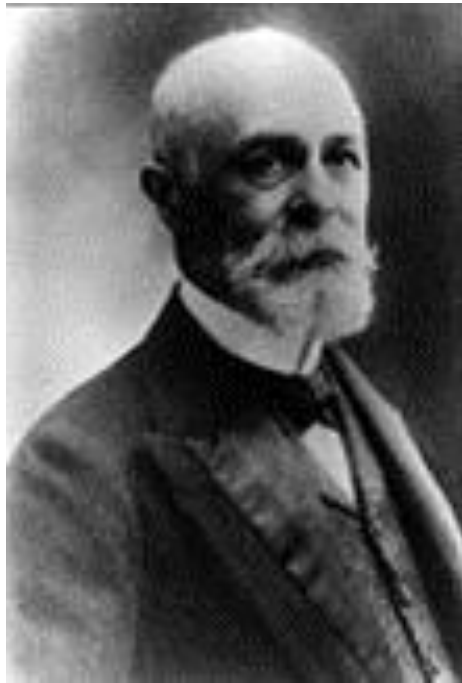
W. Röntgen reçoit le 1^{er} prix Nobel de Physique en 1901



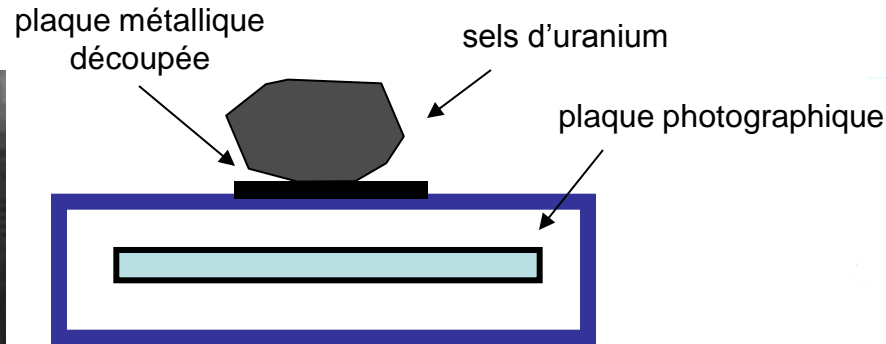
Des rayons X aux rayons uraniques

1896 H. Becquerel

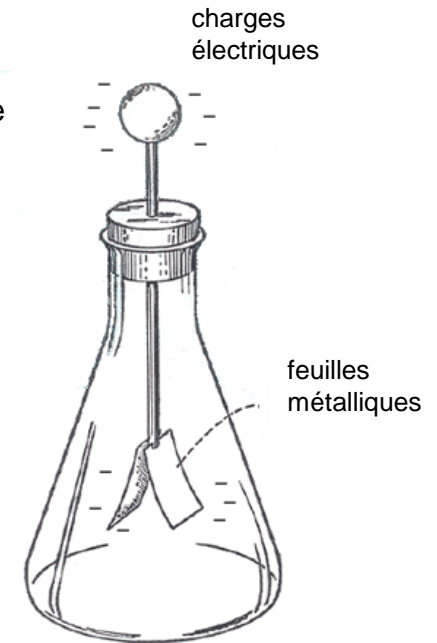
découverte d'un nouveau rayonnement émis par l'Uranium



Henri Becquerel



*10 - 11 - 96. Sulfate double d'uranyle et de Potasse sur
Papier noir. Couvré de la même manière.
Exposé au soleil le 27. et dans le noir depuis le 28. -
Ninety-sixième de l'année.*



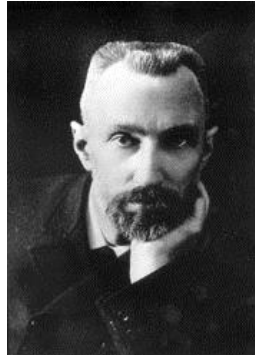
Les rayons uraniques ionisent l'air et provoquent la décharge d'un électroscope

Des rayons uraniques à la radioactivité

1898 Marie & Pierre Curie



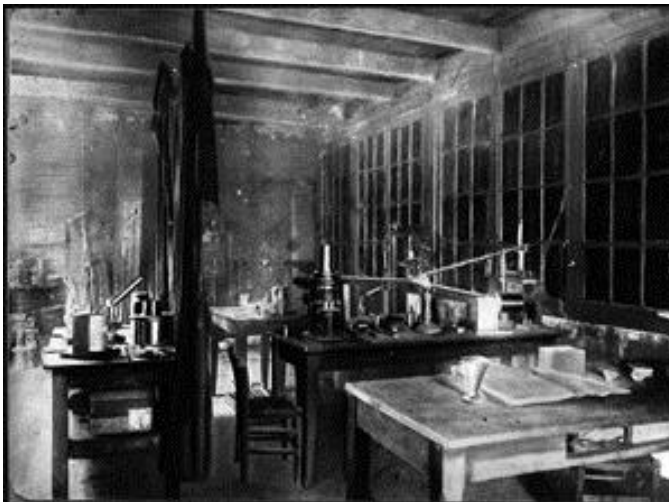
Marie Curie



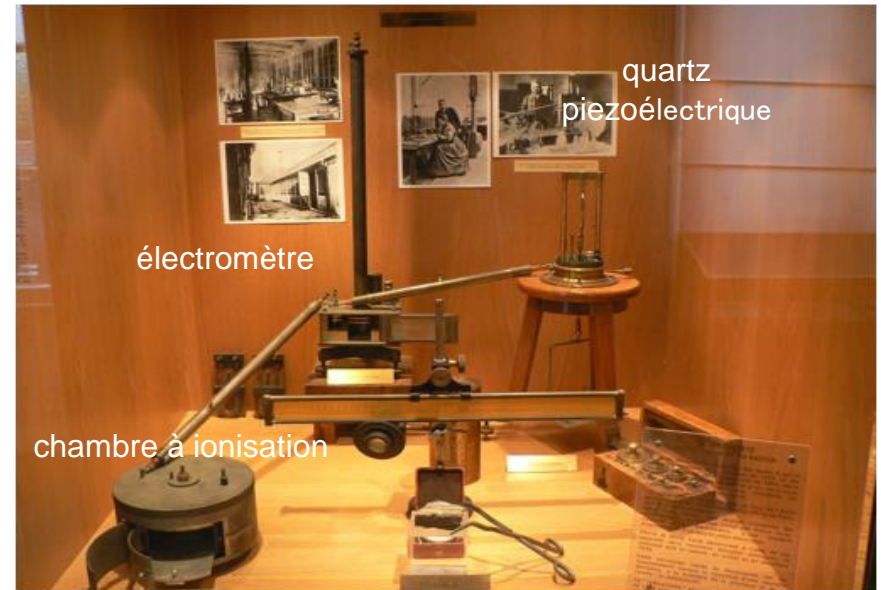
Pierre Curie

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



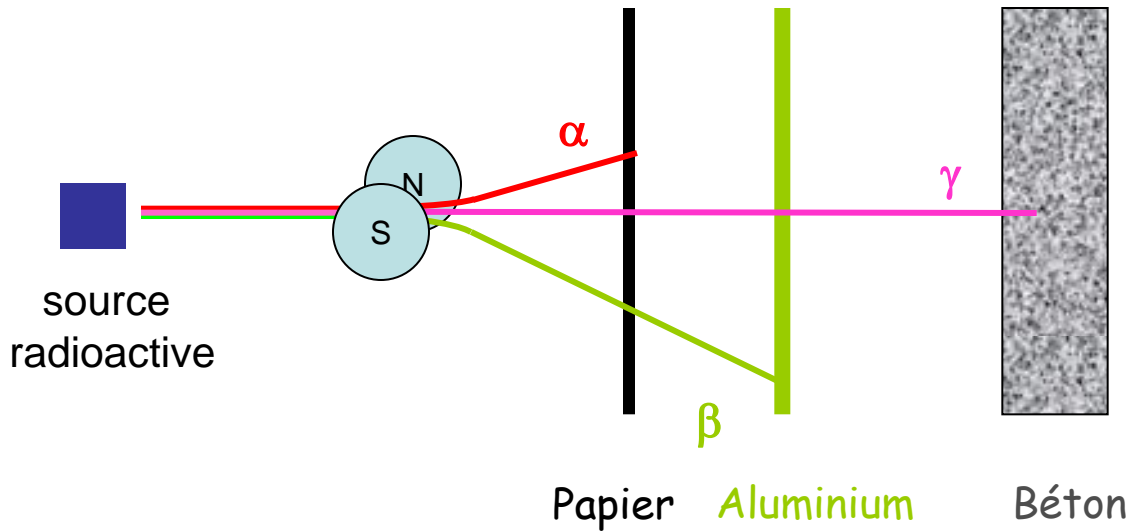
La radioactivité est multiple

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

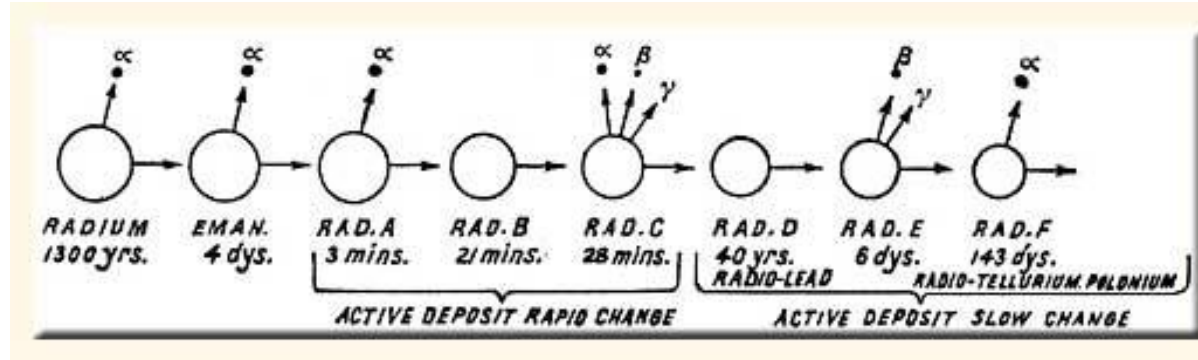
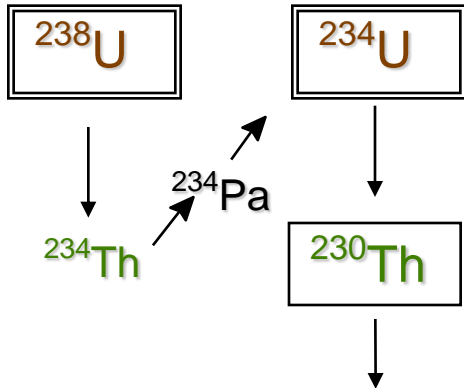


Paul Villard

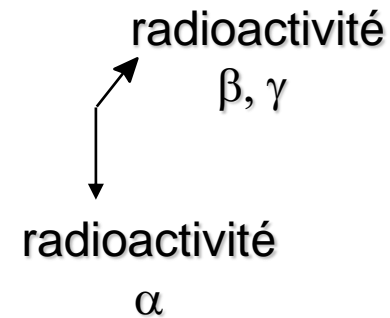
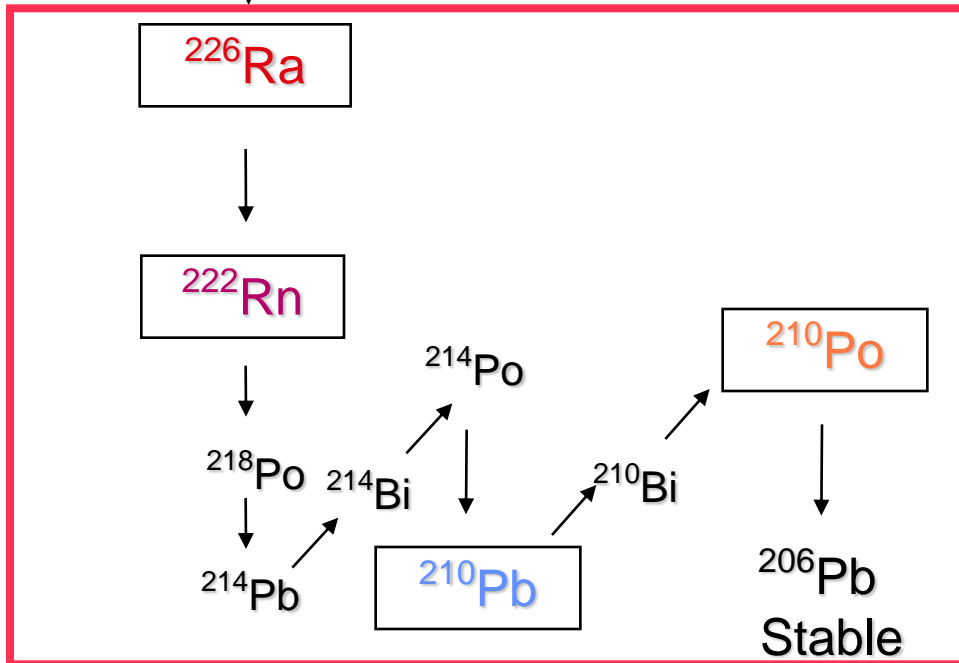
Les atomes se transforment !

1902 E. Rutherford & F. Soddy

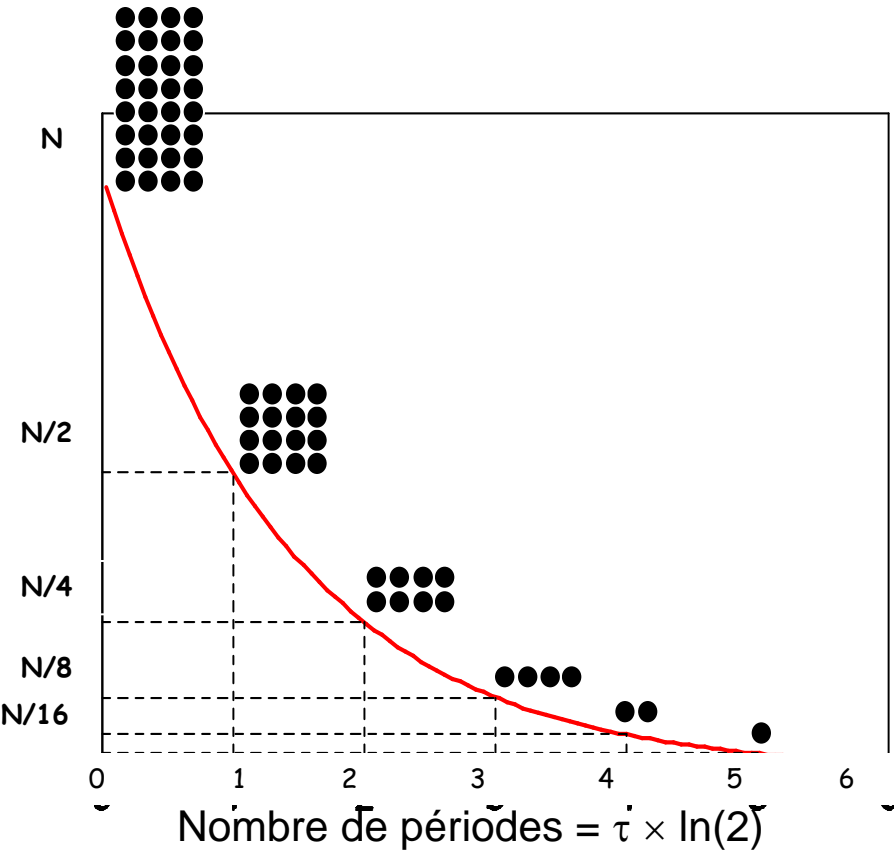
transmutation des atomes



Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1905



Décroissance radioactive



Nombre de
noyaux
au temps t

Nombre initial
de noyaux

Constante de
décroissance

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

$$\text{Activité} = \lambda N(t) = N(t) / \tau$$

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

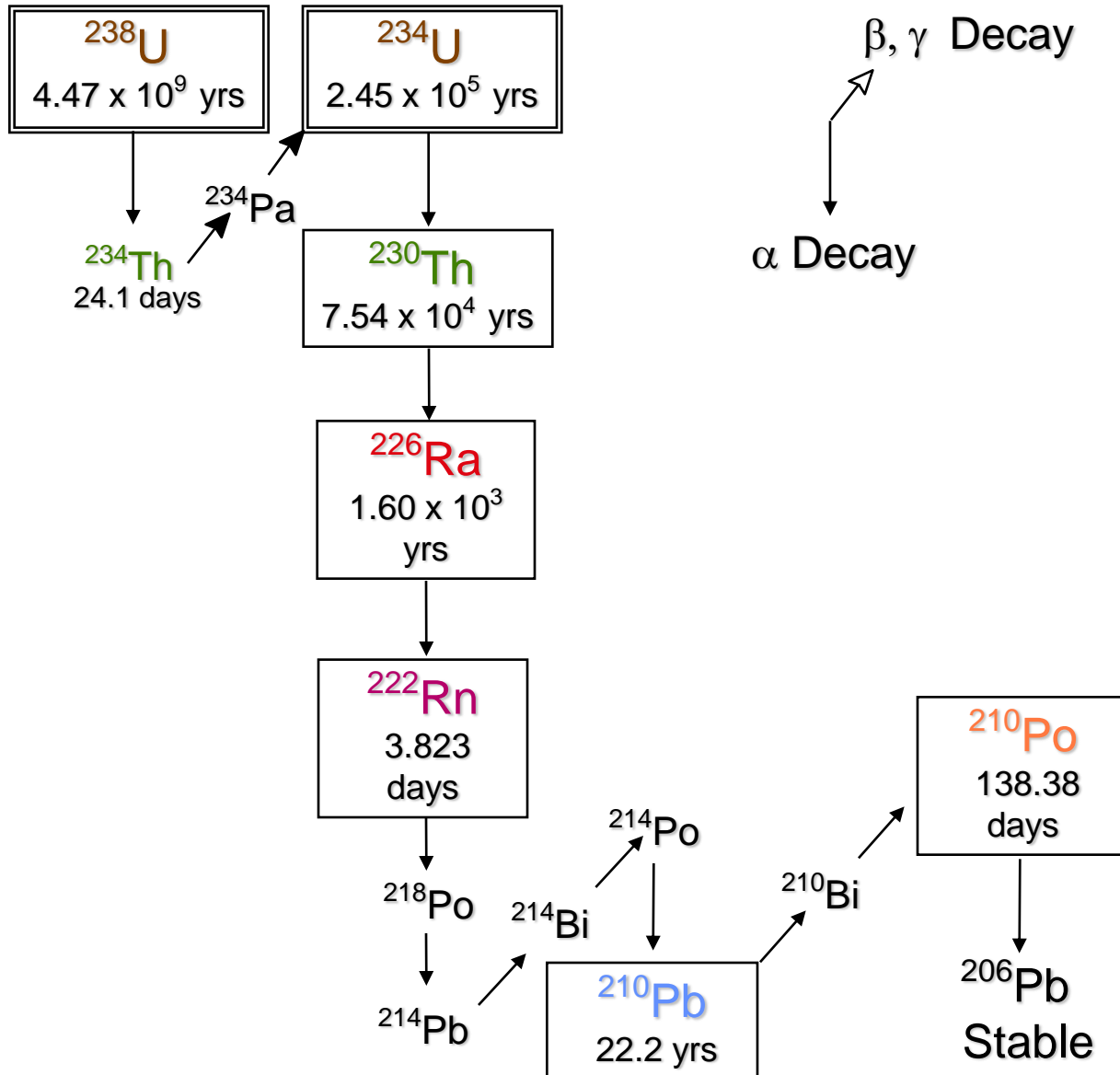
1910:

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

1 Ci = 37 milliards de désintégrations/s

1 Bq = 1 désintégration/s

Présence de Th et U sur terre

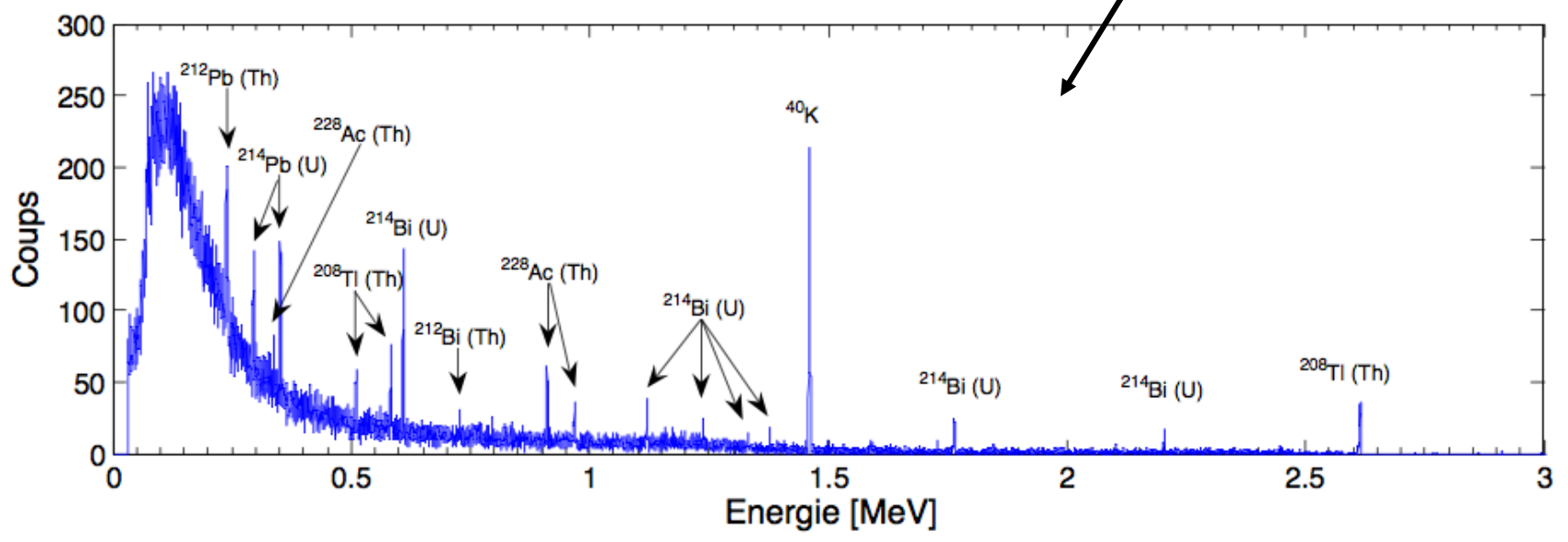


Age de la terre:
 $\sim 4.5 \times 10^9$ années

Demi-vie:
 ^{232}Th : 1.40×10^{10} a

^{234}U : 2.45×10^5 a
 ^{235}U : 7.04×10^8 a
 ^{238}U : 4.47×10^9 a

Radioactivité "ambiante"



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")

Energie et l'âge de la terre

Lord Kelvin:

- ~dizaines de millions d'années
- refroidissement à partir d'un état initialement fondu
- arguments quantitatifs

Géologues and Biologistes:

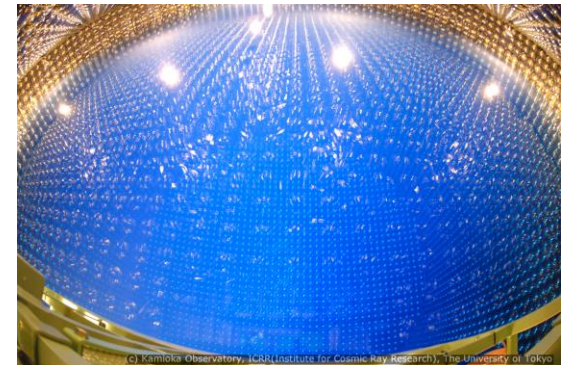
- ~centaines de millions d'années
- fossiles, évolution, vitesse de sédimentation....
- arguments "qualitatifs"

Découverte de la radioactivité :

- la désintégration des minerais radioactifs contenus dans la terre est une source de chaleur (ce qui contribue à invalider les calculs de Kelvin - en plus du fait que ce dernier n'avait pas pris en compte la convection)

Flux de chaleur terrestre: 44.2 ± 1.0 TW
Contribution due au noyaux radioactifs
d' ^{238}U , ^{232}Th et ^{40}K : ~50%

Nature Geoscience 4 (2011) 647

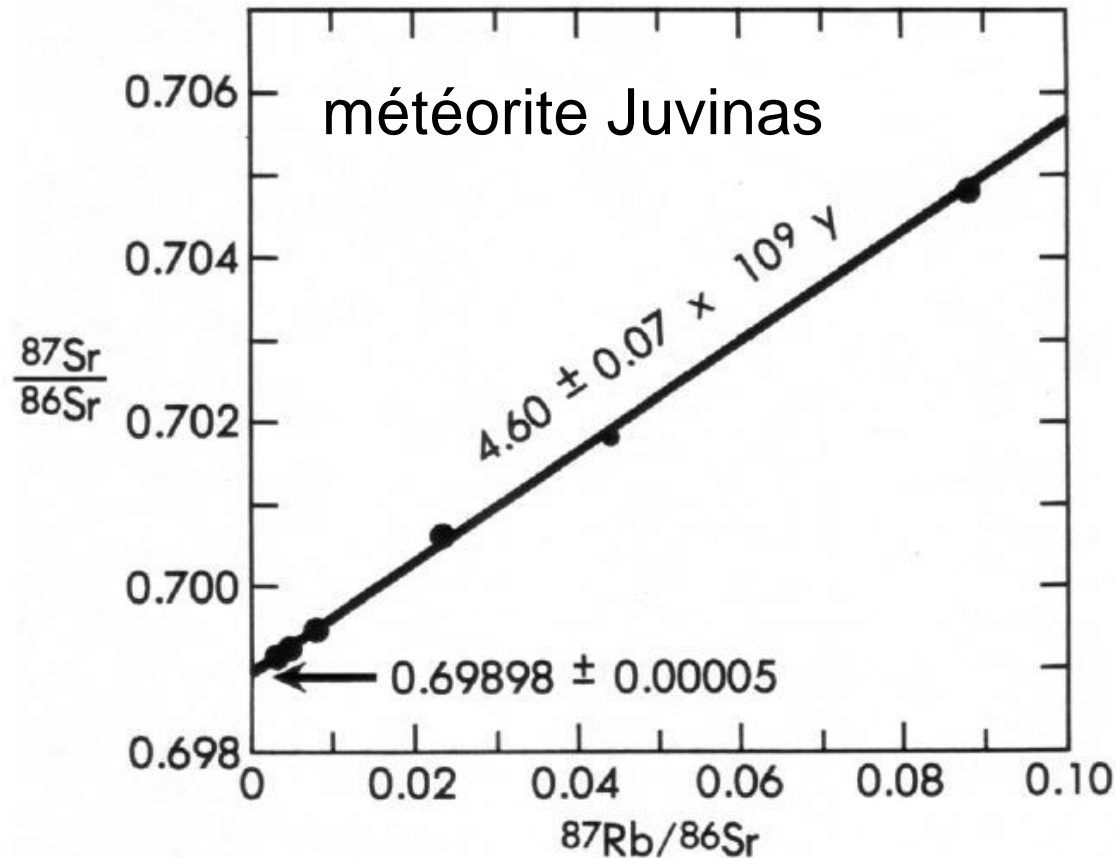


Géochronologie

Découverte de la radioactivité :

■ la radioactivité fournit une horloge capable de donner un âge absolu à la Terre

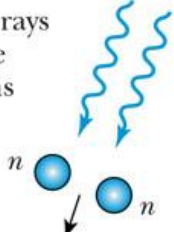
Radioactive Parent	Stable Daughter Product	Currently Accepted Half-life Values
Uranium-238	Lead-206	4.5 billion years
Uranium-235	Lead-207	713 million years
Thorium-232	Lead-208	14.1 billion years
Rubidium-87	Strontium-87	47.0 billion years
Potassium-40	Argon-40	1.3 billion years



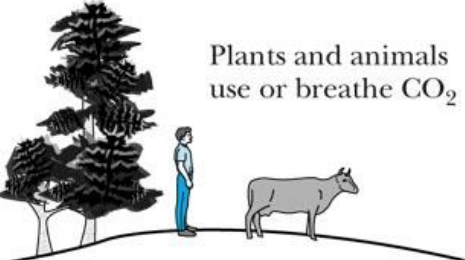
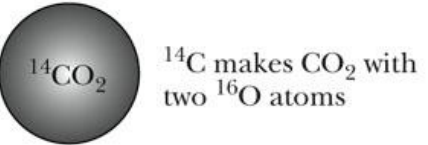
$$t = \text{pente} \times \tau$$

La datation au ^{14}C

Cosmic rays produce neutrons



Neutrons interact with ^{14}N to produce ^{14}C

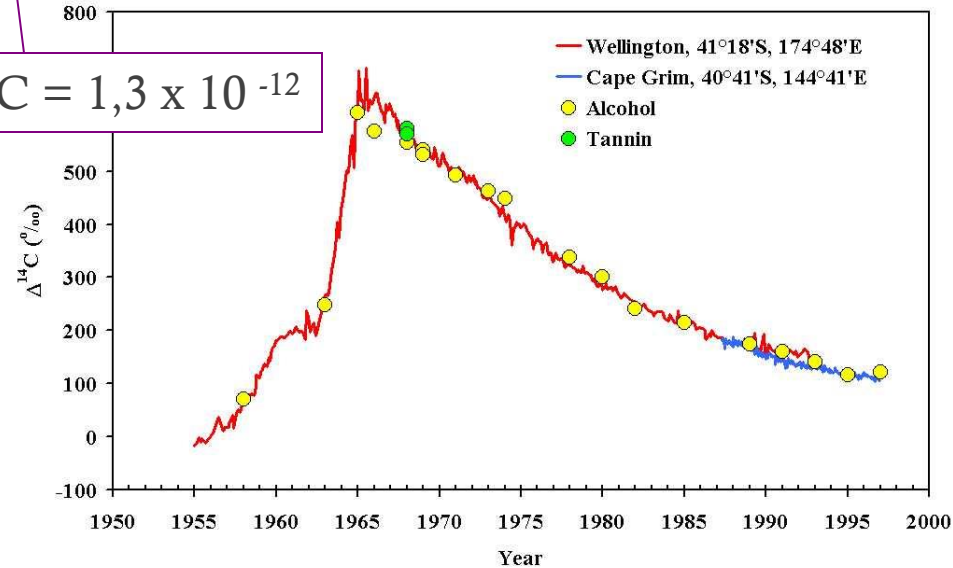


1949: W. Libby mesure la 1/2 vie du ^{14}C : 5568 ± 30 ans



Le rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ de l'atmosphère est sujet à des variations

$^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = 1,3 \times 10^{-12}$



Ötzi, l'homme des glaces



En septembre 1991, des randonneurs découvrent Ötzi (Iceman) dans les Alpes Italiennes.

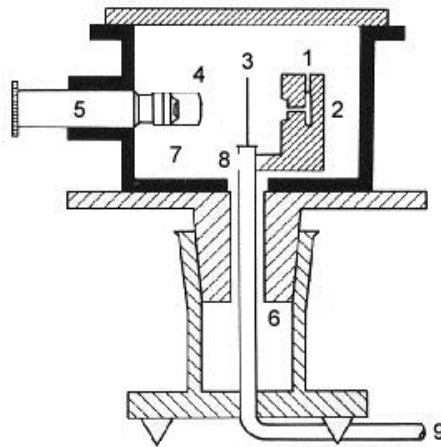
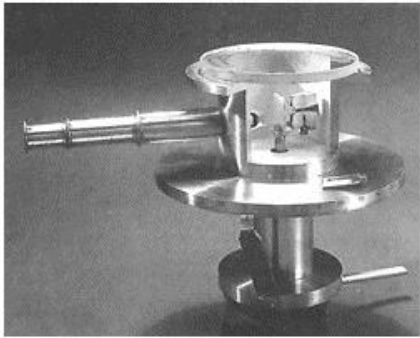
Une activité 0,121 Bq pour 1 g de C a été mesurée



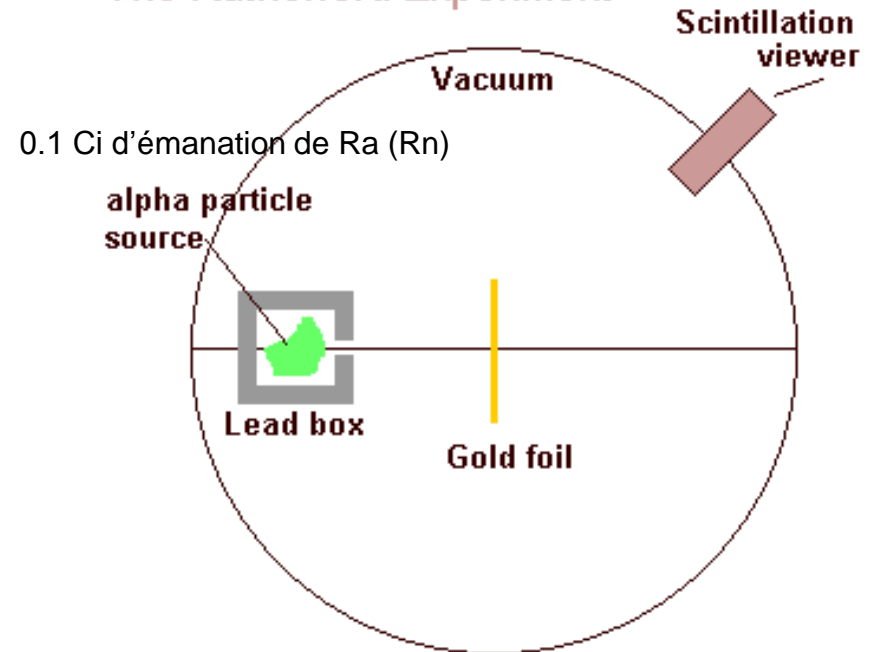
$t = 4546$ années



La diffusion de particules alpha



The Rutherford Experiment



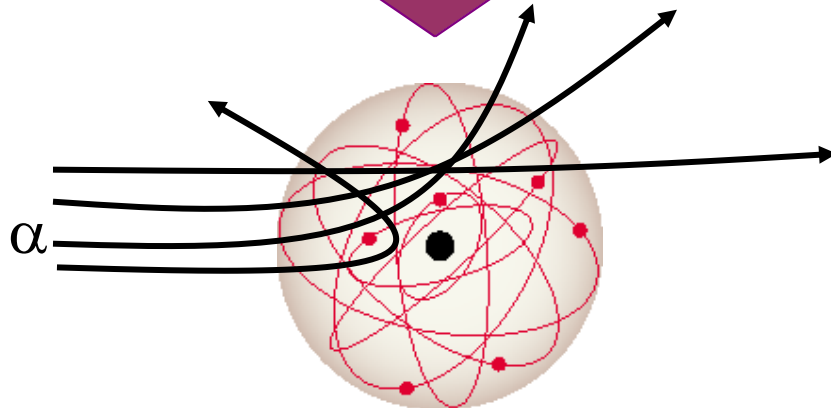
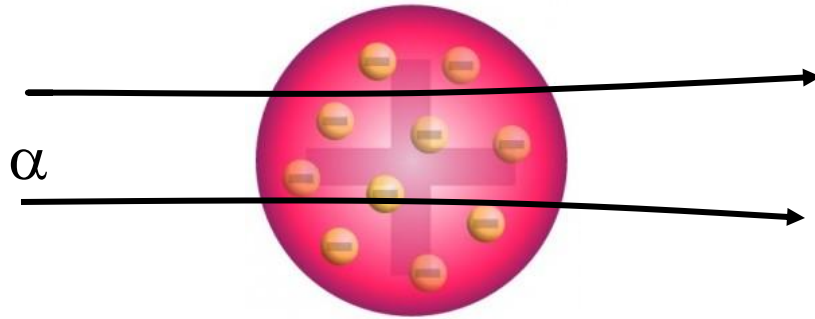
Expérience réalisée par H. Geiger et E. Marsden
(1909, Université de Manchester)

©1999 Science Joy Wagon

« 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

