

Les Noyaux et leurs Interactions

A. Lopez-Martens

IJCLab, IN2P3/CNRS, Université Paris Saclay

Objectifs

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

Plan

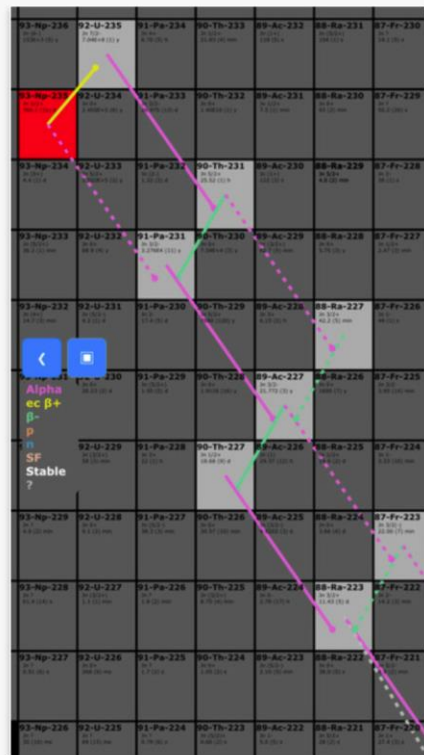
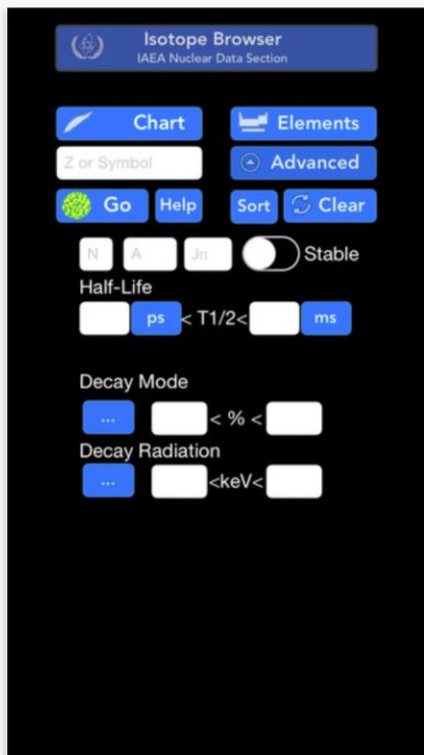
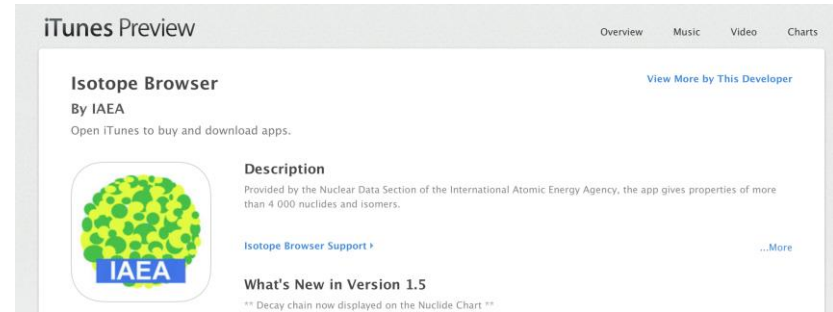
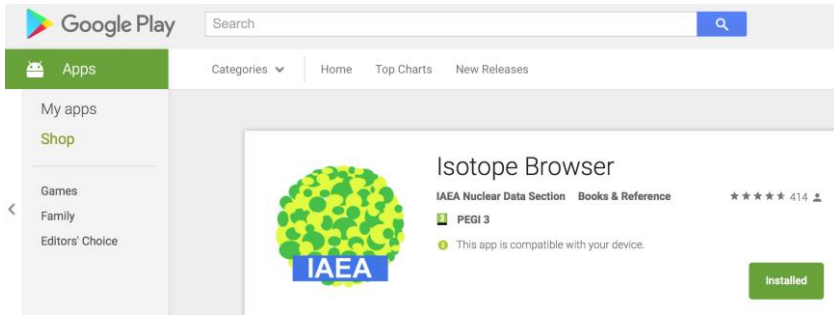
- Introduction & Radioactivité - *De la Radioactivité au Noyau*
- Echelles Nucléaires - *Du Noyau jusqu'au Neutron et les Accélérateurs*
- Interaction Nucléaire - *D'avant 2ème guerre mondiale jusqu'à nos jours*

Quelques bons outils

- National Nuclear Data Center (NNDC)

<http://www.nndc.bnl.gov>

Quelques Bonnes Applications



48 Nuclides found with:
element = 54 order by Z, N

Isotope	Half-life	Decay Mode
¹³² Xe	13 (2) ms	(7/2+)
¹³⁴ Xe	93 (3) ms	0+
¹³⁶ Xe	0.74 (20) s	α 8 +8-5%
¹³⁸ Xe	2.7 (8) s	α 0.0080%
¹⁴⁰ Xe	2.74 (8) s	(5/2+)
¹⁴² Xe	10.0 (4) s	0+
¹⁴⁴ Xe	18 (4) s	(5/2+)
¹⁴⁶ Xe	59 (2) s	0+
¹⁴⁸ Xe	61 (2) s	5/2(+)
¹⁵⁰ Xe	3.8 (9) min	0+
¹⁵² Xe	5.8 (3) min	(5/2+)
¹⁵⁴ Xe	40 (1) min	0+
¹⁵⁶ Xe	40.1 (20) min	5/2(+)

54-Xe-135 Xenon

Uncertainty applies to the least significant digit(s)

Z 54 N 81 Jn 3/2+

Half-life 9.14 (2) h

Decay

β- 100 %

Qα -3630.67 (415) keV

Qβ 1165.048 (4071) keV

Qec -2627.807 (6812) keV

Sn 6363.78 (423) keV

Sp 9646.63 (690) keV

Electric Moment +0.214 (7) barn

Magnetic Moment +0.9032 (7) barn

Binding/A 8398.503 (31) keV

Mass 134.907228 (4455) AMU

Decay Radiations

From β- decay

Energy [keV]	Intensity %
β- 310.2 (16) 96 (4)	
173.3 (15) 3.11 (14)	
248.1 (16) 0.59 (3)	
26.9 (11) 0.123 (6)	
50.0 (12) 0.075 (5)	
γ 249.794 (15) 90 (3)	
608.185 (15) 2.90 (13)	
407.99 (2) 0.358 (17)	
158.197 (18) 0.289 (14)	
358.39 (3) 0.221 (11)	
X 30.9728 (3) 2.64 (13)	
30.6251 (3) 1.43 (7)	

Quelques bonnes lectures...

The screenshot shows the Nobelprize.org website. The header includes the logo, navigation links (Home, Nobel Prizes and Laureates, Nomination, Ceremonies, Alfred Nobel, Educational, Events), and a search bar. The main content area is titled "The Nobel Prize in Physics 1922" and "Niels Bohr". It features a portrait of Bohr, a list of facts, and a quote from the prize motivation. The left sidebar contains links to "About the Nobel Prize in Physics 1922", "Niels Bohr", and "Facts". The right sidebar includes a "Share this" section, a "2014 Nobel Prize Announcements" section, and a "2013 Nobel Laureates" section.

Nobelprize.org
The Official Web Site of the Nobel Prize

Home | Nobel Prizes and Laureates | Nomination | Ceremonies | Alfred Nobel | Educational | Events

Nobel Prizes and Laureates
Physics Prizes < 1922 >

► About the Nobel Prize in Physics 1922
▼ Niels Bohr
Facts
Biographical
Nobel Lecture
Banquet Speech
Documentary
Photo Gallery
Other Resources

All Nobel Prizes in Physics
All Nobel Prizes in 1922

The Nobel Prize in Physics 1922
Niels Bohr

Share this: 32

Niels Bohr - Facts

Niels Henrik David Bohr

Born: 7 October 1885, Copenhagen, Denmark

Died: 18 November 1962, Copenhagen, Denmark

Affiliation at the time of the award:
Copenhagen University, Copenhagen, Denmark

Prize motivation: "for his services in the investigation of the structure of atoms and of the radiation emanating from them"

Field: theoretical nuclear physics

The Age to Come
New scientific and cultural perspectives on ageing
Nobel Week Dialogue

2014 Nobel Prize Announcements

2013 Nobel Laureates
© The Nobel Foundation. Photo: Lovisa Engblom

- ❖ K. Krane, Introductory Nuclear Physics, J. Wiley & Sons
- ❖ L. Valentin, Physique Subatomique: noyaux & particules, Hermann
- ❖ R. Casten, Nuclear Structure from a Simple Perspective, Oxford Science Publications

Part 1 - Introduction & Radioactivité

Le Noyau

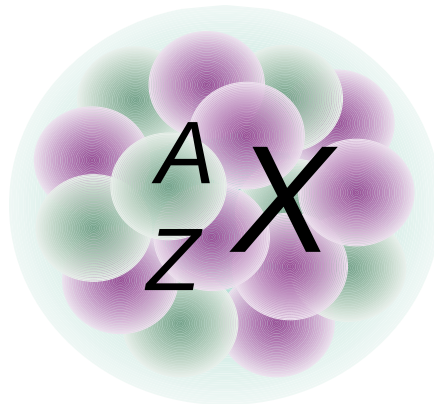
Z protons, N neutrons

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

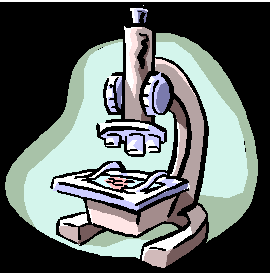
Un système complexe

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

=

Enjeu de la physique nucléaire

Résolution



140
masse du pion

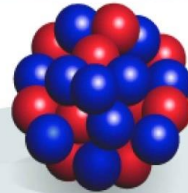
8
énergie de séparation
d'1 proton dans le Plomb

1.32
énergie de vibration
dans l'étain

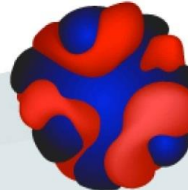
0.043
énergie de rotation
dans l'Uranium



baryons, mesons



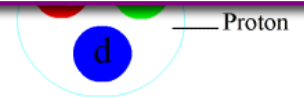
protons, neutrons



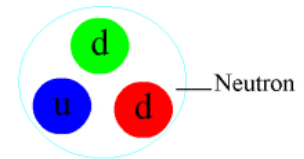
nucleonic densities
and currents



collective coordinates



Proton



Neutron

Physique des Noyaux

La Charte des Noyaux

3326 nucléides (fin 2021)

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

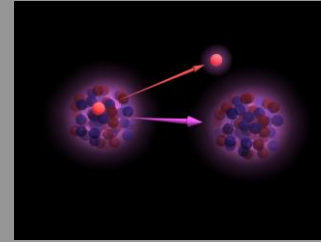
Isotope: même Z (même élément chimique), N différent

Isotone: même N, Z différent

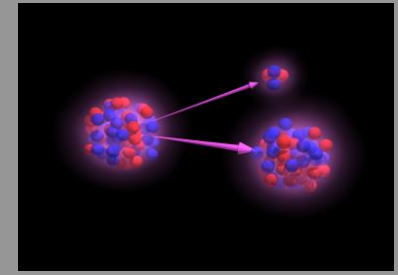
Isobar: même A, Z & N différents

radioactivité proton

noyau $\rightarrow$ proton + (noyau - 1 proton)

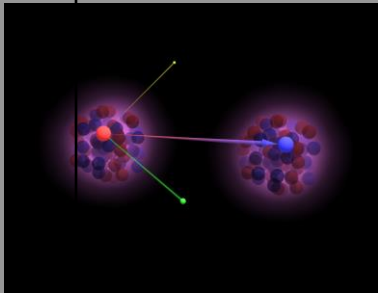


alpha émission d' ^4He

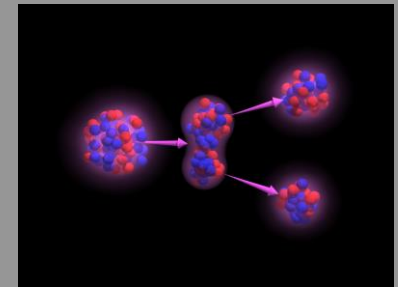


beta +

proton $\rightarrow$ neutron
+ e^+ + ν_e

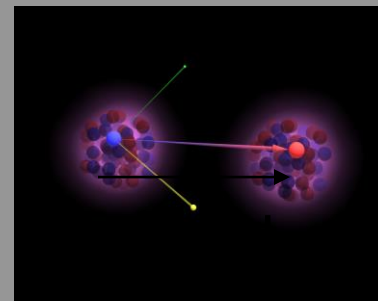


fission cassure du noyau

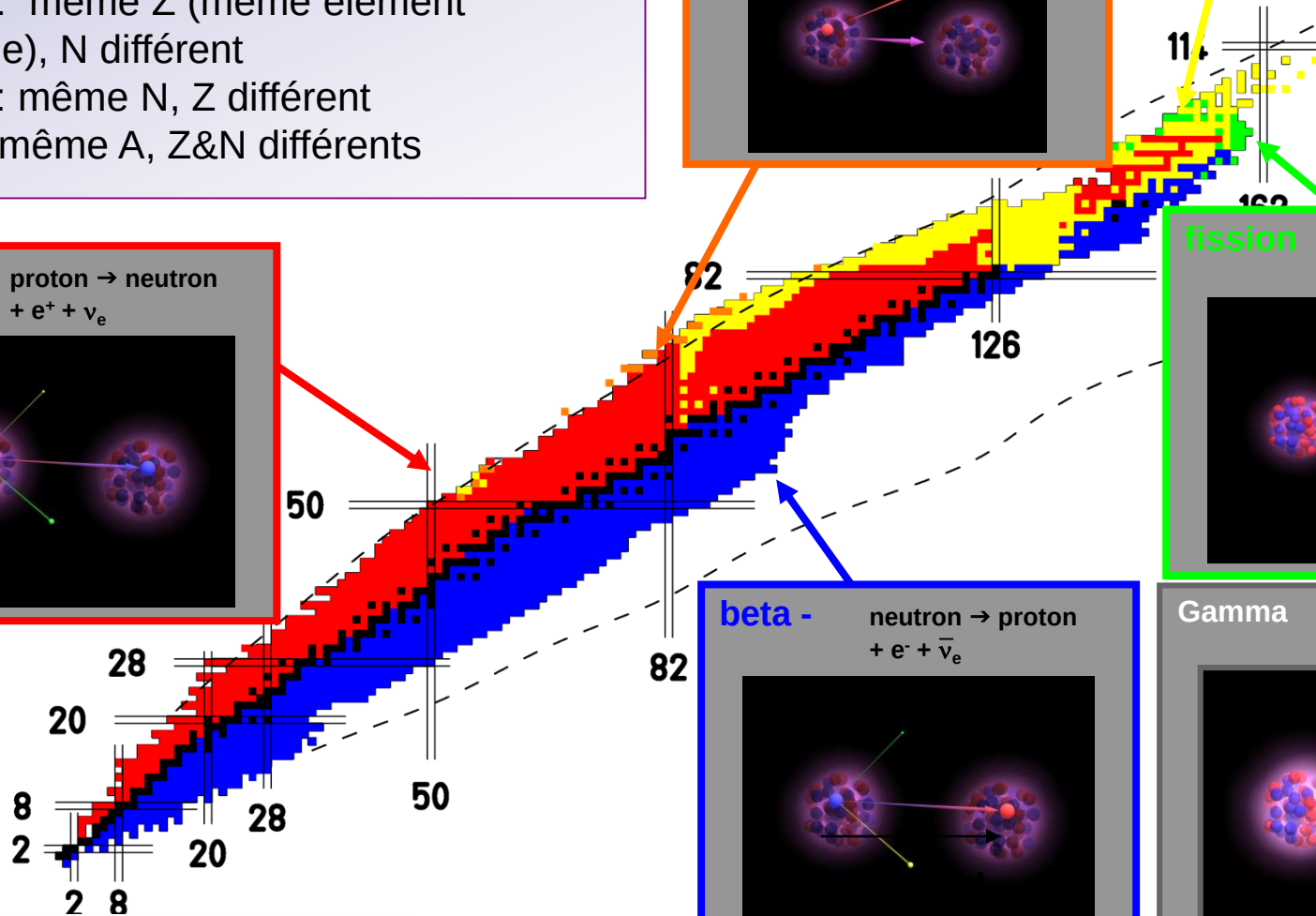
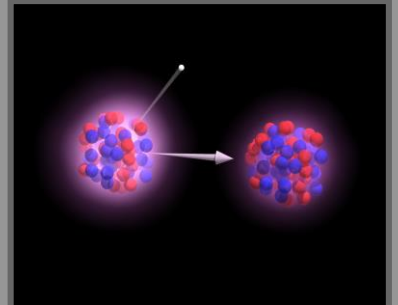


beta -

neutron $\rightarrow$ proton
+ e^- + $\bar{\nu}_e$



Gamma relaxation nucléaire +
+ photon γ

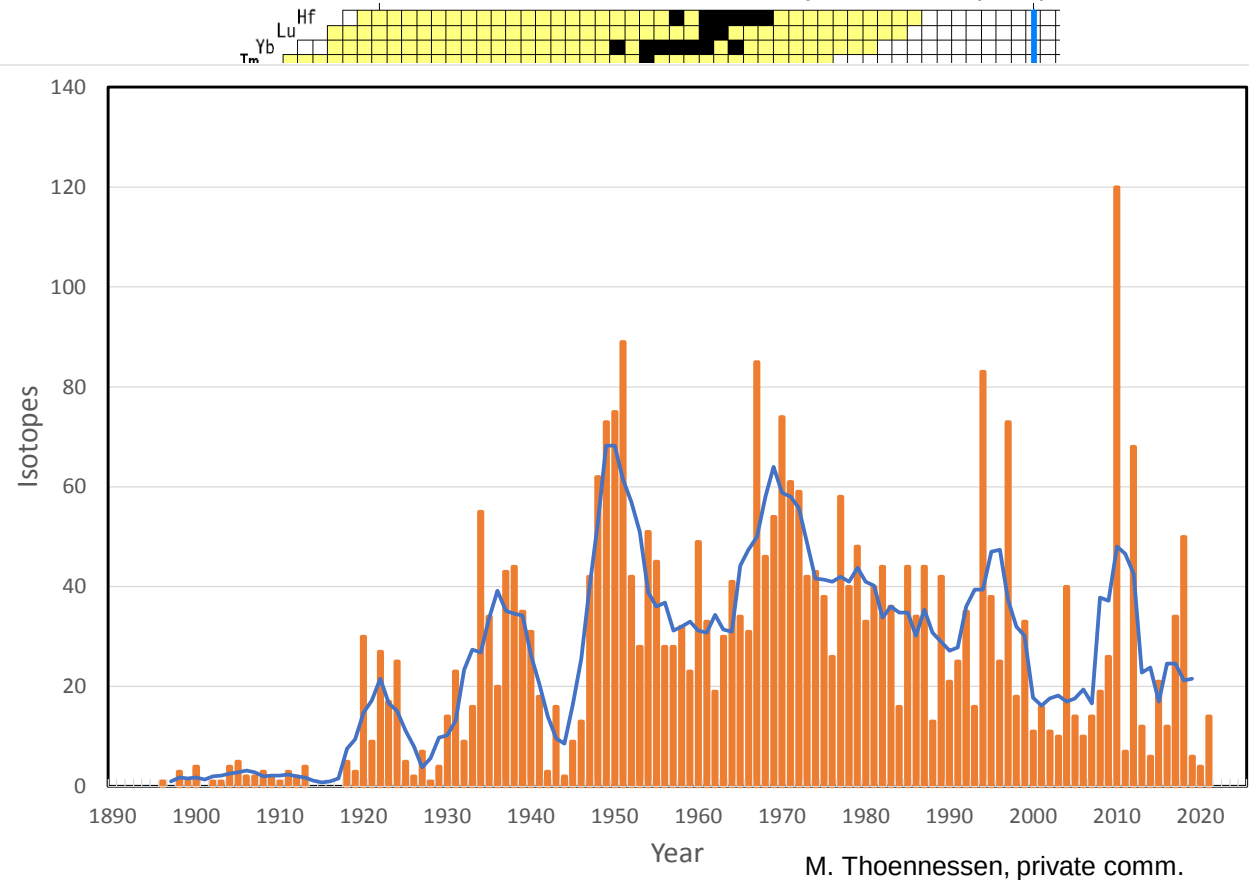


prédiction: ~7000 nucléides liés

Découverte de Nouveaux Isotopes

Rank	Country	Isotopes
1	USA	1335
2	Germany	566
3	UK	299
4	Russia	249
5	Japan	233
6	France	218
7	Switzerland	123
8	Canada	66
9	Sweden	59
10	Finland	45
11	Netherlands	36
12	China	35
13	Belgium	17
14	Denmark	13
15	Argentina	13
16	Italy	11
17	Israel	6
18	Austria	5
19	India	2
20	Norway	2
21	Australia	2
22	New Zealand	1
	Brazil	1
	Poland	1
	Hungary	1

T. Ohnishi et al. , J. Phys. Soc. Jpn. 79 (2010) 073201
D. Kameda et al.: Phys. Rev. C 86 (2012) 054319



<https://people.nsl.msui.edu/~thoennessen/isotopes/>

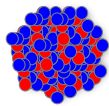
2011 (^{124}Xe): 4 nouveaux isotopes

2014-2021 (^{238}U): 87 nouveaux isotopes

2016-2021 (^{124}Xe): 10 nouveaux isotopes

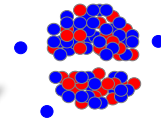
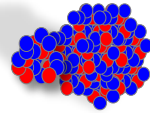
Synthèse de Nouveaux Eléments

Ion lourd
accéléré

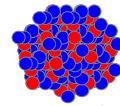


Atome
d'actinide

fusion



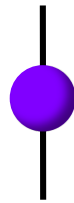
fission



fusion-
évaporation

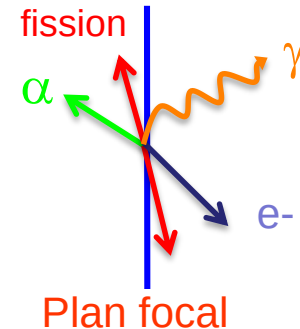
$\sigma \sim 1-10 \text{ pb} !$

Faisceau intense
d'ions lourds



Cible
rotative

Filtre



Eléments Super Lourds

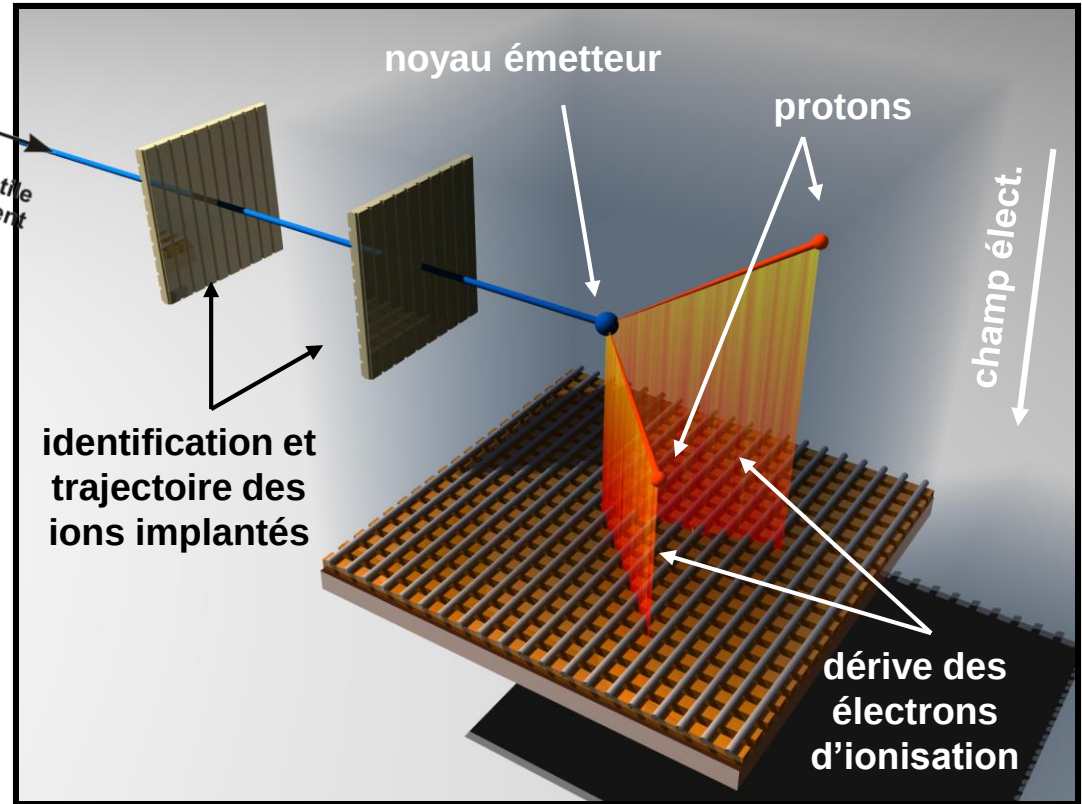
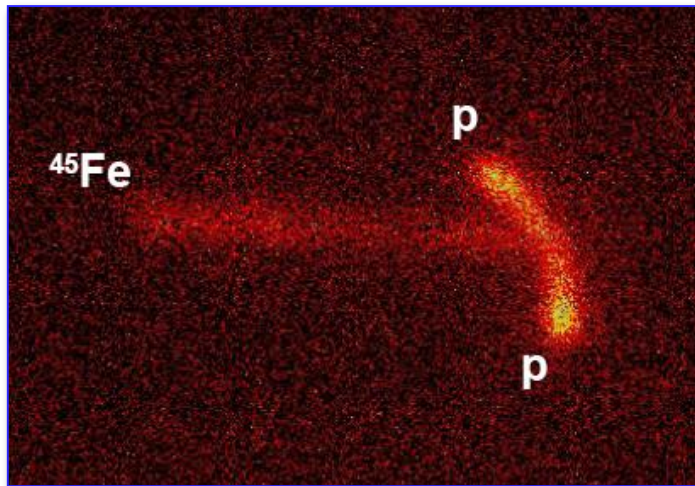
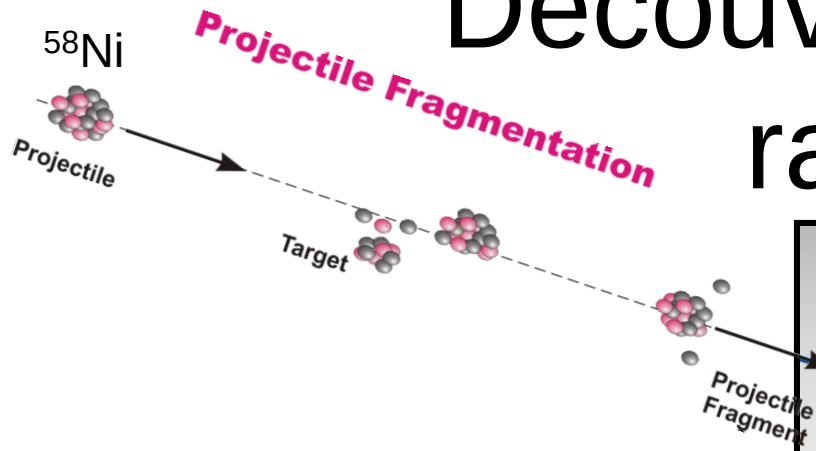


28/11/2016: IUPAC approuve les noms des 4 nouveaux éléments!

30/12/2015: IUPAC annonce que la 7^{ème} période du tableau périodique est complète!

37	Rubidium	38	Strontium	39	Yttrium	40	Zirconium	41	Niobium	42	Molybdenum	43	Technetium	44	Ruthenium	45	Rhodium	46	Palladium	47	Silver	48	Cadmium	49	Indium	50	Tin	51	Antimony	52	Tellurium	53	Iodine	54	Xenon
Cs	Barium	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																		
55	56	57	72		74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86																		
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og																		
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118																		

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)

3 autres cas observés depuis: ^{54}Zn et ^{48}Ni , ^{19}Mg

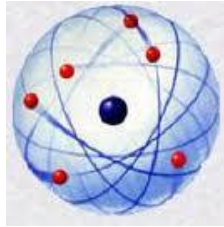
3 autres cas potentiels synthétisés pour la 1^{ère} fois au RIKEN: ^{59}Ge , ^{63}Se et ^{67}Kr

T. Goigoux et al., Phys. Rev. Lett. 117 (2016) 162501

Il y a ~111 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 ”*



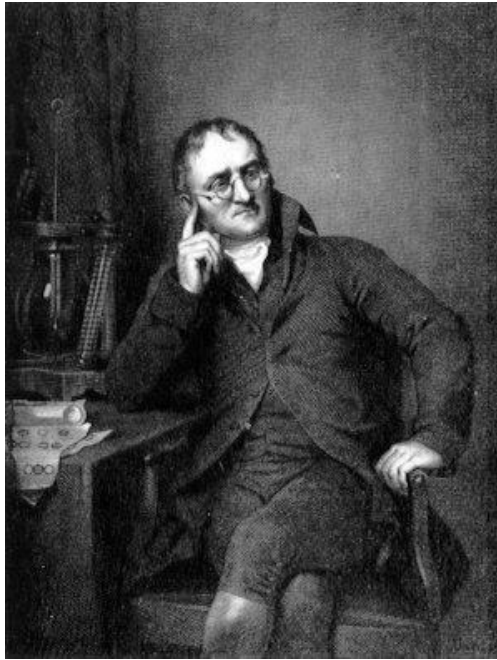
A l'aube du 20^{ème} siècle



“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.”

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**
(du grec ατομος = indivisible)

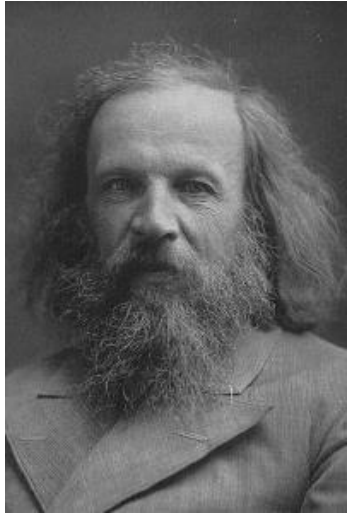
-Les atomes d'un même élément
sont identiques

-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.

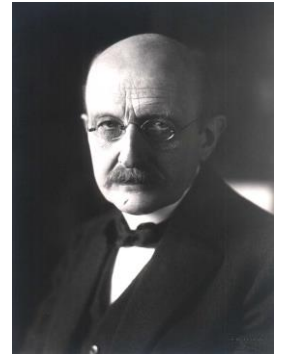
			Ti = 50	Zr = 90	? = 180.
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182.
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186.
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,1.
			Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198.
			Ni = Co = 59	Pd = 106,6	Os = 199.
			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200.
H = 1					
	Be = 9,1	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112	
	B = 11	Al = 27,1	Ga? = 68	Ur = 116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

Д. Менделѣевъ (1869)

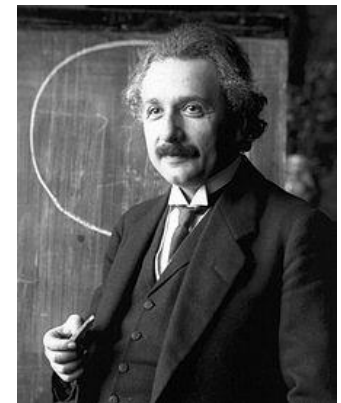
Quelques nuages dans le ciel de la physique théorique....

La catastrophe ultraviolette: Répartition spectrale du rayonnement thermique des corps

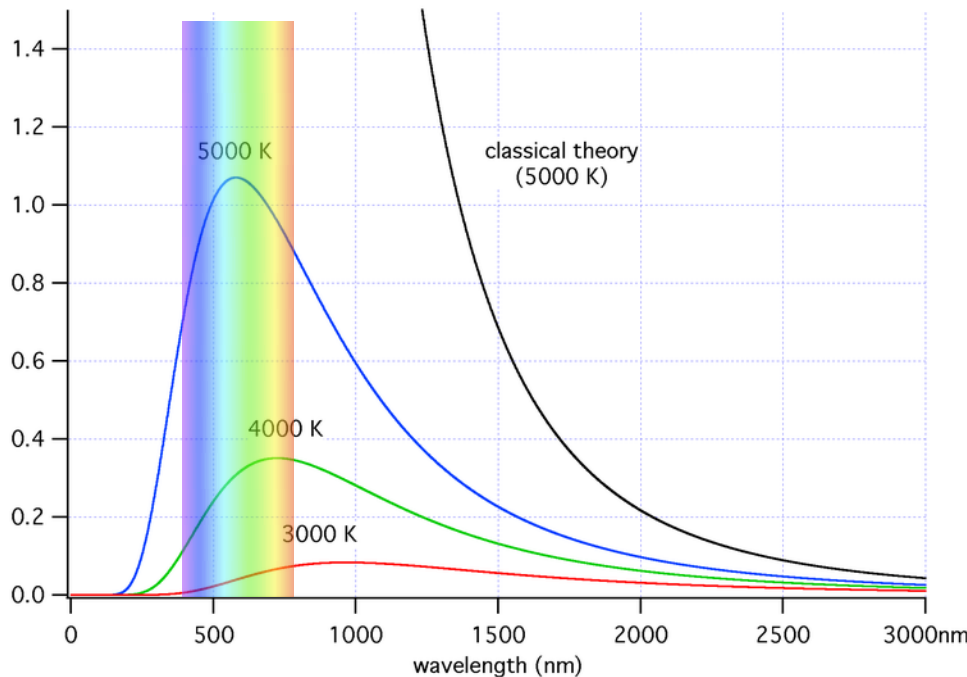


Max Planck

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



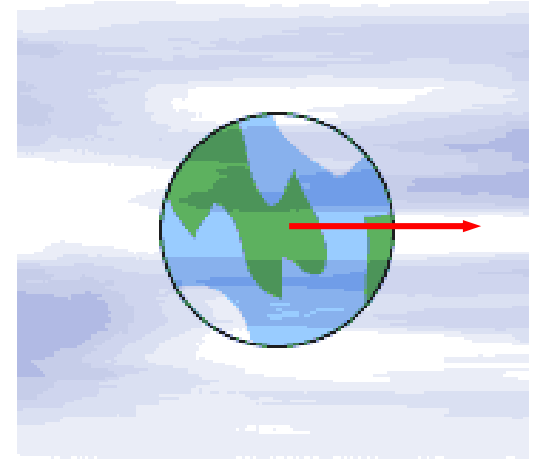
Selon A. Einstein la discontinuité de Planck provient de la structure granulaire de la lumière: la lumière est composée de **quantas lumineux = photons**



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

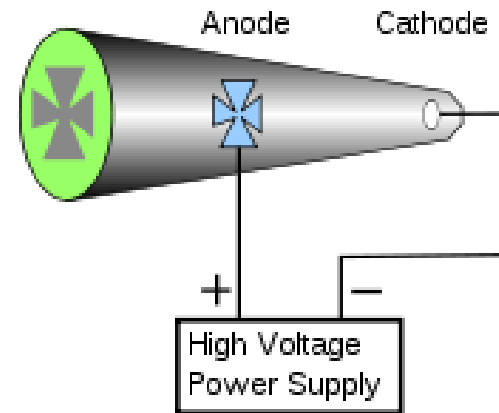


1887: échec de l'expérience d'interférométrie de Michelson-Morley

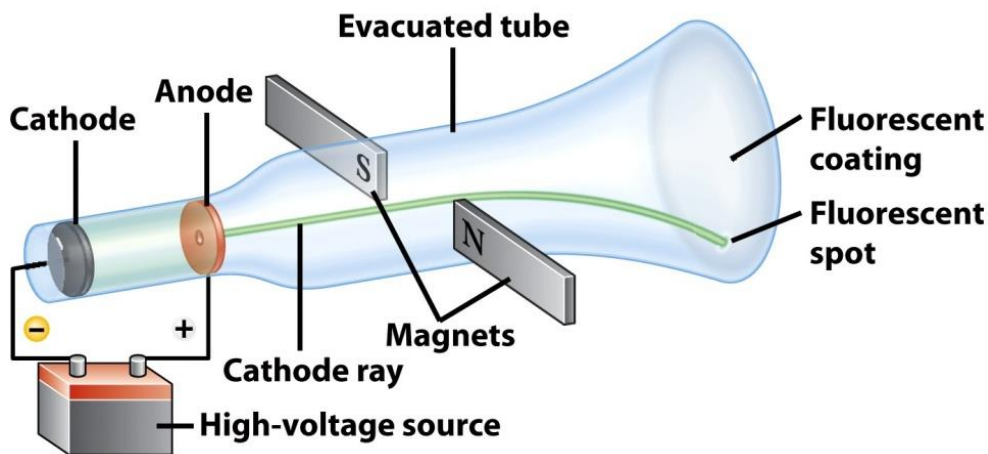
A. Einstein réconcilie la mécanique de I. Newton avec l'électromagnétisme de J.C. Maxwell en énonçant la théorie de la relativité restreinte

$$E = mc^2$$

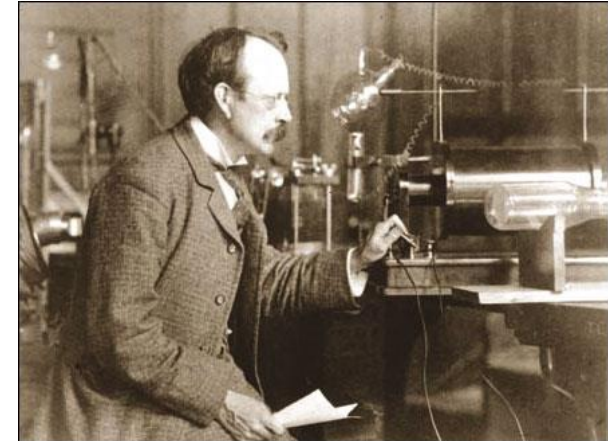
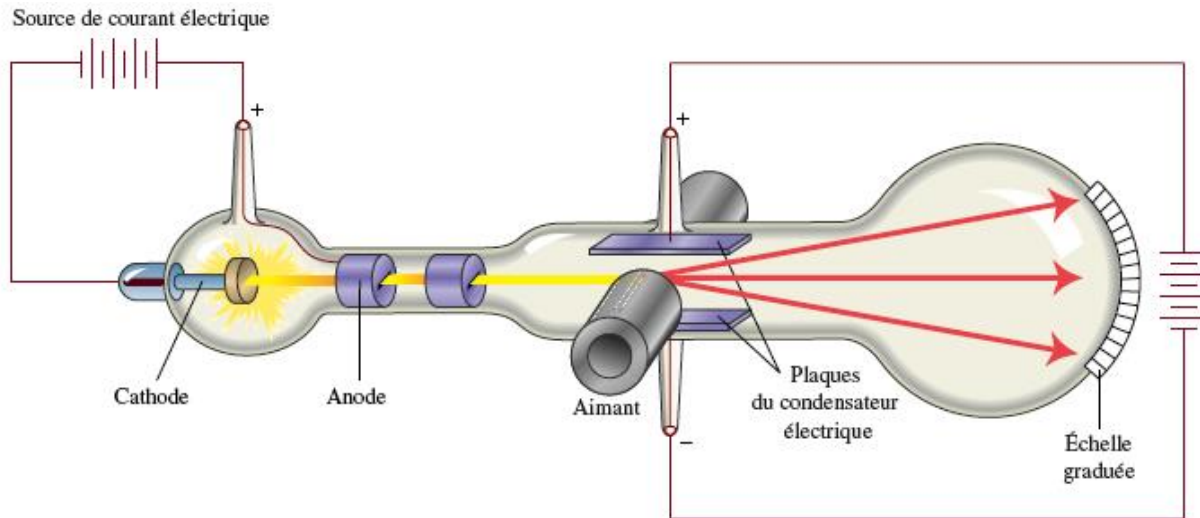
La révolution du tube cathodique



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



Les corpuscules

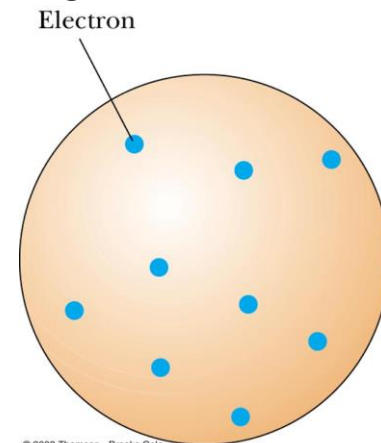


John Joseph Thomson

J.J. Thomson mesure le rapport charge/masse des particules composant les rayons cathodiques et ce rapport ne varie pas quels que soient les matériaux/gaz utilisés

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

Modèle 'plum pudding'



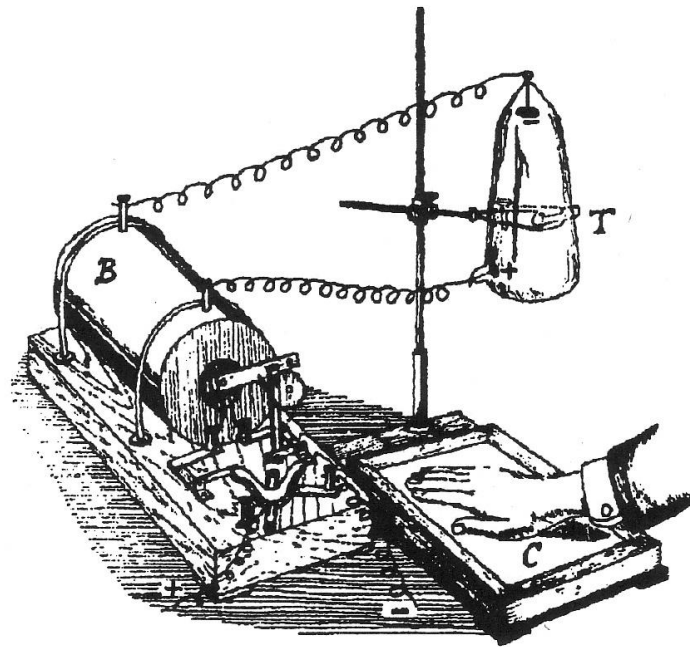
Des rayons cathodiques aux rayons X

1895 W. Röntgen

découverte des rayons X



Wilhelm Röntgen



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



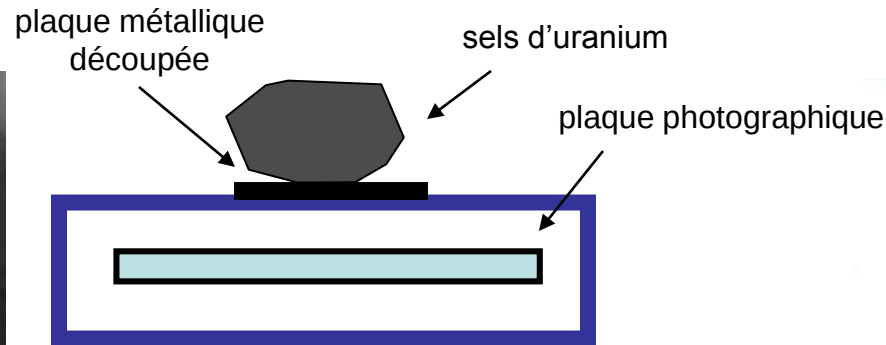
Des rayons X aux rayons uraniques

1896 H. Becquerel

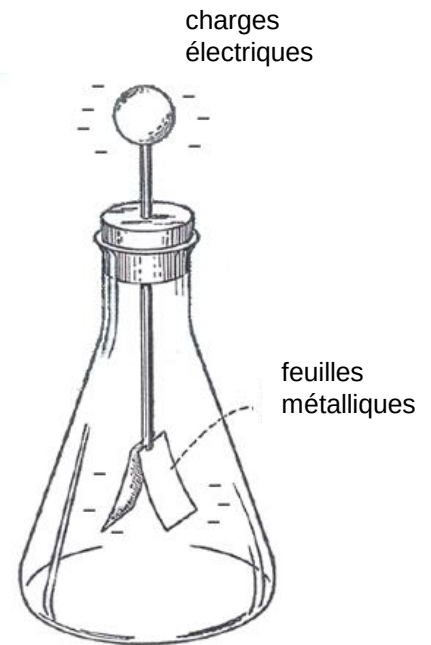
découverte d'un nouveau rayonnement émis par l'Uranium



Henri Becquerel



40 - 1700 - 96. Sulfate double d'uranyle et de Potasse.
Papier noir. Couvr. de l'uranium.
Exposé au soleil le 27. et dans l'obscurité le 28. -
Néanmoins le 1^{er} mars.



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

Des rayons uraniques à la radioactivité

1898 Marie & Pierre Curie



Marie Curie



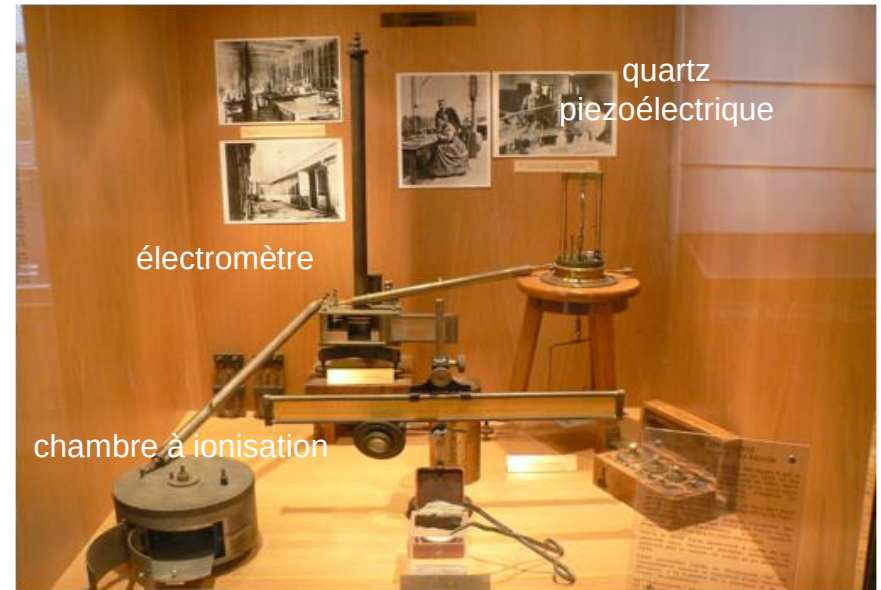
Pierre Curie

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

M. Curie appelle le rayonnement:
'radioactivité'



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



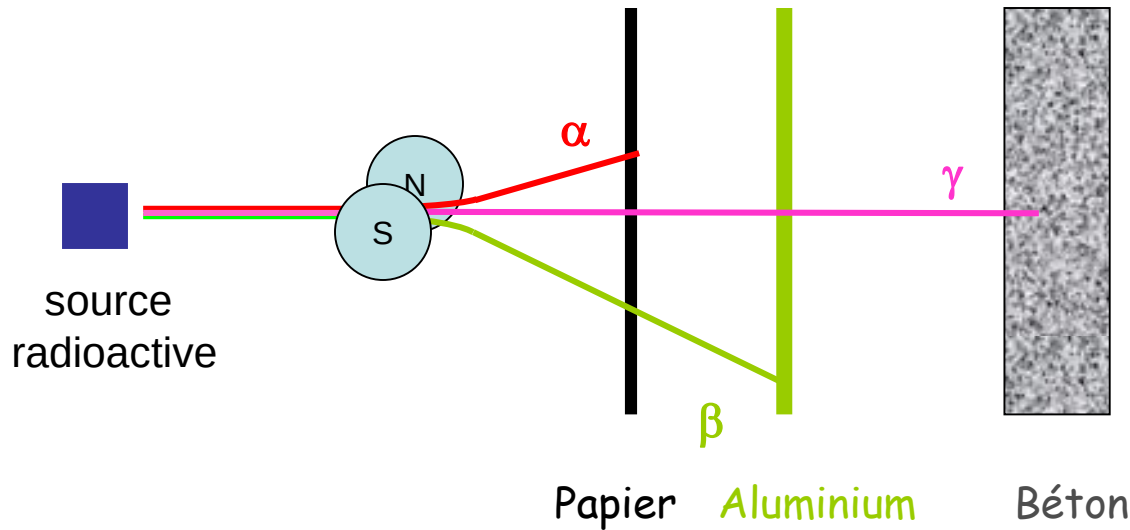
La radioactivité est multiple

1898 E. Rutherford

rayonnement alpha, beta

1900 P. Villard

rayonnement gamma



α = ion d'hélium He^{2+}

β = e^- de grande énergie

γ = photons - comme les X



Ernest Rutherford

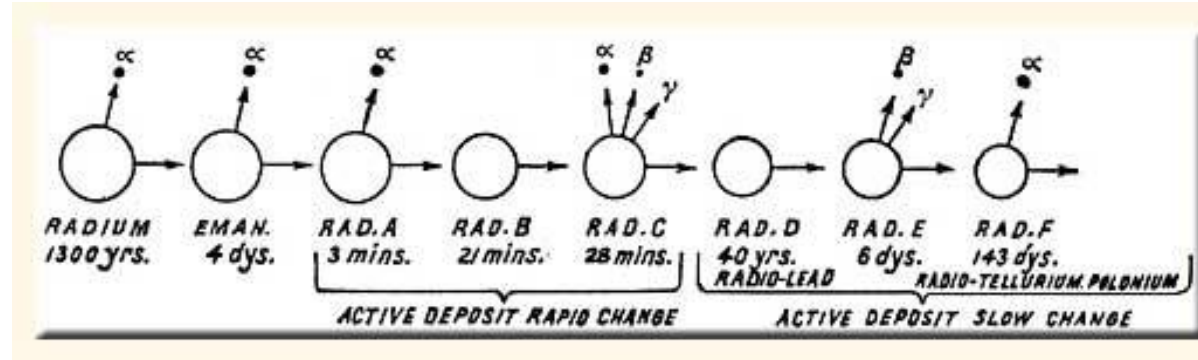
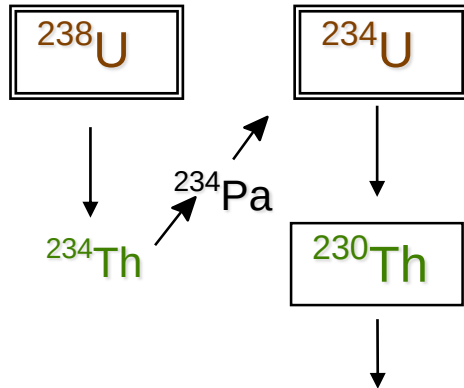


Paul Villard

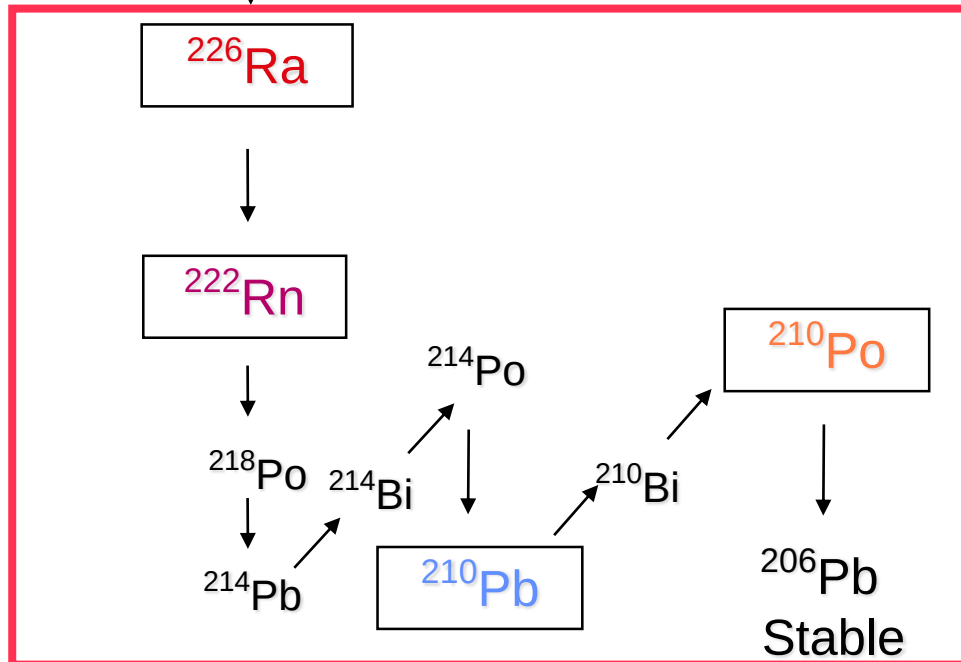
Les atomes se transforment !

1902 E. Rutherford & F. Soddy

transmutation des atomes



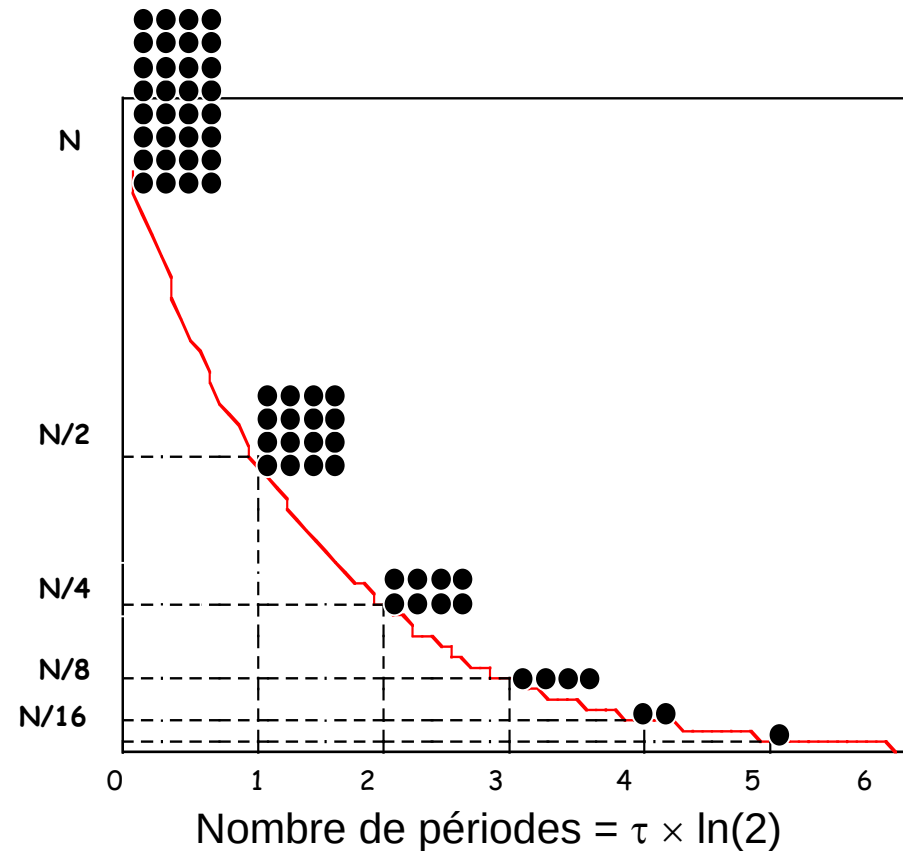
Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1905



radioactivité β, γ

radioactivité α

Décroissance radioactive



Nombre de
noyaux
au temps t

Nombre initial
de noyaux

Constante de
décroissance

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

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

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

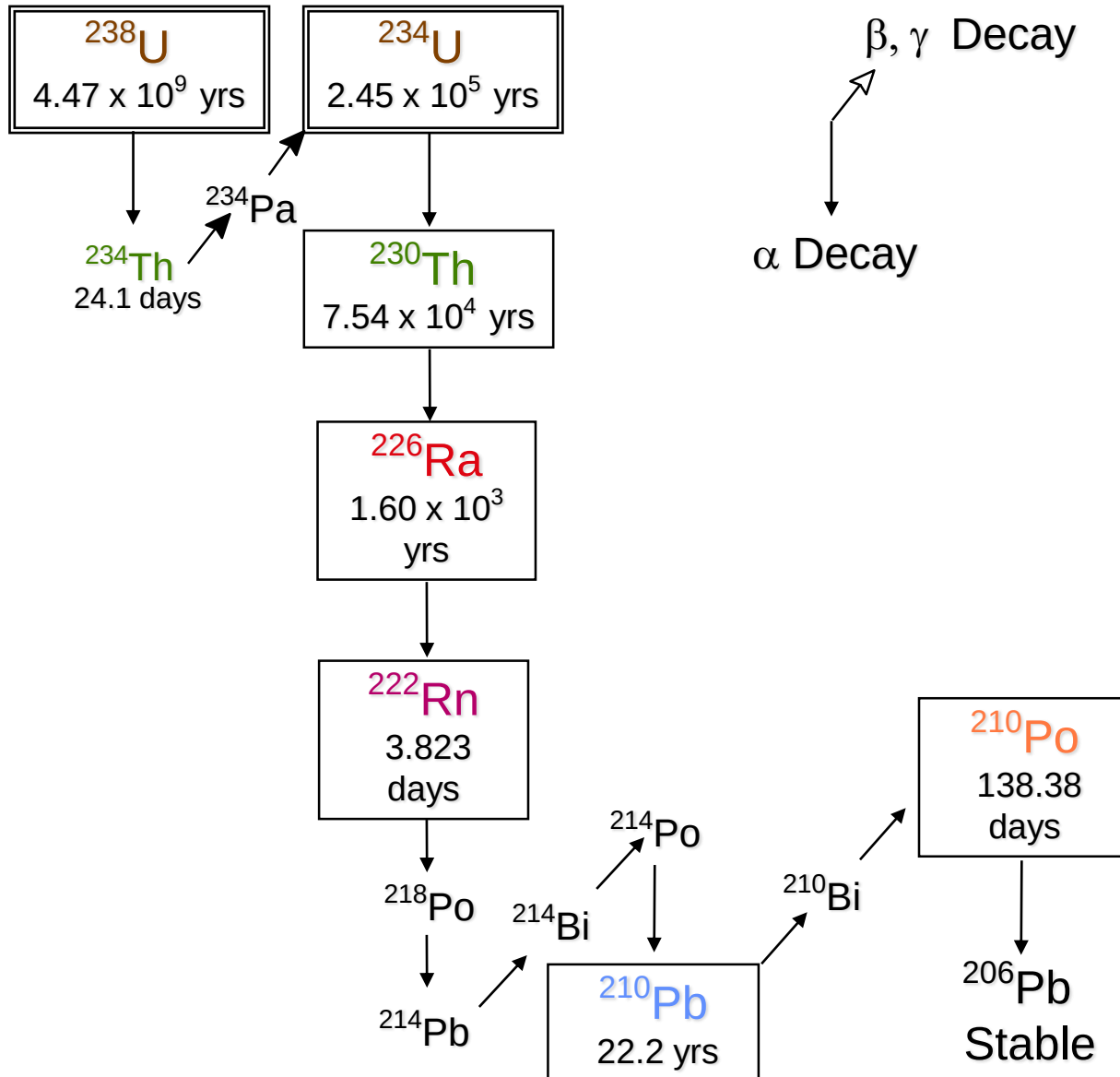
1910:

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

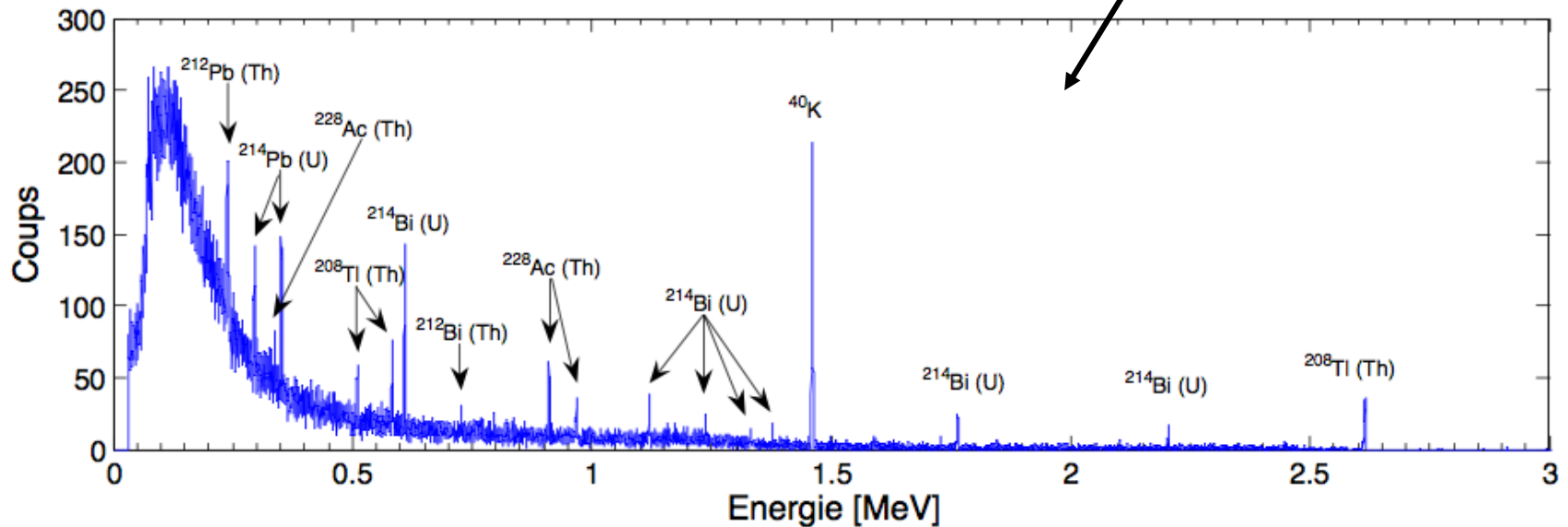
Demi-vie:
 ^{232}Th : 1.40×10^{10} a

^{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 libérerait 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:

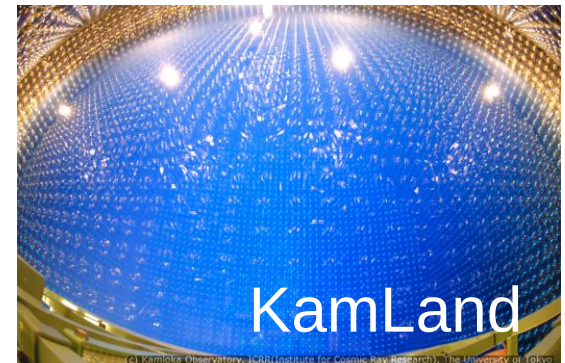
- ~centaines de millions d'années
- fossiles, évolution, vitesse de sédimentation....
- arguments "qualitatifs"

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

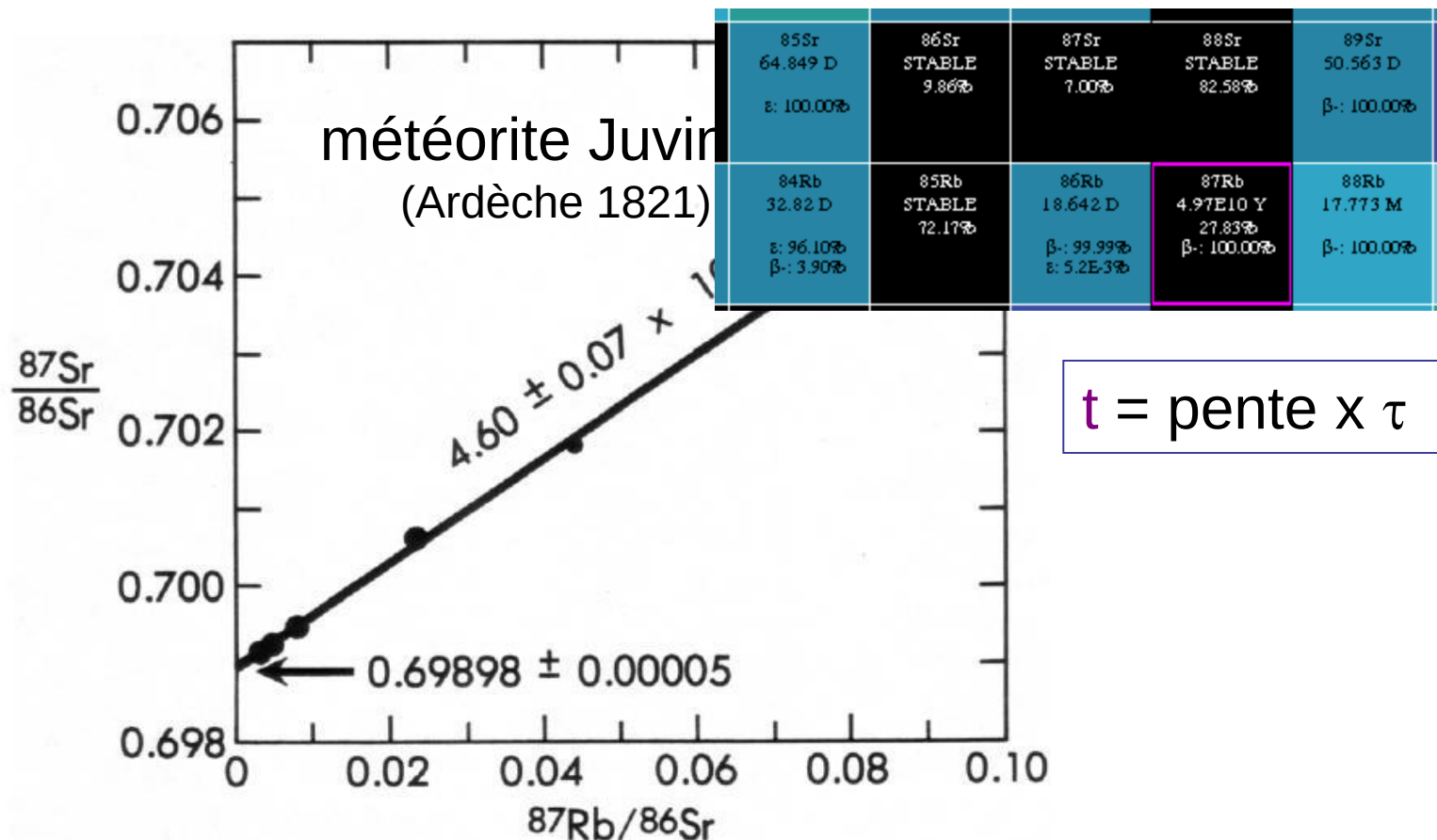


Géochronologie

Découverte de la radioactivité :

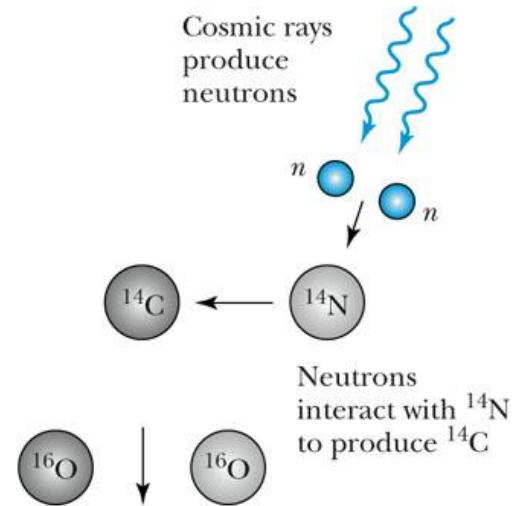
■ la radioactivité fournit une horloge capable de donner un âge absolu à la Terre

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



La datation au ^{14}C

1949: W. Libby mesure la 1/2 vie du ^{14}C : 5568 ± 30 ans
(maintenant $t_{1/2} = 5730 \pm 40$ ans)



22,920 years ago



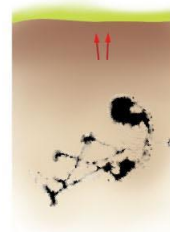
17,190 years ago



11,460 years ago



5730 years ago

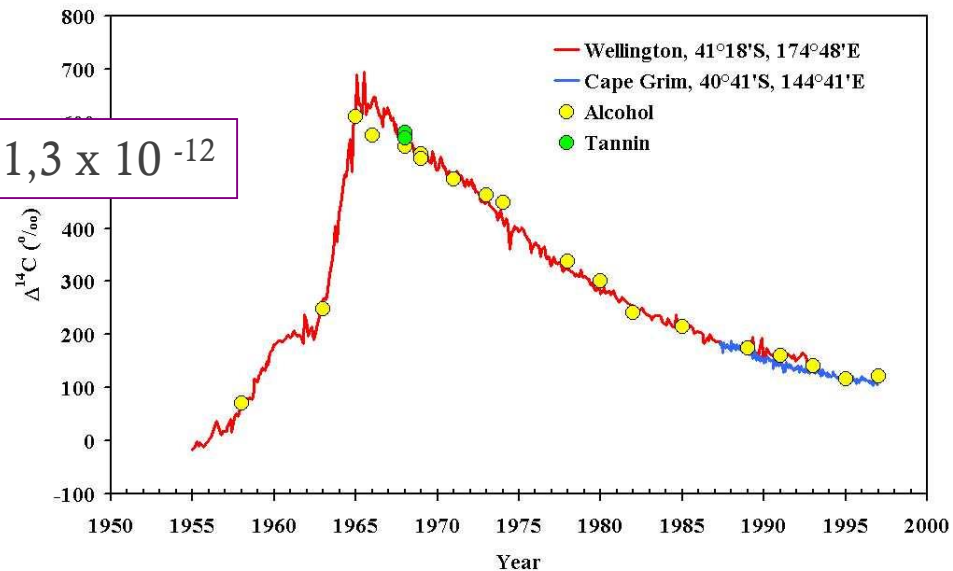
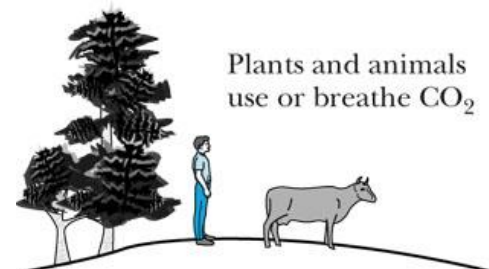


Present



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



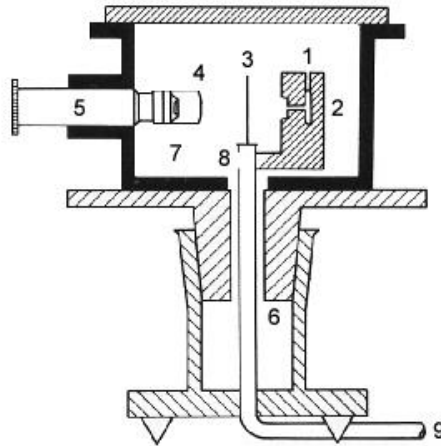
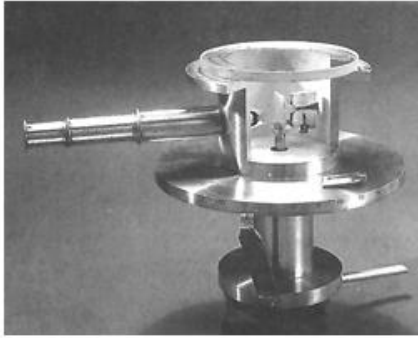
$t = 4546$ années



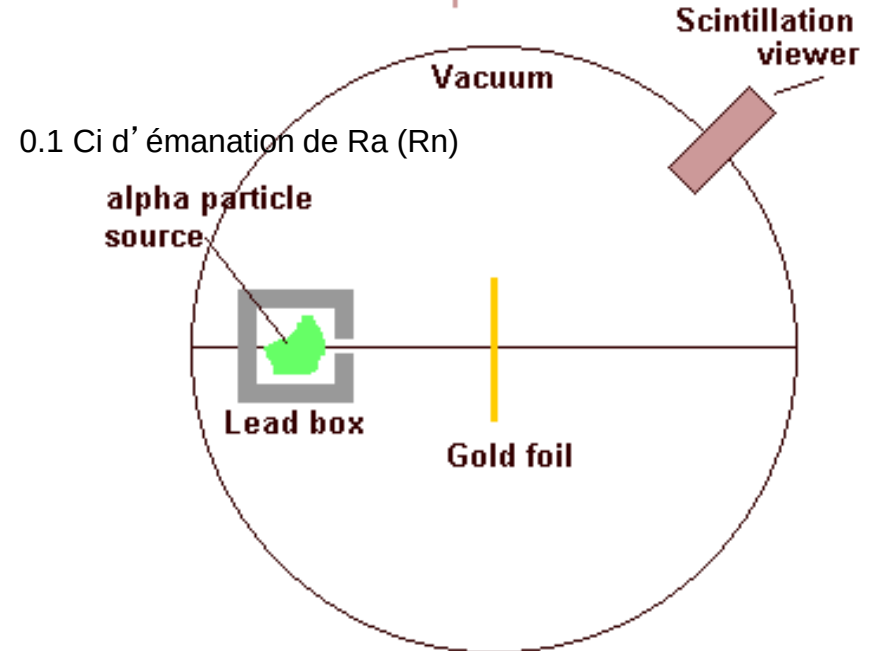
La découverte de la radioactivité a
bouleversé la science et la société de
façon générale et durable.

Mais les choses ne sont pas arrêtées
là.....

La diffusion de particules alpha



The Rutherford Experiment



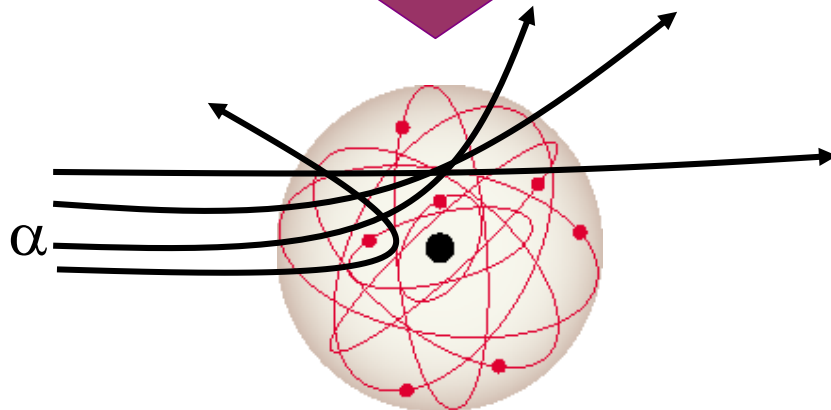
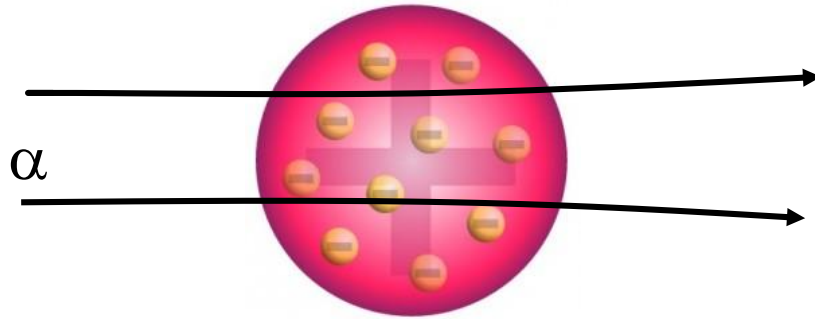
Expérience réalisée par H. Geiger et E. Marsden
(1909, Université de Manchester)

©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

