

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

- Radioactivité et Dimensions nucléaires
– *De la découverte de la radioactivité jusqu'à la découverte du Proton*
- Masse, Stabilité et Interaction Nucléaires – *Du Proton jusqu'à nos jours*

Quelques bons outils

- National Nuclear Data Center (NNDC)

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

National Nuclear Data Center

BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY Site Index -

Chart of Nuclides

NSR XUNDL ENSDF
NuDat Databases MIRD
Sigma CSISRS ENDF

Atlas of n Resonances
Empire
Nuclear Wallet Cards
Nuclear Data Sheets
Tools and Publications

Networks
CSEWG USNDP

ND2013 Proceedings

Nuclear Data Sheets

First Volume (118) for ND2013 is available!

We moved! Click on this text for map.

EXFOR 20,000 Milestone

Atomic Mass Evaluations Available

Main Structure & Decay Reactions Bibliography Networks & Links Publications Meetings

AMDC Atomic Mass Data Center, *Q-value Calculator*

Covariances of Neutron Reactions

ENDF Evaluated Nuclear (reaction) Data File, *Sigma*

NMMSS & DoE NMIRDC Safeguards & inventory decay data standards

NucRates MACS & Astro-physical reaction rates

XUNDL Experimental Un-evaluated Nuclear Data List

Atlas of Neutron Resonances Parameters & thermal values

CSEWG Cross Section Evaluation Working Group

ENSDF Evaluated Nuclear Structure Data File

NSR Nuclear Science References

NuDat Nuclear structure & decay Data

CapGam Thermal Neutron Capture γ -rays

CSISRS alias EXFOR Nuclear reaction experimental data

IRDF International Reactor Dosimetry File

Nuclear Data Sheets Nuclear structure & decay data journal, *Special Issues on reaction data*

USNDP U.S. Nuclear Data Program

Chart of Nuclides Basic properties of atomic nuclei

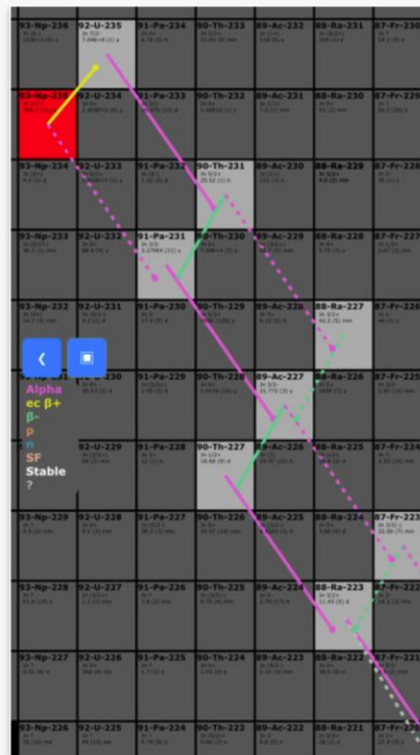
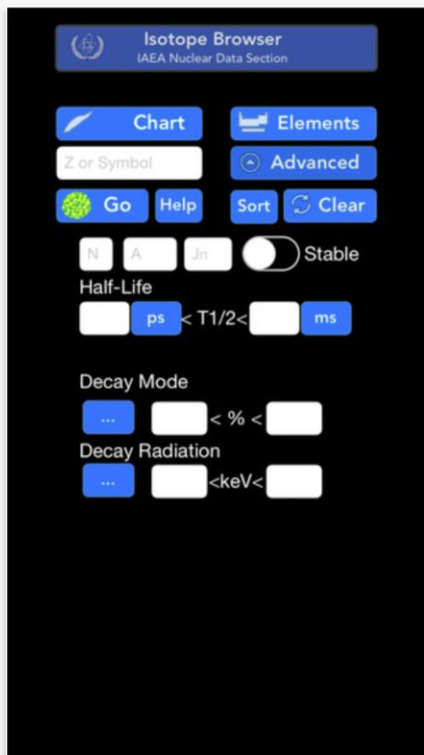
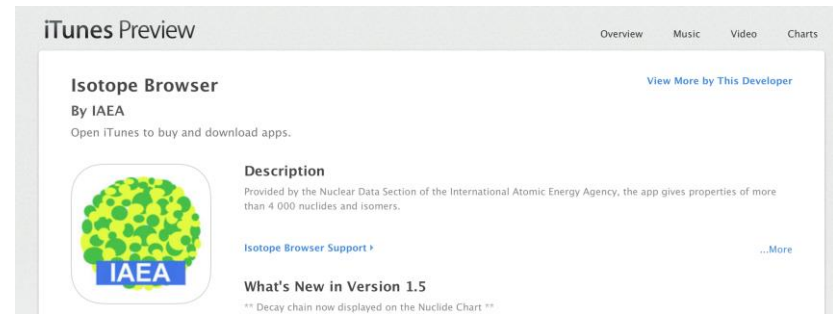
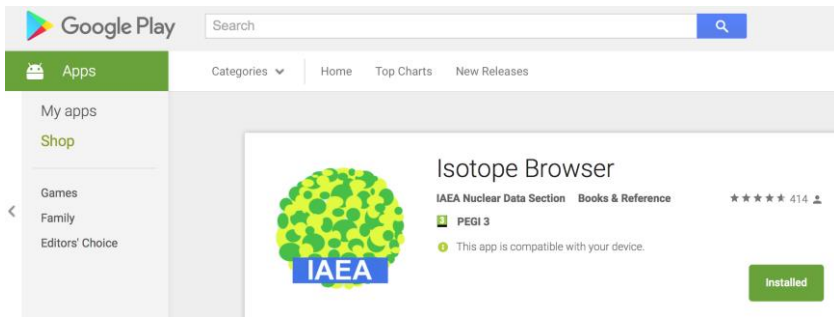
Empire Nuclear reaction model code system, *Reference paper*

MIRD Medical Internal Radiation Dose

Nuclear Wallet Cards Ground & isomeric states properties, *Homeland Security version*

USNDP/CSEWG GForge Collaboration Server

Quelques Bonnes Applications



The screenshot shows the 'Chart' for element 54 (Xenon). It lists 48 nuclides found with element 54, ordered by Z, N. The table includes columns for the isotope symbol, half-life, spin/parity, and decay mode.

Isotope	Half-life	Spin/Parity	Decay Mode
⁹⁹ Xe ₅₅	13 (2) ms	(7/2+)	α 100%
¹⁰ ₅₄ Xe ₅₆	93 (3) ms	0+	α 64 35%
¹¹ ₅₄ Xe ₅₇	0.74 (20) s	0+	α 8 +8-5%
¹² ₅₄ Xe ₅₈	2.7 (8) s	0+	α 0.0080%
¹³ ₅₄ Xe ₅₉	2.74 (8) s	(5/2+)	α = 0.011%
¹⁴ ₅₄ Xe ₆₀	10.0 (4) s	0+	α β+ 100%
¹⁵ ₅₄ Xe ₆₁	18 (4) s	(5/2+)	α 0.0003 1%
¹⁶ ₅₄ Xe ₆₂	59 (2) s	0+	α β+ 100%
¹⁷ ₅₄ Xe ₆₃	61 (2) s	5/2(+)	α β+ 100%
¹⁸ ₅₄ Xe ₆₄	3.8 (9) min	0+	α β+ 100%
¹⁹ ₅₄ Xe ₆₅	5.8 (3) min	(5/2+)	α β+ 100%
²⁰ ₅₄ Xe ₆₆	40 (1) min	0+	α β+ 100%
²¹ ₅₄ Xe ₆₇	40.1 (20) min	5/2(+)	α β+ 100%

The screenshot shows the properties of ¹³⁵Xe. It includes the element name, atomic number (Z=54), neutron number (N=81), and spin/parity (Jπ=3/2+). It also lists the half-life (9.14 (2) h) and various decay data.

54-Xe-135 Xenon
Uncertainty applies to the least significant digit(s)
Z 54 N 81 Jπ 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 Niels Bohr". It features a portrait of Niels Bohr, his birth and death dates, and the prize motivation. A sidebar on the left lists "Nobel Prizes and Laureates" and "Physics Prizes" for 1922. A right sidebar contains links to "The Age to Come", "2014 Nobel Prize Announcements", and "2013 Nobel Laureates".

Nobelprize.org
The Official Web Site of the Nobel Prize

Video Podcast About Us Search

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

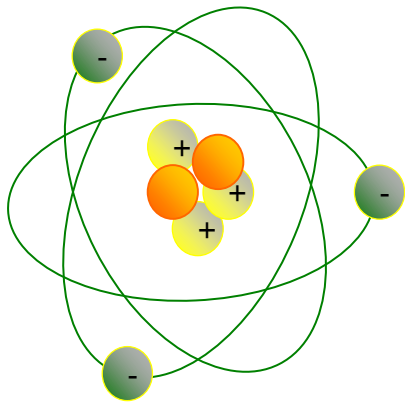
2013 Nobel Laureates
© The Nobel Foundation. Photo: Lovisa Engblom.



- ❖ 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

Première partie

L'atome moderne



 **Z** Electrons

 **Z** Protons

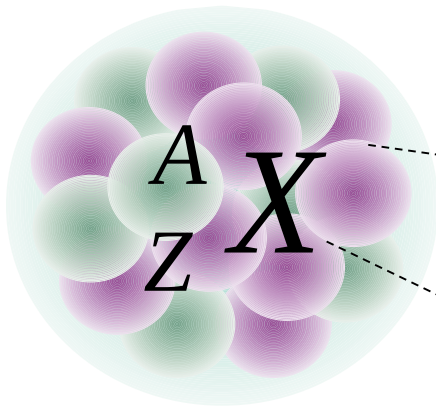
 **N** Neutrons

A nucléons formant le
noyau de l'atome

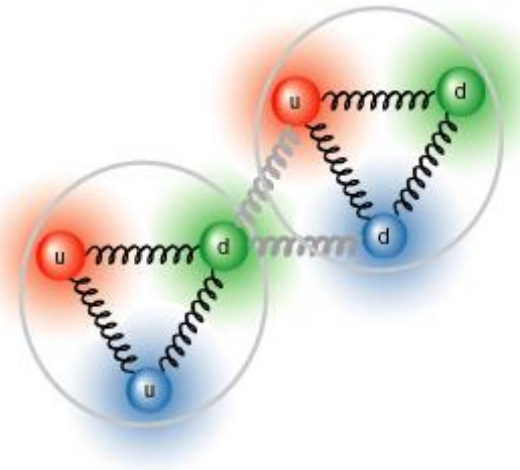
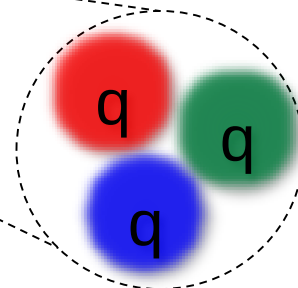
$\text{Masse}_{\text{noyau}} > 99.9\% \text{ Masse}_{\text{atome}}$

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

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



Les nucléons ne sont pas
des particules élémentaires



Noyau= A nucléons en interaction
3 forces: faible, électromagnétique, forte

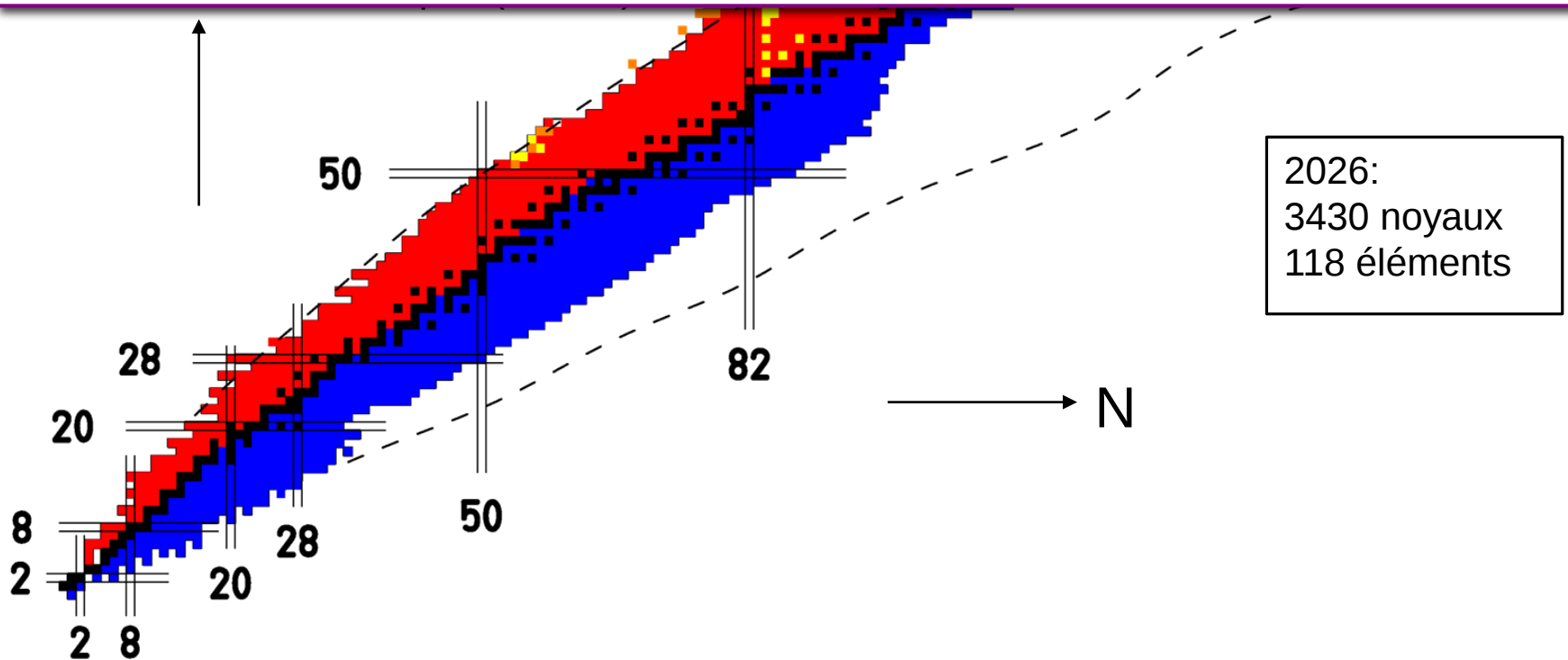
Paysage nucléaire

114 

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

=

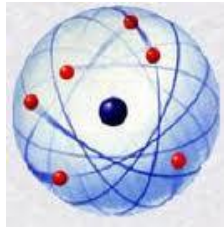
Enjeu de la physique nucléaire



Naissance de la physique nucléaire: 1911

“ 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 ”



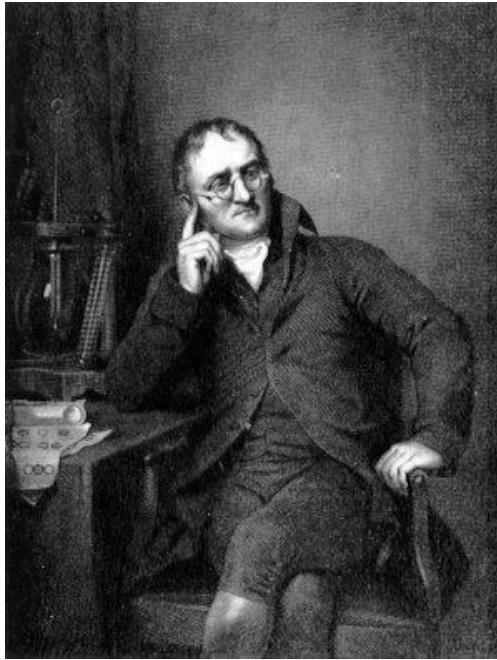
A l'aube du 20^{ème} siècle



“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)

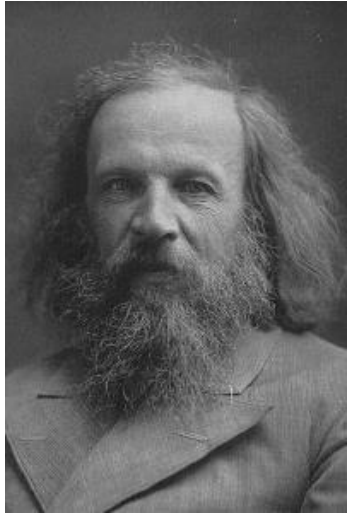
-Les atomes d'un même élément
sont identiques

-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.

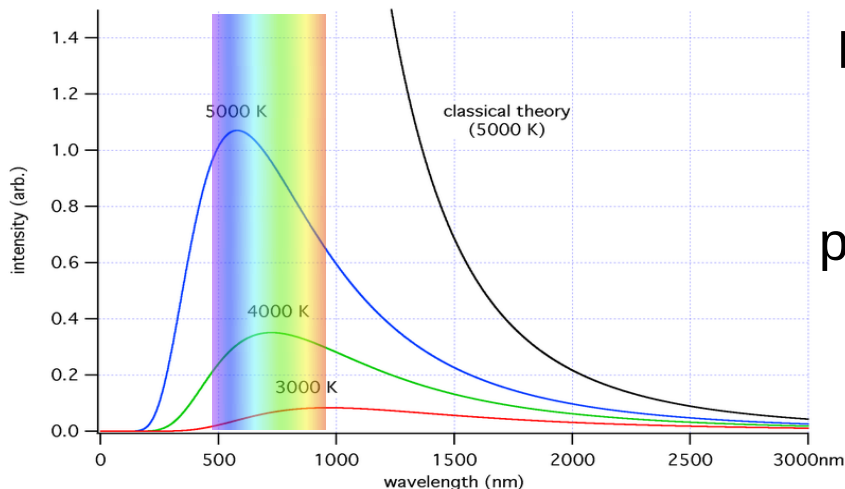
			Ti = 50	Zr = 90	? = 180.
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182.
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186.
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,1.
			Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198.
			Ni = Co = 59	Pd = 106,6	Os = 199.
			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200.
H = 1					
	Be = 9,1	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112	
	B = 11	Al = 27,9	Ga? = 68	Ur = 116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

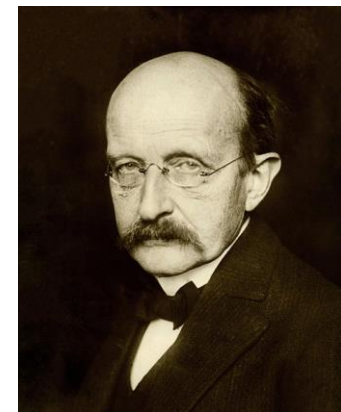
Д. Менделѣевъ (1869)

Des nuages dans le ciel...

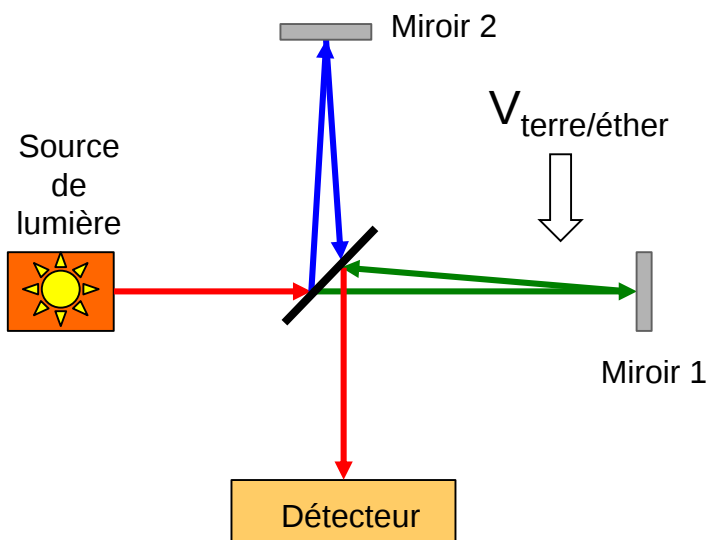
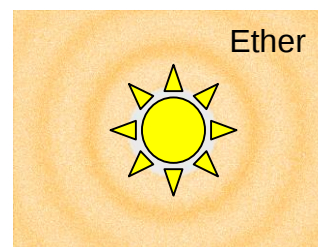
Catastrophe ultraviolette



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



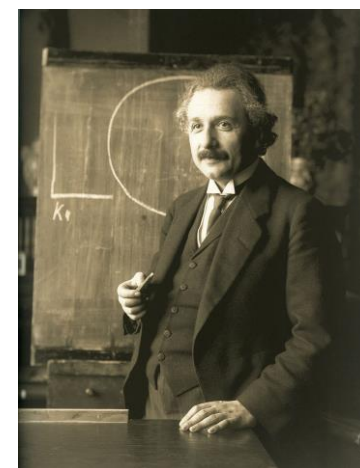
Max Planck



Expérience de Michelson Morley

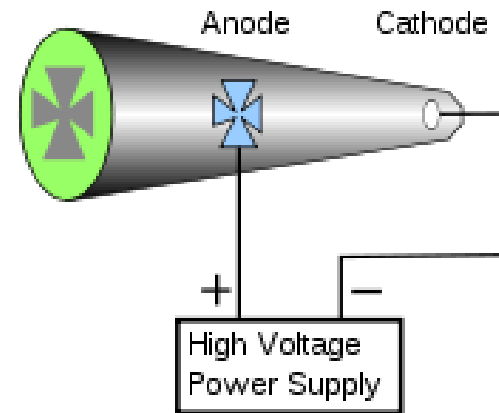
Relativité restreinte :
Les lois de la physique sont les mêmes dans tout référentiel inertiel et la vitesse de la lumière est une constante

$$E=mc^2$$

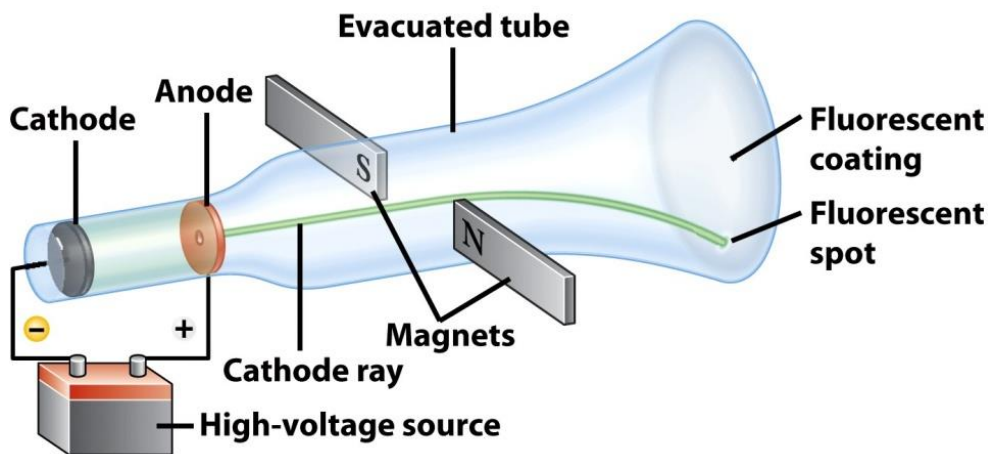


Albert Einstein

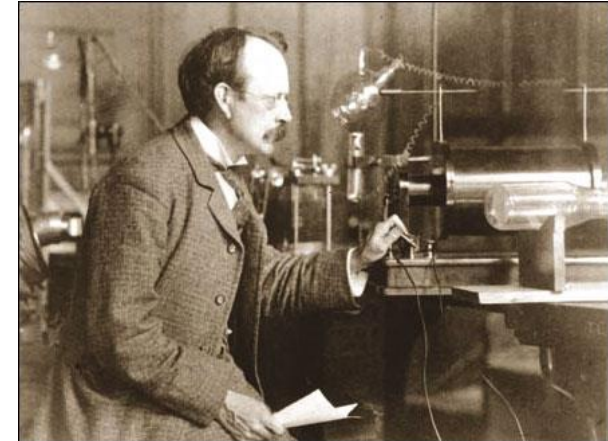
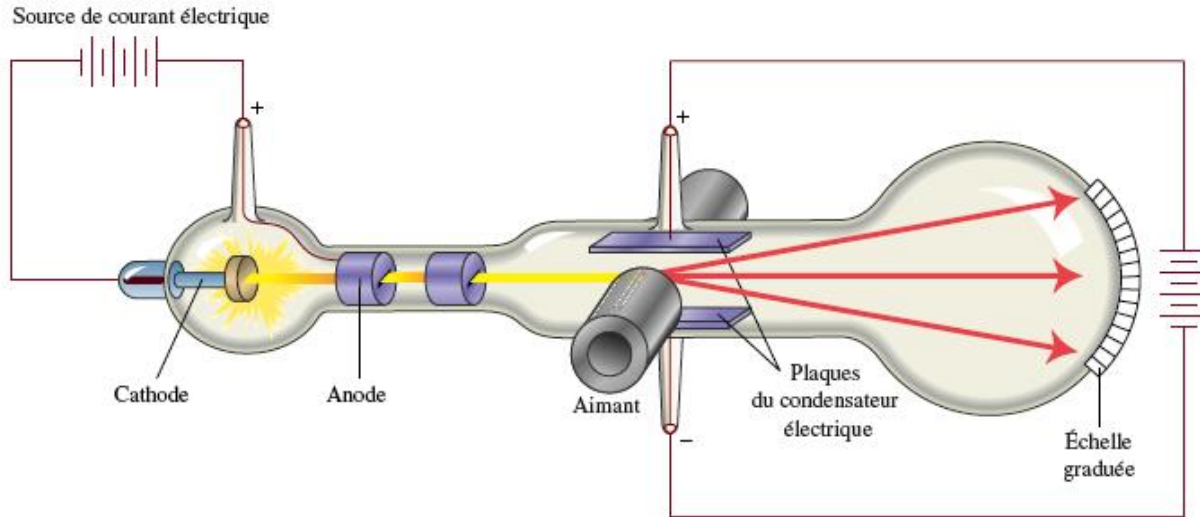
La révolution du tube cathodique



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



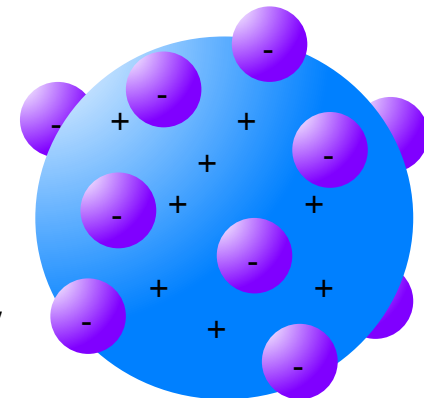
Les corpuscules



John Joseph Thomson

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

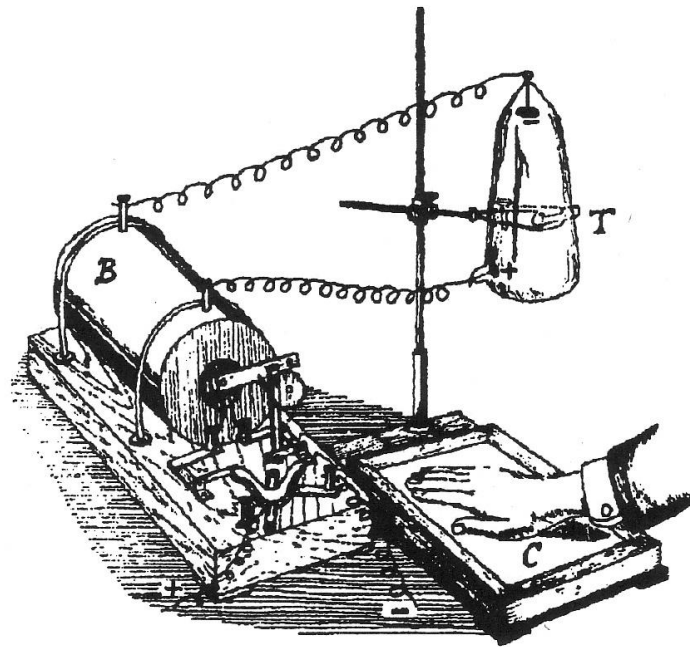
Des rayons cathodiques aux rayons X

1895 W. Röntgen

découverte des rayons X



Wilhelm Röntgen



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



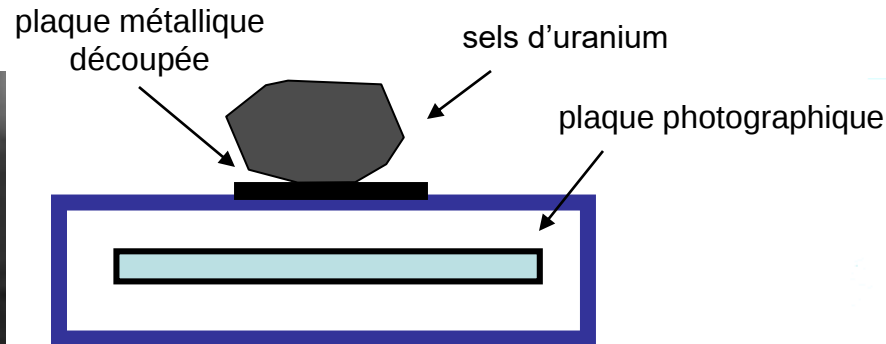
Des rayons X aux rayons uraniques

1896 H. Becquerel

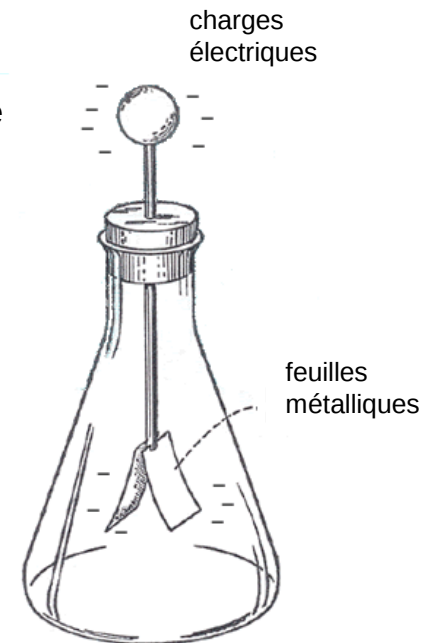
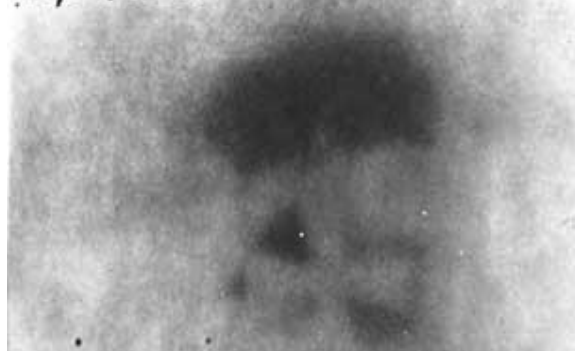
découverte d'un nouveau rayonnement émis par l'Uranium



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



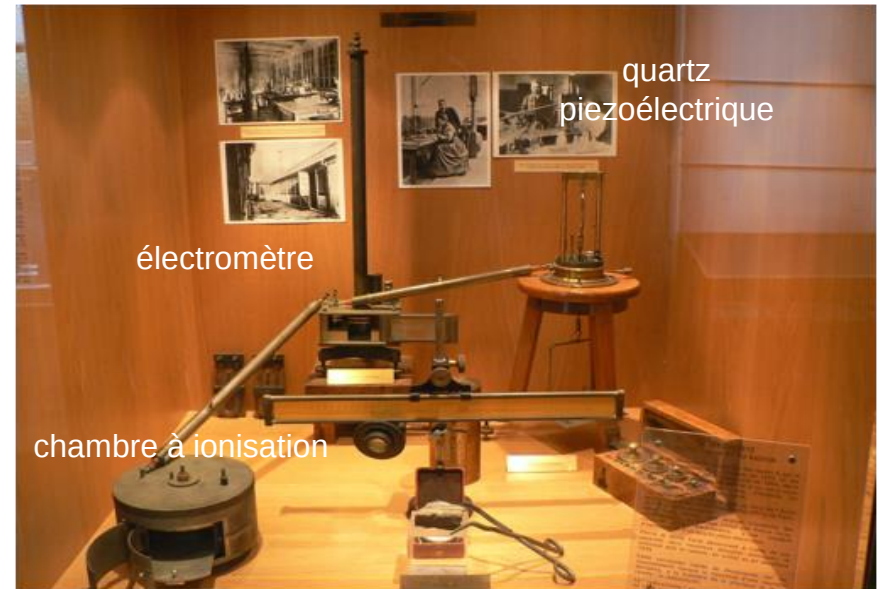
Pierre Curie

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



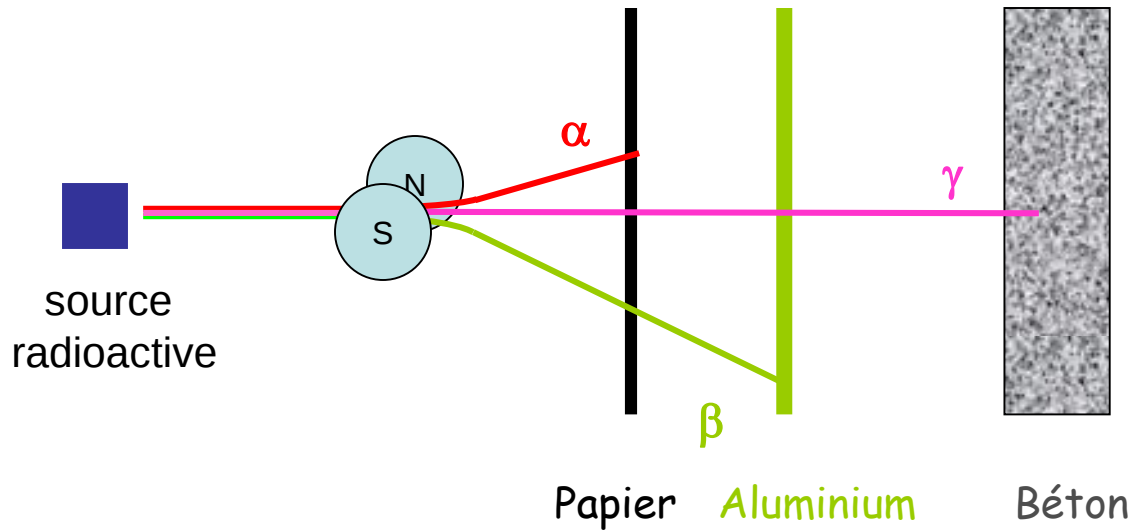
La radioactivité est multiple

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

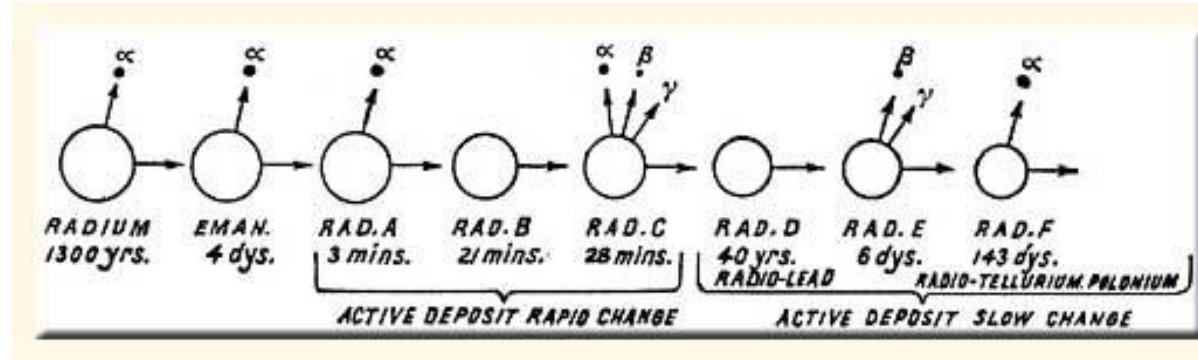
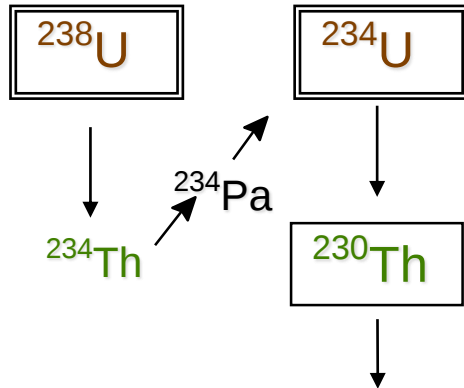


Paul Villard

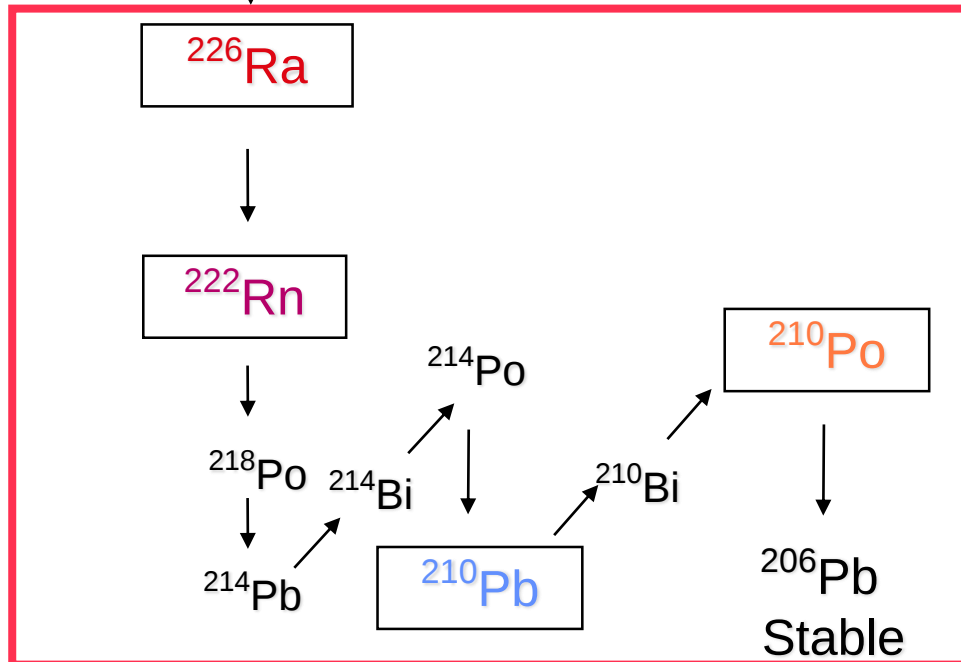
Les atomes se transforment !

1902 E. Rutherford & F. Soddy

transmutation des atomes



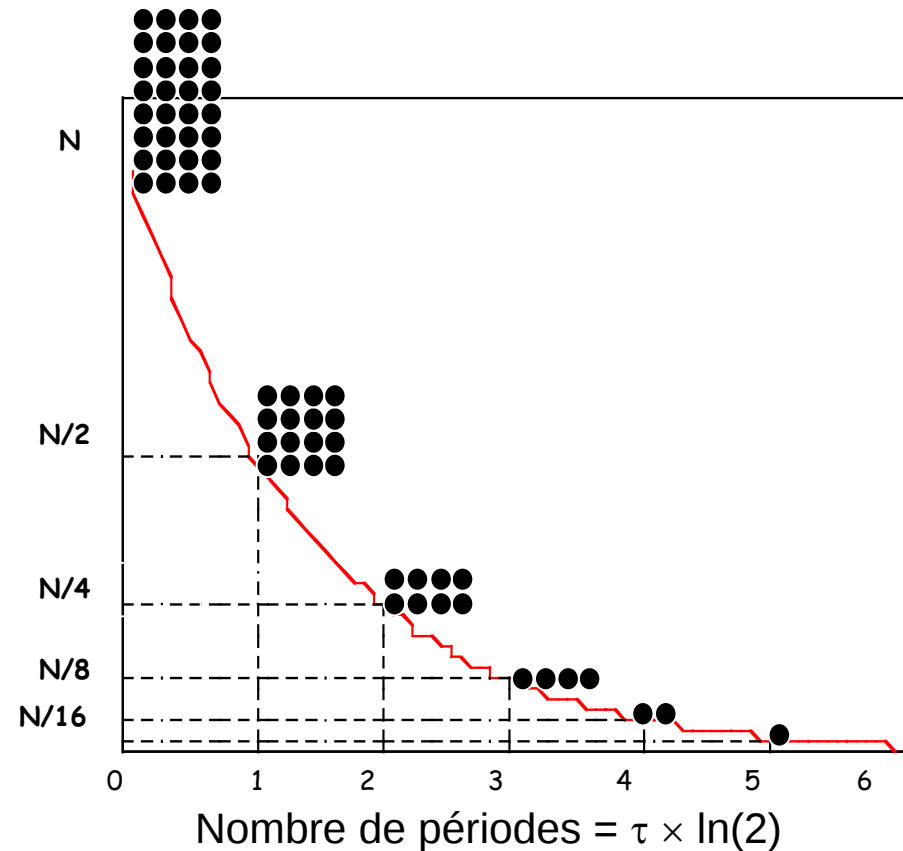
Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1905



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

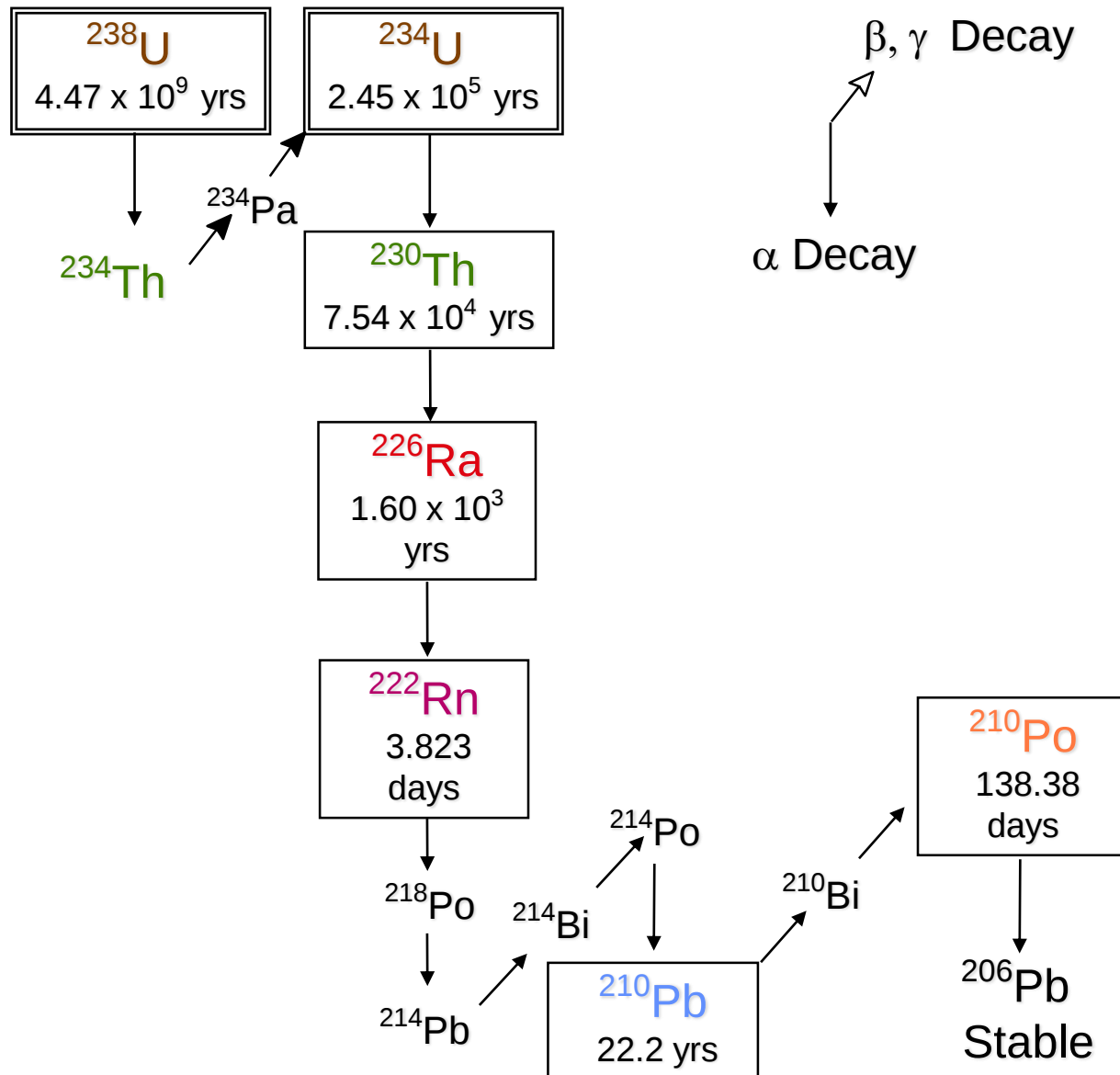
1910:

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

1 Ci = 37 milliards de désintégrations/s

1 Bq = 1 désintégration/s

Radioactivité tellurique



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

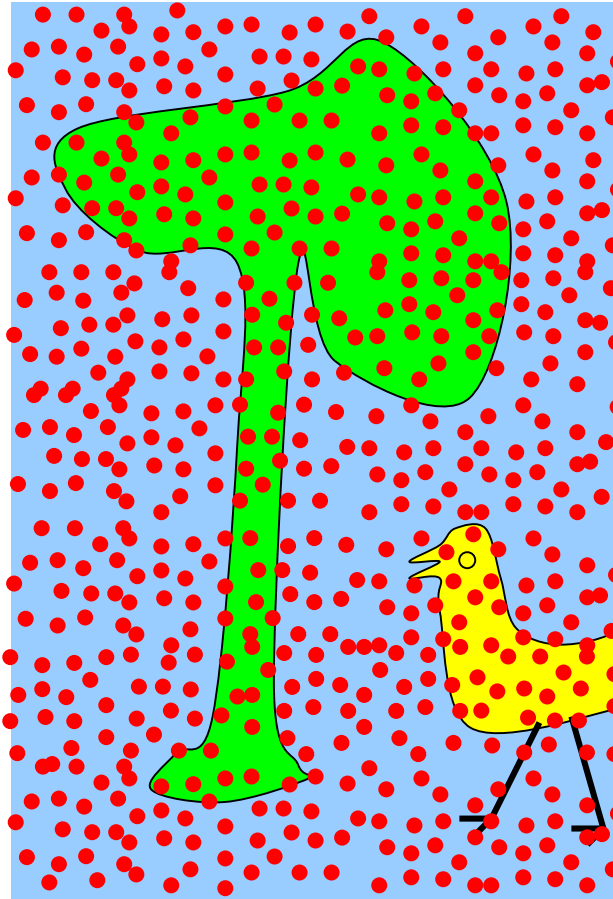
Demi-vie:
 ^{232}Th : 1.40×10^{10} a

^{235}U : 7.04×10^8 a

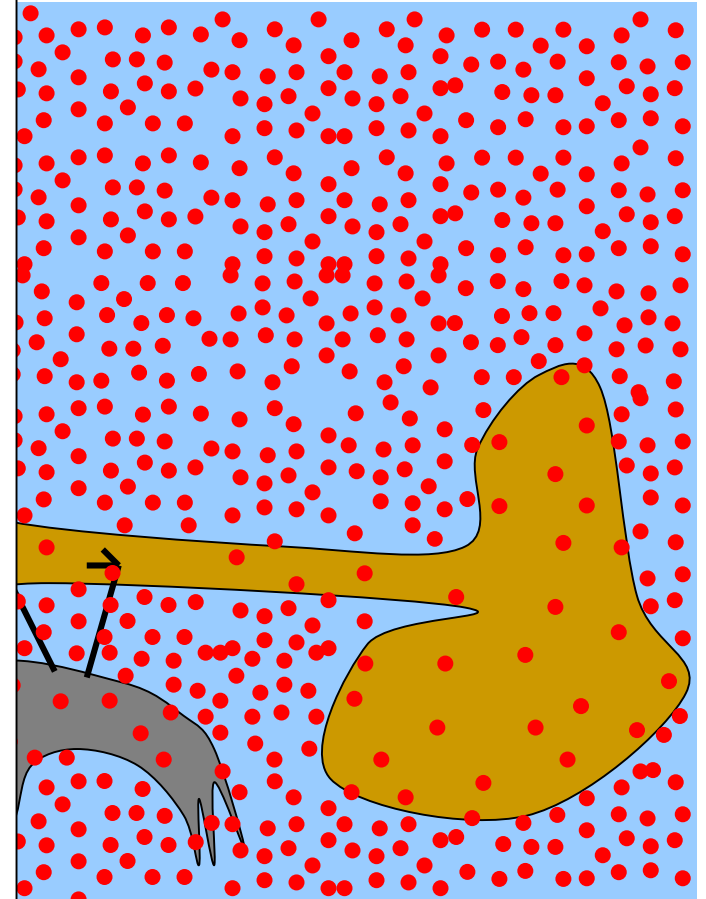
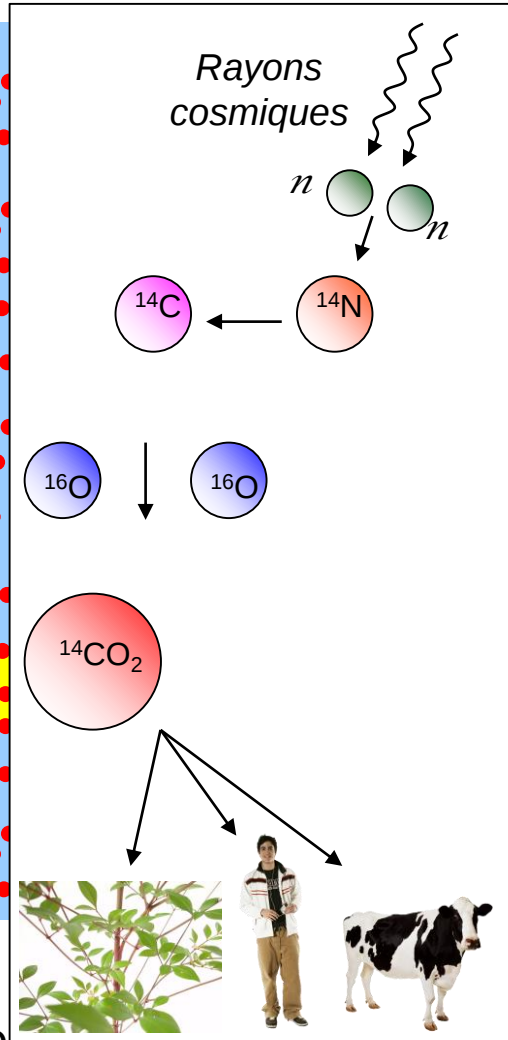
^{238}U : 4.47×10^9 a

^{40}K : 1.2×10^9 a

Radioactivité cosmogénique



Le monde vivant
échange avec l'atmosphère



la mort survient, les échanges
s'arrêtent et le ^{14}C décroît avec une demi-
vie de 5730 ans: R diminue

Rapport d'abondances $R = ^{14}\text{C}/^{12}\text{C} \approx 10^{-12}$

La datation au ^{14}C



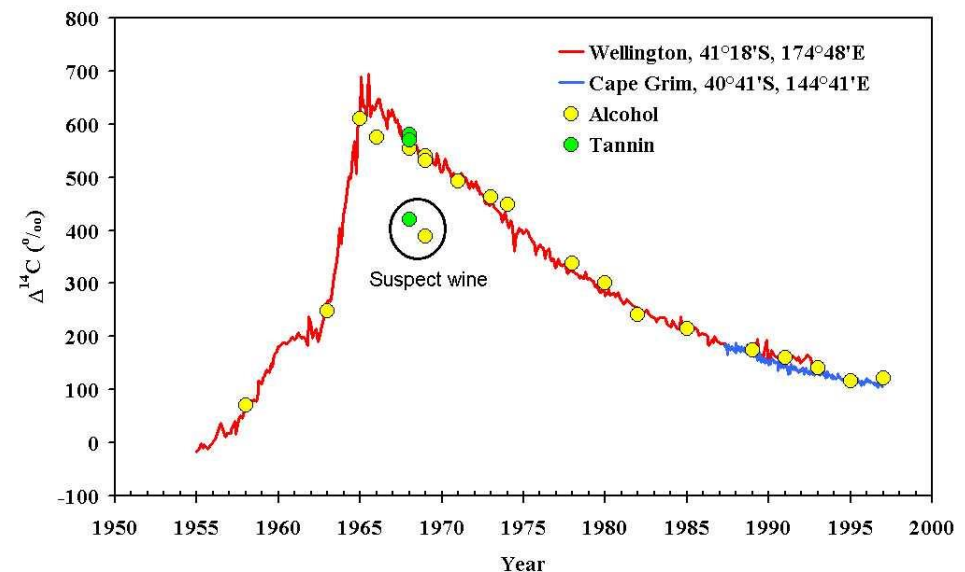
En septembre 1991, des randonneurs découvrent Ötzi (Iceman) dans les Alpes Italiennes.

Une activité 0,121 Bq pour 1 g de C a été mesurée $\Rightarrow t = 4546$ années

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



South Tyrol Museum of Archaeology, Bolzano



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:

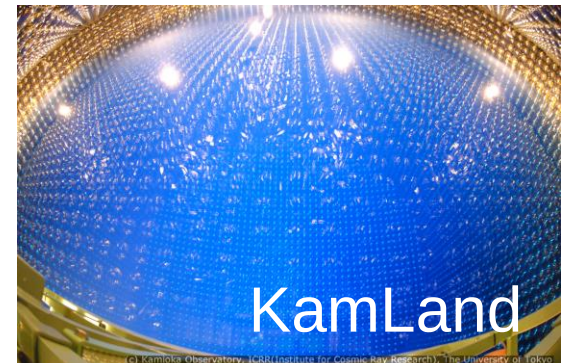
- ~centaines de millions d'années
- fossiles, évolution, vitesse de sédimentation....
- arguments "qualitatifs"

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%

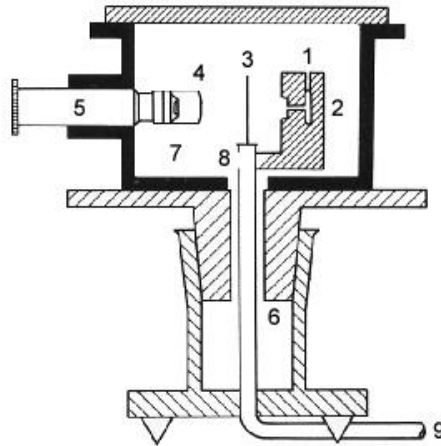
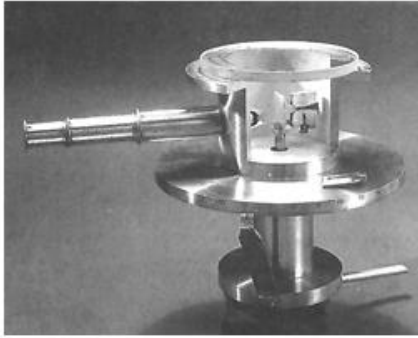
Nature Geoscience 4 (2011) 647



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

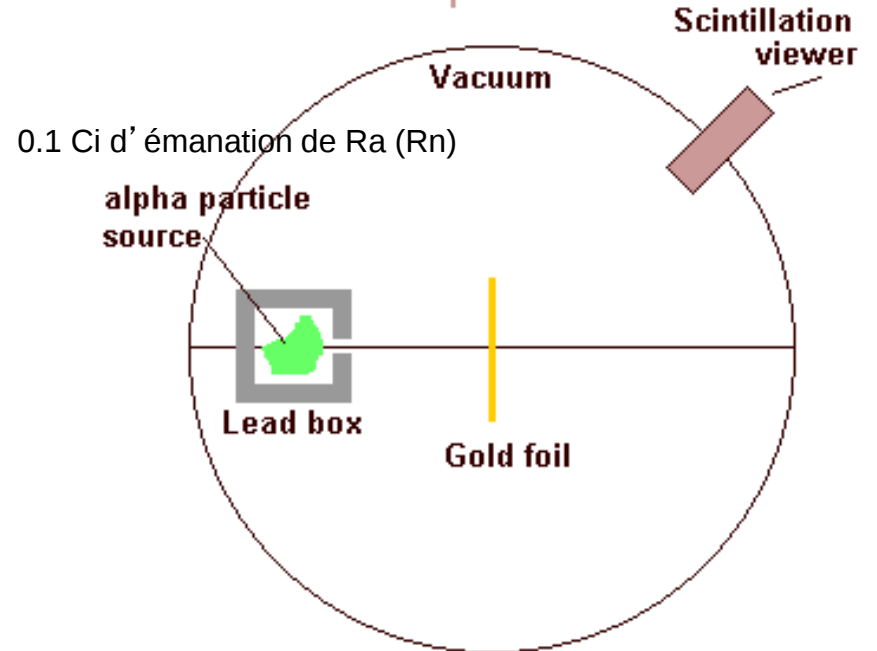
Mais les choses ne sont pas arrêtées
là.....

La diffusion de particules alpha



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

The Rutherford Experiment

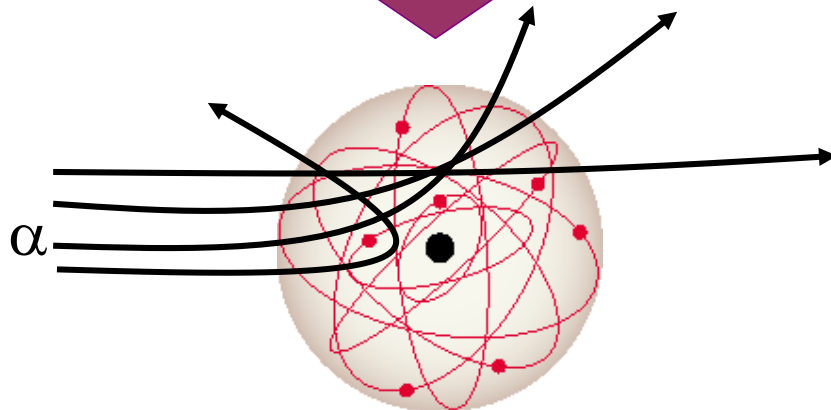
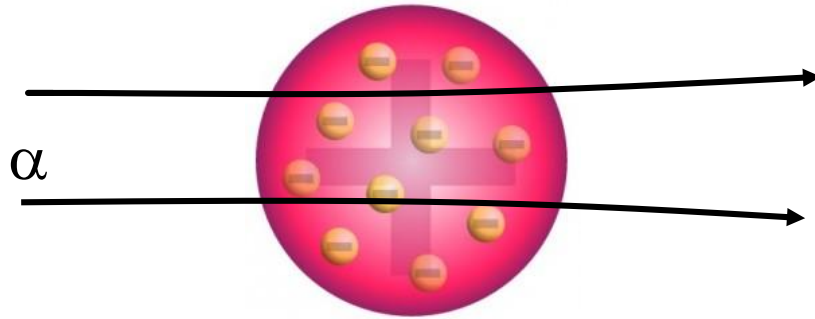


©1999 Science Joy Wagon

« 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 ! »

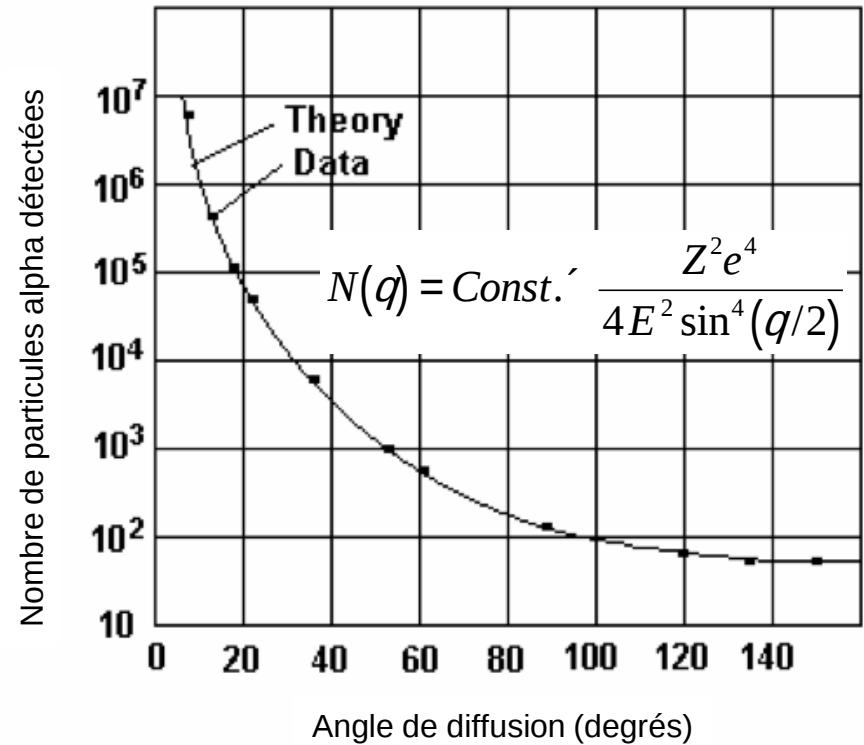
Le noyau est né !

Modèle 'plum pudding'



Modèle nucléaire

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



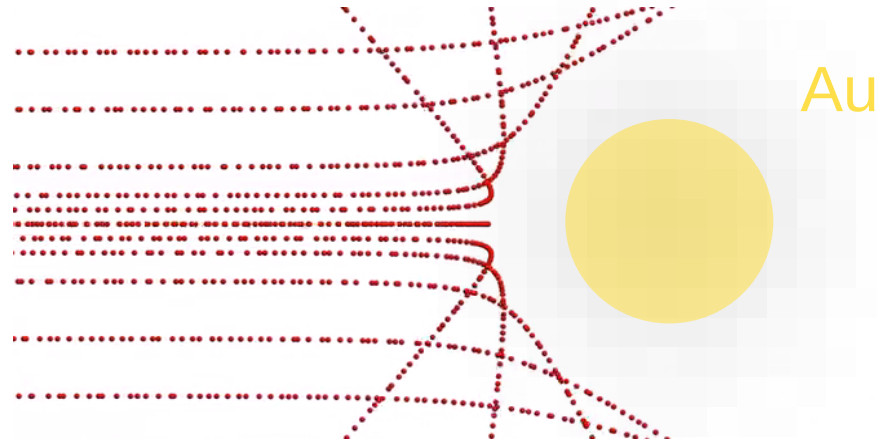
Conséquences du modèle de Rutherford



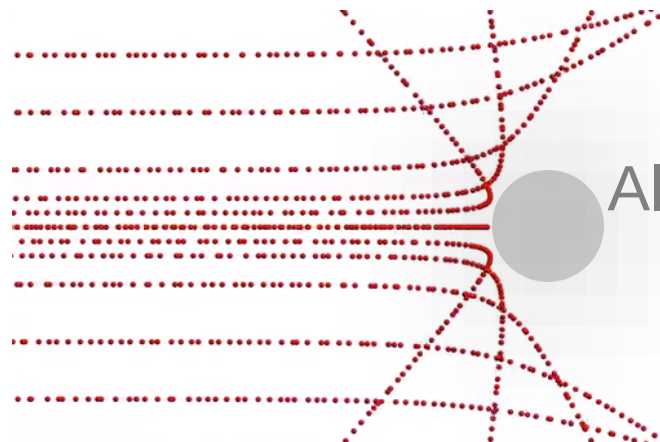
10^{-14} m

10^{-10} m

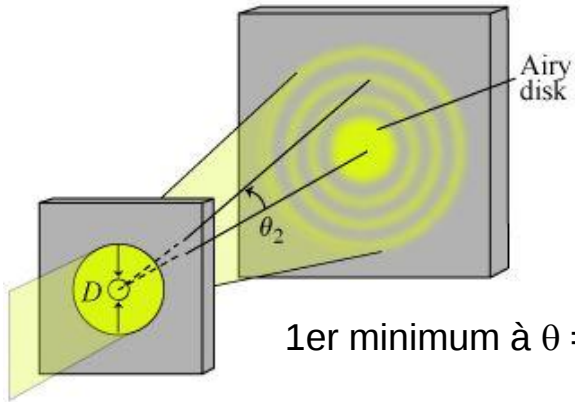
La matière est vide !



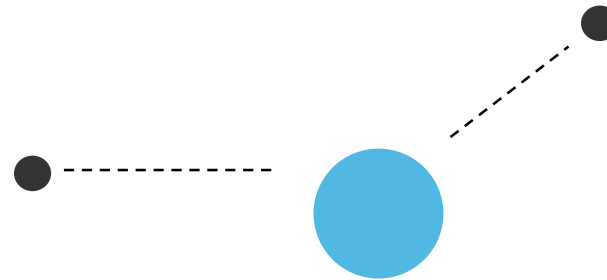
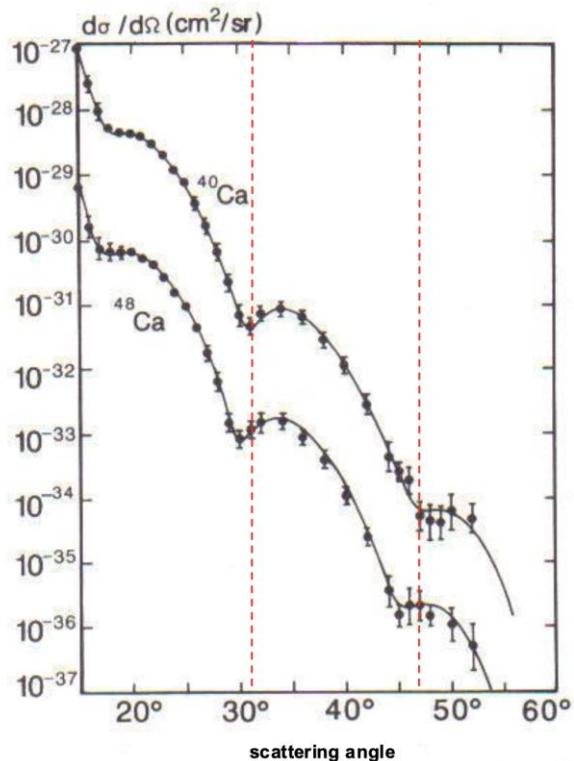
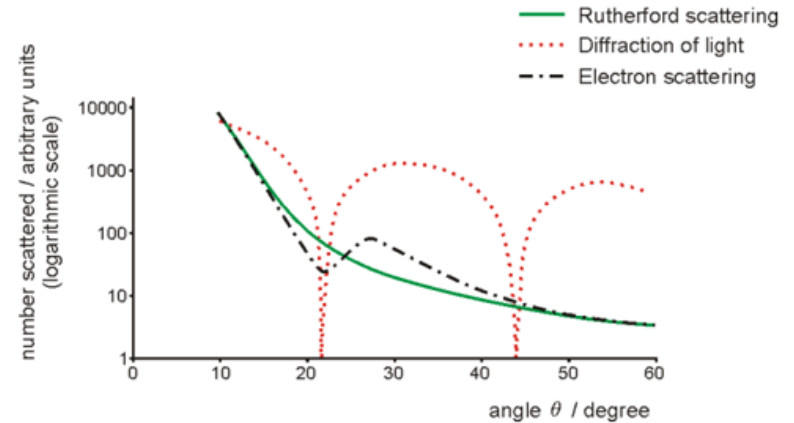
$E_{\alpha}(\text{source}) < 9 \text{ MeV}$



Expériences de diffusion avec e-



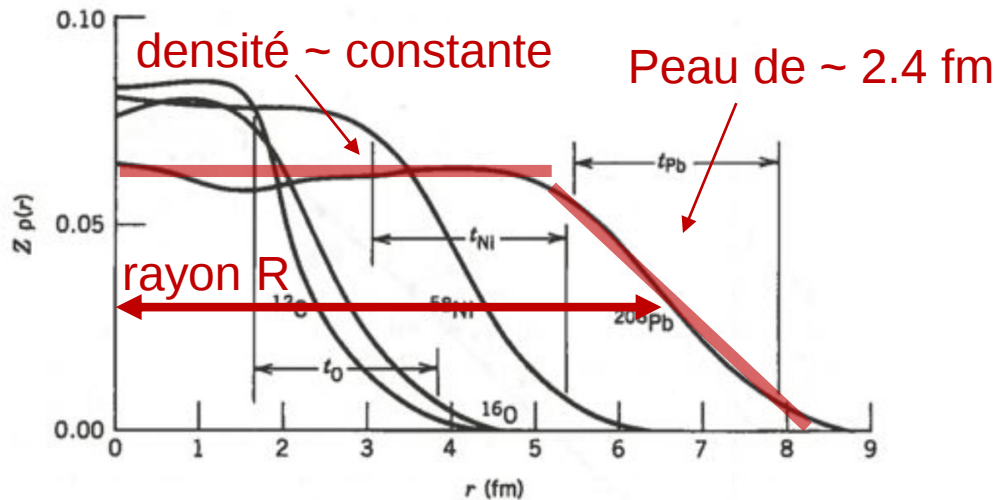
1er minimum à $\theta = \sin^{-1}(1.22 \lambda/D)$



$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{Ruth} |F(\vartheta)|^2$$

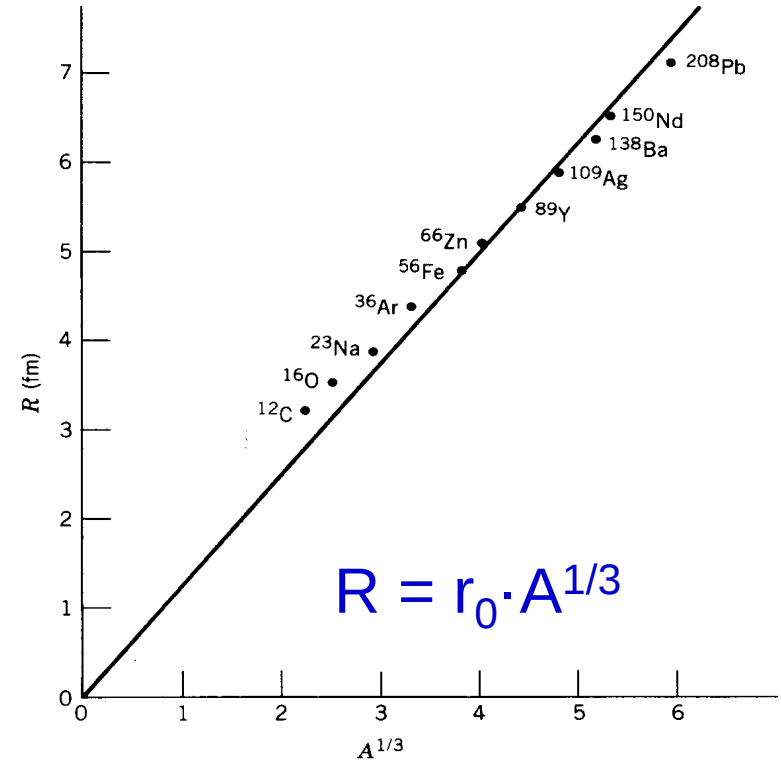
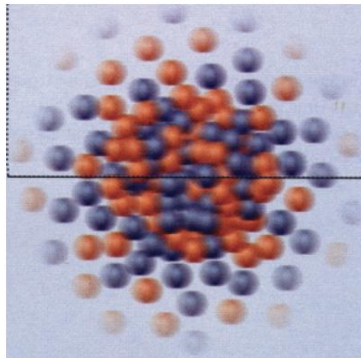
facteur de forme

Dimensions des noyaux



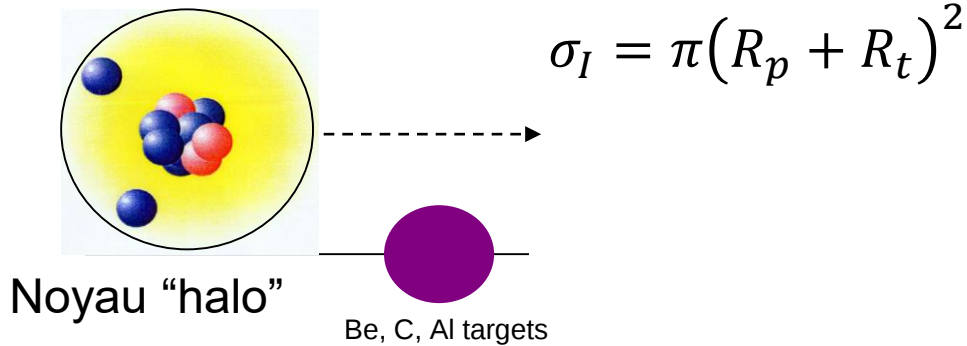
K. S. Krane, Introductory Nuclear Physics, John Wiley & Sons

Nuclide	Fraction in "Skin"
^{12}C	0.90
^{24}Mg	0.79
^{56}Fe	0.65
^{107}Ag	0.55
^{139}Ba	0.51
^{208}Pb	0.46
^{238}U	0.44

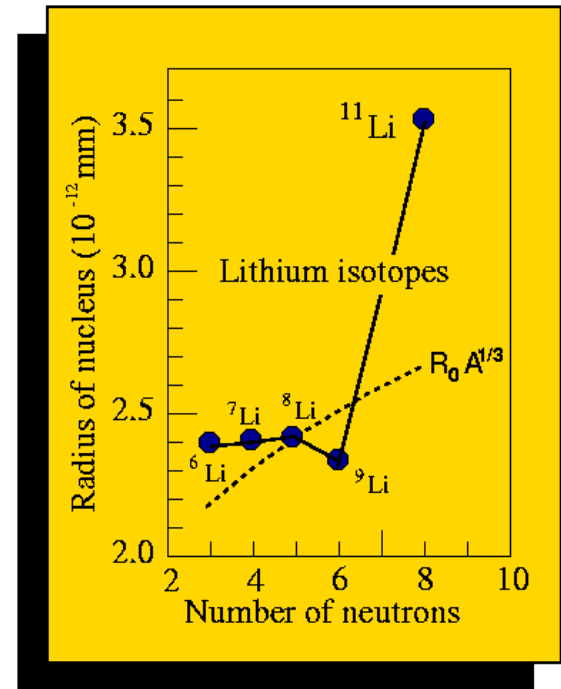
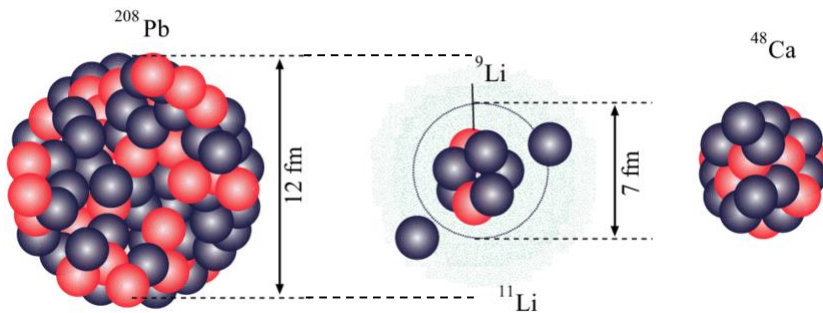


➔ Volume du noyau $\propto A$

Exceptions notables....

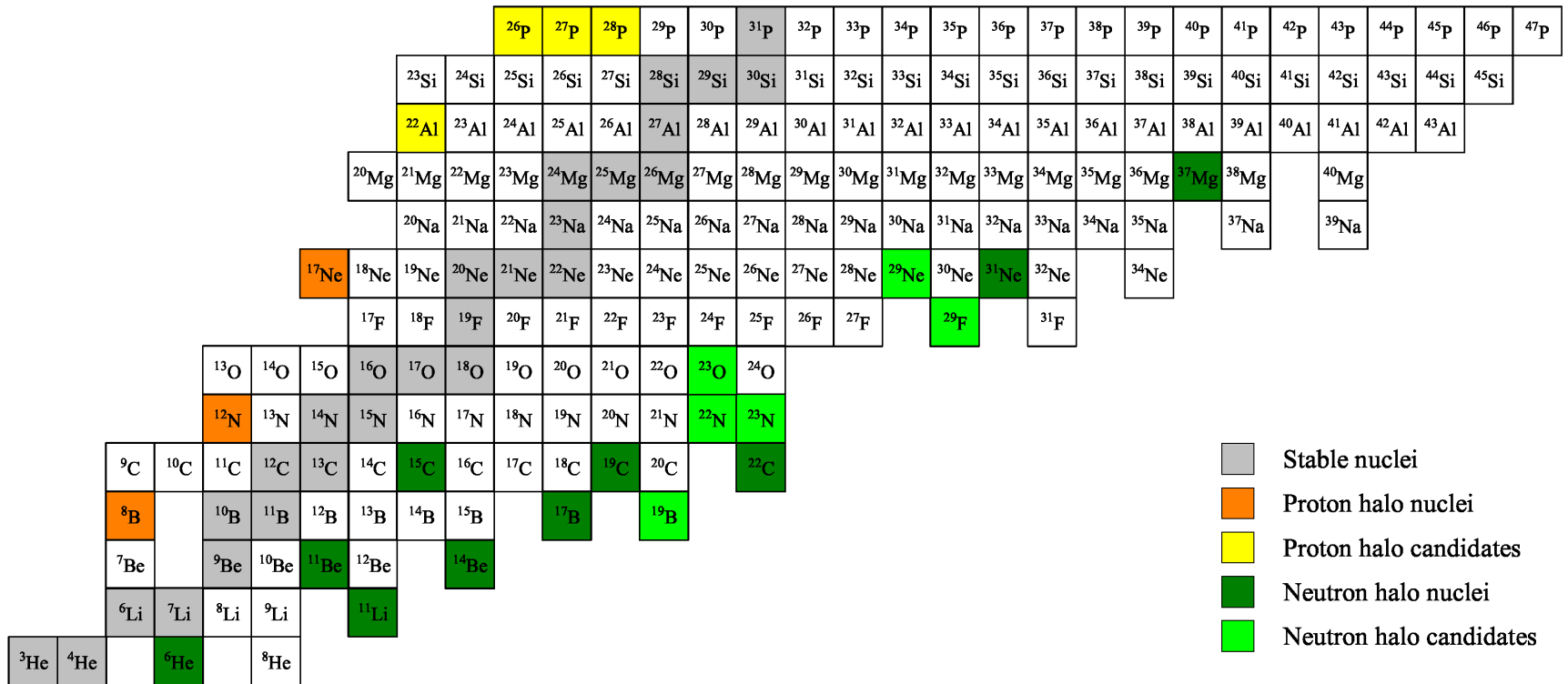


I. Tanihata et al., Phys. Rev. Lett. 55 (1985) 2676



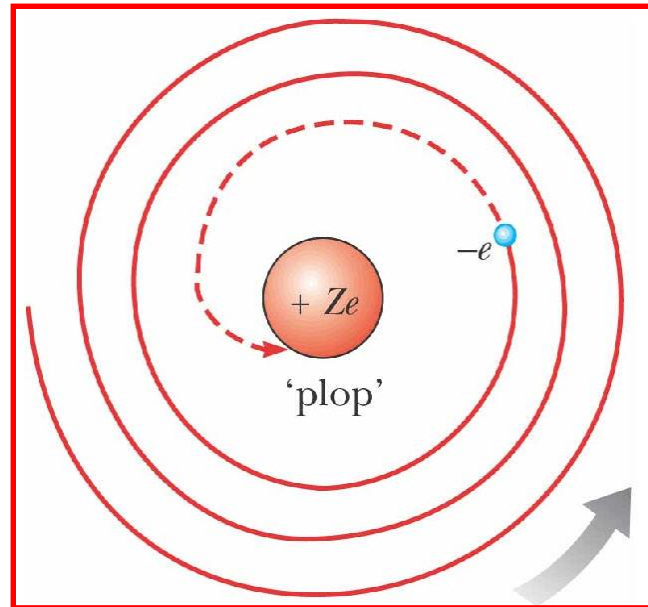
^{11}Li est un noyau **Borroméen**: si on enlève une des 3 composante, le système n'est plus lié (^{10}Li et $2n$ ne sont pas liés)

Noyaux halo



Y. Xiang et al., *Symmetry* **2023**, 15(7), 1420;

Conséquences du modèle de Rutherford



l'atome est instable !

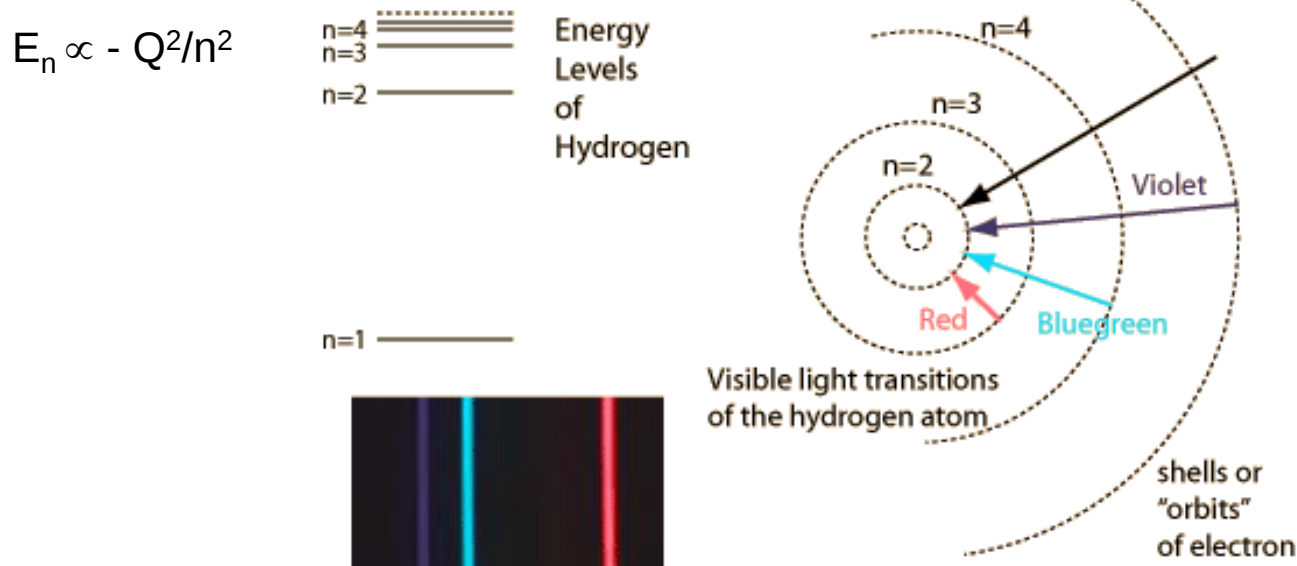
Bohr résout le problème avec les quantas de Planck

- 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

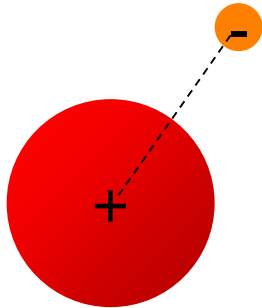


Niels Bohr

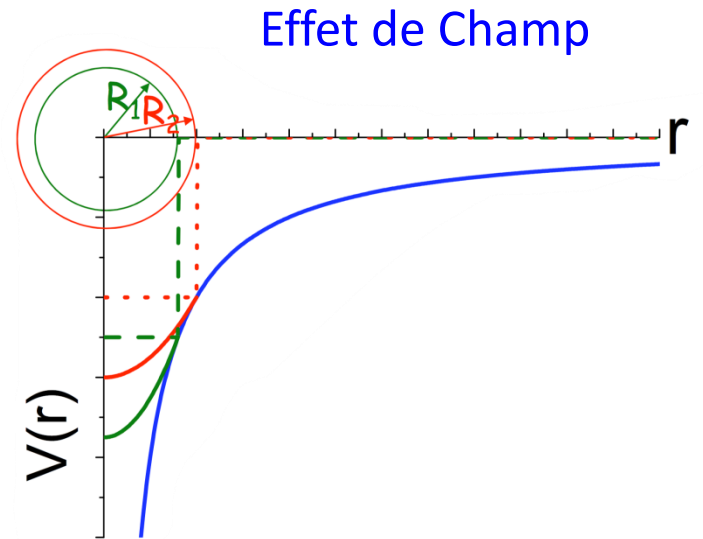
Philosophical Magazine 26, 1-25 (1913)



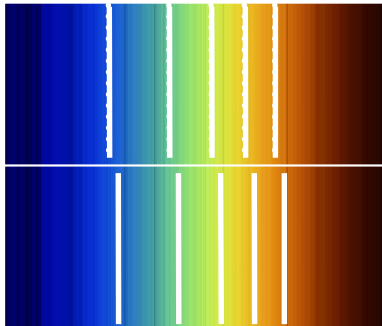
Déplacements isotopiques



Effet de Masse



Isotope A

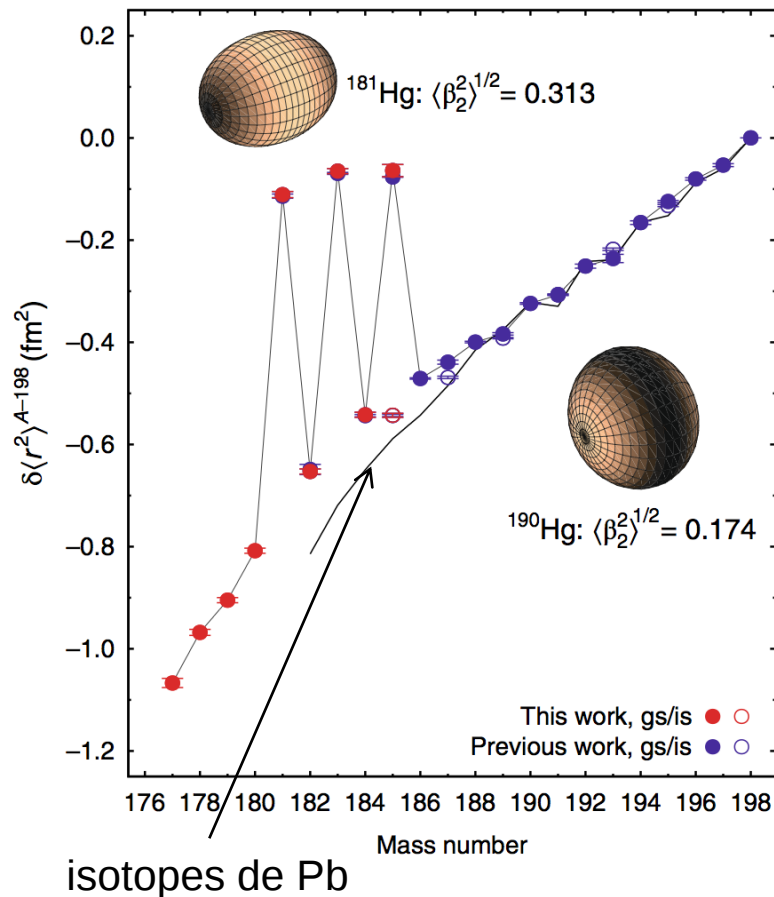


Isotope A'

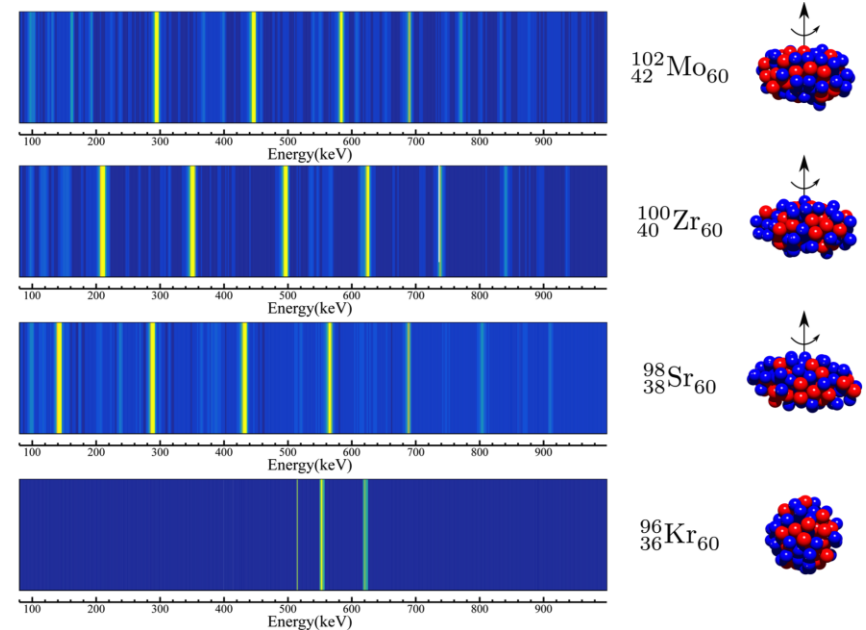
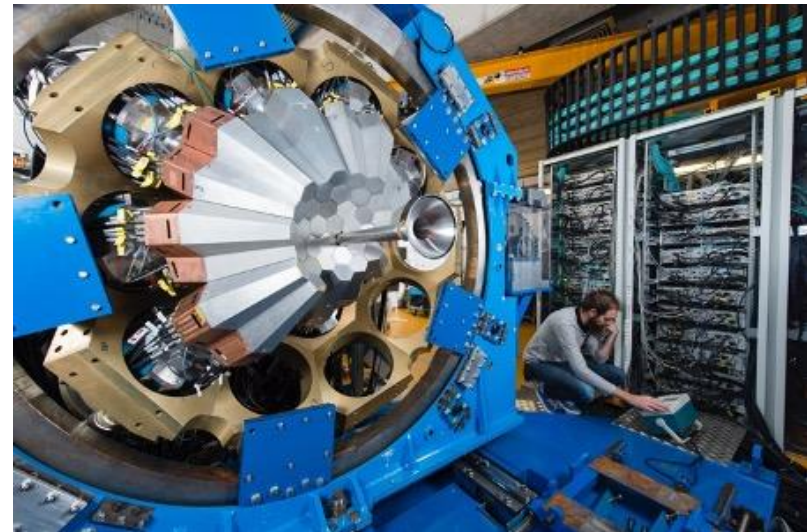
$$dn^{A,A'} = \underbrace{M}_{\text{facteurs atomiques}} \frac{A' - A}{AA'} + \underbrace{F d\langle r^2 \rangle^{A,A'}}_{\text{effet de champ}}$$

effet de masse

Changements de forme



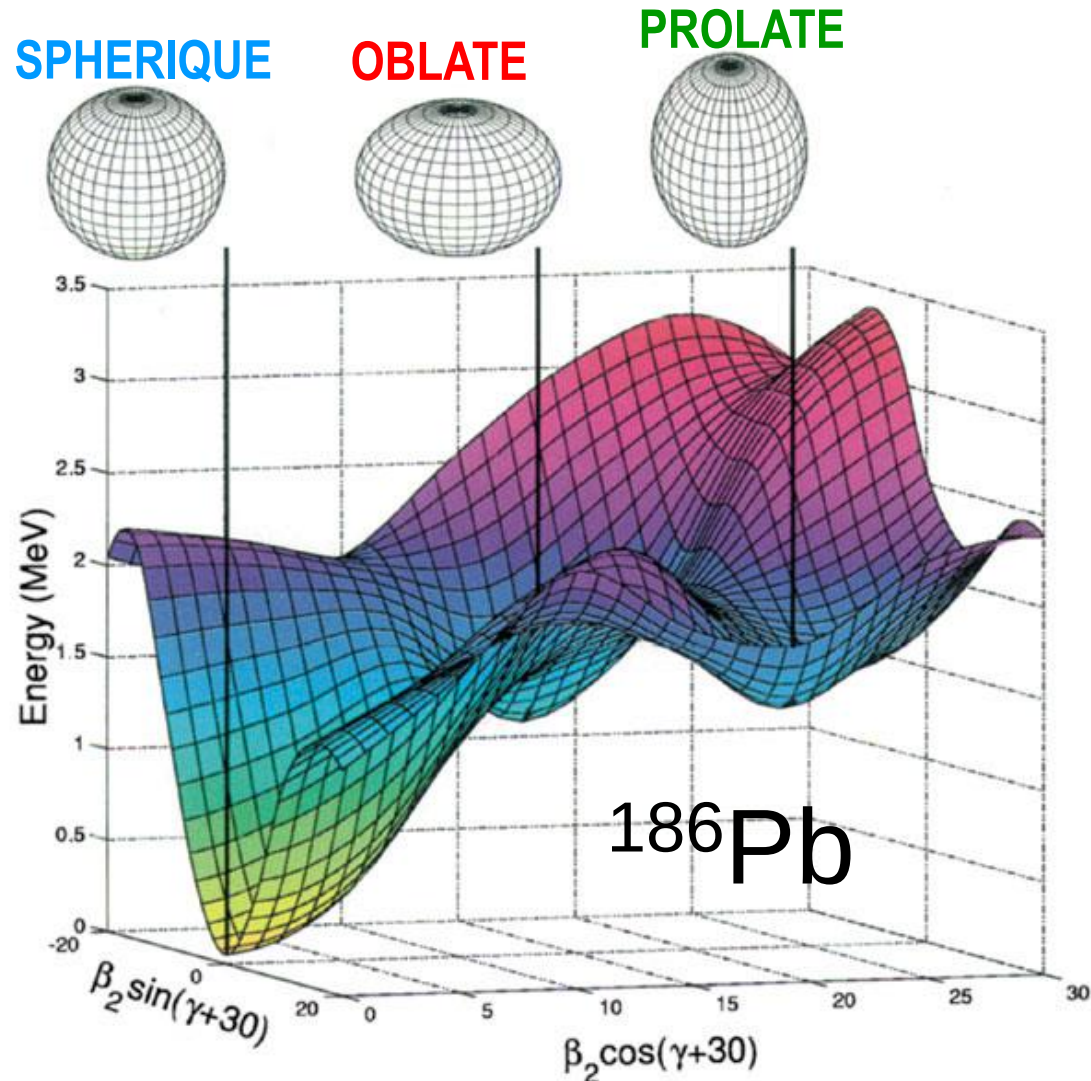
B.A. Marsh et al., Nature Physics 14 (2018) 1163



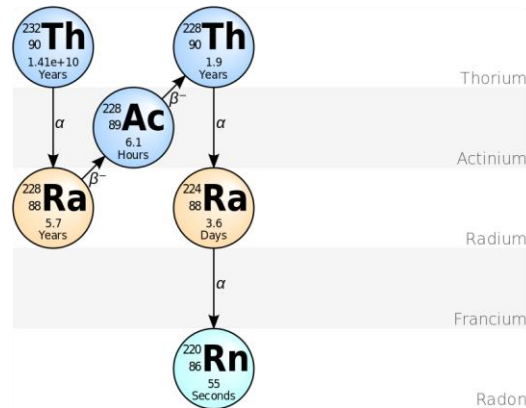
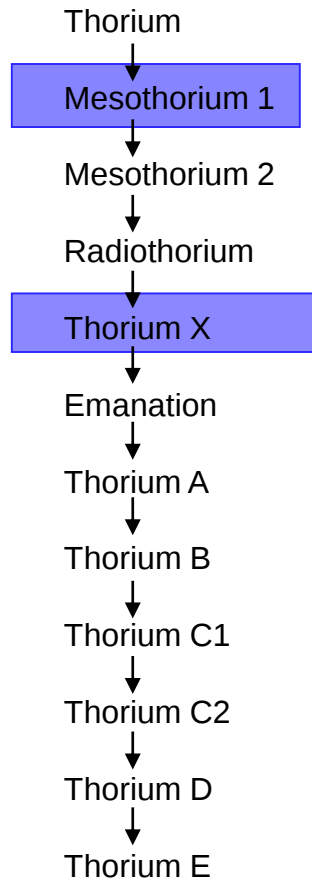
J. Dudouet et al., Phys. Rev. Lett. 118, 162501 (2017)

Coexistence de formes

3 états 0^+ de basse énergie observés dans la décroissance α du $^{190}\text{Po} \rightarrow ^{186}\text{Pb}$



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 !

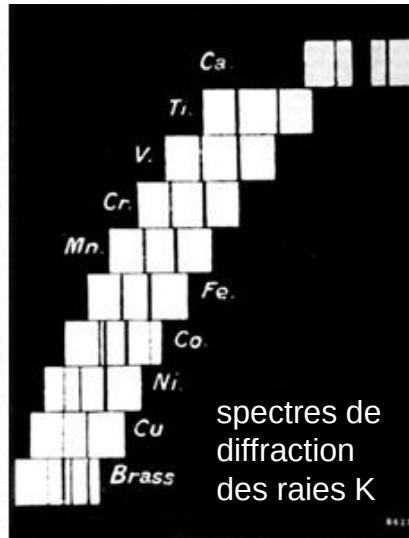
Inséparabilité de certains radioéléments



Frederick Soddy

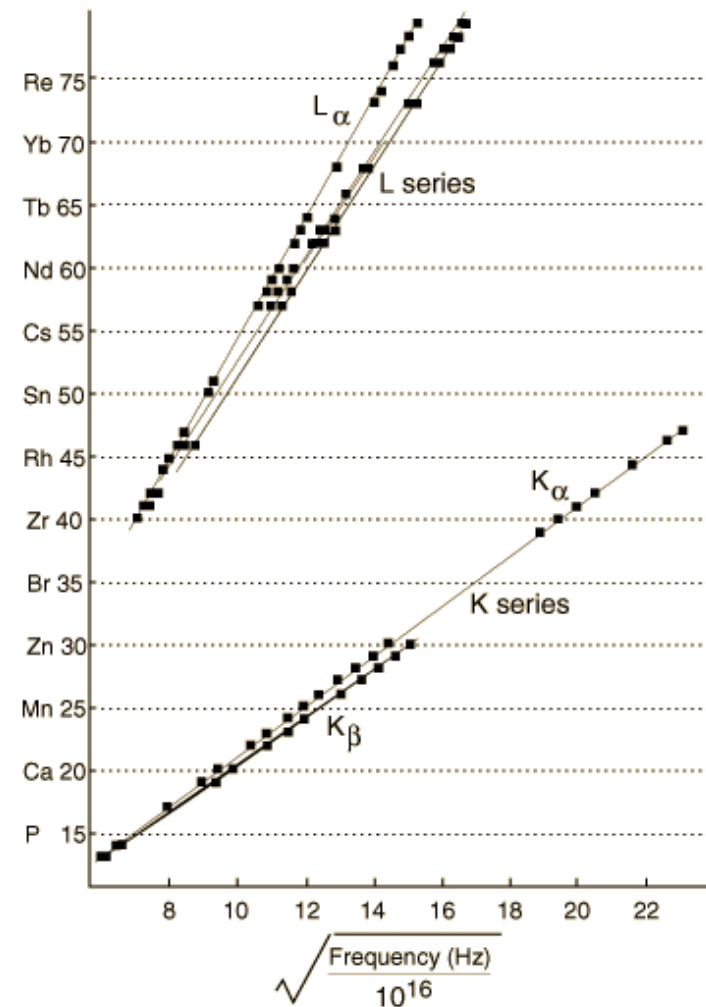
1913: Concept d'isotope: éléments radioactifs ayant différentes masses atomiques mais les mêmes propriétés chimiques

Le tableau périodique trouve enfin son fil conducteur



1914 Henry Moseley

Mesure de la fréquence du rayonnement X de nombreux éléments

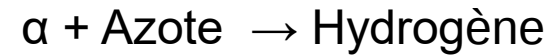


Adapted from Moseley's original data (H. G. J. Moseley, Philos. Mag. (6) 27:703, 1914)

Les alchimistes du 20^{ème} siècle

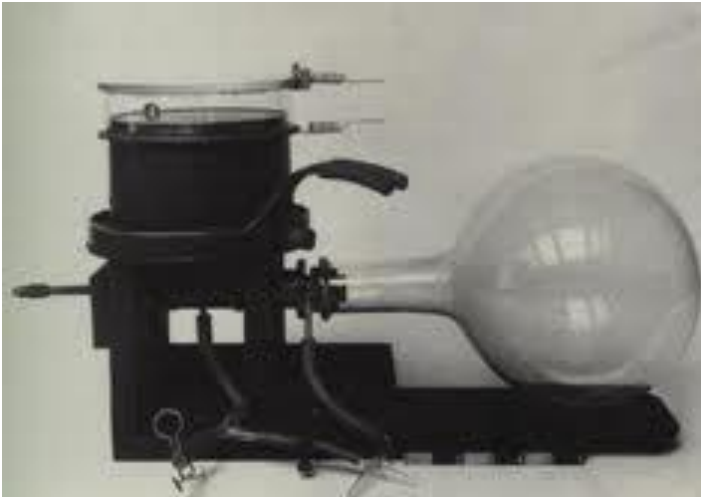
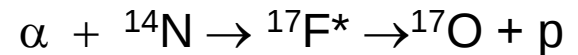
1919 E. Rutherford

1ère transmutation en laboratoire

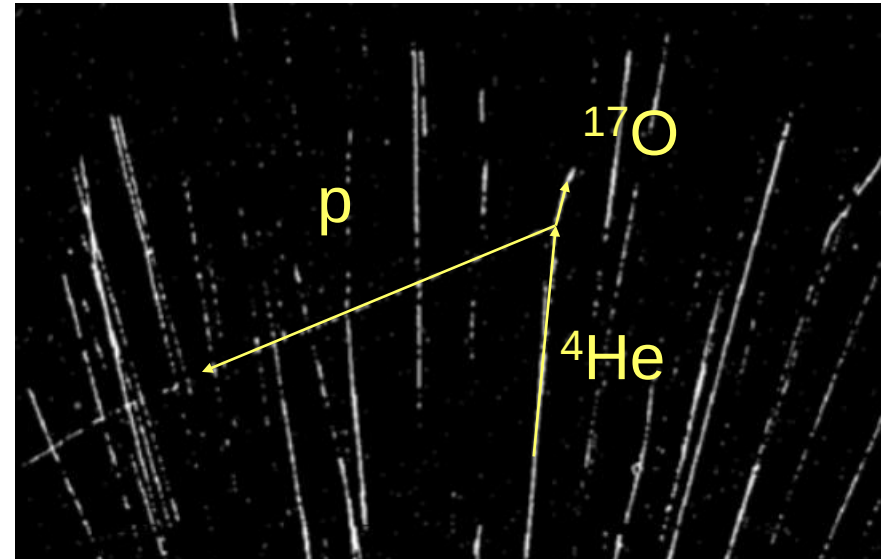


Rutherford appelle H^+ proton

1924 P. Blackett visualise la transmutation



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

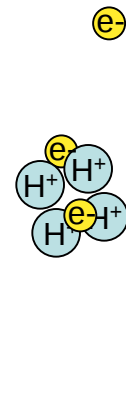


Structure du noyau (1920)

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...