

# 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)

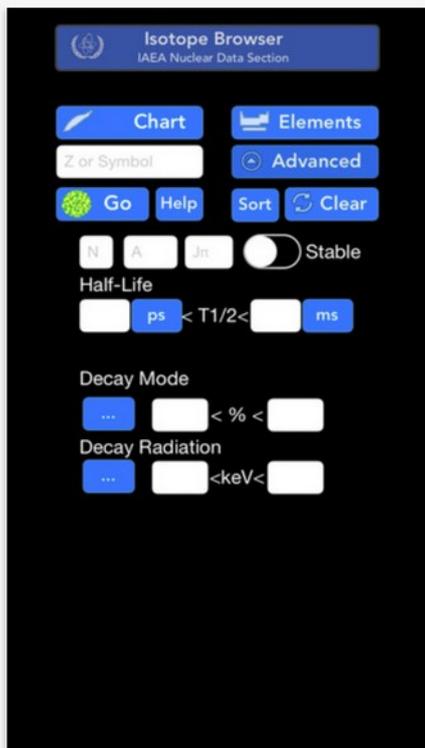
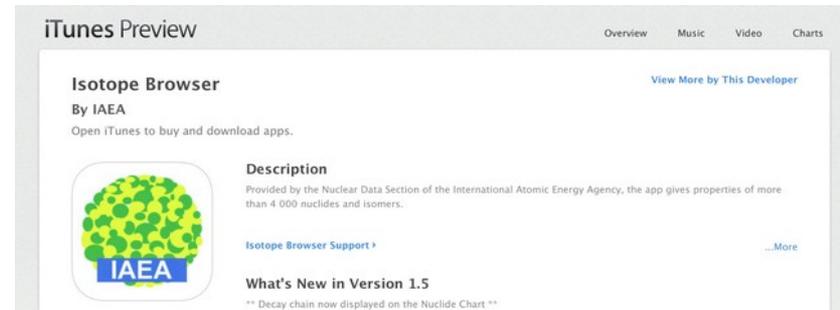
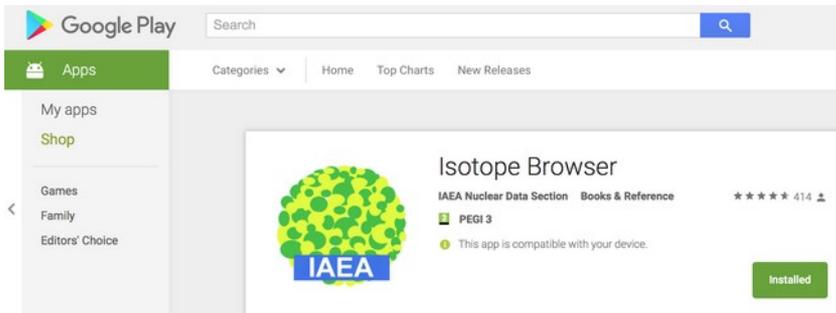
<http://www.nndc.bnl.gov>

The screenshot shows the National Nuclear Data Center (NNDC) website. At the top, there is a navigation bar with the NNDC logo, the text "National Nuclear Data Center", the Brookhaven National Laboratory logo, and a "Site Index" search box. Below the navigation bar, there is a large graphic of a Chart of Nuclides with various data sources and tools labeled around it, including NSR, XUNDL, ENSDF, NuDat, Databases, MIRD, Sigma, CSISRS, ENDF, Chart of Nuclides, Empire, Atlas of n Resonances, Nuclear Wallet Cards, Tools and Publications, Nuclear Data Sheets, Networks, CSEWG, and USNDP. To the right of the Chart of Nuclides graphic, there is a section for "ND2013 Proceedings" featuring a cover image of "Nuclear Data Sheets" and text indicating that the first volume (118) is available, along with links for "EXFOR 20,000 Milestone" and "Atomic Mass Evaluations Available". At the bottom of the page, there is a main navigation menu with tabs for "Main", "Structure & Decay", "Reactions", "Bibliography", "Networks & Links", "Publications", and "Meetings". Below the "Main" tab, there is a grid of links to various data sources and tools, including AMDC, Covariances, ENDF, NMMSS & DoE NMIRDC, NucRates, XUNDL, Atlas of Neutron Resonances, CSEWG, ENSDF, NSR, NuDat, CapGam, CSISRS alias EXFOR, IRDF, Nuclear Data Sheets, USNDP, Chart of Nuclides, Empire, MIRD, Nuclear Wallet Cards, and USNDP/CSEWG GForge.

**Main** | Structure & Decay | Reactions | Bibliography | Networks & Links | Publications | Meetings

<b>AMDC</b> Atomic Mass Data Center, <a href="#">Q-value Calculator</a>	<b>Atlas of Neutron Resonances</b> Parameters & thermal values	<b>CapGam</b> Thermal Neutron Capture $\gamma$ -rays	<b>Chart of Nuclides</b> Basic properties of atomic nuclei
<b>Covariances</b> of Neutron Reactions	<b>CSEWG</b> Cross Section Evaluation Working Group	<b>CSISRS alias EXFOR</b> Nuclear reaction experimental data	<b>Empire</b> Nuclear reaction model code system, <i>Reference paper</i>
<b>ENDF</b> Evaluated Nuclear (reaction) Data File, <a href="#">Sigma</a>	<b>ENSDF</b> Evaluated Nuclear Structure Data File	<b>IRDF</b> International Reactor Dosimetry File	<b>MIRD</b> Medical Internal Radiation Dose
<b>NMMSS &amp; DoE NMIRDC</b> Safeguards & inventory decay data standards	<b>NSR</b> Nuclear Science References	<b>Nuclear Data Sheets</b> Nuclear structure & decay data journal, <i>Special Issues on reaction data</i>	<b>Nuclear Wallet Cards</b> Ground & isomeric states properties, <i>Homeland Security version</i>
<b>NucRates</b> MACS & Astro-physical reaction rates	<b>NuDat</b> Nuclear structure & decay Data	<b>USNDP</b> U.S. Nuclear Data Program	<b>USNDP/CSEWG GForge</b> Collaboration Server
<b>XUNDL</b> Experimental Un-evaluated Nuclear Data List			

# Quelques Bonnes Applications



Element	Half-life	Spin	Decay Mode
<sup>99</sup> Xe <sub>55</sub>	13 (2) ms	(7/2+)	α 100%
<sup>100</sup> Xe <sub>54</sub>	93 (3) ms	0+	α 64 35%
<sup>111</sup> Xe <sub>57</sub>	0.74 (20) s		α 8 +8-5%
<sup>112</sup> Xe <sub>58</sub>	2.7 (8) s		α 0.0080%
<sup>114</sup> Xe <sub>59</sub>	2.74 (8) s	(5/2+)	α = 0.011%
<sup>114</sup> Xe <sub>60</sub>	10.0 (4) s	0+	ec β+ 100%
<sup>115</sup> Xe <sub>61</sub>	18 (4) s	(5/2+)	α 0.0003 1%
<sup>116</sup> Xe <sub>62</sub>	59 (2) s	0+	ec β+ 100%
<sup>117</sup> Xe <sub>63</sub>	61 (2) s	5/2(+)	ec β+ 100%
<sup>118</sup> Xe <sub>64</sub>	3.8 (9) min	0+	ec β+ 100%
<sup>119</sup> Xe <sub>65</sub>	5.8 (3) min	(5/2+)	ec β+ 100%
<sup>120</sup> Xe <sub>66</sub>	40 (1) min	0+	ec β+ 100%
<sup>121</sup> Xe <sub>67</sub>	40.1 (20) min	5/2(+)	ec β+ 100%

**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 main content area is titled "The Nobel Prize in Physics 1922" and "Niels Bohr". It features a portrait of Niels Bohr and a list of facts:

- Name:** 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 left sidebar contains navigation links for "Nobel Prizes and Laureates", "Physics Prizes", and "About the Nobel Prize in Physics 1922". The right sidebar features promotional banners for "The Age to Come", "2014 Nobel Prize Announcements", and "2013 Nobel Laureates".

☞ 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

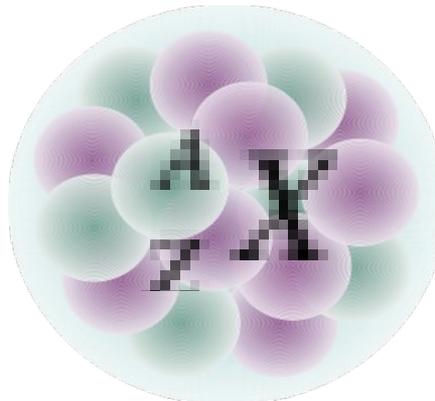
Z protons, N neutrons

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

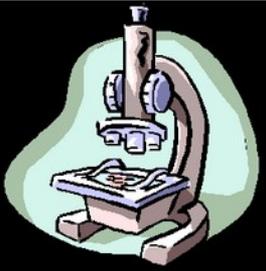
# Un système complexe

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

=

Enjeu de la physique nucléaire

Résolution

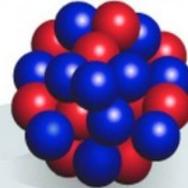


140  
masse du pion



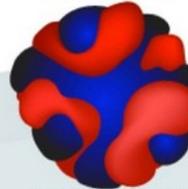
baryons, mesons

8  
énergie de séparation  
d'1 proton dans le Plomb



protons, neutrons

1.32  
énergie de vibration  
dans l'étain

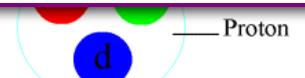


nucleonic densities  
and currents

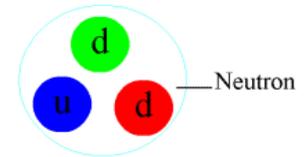
0.043  
énergie de rotation  
dans l'Uranium



collective coordinates



Proton



Neutron

Physique des Noyaux

# La Charte des Noyaux

3360 nucléides (juin 2024)

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

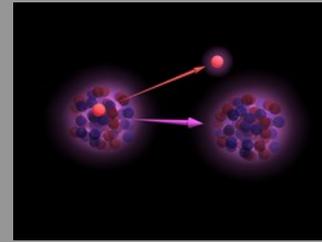
Isotope: même Z (même élément chimique), N différent

Isotone: même N, Z différent

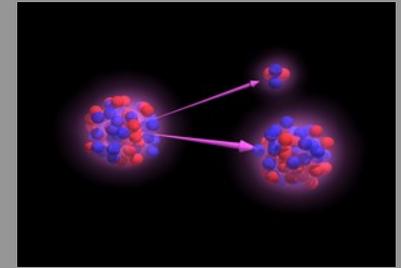
Isobar: même A, Z&N différents

## radioactivité proton

noyau g proton + (noyau - 1 proton)

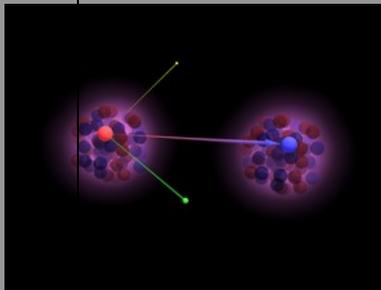


## alpha émission d<sup>4</sup>He

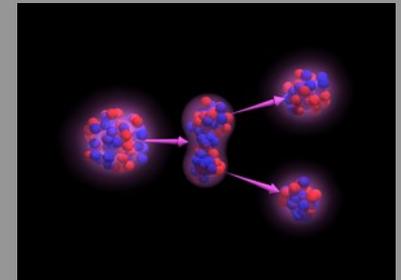


## beta +

proton g neutron  
+ e<sup>+</sup> + ν<sub>e</sub>

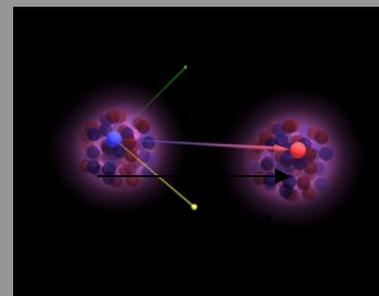


## fission cassure du noyau

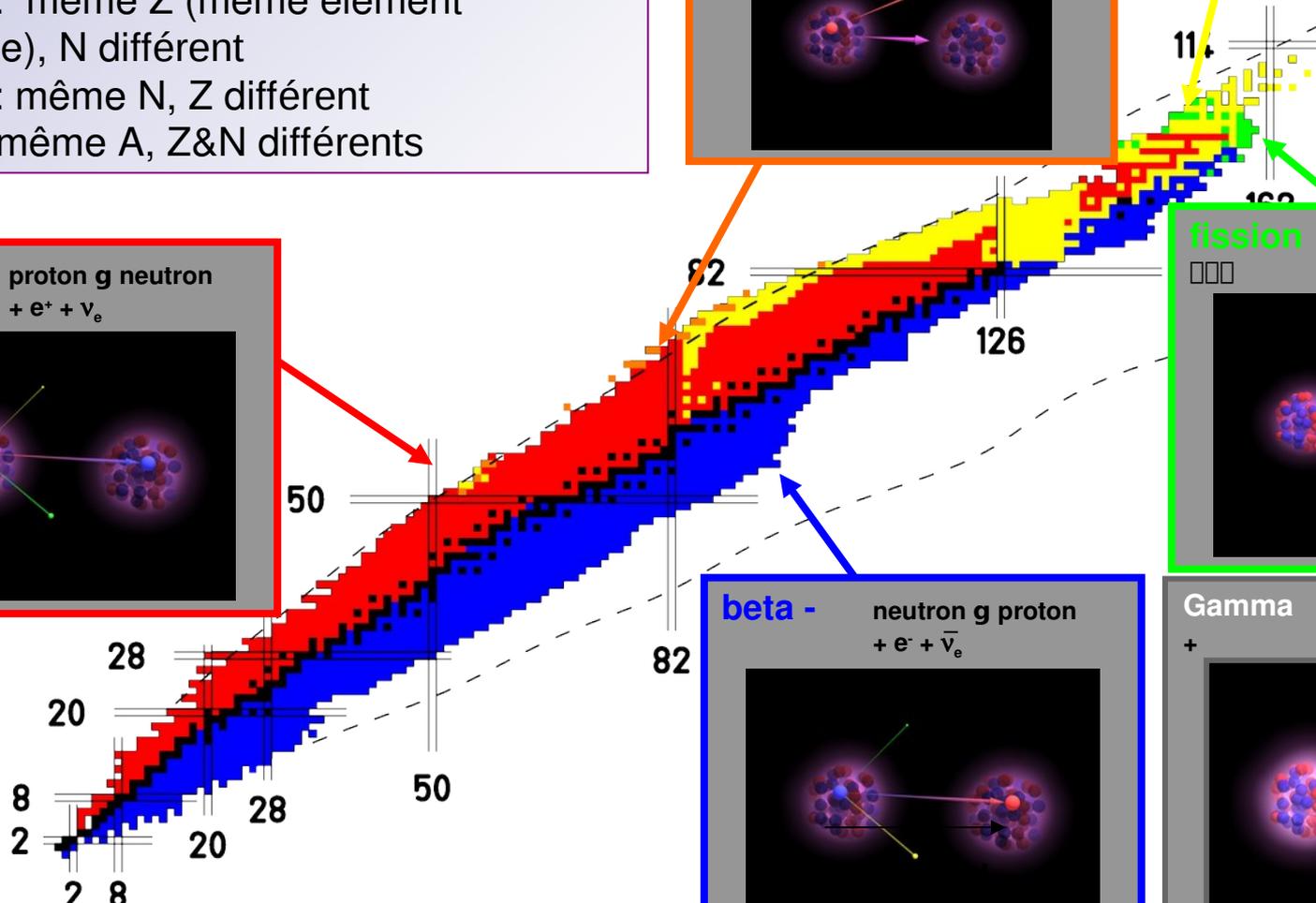
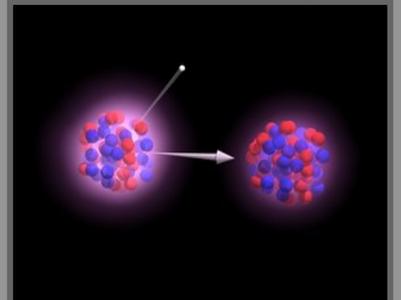


## beta -

neutron g proton  
+ e<sup>-</sup> + ν̄<sub>e</sub>



## Gamma relaxation nucléaire + photon γ

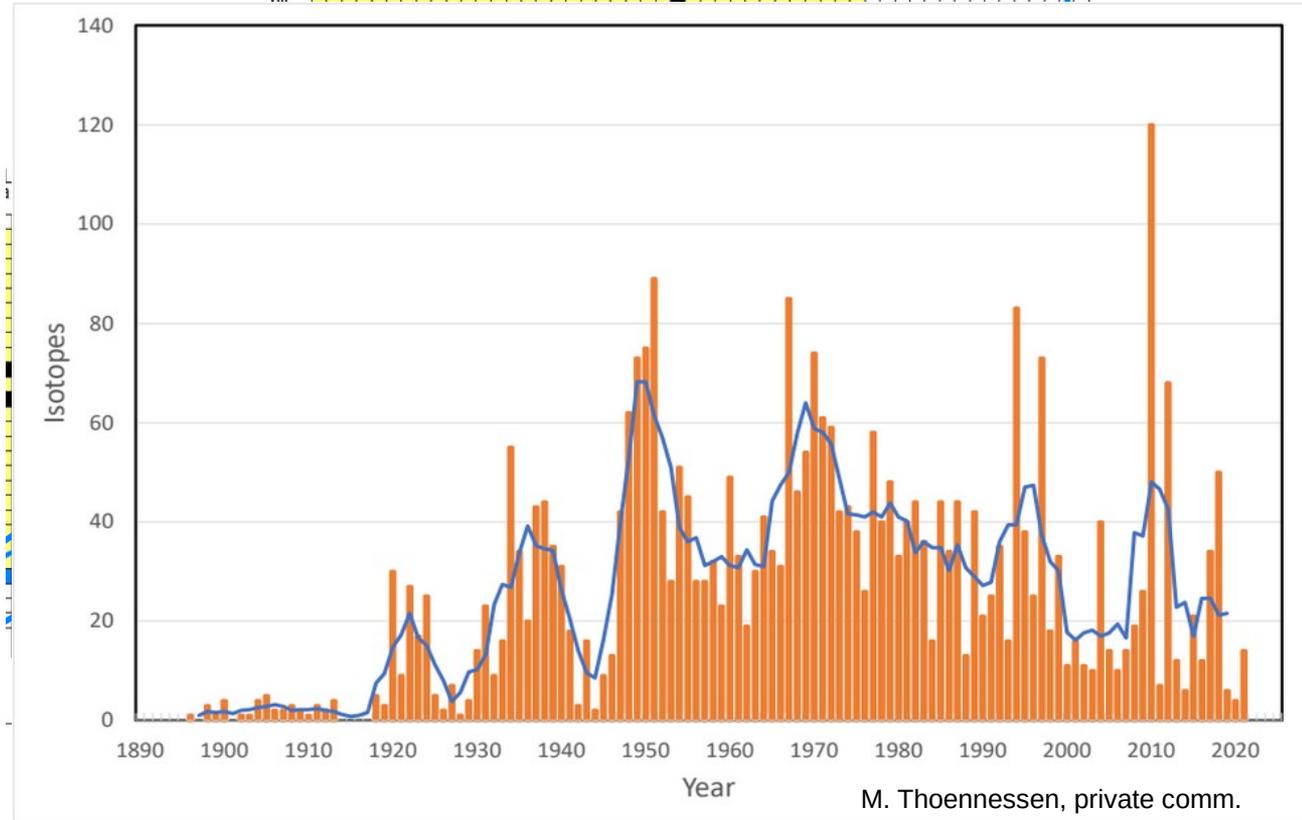
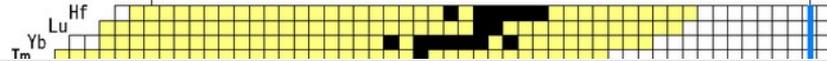


prédiction: ~7000 nucléides liés

# Découverte de Nouveaux Isotopes

Rank	Country	Isotopes
1	USA	1336
2	Germany	566
3	UK	299
4	Russia	251
5	Japan	238
6	France	217
7	Switzerland	122
8	Canada	67
9	Sweden	59
10	Finland	46
11	China	37
12	Netherlands	36
13	Belgium	17
14	Denmark	13
	Argentina	13
16	Italy	11
17	Israel	6
18	Austria	5
19	India	2
	Norway	2
	Australia	2
	New Zealand	1
	Brazil	1
24	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://frib.msu.edu/public/nuclides> x isotopes

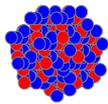
2011 ( $^{124}\text{Xe}$ ): 4 nouveaux isotopes

2014-2022 ( $^{238}\text{U}$ ): 91 nouveaux isotopes

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

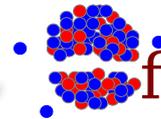
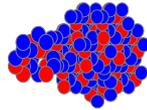
# Synthèse de Nouveaux Éléments

Ion lourd  
accélééré



Atome  
d'actinide

fusion



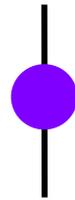
fission



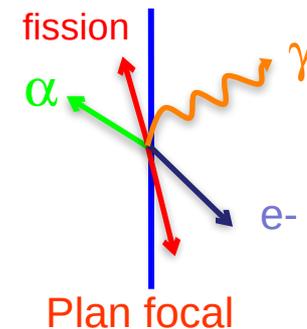
fusion-  
évaporation

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

Faisceau intense  
d'ions lourds



Cible  
rotative



# Eléments Super Lourds

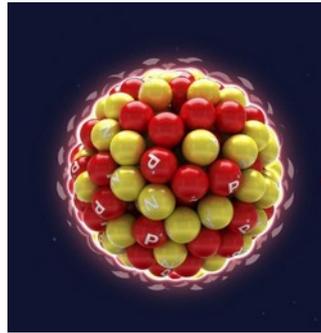
28/11/2016: IUPAC approuve les noms des 4 nouveaux éléments!

30/12/2015: IUPAC annonce que la 7<sup>ème</sup> période du tableau périodique est complète!

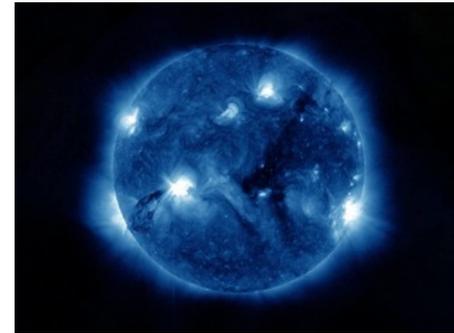
# Découverte de nouveaux états de la matière nucléaire



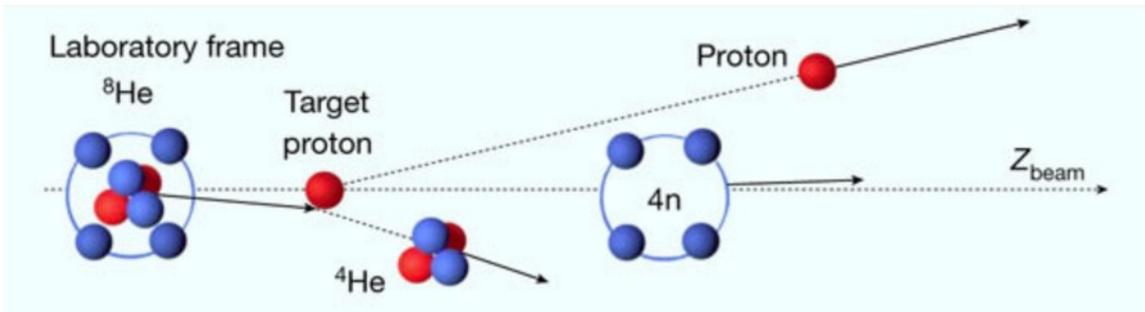
n instable



n stable/instable

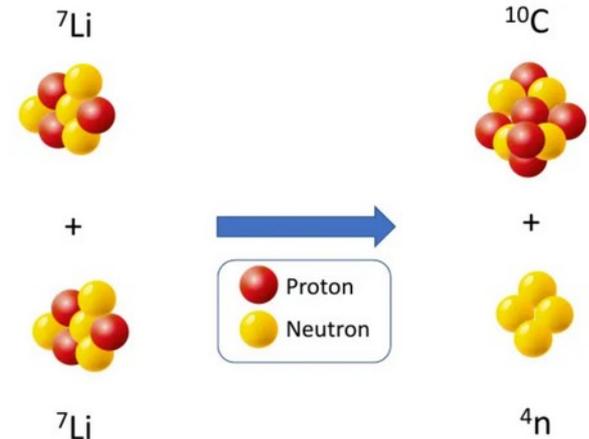


n stable



Observation d'un système à 4 neutrons corrélés,  
 $T_{1/2} = (3.8 \pm 0.8) \times 10^{-22}$  s

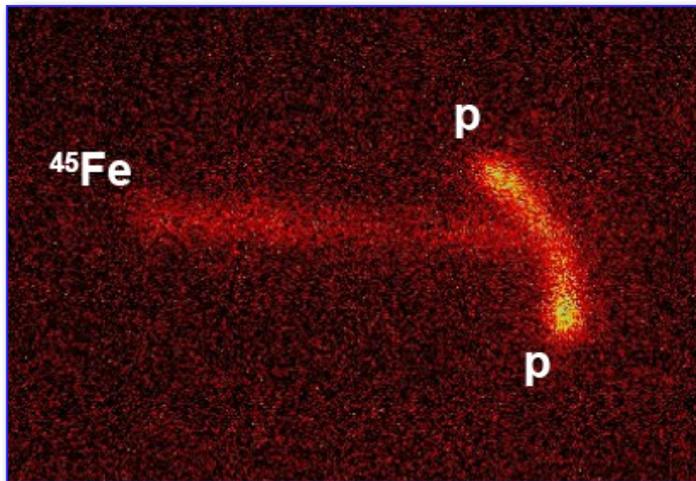
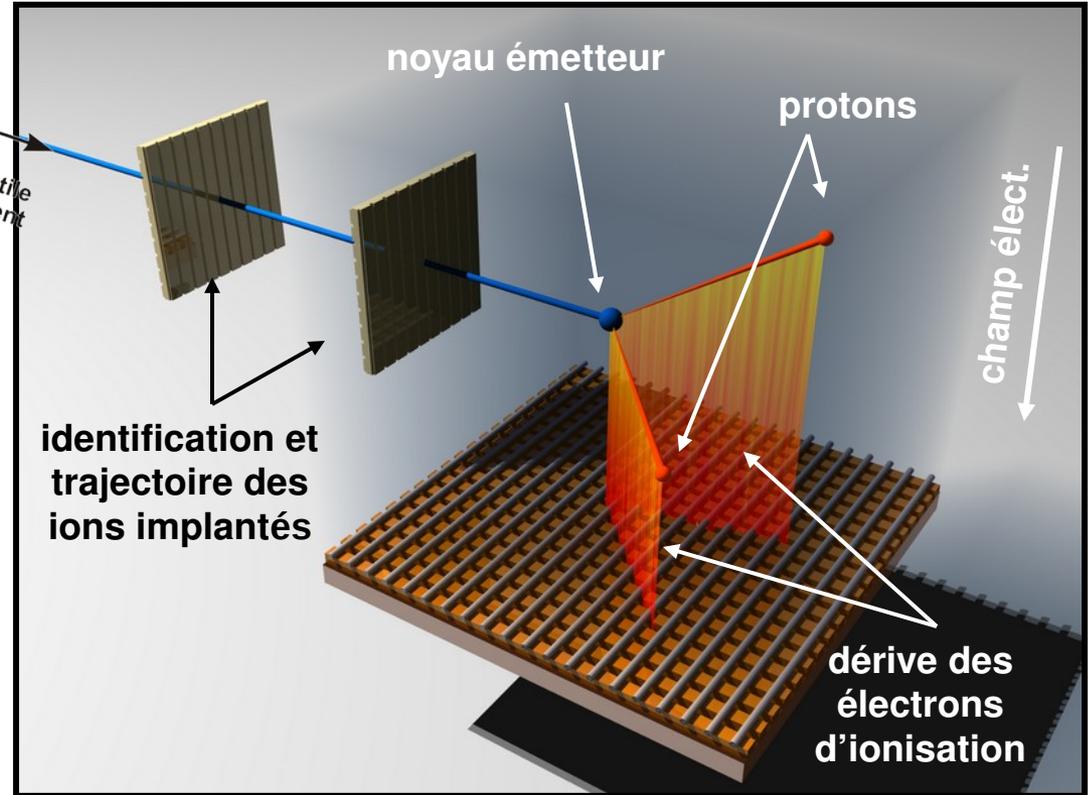
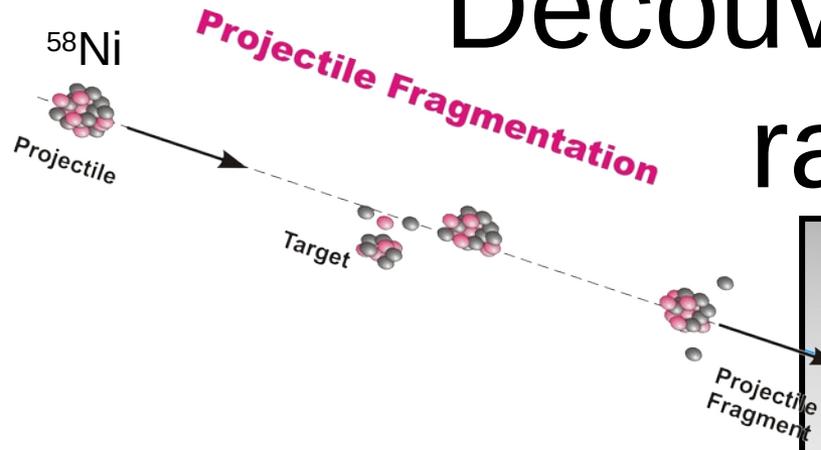
M. Duer et al., Nature 606, 678 (2022)



Observation d'un système lié à 4 neutrons,  $T_{1/2} \sim T_{1/2}(n)$

T. Faestermann et al., Phys. Lett. B 824,136799 (2022)

# 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)

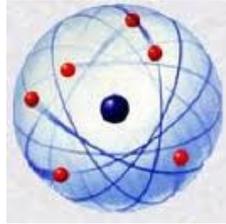
4 autres cas observés depuis:  $^{54}\text{Zn}$ ,  $^{48}\text{Ni}$ ,  $^{19}\text{Mg}$ ,  $^{67}\text{Kr}$

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

# Il y a 113 ans.....

*“ The scattering of  $\alpha$  particles by matter and the structure of the atom ”*

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

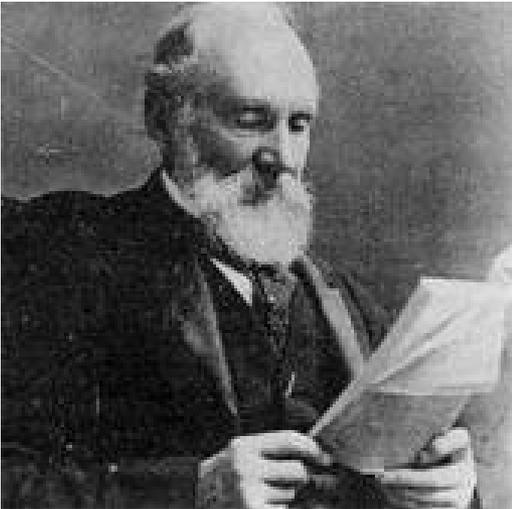


Le prix Nobel de Chimie 1911 est attribué à Marie Curie

*“ 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 ”*



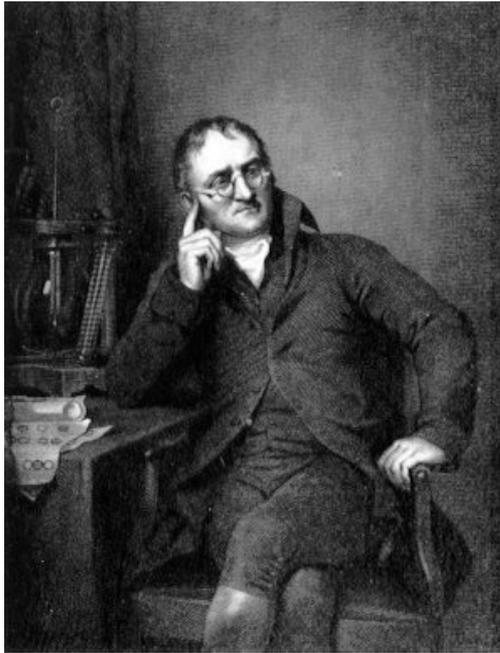
# A l'aube du 20<sup>ème</sup> siècle



“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  $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$  = indivisible)

- Les atomes d'un même élément  
sont identiques

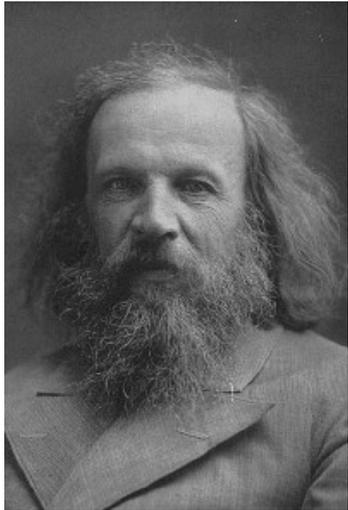


- Les atomes d'un élément peuvent se combiner à  
ceux d'un autre pour former un composé  
chimique

- Les atomes d'éléments différents ont des  
masses différentes

# Classification des éléments

**Périodicité** des propriétés chimiques des éléments



Dmitri Ivanovich  
Mendeleev

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

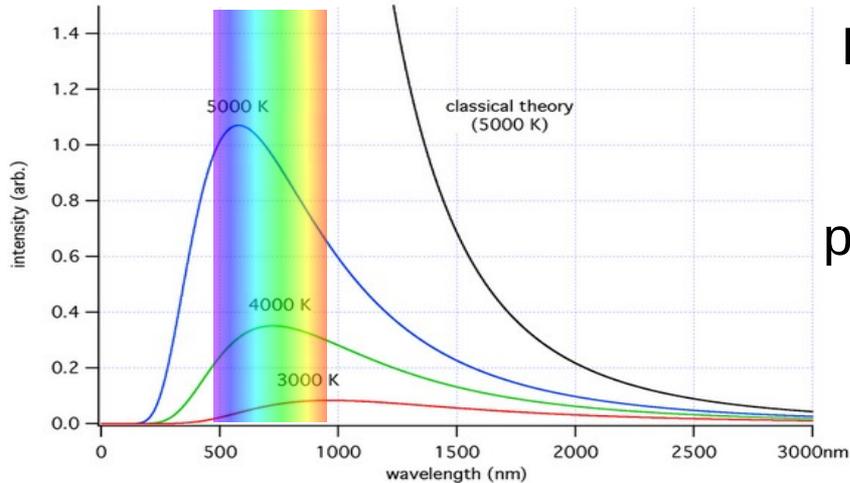
ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

			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	Rn = 104,4	Ir = 198.
			Ni = Co = 59	Pl = 106,6	Os = 199.
H = 1			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200.
	Be = 9,1	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112	
	B = 11	Al = 27,9	Ga? = 68	Ur = 116	Lu = 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)

# Des nuages dans le ciel...

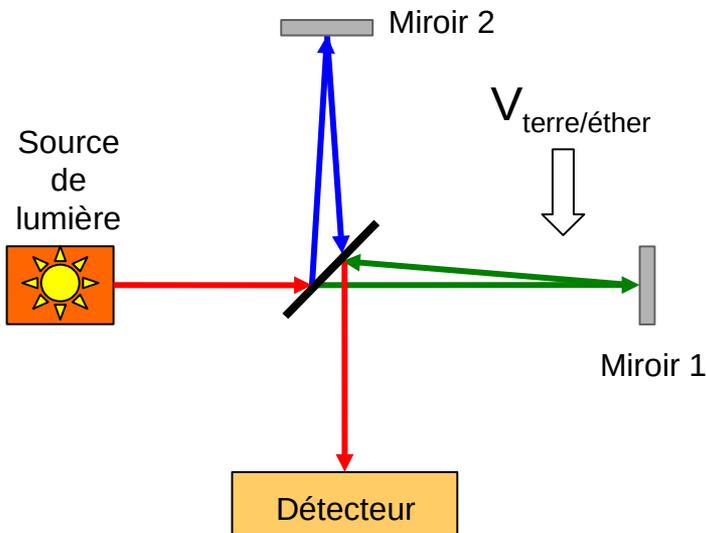
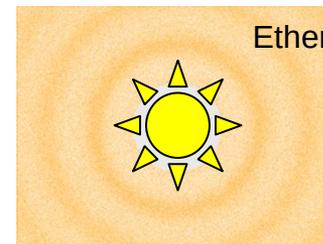
Catastrophe ultraviolette



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



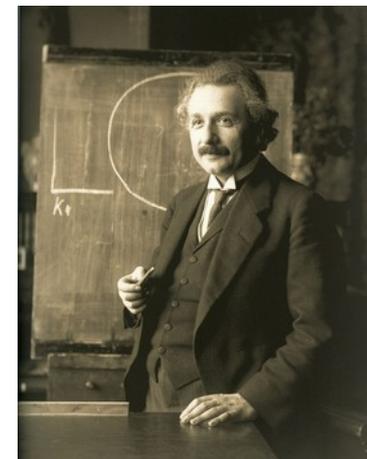
Max Planck



Expérience de Michelson Morley

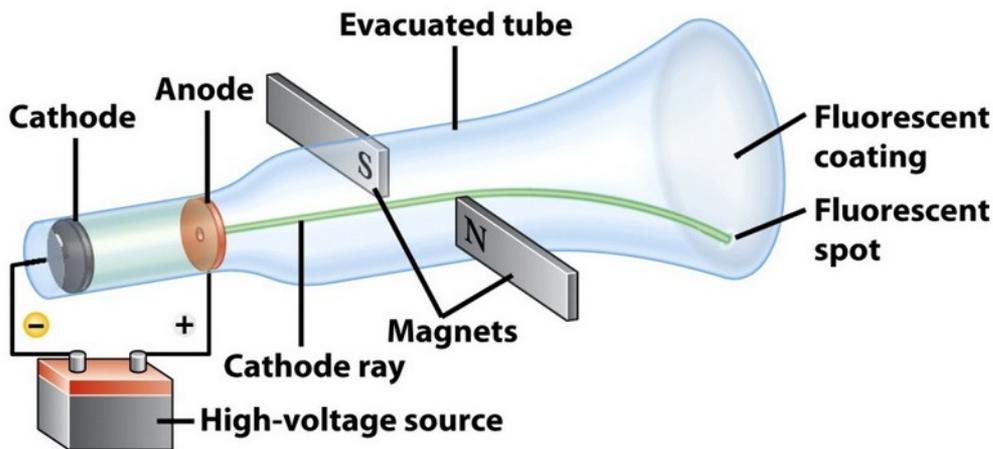
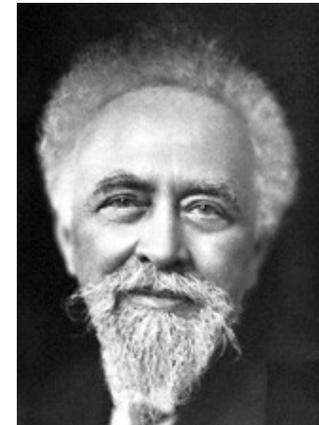
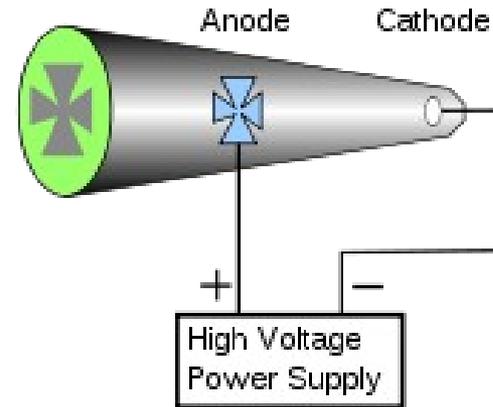
**Relativité** restreinte :  
Les lois de la physique sont les mêmes dans tout référentiel inertiel et la vitesse de la lumière est une constante

$$E=mc^2$$



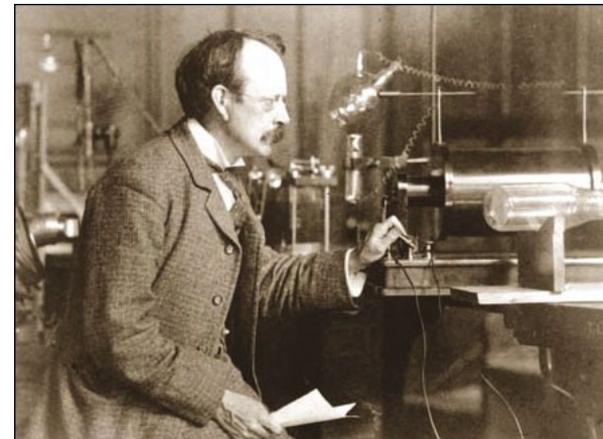
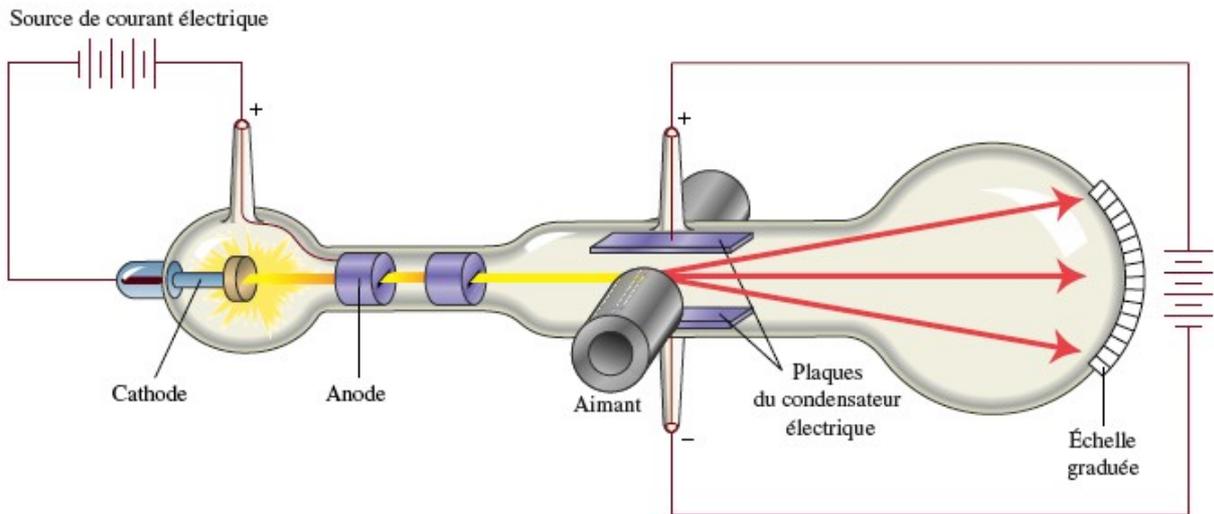
Albert Einstein

# La révolution du tube cathodique



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

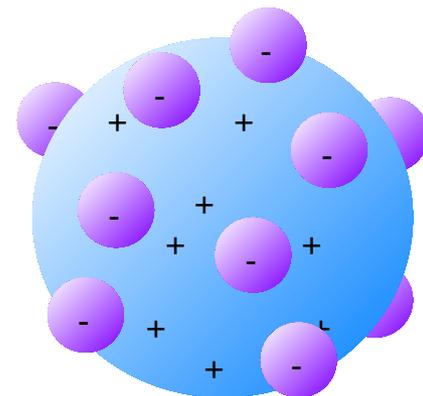
# Les corpuscules



*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'*

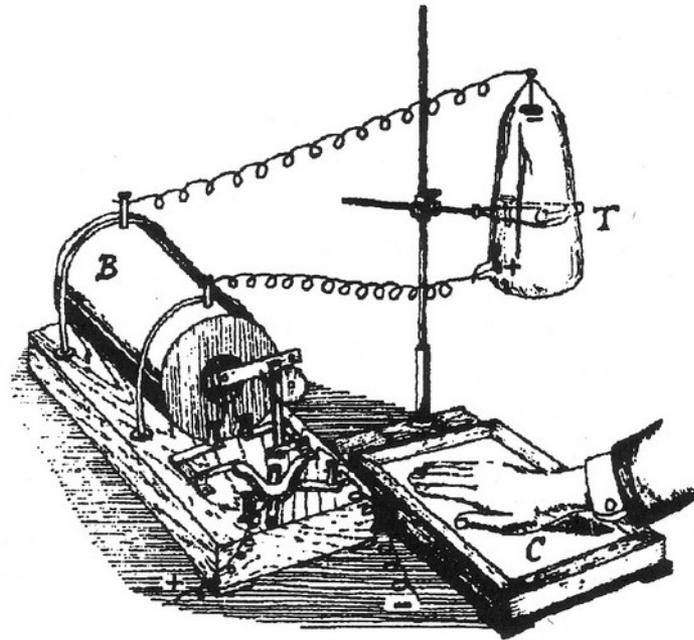
# Des rayons cathodiques aux rayons X

1895 W. Röntgen

découverte des rayons X



*Wilhelm Röntgen*



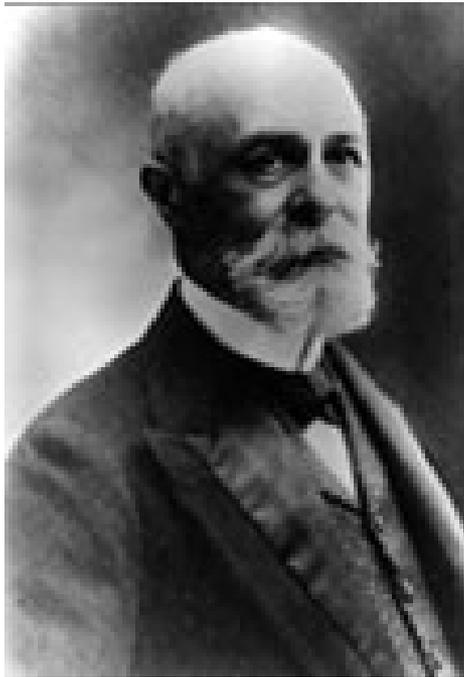
W. Röntgen reçoit le 1<sup>er</sup> prix Nobel de Physique en 1901



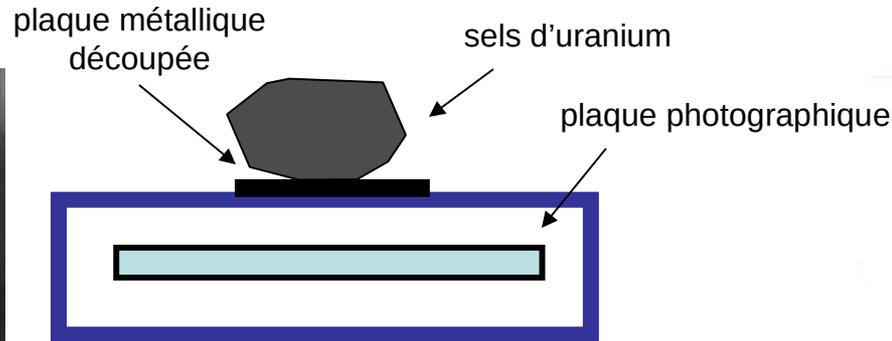
# Des rayons X aux rayons uraniques

1896 H. Becquerel

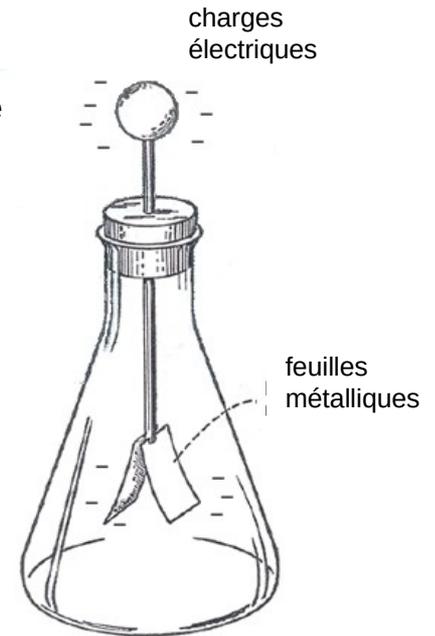
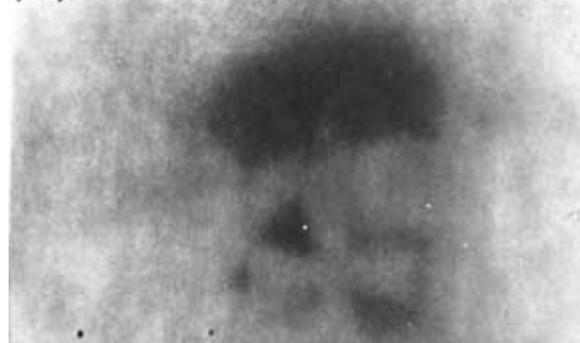
découverte d'un nouveau rayonnement émis par l'Uranium



*Henri Becquerel*



40 - 1700 - 96. Sulfate double d'uranyle et de Potasse sur  
Papier noir. Couvré de la même manière.  
Exposé au soleil le 27. et dans le noir depuis le 28. -  
Ninety six 170000.



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*



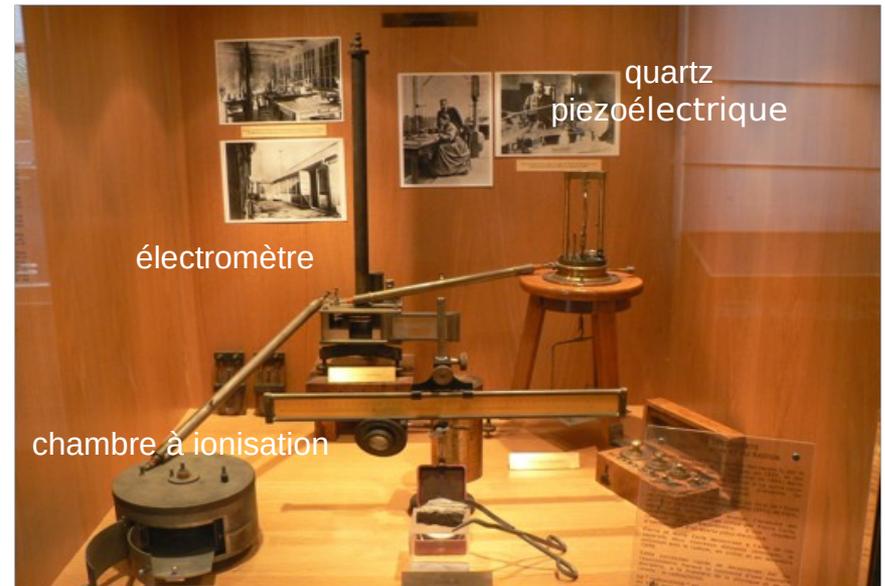
*Pierre Curie*

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

M. Curie appelle le rayonnement:  
**'radioactivité'**



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



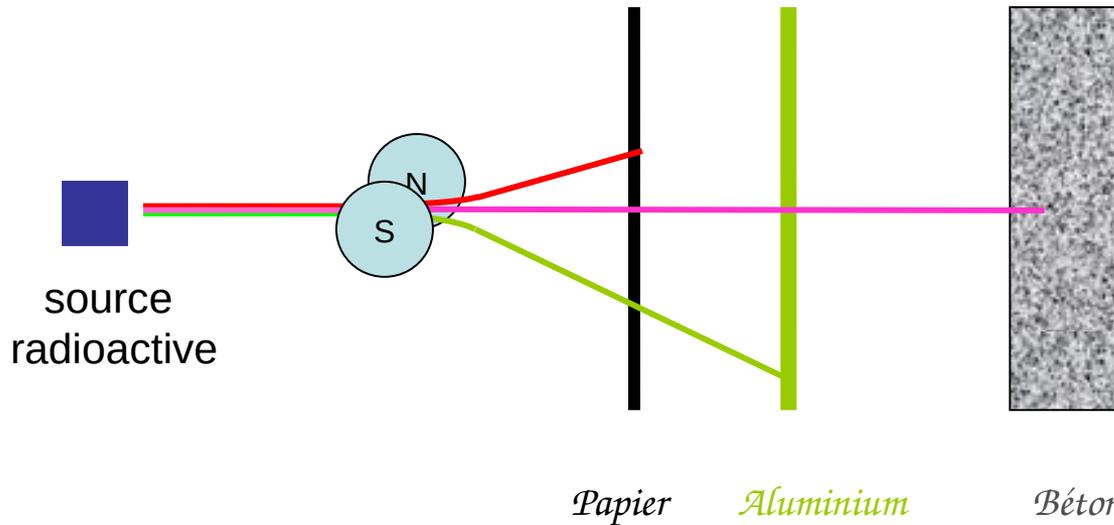
# La radioactivité est multiple

1898 E. Rutherford

rayonnement alpha, beta

1900 P. Villard

rayonnement gamma



*Ernest Rutherford*



*Paul Villard*

= ion d'hélium  $\text{He}^{2+}$

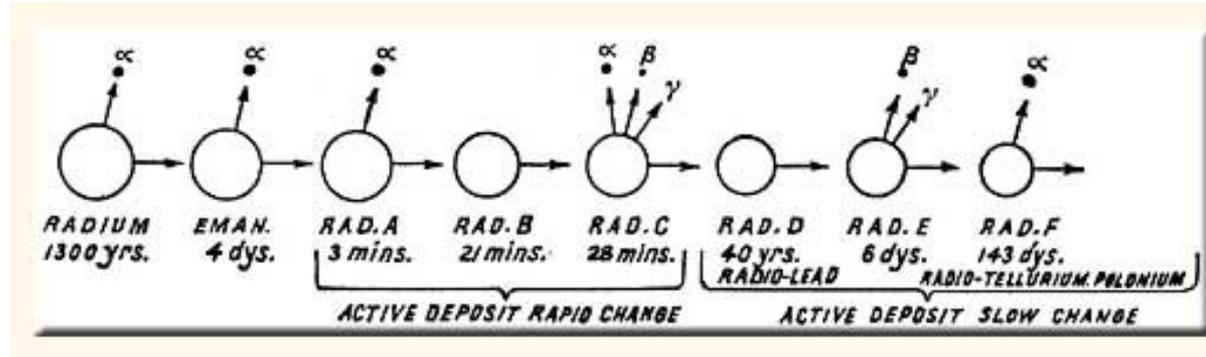
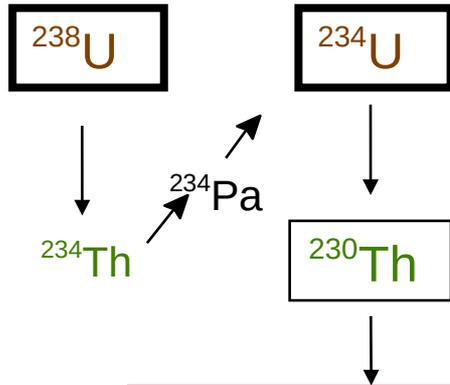
$\beta$  =  $e^-$  de grande énergie

= photons - comme les X

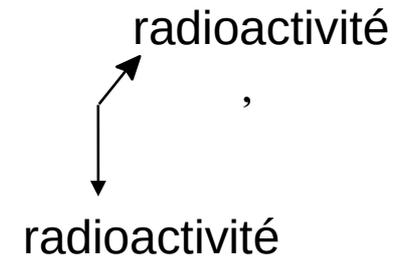
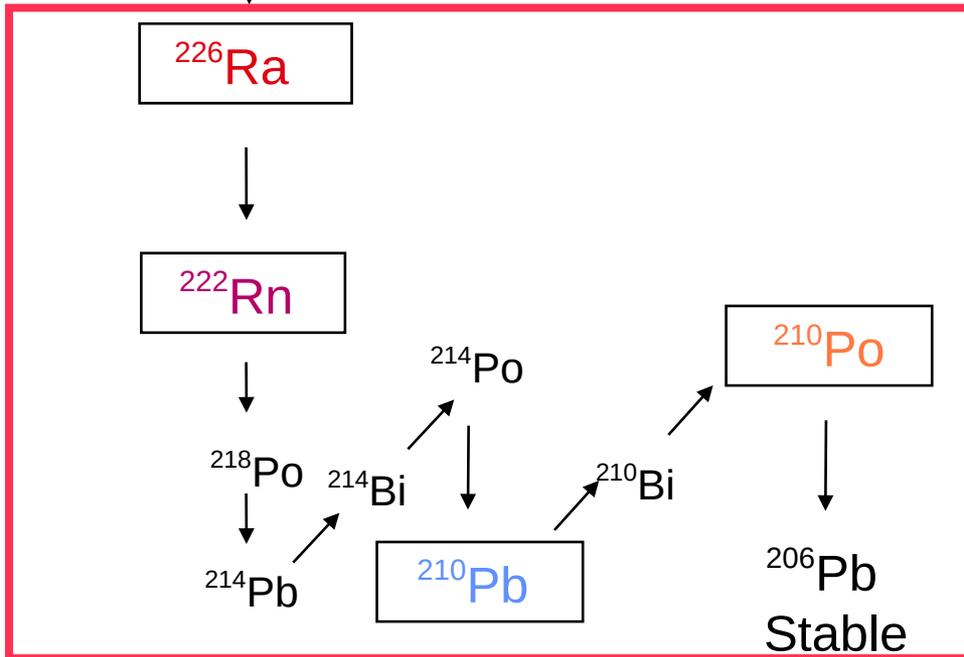
# Les atomes se transforment !

1902 E. Rutherford & F. Soddy

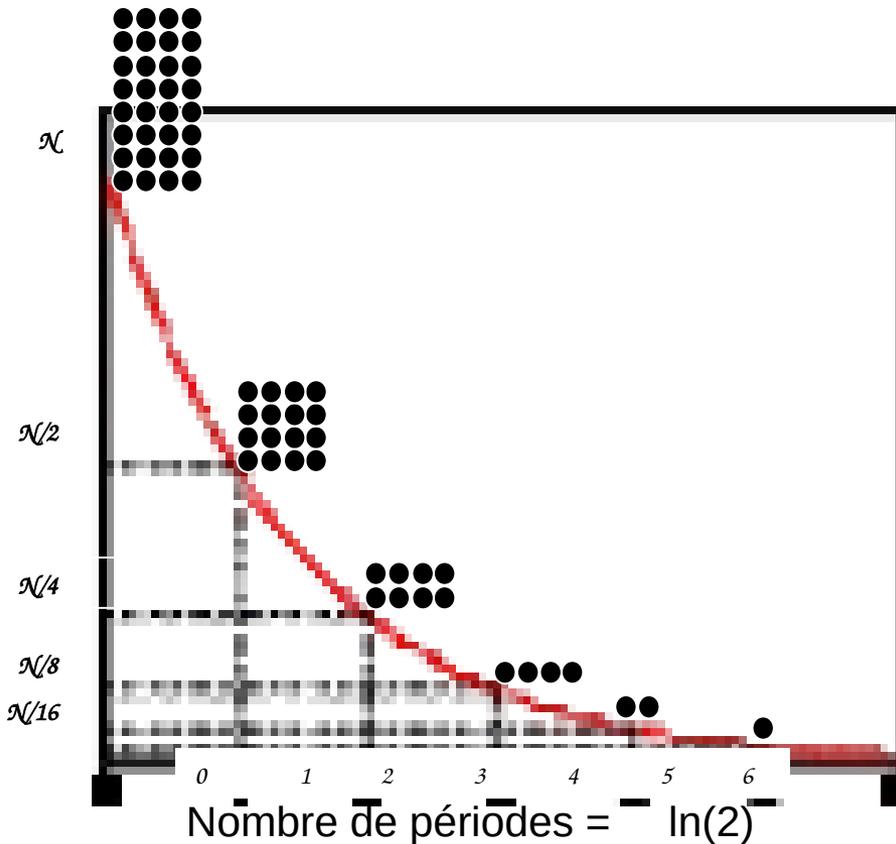
transmutation des atomes



*Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1905*



# Décroissance radioactive



Nombre de  
noyaux  
au temps t

Nombre initial  
de noyaux

Constante de  
décroissance

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

$$\text{Activité} = \lambda N(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$$

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

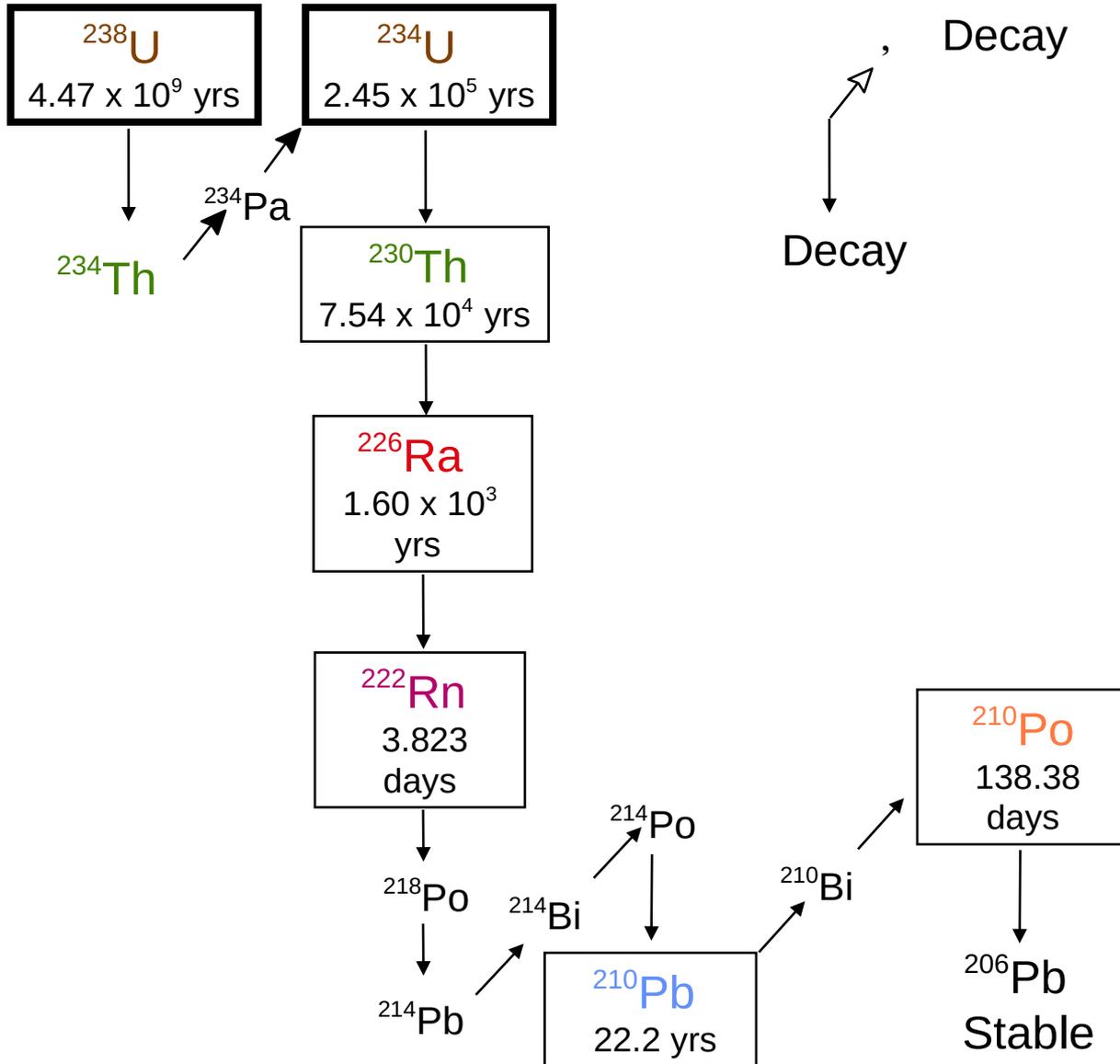
**1910:**

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:  
~4.5  $10^9$  années

Demi-vie:  
 $^{232}\text{Th}$ :  $1.40 \cdot 10^{10}$  a

$^{235}\text{U}$ :  $7.04 \cdot 10^8$  a

$^{238}\text{U}$ :  $4.47 \cdot 10^9$  a

$^{40}\text{K}$ :  $1.2 \cdot 10^9$  a

# Radioactivité tellurique

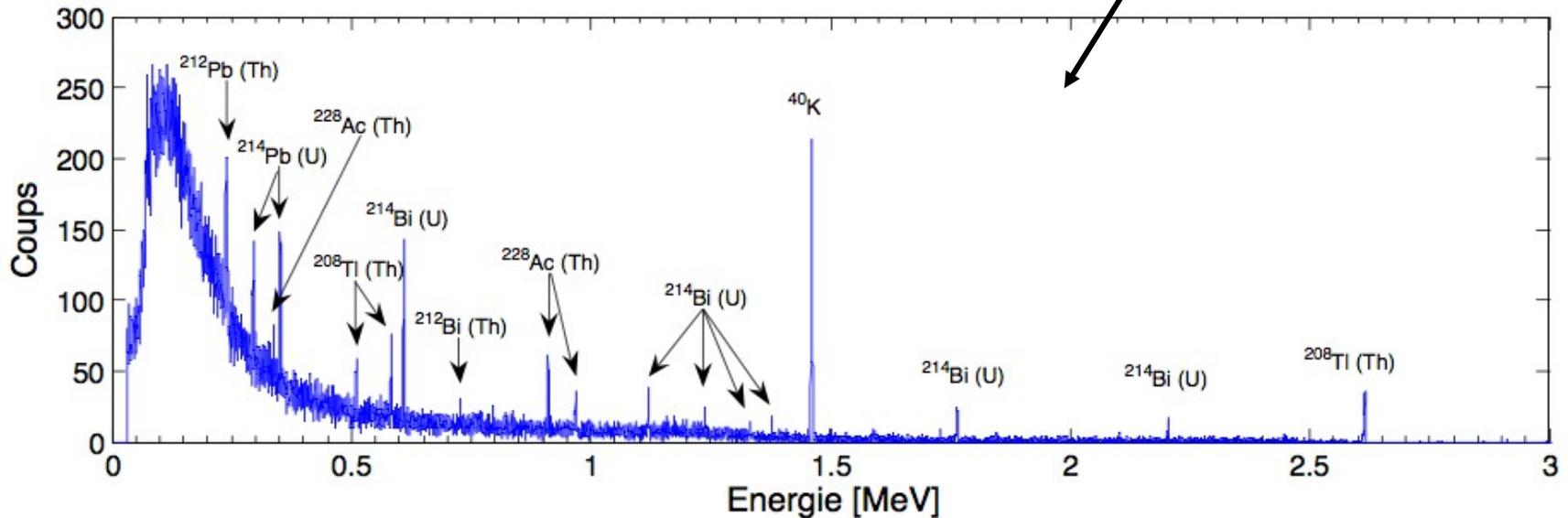
radioactivité  
des murs/sols



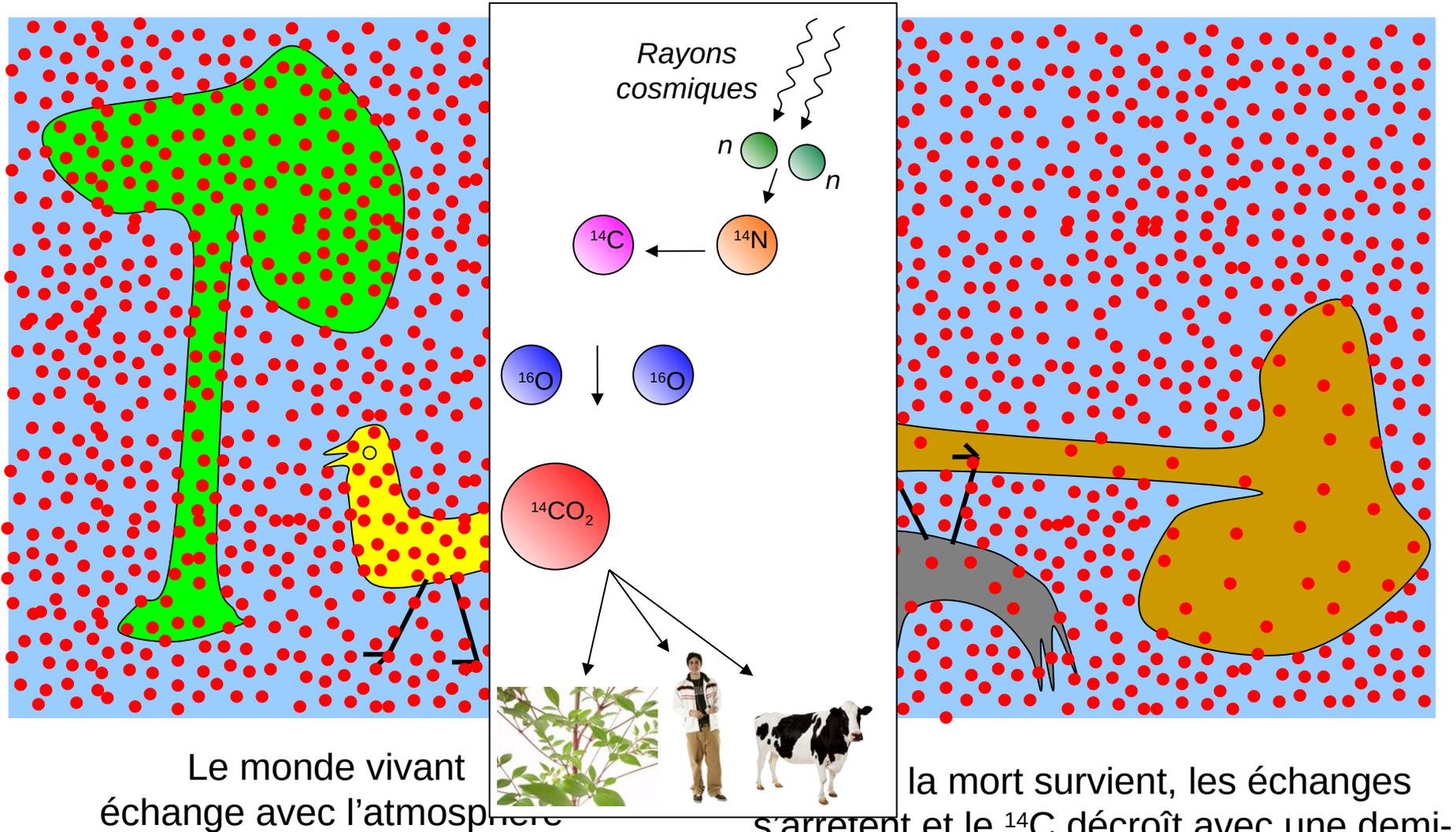
photon



détecteur Ge



# Radioactivité cosmogénique



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

R diminue

# 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



# 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 minéraux 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:  $44.2 \pm 1.0$  TW**  
**Contribution due au noyaux radioactifs**  
**d' $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$ : ~50%**

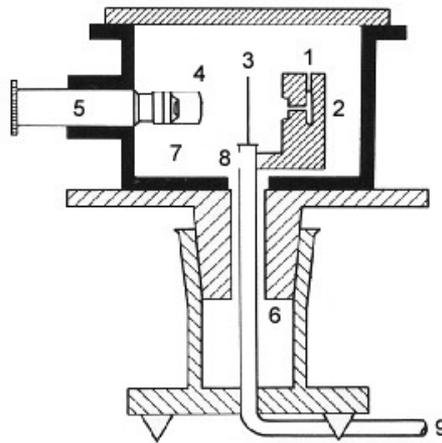
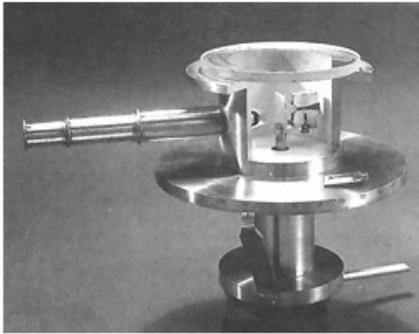
Nature Geoscience 4 (2011) 647



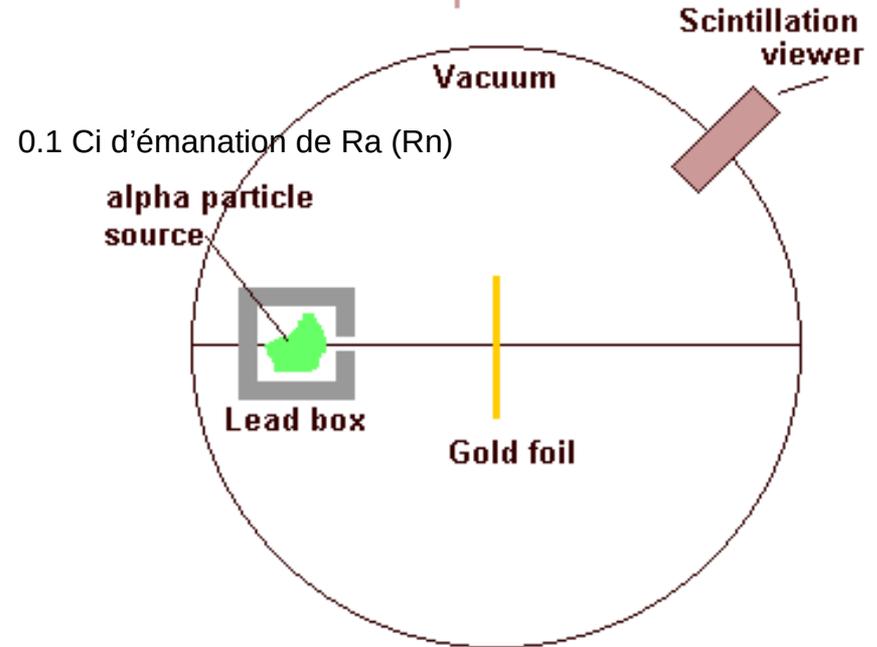
La découverte de la radioactivité a bouleversé la science et la société de façon générale et durable.

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

# La diffusion de particules alpha



## The Rutherford Experiment



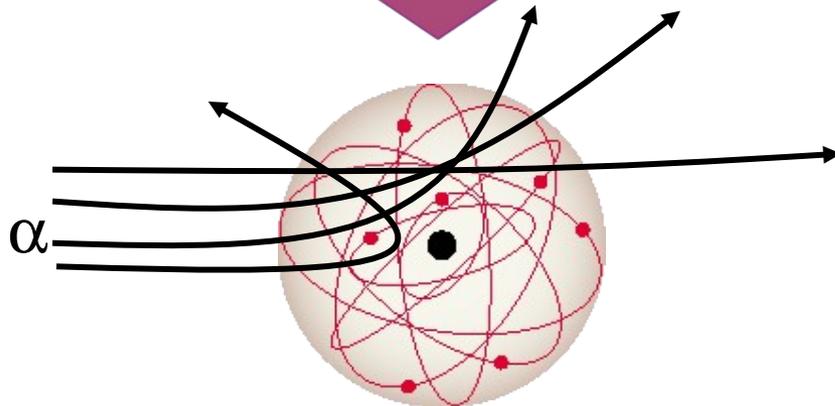
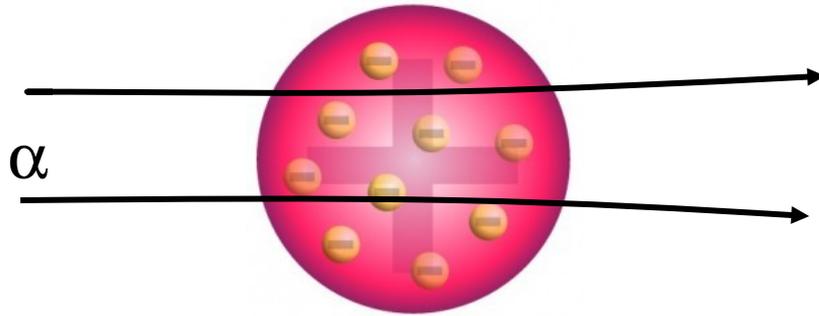
Expérience réalisée par H. Geiger et E. Marsden  
(1909, Université de Manchester)

©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

