

# Voyage au coeur de la matière

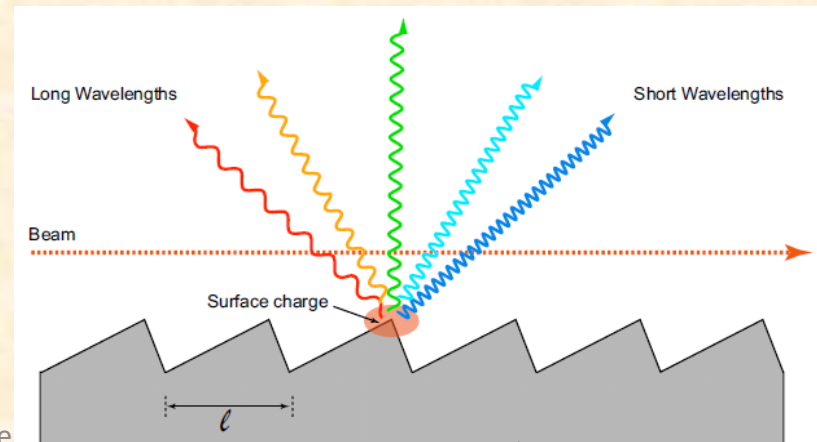
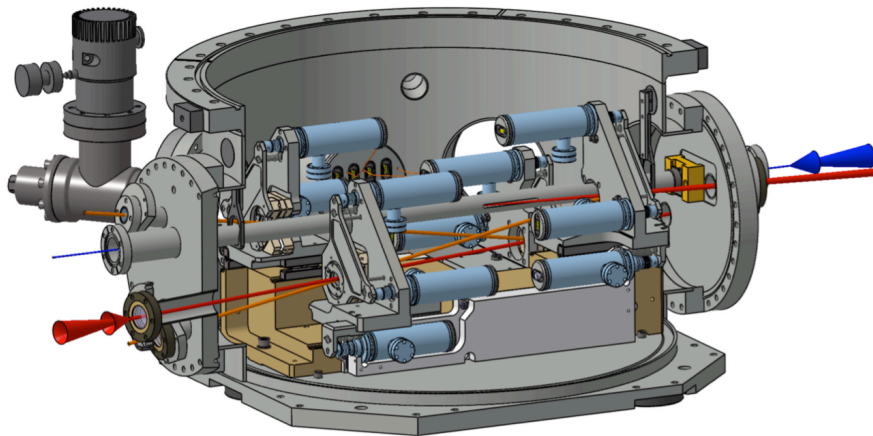
Nicolas Delerue

LAL (CNRS and Université de Paris-Sud)

<http://nicolas.delerue.org>

# Présentation personnelle

- Chercheur au CNRS, au laboratoire de l'accélérateur linéaire (LAL) à Orsay.
- Spécialisé en Physique des particules et physique des accélérateurs de particules.
- Mes recherches portent sur les interactions entre lumière et électrons.



# QUELQUES GRANDES DÉCOUVERTES AU TOURNANT DU XXÈME SIÈCLE

Panorama scientifique à la fin du XIXème siècle

La table périodique des éléments

Les électrons et les rayons X

La radioactivité

L'expérience de Rutherford

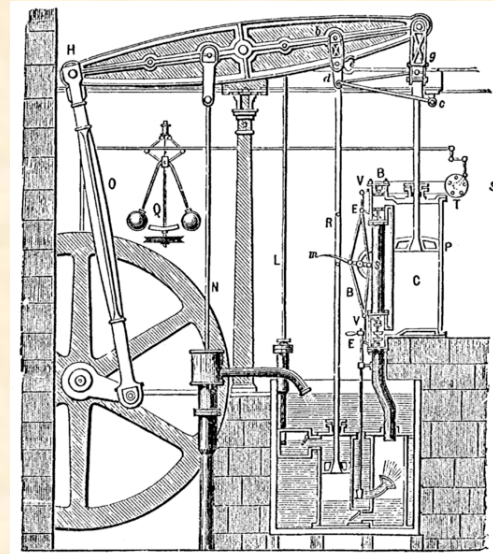
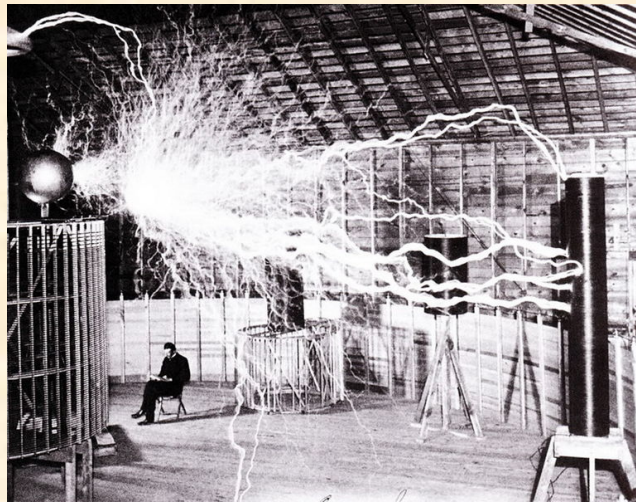
L'atome de Bohr

# La fin du XIXème siècle: une science qui explique tout?

- Les scientifiques de la fin du XIXème siècle avaient le sentiment qu'ils comprenaient tous les mécanismes régissant notre monde!
- Les livres de Jules Verne nous montrent une confiance sans limite en la science de cette époque.



Source: <http://sciencelay.com/>



# La fin du XIXème siècle: une science qui explique (presque) tout?

- Malgré les progrès fulgurants de la science au XIXème siècle, il restait des zones d'ombre.
- De nombreux savants de l'époque pensaient qu'il suffirait de quelques calculs supplémentaires pour les clarifier...
- Ils ne s'attendaient pas aux révolutions qui allaient suivre!

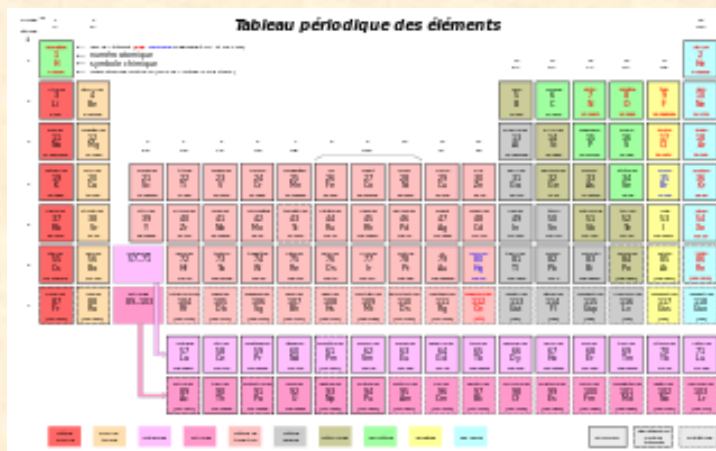


Tableau périodique des éléments

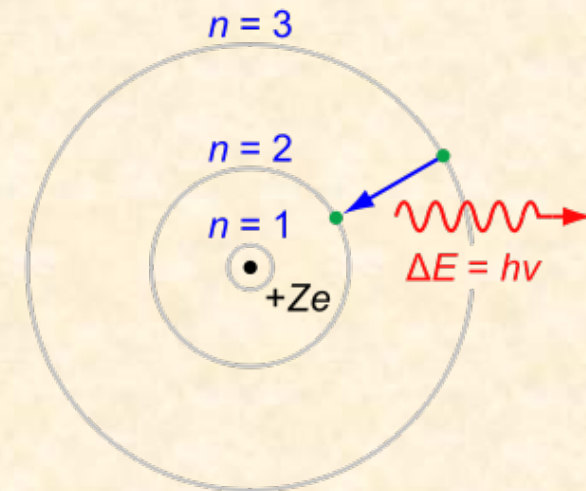
Legend:   
■ métaux alcalins   
■ métaux alcalino-terreux   
■ métalloïdes   
■ gaz nobles   
■ halogènes   
■ métaux de transition   
■ terres rares   
■ actinides   
■ lanthanides

Table with 18 columns and 7 rows of elements, color-coded by groups.

Nicolas Delerue, LAL Orsay  
<http://nicolas.delerue.org>



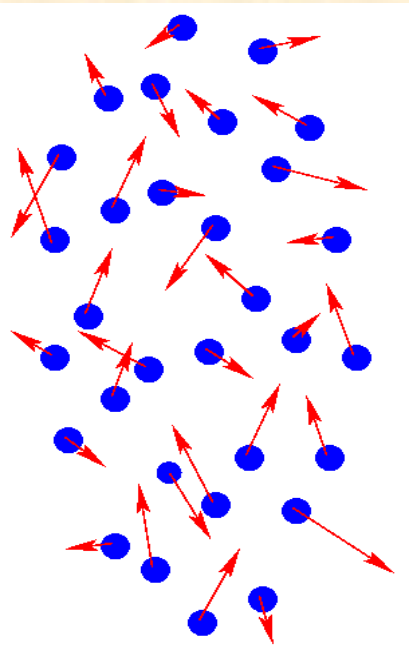
Voyage au coeur de la matière



# Le concept de molécule et d'atome



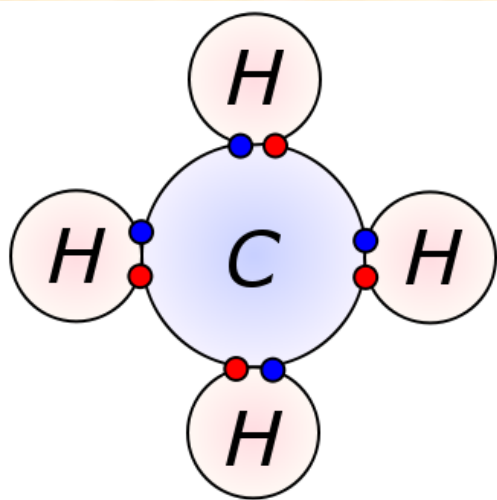
- Philosophes grecs (Leucippe, Démocrite,...): morceaux de matière « atome » = « que l'on ne peut pas couper ».
- Lavoisier: Rien ne se perd, rien ne crée, lors d'une réaction des « éléments » sont échangés mais pas créés.
- 1811, Avogadro: Un volume à une pression et une température donnée de gaz contient toujours le même nombre de molécules/atomes.
- Définition moderne: Les *molécules* sont les briques élémentaires des éléments chimiques. Elles sont formées d'un ou plusieurs *atomes*.



# Classification des éléments chimiques: Valence et métaux



- 1829 (Döbereiner): les métaux peuvent être groupés par 3 avec des propriétés similaires (ex: Lithium, Sodium, Potassium).
- 1858 (Kekulé): Carbone a souvent 4 atomes attachés => « valence » chaque atome peut être fixé à un nombre donné d'autres atomes.
- 1864: Meyer montre que les atomes de propriétés similaires ont la même valence.



● Electron de l'hydrogène  
● Electron du carbone

# La table périodique des éléments

- En 1869 le chimiste russe Dmitri Mendeleïev classa les éléments par valence et par masse atomique croissante.
- Il constata qu'il y avait des trous, correspondant à des éléments pas encore découverts.
- Plusieurs de ces trous furent comblés dans les années qui suivirent: Scandium (1879), Gallium (1875), Germanium (1882),...

**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 = 59	Pi = 106,8	O = 199.
H = 1			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200.
Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112		
B = 11	Al = 27,1	? = 68	Ur = 116	Lu = 197?	
C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118		
N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?	
O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?		
F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	I = 127		
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204.
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207.
		? = 45	Ce = 92		
		?Er = 56	La = 94		
		?Yt = 60	Di = 95		
		?In = 75,6	Th = 118?		

**Д. Менделѣевъ**

**Tableau périodique des éléments**

The image shows a modern periodic table of elements. The elements are arranged in rows and columns, with their atomic numbers and symbols. The table is color-coded by groups: alkali metals (red), alkaline earth metals (orange), transition metals (various shades of pink and purple), lanthanides and actinides (pink), metalloids (green), nonmetals (yellow), and noble gases (light blue). A legend at the bottom identifies these groups.

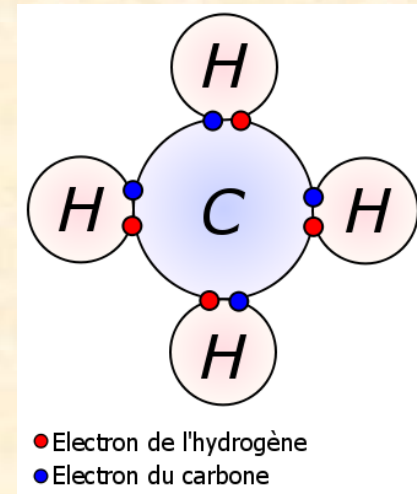




# Conséquences de la classification périodique de éléments

Tableau périodique des éléments

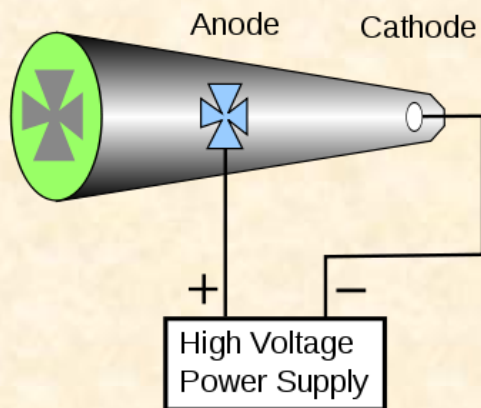
Le tableau périodique des éléments est présenté avec des couleurs distinctes pour chaque groupe chimique. Les groupes sont : 1 (rouge), 2 (orange), 13 (rose), 14 (violet), 15 (bleu-rose), 16 (bleu), 17 (vert), 18 (jaune), 19 (orange), 20 (rouge), 21 (orange), 22 (orange), 23 (orange), 24 (orange), 25 (orange), 26 (orange), 27 (orange), 28 (orange), 29 (orange), 30 (orange), 31 (orange), 32 (orange), 33 (orange), 34 (orange), 35 (orange), 36 (orange), 37 (orange), 38 (orange), 39 (orange), 40 (orange), 41 (orange), 42 (orange), 43 (orange), 44 (orange), 45 (orange), 46 (orange), 47 (orange), 48 (orange), 49 (orange), 50 (orange), 51 (orange), 52 (orange), 53 (orange), 54 (orange), 55 (orange), 56 (orange), 57 (orange), 58 (orange), 59 (orange), 60 (orange), 61 (orange), 62 (orange), 63 (orange), 64 (orange), 65 (orange), 66 (orange), 67 (orange), 68 (orange), 69 (orange), 70 (orange), 71 (orange), 72 (orange), 73 (orange), 74 (orange), 75 (orange), 76 (orange), 77 (orange), 78 (orange), 79 (orange), 80 (orange), 81 (orange), 82 (orange), 83 (orange), 84 (orange), 85 (orange), 86 (orange), 87 (orange), 88 (orange), 89 (orange), 90 (orange), 91 (orange), 92 (orange), 93 (orange), 94 (orange), 95 (orange), 96 (orange), 97 (orange), 98 (orange), 99 (orange), 100 (orange), 101 (orange), 102 (orange), 103 (orange), 104 (orange), 105 (orange), 106 (orange), 107 (orange), 108 (orange), 109 (orange), 110 (orange), 111 (orange), 112 (orange), 113 (orange), 114 (orange), 115 (orange), 116 (orange), 117 (orange), 118 (orange).



- L'existence d'une structure périodique dans les éléments indique qu'il existe probablement une structure sous-jacente.
- *Nous verrons plus tard quelle est cette structure.*
- De nombreux nouveaux éléments ont été découverts (ou produits) depuis 1869 et ils trouvent tous leur place dans la table de Mendeleïev.
- La classification périodique renforce fortement le concept d'atome => avec une centaine de « briques » il est possible de former toute la matière que nous connaissons (sur terre et dans les étoiles)!

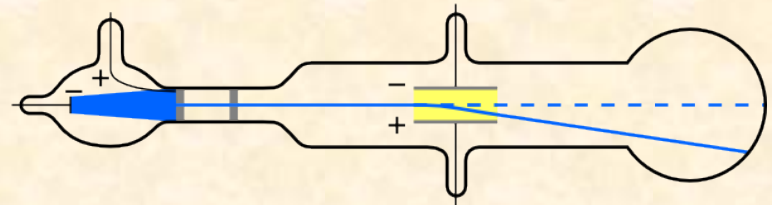
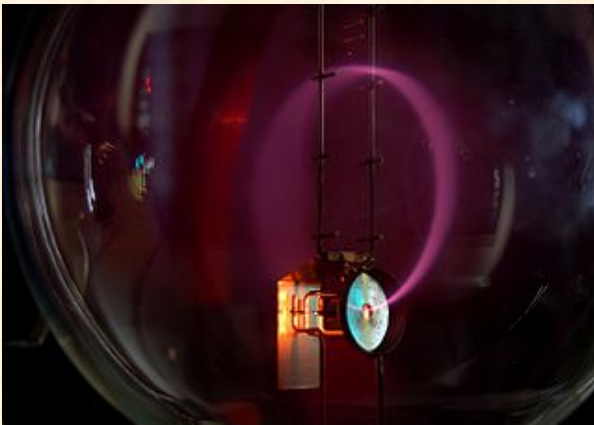
# Découverte de l'électron: Les tubes de Crookes

- 1878, William Crookes: Mesure de la conductivité des gaz à faible pression: rayons lumineux
- Ces rayons proviennent de la « cathode » (électrode négative)  
=> rayons cathodiques
- Matière négativement chargée???



# Découverte de l'électron

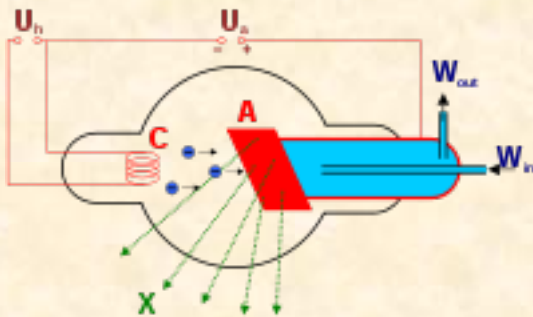
- Des études plus poussées des tubes de Crookes montrent que les rayons cathodiques sont effectivement chargés.
- 1897, Joseph John Thomson: Mesure du rapport masse sur charge des rayons cathodiques.  
Déduit des expériences que les rayons cathodiques sont formés par des particules: « électrons ».





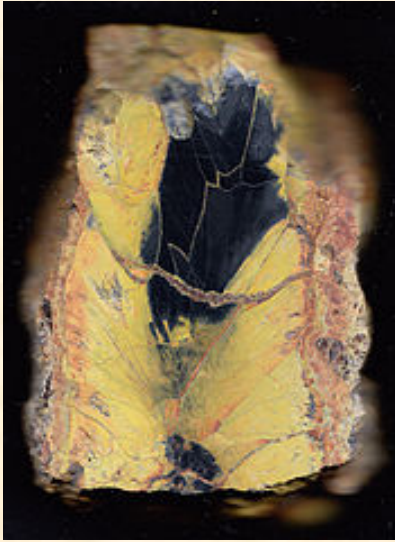
# Découverte des rayons X

- Les scientifiques travaillant sur les tubes de Crookes remarquèrent que les plaques photographiques entreposées près de ces tubes étaient souvent voilées.
- En 1895, Wilhelm Röntgen étudia cet effet et l'utilisa pour prendre une photo de la main de sa femme: il constata que les tubes de Crookes émettaient des rayons qui traversaient la chair mais pas les os ou les objets métalliques.
- Il les appela « rayons X ».
- Nous savons maintenant que les rayons X sont produits lorsque les électrons émis par la cathode frappent le tube en verre.
- Plus il y a de courant, plus les rayons X sont intenses.
- Plus le voltage est élevé, plus l'énergie des rayons X est grande.

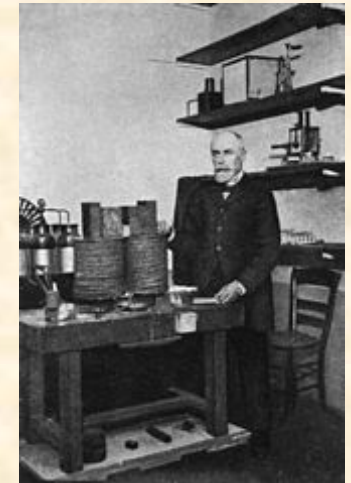


# Découverte de la radioactivité:

## (1) Henri Becquerel

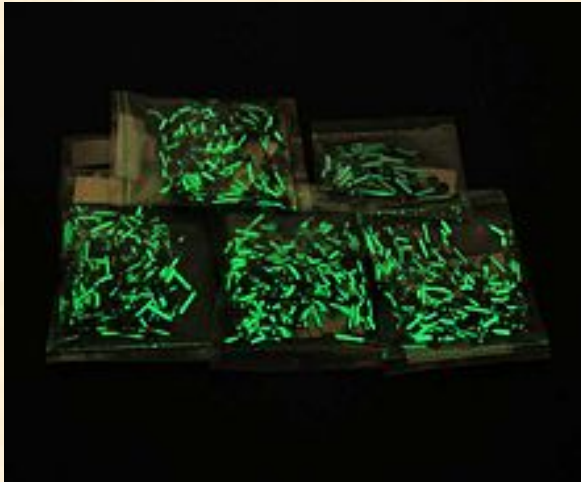


- 1896: Henri Becquerel cherche à déterminer si les matériaux fluorescents émettent des rayons X.
- Seuls les sels d'Uranium laissent des traces sur les plaques photographiques.
- Surprise: ils laissent des traces même quand ils ne sont pas fluorescents!  
=> « Rayons Becquerel ».
- Aujourd'hui nous savons que les substances radioactives (dont l'Uranium) peuvent émettre des « rayons » de très haute énergie.

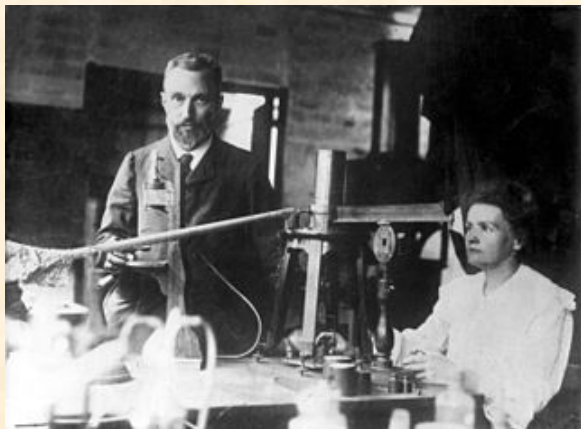


# Découverte de la radioactivité:

## (2) Pierre et Marie Curie

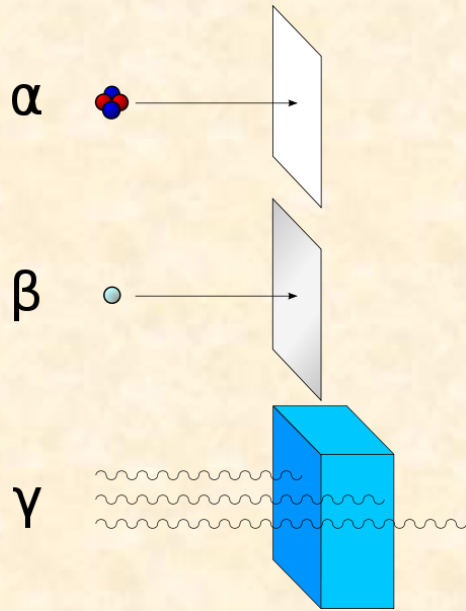


- 1897: Doctorat de Marie Curie sur les « rayons uraniques ».
- Pierre et Marie Curie découvrent que les « rayons uraniques » ionisent l'air  
=> Ils baptisent cette propriété « radioactivité ».
- Montrent que la radioactivité n'est pas une propriété chimique mais une propriété physique.  
=> Prix Nobel en 1903 (avec Becquerel).
- Il existe différents types de rayons radioactifs: certains ayant une charge électrique (alpha, beta) et d'autres neutres (gamma).
- Découverte de nouveaux éléments radioactifs: Radium et Polonium.  
=> Prix Nobel en 1911

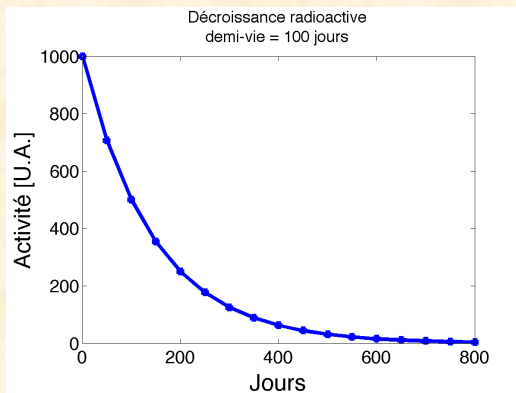


# Etude de la radioactivité:

## Ernest Rutherford



- 1899: Différents types de rayons radioactifs pénètrent différemment.
- Découvre que certains éléments radioactifs émettent un gaz (radon).
- Découverte de la décroissance de l'activité radioactive.  
=> Prix Nobel de Chimie en 1908
- Prouve que les particules « alpha » sont des noyaux d'Hélium.





# Enthousiasme pour la radioactivité

- A faible dose, le radium est efficace contre le cancer, mais à plus forte dose, il est nocif.
- Ses propriétés phosphorescentes étaient aussi très populaires.
- Ses effets néfastes ne furent compris que plus tard... (interdit à partir de 1937)

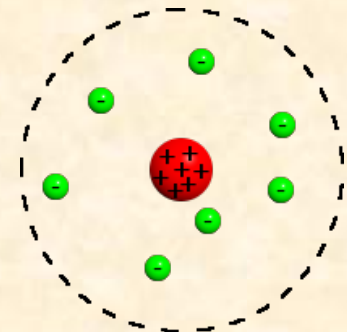
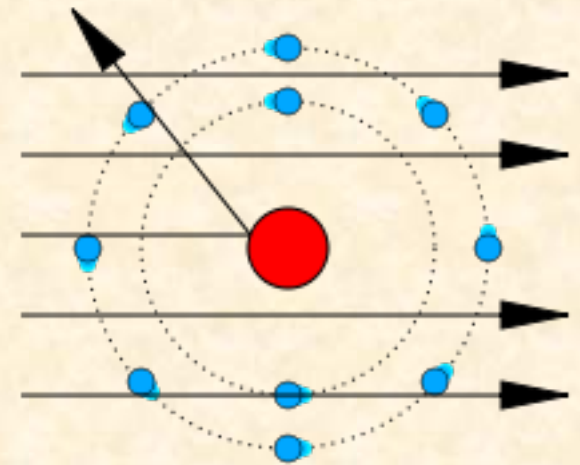
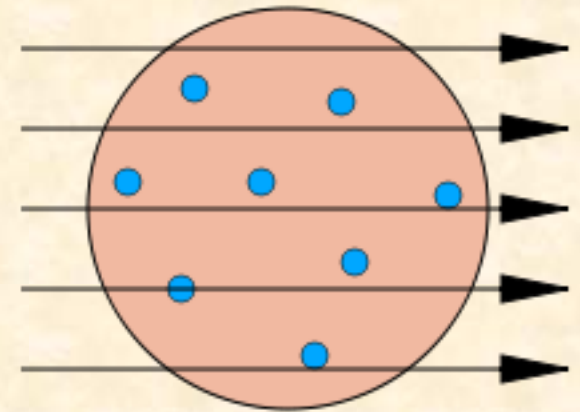


Nicolas Delerue, LAL Orsay  
<http://nicolas.delerue.org>

Voyage au coeur de la matière

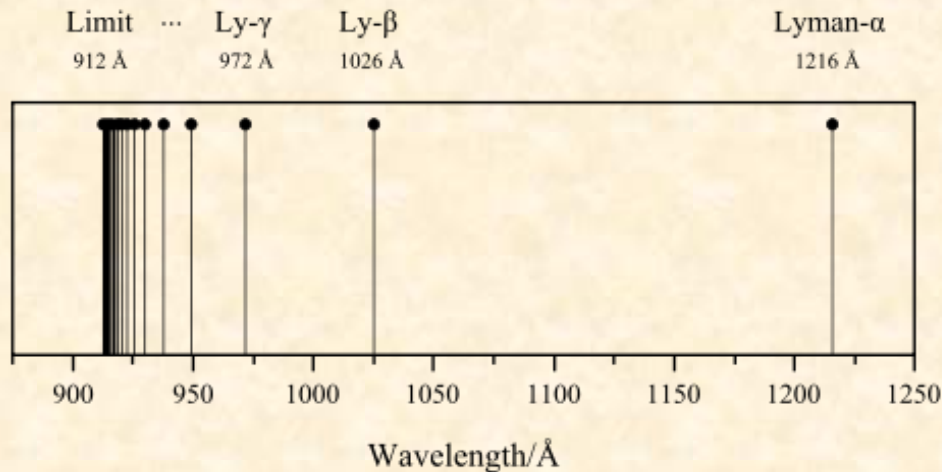
# Découverte du noyau atomique: La diffusion de Rutherford

- 1909: Expérience pour étudier comment la matière est répartie dans un atome.
- Rutherford propose d'envoyer des particules alpha sur une feuille d'or.
- Expérience par Geiger et Marsden.
- La plupart des particules traversent la feuille mais certaines particules rebondissent  
=> Il y a un « noyau » dur au centre des atomes, 100 000 fois plus petit que ceux ci!



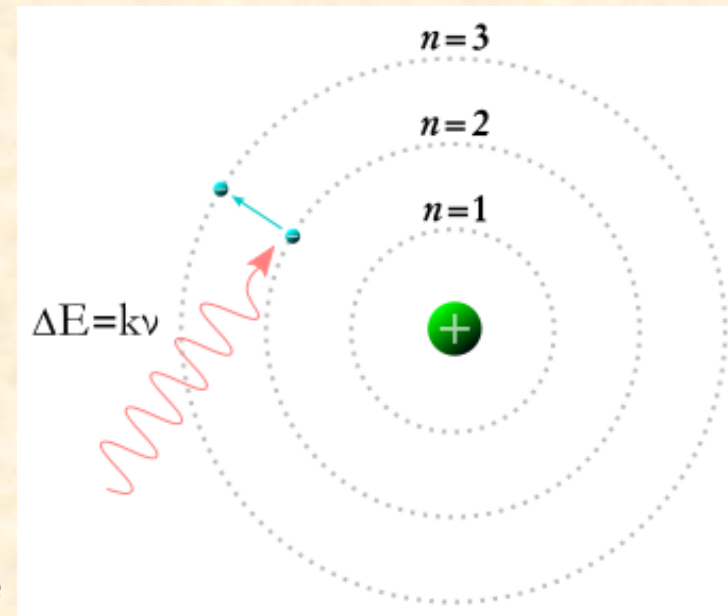
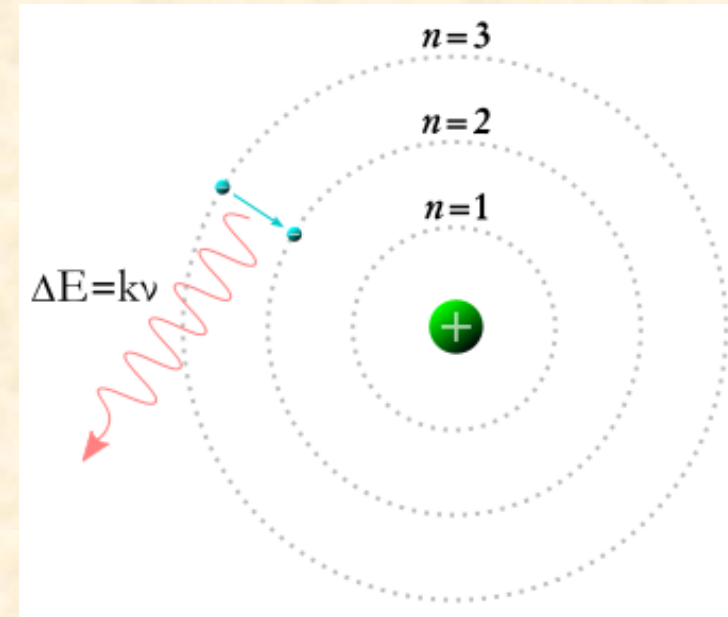
# Spectre de l'hydrogène

- Hydrogène chauffé => émission de lumière à des couleurs très particulières
- « Raies de Balmer » (visible)
- « Série de Lyman » (infrarouge)
- L'existence de ces raies n'est pas expliquée par les observations de Rutherford.



# L'atome de Bohr

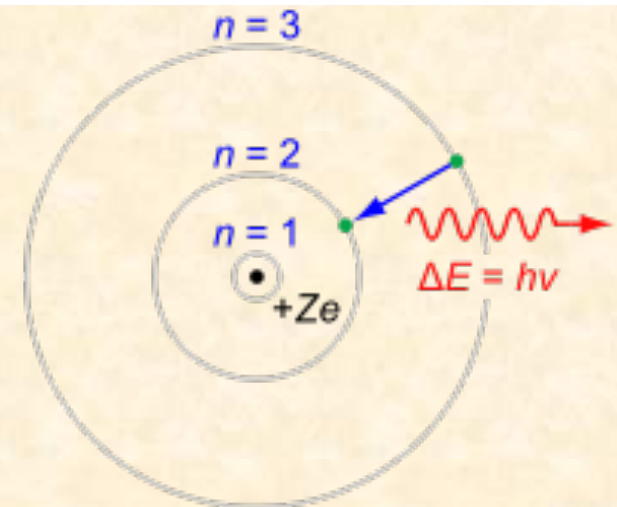
- 1913: Niels Bohr propose un modèle atomique.
- Ce modèle s'inspire de plusieurs modèles antérieurs.
- Dans ce modèle, les électrons « tournent » autour d'un noyau sur des orbites fixes, comme des planètes tournant autour du soleil.
- Lorsqu'un électron passe d'une « orbite » à une autre plus basse il émet de la lumière.
- Inversement pour passer d'une « orbite » basse à une autre plus haute il faut absorber de la lumière.
- La « distance » entre les orbites (et donc l'énergie émise) explique les séries de Balmer et de Lyman.



# Atome de Bohr:

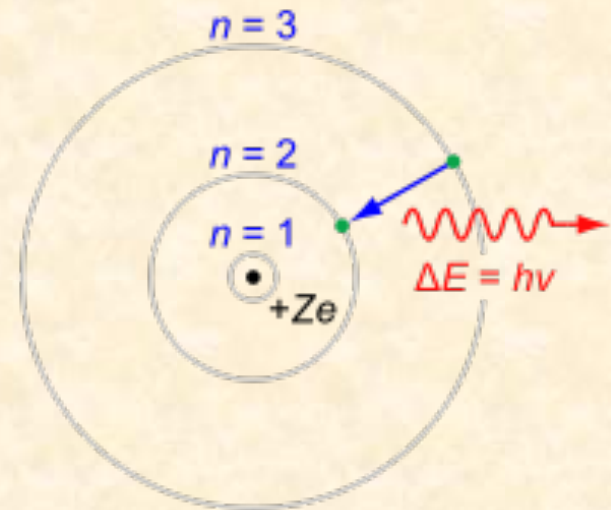
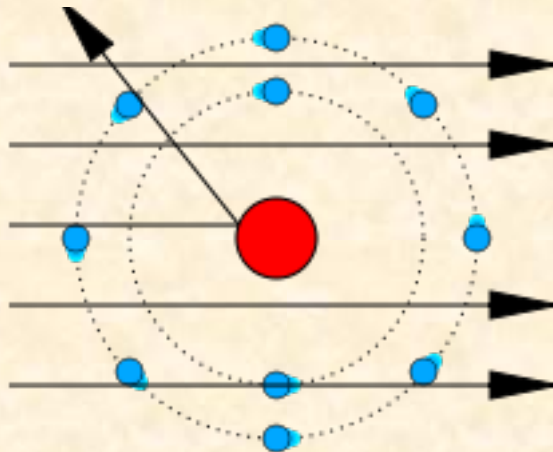
## Une analogie

- Dans le modèle de Bohr, les électrons autour d'un atome sont un peu comme des montgolfières: selon la quantité de lest qu'ils emportent ils vont se placer sur une orbite différente.
- Pour changer d'orbite il faut lâcher du lest (émettre un photon) ou en recevoir (absorber un photon).
- Seules certaines orbites sont possibles (nous en reparlerons).



# Succès de l'atome de Bohr

- Le modèle proposé par Niels Bohr a permis d'expliquer toutes les observations de l'époque.
- En particulier les raies du spectre de l'hydrogène s'expliquent par le changement d'orbite d'un atome.
- L'expérience de Rutherford s'explique par la présence du noyau au cœur de l'atome.



# Etat des lieux

- De la fin du XIXeme siècle à 1920 de nombreuses découvertes ont révolutionné la compréhension de la structure de la matière.
- Les éléments chimiques peuvent être classés par propriétés, reflétant l'existence de briques appelées atomes.
- Certains éléments chimiques sont « radioactifs ».
- Les atomes sont formés d'un noyau et d'un nuage d'électrons.

# ÉTRANGES PROPRIÉTÉS DE LA MATIÈRE: LA PHYSIQUE QUANTIQUE

La lumière: onde ou particule?

Les trous d'Young

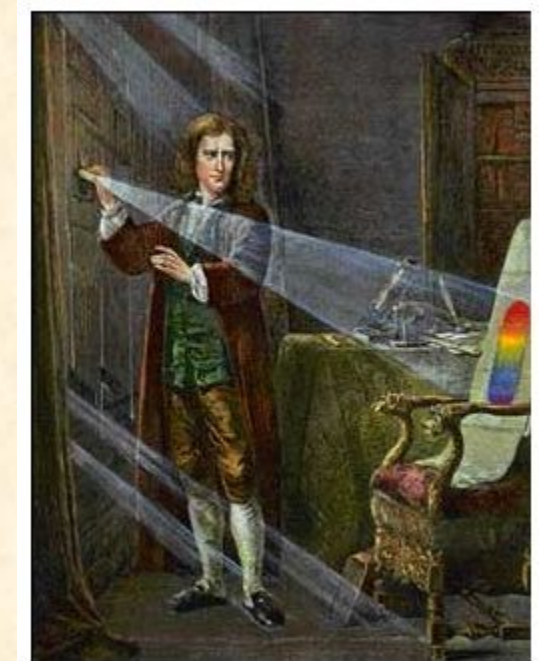
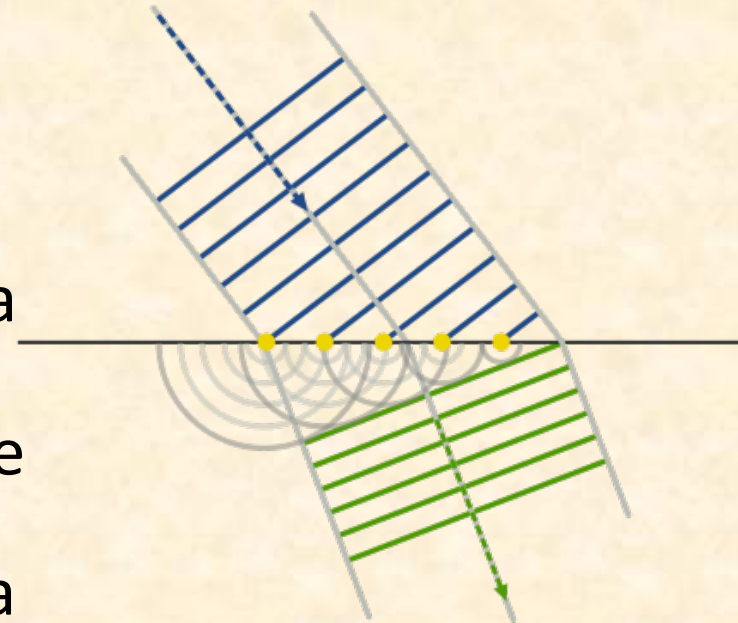
Fonction d'onde

Le chat de Heisenberg est-il mort ou vivant?



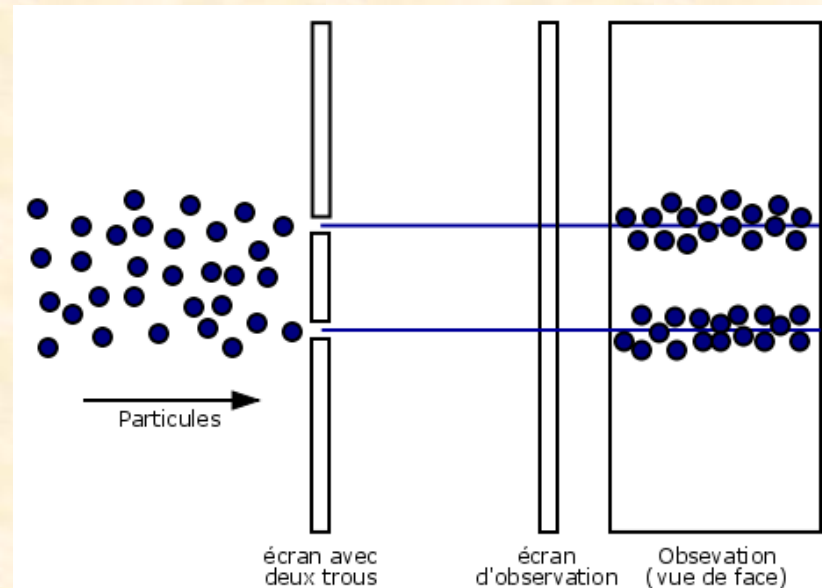
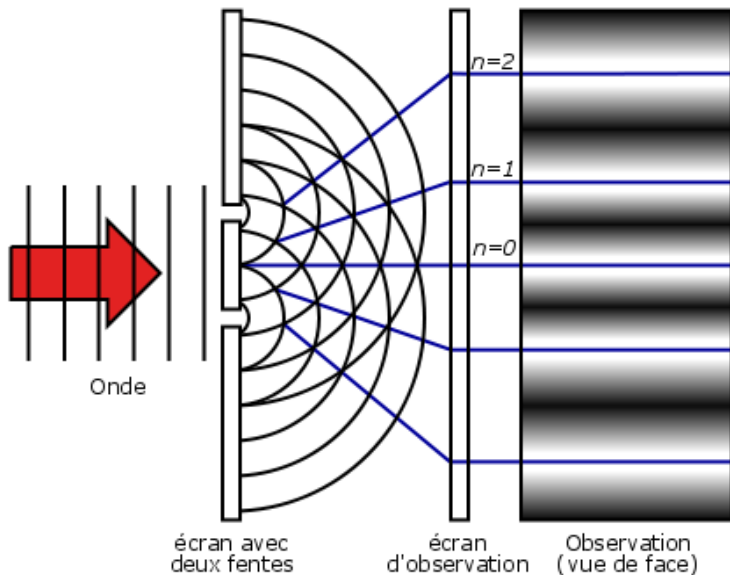
# La lumière: Ondes ou particules?

- Quelle est la nature physique de la lumière?
- 1690 Huygens: théorie ondulatoire de la lumière.  
Explique certaines propriétés de la propagation de la lumière.
- 1704, Newton: théorie corpusculaire de la lumière.  
Montre qu'un prisme « sépare » la lumière en couleurs.
- A l'époque il était difficile de départager les deux théories.



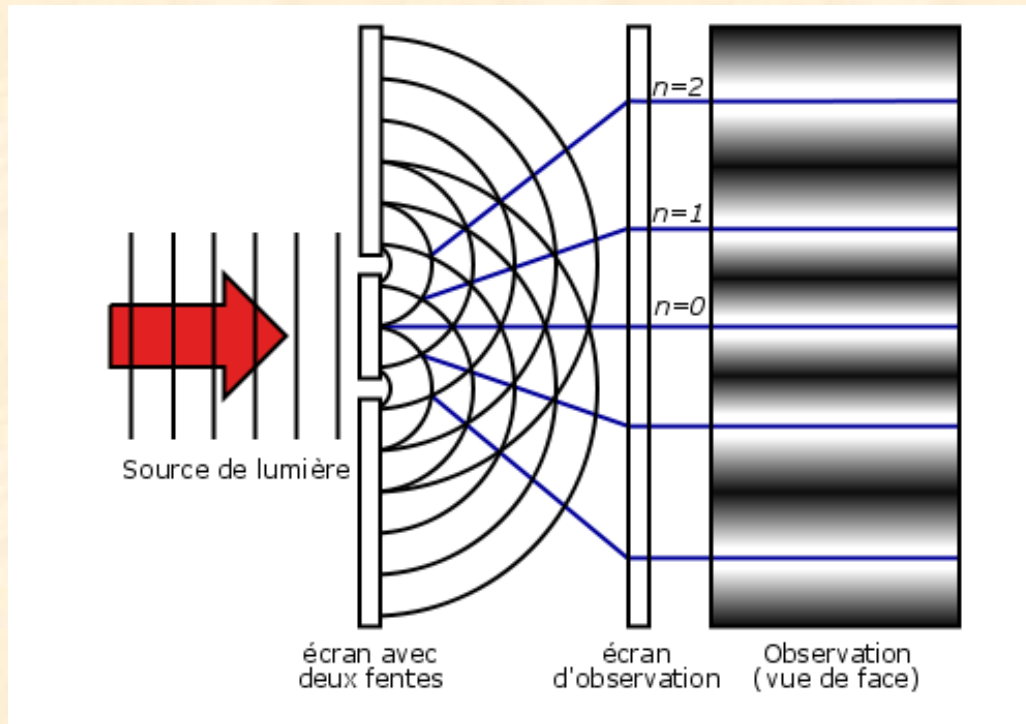
# L'expérience des trous d'Young (1)

- 1803: Afin de tester la nature de la lumière Thomas Young effectua une expérience d'interférence avec deux trous.
- Cette expérience devait permettre de savoir si la lumière était constituée d'ondes ou de particules...



# L'expérience des trous d'Young (2)

- Thomas Young observa clairement un motif d'interférence, preuve de la nature ondulatoire de la lumière.
- De nombreux travaux pendant le XIXe siècle confirmèrent la nature ondulatoire de la lumière.
- Le point d'orgue étant la mise en équation des ondes électromagnétiques par Maxwell en 1864.



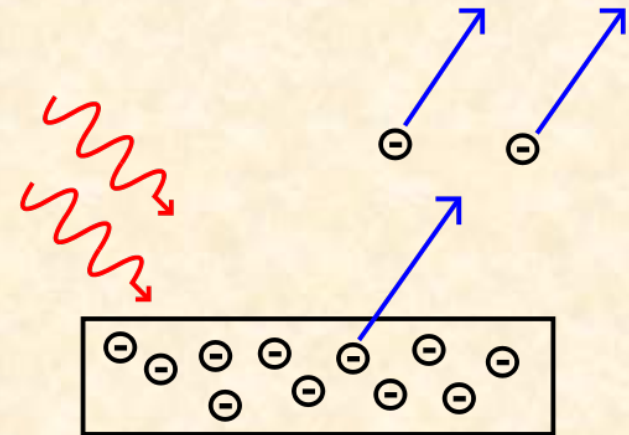
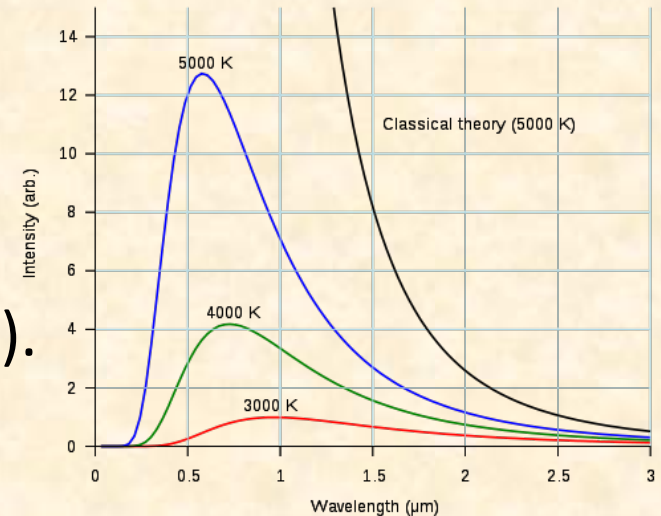
# L'effet photoélectrique

- 1887: Hertz utilise un éclateur pour produire des étincelles.
- En illuminant les électrodes avec de la lumière ultraviolette, les étincelles se produisent plus facilement.
- D'autres expériences montrent que l'illumination entraîne l'émission d'électrons.
- L'énergie des électrons dépend de la longueur d'onde (couleur) de la lumière utilisée mais pas de son intensité.  
=> Contraire aux prédictions de la théorie ondulatoire de la lumière.



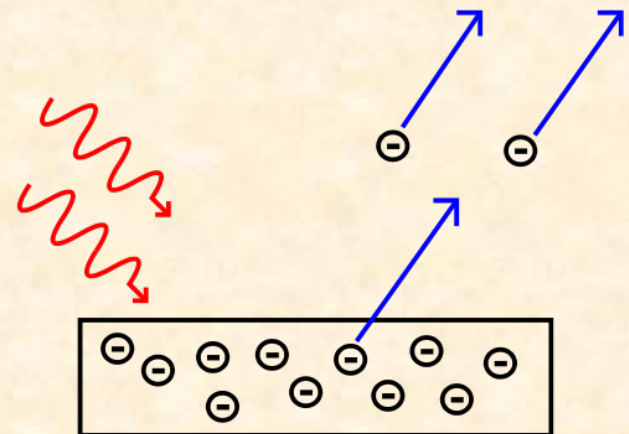
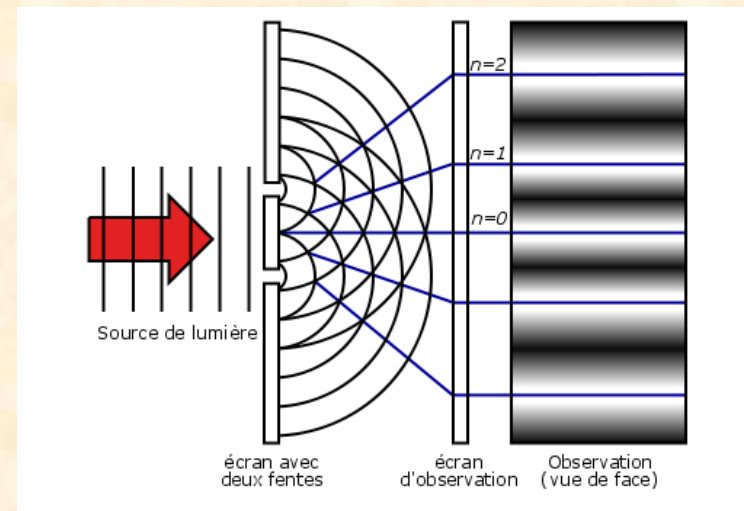
# Explication de l'effet photoélectrique

- 1905: Albert Einstein propose une explication:  
La lumière est formée de particules!
- Travaux antérieurs de Planck pour décrire la radiation du corps noir (1900).
- Très bon accord entre prédictions et observations dans ces deux cas si la lumière est décrite comme une particule!
- Un « grain » de lumière rouge aurait moins d'énergie qu'un « grain » de lumière bleue.
- Einstein a reçu le prix Nobel en 1921 pour son explication de l'effet photoélectrique.



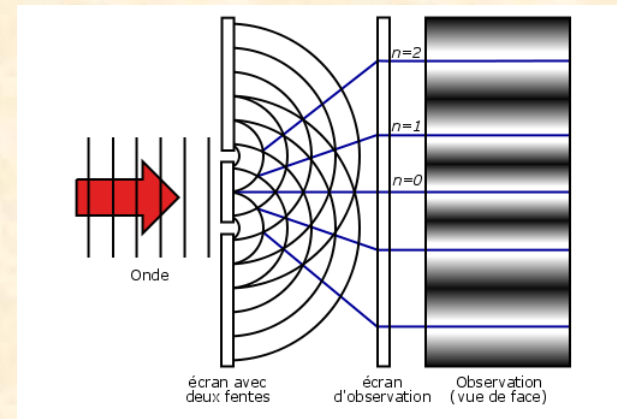
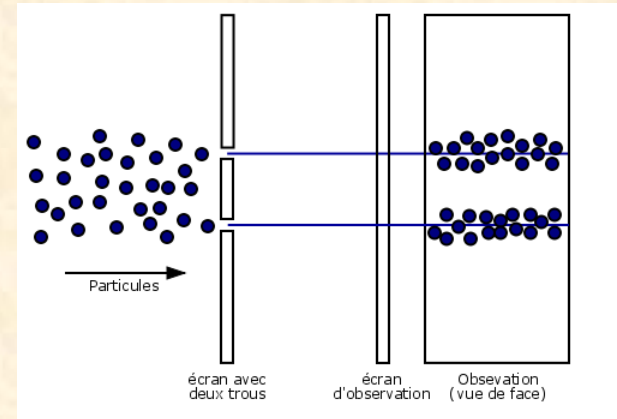
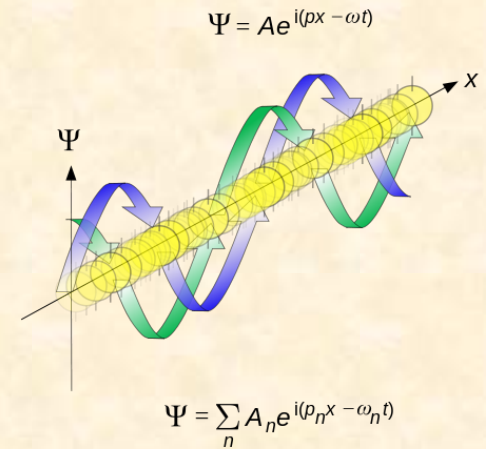
# La nature de la lumière: Ondes ou particules?

- Retour au point de départ!
- Certaines théories décrivent la lumière comme une onde,
- D'autre comme une particule
- Les deux s'appuient sur des vérifications expérimentales.



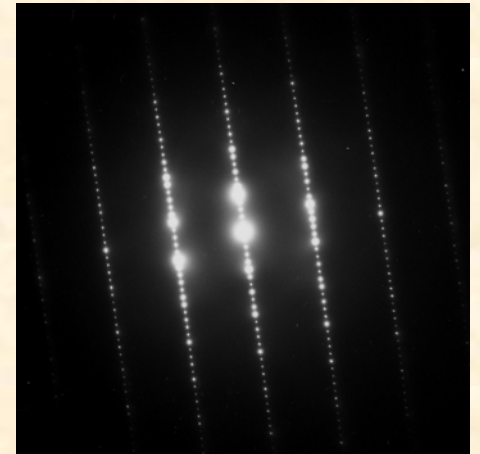
# Louis de Broglie: Dualité onde-particule

- En 1924 Louis de Broglie proposa de résoudre ce paradoxe en postulant que la matière est aussi une onde!
- Pour vérifier son hypothèse il suggère de faire une expérience de diffraction avec des électrons.



# Diffraction des électrons

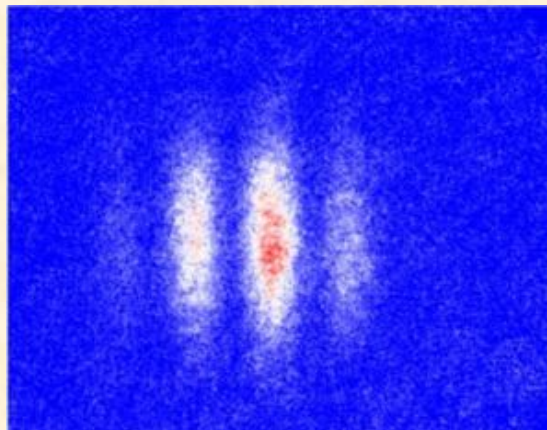
- 1927: deux expériences de diffraction des électrons.
- George Paget Thompson (fils de J.J. Thomson) envoie des électrons sur un film métallique.
- Clinton Davisson et Lester Germer envoient des électrons sur une cible de Nickel cristallin.
- Dans les deux expériences un motif de diffraction est observé.
- Prix Nobel 1929: de Broglie
- Prix Nobel 1937:  
Thomson & Davisson





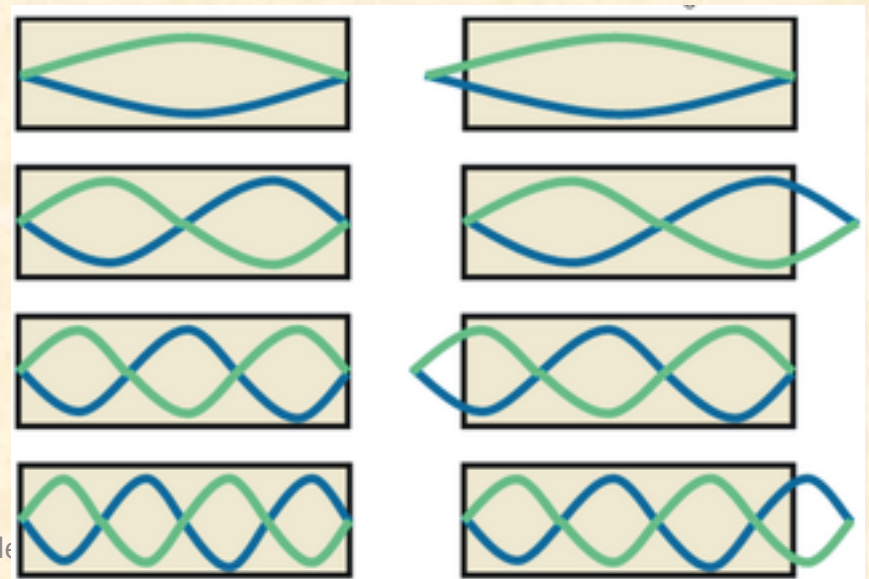
# Dualité onde-particule

- Conséquence:  
**Toute particule de matière peut aussi être décrite par une onde.**
- Plus l'énergie de la particule est élevée plus la longueur d'onde est courte.
- Ce résultat a été confirmé (beaucoup plus tard) pour des atomes et pour des molécules.
- Pour l'instant il n'est pas possible d'effectuer des expériences similaires dans des systèmes plus grands que des atomes et les molécules...



# Equation de Schrödinger: Fonction d'onde

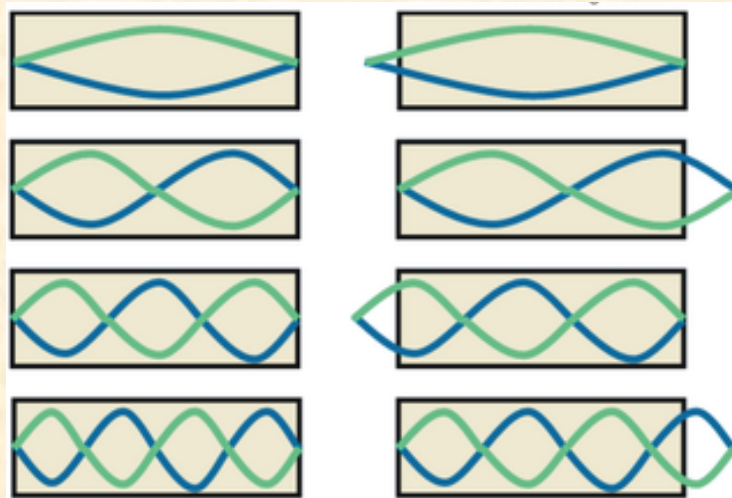
- 1925: Erwin Schrödinger propose une équation décrivant la « propagation » des ondes de matière.
- Cas d'une particule dans une boîte:
  - Si l'on secoue légèrement une boîte avec de l'eau des vagues vont se former.
  - Seules certaines périodes de vagues sont possibles.
  - Seules certaines longueurs d'onde de matière seront possibles!





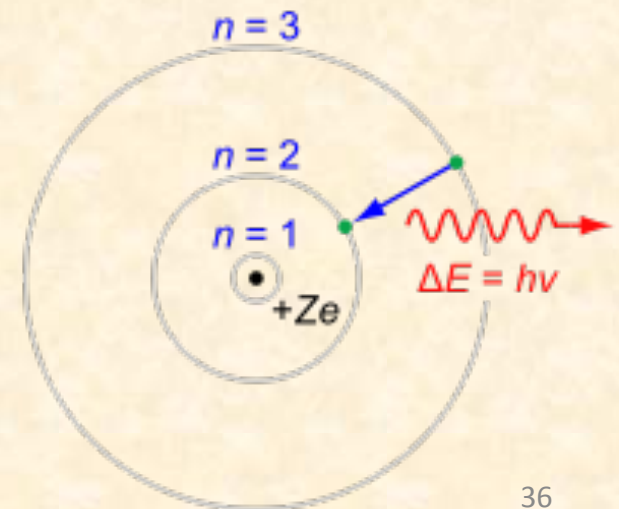
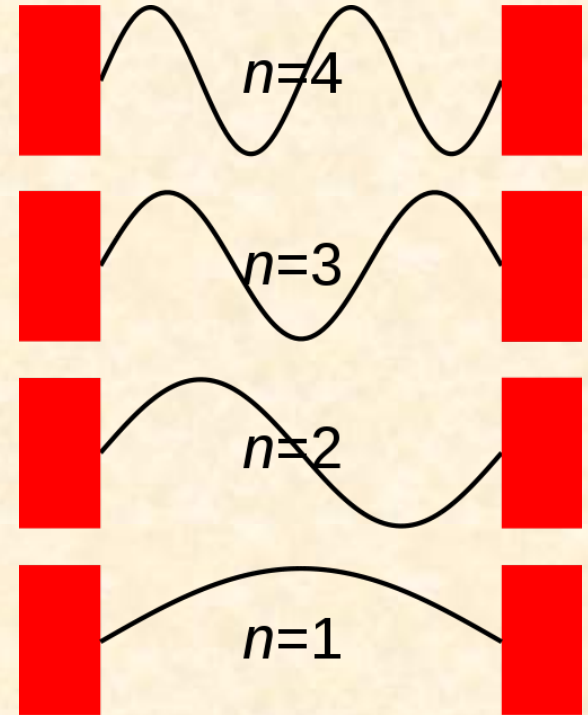
# Fonction d'onde dans une boîte

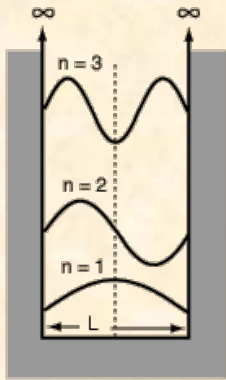
- Quand l'on joue de la guitare les cordes vibrent à certaines fréquences.
- Ces fréquences sont limitées par les deux extrémités de la guitare et seules certaines notes sont possibles.
- Il en va de même pour une fonction d'onde: seules certaines longueurs d'onde sont possibles.



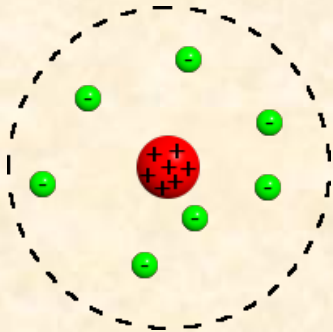
# Equation de Schrödinger: Puits de potentiel

- Conséquence: Une « boîte microscopique » ne peut contenir des particules de matière (par exemple des électrons) qu'à certaines énergies!
- Exemple de boîte: le « puits » électrique créé par un atome.  
=> Autour d'un atome les électrons ne peuvent avoir que certaines longueurs d'onde (ou énergie).
- L'équation de Schrödinger explique les niveaux d'énergie de l'atome de Bohr!
- Plus généralement, dans de nombreux cas seuls certains niveaux d'énergie sont permis.
- On parle de « quanta d'énergie »  
=> Physique (ou mécanique) quantique
- Schrödinger reçu le prix Nobel en 1933.



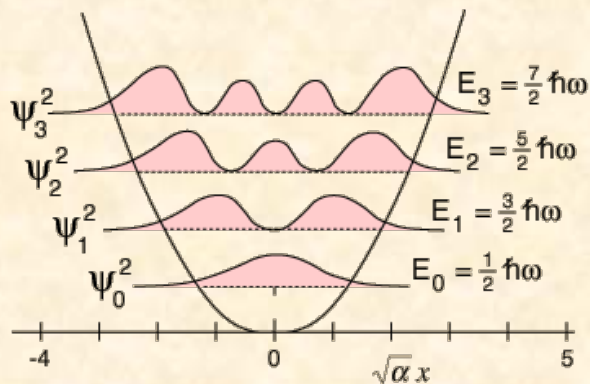


$x = 0$  at left wall of box.



# Puits de potentiel

- L'un des résultats importants de l'équation de Schrödinger est le concept de puits de potentiel.
- Un noyau atomique par exemple crée autour de lui un puits de potentiel dans lequel circulent les électrons.
- Les « ondes » de ces électrons doivent respecter le puits  
=> seules certaines orbites sont possibles!  
=> C'est exactement ce qui est observé expérimentalement.



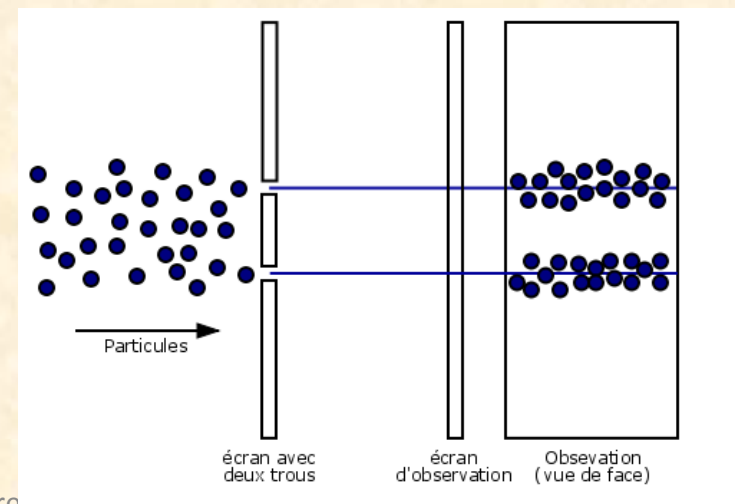
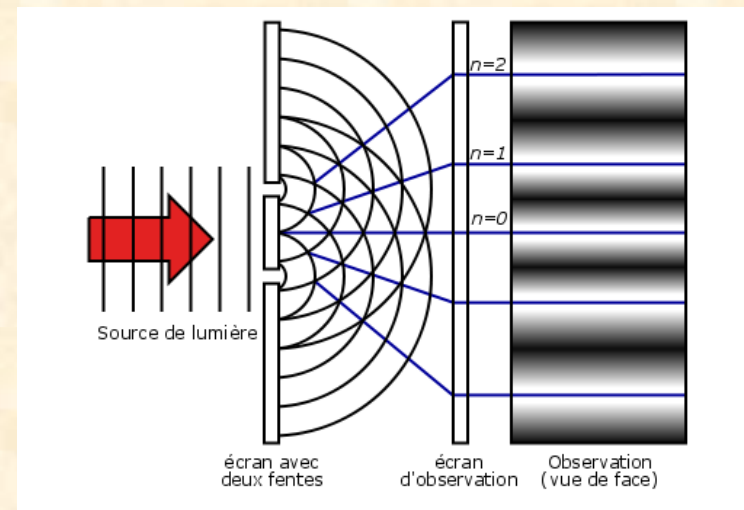
# Description probabiliste

- L'une des interprétations des fonctions d'onde est de dire que celles-ci représentent la *probabilité* qu'une particule soit à un endroit donné.
- Par conséquent la particule peut être observée partout où sa fonction d'onde se propage...
- A un instant donné, il y a plusieurs endroits où la particule se trouve « peut-être ».
- Cependant toute « mesure » ou observation de la particule réduit ces probabilités: l'endroit où se trouve la particule est fixé.
- Cette interprétation a mis longtemps à être acceptée mais elle n'a pas été mise en défaut.



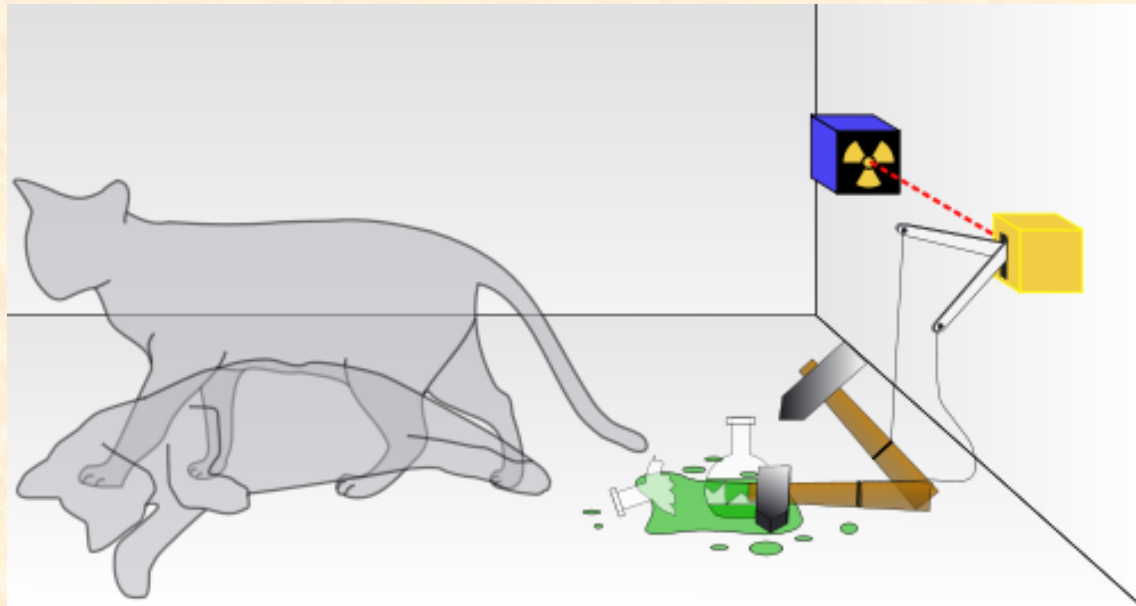
# Superposition d'états: Les trous d'Young

- Regardons à nouveau l'expérience de Thomas Young.
- Il n'est pas possible de dire par quel trou le photon (ou l'électron) est passé.
- Si l'on met un détecteur pour mesurer par quel trou le photon est passé, le motif d'interférence ne se produit plus!
- Le photon passe par les deux trous à la fois!
- En réalité la « vague » (l'onde) correspondant au photon doit passer par les deux trous pour pouvoir former un motif d'interférence.
- Cela s'appelle une superposition d'états.



# Superposition d'états: Le chat de Schrödinger

- La description probabiliste permet la superposition d'états: un système décrit par une fonction d'onde peut se trouver dans plusieurs états à la fois (chacun avec une probabilité donnée).
- Exemple: le chat de Schrödinger (expérience de pensée).
- Même Albert Einstein a eu du mal à admettre ce concept!

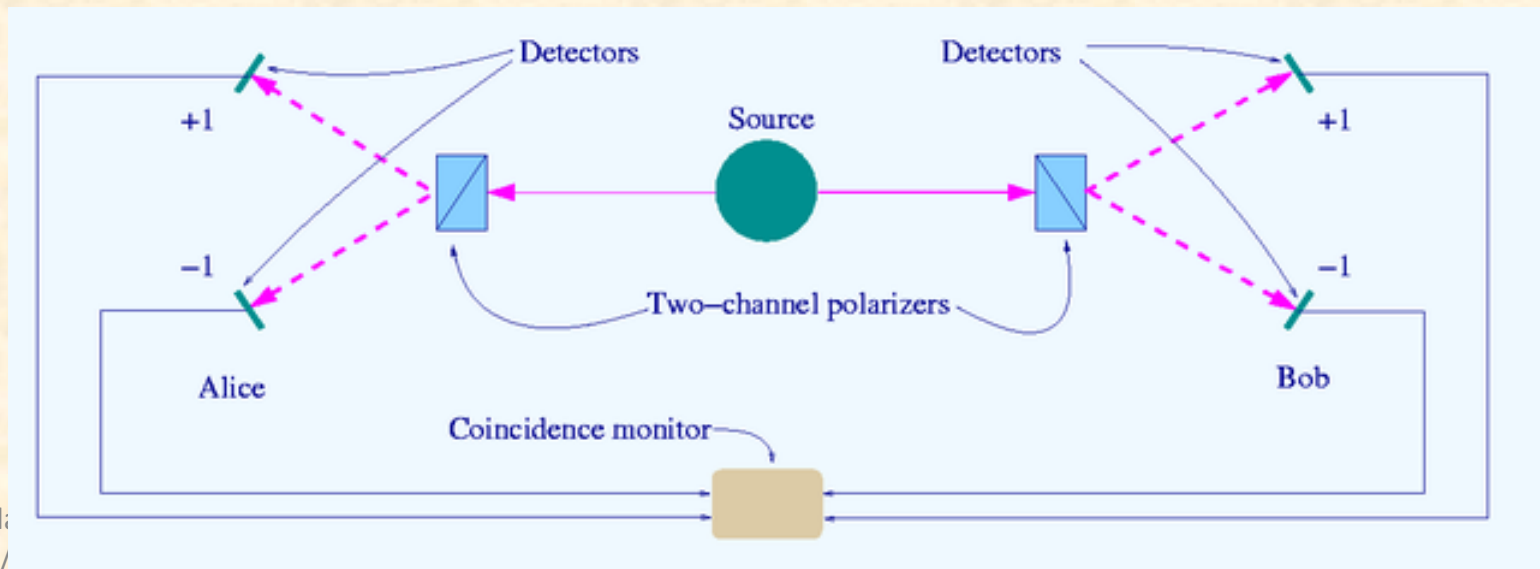




# Superposition d'états:

## Vérification expérimentale

- Le paradoxe du chat de Schrödinger a été testé expérimentalement en France à Orsay (les chats étant remplacés par des lasers).
- Les résultats ont confirmé la superposition d'états quantique (intrication quantique):  
=> les photons se propagent dans les deux états jusqu'à ce que l'un d'eux soit observé.

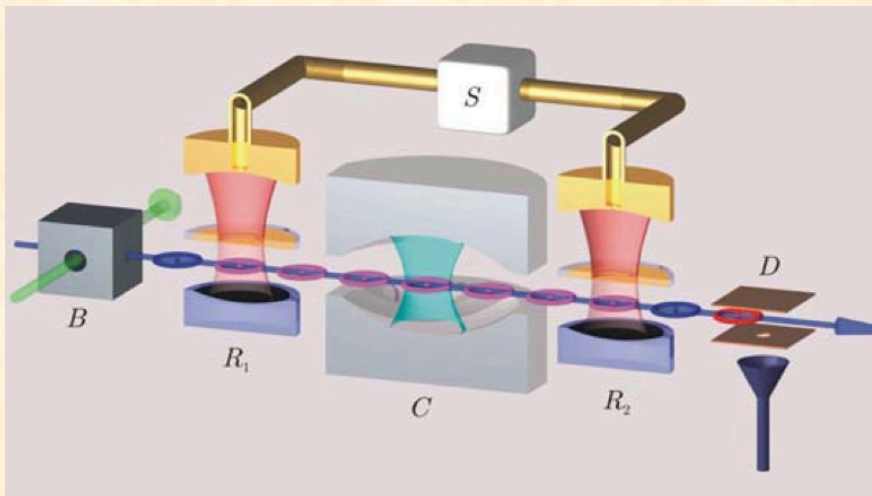
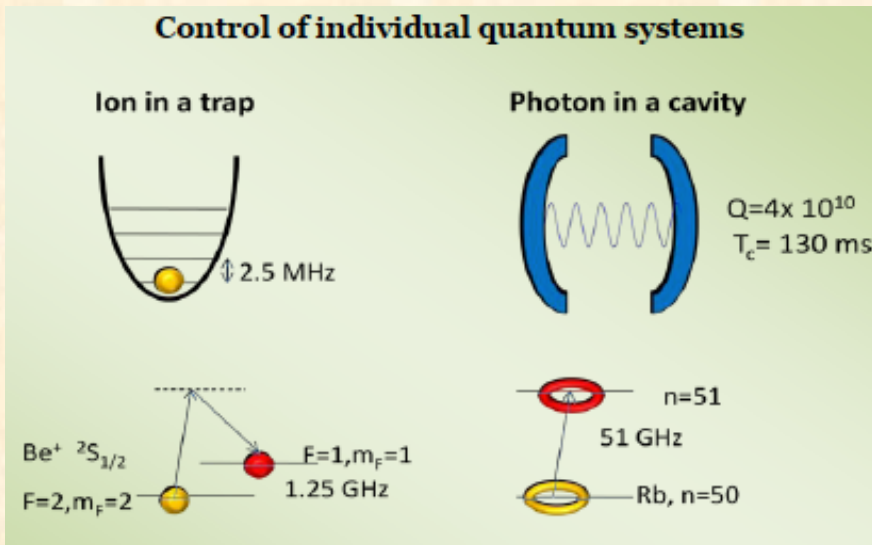


# Le Prix Nobel de Physique 2012: Etude des états quantiques

- Serge Haroche (F) et David Wineland (US)
- Mesure de l'état quantique d'ions (DW) et d'atomes (SH) « sans les perturber ».
- Mesures que l'on pensait impossibles jusqu'à présent.



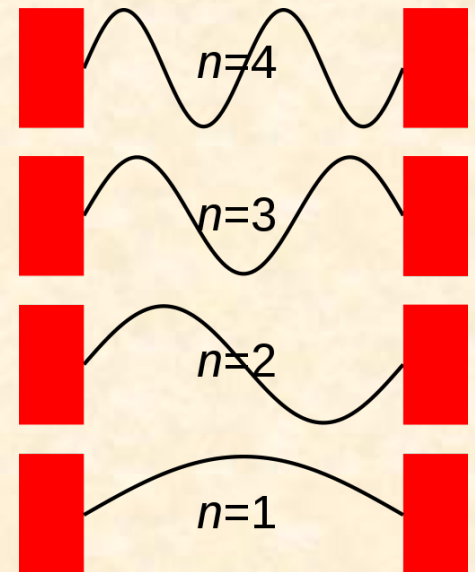
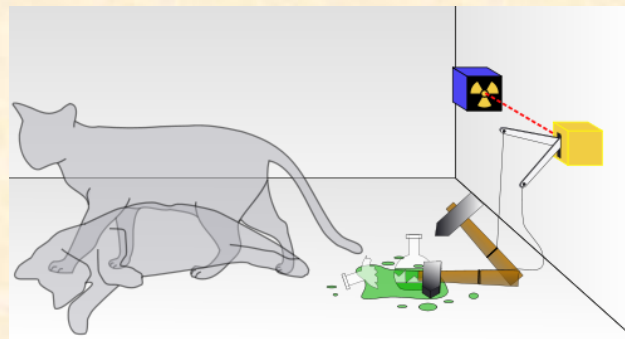
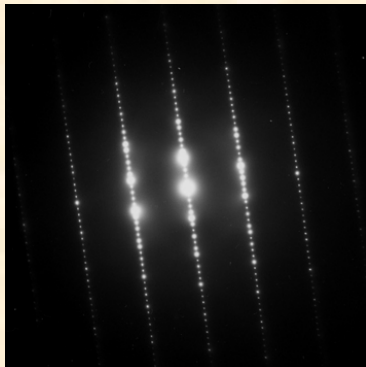
# Le prix Nobel de Physique 2012: Travaux de Serge Haroche



- Serge Haroche et David Wineland ont montré qu'il est possible de mesurer l'état quantique d'un système sans le perturber.

# Récapitulatif des propriétés étranges de la matière

- Des expériences ont montré que la matière est formée de particules qui peuvent être décrites par des ondes (« fonction d'onde »).
- Ces fonctions d'onde décrivent la probabilité que le système se trouve dans un état donné.
- Même les plus grands savants ont eu du mal à accepter ces concepts!



# LA PHYSIQUE ATOMIQUE

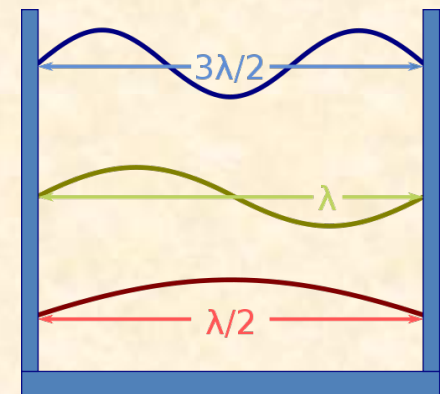
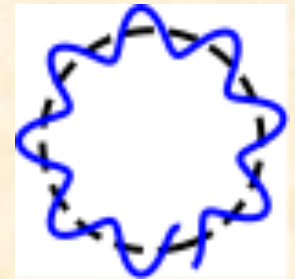
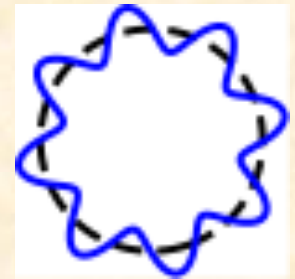
Niveaux d'énergie de l'hydrogène

Les raies de Balmer

Valence des atomes

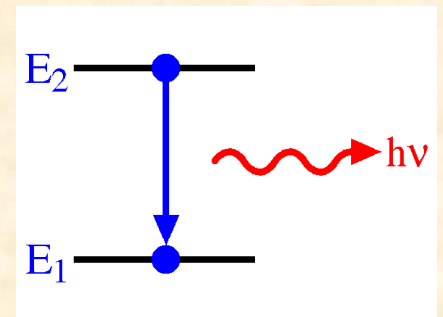
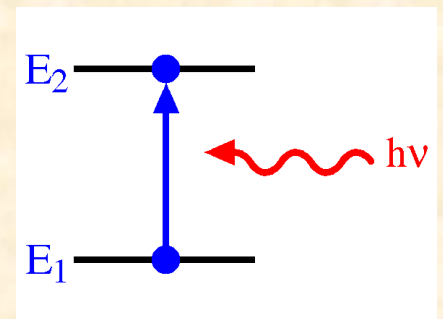
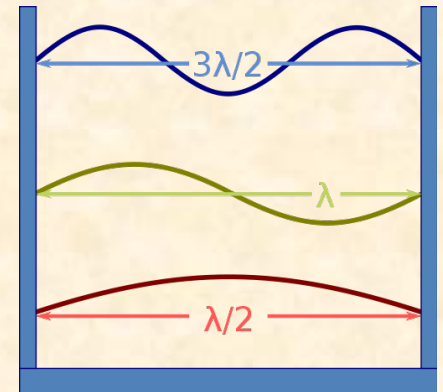
# Retour à l'atome d'hydrogène

- Description de l'hydrogène:  
Modèle de Bohr + Mécanique quantique
- Atome d'hydrogène = exemple simple de puits « électrique » avec un électron.
- Les fonctions d'ondes doivent se refermer  
=> seules certaines orbites sont possibles  
=> explique ce que Bohr avait remarqué empiriquement.
- Pour calculer les orbites possibles, il faut résoudre l'équation de Schrödinger.



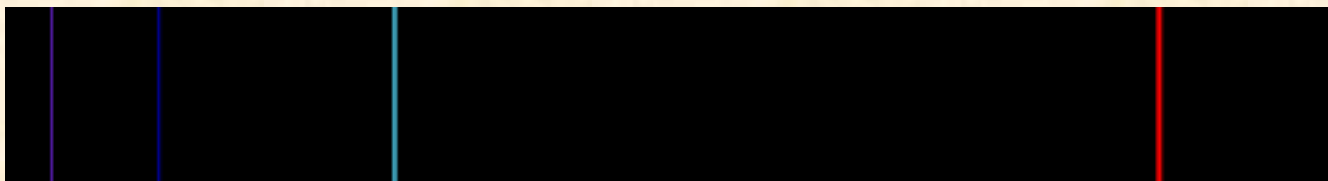
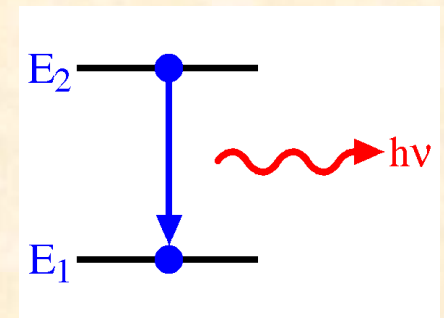
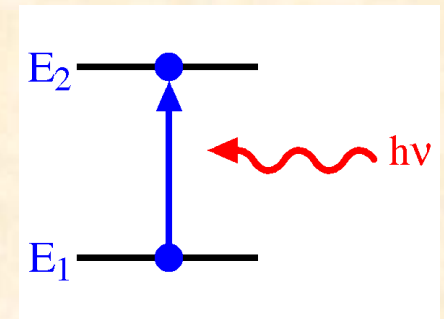
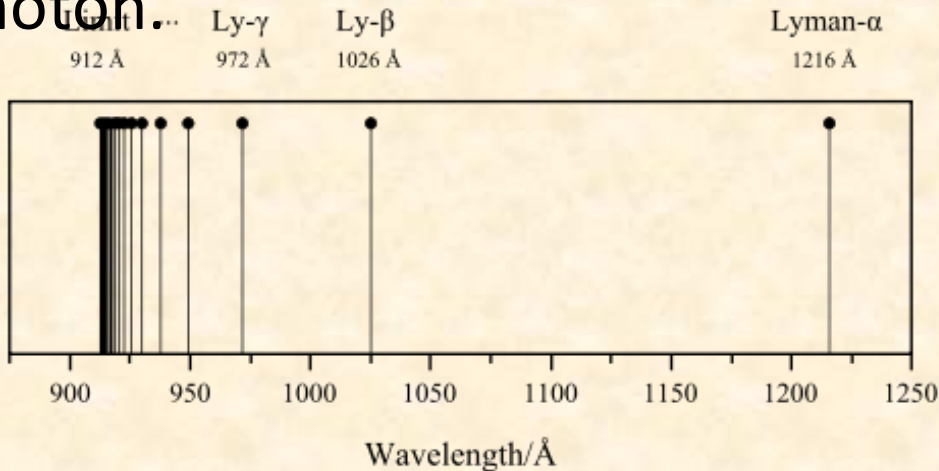
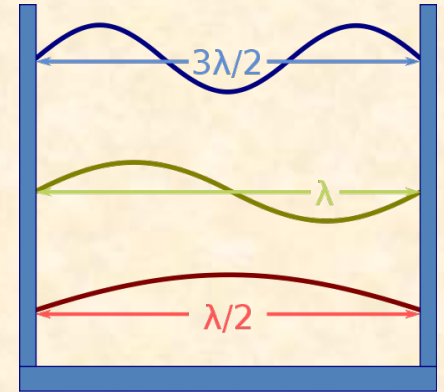
# Niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène

- Résolution de l'équation de Schrödinger  
=> chaque orbite correspond à une énergie différente  
=> « Niveaux d'énergie »
- Pour passer d'un niveau d'énergie à un autre l'électron doit changer d'énergie c'est à dire émettre ou absorber un photon...



# Raies de Balmer et série de Lyman

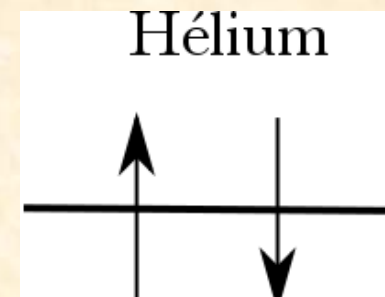
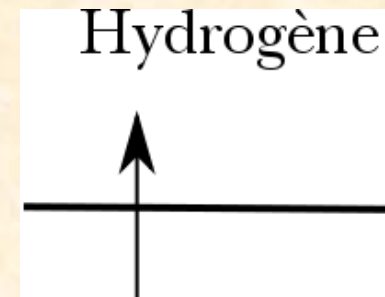
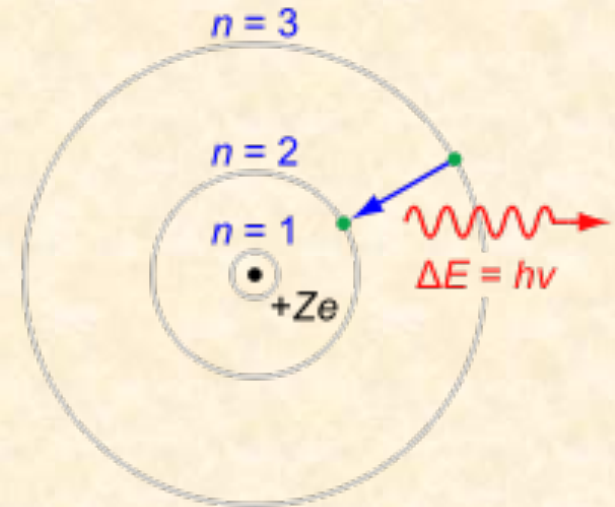
- Les séries de Balmer et de Lyman correspondent donc à un électron passant d'une orbite à une autre et émettant (ou absorbant) un photon.



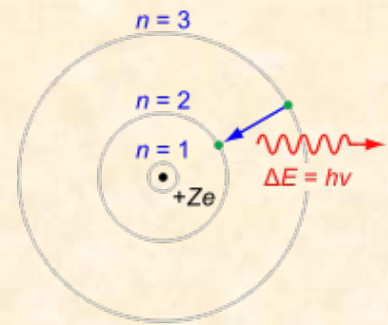


# Atomes d'hydrogène et d'Hélium au repos

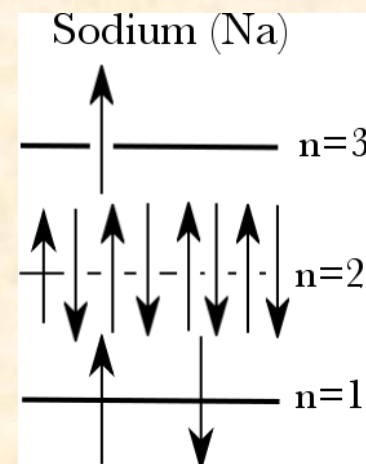
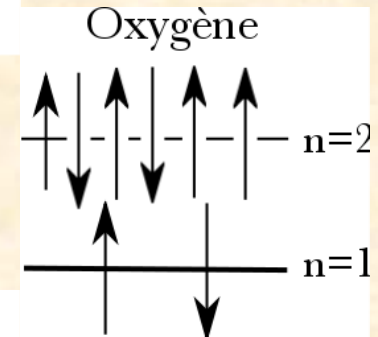
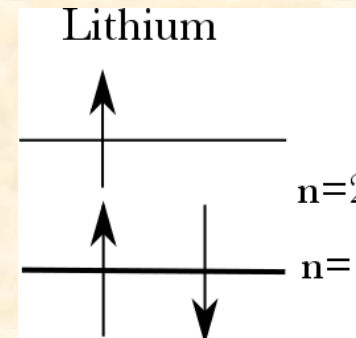
- L'atome d'hydrogène est constitué d'un seul proton et d'un seul électron.
- Au « repos » cet électron se met sur la « première » orbite ( $n=1$ ) autour de l'atome.
- Le second atome de la table périodique est l'Hélium, constitué le plus souvent de 2 neutrons et 2 protons.
- Au « repos » les deux électrons de l'Hélium se mettent sur l'orbite la plus basse (mais inversé l'un par rapport à l'autre).
- Cette couche est maintenant pleine.



# Atomes plus complexes: Lithium, Oxygène, Sodium...

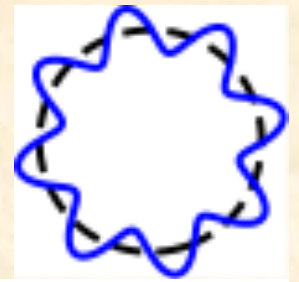


- Le troisième atome de la classification périodique est le Lithium (3 protons et 3 ou 4 neutrons):
  - 2 électrons sur  $n=1$
  - 3<sup>ème</sup> électron sur l'orbite suivante ( $n=2$ ).
- La couche  $n=2$  peut recevoir 4 paires différentes (soit 8 électrons).
- Le noyau d'oxygène possède 8 protons ( $Z=8$ ), il est donc entouré par 8 électrons:
  - 2 sur la première orbite ( $n=1$ )
  - 6 sur la deuxième orbite ( $n=2$ ) pour 8 places disponibles.
- Le Sodium a  $Z=11$ , il faut donc aussi mettre des électrons sur la 3<sup>ème</sup> couche...
- Et ainsi de suite:
  - Le Fer a des électrons sur la 4<sup>ème</sup> couche
  - L'Uranium a 7 couches électroniques.

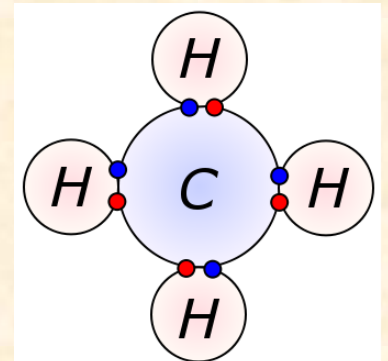
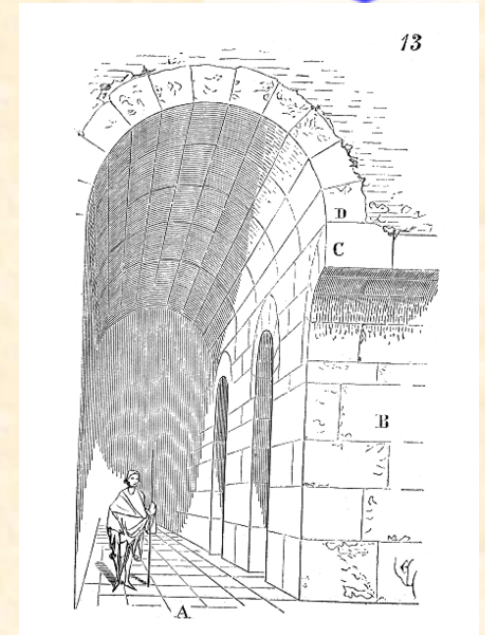




# Valence des atomes



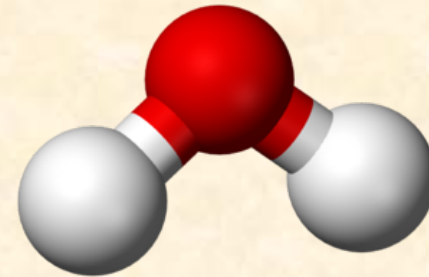
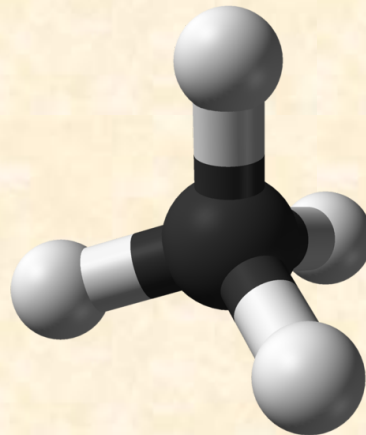
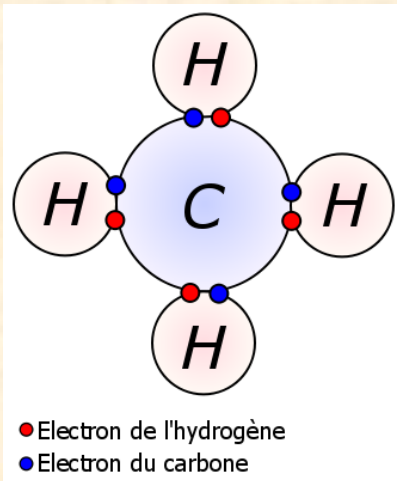
- Orbite remplie => difficile à casser (comme une clef de voûte).
- Atome avec orbite incomplète => Recherche atome(s) « complémentaires »
- Le nombre d'électrons de l'orbite (couche) extérieure détermine comment un atome s'associe avec d'autres  
=> « couche de valence »  
Propriété chimique très importante!



● Electron de l'hydrogène  
● Electron du carbone

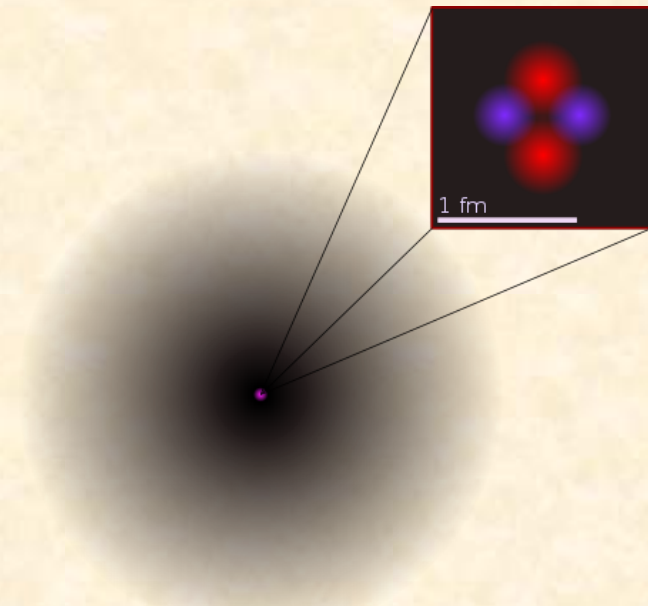
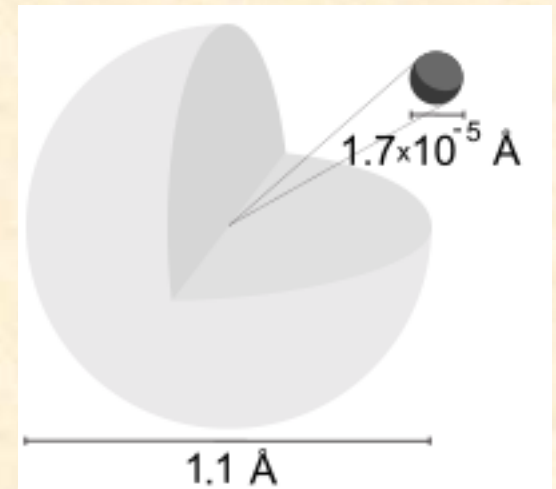
# Liaisons chimiques

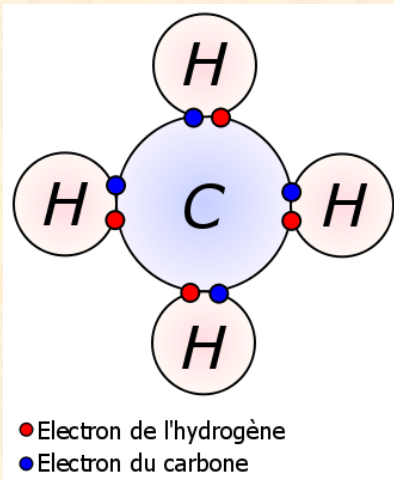
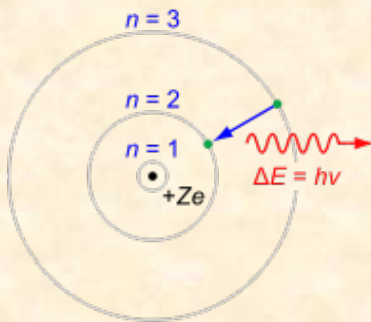
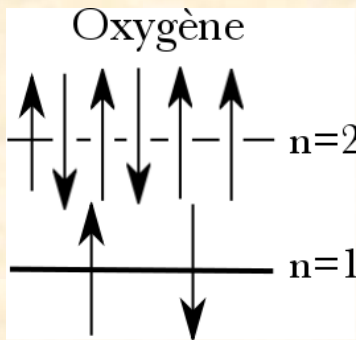
- Affinités entre atomes  
=> remplissage des couches électroniques.
- Exemples:  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $UF_6$
- Principe fondamental de la chimie!



# Quelques ordres de grandeur atomique

- Molécule de dihydrogène 125pm (125 avec 12 zéros devant)
- Molécule d'eau: 300 pm
- Atome d'Hydrogène: 50pm
- Atome d'Uranium: 175 pm
- Noyau atomique: quelques femtomètres (1 avec 15 zéros devant), 50 000 fois moins qu'un atome.





# Récapitulatif (physique atomique)

- Les électrons sont disposés autour d'un noyau atomique en couches (orbites).
- Le passage d'une couche à une autre requiert l'émission ou l'absorption d'énergie (photons).
- Les couches électroniques qui ne sont pas complètement remplies d'électrons déterminent les propriétés chimiques de l'atome.

# UN ÉTAGE PLUS BAS: LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE

Le noyau atomique

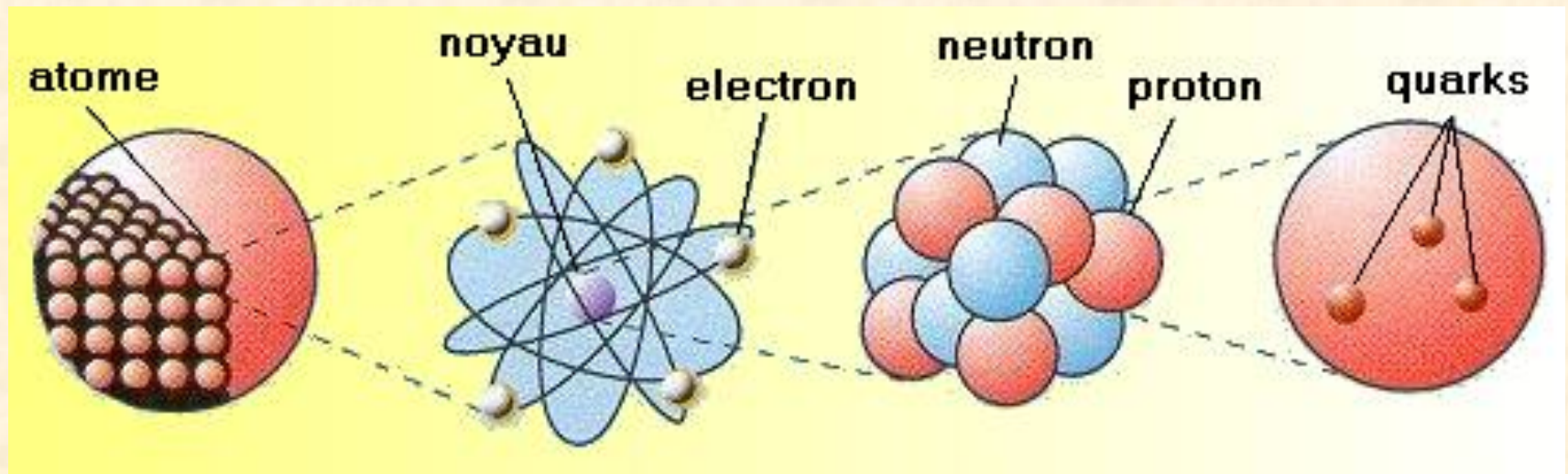
Radioactivité

Fission atomique et réaction en chaînes

L'énergie du soleil: la fusion atomique



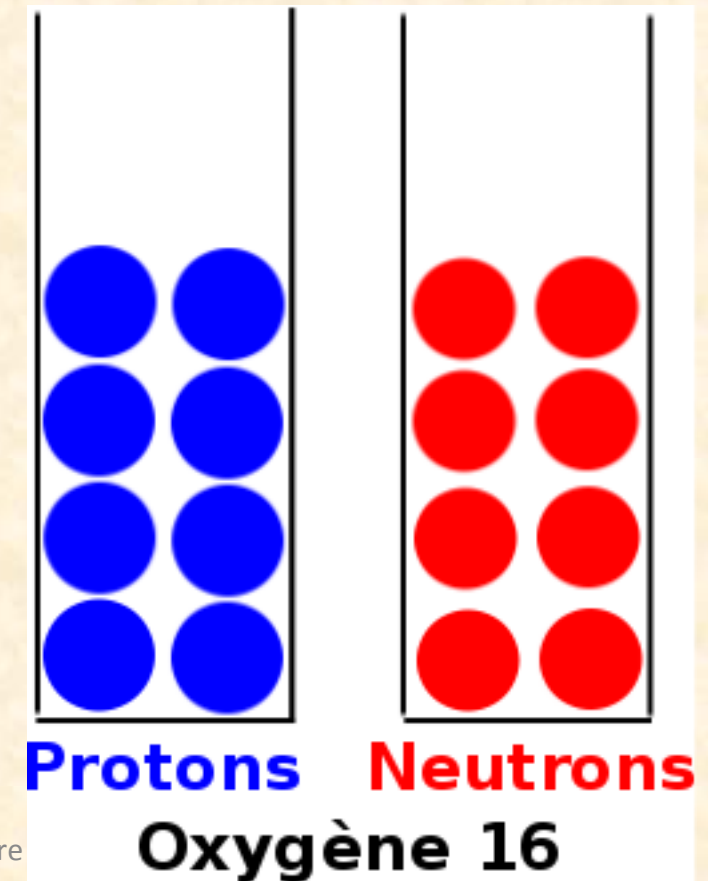
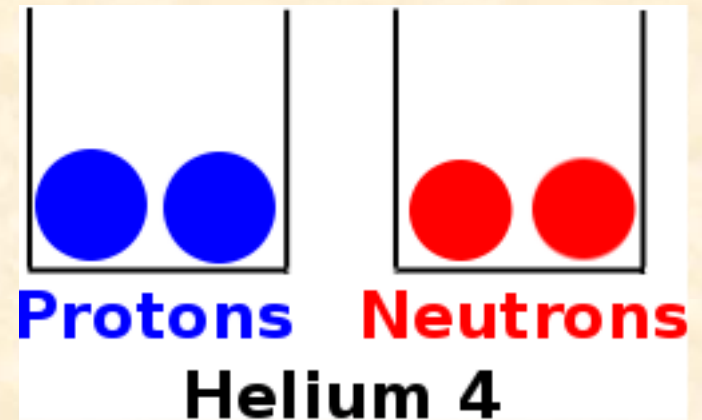
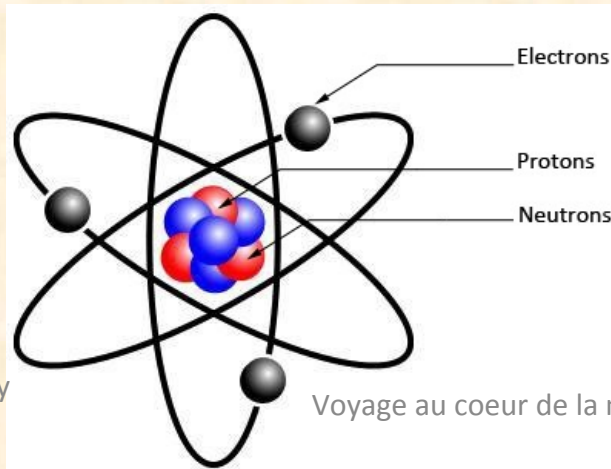
# De l'atome au noyau



- Noyau atomique  
=> Même principe que l'atome
- Déséquilibres => Radioactivité

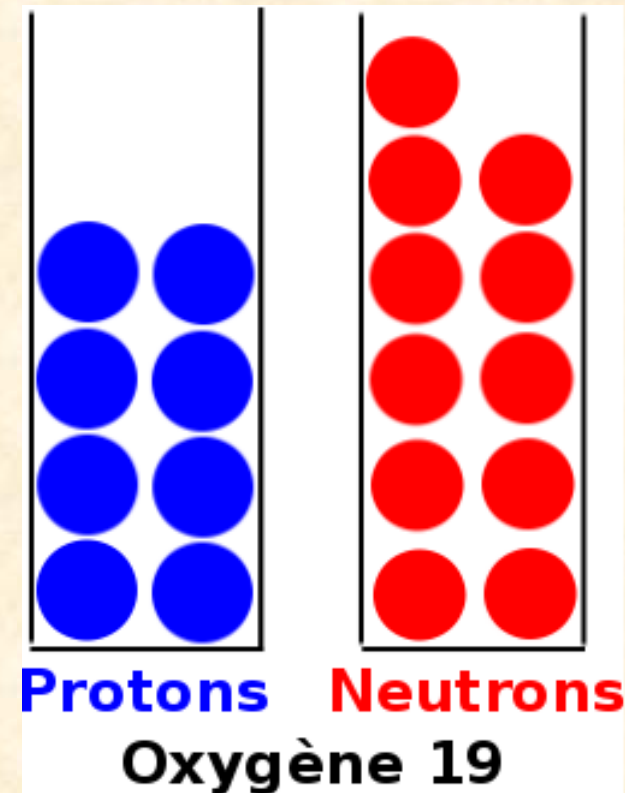
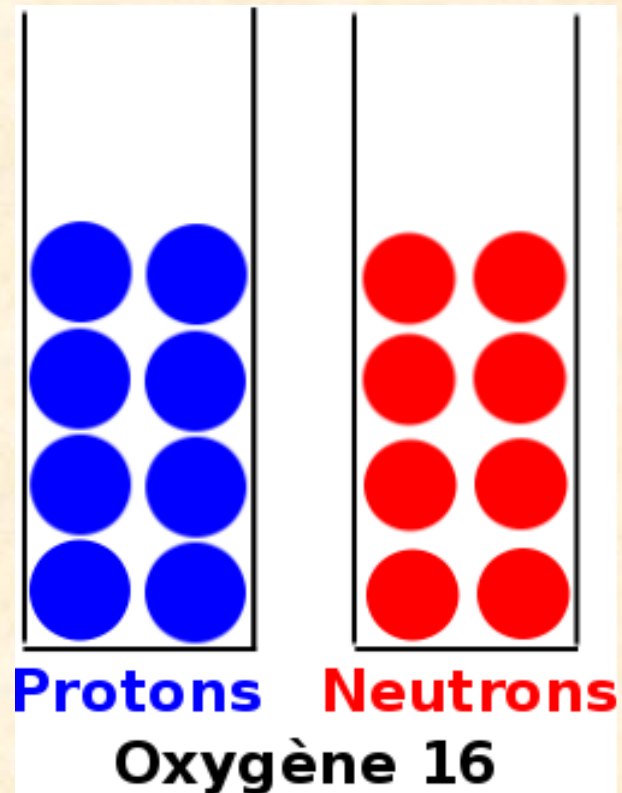
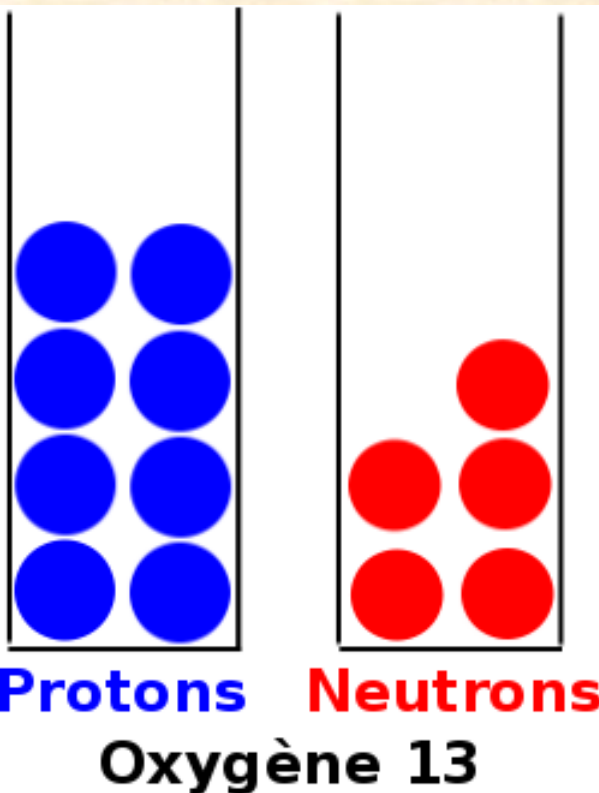
# Le noyau atomique

- Un noyau atomique est composé de protons et neutrons.
- Ces protons et ces neutrons « s'empilent » par paires sur des couches de plus en plus élevées, selon des règles très proches de celles qui s'appliquent pour les électrons.
- Protons et neutrons sont parfois appelés « nucléons ».



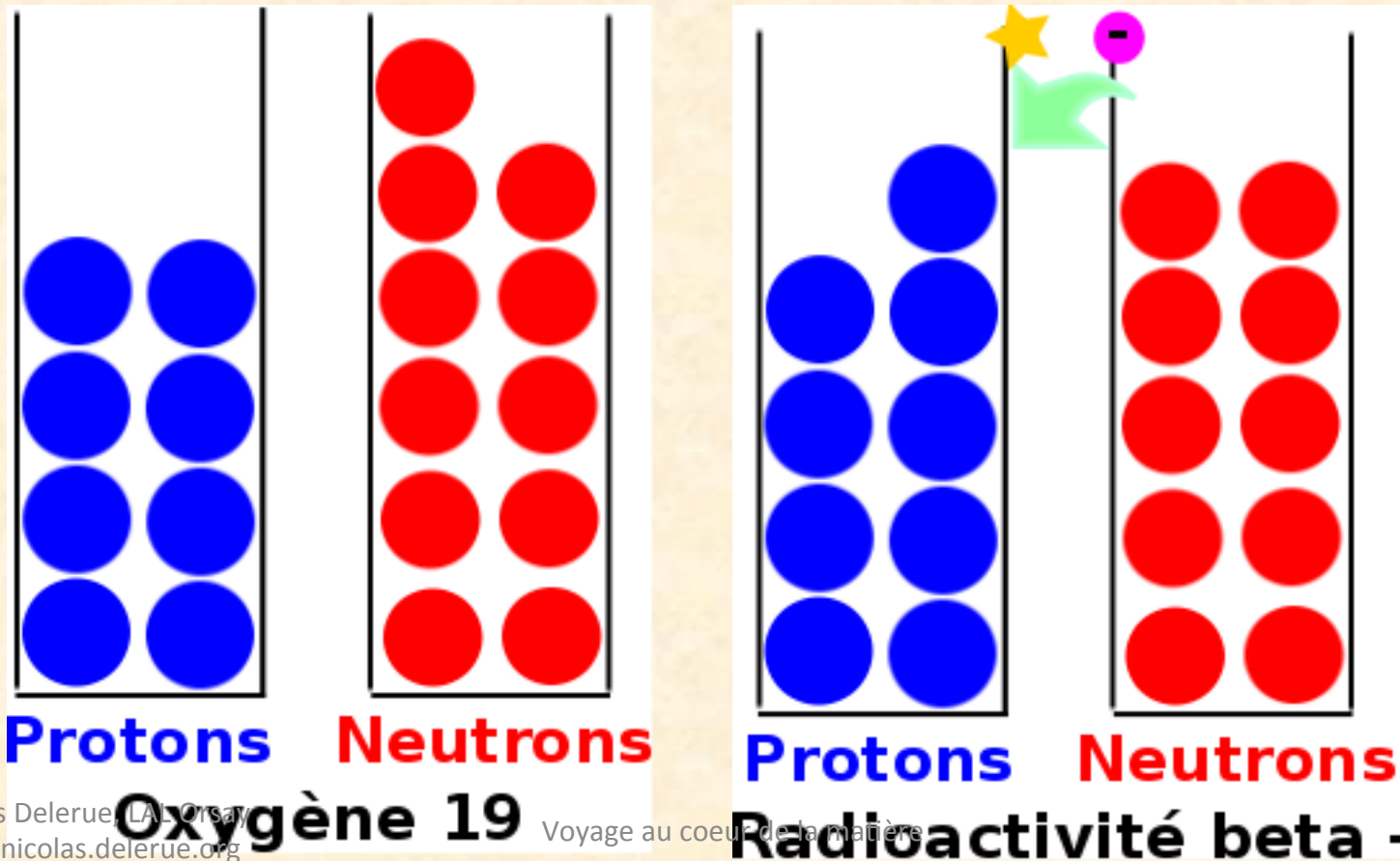
# Isotopes

- Des atomes avec le même nombre de protons mais des nombres différents de neutrons sont appelés « isotopes »: ils ont les mêmes propriétés chimiques mais pas la même masse.
- Exemples:
  - Oxygène-13 (8 protons et 5 neutrons), Oxygène-16 (8 protons et 8 neutrons) et Oxygène-19 (8 protons et 11 neutrons).
  - Uranium-235 (92 protons et 143 neutrons) et Uranium-238 (92 protons et 146 neutrons).



# Noyau hors d'équilibre

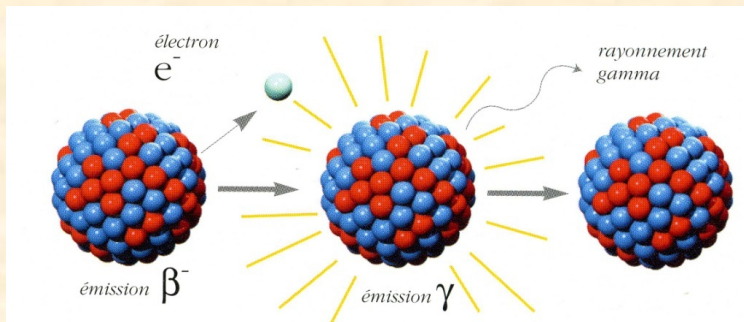
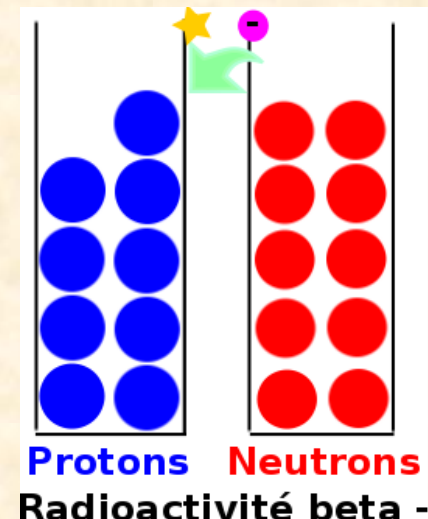
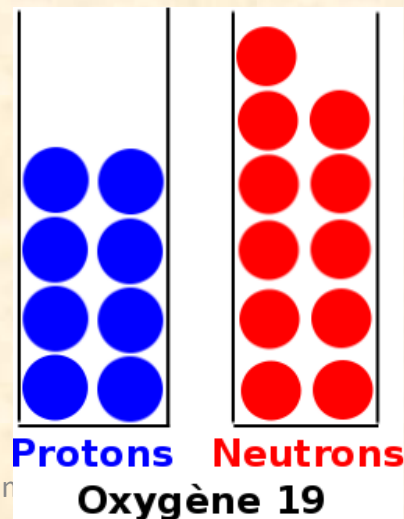
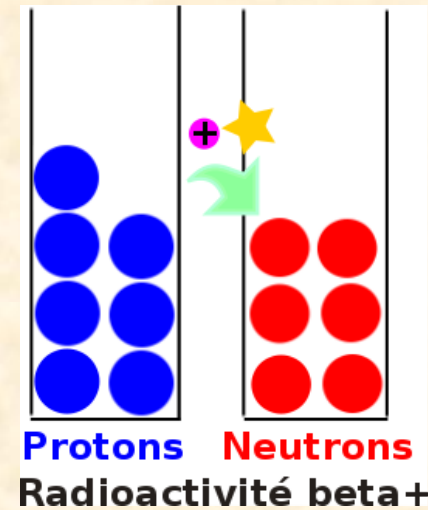
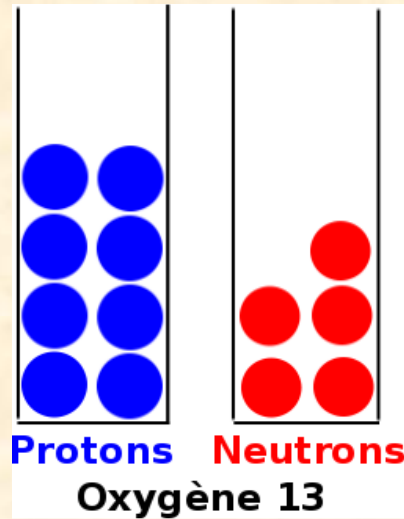
- Dans un noyau il faut que le nombre de protons et de neutrons soit équilibré, sinon le noyau va être instable: des particules du noyau vont se transformer.



# Les différents types de radioactivité:

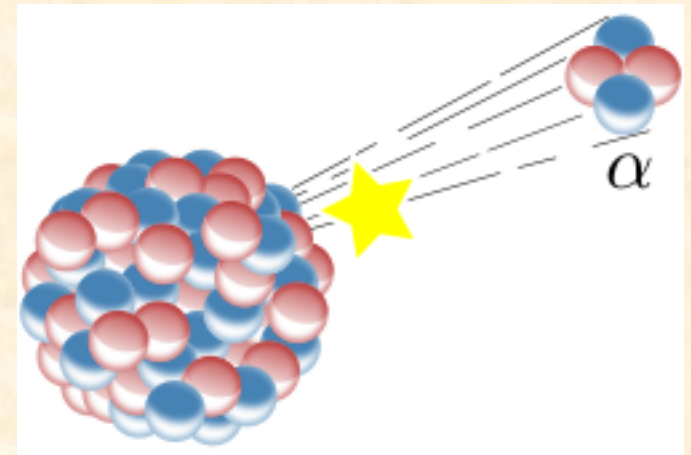
## La radioactivité beta + ou beta -

- Trop de protons  
=>  $p \rightarrow n + e^+ + \text{énergie}$   
Radioactivité beta +
- Trop de neutrons  
=>  $n \rightarrow p + e^- + \text{énergie}$   
Radioactivité beta -
- Plusieurs désintégrations beta peuvent se succéder en cas de fort déséquilibre.
- Une petite particule invisible appelée neutrino est aussi émise au même moment.



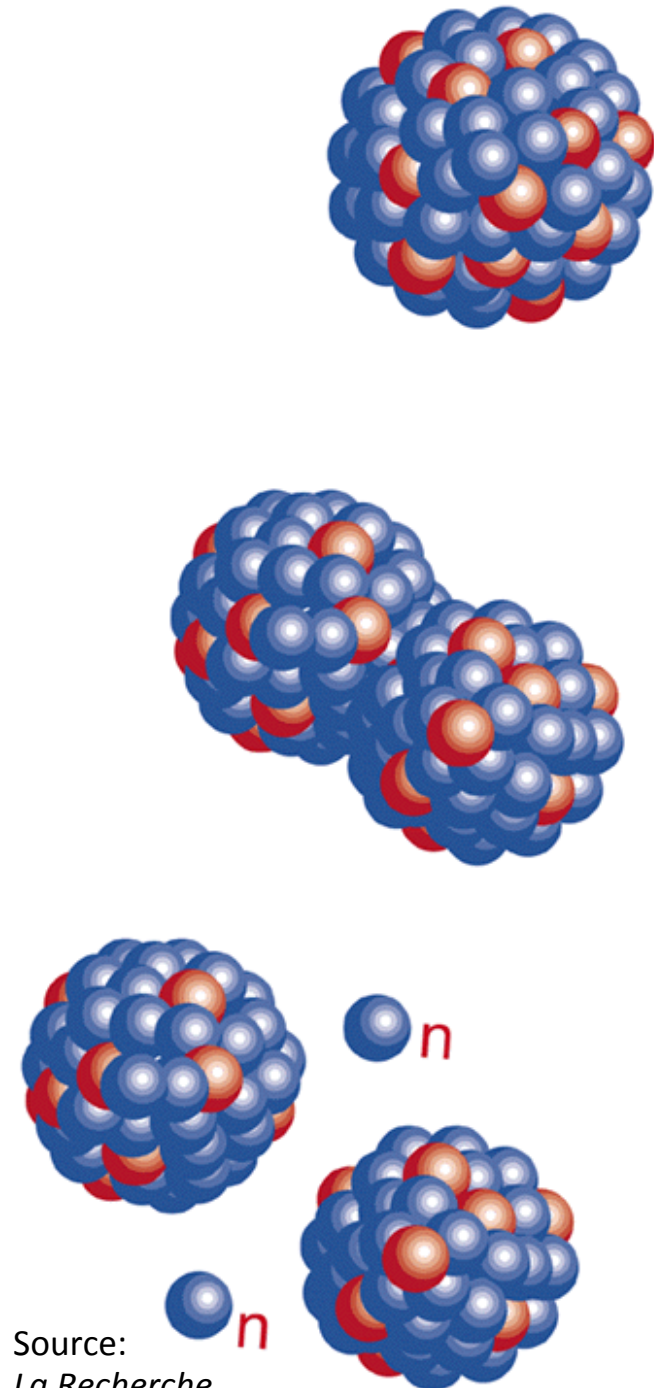
# Radioactivité alpha

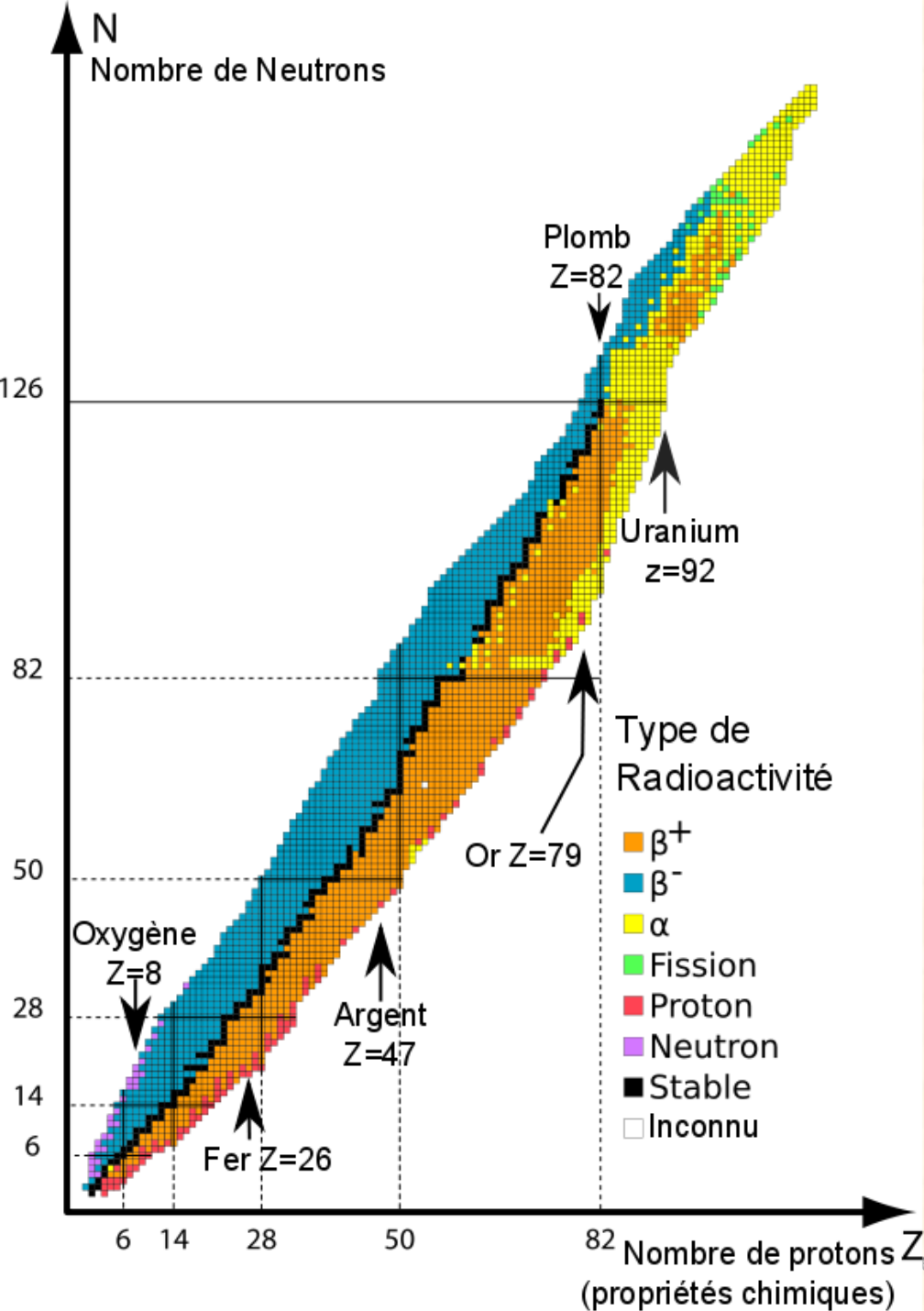
- Quand un noyau contient beaucoup de nucléons il peut perdre d'un seul coup 2 protons et 2 neutrons.
- En faisant cela il émet aussi de l'énergie.
- Les 2 protons et les 2 neutrons sont éjectés en même temps sous la forme d'une particule « alpha » (noyau d'Hélium-4 sans électrons).
- Cette forme de radioactivité s'appelle « radioactivité alpha ».



# Fission spontanée

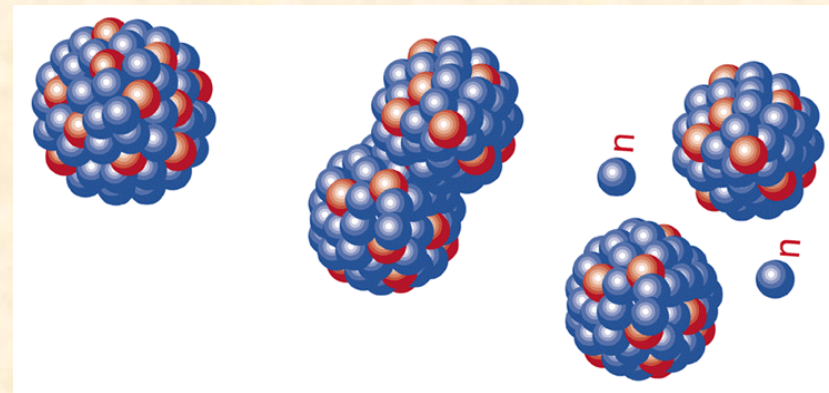
- Lorsqu'un noyau est très gros les forces liant les nucléons ensemble sont très faibles.
- Le noyau peut alors se casser en plusieurs morceaux.
- Il faut moins d'énergie pour lier des petits noyaux que des très gros  
=> émission d'énergie.
- Les petits noyaux ont aussi une proportion plus faible de neutrons  
=> émission de neutrons.



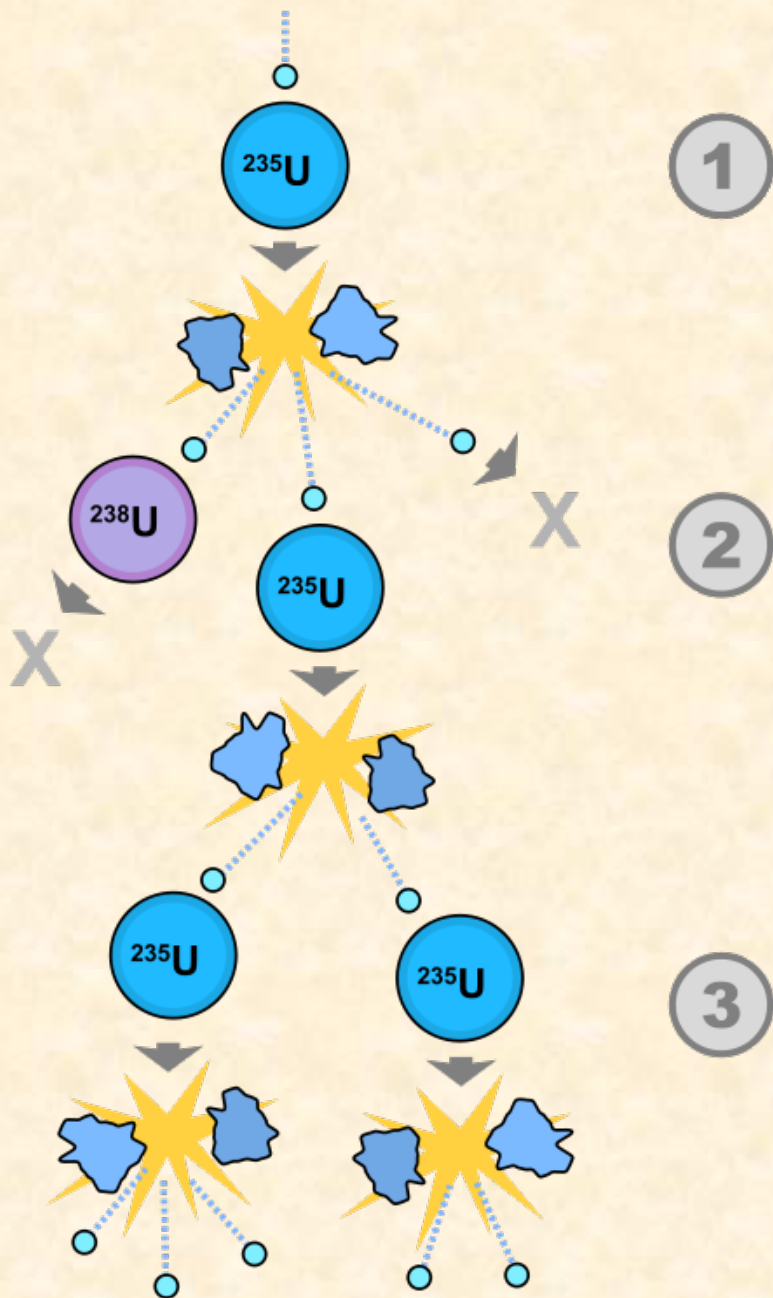


# La fission atomique

- Un noyau peut se casser en morceaux.
- Cela s'appelle une « fission atomique »
- Dans certains cas il libère de l'énergie et des neutrons.





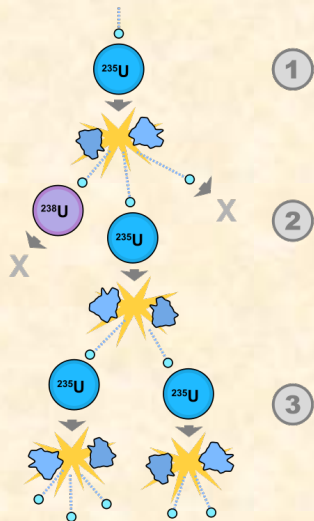
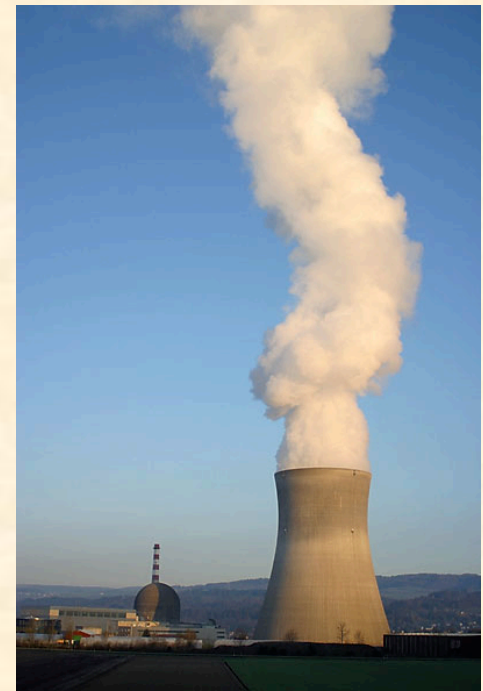


# Réaction en chaîne

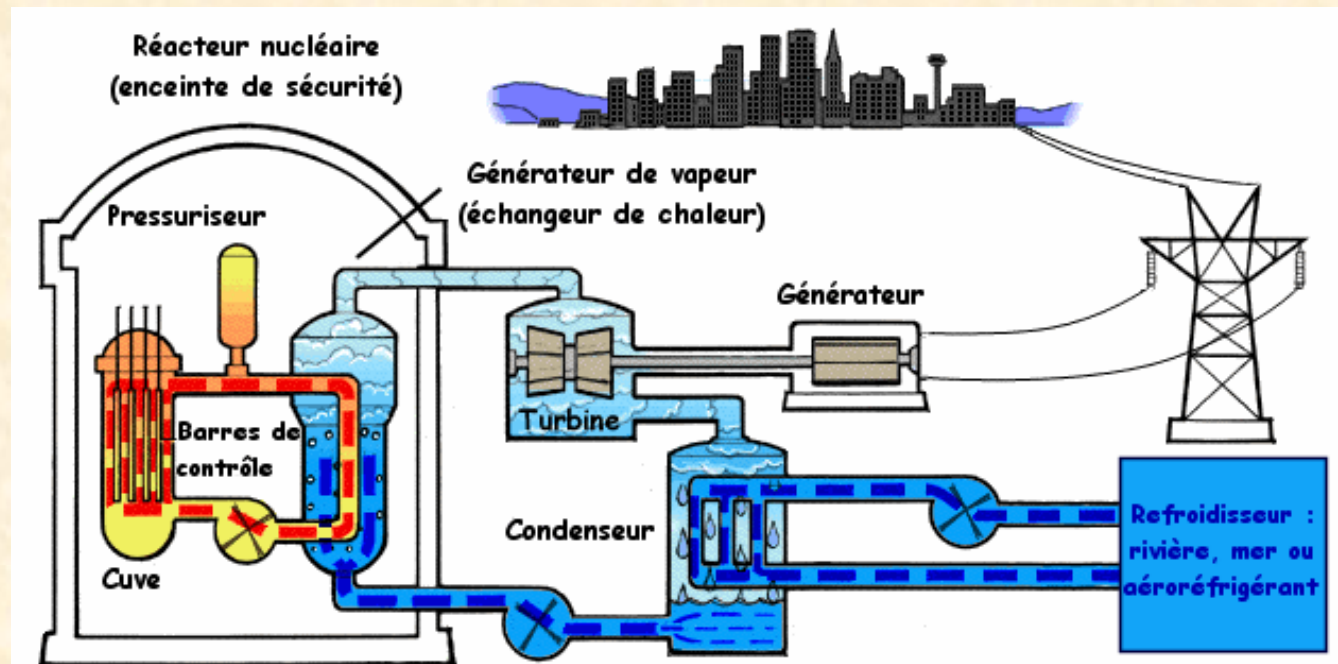
- Lorsqu'un noyau se casse, il émet des neutrons.
- Ces neutrons peuvent aller casser un ou plusieurs autres noyaux.
- Cela s'appelle une réaction en chaîne.
- Lors de cette réaction en chaîne de la chaleur est produite.

# Les centrales nucléaires

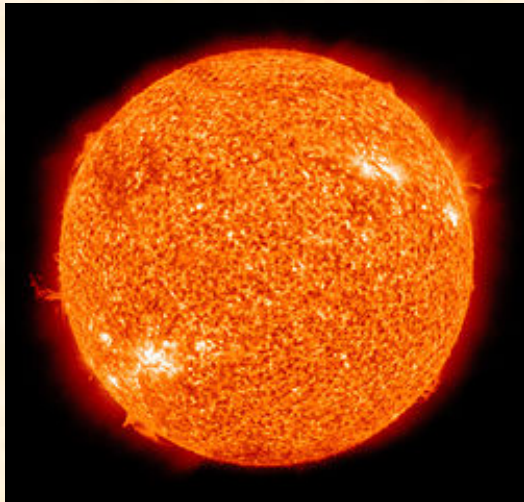
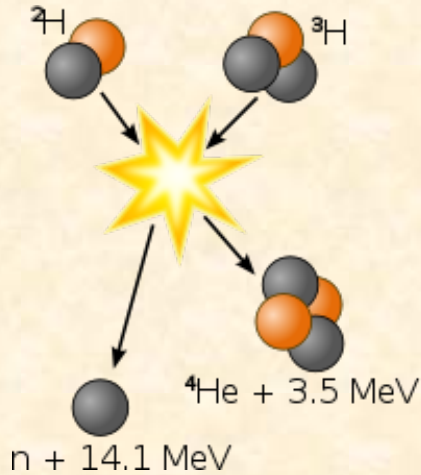
- Une centrale nucléaire utilise une réaction en chaîne entre atomes d'Uranium pour produire de la chaleur.
- Cette chaleur est utilisée pour chauffer de l'eau.
- Des barres de contrôle sont utilisées pour empêcher la réaction de s'emballer.



Nicolas Delerue, LAL Orsay  
<http://nicolas.delerue.org>



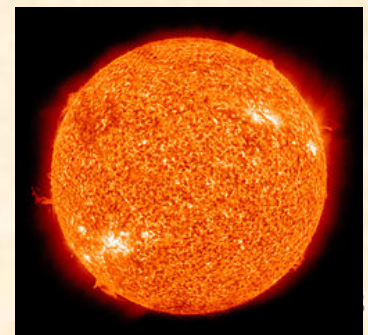
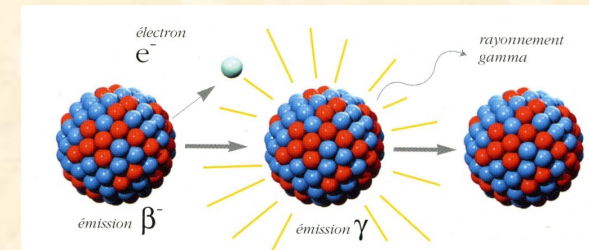
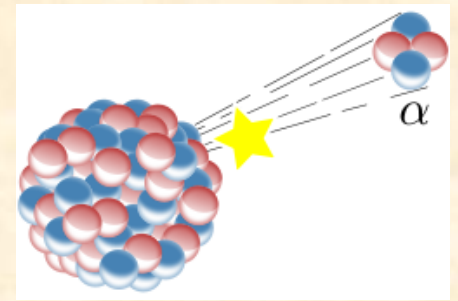
# L'énergie du soleil: la fusion atomique



- Les petits noyaux atomiques sont difficiles à casser.
- Par contre ils aiment bien se mettre ensemble.
- Quand deux petits noyaux fusionnent, ils dégagent de l'énergie.
- C'est sur ce principe que fonctionne le soleil.

# Récapitulatif (physique nucléaire)

- Un noyau atomique est formé de protons et de neutrons.
- Lorsqu'un noyau est déséquilibré, il peut émettre des protons ou des neutrons pour se rapprocher de l'équilibre.  
=> Radioactivité
- Lorsqu'un gros noyau se casse, il émet de la chaleur. C'est ce principe qui est utilisé dans les centrales nucléaires.
- Les petits noyaux au contraire préfèrent se mettre ensemble et « fusionner », c'est ce qui se passe dans le soleil.

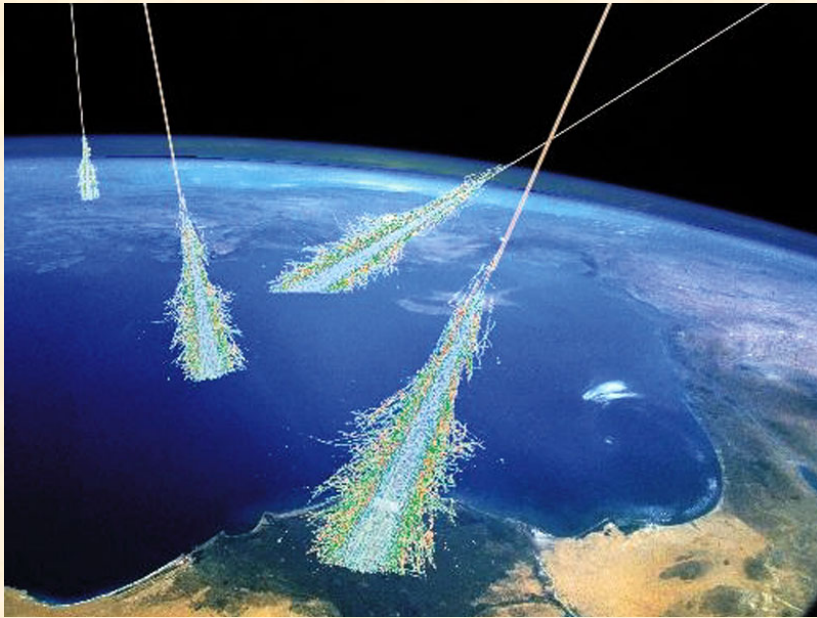


# A LA FRONTIÈRE DU SAVOIR: LA PHYSIQUE DES PARTICULES

Nouvelles particules

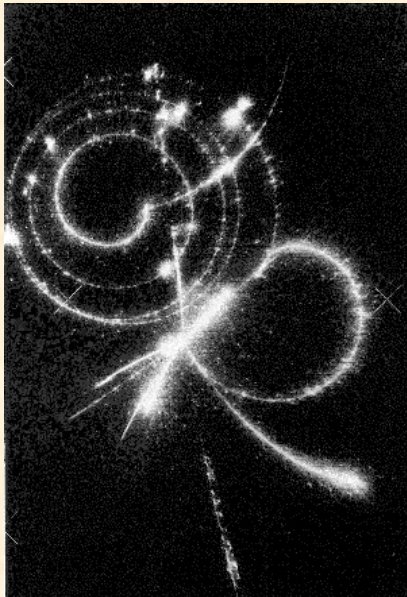
Le modèle standard

Le boson de Higgs



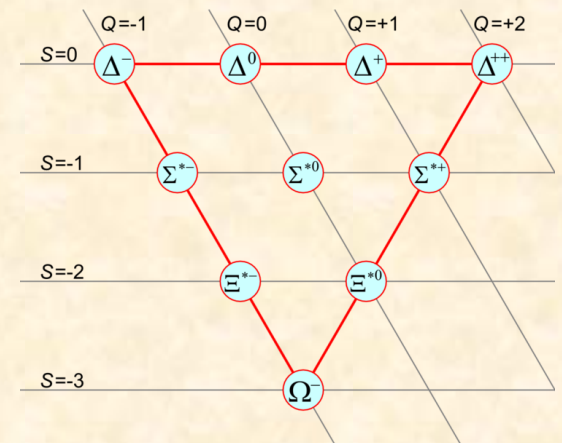
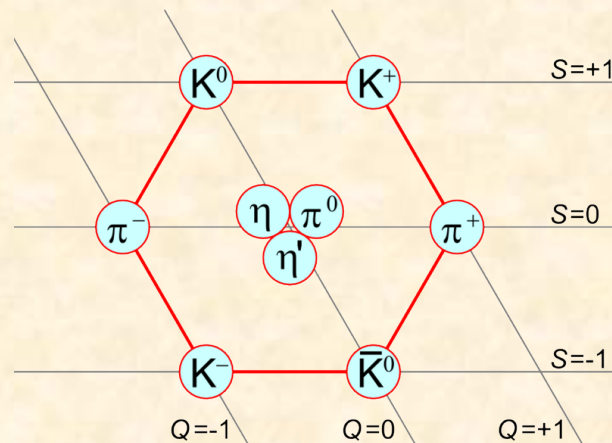
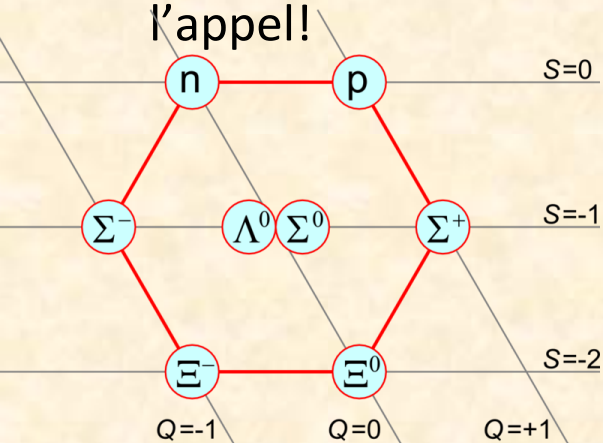
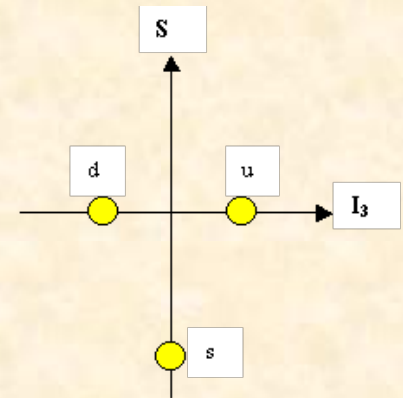
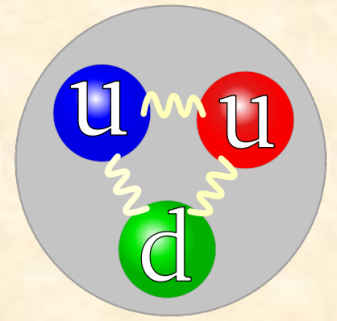
# Des particules venues du ciel

- La terre est bombardée en permanence de particules venues du ciel.
- Ces particules sont appelées « rayons cosmiques ».
- Après la seconde guerre mondiale l'étude de ces rayons cosmiques a permis de découvrir de nouvelles particules!

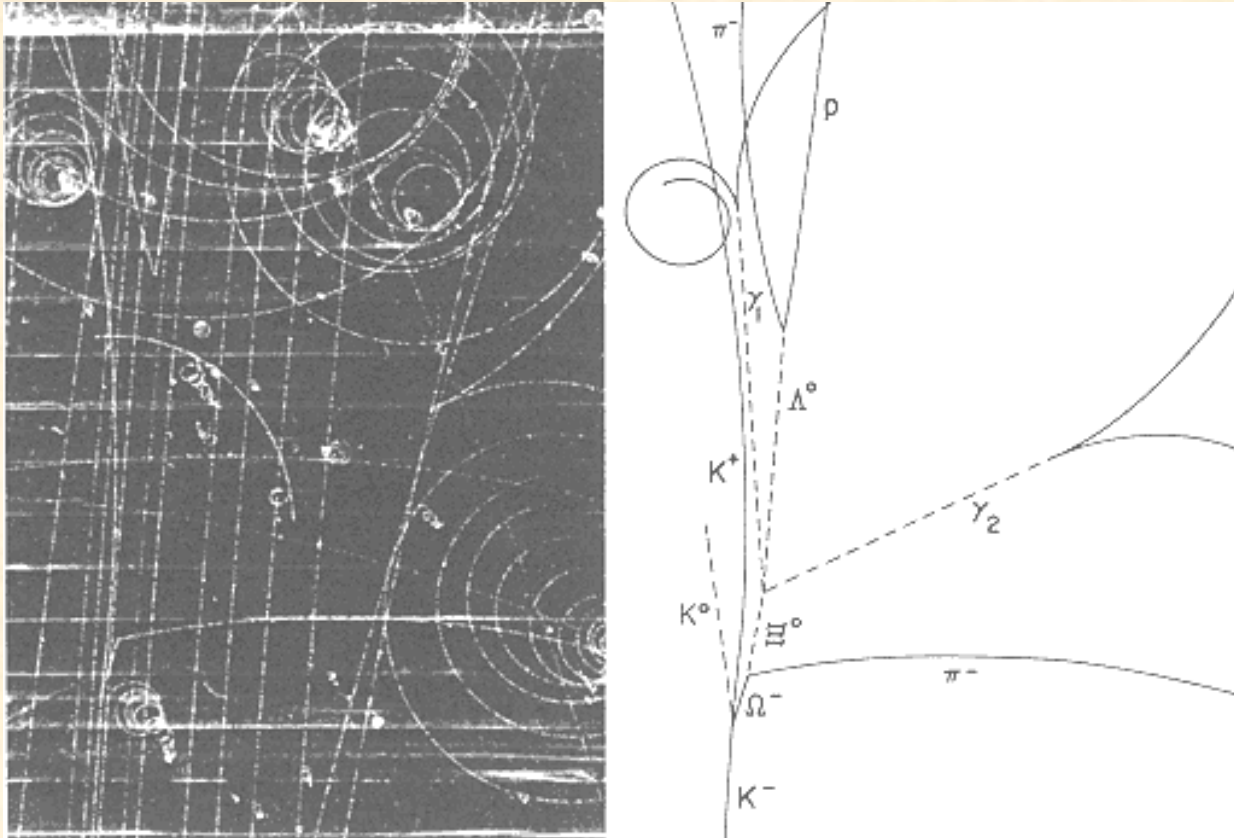


# Classification des particules

- Dans les années 1960 ces particules étaient tellement nombreuses qu'un classement était devenu nécessaire.
- Murray Gell-Mann décida de s'attacher à cette tâche en regroupant les particules en fonction de certaines de leur propriétés.
- Il remarqua qu'il obtenait des motifs géométriques bien décrits en mathématique par ce qui s'appelle la théorie des groupes.
- Ce modèle repose sur l'existence de 3 particules fondamentales appelées « quarks ».
- Cependant certaines particules étaient manquantes à l'appel!



# Découverte du $\Omega^-$



- L'une des particules manquantes et prédites par Gell-Man étant le  $\Omega^-$ .
- Celui-ci fut découvert en juin 1963  
=> validation du modèle de Gell-Mann (Prix Nobel 1969)



# Le modèle des quarks

- Plus tard de nouvelles particules furent découvertes, amenant le nombre total de quarks à 6.
- Le dernier de ces quarks fut découvert seulement en 1995.
- Ces quarks peuvent être rangés en 3 familles mais nous ne savons pas si cela reflète une sous-structure.

**Composants élémentaires de la matière**

10<sup>26</sup> m : TERRE (Planète)

1 m : OBJET (Chaise)

10<sup>-8</sup> m : CRISTAL (Réseau cristallin)

10<sup>-10</sup> m : ATOME (Noyau et électrons)

10<sup>-14</sup> m : NOYAU ATOMIQUE (Protons et neutrons)

10<sup>-16</sup> m : PROTON (u u d)

10<sup>-16</sup> m : NEUTRON (u d d)

10<sup>-18</sup> m : AFFIRMÈRE (u u d)

**LEPTONS** (Particules insensibles à l'interaction forte)

1 <sup>re</sup> famille	2 <sup>e</sup> famille	3 <sup>e</sup> famille
e (électron)	μ (muon)	τ (tau)
ν <sub>e</sub> (neutrino électronique)	ν <sub>μ</sub> (neutrino muonique)	ν <sub>τ</sub> (neutrino tauique)

**QUARKS** (S'assemblent en triplets ou en paires qu'ils forment pour former les hadrons)

1 <sup>re</sup> famille	2 <sup>e</sup> famille	3 <sup>e</sup> famille
u (haut)	c (charm)	t (top)
d (bas)	s (strange)	b (beauté)

**Les interactions fondamentales**

Il existe des PARTICULES ASSOCIÉES aux interactions fondamentales permettant leur propagation.

<b>Gravitation</b> Attraction universelle : planètes, galaxies. <b>GRAVITON ?</b>
<b>Interaction faible</b> Désintégration radioactive. Z <sup>0</sup> , W <sup>+</sup> , W <sup>-</sup>
<b>Interaction électromagnétique</b> Électrons, magnétisme, cohésion de l'atome et du cristal, chimie. <b>PHOTON</b>
<b>Interaction forte</b> Cohésion des protons et des neutrons. <b>GLUON</b>

À chaque particule correspond une antiparticule qui possède une charge opposée. La charge électrique d'une antiparticule est l'opposé de la particule correspondante.

Les 3 familles de la première famille sont associées aux interactions électromagnétiques. Les 3 familles de la deuxième famille sont associées aux interactions faibles. Les 3 familles de la troisième famille sont associées aux interactions fortes.

# Composants élémentaires de la matière



	1 <sup>re</sup> famille	2 <sup>e</sup> famille	3 <sup>e</sup> famille
<p><b>LEPTONS</b></p> <p>Particules insensibles à l'interaction forte.</p>	<p><b>e</b></p> <p>électron</p> <p><math>m_e = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}</math> <math>q_e = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}</math></p> <p><math>\nu_e</math></p> <p>neutrino e</p>	<p><b><math>\mu</math></b></p> <p>muon</p> <p><math>m_\mu = 1.883 \cdot 10^{-28} \text{ kg}</math> <math>q_\mu = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}</math></p> <p><math>\nu_\mu</math></p> <p>neutrino muon</p>	<p><b><math>\tau</math></b></p> <p>tau</p> <p><math>m_\tau = 1.777 \cdot 10^{-27} \text{ kg}</math> <math>q_\tau = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}</math></p> <p><math>\nu_\tau</math></p> <p>neutrino tau</p>
<p><b>QUARKS</b></p> <p>S'assemblent en triplets ou en paires quark-antiquark pour former les nombreuses particules subatomiques.</p>	<p><b>u</b></p> <p>haut / up</p> <p><math>m_u = 2.2 \cdot 10^{-28} \text{ kg}</math> <math>q_u = +2/3 \cdot e</math></p> <p><b>d</b></p> <p>bas / down</p> <p><math>m_d = 3.3 \cdot 10^{-28} \text{ kg}</math> <math>q_d = -1/3 \cdot e</math></p>	<p><b>c</b></p> <p>charm / charm</p> <p><math>m_c = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}</math> <math>q_c = +2/3 \cdot e</math></p> <p><b>s</b></p> <p>strange / strange</p> <p><math>m_s = 2.9 \cdot 10^{-28} \text{ kg}</math> <math>q_s = -1/3 \cdot e</math></p>	<p><b>t</b></p> <p>top</p> <p><math>m_t = 1.73 \cdot 10^{-26} \text{ kg}</math> <math>q_t = +2/3 \cdot e</math></p> <p><b>b</b></p> <p>bas / beauty / bottom</p> <p><math>m_b = 4.18 \cdot 10^{-28} \text{ kg}</math> <math>q_b = -1/3 \cdot e</math></p>

## Les interactions fondamentales

Il existe des **PARTICULES ASSOCIÉES** aux interactions fondamentales permettant leur propagation.

- Gravitation**  
 Attraction universelle, planètes, galaxies.  
**GRAVITON ?**
- Interaction faible**  
 Désintégrations radioactives.  
**Z<sup>0</sup>, W<sup>+</sup>, W<sup>-</sup>**
- Interaction électromagnétique**  
 Électricité, magnétisme, cohésion de l'atome et du cristal, chimie.  
**PHOTON**
- Interaction forte**  
 Cohésion des protons et des noyaux.  
**GLUON**

Les 4 forces fondamentales sont indispensables au fonctionnement du soleil (et des étoiles) :

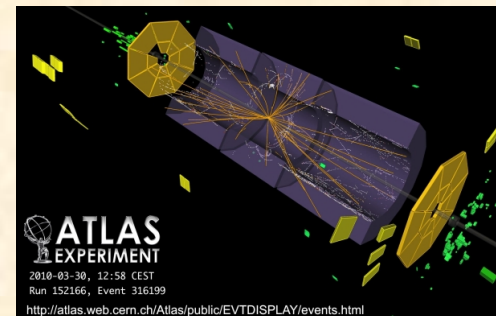
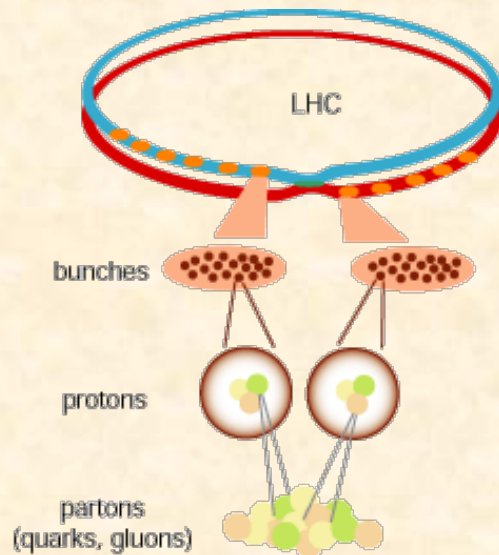
- formation de l'étoile causée par la gravitation;
- réactions de fusion nucléaire avec l'interaction faible et forte;
- production de lumière-interaction électromagnétique.

Les 4 particules de la première famille sont présentes dans le soleil qui envoie sur la terre un flux intense de photons et de neutrons.

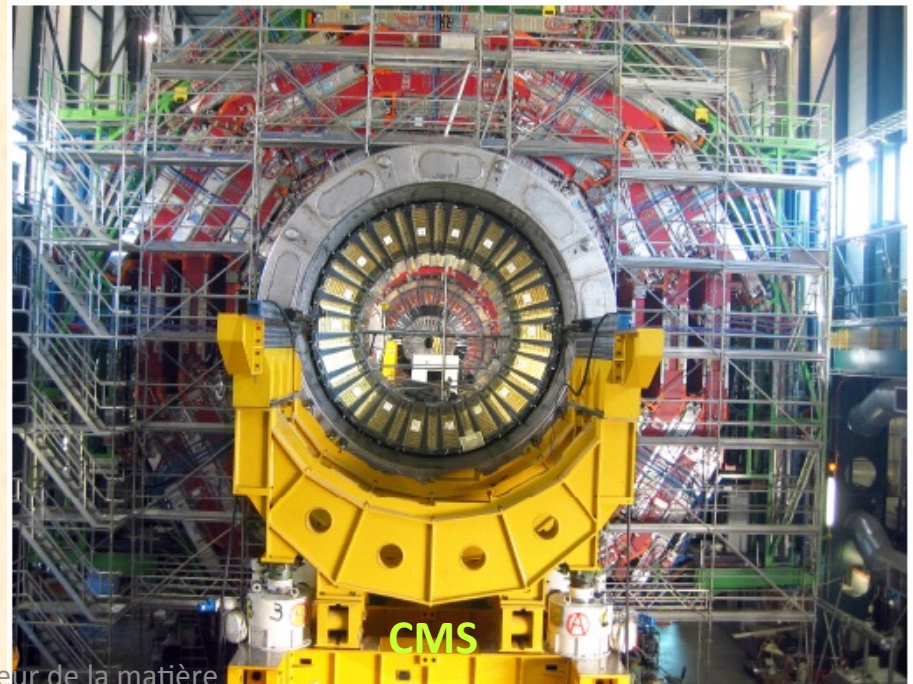
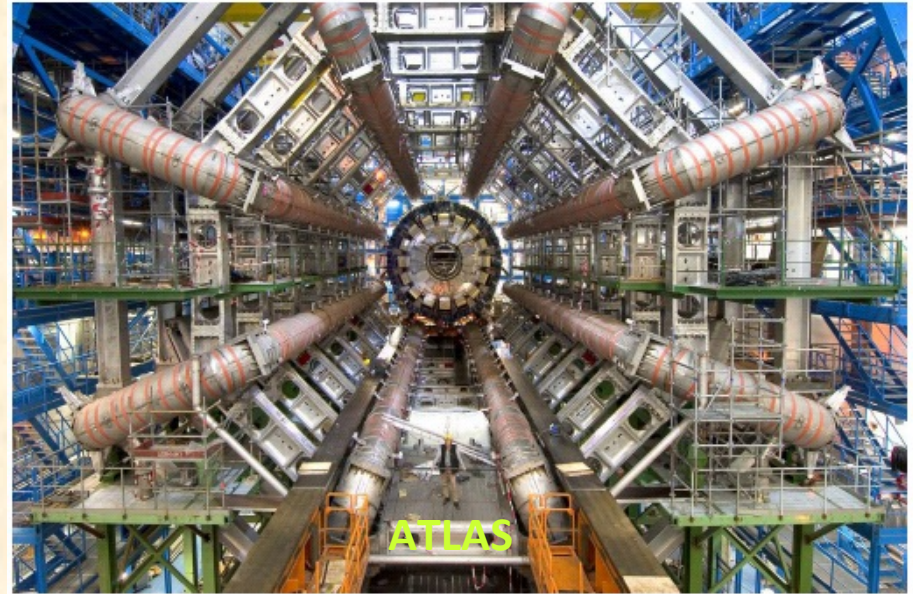
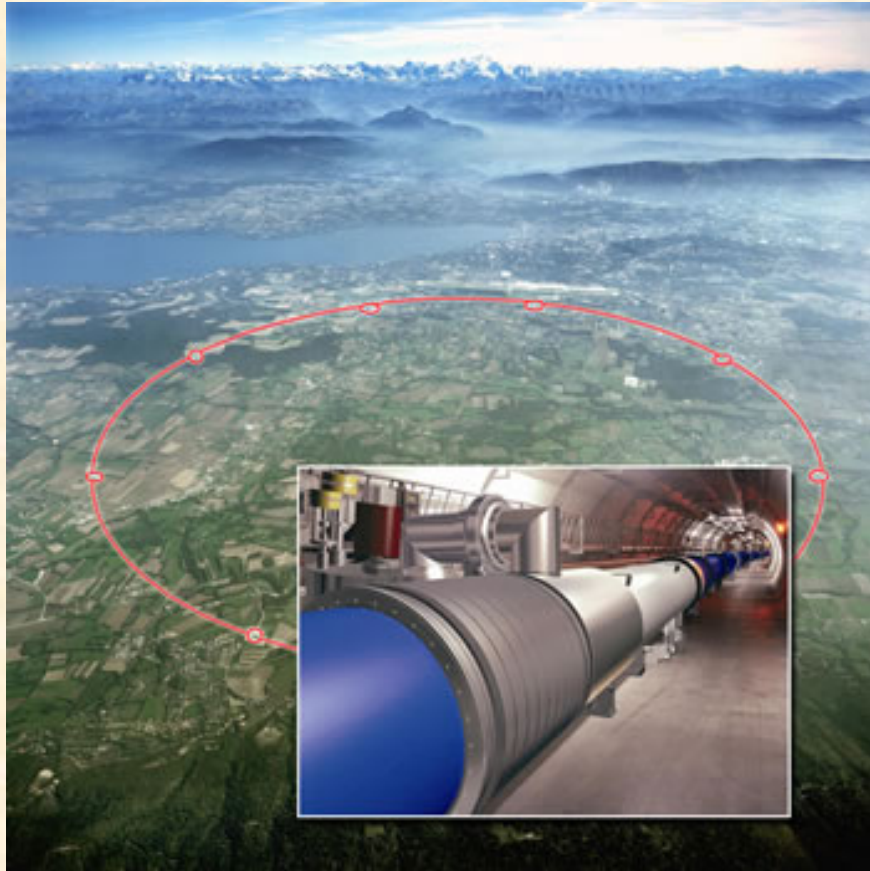
À chaque particule correspond une antiparticule aux propriétés quasi-identiques. La charge électrique d'une antiparticule est l'opposé de la particule correspondante.

# A la recherche de nouvelles particules...

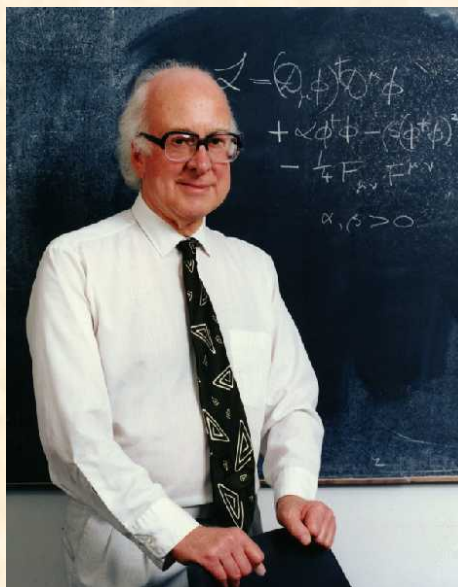
- Pour mieux comprendre l'infiniment petit, des accélérateurs de particules sont utilisés pour « casser » les particules et tenter d'en trouver de nouvelles.
- Le plus grand de ces accélérateurs est le LHC qui fait 27km de circonférence près de Genève.



# Le LHC et ses détecteurs en construction



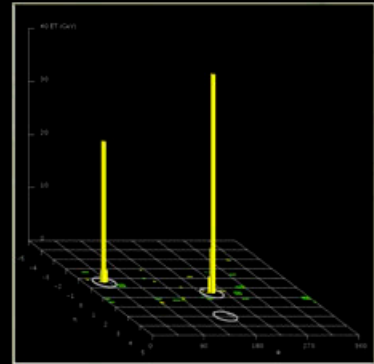
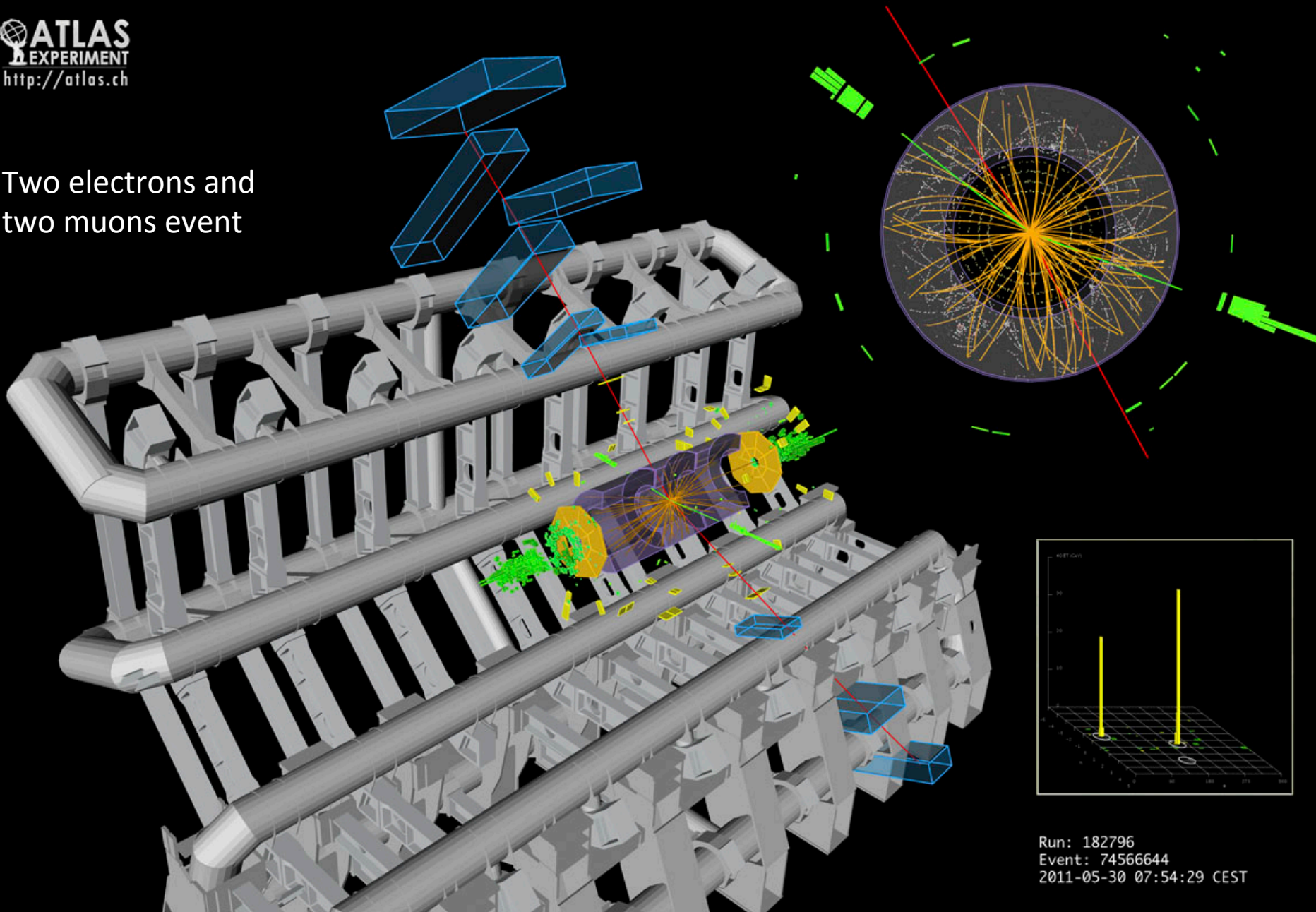
# Le boson de (Brout Englert) Higgs



Adapted from D. Miller,  
© CERN

Voyage au coeur de la matière

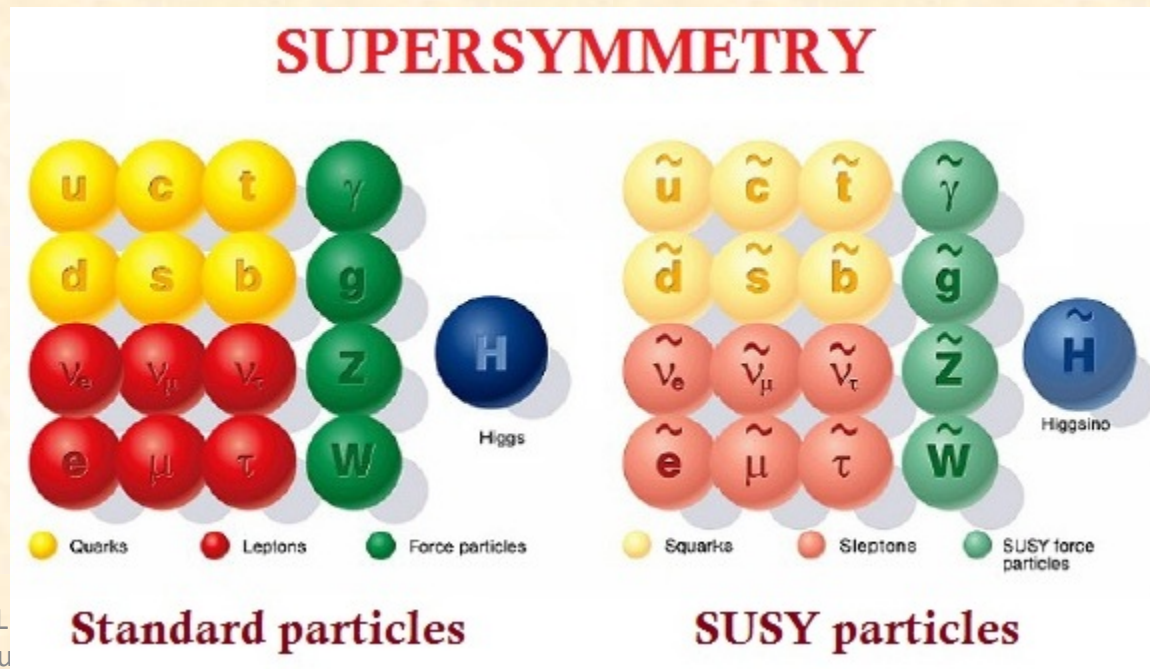
# Two electrons and two muons event



Run: 182796  
Event: 74566644  
2011-05-30 07:54:29 CEST

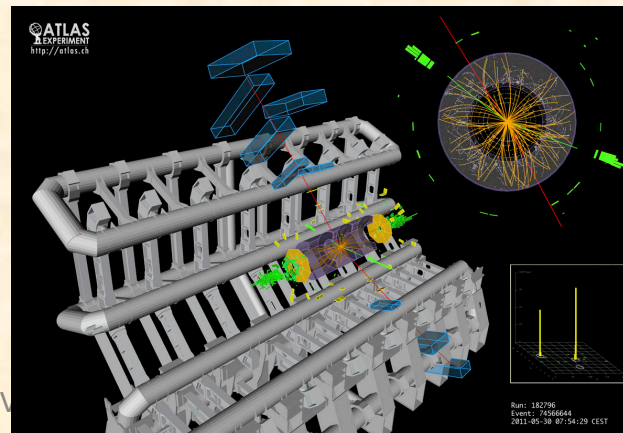
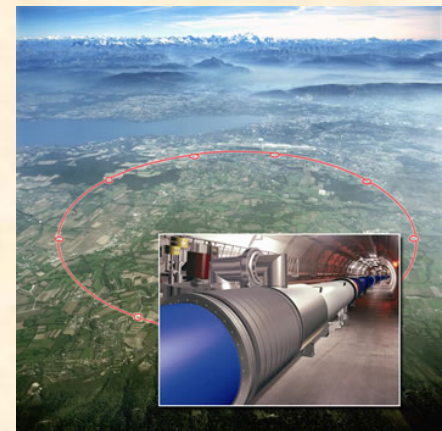
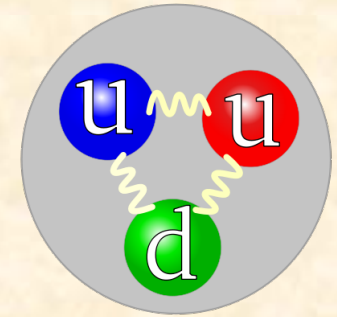
# Au delà du modèle standard

- Il reste des points que nous ne pouvons pas expliquer (pourquoi trois générations?,...)
- Des théories prédisent des « extensions » au modèle standard.
- Le LHC permettra de tester (dans certaines limites) ces théories.



# Récapitulatif (physique des particules)

- Protons et neutrons sont eux-mêmes formés de particules appelées quarks.
- Le modèle des quarks a été validé expérimentalement en utilisant les plus gros instruments scientifiques qui existent: des accélérateurs de particules.
- Récemment une nouvelle particule a été découverte.
- Certains aspects du modèle standard indiquent qu'il existe peut-être un ensemble de particules plus vaste.





# CE QU'IL FAUT RETENIR

Etranges propriétés de la matière

Modèle atomique

Modèle nucléaire

# Etranges propriétés de la matière



- Aux échelles les plus petites que nous pouvons explorer, la matière se comporte à la fois comme une onde et comme une particule.
- Il n'est alors plus possible de dire exactement où se trouve un objet, il faut indiquer la probabilité qu'il se trouve à un endroit donné.
- Tant qu'une propriété d'une particule n'a pas été mesurée, elle peut être dans plusieurs états à la fois.

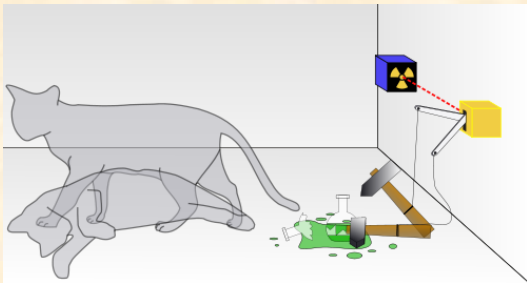
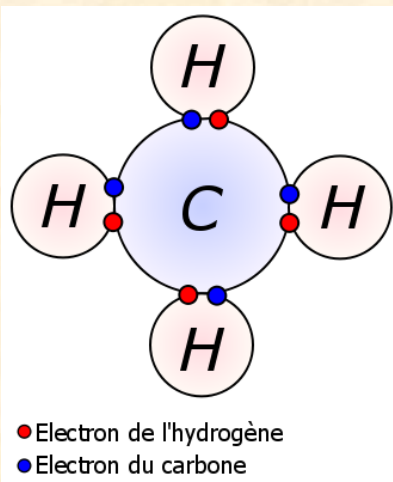
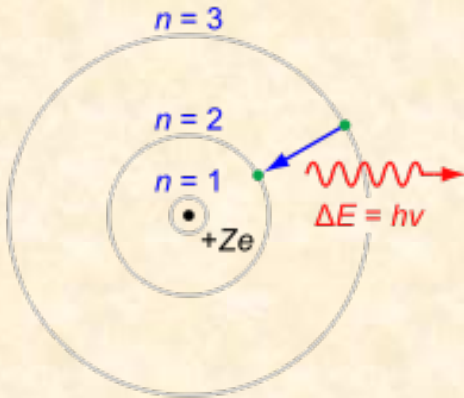
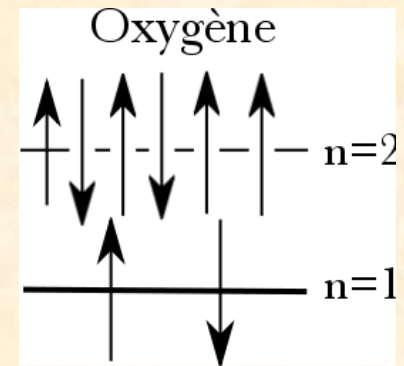


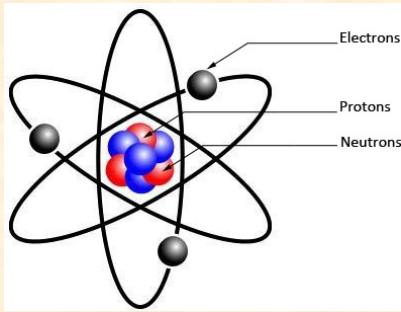
Tableau périodique des éléments

Tableau périodique des éléments montrant les numéros atomiques, les symboles chimiques et les noms des éléments.

# L'atome

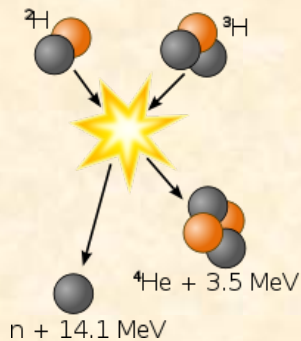
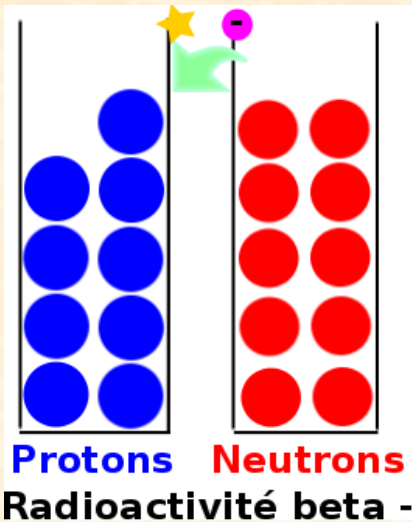


- Tous les objets de notre vie quotidienne sont formés d'atomes.
- Un atome est formé d'un noyau atomique et d'un nuage électronique.
- Les électrons se répartissent par couches successives dans le nuage électronique.
- Le nombre d'électrons sur la dernière couche détermine les propriétés chimiques d'un atome.



# Le noyau atomique

- Un noyau atomique est composé de deux types de particules appelées protons et neutrons.
- Un déséquilibre entre protons et neutrons provoque une instabilité appelée radioactivité.
- Lorsqu'un gros noyau se casse il dégage de l'énergie (fission).
- Deux petits noyaux peuvent fusionner en dégageant de l'énergie.



# Composants élémentaires de la matière



	1 <sup>re</sup> famille	2 <sup>e</sup> famille	3 <sup>e</sup> famille
<p><b>LEPTONS</b></p> <p>Particules insensibles à l'interaction forte.</p>	<p><b>e</b></p> <p>électron</p> <p><math>m_e = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}</math> <math>q_e = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}</math></p>	<p><b><math>\mu</math></b></p> <p>muon</p> <p><math>m_\mu = 1.88 \cdot 10^{-28} \text{ kg}</math> <math>q_\mu = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}</math></p>	<p><b><math>\tau</math></b></p> <p>tau</p> <p><math>m_\tau = 1.777 \cdot 10^{-27} \text{ kg}</math> <math>q_\tau = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}</math></p>
	<b><math>\nu_e</math></b> neutrino e	<b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino muon	<b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino tau
	<b>u</b> haut / up <p><math>m_u = 2.3 \cdot 10^{-28} \text{ kg}</math> <math>q_u = +2/3 \cdot e</math></p>	<b>c</b> charm / charm <p><math>m_c = 1.32 \cdot 10^{-27} \text{ kg}</math> <math>q_c = +2/3 \cdot e</math></p>	<b>t</b> top <p><math>m_t = 1.73 \cdot 10^{-26} \text{ kg}</math> <math>q_t = +2/3 \cdot e</math></p>
	<b>d</b> bas / down <p><math>m_d = 3.5 \cdot 10^{-28} \text{ kg}</math> <math>q_d = -1/3 \cdot e</math></p>	<b>s</b> étrange / strange <p><math>m_s = 2.9 \cdot 10^{-28} \text{ kg}</math> <math>q_s = -1/3 \cdot e</math></p>	<b>b</b> bas / beauty / bottom <p><math>m_b = 4.18 \cdot 10^{-27} \text{ kg}</math> <math>q_b = -1/3 \cdot e</math></p>

## Les interactions fondamentales

Il existe des **PARTICULES ASSOCIÉES** aux interactions fondamentales permettant leur propagation.

- Gravitation**  
Attraction universelle, planètes, galaxies.  
**GRAVITON ?**
- Interaction faible**  
Désintégrations radioactives.  
**Z<sup>0</sup>, W<sup>+</sup>, W<sup>-</sup>**
- Interaction électromagnétique**  
Électricité, magnétisme, cohésion de l'atome et du cristal, chimie.  
**PHOTON**
- Interaction forte**  
Cohésion des protons et des noyaux.  
**GLUON**

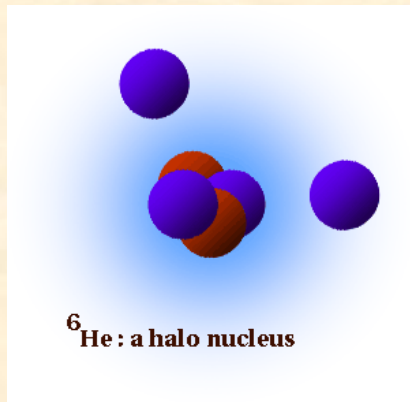
Les 4 forces fondamentales sont indispensables au fonctionnement du soleil (et des étoiles) :

- formation de l'étoile causée par la gravitation;
- réactions de fusion nucléaire avec l'interaction faible et forte;
- production de lumière-interaction électromagnétique.

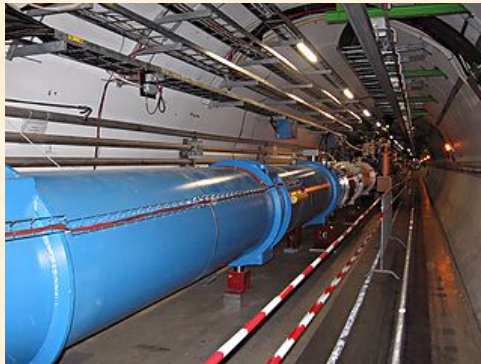
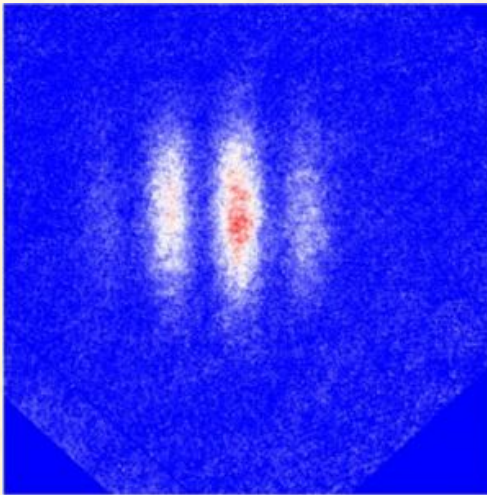
Les 4 particules de la première famille sont présentes dans le soleil qui envoie sur la terre un flux intense de photons et de neutrons.

À chaque particule correspond une antiparticule aux propriétés quasi-identiques. La charge électrique d'une antiparticule est l'opposé de la particule correspondante.

# Perspectives

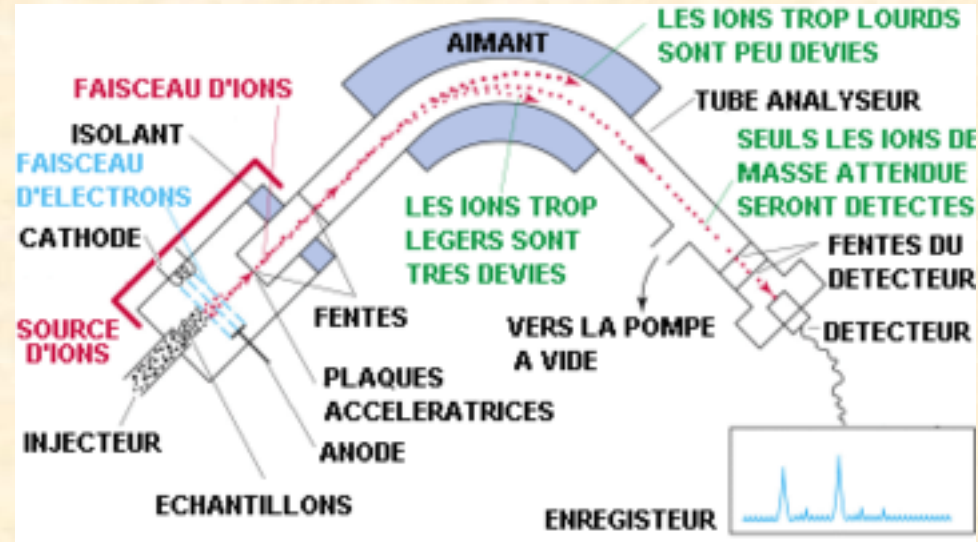
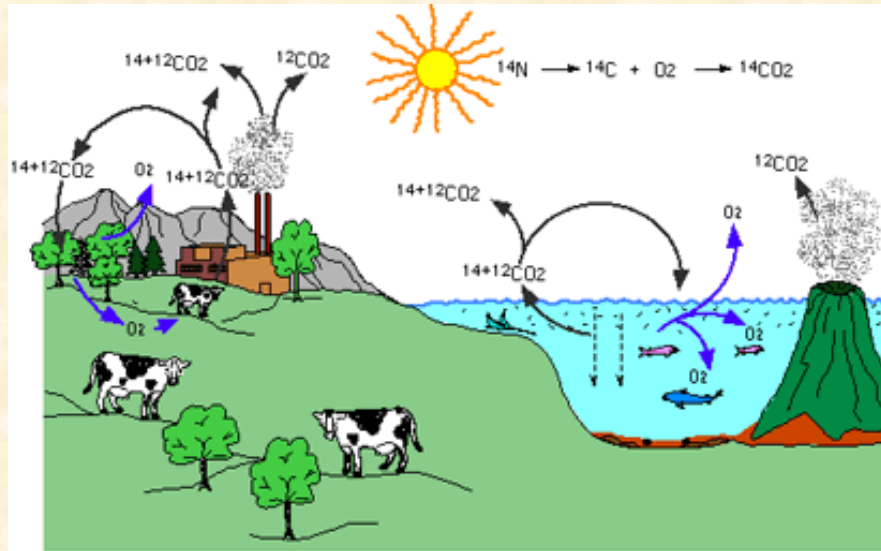


- Il existe encore des zones d'ombre dans notre compréhension des atomes et des noyaux:
  - certaines couches électroniques se mélangent
  - certains noyaux déséquilibrés sont relativement stables
- Les propriétés étranges de la matière à l'échelle quantique fascinent encore et font l'objet de nombreuses recherches.
- Nous ne savons pas si les quarks sont eux-mêmes formés de particules plus petites ou pas.



**MERCI POUR VOTRE ATTENTION**

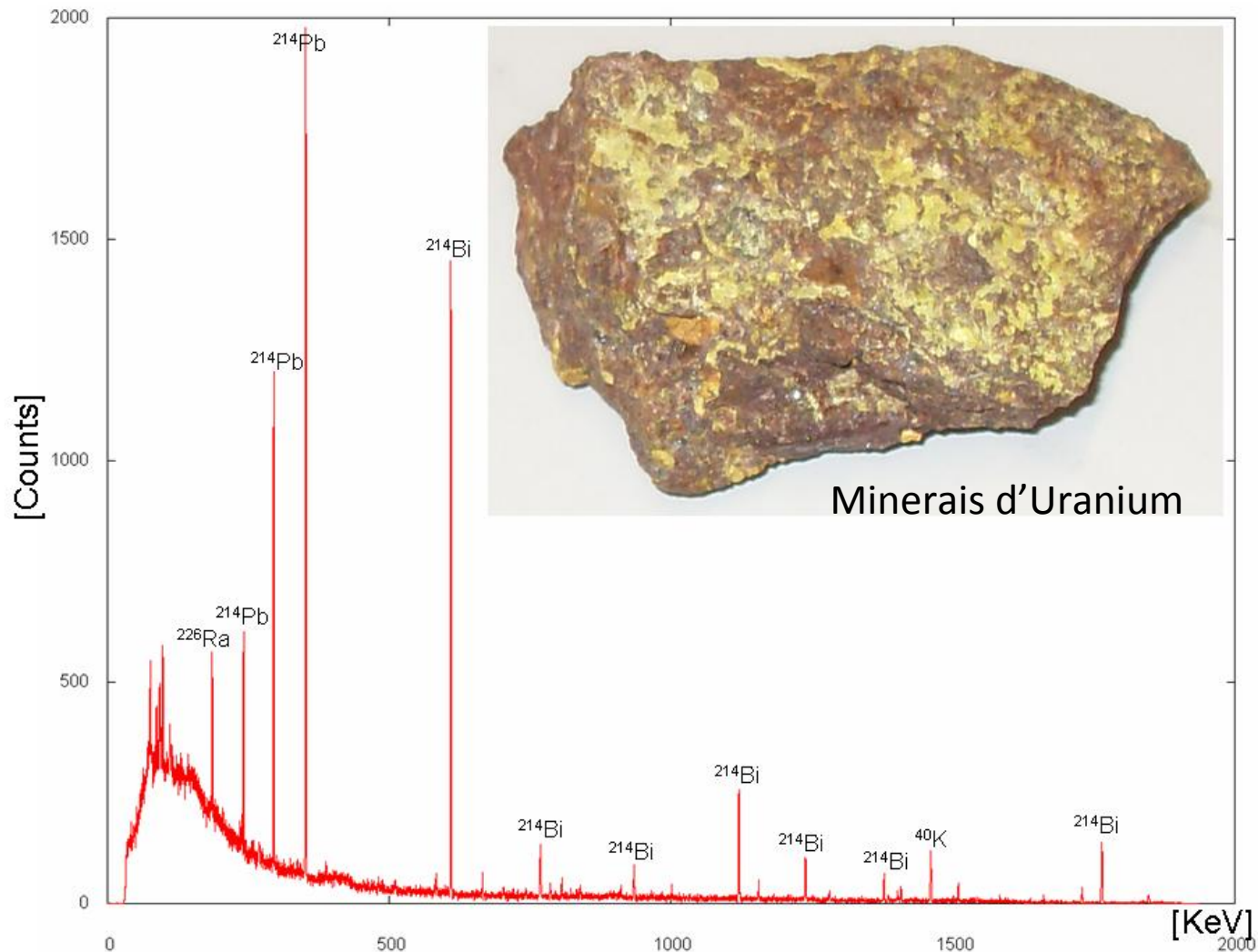
# Datation au carbon-14



- Permet de mesurer l'âge d'objets organiques.
- Peut se faire avec un simple compteur Geiger, mais le plus souvent avec un accélérateur de particules.
- Nécessite la destruction d'un tout petit morceau de l'échantillon.

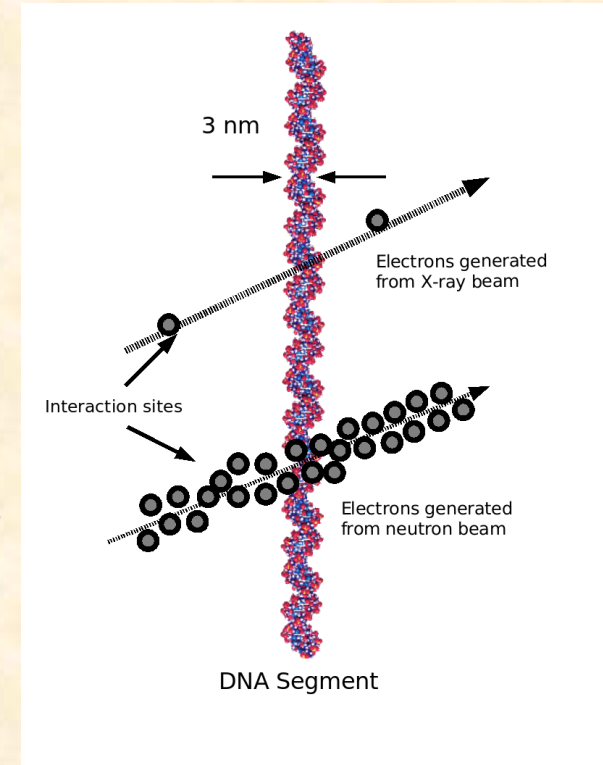


# Le spectre d'émission radioactif est caractéristique d'un élément



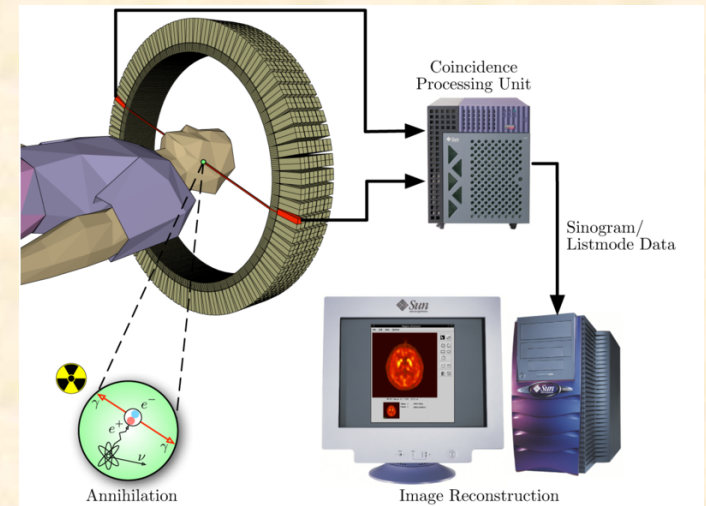
# Effets biologiques

- Les rayonnements ionisants (radioactivité) peuvent endommager les cellules de notre corps de plusieurs manières:
  - Brûlures
  - Rupture des brins d'ADN
- Tout comme avec d'autres formes de blessure, notre corps peut partiellement réparer les cellules endommagées.  
=> notre corps est capable de supporter de faibles doses d'irradiations.
- Une exposition à une dose intense de radioactivité peut provoquer des lésions similaires à des brûlures (qui peuvent laisser des « cicatrices »).
- L'accumulation de ruptures dans l'ADN peut, à forte dose, se développer en Cancer.
- Mécanismes au sein du corps humain objet d'études et de controverses (échantillons limités, enjeux politiques, limites de dose,...).



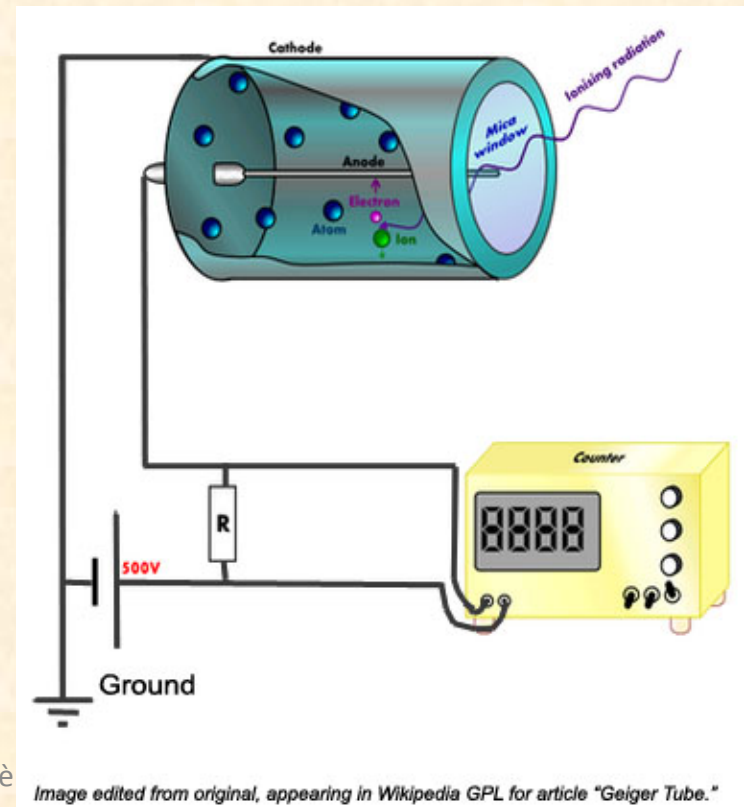
# Applications médicales

- Éléments radioactifs  
=> marqueurs (traçage dans l'organisme...).
- Tomographie par émission de positrons :  
substance radioactive à vie courte suivie dans le corps.  
(ex: activité du cerveau)
- Radiothérapie et proton thérapie:  
tuer des tumeurs à l'aide de doses importantes produites par des accélérateurs de particules.



# Unités

- Activité radioactive: **Becquerel**
- Une activité d'un Becquerel correspond à un échantillon dans lequel se produit une désintégration par seconde.
- Dose absorbée: **Gray** (1J/kg)
- L'effet d'une irradiation dépend de la nocivité des radiations reçues et des tissus irradiés. Ces éléments sont pris en compte lors du calcul de la dose absorbée.
- Dose biologique équivalente: **Sievert**
- L'effet biologique des radiations dépend du type type de radiation reçues et des tissus irradiés. Une dose exprimée en Sievert tient compte de cela.
- Un sol contaminé par du Césium 137 avec une activité de 1 million de Becquerels/m<sup>2</sup> donne une irradiation de 0.002mSv/h ou 17mSv/an.
- Dose maximum de radioactivité autorisée pour le grand public: 1mSv/an (hors radioactivité naturelle).
- Il est considéré qu'une dose reçue de 300mSv (corps entier) a des effets déterministes sur la santé.



# Puis-je connaître la position d'une voiture qui va vite?

- Il est difficile de prendre une photographie d'un objet qui va vite car celui-ci bouge pendant le temps d'exposition de la photographie.
- Plus l'objet va vite, plus sa position sur la photographie sera imprécise.
- Inversement pour connaître la vitesse d'un objet, il faut mesurer le temps qu'il met à aller entre deux points  
=> Donc on ne connaît pas précisément sa position.
- La même chose est vraie pour les particules!



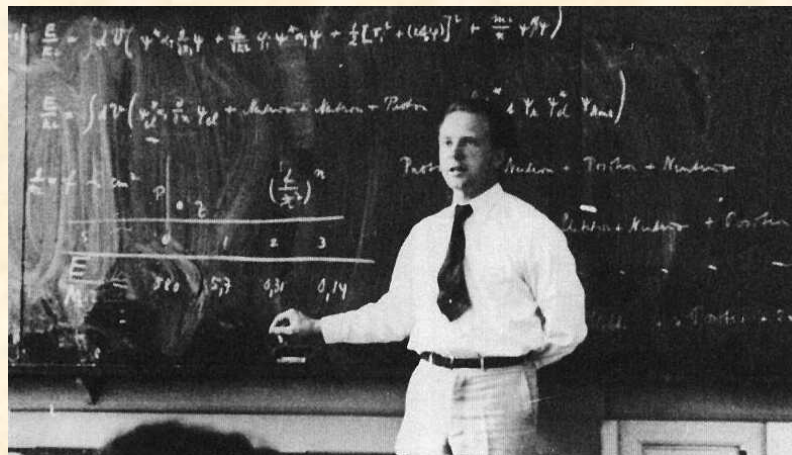
# Limitation des mesures à l'échelle des particules

- Toute mesure d'une grandeur physique a besoin d'un système d'observation (l'appareil photo dans l'exemple précédant).
- La mesure est donc limitée par le système utilisé pour l'effectuer: si l'on cherche à mesurer la position on ne mesure pas bien la vitesse, et inversement...
- Il est possible de faire deux mesures consécutives (position puis vitesse), cependant, à l'échelle microscopique le système peut changer entre les deux mesures.



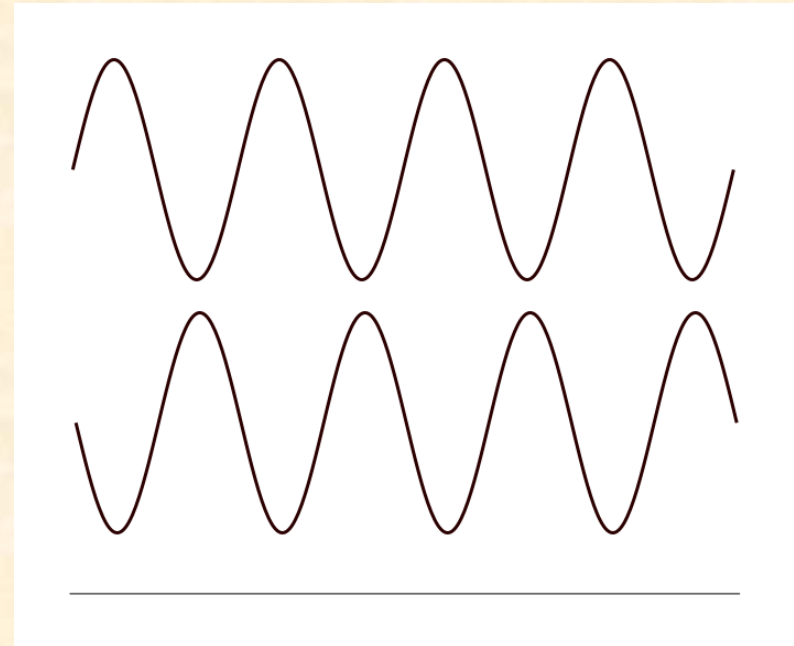
# Le principe d'incertitude d'Heisenberg

- En 1927, Werner Heisenberg montra qu'il existe une limite à la précision avec laquelle on peut mesurer deux variables liées.
- Cette limitation est imperceptible dans le monde classique, mais au niveau des atomes elle joue un rôle important.
- Cela s'appelle « le principe d'incertitude d'Heisenberg »:
  - Plus on connaît la position avec précision, moins bien l'on connaît la vitesse.
  - Plus on connaît l'énergie d'une particule avec précision, moins l'on connaît le moment auquel cette énergie a été mesurée.
- Ce principe découle directement des propriétés des ondes (il n'est pas possible de mesurer une vague avec une précision infinie).



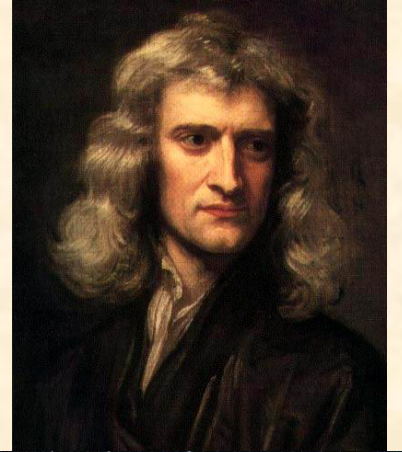
# Principe d'exclusion de Pauli

- Les fonctions d'onde des électrons ont une propriété particulière: elles sont « antisymétriques ».
- La somme des fonctions d'onde de deux électrons se trouvant au même endroit au même moment est nulle!
- Deux électrons ne peuvent pas se trouver au même endroit au même moment!
- Cela s'appelle le principe d'exclusion de Pauli.
- Nous verrons plus tard qu'il joue un rôle très important dans la matière qui nous entoure.

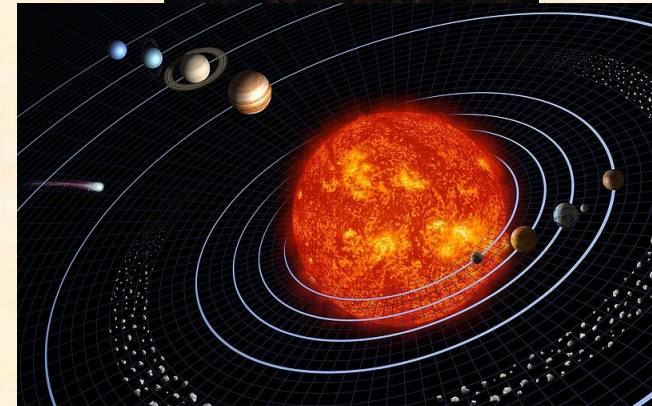




# Une science qui explique tout: La chute des corps

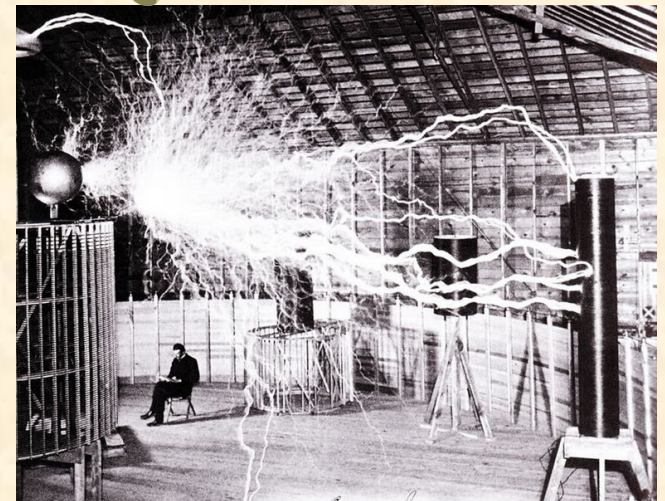
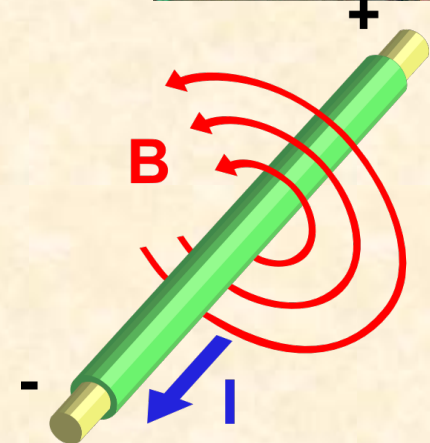


- Au XVIIème siècle Newton avait expliqué le mouvement des planètes et la chute des corps.
- Les techniques de calculs mises au point au XIXème siècle permettaient de calculer l'orbite des planètes avec une précision inégalée.



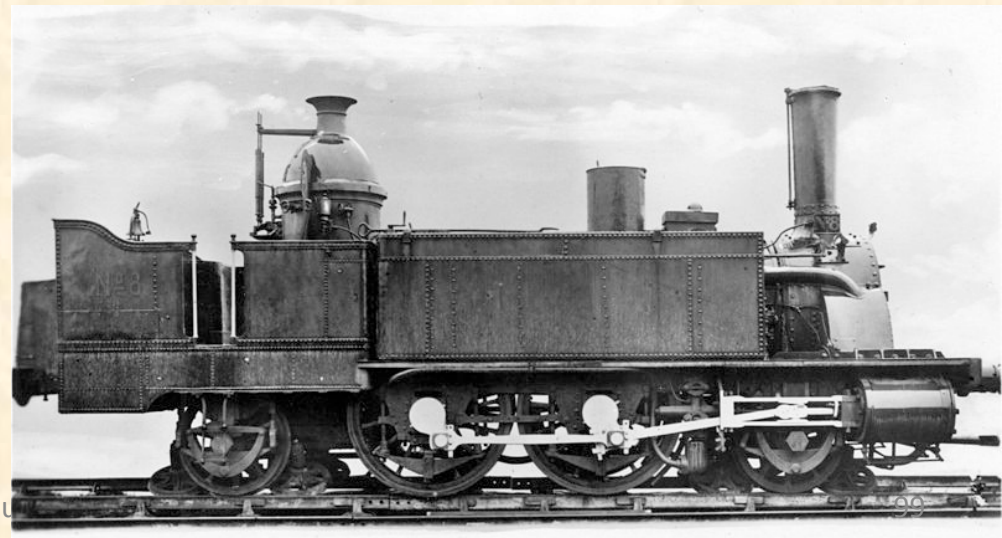
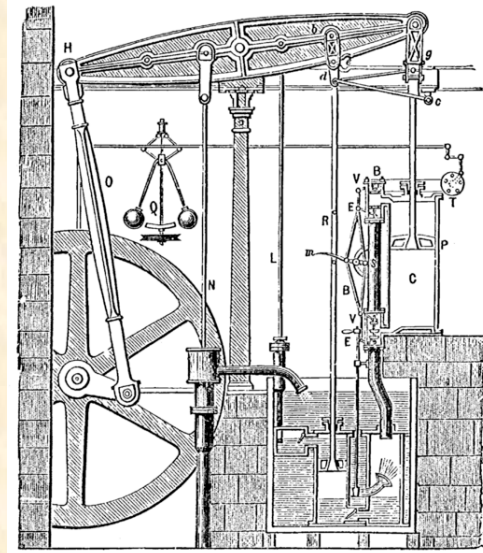
# Une science qui explique tout: L'électricité et le magnétisme

- De nombreux progrès avaient été effectués dans le domaine de l'électricité et du magnétisme:
  - Pile de Volta
  - Lois de l'électricité (Ampère, Gauss, Faraday...).
- Maxwell avait montré qu'électricité et magnétisme pouvaient être unis en 4 équations!
- Les premiers essais de « domestication » de la fée électricité pour éclairer et animer des machines étaient prometteurs.



# Une science qui explique tout: Mécanique et révolution industrielle

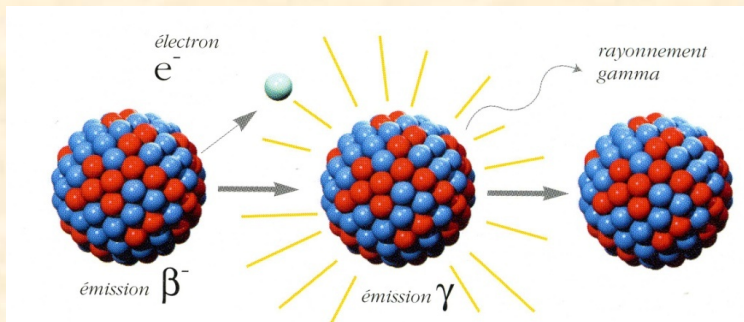
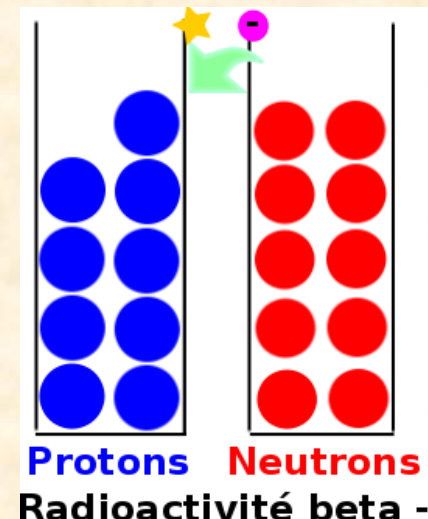
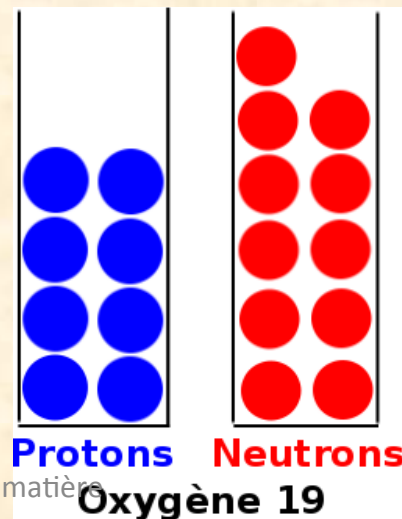
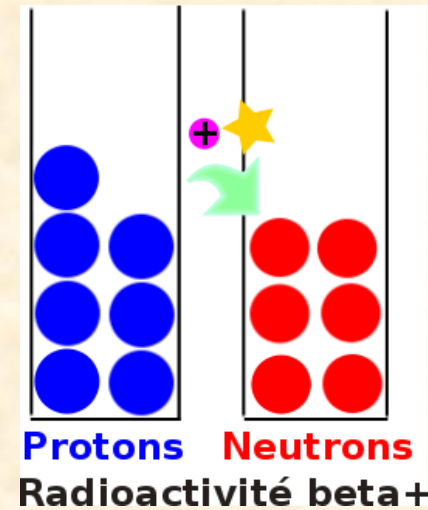
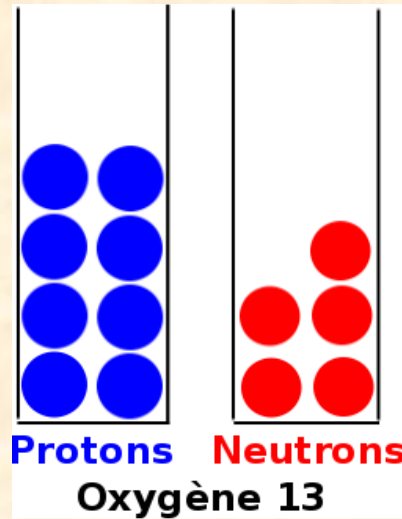
- Inventées à la fin du siècle précédant les machines à vapeur avaient entraîné la révolution industrielle.
- Les travaux de Watt, de Carnot et de nombreux autres scientifiques permettaient d'améliorer ces machines.
- A Grenoble la « houille blanche » semblait être une nouvelle source d'énergie.
- Les chemins de fer permettaient de se déplacer en des temps records.



# Les différents types de radioactivité:

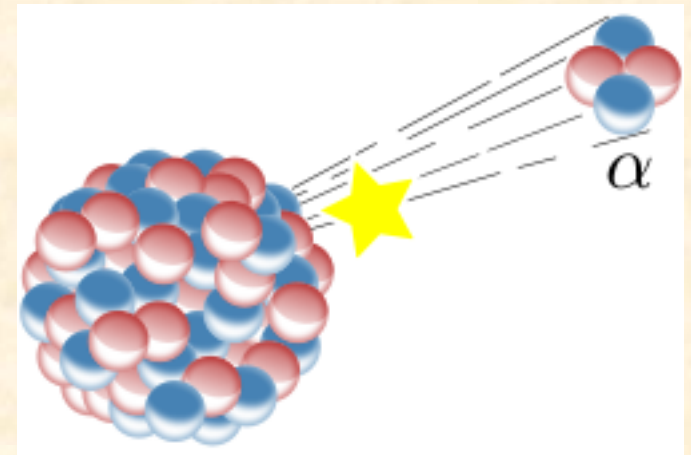
## La radioactivité beta + ou beta -

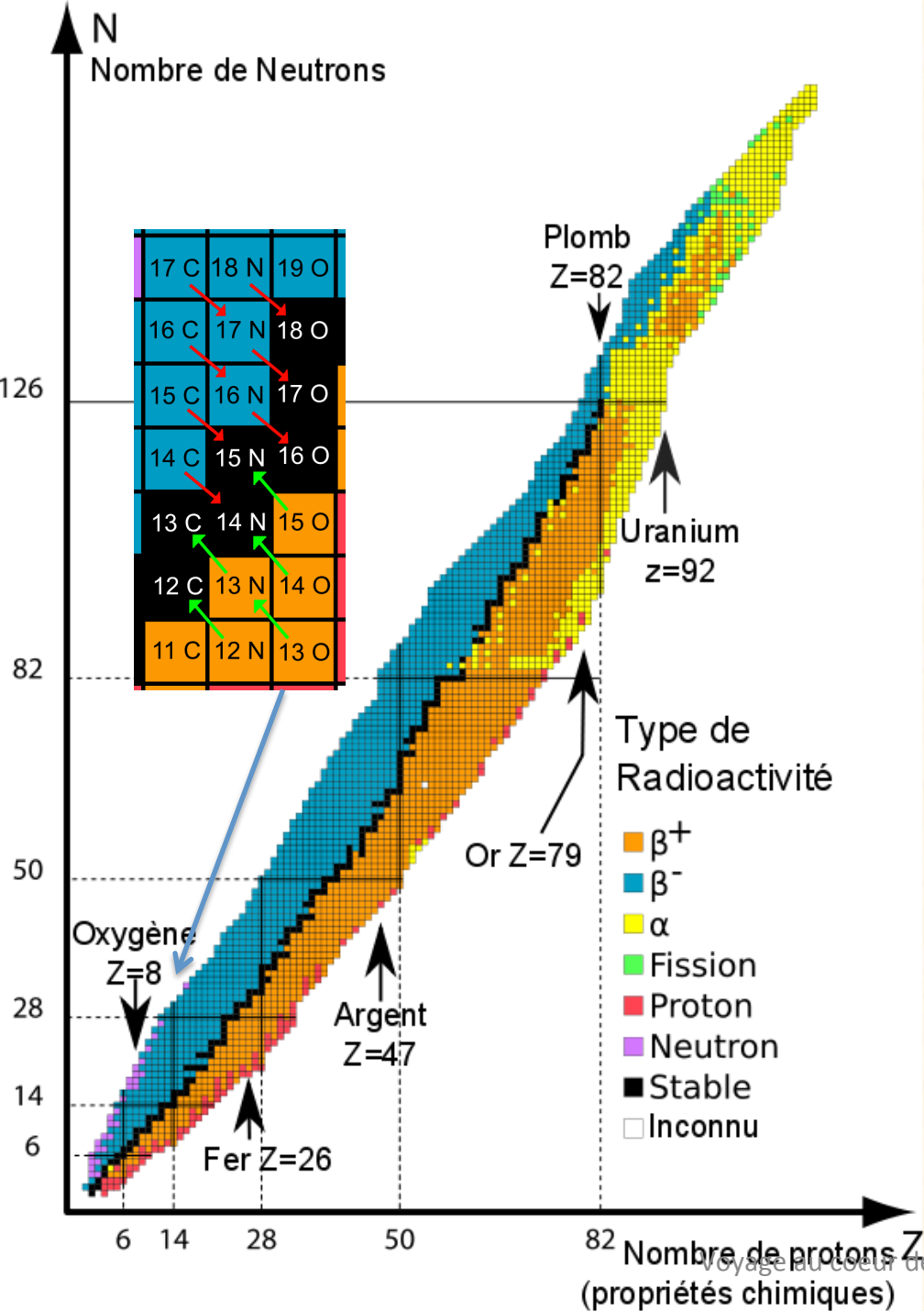
- Trop de protons  
=>  $p \rightarrow n + e^+ + \text{énergie}$   
Radioactivité beta +
- Trop de neutrons  
=>  $n \rightarrow p + e^- + \text{énergie}$   
Radioactivité beta -
- Plusieurs désintégrations beta peuvent se succéder en cas de fort déséquilibre.
- Une petite particule invisible appelée neutrino est aussi émise au même moment.



# Radioactivité alpha

- Quand un noyau contient beaucoup de nucléons il peut perdre d'un seul coup 2 protons et 2 neutrons.
- En faisant cela il émet aussi de l'énergie.
- Les 2 protons et les 2 neutrons sont éjectés en même temps sous la forme d'une particule « alpha » (noyau d'Hélium-4 sans électrons).
- Cette forme de radioactivité s'appelle « radioactivité alpha ».



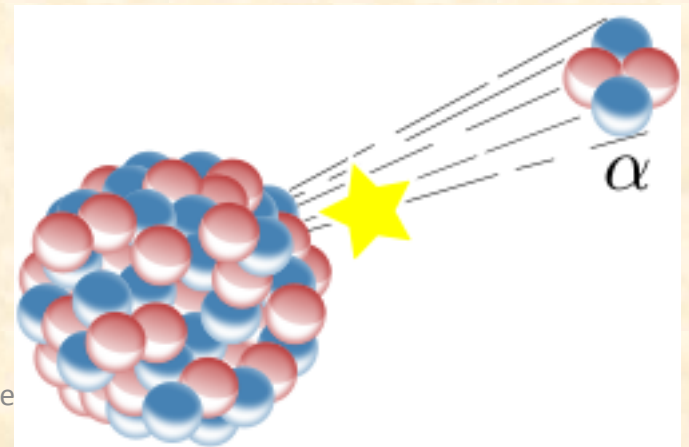
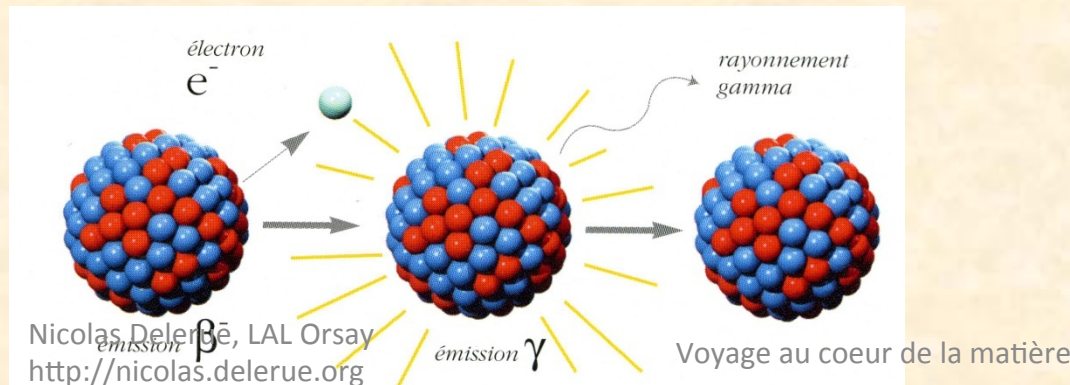


# Noyaux stables et instables

- A bas nombre de masse, un noyau est équilibré s'il a autant de protons que de neutrons.
- A haute masse, il faut plus de neutrons.
- Les très gros noyaux peuvent aussi se casser en morceaux.
- Chaque type d'atome radioactif se désintègre (se transforme) préférentiellement d'une certaine façon.
- Les éléments radioactifs peuvent exister naturellement ou être synthétisés.

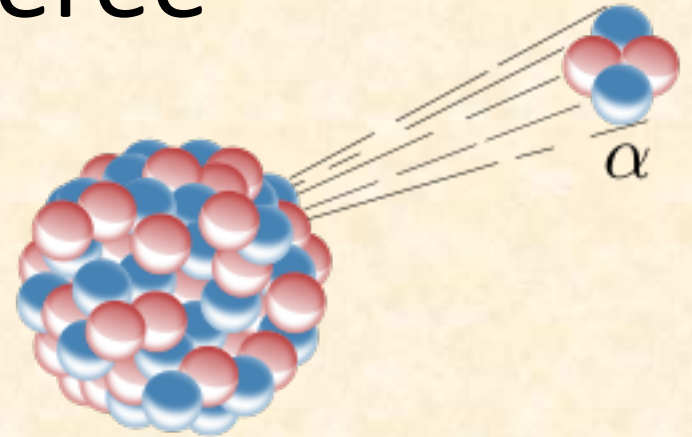
# Emission Gamma

- Tous ces processus sont accompagnés d'une émission d'énergie. Cette énergie est émise sous la forme de particules de lumière « photons ».
- L'énergie des photons émis est caractéristique de chaque isotope.
- Historiquement cette émission est appelée « rayons gamma ».
- La transformation d'un noyau atomique par désintégration radioactive libère entre 2000 et 100 000 fois plus d'énergie que la combustion d'une molécule de carburant!



# Energie libérée

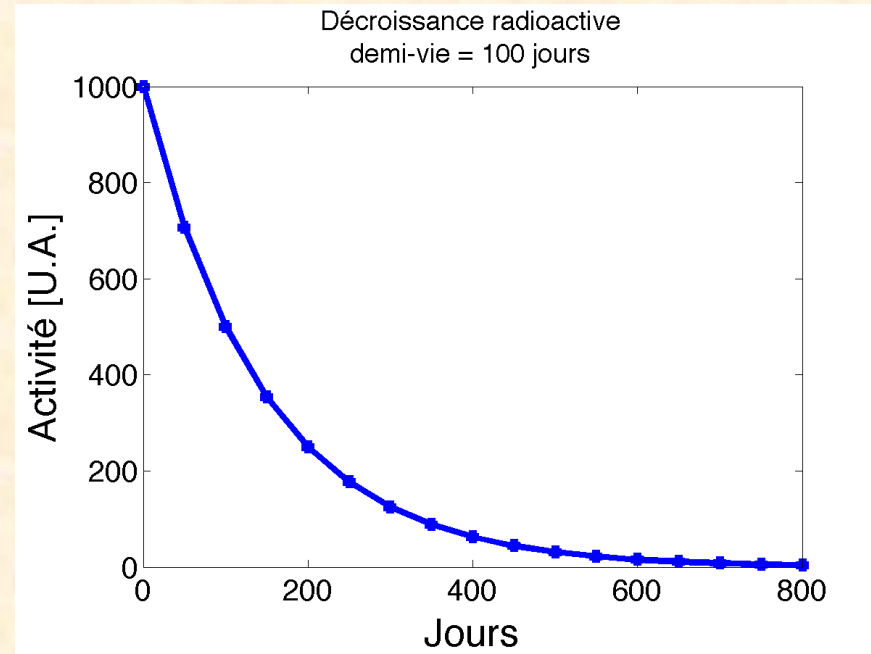
- L'énergie libérée pendant une désintégration radioactive est très importante.
- La transformation d'un noyau atomique par désintégration radioactive libère entre 2000 et 100 000 fois plus d'énergie que la combustion d'une molécule de carburant.





# Demi-vie radioactive

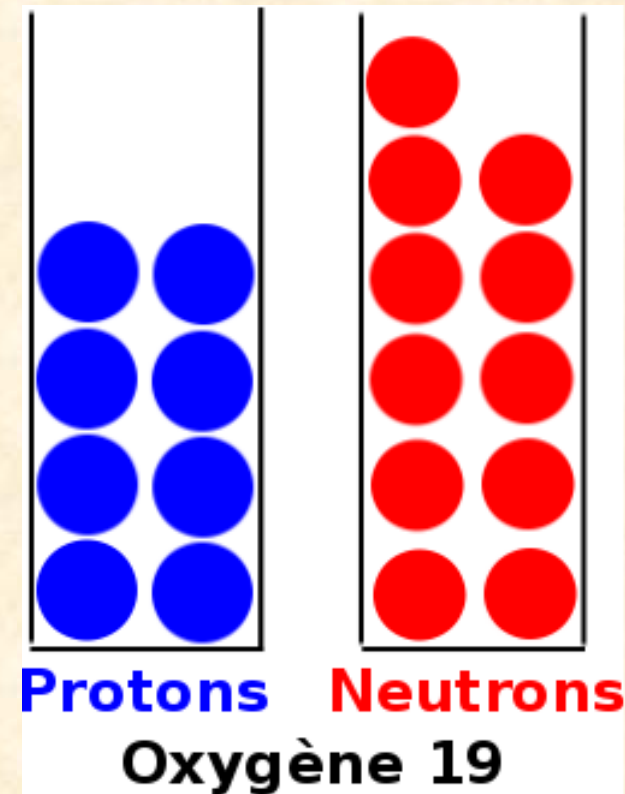
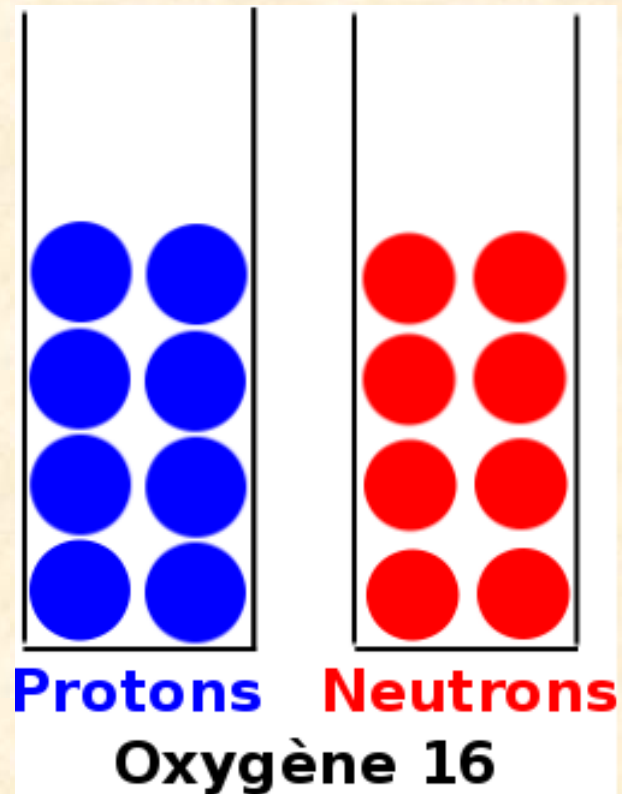
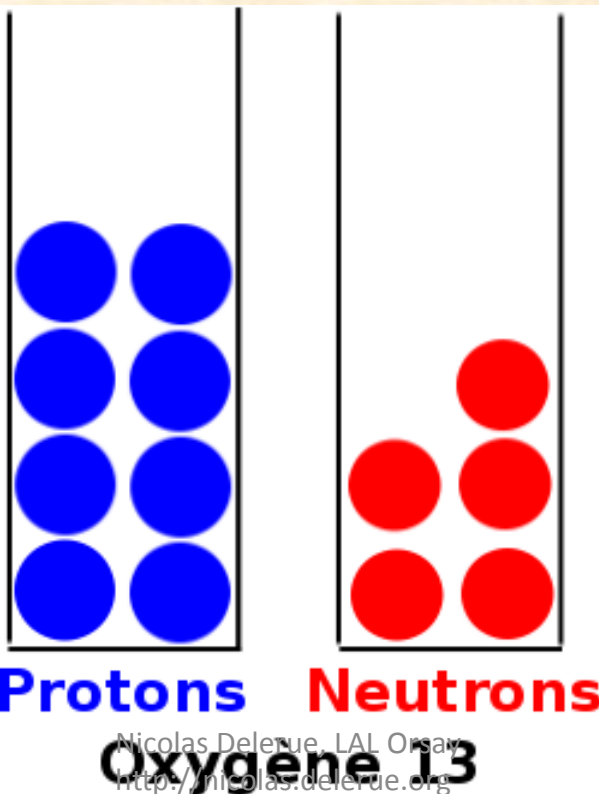
- Tous les atomes instables d'un échantillon radioactif ne se désintègrent (transforment) pas en même temps.
- C'est comme à la loterie où tout le monde a la même chance de gagner mais il n'y a qu'un seul gagnant à la fois.
- On appelle « demi-vie » le temps qu'il faut à la moitié des atomes d'un isotope pour se désintégrer.
- Sur 1000 atomes présents au début, il n'en restera que 500 après une demi-vie, puis 250 après deux demi-vie et ainsi de suite. C'est ce qui s'appelle la décroissance radioactive d'un échantillon.



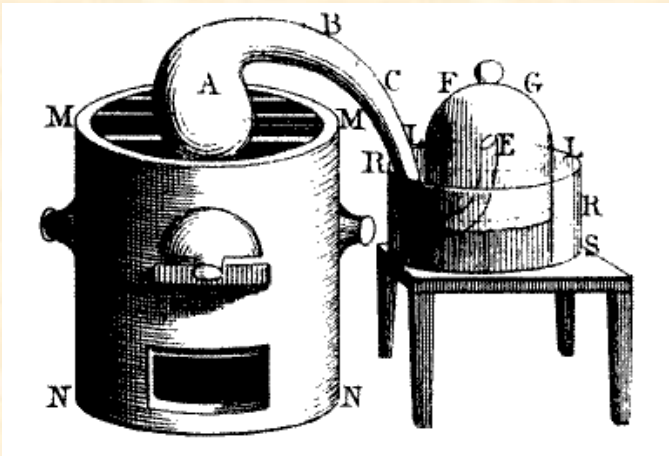
- Demi-vie Uranium-238:  
*4,5 milliards d'années*
- Demi-vie Césium-137:  
*30 ans*
- Demi-vie Carbone-14:  
*5730 ans*
- Demi-vie Carbone-11:  
*20 minutes*

# Isotopes

- Des atomes avec le même nombre de protons mais des nombres différents de neutrons sont appelés « isotopes »: ils ont les mêmes propriétés chimiques mais pas la même masse.
- Exemples:
  - Oxygène-13 (8 protons et 5 neutrons), Oxygène-16 (8 protons et 8 neutrons) et Oxygène-19 (8 protons et 11 neutrons).
  - Uranium-235 (92 protons et 143 neutrons) et Uranium-238 (92 protons et 146 neutrons).



# Classification des éléments chimiques: Lavoisier



- Depuis très longtemps les (al)chimistes étudient les propriétés des composés chimiques à leur disposition.
- En 1789, Lavoisier montra que ceux-ci pouvaient être classés en 4 catégories:  
gaz, métaux, non-métaux et terres.
- Il montra aussi que l'eau était faite d'oxygène et d'hydrogène.
- Il introduisit le concept d'élément chimique qui ne peut pas être fractionné.

