

Webinaire 3 – Physique moderne

27 février 2019 16 h

Marc de Montigny, Faculté Saint-Jean

(Webinaire 1 – 30 janvier, Mécanique)

(Webinaire 2 – 13 février, Électricité, magnétisme, optique)

Bacc (physique) et maîtrise (physique des particules), Université Laval
Doctorat (physique mathématique), Université de Montréal
Stages postdoctoraux : University of Florida, McGill University

Professeur à la Faculté Saint-Jean depuis 1995.

Recherche en *physique mathématique*: symétries en physique, algèbres de Lie et contractions d'algèbres, invariance galiléenne, équations de la théorie des champs, etc.
Physique des particules: collaboration MoEDAL/CERN qui portes sur des particules hautement ionisantes, neutrinos lourds, particules mini-chargées, particules de longue durée de vie, monopôle magnétique

Membre de comités de validation des examens de diplôme de physique 30, tests sur le terrain.

Webinaire 3 : Physique moderne

Modèles atomiques, physique quantique, physique nucléaire (Phys 30-C,D)

Plan approximatif

- Compétences connexes (cours de physique FSJ)
- Principes de physique (feuille de données)
- Extrait du bulletin de physique 30 du 23 août 2018
- Électricité, magnétisme, optique, lentilles: exemples et principes
- Ressources: multimédia, manuels

Sujets

page

- Équation de Schrödinger 9
- Modèle de Thomson (30-D1) 12
- Effet photoélectrique (30-C2) 14
- Modèle de Rutherford (30-D1) 17
- Modèle de Bohr (30-D2) 18
- Goutte d'huile de Millikan (30-B2) 19
- Hypothèse de de Broglie (30-D2) 20
- Équivalence énergie-masse (30-D3) 24
- Désintégrations nucléaires (30-D3) 29
- Fusion et fission nucléaires (30-D3) 36
- Physique des particules (30-D4) 48

Compétences connexes utilisés dans mes cours de physique

- C1. algèbre (ex. trigonométrie de base, systèmes d'équations à plusieurs variables, équation quadratique)
- C2. graphiques, pente, axes (ex. $x - t$, $v - t$, oscillateur harmonique simple)
- C3. unités, conversion, préfixes de notation scientifique (p,n,μ,m,k,M,G)
- C4. vecteurs : composantes, algèbre vectorielle, etc.
- C5. questions conceptuelles
- C6. applications concrètes, y compris résultats expérimentaux, ou de l'actualité

Feuille de données, examen de diplôme - physique 30

Principes de physique

- D0. Mouvement uniforme ($\mathbf{F}_{\text{nette}} = \mathbf{0}$)
- D1. Mouvement accéléré ($\mathbf{F}_{\text{nette}} \neq \mathbf{0}$)
- D2. Mouvement circulaire uniforme ($\mathbf{F}_{\text{nette}}$ radiale et vers le centre)
- D3. Théorème de l'énergie mécanique
- D4. Conservation de la quantité de mouvement
- D5. Conservation de l'énergie
- D6. Conservation de la masse-énergie [webinaire 3]
- D7. Conservation de la charge [webinaires 2,3]
- D8. Conservation des nucléons [webinaire 3]
- D9. Dualité onde-particule [webinaire 3]

Extrait : Physics 30 Information Bulletin, 23 août 2018, p. 20

Physics Principles

The linking of two of the 10 physics principles given on the data sheet to the solution to a problem continues to be a challenge for many students. This is most directly assessed on the two-item scenario that appears at the end of the diploma examination: numerical-response item 13 asks the students to calculate something, and numerical-response item 14 asks the students to identify the physics principles they used. Historically, this trend is more significant for students writing the examination in French. In general, for this type of item, there are some situations in which one principle is subsumed by another (e.g., circular motion and accelerated motion). There are some situations in which two principles are equivalent (e.g., work-energy theorem and conservation of energy), but this is not always true. This type of item is not likely to reward a memorized approach. For more examples of the assessment of physics principles using items like numerical-response item 13 and numerical-response item 14, see the Physics 30 Archive or the practice questions on Quest A+. Links to these resources are given on page 25.

Équation de Schrödinger

L'équation de Schrödinger est aussi essentielle en mécanique quantique non-relativiste que la deuxième loi de Newton en mécanique classique: c'est l'*équation du mouvement* fondamentale. En version abrégée,

$$i\hbar\partial_t\Psi = \hat{H}\Psi \quad \text{ou} \quad E\Psi = \hat{H}\Psi$$

Les solutions de cette équation (différentielle, comme la loi de Newton) sont assujetties à des conditions initiales et aux limites et donnent la fonction d'onde Ψ . Le symbole $\hat{}$ au-dessus de H représente un *opérateur*.

Équation de Schrödinger (dépendante de t)

Formalisme de la mécanique quantique:

observables (E , \mathbf{p} , etc.) \rightarrow **opérateurs** (matrices, d/dx , etc.)

Opérateur énergie $E \rightarrow \hat{H} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$
(H : *Hamiltonien*)

Opérateur quantité de mouvement $p_x \rightarrow \hat{p}_x = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$

Ces opérateurs différentiels agissent sur une fonction d'onde $\Psi(x,t)$ associée à une densité de probabilité.

La définition classique de l'énergie $E = \frac{1}{2}mv^2 + U = \frac{p^2}{2m} + U$

mène à l'*équation de Schrödinger dépendante du temps*

$$\hat{H}\Psi(x,t) = \left(\frac{\hat{p}^2}{2m} + \hat{U}(x) \right) \Psi(x,t)$$

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial x^2} + U(x) \Psi(x,t)$$

Les systèmes étudiés sont définis dans cette équation par le terme d'énergie potentielle $U(x)$.

Simulation boîte infinie http://www.kcvs.ca/site/projects/physics_files/particleBox/particleBox2.swf

Mécanique quantique

5è Congrès de Solvay, octobre 1927



Rangée à l'arrière : Auguste Piccard, Émile Henriot, Paul Ehrenfest, Édouard Herzen, Théophile de Donder, Erwin Schrödinger, Jules-Émile Verschaffelt, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Ralph H. Fowler, Léon Brillouin ;

Rangée du milieu : Peter Debye, Martin Knudsen, William Lawrence Bragg, Hendrik Anthony Kramers, Paul Dirac, Arthur Compton, Louis de Broglie, Max Born, Niels Bohr ;

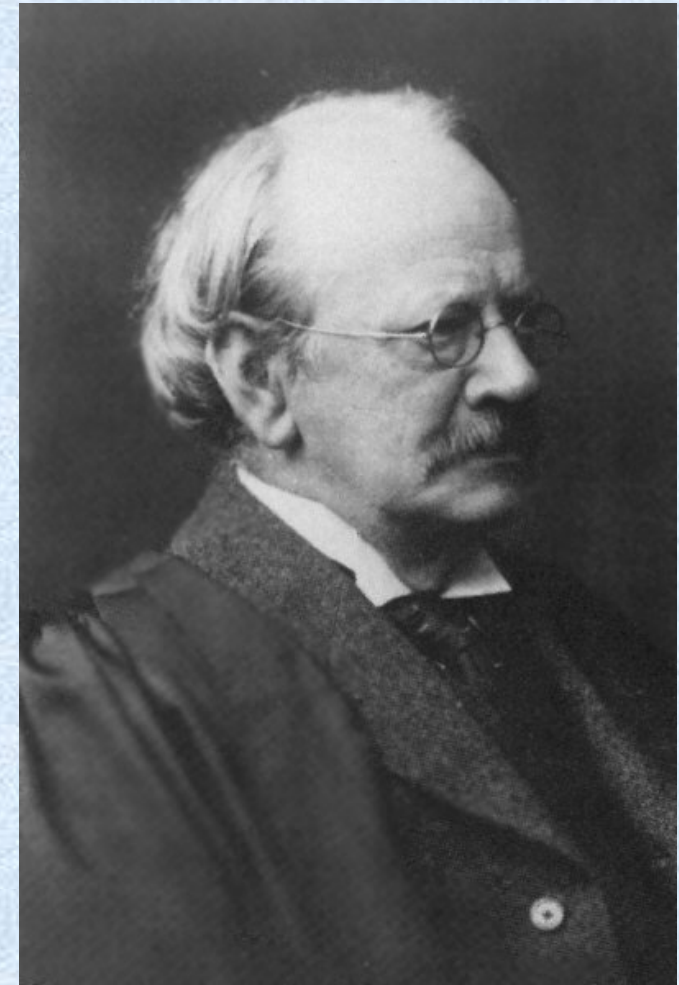
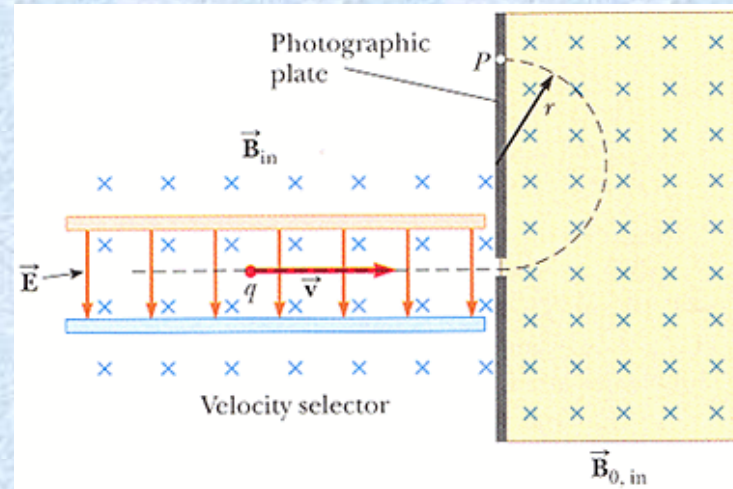
Rangée à l'avant : Irving Langmuir, Max Planck, Marie Curie, Hendrik Lorentz, Albert Einstein, Paul Langevin, Charles-Eugène Guye, Charles Thomson Rees Wilson, Owen Willans Richardson.

Joseph John Thomson (1856-1940)

Prix Nobel (1906)

Rayons cathodiques, découverte de l'électron,
sélecteur de vitesse, rapport e/m (1897)

Mouvement accéléré, circulaire uniforme
(principe D2)



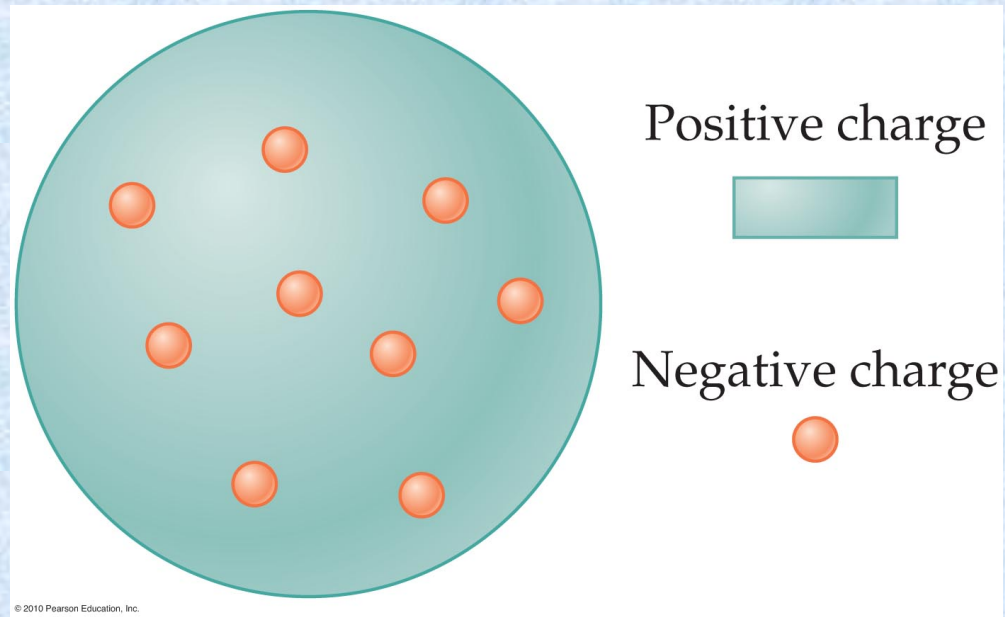
$$F_B = F_E \Rightarrow Bv = E \quad F_B = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow mv = qBr$$

Simulation http://www.kcvs.ca/site/projects/physics_files/thompson/thomsonExp.swf

Modèle du plum pudding (1904)

Atome neutre et électrons de charge négative.

Charges négatives enchâssées (et non fixes) dans l'atome.



Incompatible avec l'expérience de Rutherford (1909)

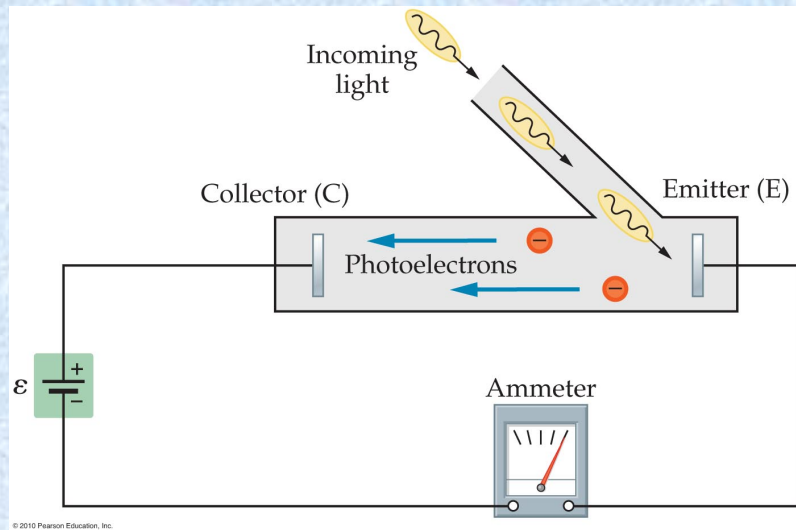
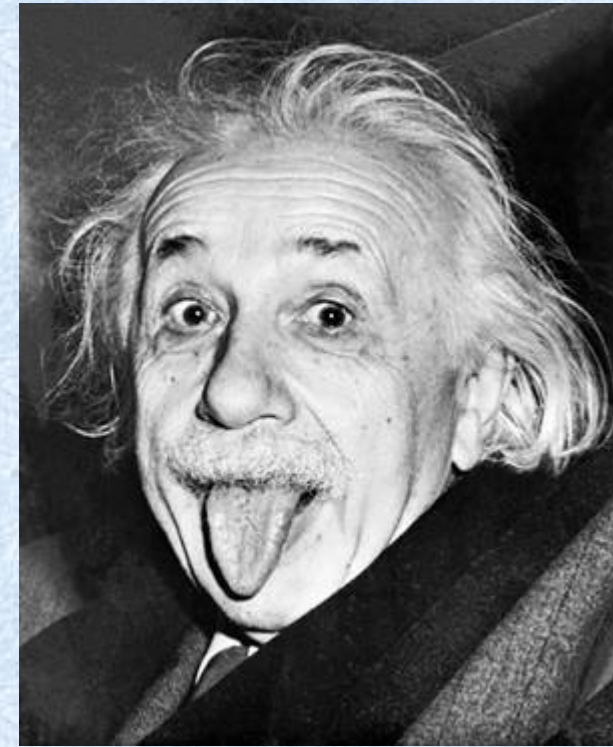
Albert Einstein (1879-1955)

Prix Nobel (1921)

<https://www.youtube.com/watch?v=OamFZCFfQkg>

Effet photoélectrique, concept de photon (1905),
relativité (1905, 1916)

Effet photoélectrique : conservation de l'énergie (principe D5)



$$E_C = hf - W$$

$$E_C = \frac{1}{2}mv^2 = qV_0$$

Simulation http://www.kcvs.ca/site/projects/physics_files/photoelectric/photoelectricEffect.swf

Effet photoélectrique – analogie

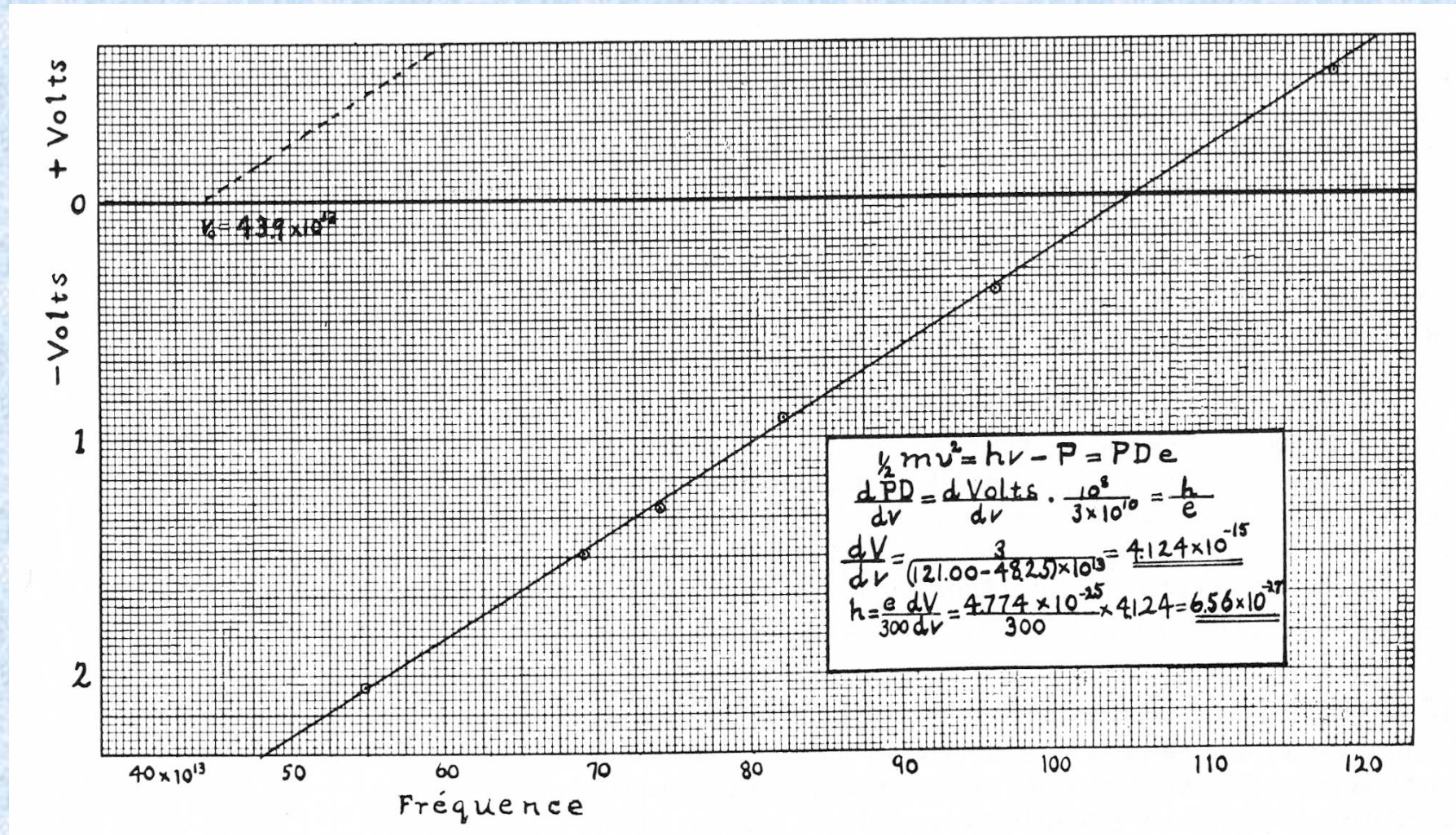
Albert, Max et Niels entrent dans un bar.

Il faut payer 10 \$ à l'entrée pour y voir un spectacle.

Albert a 100 \$, Max a 50 \$, et Niels a 20 \$.

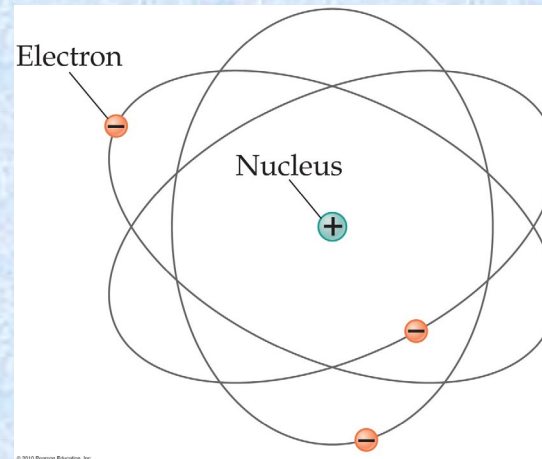
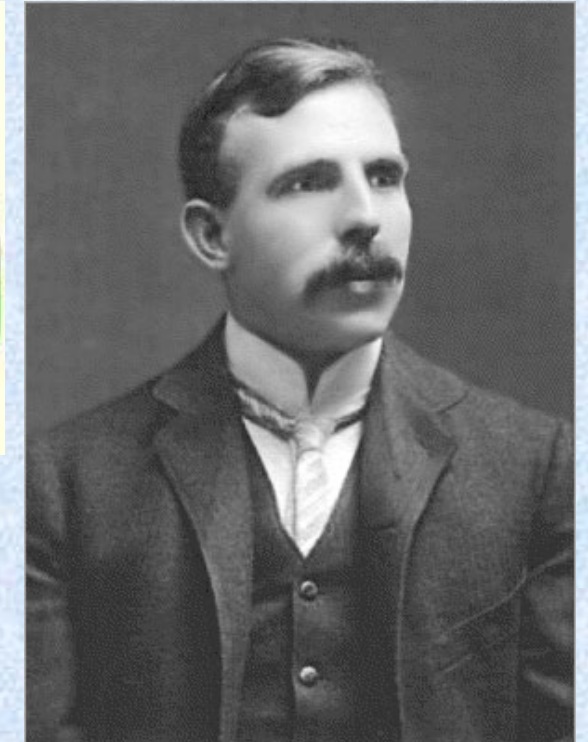
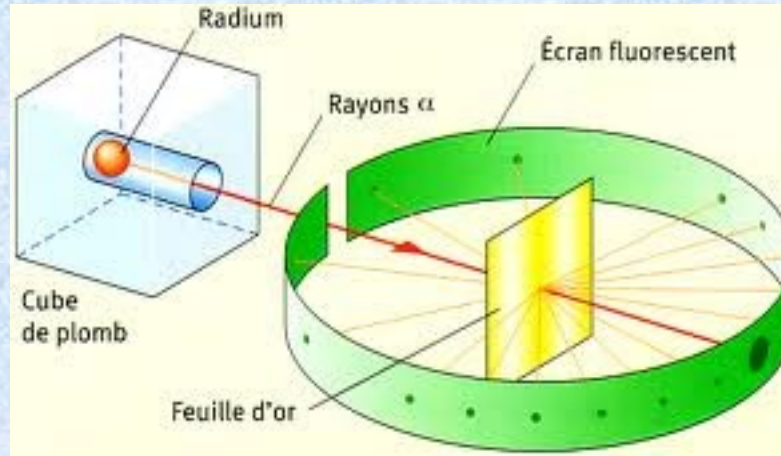
1. Quel est l'analogie de l'énergie d'ionisation du métal?
2. Quel est l'analogie de l'énergie cinétique finale?
3. Qui serait le plus “bleu”?
4. Qui serait le plus “rouge”?

Résultats de Millikan: compétence d'analyse d'un graphique (compétence C2)



Ernest Rutherford (1871-1937)
Prix Nobel (1908)

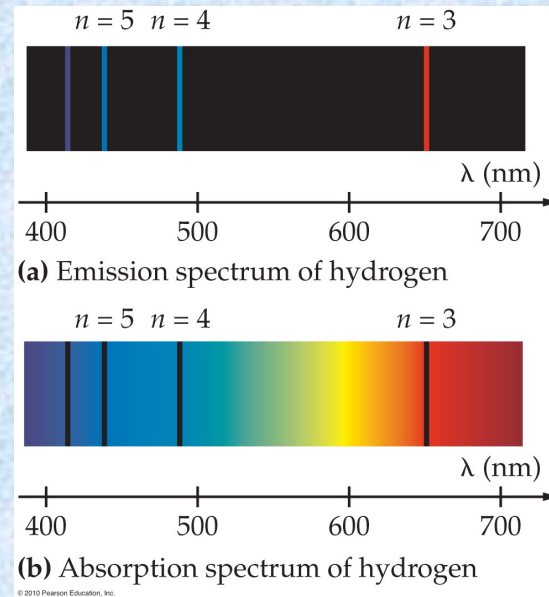
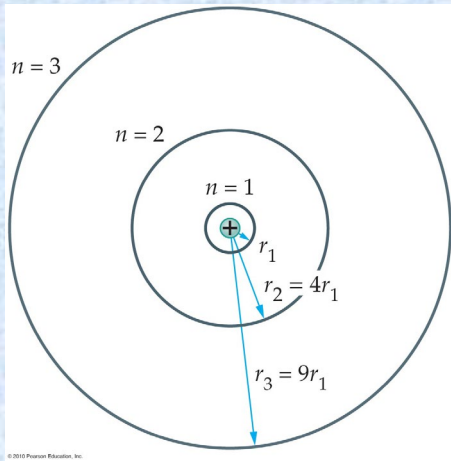
Modèle nucléaire de l'atome (1911)
Rayons α , β (1903), radioactivité
et demi-vie (McGill, Nobel)



Simulation <https://phet.colorado.edu/en/simulation/rutherford-scattering>

Niels Bohr (1885-1962)
Prix Nobel (1922)

Modèle atomique quantifié (1913)



$$E_n = -\frac{13.6 \text{ eV}}{n^2}$$

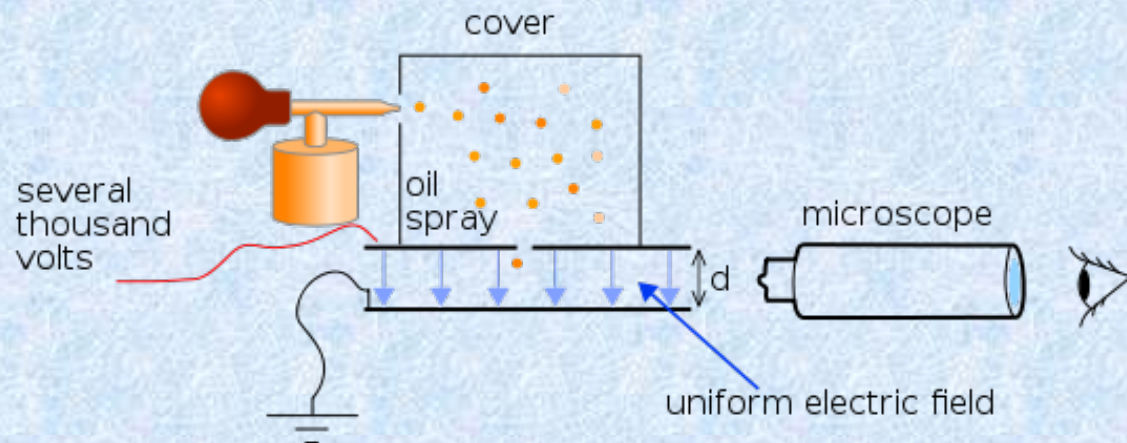
Simulation https://www.walter-fendt.de/html5/phen/bohrmodel_en.htm

Robert Millikan (1868-1953)

Prix Nobel (1923)

Expérience de la goutte d'huile (1909)

Charge de l'électron, effet photoélectrique



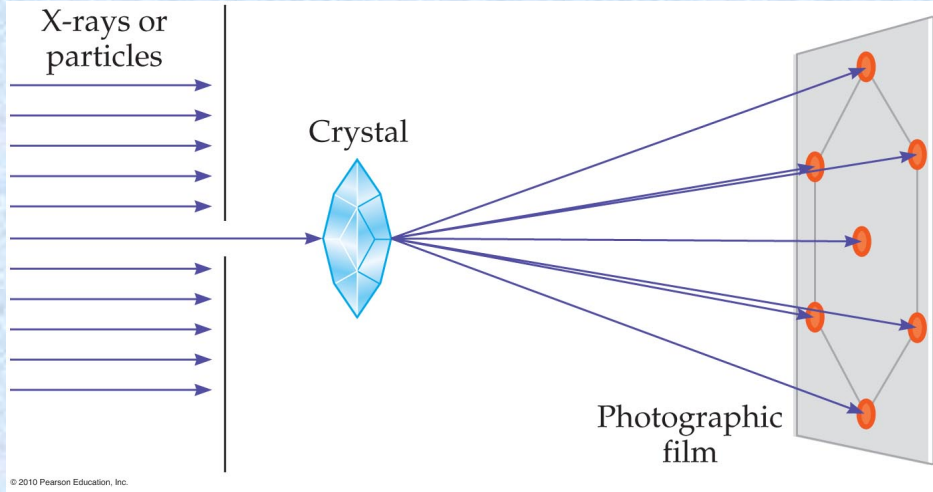
$$qE = mg \rightarrow \text{charge quantifiée: } q = nq_e$$

Simulation http://www.kcvs.ca/site/projects/physics_files/millikan/millikanlike.swf

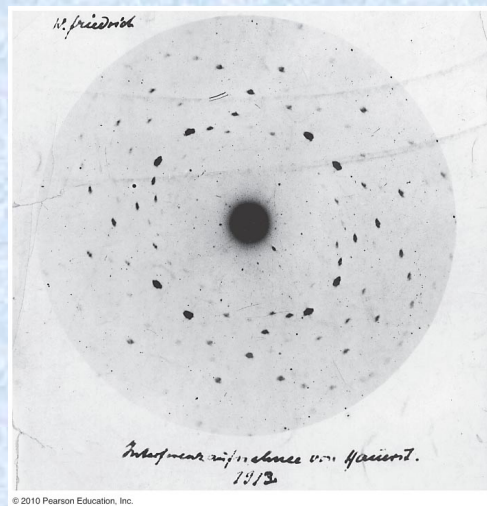
Louis de Broglie (1892-1987)

Prix Nobel (1929)

Ondes de matière (1924)



$$\lambda = \frac{h}{p}$$



Entrevue de 1967

https://www.youtube.com/watch?v=stRrf4DB_3Y



de Broglie

prononcé comme “oeil”

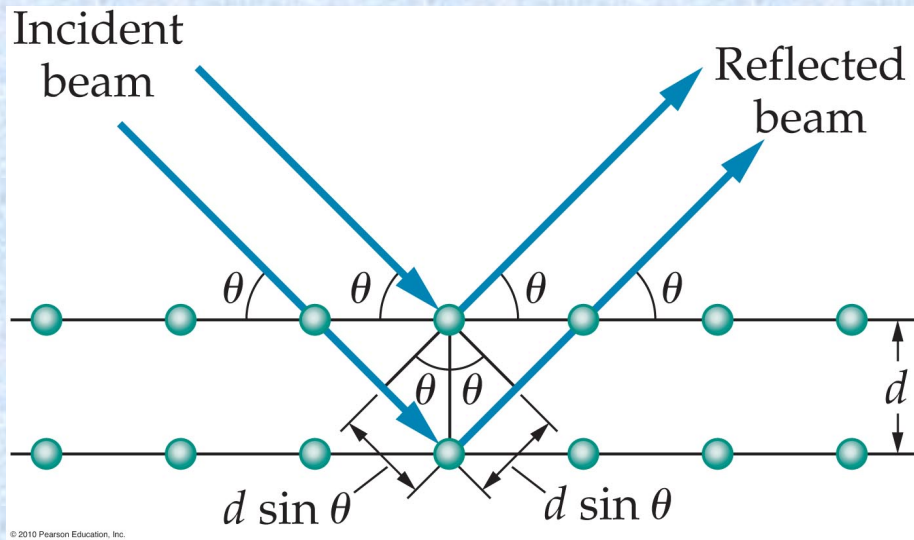
Famille d'aristocrate à laquelle appartenait le château de Chaumont-sur-Loire

George Paget Thomson (1892-1975)

Fils de J J Thomson (dualité onde-corpuscule, principe D9)

Prix Nobel (1937)

Diffraction des électrons (1920s)



$$2d \sin \theta = m\lambda$$

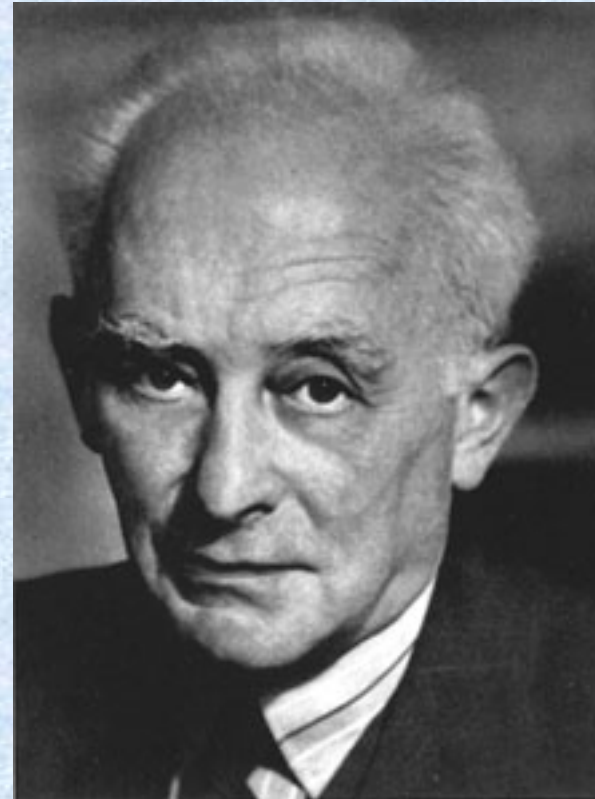
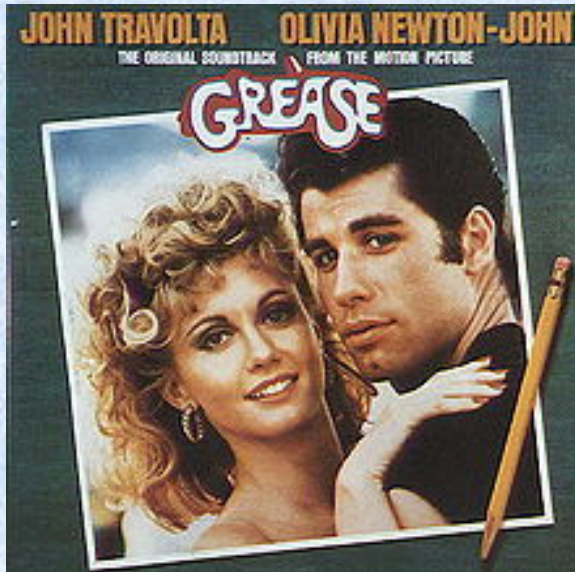
$$m = 1, 2, 3, \dots$$

Max Born (1882-1970)

Prix Nobel (1954)

Ondes de probabilité (1925)

$$P \propto |\Psi|^2$$



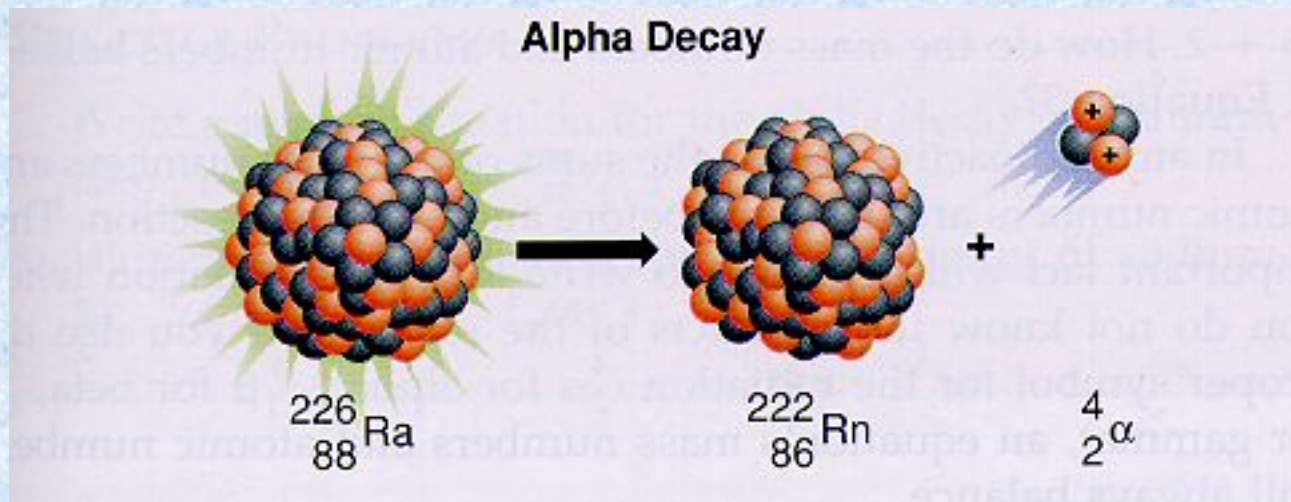
MB grand-père d'ONJ...

Physique nucléaire, équivalence masse-énergie (principe D6)

Nucléaire = source d'énergie, applications médicales, armes, etc.

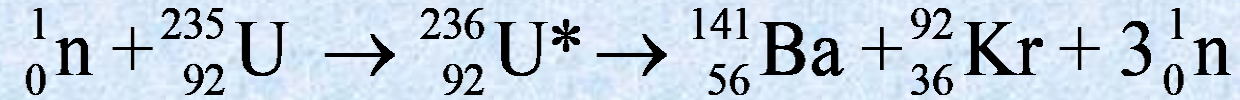
Fondé sur le fait que $\sum \text{masse}_{\text{avant}} \neq \sum \text{masse}_{\text{après}}$

La différence va en énergie: $E = mc^2$



Exemple

(Principes D7,D8)



$$m_i = m_U + m_n = 235.043925 \text{ u} + 1.008665 \text{ u} = 236.052590 \text{ u}$$

$$m_f = m_{\text{Ba}} + m_{\text{Kr}} + 3m_n = 140.914406 \text{ u} + 91.926111 \text{ u} + 3(1.008665 \text{ u}) = 235.866512 \text{ u}$$

$$\Delta m = m_f - m_i = -0.186078 \text{ u}$$

$$E = \Delta mc^2 = (0.186078 \text{ u}) \left(\frac{931.5 \text{ MeV}/c^2}{1 \text{ u}} \right) c^2 = 173.3 \text{ MeV}$$

Donc, une seule réaction vaut environ

$$(200 \text{ MeV}) \left(\frac{10^6 \text{ eV}}{1 \text{ MeV}} \right) \left(\frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{\text{eV}} \right) = 3.2 \times 10^{-11} \text{ J}$$

Un peu de relativité... En relativité, on apprend que lors de processus, il faut assurer la conservation du *quadri-vecteur* énergie-quantité de mouvement relativiste.

La *quantité de mouvement relativiste* d'un corps de masse m et de vitesse \mathbf{u} est

$$\vec{p} = \frac{m\vec{u}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \gamma m\vec{u}$$

L'énergie relativiste d'un objet de masse m qui se déplace à vitesse \mathbf{u} :

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \gamma mc^2$$

Pour $u \ll c$, E est l'énergie cinétique plus un nouveau terme, très important: mc^2 , *l'énergie de masse* ou *énergie au repos*.

Si $u = 0$, alors $E_{u=0} = mc^2$

La loi classique de conservation de la masse n'est pas valide au niveau nucléaire (même si elle est valide en chimie)

Énergie cinétique relativiste $K \equiv E - mc^2 = (\gamma - 1)mc^2 \left(\neq \frac{1}{2} m_\gamma v^2!! \right)$

Les relations $\mathbf{p} = m_\gamma \mathbf{u}$ et $E = m_\gamma c^2$, mènent à $\vec{\beta} \equiv \frac{\vec{u}}{c} = \frac{\vec{p}c}{E}$ et à l'*invariant fondamental* de la dynamique relativiste:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

Exemple. Une particule Λ est désintégrée en un proton et un pion:

$\Lambda \rightarrow p + \pi$, après quoi on observe p au repos. (a) Quelle est l'énergie du pion?

(b) Quelle était l'énergie du Λ ? Prenez $m_\Lambda = 1116$, $m_p = 938$ et $m_\pi = 140 \text{ MeV}/c^2$.

Exemple. Un méson K^0 (masse $498 \text{ MeV}/c^2$) se désintègre en deux pions chargés:

$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ (masse $140 \text{ MeV}/c^2$). Si le K^0 était au repos, trouvez les énergies, quantités de mouvement et vitesses des pions.

En mécanique classique, une particule de *masse nulle* n'a pas de sens, car $F = ma = 0$, $p = mv = 0$, mais ce n'est le cas en mécanique relativiste. De $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$, nous voyons que lorsque $m = 0$, l'énergie relativiste vaut $E = pc$ et $\beta = 1$, c.-à-d. $u = c$.

Désintégrations nucléaires

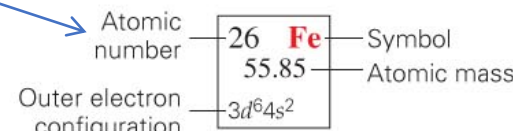
Isotopes ${}^A_Z X$ ou $X(A, Z)$ (différents isotopes d'un élément ont même Z mais différentes valeurs de A , c.-à-d. même nombre de protons et différent nombre de neutrons)

Nombre de masse A = nombre de nucléons (p + n)
 \approx masse molaire de l'élément (g/mol)

Numéro atomique Z = nombre de protons (identifie l'élément)

Particule	Masse	Charge
Proton	$1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg} = 938.27 \text{ MeV}$	$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
Neutron	$1.6750 \times 10^{-27} \text{ kg} = 939.57 \text{ MeV}$	0
Électron	$9.1094 \times 10^{-31} \text{ kg} = 511 \text{ keV}$	$-e$

PERIODS	s		d										p																
	GROUP I	GROUP II	Transition elements										GROUP III	GROUP IV	GROUP V	GROUP VI	GROUP VII	GROUP VIII											
1	1 H 1.01 1s ¹																		2 He 4.00 1s ²										
2	3 Li 6.94 2s ¹	4 Be 9.01 2s ²											5 B 10.81 2p ¹	6 C 12.01 2p ²	7 N 14.01 2p ³	8 O 16.00 2p ⁴	9 F 19.00 2p ⁵	10 Ne 20.18 2p ⁶											
3	11 Na 22.99 3s ¹	12 Mg 24.31 3s ²											13 Al 26.98 3p ¹	14 Si 28.09 3p ²	15 P 30.97 3p ³	16 S 32.07 3p ⁴	17 Cl 35.45 3p ⁵	18 Ar 39.95 3p ⁶											
4	19 K 39.10 4s ¹	20 Ca 40.08 4s ²	21 Sc 44.96 3d ¹ 4s ²	22 Ti 47.88 3d ² 4s ²	23 V 50.94 3d ³ 4s ²	24 Cr 52.00 3d ⁵ 4s ¹	25 Mn 54.94 3d ⁵ 4s ²	26 Fe 55.85 3d ⁶ 4s ²	27 Co 58.93 3d ⁷ 4s ²	28 Ni 58.69 3d ⁸ 4s ²	29 Cu 63.55 3d ¹⁰ 4s ¹	30 Zn 65.39 3d ¹⁰ 4s ²	31 Ga 69.72 4p ¹	32 Ge 72.61 4p ²	33 As 74.92 4p ³	34 Se 78.96 4p ⁴	35 Br 79.90 4p ⁵	36 Kr 83.80 4p ⁶											
5	37 Rb 85.47 5s ¹	38 Sr 87.62 5s ²	39 Y 88.96 4d ¹ 5s ²	40 Zr 91.22 4d ² 5s ²	41 Nb 92.91 4d ⁴ 5s ¹	42 Mo 95.94 4d ⁵ 5s ¹	43 Tc (98) 4d ⁵ 5s ²	44 Ru 101.07 4d ⁷ 5s ¹	45 Rh 102.91 4d ⁸ 5s ¹	46 Pd 106.42 4d ¹⁰ 5s ⁰	47 Ag 107.87 4d ¹⁰ 5s ¹	48 Cd 112.41 4d ¹⁰ 5s ²	49 In 114.82 5p ¹	50 Sn 118.71 5p ²	51 Sb 121.76 5p ³	52 Te 127.60 5p ⁴	53 I 126.90 5p ⁵	54 Xe 131.29 5p ⁶											
6	55 Cs 132.91 6s ¹	56 Ba 137.33 6s ²	57 La 138.91 5d ¹ 6s ²	58 Ce 140.12 4f ¹ 6s ²	59 Pr 140.91 4f ³ 6s ²	60 Nd 144.24 4f ⁴ 6s ²	61 Pm (145) 4f ⁵ 6s ²	62 Sm 150.36 4f ⁶ 6s ²	63 Eu 151.96 4f ⁷ 6s ²	64 Gd 157.25 5d ¹ 4f ⁷ 6s ²	65 Tb 158.93 4f ⁹ 6s ²	66 Dy 162.50 4f ¹⁰ 6s ²	67 Ho 164.93 4f ¹¹ 6s ²	68 Er 167.26 4f ¹² 6s ²	69 Tm 168.93 4f ¹³ 6s ²	70 Yb 173.04 4f ¹⁴ 6s ²	71 Lu 174.97 5d ¹ 4f ¹⁴ 6s ²												
7	87 Fr (223) 7s ¹	88 Ra 226.03 7s ²	89 Ac 227.03 6d ¹ 7s ²	90 Th 232.04 6d ² 7s ²	91 Pa 231.04 5f ² 6d ¹ 7s ²	92 U 238.03 5f ³ 6d ¹ 7s ²	93 Np 237.05 5f ⁴ 6d ¹ 7s ²	94 Pu (244) 5f ⁶ 6d ⁰ 7s ²	95 Am (243) 5f ⁷ 6d ⁰ 7s ²	96 Cm (247) 5f ⁷ 6d ¹ 7s ²	97 Bk (247) 5f ⁹ 6d ¹ 7s ²	98 Cf (251) 5f ¹⁰ 6d ⁰ 7s ²	99 Es (252) 5s ¹ 16d ⁰ 7s ²	100 Fm (257) 5f ¹² 6d ⁰ 7s ²	101 Md (258) 5f ¹³ 6d ⁰ 7s ²	102 No (259) 5f ¹⁴ 6d ⁰ 7s ²	103 Lr (262) 5f ¹⁴ 6d ¹ 7s ²	104 Rf (261) 6d ² 7s ²	105 Db (262) 6d ³ 7s ²	106 Sg (266) 6d ⁴ 7s ²	107 Bh (264) 6d ⁵ 7s ²	108 Hs (269) 6d ⁶ 7s ²	109 Mt (268) 6d ⁷ 7s ²	110 (271)	111 (272)	112 (277)	114 (289)	116 (289)	118 (293)



	f														
*	58 Ce 140.12 5d ¹ 4f ¹ 6s ²	59 Pr 140.91 4f ³ 6s ²	60 Nd 144.24 4f ⁴ 6s ²	61 Pm (145) 4f ⁵ 6s ²	62 Sm 150.36 4f ⁶ 6s ²	63 Eu 151.96 4f ⁷ 6s ²	64 Gd 157.25 5d ¹ 4f ⁷ 6s ²	65 Tb 158.93 4f ⁹ 6s ²	66 Dy 162.50 4f ¹⁰ 6s ²	67 Ho 164.93 4f ¹¹ 6s ²	68 Er 167.26 4f ¹² 6s ²	69 Tm 168.93 4f ¹³ 6s ²	70 Yb 173.04 4f ¹⁴ 6s ²	71 Lu 174.97 5d ¹ 4f ¹⁴ 6s ²	Lanthanides
†	90 Th 232.04 6d ² 7s ²	91 Pa 231.04 5f ² 6d ¹ 7s ²	92 U 238.03 5f ³ 6d ¹ 7s ²	93 Np 237.05 5f ⁴ 6d ¹ 7s ²	94 Pu (244) 5f ⁶ 6d ⁰ 7s ²	95 Am (243) 5f ⁷ 6d ⁰ 7s ²	96 Cm (247) 5f ⁷ 6d ¹ 7s ²	97 Bk (247) 5f ⁹ 6d ¹ 7s ²	98 Cf (251) 5f ¹⁰ 6d ⁰ 7s ²	99 Es (252) 5s ¹ 16d ⁰ 7s ²	100 Fm (257) 5f ¹² 6d ⁰ 7s ²	101 Md (258) 5f ¹³ 6d ⁰ 7s ²	102 No (259) 5f ¹⁴ 6d ⁰ 7s ²	103 Lr (262) 5f ¹⁴ 6d ¹ 7s ²	Actinides

© 2010 Pearson Education, Inc.

Équivalence masse-énergie

$$E = mc^2$$

Unité d'énergie (électron-volt eV)

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Unité de masse atomique (u)

$$1 \text{ u} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1.49 \times 10^{-10} \text{ J}/c^2 = 931.5 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_e = 5.4857990943 \times 10^{-4} \text{ u}$$

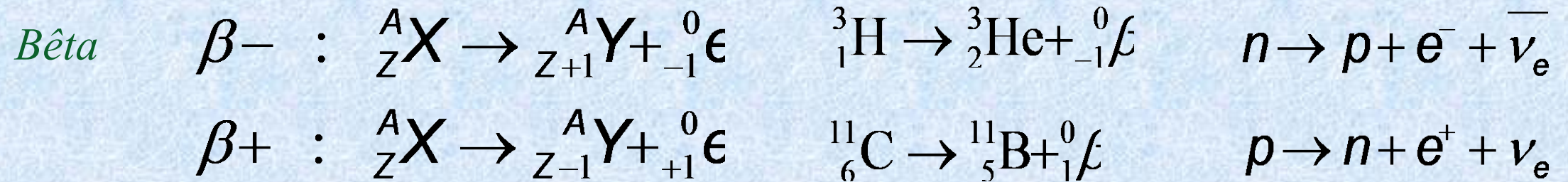
$$m_p = 1.00727646677 \text{ u}$$

$$m_n = 1.00866491597 \text{ u}$$

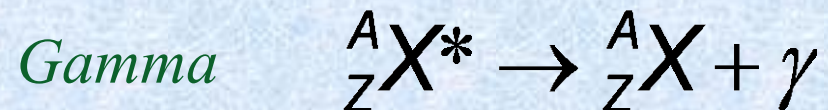
Radioactivité



Noyaux positifs (+2e), bloqués par une feuille de papier ou 5 cm d'air



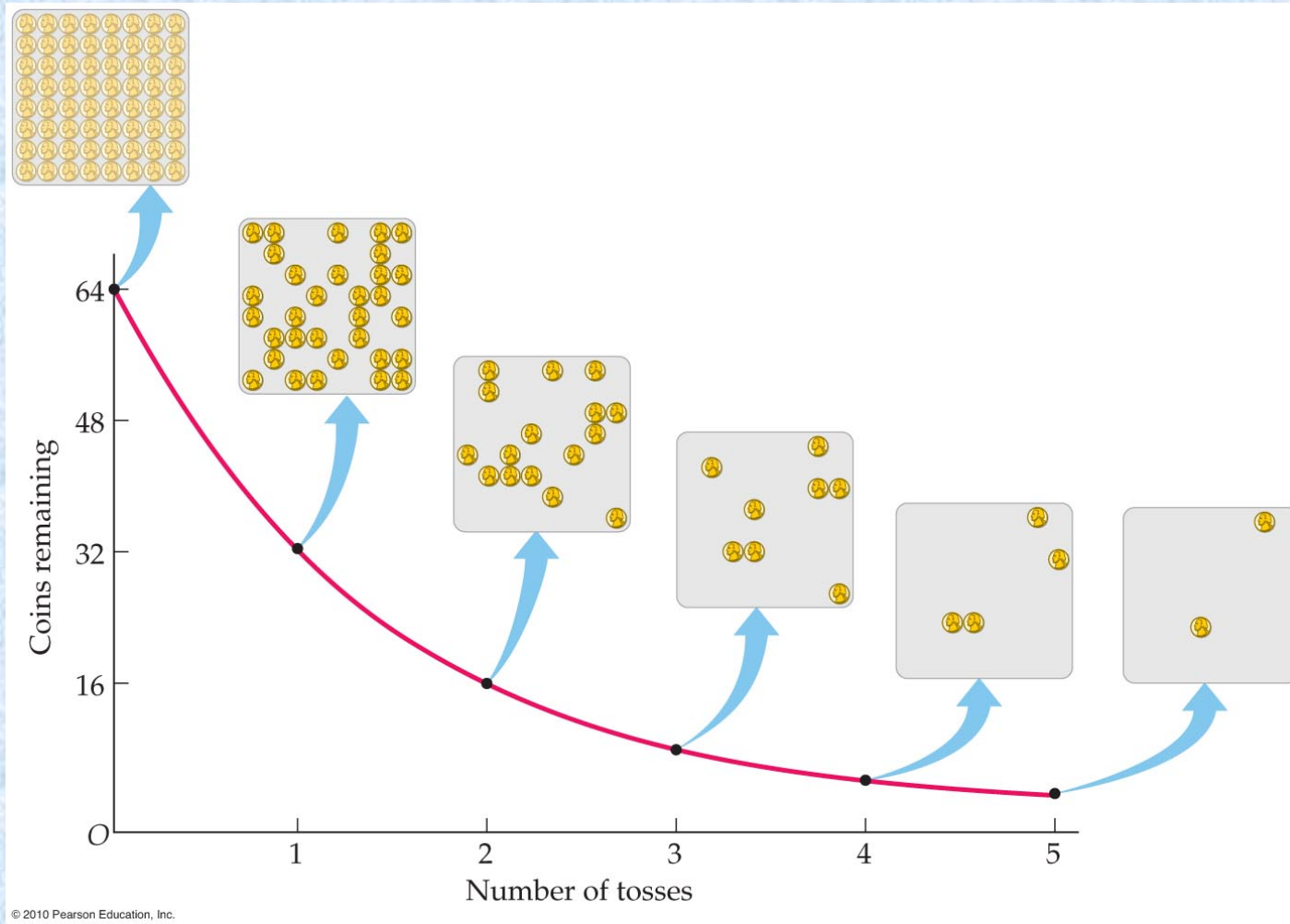
Peuvent parcourir plusieurs mètres dans l'air. Bloqué par quelques mm d'aluminium. Domageable si ingéré via air, nourriture, etc.



Requiert plus de protection: quelques cm de plomb, etc. Ondes em dont $\lambda \approx 10^{-11}$ m .

La désintégration nucléaire est décrite par une fonction exponentielle décroissante.

Simulation - https://www.walter-fendt.de/html5/phfr/lawdecay_fr.htm

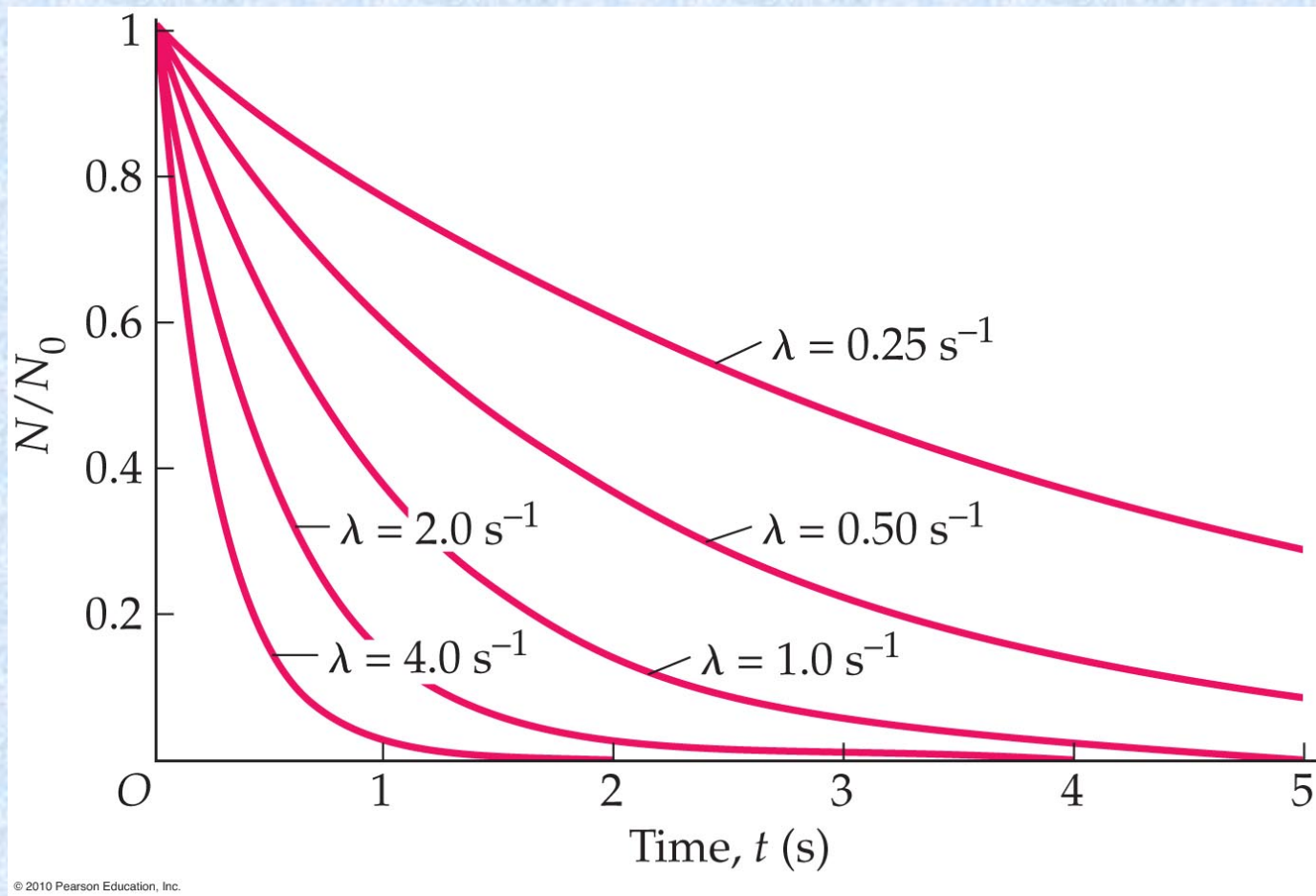


Mathématiquement : $\frac{dN}{dt} \propto N \rightarrow \frac{dN}{dt} = -\lambda N$

Plus λ est grand, plus la décroissance est rapide.

Activité $A \equiv \left| \frac{dN}{dt} \right|$

proportionnelle à N



Solution $N = N_0 \exp(-\lambda t) = N_0 \exp\left(-\frac{t \ln 2}{T_{1/2}}\right)$ avec $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$

N_0 est la quantité radioactive (masse, nombre de noyaux, etc.) à $t = 0$.

$T_{1/2}$ est la demi-vie, λ est la *constante de désintégration*

Relation inverse (on demande t pour N donné, compétence C1 avec fonctions \ln et e)

$$t = -\frac{T_{1/2}}{\ln 2} \ln \frac{N}{N_0}$$

avec $\ln(2) \cong 0.693$

Énergie nucléaire

Considérez un noyau d'hélium, qui contient 2 protons et 2 neutrons. Leur masse totale vaut donc

$$2m_p + 2m_n = 2(1.007276 \text{ u}) + 2(1.008665 \text{ u}) = 4.031882 \text{ u}$$

D'autre part, le noyau de He(4,2) a une masse de 4.001506 u (masse de l'atome d'hélium moins deux électrons).

La *somme des constituants a une plus grande masse que le noyau total*, avec un écart de $4.031882 \text{ u} - 4.001506 \text{ u} = 0.030376 \text{ u} = 28.3 \text{ MeV}/c^2$.

Cette différence de masse correspond à l'*énergie de liaison B*, c.-à-d. l'énergie minimale nécessaire pour séparer le noyau d'hélium en ses constituants.

Pour l'hélium, cette énergie est de 28.3 MeV, soit $B/A = 7.07 \text{ MeV}$ par nucléon (il y en a quatre).

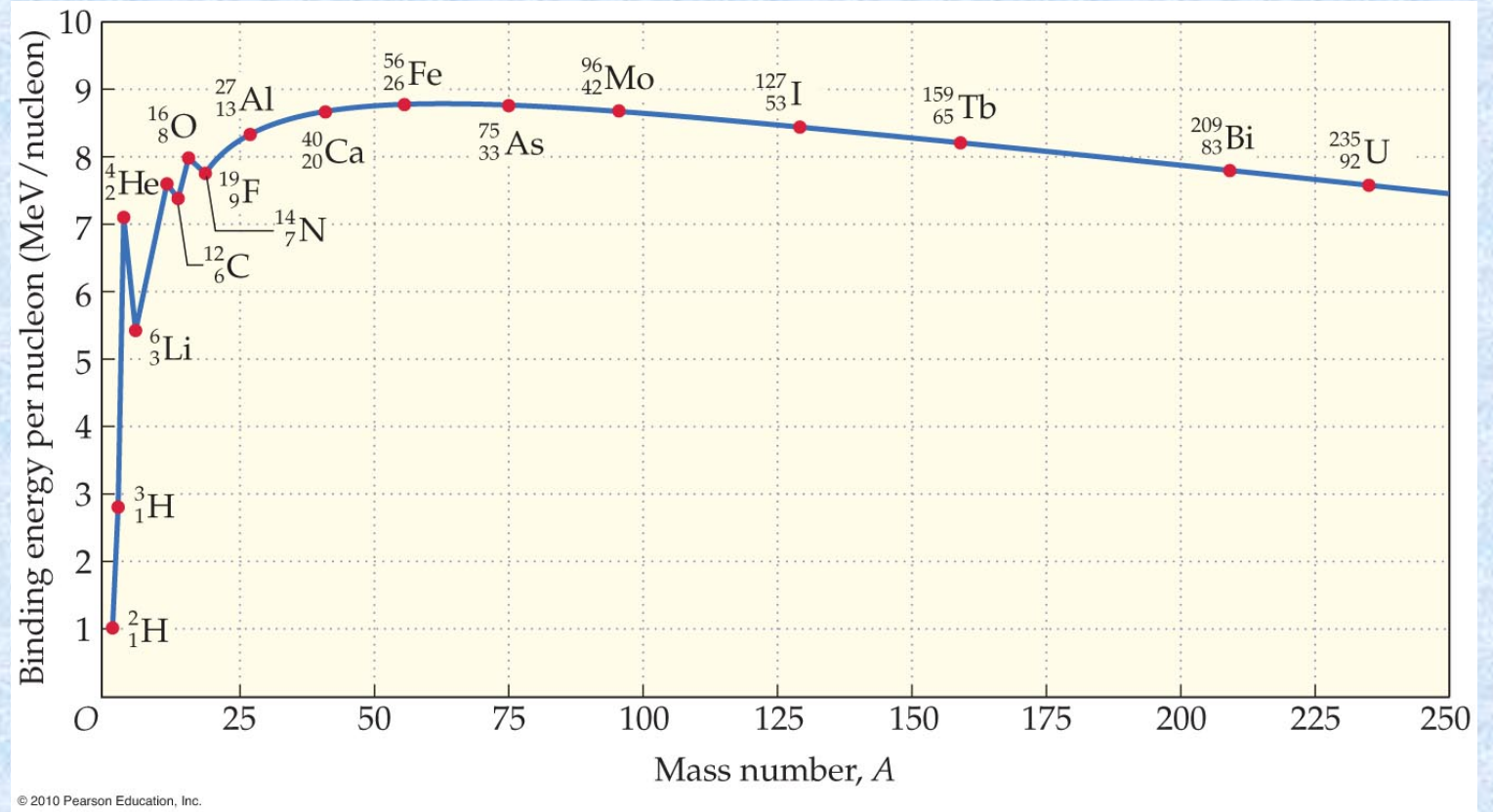
Énergie de liaison par nucléon

Moyenne environ 8 MeV

Maximale vers $A \cong 50$, pour des noyaux stables (ex. Fe)

Fusion les noyaux avec petits A se joignent en des produits qui ont une plus grande énergie par nucléon B/A .

Fission les noyaux avec grands A brisés en des produits qui ont une plus grande B/A .



© 2010 Pearson Education, Inc.

Table 10-4: Binding Energy per Nucleon

Nucleus	B.E. (MeV)	Nucleus	B.E. (MeV)	Nucleus	B.E. (MeV)
^2_1H	1.112	$^{10}_5\text{B}$	6.475	$^{140}_{54}\text{Xe}$	8.295
^3_1H	2.827	$^{12}_6\text{C}$	7.68	$^{235}_{92}\text{U}$	7.59
^3_2He	2.572	$^{14}_7\text{N}$	7.475	$^{236}_{92}\text{U}$	7.586
^4_2He	7.074	$^{56}_{26}\text{Fe}$	8.791	$^{238}_{92}\text{U}$	7.57
^6_3Li	5.332	$^{95}_{38}\text{Sr}$	8.552	$^{239}_{92}\text{U}$	7.558
^7_3Li	5.606	$^{100}_{40}\text{Zr}$	8.531	$^{239}_{94}\text{Pu}$	7.56
^7_4Be	5.371	$^{139}_{54}\text{Xe}$	8.314	$^{240}_{94}\text{Pu}$	7.556

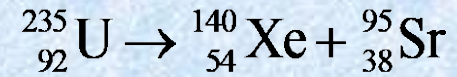
Deux façons d'extraire l'énergie nucléaire:

1. **Fission:** si on brise un noyau lourd, les deux noyaux légers auraient de plus grands B/A et de l'énergie serait libérée. La fission est plus probable avec des neutrons incidents "lents" ou "froids". Ces neutrons sont obtenus à l'aide d'un *modérateur*, un matériau comme l'eau.

2. **Fusion:** si on lie deux noyaux très légers, le noyau plus lourd résultant aura un plus grand B/A et de l'énergie serait libérée. Les techniques ne sont pas encore au point (dans un 10aine d'années peut-être), mais serait avantageuse aux plans économique et environnemental.

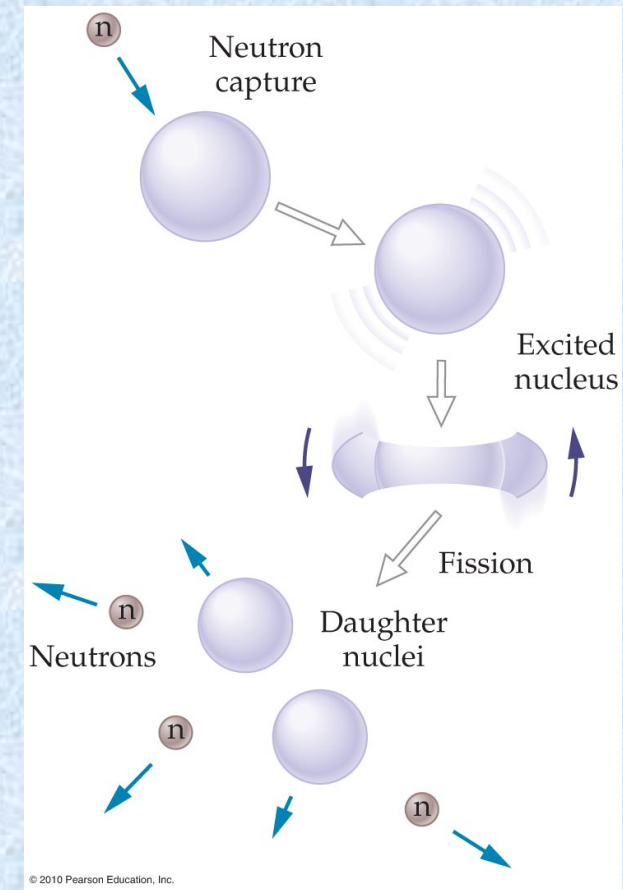
La stabilité (ou instabilité) de noyaux est déterminée par l'équilibre entre l'interaction nucléaire forte (qui attire les voisins) et l'interaction électromagnétique (les protons des noyaux se repoussent).

Fission spontanée

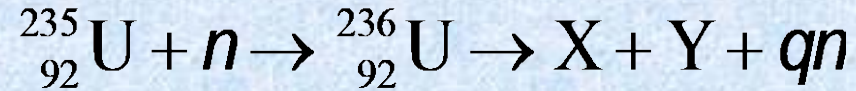


De l'exemple précédent, on voit que 190 MeV serait libérée sous forme d'énergie cinétique des fragments, puis de la chaleur en frappant les atomes voisins.

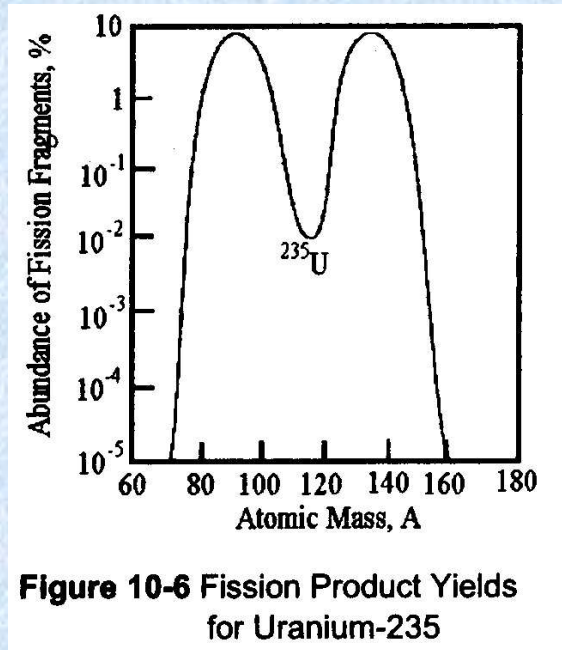
Réaction rare. Moins commune que la *fission induite* par des neutrons à l'état thermique (*thermalized*) ou neutrons lents ($K \approx 1/40$ eV \approx molécules à température de la pièce).



Fragments de fission



q = petit entier, X , Y sont des noyaux groupés autour de la région où masse = $A_U/2 = 235/2$. Le minimum signifie que les paires de fragments auront généralement des masses inégales.

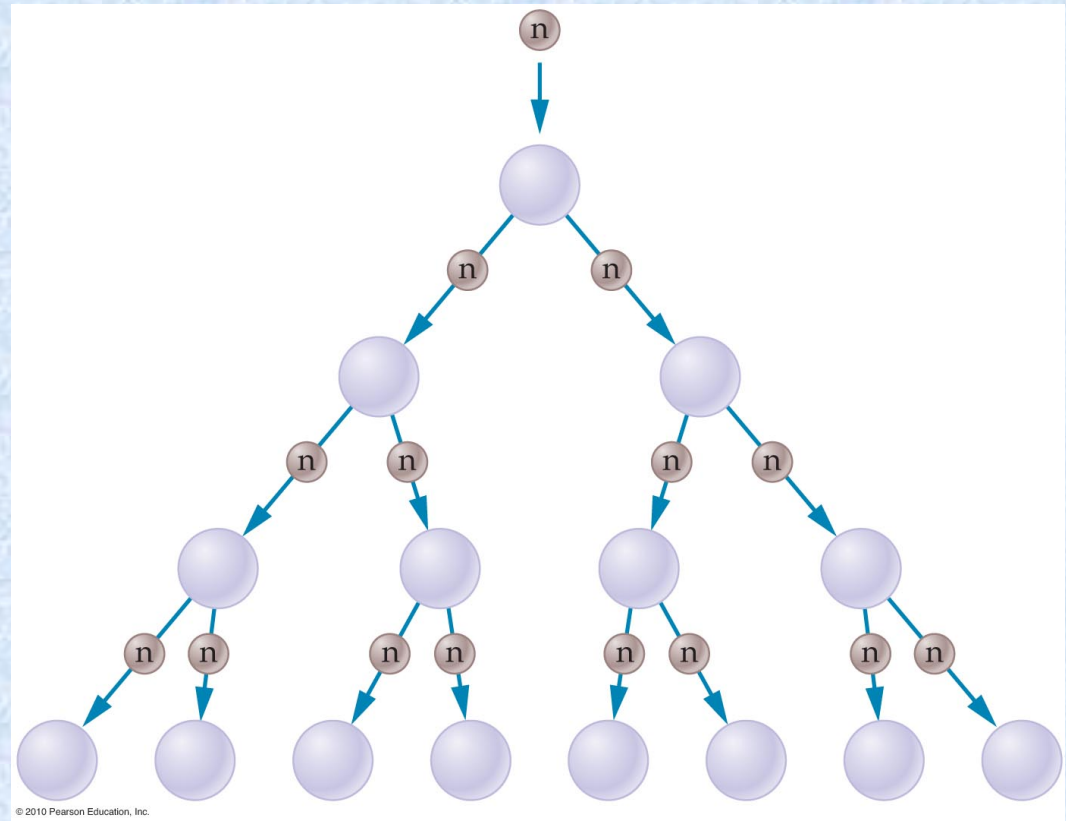


Fragments souvent riches en neutrons et radioactifs (séries de type bêta accompagné de gamma, les états intermédiaires portent des risques en cas de fuite de réacteurs).

Réaction en chaîne

Les neutrons émis sont souvent rapides. Le processus de *modération* les ralentit, et les n peuvent induire d'autres fissions.

On a des **réactions contrôlées** (1ère le 2 décembre 1942 à l'Univ. de Chicago par E Fermi) et des **réactions non-contrôlées** (bombes atomiques).



Réacteurs nucléaires

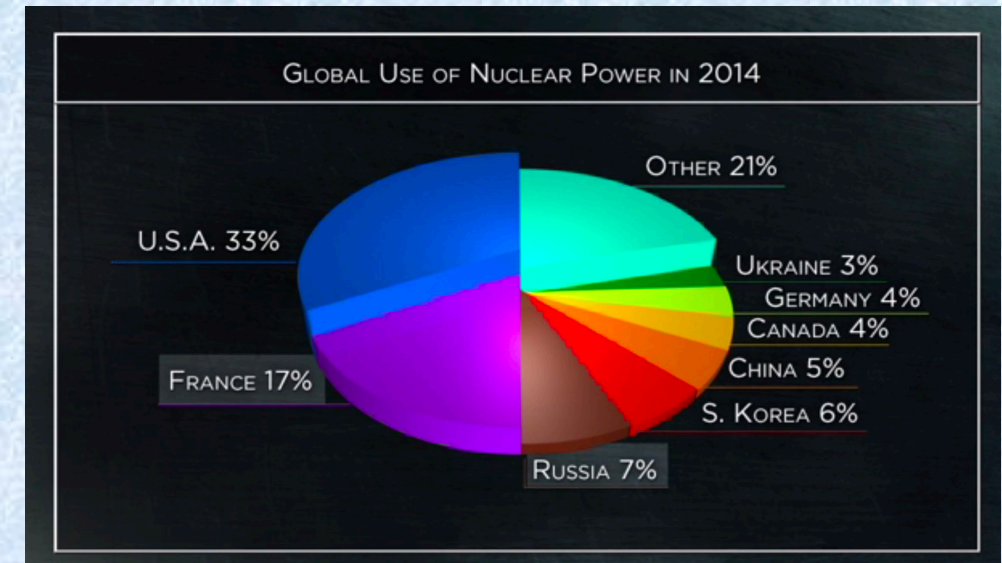
But: Établir et maintenir des réactions en chaîne contrôlées. Le combustible nucléaire est souvent l'uranium-235 (abondant à 0.72% de l'uranium naturel, l'uranium-238 l'est à 99.2745%), qui est le seul uranium *fissile*. L'U-235 est souvent *enrichi* de 0.72% à 3-4%.

Nucléaire = 11% de l'énergie électrique mondiale (US, Japon, France en produisent la moitié).

Réduction des émissions de carbone.

Risques d'accidents: Three Mile Island (1979, pas de décès immédiats, cancers), Chernobyl (1986, 30 morts immédiates et 3 fois plus ensuite), Fukushima (2011, suite à un tsunami). L'enfouissement des déchets radioactifs est un défi.

La durée de vie d'un réacteur est typiquement 30 à 40 ans.



Réacteur CANDU (CANada Deuterium Uranium)

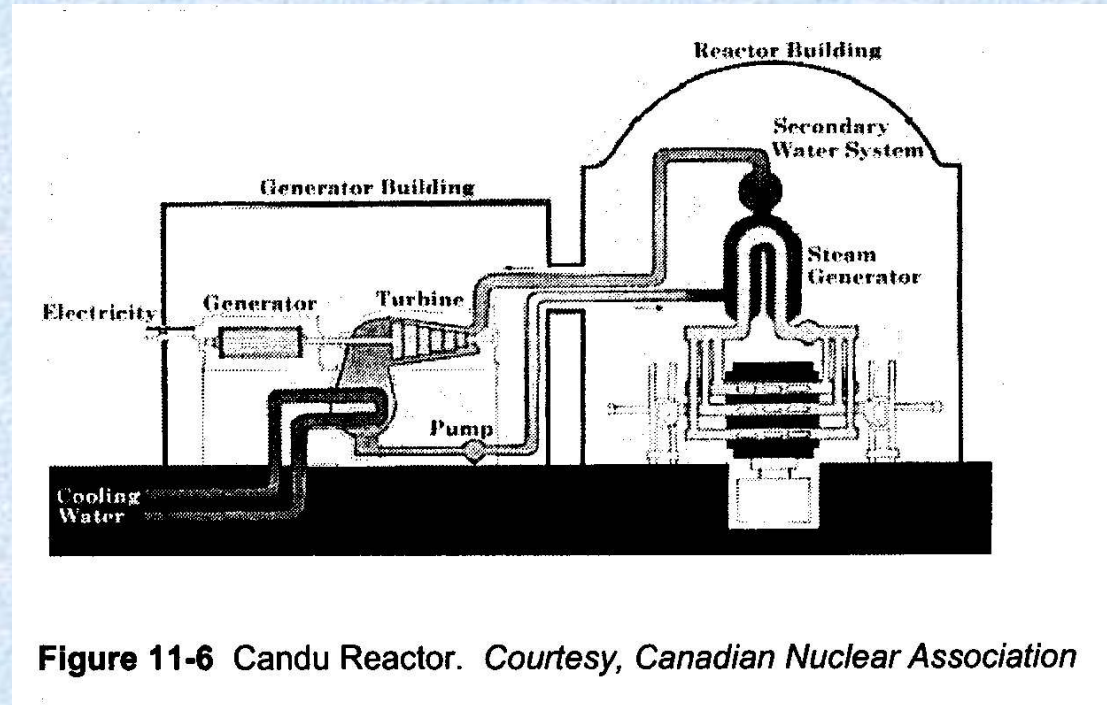


Figure 11-6 Candu Reactor. Courtesy, Canadian Nuclear Association

Modérateur à l'eau lourde (D_2O), combustible = uranium
(Deutérium $D = {}^2_1H$ "hydrogène lourd")

Développé fin des années 1950.

Autres pays: Inde, Corée du Sud, Argentine, Roumanie, Chine, Pakistan

Contrôle, stabilité, sécurité de réacteurs

Extraordinairement sécuritaire, si on tient compte de la quantité d'énergie produite en comparant avec d'autres sources. Pas d'émissions de gas à effet de serre, pas d'émission toxique dans l'atmosphère, ne contribue pas aux changements climatiques, 100aine d'accidents mineurs dans décès.

Problèmes = fusion du coeur du réacteur (core meltdown) et déchets radioactifs.

Three Mile Island: 28 mars 1979 (12 jours après la sortie de *China Syndrome*), tournant dans l'industrie nucléaire mondiale, nettoyage complété en 1993 au coût de 1 milliard \$

Tchernobyl: 26 avril 1986, 56 décès directs, 4000 retombées radioactives

Fukushima Daiichi: 11 mars 2011, série de malchances, aucun décès immédiat, peut-être quelques centaines dûs aux retombées dans les années à venir.

D'autres ressources et meilleure technologie (ex. Gaz naturel, fracturation hydraulique) diminue l'intérêt pour l'énergie nucléaire.

Fusion nucléaire

La réaction ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$

libère 17.6 MeV.

Défis causés par : interactions nucléaires de courte portée, répulsion électrostatique de grande portée.

Méthode: chauffer le mélange deutérium-tritium, vitesse moyenne des particules

$$v = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}} \quad k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

Les particules auront assez d'énergie cinétique pour surmonter la répulsion électrostatique.

T typiques: 10aines et 100aines de millions de degrés $T\tau n > 6 \times 10^{28} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$

Токмак : тороидальная камера с магнитными катушками (chambre toroïdale avec bobines magnétiques)

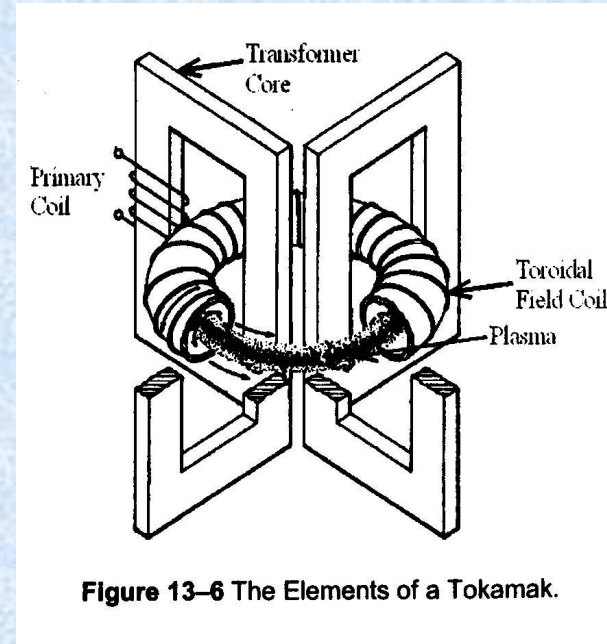
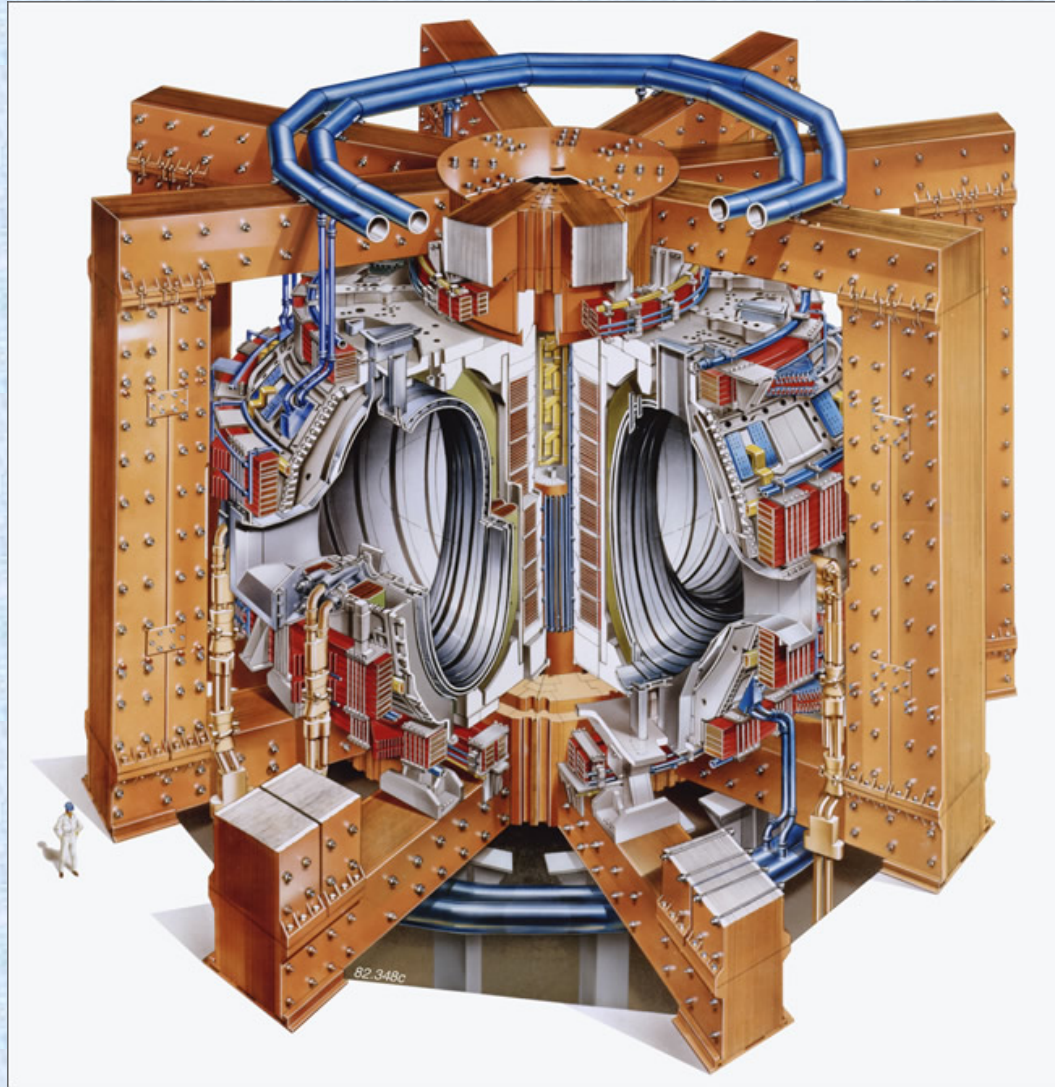


Figure 13-6 The Elements of a Tokamak.

Avantages de la fusion:

Matériaux disponibles: deutérium D de l'eau de mer, tritium produit par l'activation par neutron du lithium-6

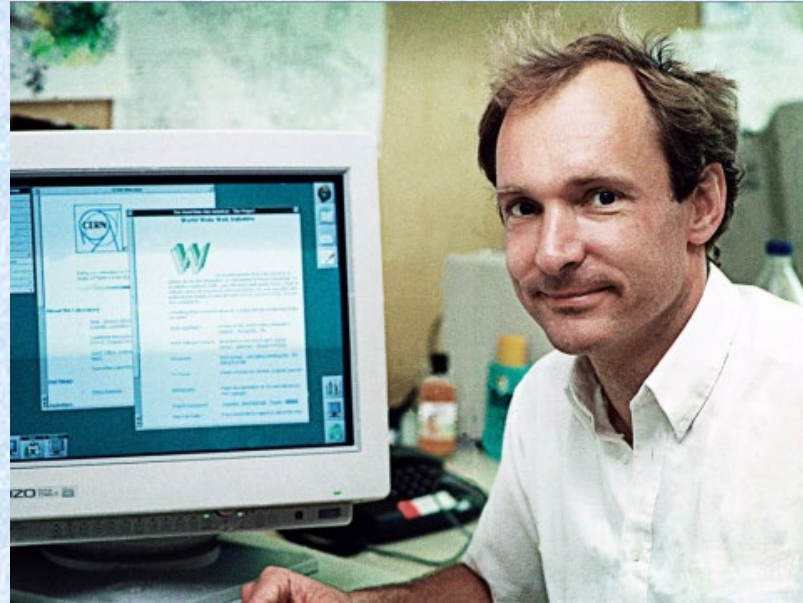
Plus sécuritaire que la fission, moins de combustible présent, l'emballement n'est pas possible, en cas de défautuosité des aimants le plasma disparaîtra tout simplement

Déchet radioactifs moins problématiques. Par ex. $T_{1/2}$ du tritium = 12 ans

Physique des particules – objectifs généraux

Comprendre l'univers

Applications pratiques
(Souvent imprévisibles:
Tim Berners-Lee propose WWW
en mars 1989)



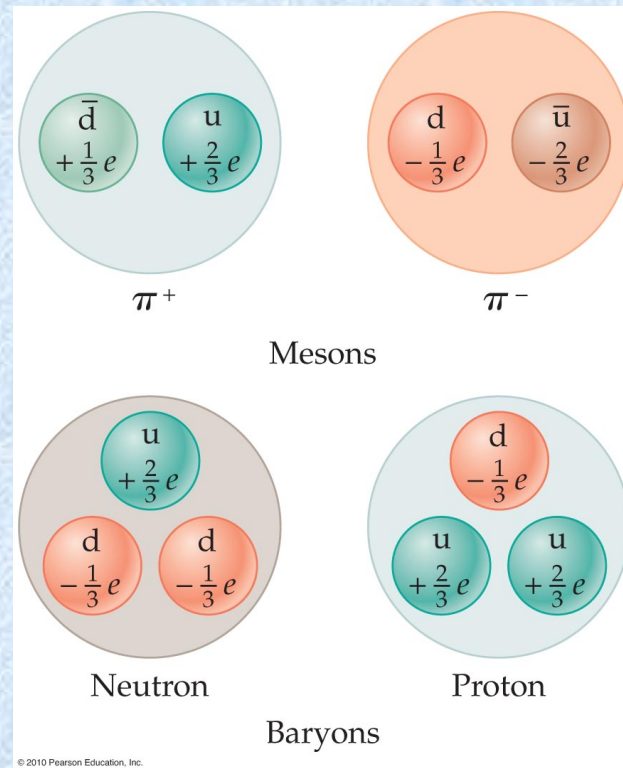
<http://uk.businessinsider.com/sir-tim-berners-lee-oxford-university-professor-2016-10>

Murray Gell-Mann (1929)

Prix Nobel (1969)

Modèle des quarks (1964)

George Zweig (1937) propose les quarks



Modèle standard de la physique des particules (1967)
Prix Nobel (1979)

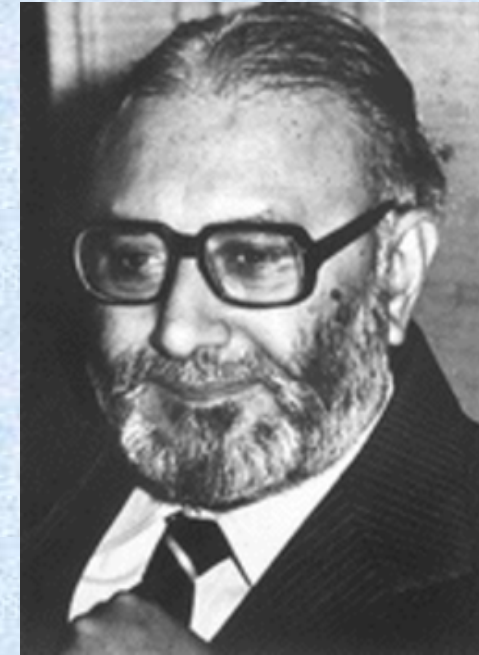
Steven Weinberg



Sheldon Glashow



Abdus Salam



“Particules élémentaires” = champs quantiques

Modèle standard – fermions et bosons

Fermions (spin = entier + 1/2) fondamentaux = **quarks & leptons** (“matière”)

The diagram shows a 3D grid of fermions. The vertical axis is labeled 'Quarks' and 'Leptons'. The horizontal axis is labeled 'I', 'II', and 'III', representing the three generations of matter. The grid contains the following particles:

	I	II	III
Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
Leptons	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
	e electron	μ muon	τ tau

The Generations of Matter

Hadrons

TABLE 32–9 Quark Composition of Some Hadrons

Particle	Quark Composition
MESONS	
π^+	$u\bar{d}$
π^-	$\bar{u}d$
K^+	$u\bar{s}$
K^-	$\bar{u}s$
K^0	$d\bar{s}$
BARYONS	
p	uud
n	udd
Σ^+	uus
Σ^0	uds
Σ^-	dds
Ξ^0	uss
Ξ^-	dss
Ω^-	sss

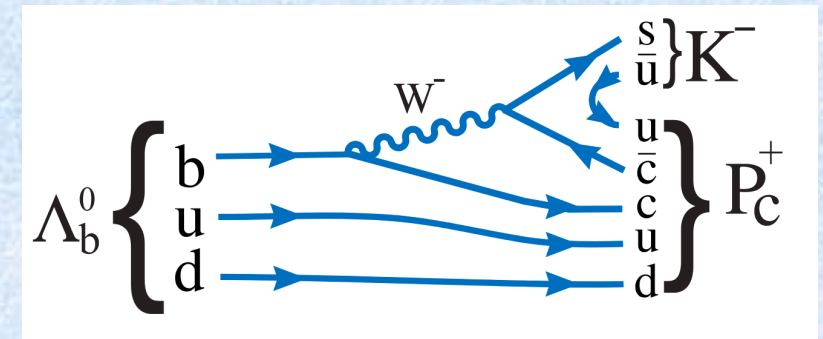
© 2010 Pearson Education, Inc.

Mésos : états liés à une paire quark-antiquark

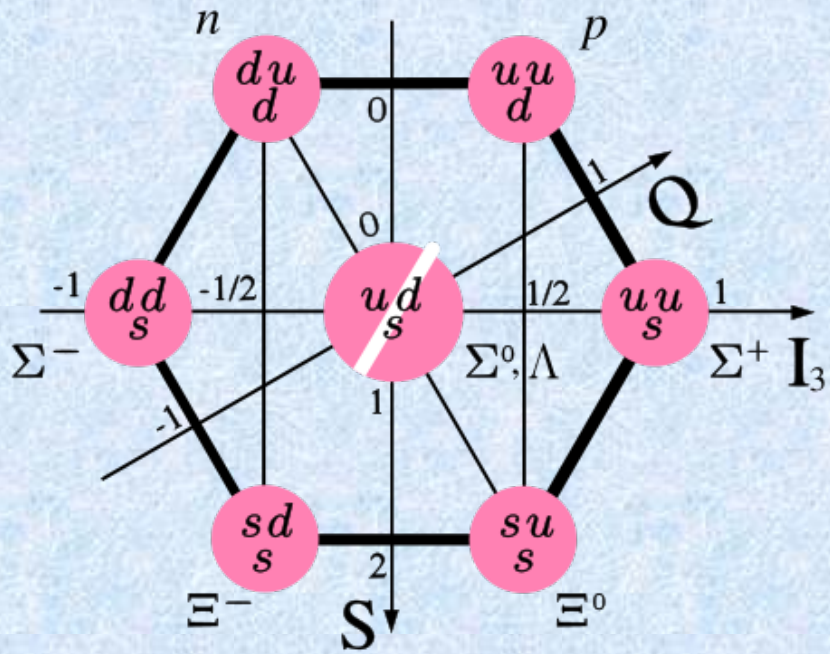
Baryons : états liés à trois quarks (ou plus)

Pentaquarks : états liés à quatre quarks et un antiquark

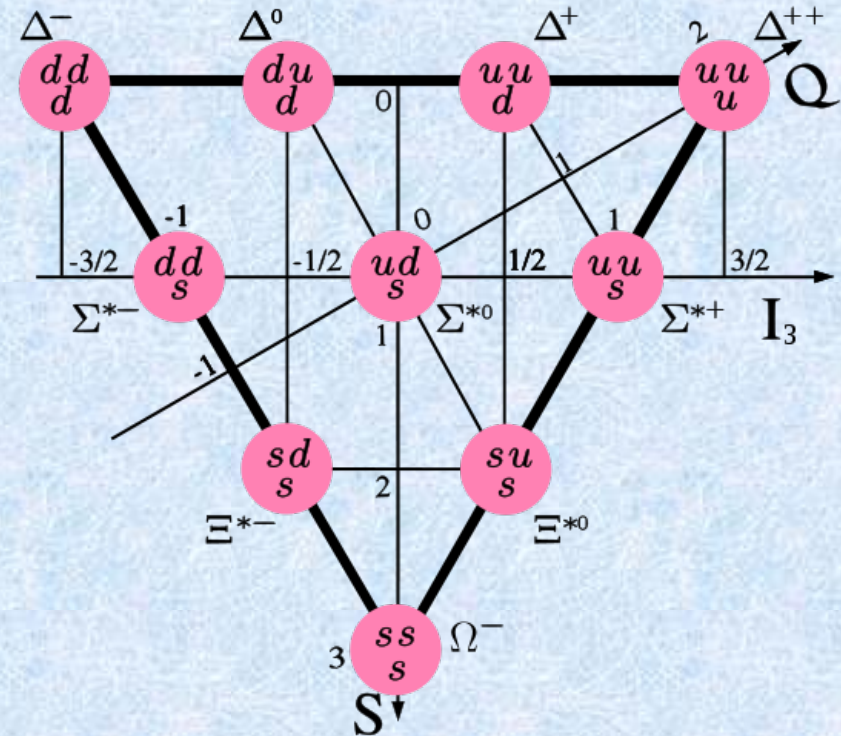
observés au LHCb en 2015:



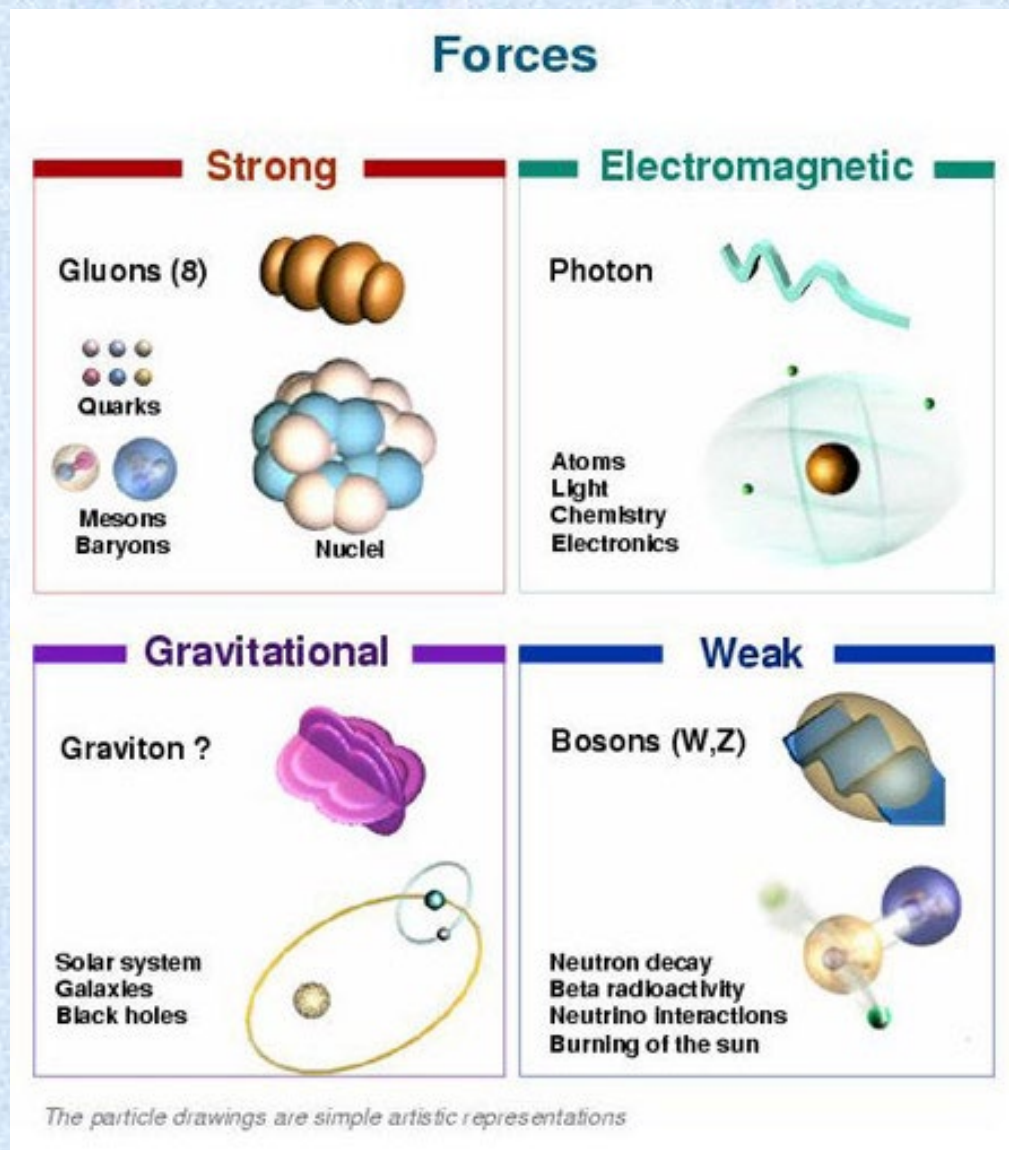
Octet de baryons



Décuplet de baryons



Bosons (spin = entier) fondamentaux (interaction dans la matière)



Interaction = échange d'un boson
“diagrammes de Feynman” \approx blocs lego

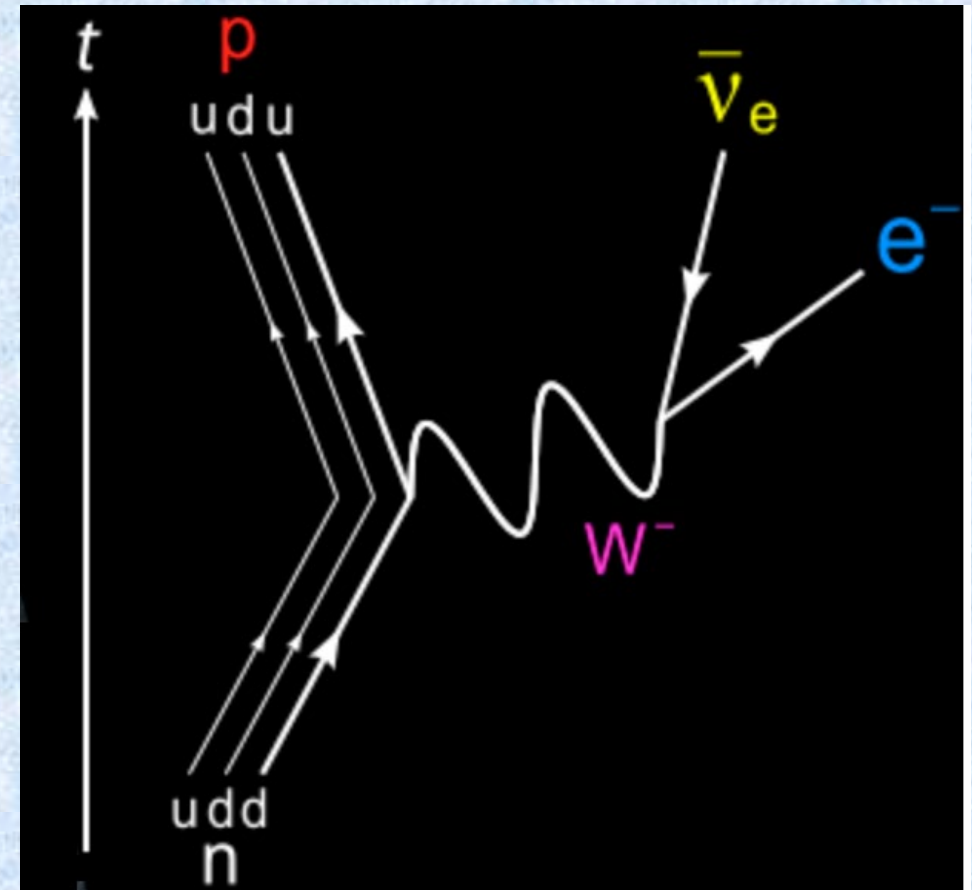
Ex. $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

où $n = udd$ et $p = uud$

et les sous-réactions

$$d \rightarrow u + W^- \text{ et } W^- \rightarrow e + \bar{\nu}$$

où la charge électrique (principe D7) et autres nombres quantiques sont conservés...





Un grand de la physique moderne:
Richard Phillips Feynman (1918-1988)
Prix Nobel 1965 pour le développement de
l'électrodynamique quantique

Excellent pédagogue, ses livres et vidéos sont
recommandés, dont les *Feynman Lectures on Physics*

<https://www.youtube.com/watch?v=P1ww1IXRfTA>

<https://www.britannica.com/biography/Richard-Feynman>

Autres ressources multimédia

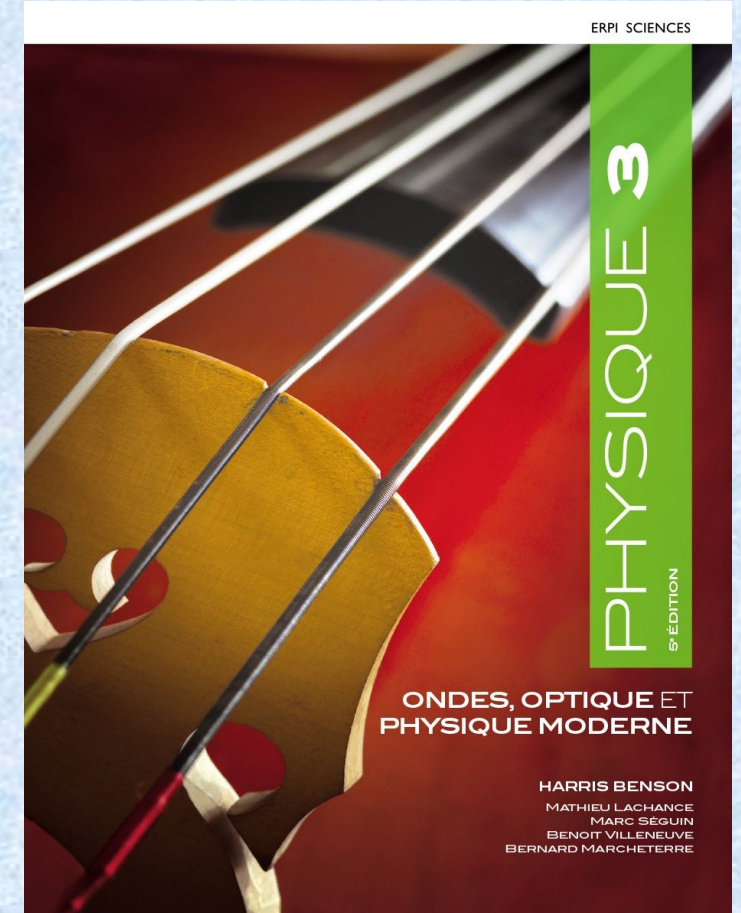
Site de Walter Fendt: <http://www.walter-fendt.de/html5/phfr/> (en français!)
(mathématiques: <http://www.walter-fendt.de/html5/mfr/>)

<https://phet.colorado.edu/> **Physics Education Technology** (Univ Colorado, Boulder)

<https://kcvs.ca/concrete/visualizations/modern-physics> The King's (College) Centre for
Visualization in Science

Manuel utile pour les termes en français, plus avancé que Phys 20, 30

Harris Benson et autres, Physique 1, 2, 3, 5^e édition, Édition du Renouveau pédagogique



Autres ressources

Expériences offertes au Dept of Physics de la Univ of Alberta et reliées à Physique 30 (rapport e/m, séries de Balmer et radioactivité ou supraconductivité)

<https://www.ualberta.ca/physics/outreach/high-school-physics-experiments>

Séances et documents offerts en français!

<https://www.ualberta.ca/physics/outreach/high-school-physics-talks>

M de Montigny donne des présentations sur la physique des particules orientées en révision de l'unité D de physique 30.

Labs de la Faculté Saint-Jean:

<https://sites.ualberta.ca/~mdemonti/cours/physq124/lab124.pdf>

<https://sites.ualberta.ca/~mdemonti/cours/physq126/Lab126.pdf>

<https://sites.ualberta.ca/~mdemonti/cours/physq131/lab130-131.pdf>

<https://www.ualberta.ca/physics/outreach/department-of-physics-astronomical-observatory>

Questions?

Marc de Montigny
Faculté Saint-Jean
University of Alberta
Edmonton T6C 4G9

Courriel: mdemonti@ualberta.ca
Téléphone 780 465 8739