



Des particules et des interactions

Bref état des lieux de la physique des particules

*Transparents préparés pour l'essentiel par Loïc VALERY
(doctorant dans l'équipe ATLAS du LPC)
à l'occasion d'une autre journée Masterclasse*



Contenu

- ◆ *Des particules ...*
- ◆ *... des interactions ...*
- ◆ *... et un modèle !*

Des particules ...

Plongeons-nous au cœur de la matière !



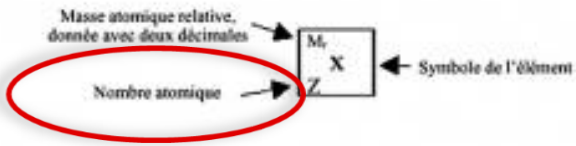
Un peu de chimie ...

- ◆ Division d'une goutte d'eau
- ◆ Le plus petit morceau d'eau = molécule d'eau (H_2O)
- ◆ Plus petit ? **Atomes** d'hydrogène et d'oxygène.
- ◆ La matière « ordinaire » peut être décomposée en atomes.
- ◆ Atomes classés selon leurs propriétés (classification périodique des éléments)

Un peu de chimie ...

Tableau périodique des éléments

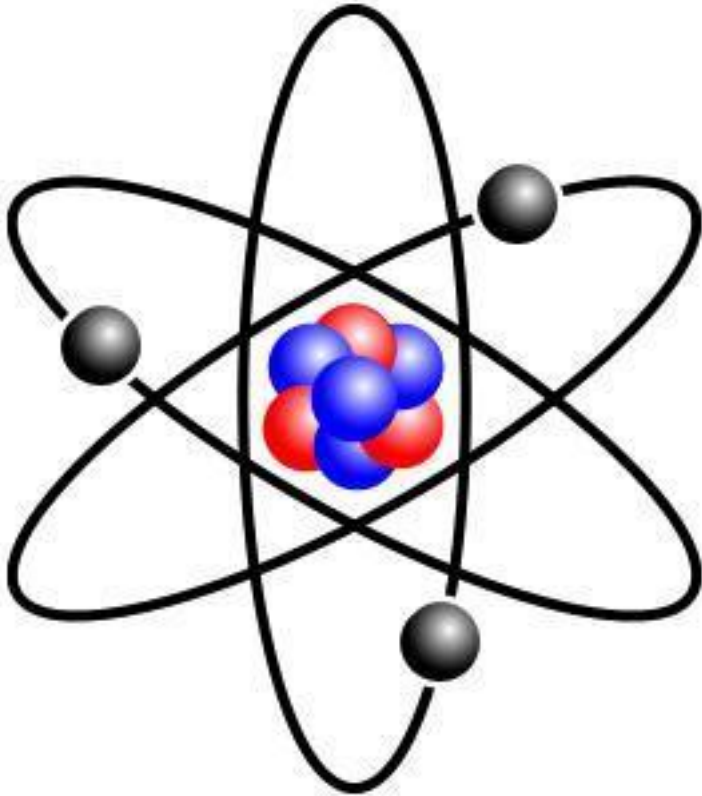
1 (Ia)		2 (IIa)												13 (IIIa)	14 (IVa)	15 (Va)	16 (VIa)	17 (VIIa)	18 (VIIIa)	
1,01 H 1																			4,00 He 2	
6,94 Li 3	9,01 Be 4																			
22,99 Na 11	24,31 Mg 12																			
39,10 K 19	40,08 Ca 20	44,96 Sc 21	47,88 Ti 22	50,94 V 23	52,00 Cr 24	54,94 Mn 25	55,85 Fe 26	58,93 Co 27	58,69 Ni 28	63,55 Cu 29	65,39 Zn 30	69,72 Ga 31	72,61 Ge 32	74,92 As 33	78,96 Se 34	79,90 Br 35	83,80 Kr 36			
85,47 Rb 37	87,62 Sr 38	88,91 Y 39	91,22 Zr 40	92,91 Nb 41	95,94 Mo 42	Te* 43	101,07 Ru 44	102,91 Rh 45	106,42 Pd 46	107,87 Ag 47	112,41 Cd 48	114,82 In 49	118,71 Sn 50	121,75 Sb 51	127,60 Te 52	126,90 I 53	131,29 Xe 54			
132,91 Cs 55	137,33 Ba 56	57-70 La 71	174,97 Hf 72	178,49 Ta 73	180,95 W 74	183,85 Re 75	186,21 Os 76	190,21 Ir 77	192,22 Pt 78	195,08 Au 79	196,97 Hg 80	200,59 Tl 81	204,38 Pb 82	207,21 Bi 83	208,98 Po* 84			At*	Rn*	
Fr*	Ra*	89-102 Lr*	103 Rf*	104 Db*	105 Sg*	106 Bh*	107 Hs*	108 Mt*	109 Uun*	110 Uuu*	111 Uub*									



138,92 La 57	140,12 Ce 58	140,91 Pr 59	144,24 Nd 60	Pm*	150,36 Sm 62	151,97 Eu 63	157,25 Gd 64	158,93 Tb 65	162,50 Dy 66	164,93 Ho 67	167,26 Er 68	168,93 Tm 69	173,04 Yb 70
Ac*	232,04 Th 90	231,04 Pa 91	238,03 U 92	Np*	Pu*	Am*	Cm*	Bk*	Cf*	Es*	Fm*	Md*	No*
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102

* : Eléments n'ayant pas de nucléide (isotope) de durée de vie suffisamment longue et n'ayant donc pas une composition terrestre caractéristique.

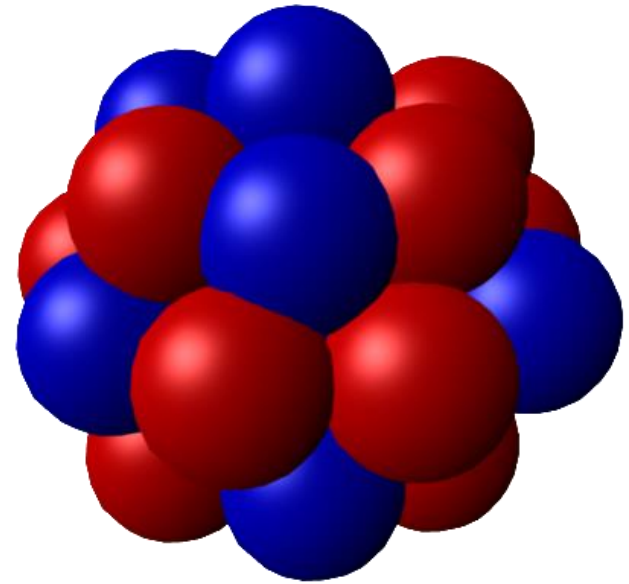
Un peu de chimie ...



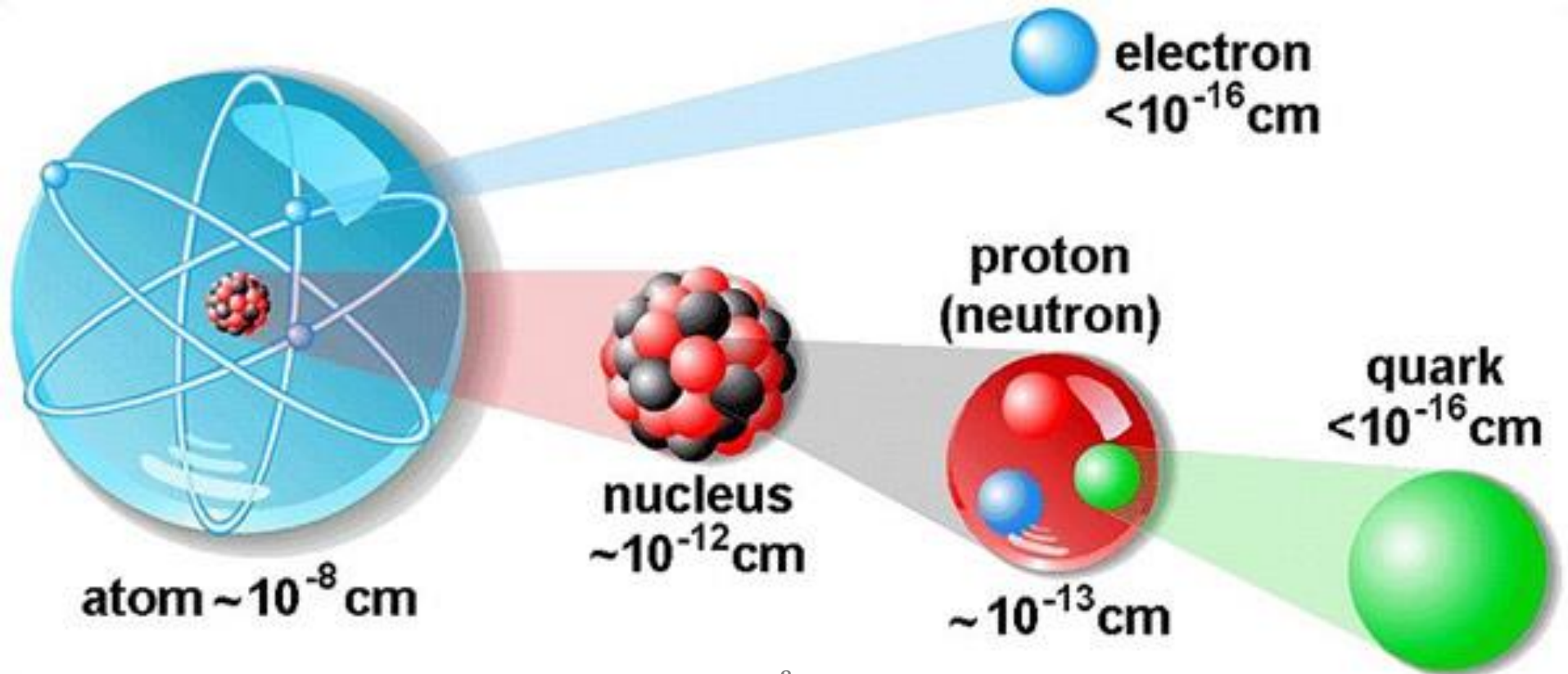
- ✓ Atome constitué de deux parties :
électrons et noyaux
→ *La chimie étudie les interactions* entre les atomes
- ✓ La physique s'attache à l'étude du noyau de l'atome. Par exemple, la **radioactivité**.

... et de physique

- ◆ Le noyau n'est pas insécable
- ◆ Constitué de protons et de neutrons
- ◆ Des observations nous ont amené à penser que les protons et neutrons étaient eux-mêmes constitués d'autres particules plus élémentaires.
- ◆ On parle de **quarks**.



Résumé



Résumé

La **physique des particules** a pour but

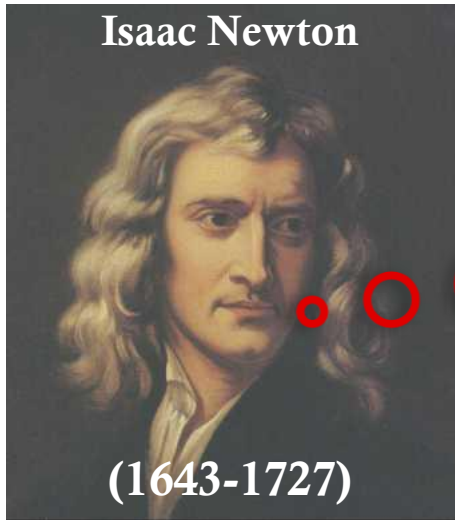
- ◆ De recenser les particules élémentaires, et de réaliser un classement, de la même façon que la CPE
- ◆ D'étudier comment ces particules interagissent entre elles

... des Interactions ...

Vers la compréhension de l'infiniment petit



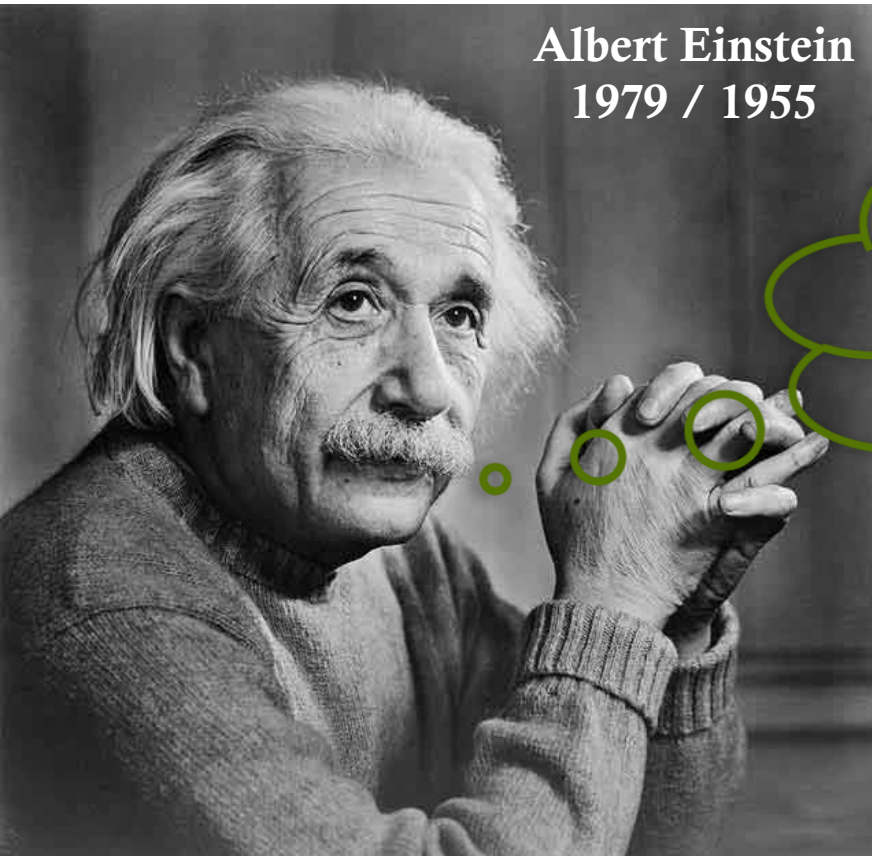
Evolution des pensées sur les interactions



**Toutes les actions
sont instantanées**

Vision classique

Evolution des pensées sur les interactions



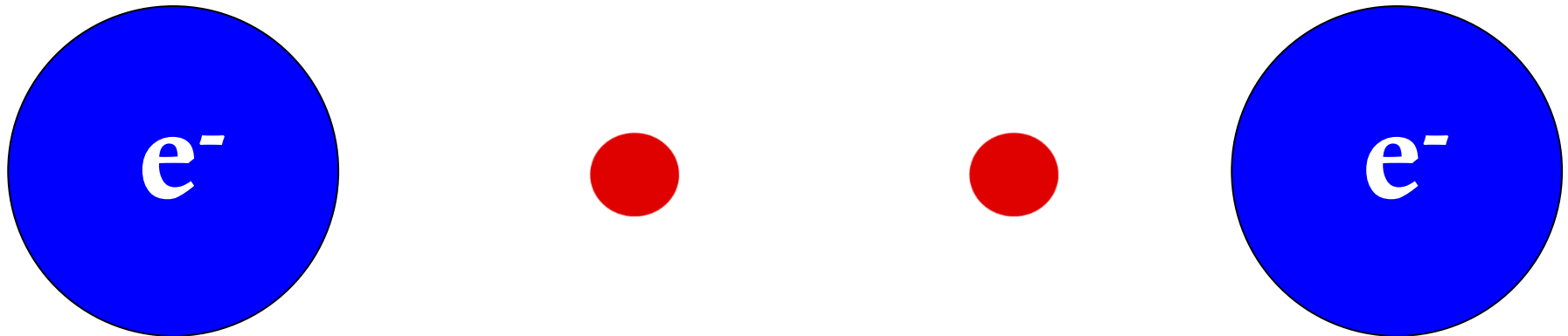
Albert Einstein
1979 / 1955

**Une interaction
est un échange de
particules.**

Vision moderne

Qu'est-ce qu'une interaction?

💧 Exemple : interaction entre deux électrons



- ✓ Interaction entre les électrons pas instantanée
- ✓ Une particule est échangée : elle **porte l'interaction**

Interrogation surprise !

◆ Quelles sont les interactions fondamentales ?

**Interaction
électromagnétique**

**Interaction
gravitationnelle**

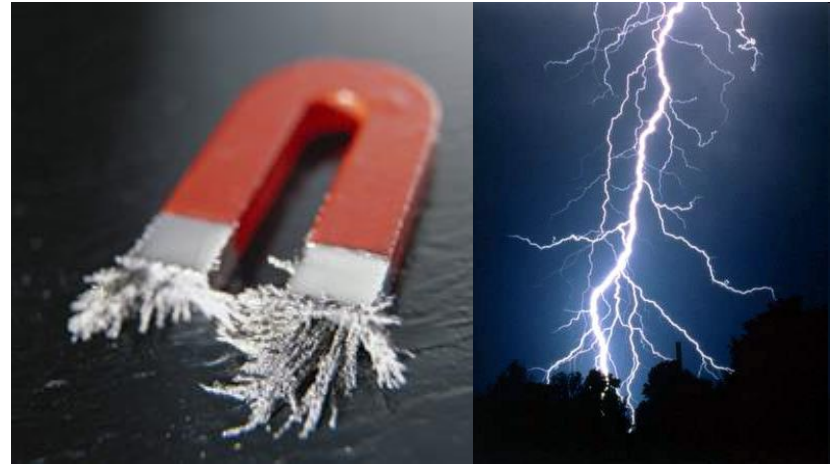
Interaction forte

Interaction faible

Interaction électromagnétique

- ◆ Existe entre des particules qui portent des charges électriques.
- ◆ Exemple : interaction entre électrons
- ◆ Particule qui porte cette interaction :

PHOTON



Interaction forte

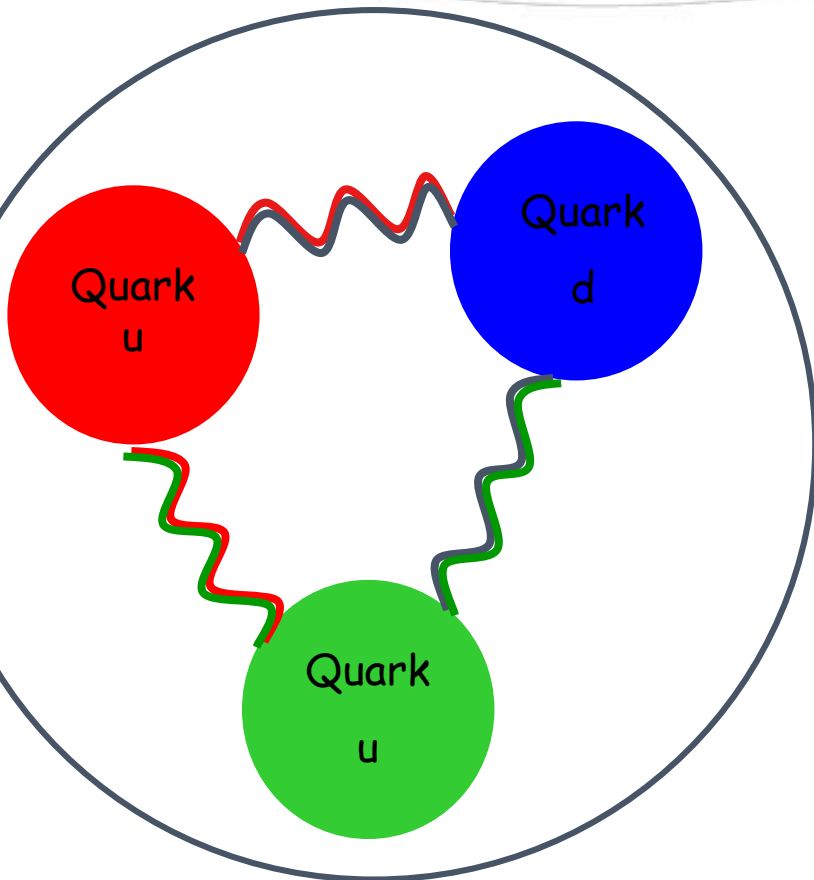
- Existe entre les quarks.



- Exemple : cohésion du noyau
- Particules qui portent cette interaction :

GLUONS

Interaction forte



Exemple :

Le proton est constitué de trois quarks
(u,u,d)

Ces quarks sont maintenus ensemble
grâce à des **gluons**.

Ces derniers agissent comme de la
« colle ».

Interaction faible

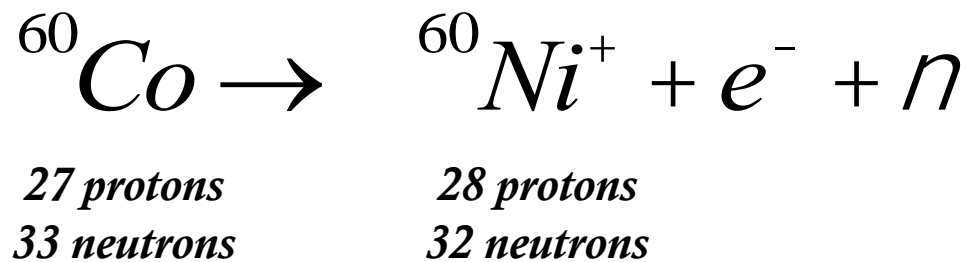
- ◆ Existe entre toutes les particules.
- ◆ Exemple : désintégration radioactive β .
- ◆ Particules qui portent cette interaction :

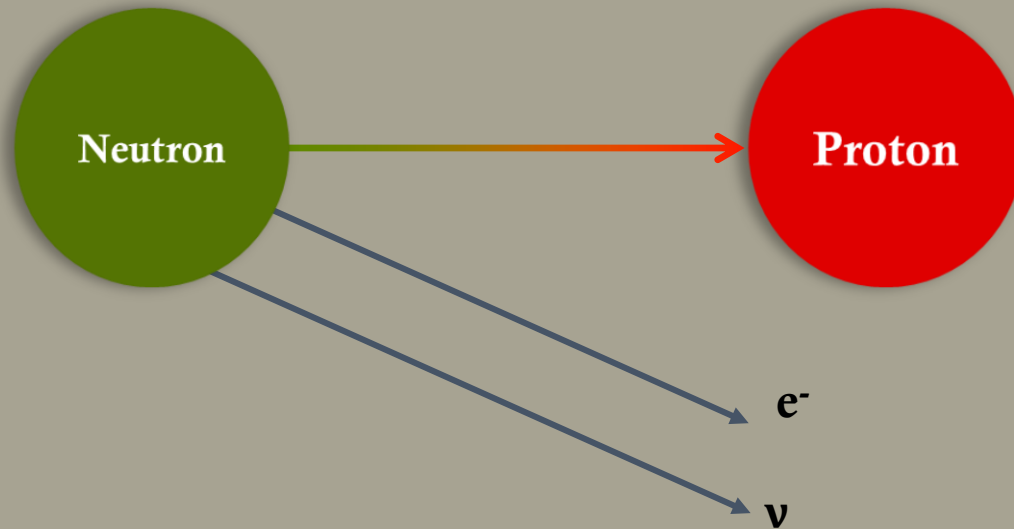
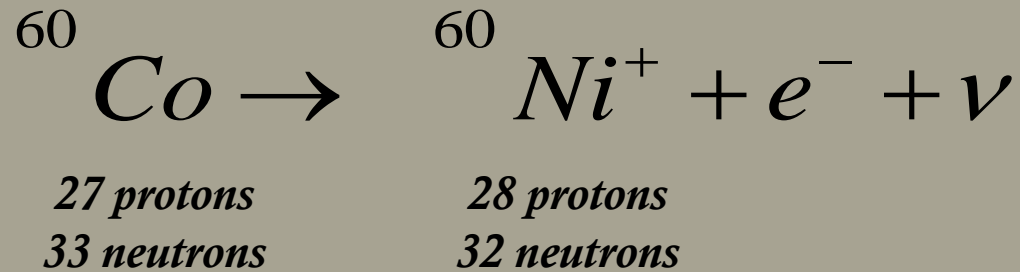
W^+ , W^- , Z

Radioactivité β

Radioactivité: Phénomène physique naturel au cours duquel des **noyaux atomiques instables**, se **transforment spontanément** en dégageant de l'**énergie** sous forme de **rayonnements** divers.

Exemple : Radioactivité β





Questions :

- D'où vient l'électron ? Du noyau ?
- A quoi correspond le ν ?

Radioactivité β

- ◆ *Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme.*
- ◆ Et alors ?
- ◆ Cela se traduit par une **conservation de l'énergie** au cours des réactions nucléaires.

Radioactivité β



- Expérimentalement, on observe que :

$$E_{\text{Co}} > E_{\text{Ni}} + E_{e^-}$$

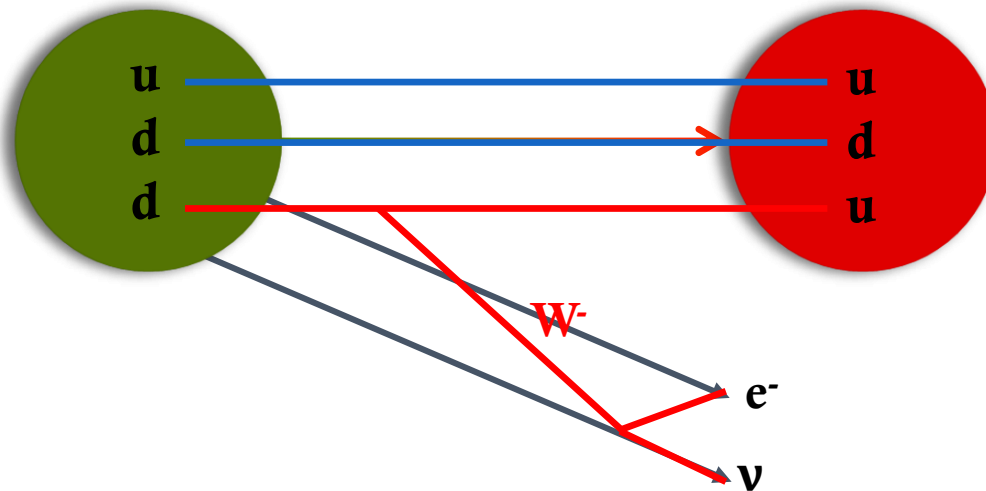
- Pour conserver l'énergie, on suppose l'existence d'une particule : un **neutrino**, particule impossible à détecter expérimentalement.

- On a donc : $E_{\text{Co}} = E_{\text{Ni}} + E_{e^-} + E_n$

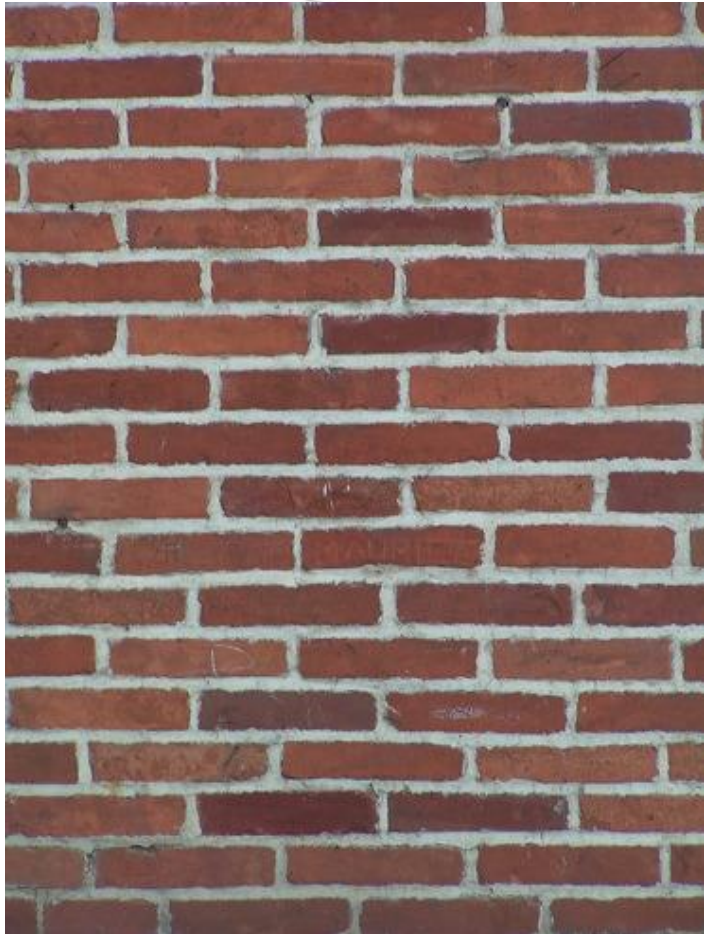
 **Voilà donc ce qu'est le neutrino !**

Radioactivité β

- Et l'électron ?
- On peut expliquer son apparition à l'aide du boson W .



















Résumé



Si le monde qui nous entoure est un mur, il est constitué de deux choses :

- ✓ Des **briques** (quarks, électrons, neutrinos)
→ **fermions**
- ✓ Du **ciment** qui maintient ces dernières liées.
→ **bosons**

Résumé

FERMIONS	LEPTONS <i>(insensibles à la force forte)</i>		QUARKS <i>(sensibles à toutes les forces)</i>	
1 ^{ère} Génération (matière ordinaire)	Electron 	Neutrino  Electronique	Up 	Down 
2 ^{ème} Génération	Muon 	Neutrino  Muonique	Strange 	Charmed 
3 ^{ème} Génération	Tau 	Neutrino  Tauonique	Bottom 	Top 
BOSONS DE GAUGES	Photon <i>(électromagnétisme)</i> 	8 Gluons <i>(force forte)</i> 	W⁺ W⁻ Z⁰ <i>(force faible)</i> 	Higgs <i>(masse)</i> 

Un bref historique



Un bref historique (1/4)

- 1898 : Découverte de l'électron (J.J. Thomson) : la première particule
- 1905 : Explication de l'effet photoélectrique (A. Einstein)
 - Photon = Quantum de lumière
- 1919 : Découverte du noyau de l'atome (E. Rutherford)
- 1910 : Découverte du proton (E. Rutherford)
- 1923 : Découverte de l'effet Compton
 - Les électrons et les photons peuvent interagir, les photons sont des particules
- 1929: Equation de Dirac (prédiction de l'existence du positron)
- 1930 : Prédiction de l'existence du neutrino (W. Pauli, désintégrations β)
- 1931 : Découverte du positron (C.D. Anderson)

Un bref historique (2/4)

- ◆ 1932- 1940 : Découvertes du neutron; découverte du muon, du pion et des hypérons (ces trois dernières dans le rayonnement cosmique).
- ◆ 1946-1950 : Formulation de la théorie quantique de l'électromagnétisme (QED)
- ◆ 1951 : Observation du comportement de particules « étranges » (on comprendra plus tard qu'elles contiennent un quark s)
- ◆ 1953 : Découverte du neutrino électronique (Reines et Cowan)
- ◆ 1954 : Invention des théories de jauge non-abéliennes (Yang-Mills)
 - ◆ Théorie de l'interaction forte (QCD)
- ◆ 1956 : Découverte de la violation de la parité (Wu)
- ◆ 1962 : Découverte de neutrino muonique
 - ◆ Plusieurs « familles » de particules aux propriétés comparables

Un bref historique (3/4)

- ◆ 1960-1970: Découverte de centaines de particules
 - ◆ Réinterprétées plus tard comme des assemblages de quarks
- ◆ 1964 : Découverte de la violation de CP (symétrie matière-antimatière)
- ◆ 1967 : Unification des forces électromagnétiques et faible (Glashow, Salam, Weinberg) → Les débuts du Modèle Standard
- ◆ 1973 : Prédiction du quark charme.
- ◆ 1974 : Découverte de la résonance J/ψ (quark c)
- ◆ 1976 : Découverte de la résonance Υ (quark b)
 - ◆ Troisième famille de quarks
- ◆ 1976 : Découverte du lepton τ
 - ◆ Troisième famille de leptons
- ◆ 1979 : Première trace expérimentale des gluons (PETRA à DESY)

Un bref historique (4/4)

- ◆ 1983 : Découverte des bosons W et du Z au CERN
- ◆ 1990-2000 : Tests intensifs du Modèle Standard au CERN grâce au LEP (collisionneur e^+e^- ; le LHC utilise le tunnel du LEP)
 - ◆ Trois familles de neutrinos légers, prédiction de la masse du quark top...
- ◆ 1989 : Premières discussions sur la construction du LHC
- ◆ 1995 : Découverte du quark top à Fermilab
- ◆ 1998-2004 : Découverte des oscillations de neutrinos à Super-Kamiokande (Japon), SNO (Canada), KamLand (Japon)
 - ◆ Les neutrinos ont une masse.
- ◆ 2000 : Découverte du neutrino tauique par l'expérience DONUT (Fermilab)
- ◆ 2007 : Premières prises de données avec le LHC

... et un modèle !

Pour les unifier tous ... ou presque !



$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_{\text{SM}} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \frac{1}{2}ig_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c \\
& -\partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- \\
& -M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h \\
& -igc_w \left[\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) \right] \\
& -igs_w \left[\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) \right] \\
& -\frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) \\
& +g^2 s_w c_w \left[A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^- \right] - g\alpha \left[H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^- \right] \\
& -\frac{1}{8}g^2 \alpha_h \left[H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2 \right] - gM W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H \\
& -\frac{1}{2}ig \left[W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0) \right] + \frac{1}{2}g \left[W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H) \right] \\
& +\frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + igs_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- \\
& -\phi^- \partial_\mu \phi^+) + igs_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- \left[H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^- \right] - \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 \\
& +2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) \\
& +\frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda \\
& -\bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + igs_w A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] \\
& +\frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \left[(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda) \right] \\
& +\frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ \left[(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa) \right] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- \left[(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) \right] \\
& +\frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_e^\lambda}{M} \left[-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) \right] - \frac{g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} \left[H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) \right]
\end{aligned}$$

Le Modèle Standard

- ◆ Le **Modèle Standard** est la théorie qui décrit à la fois les particules élémentaires et les interactions.
- ◆ Comme tous les modèles, il faut s'assurer qu'il décrit bien la nature.
- ◆ Pour vérifier que ce Modèle est valide, on construit des expériences, et notamment des accélérateurs et collisionneurs de particules.
- ◆ A l'heure actuelle, le Modèle Standard est parfaitement vérifié expérimentalement.



Et le boson de Higgs ?

- ◆ Dans le cadre de la symétrie fondamentale permettant de décrire les interactions, toutes les particules élémentaires sont de masse nulle.
- ◆ Or, on sait expérimentalement qu'elles ont une masse.
- ◆ L'introduction d'un nouveau boson, le **boson de Higgs**, permet de donner une masse aux particules élémentaires.
- ◆ L'ensemble de l'édifice qui décrit les trois interactions de l'infiniment petit et inclut le boson de Higgs est le **Modèle Standard**.
- ◆ ~~A l'heure actuelle, le boson de Higgs n'a toujours pas été découvert.~~
Le 4 juillet 2012 ATLAS et CMS ont déclaré avoir découvert un nouveau boson à une masse $126 \text{ GeV}/c^2$ (126 fois la masse du proton). De nombreux indices pointaient déjà vers le boson de Higgs. Depuis, de nouvelles mesures ont confirmé qu'il s'agissait bien là du boson tant attendu.

Conclusions

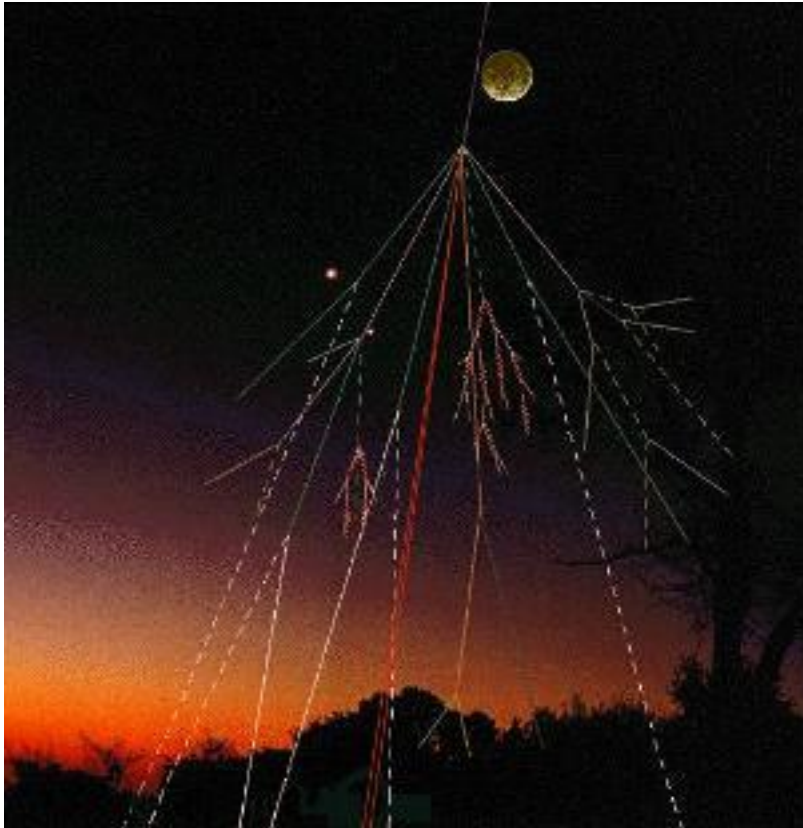
- ◆ La physique des particules s'attache à découvrir les rouages élémentaires de la matière : les particules de matière, et les interactions.
- ◆ La matière est constituée par des particules appelées **fermions**.
- ◆ Les interactions sont portées par les **bosons**.
- ◆ L'ensemble est décrit, à l'heure actuelle par le Modèle Standard de la physique des particules, modèle qui repose à la fois sur les expériences et la théorie. On cherche à le mettre en défaut auprès d'expériences enregistrant les collisions des accélérateurs de particules.

BACKUP SLIDES

ALWAYS USEFUL !!



Des particules comme s'il en pleuvait ...



- ✓ *Supernovae* : émission de protons (cosmiques)
- ✓ Entrée dans l'atmosphère ... le nombre de particules augmente rapidement → **gerbe**
- ✓ On a trouvé, dans ces gerbes des particules inconnues jusqu'alors.