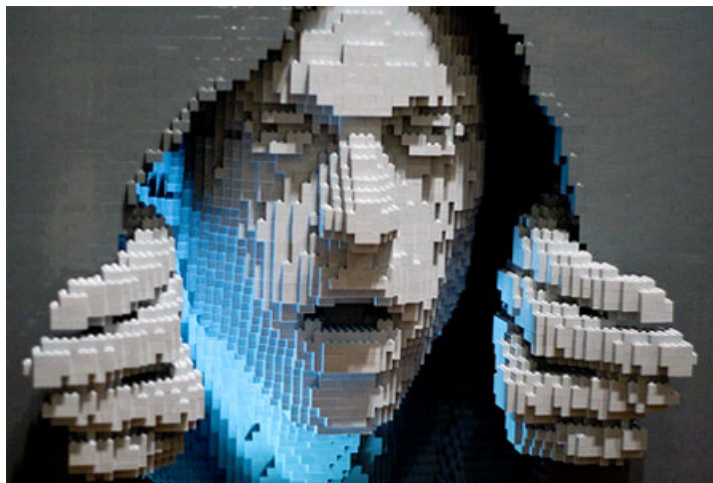


Petite introduction à la physique des particules

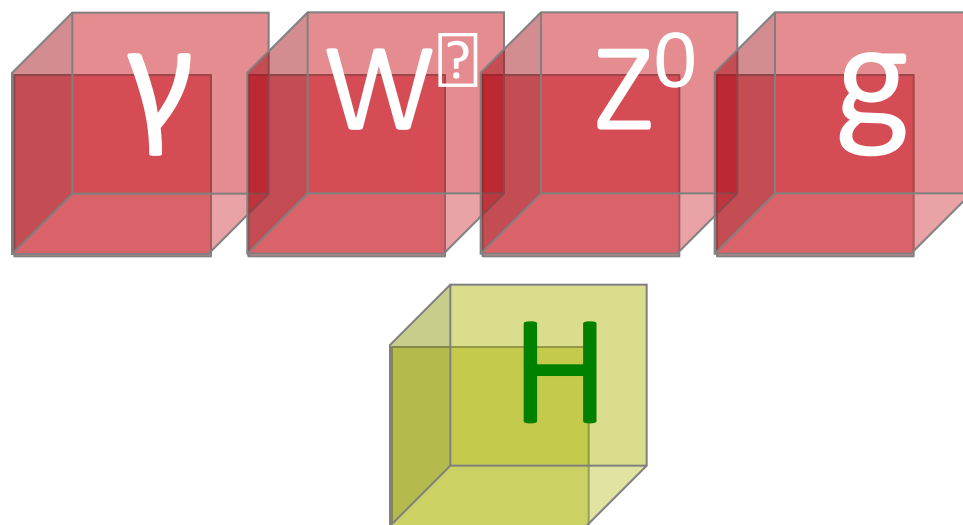
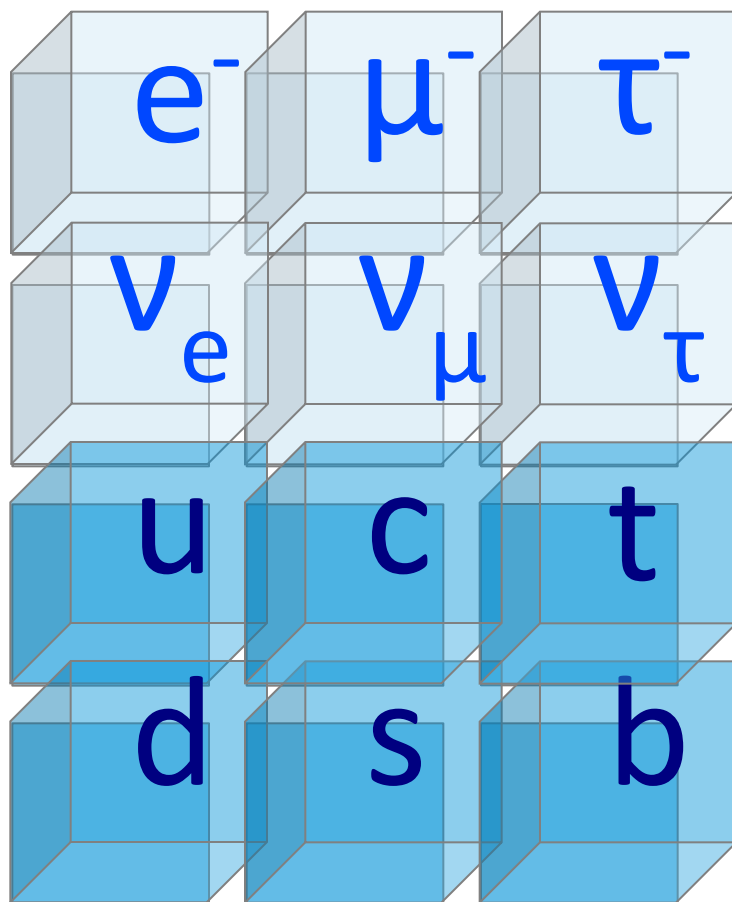


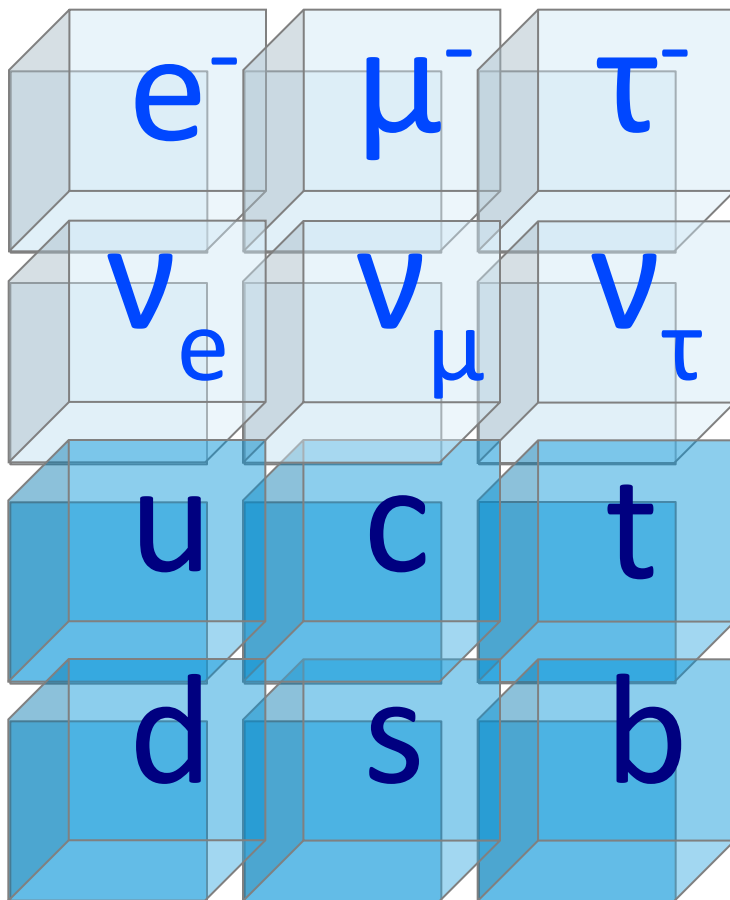
Le Modèle Standard des particules

- C'est la théorie physique qui décrit les **particules élémentaires** (les plus petits constituants de l'univers) et leurs **interactions**



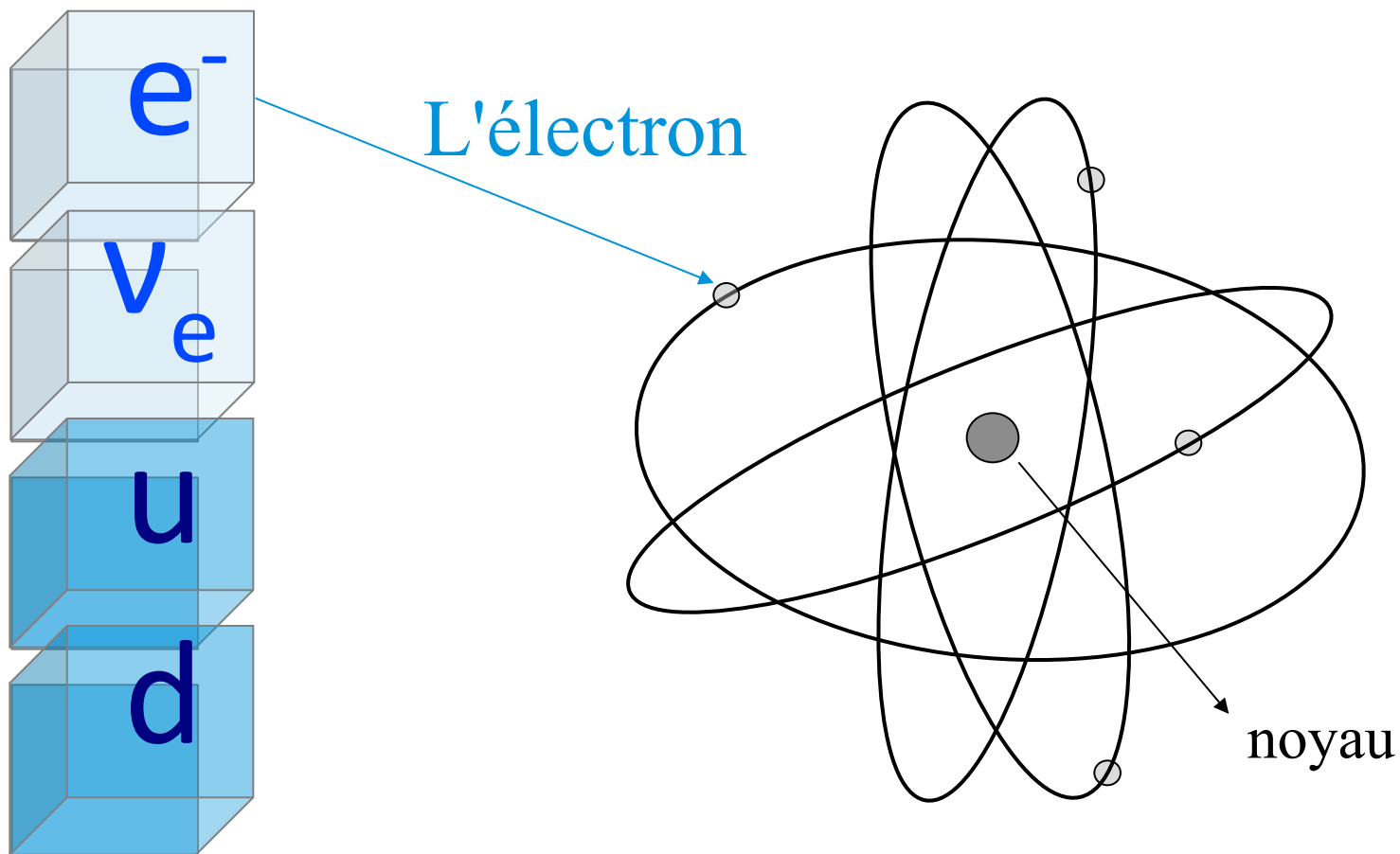
Quelles particules élémentaires
connaissez-vous ?

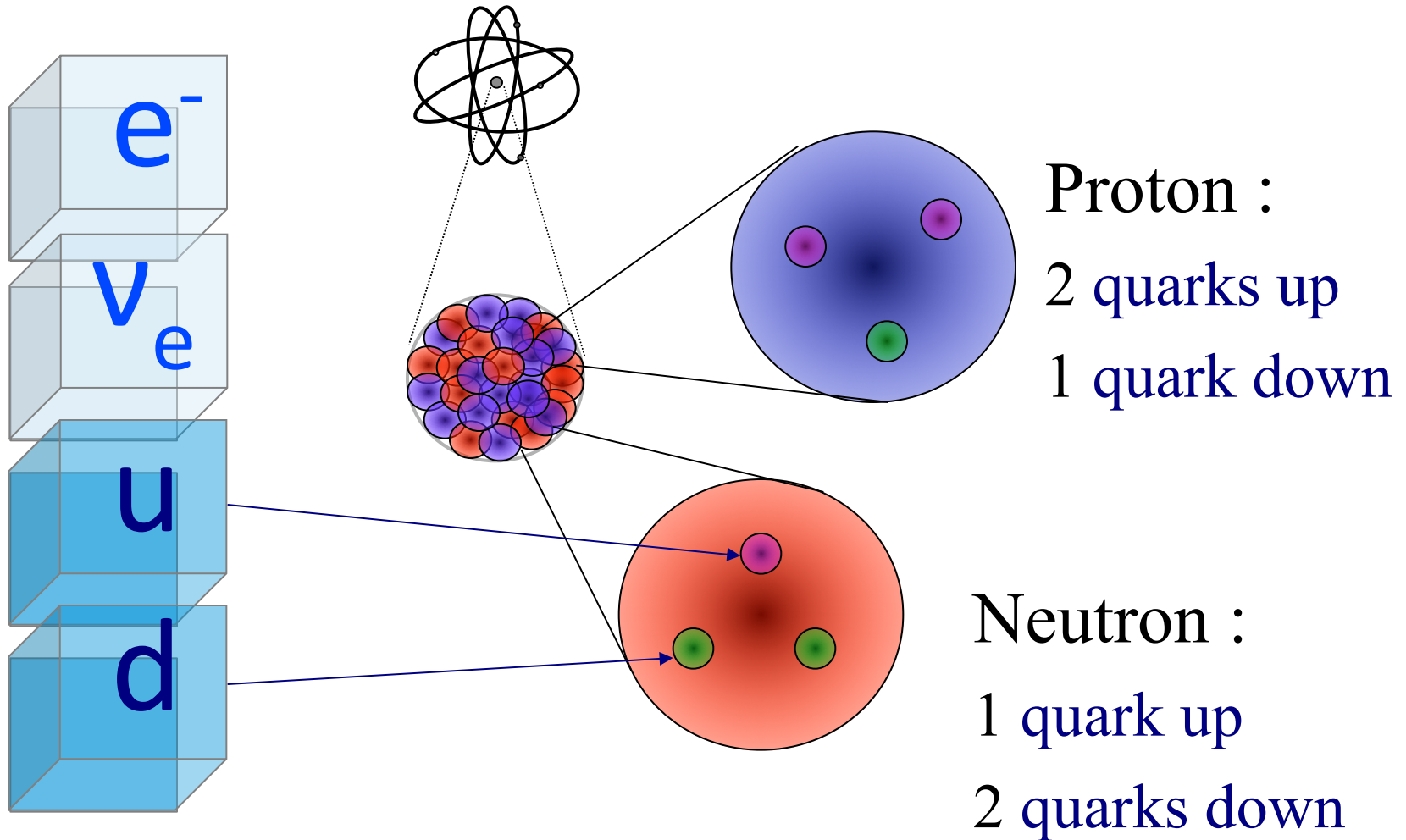




Les *fermions* :
particules de matière

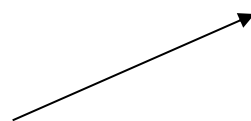
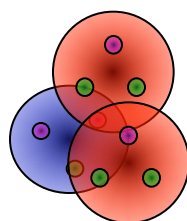
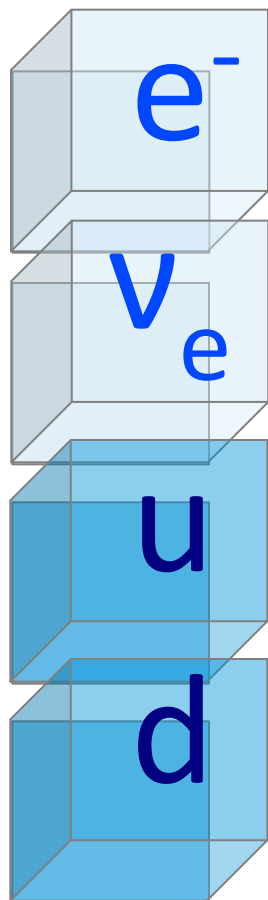
*Il existe aussi les anti-particules :
les mêmes particules mais leurs charges sont inversées.
Par exemple : e^+ (aussi notée \bar{e}) est l'antiparticule de e^-*



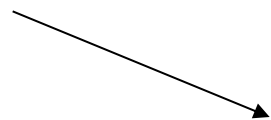
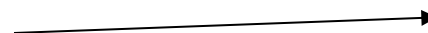




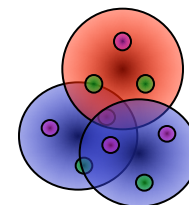
Découvert dans les désintégrations β



e^-

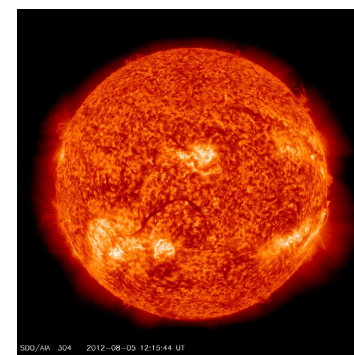


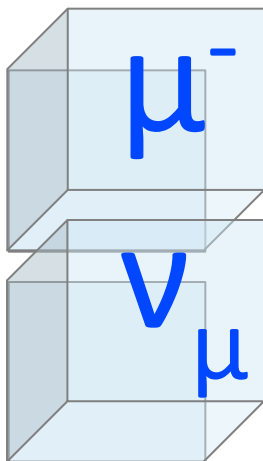
$\bar{\nu}_e$



Le neutrino électronique

Ils sont aussi produits en grande quantité
dans les réactions nucléaires au coeur du soleil



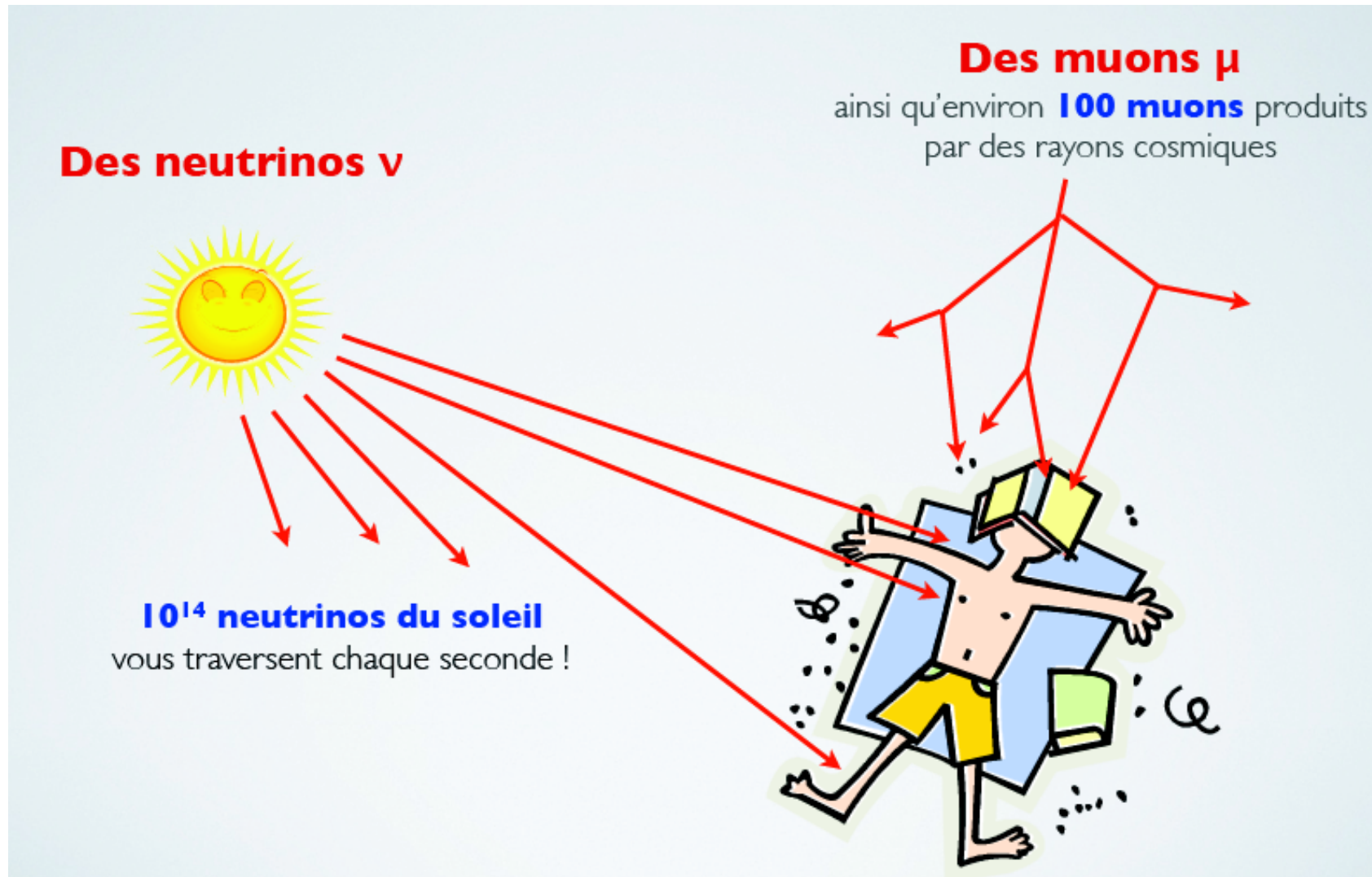


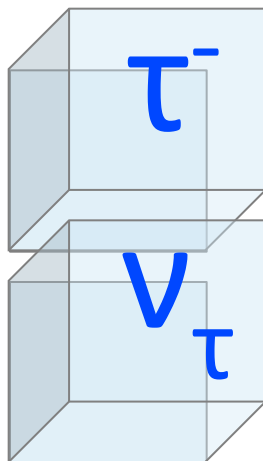
Le muon a les mêmes propriétés physiques que l'électron, mais avec une masse 207 fois plus grande et il se désintègre en $\tau = 2.10^{-6} \text{ s}$

Il a aussi son neutrino associé.

Les muons ont été découverts dans les rayons cosmiques

Des particules élémentaires vous traversent en ce moment !

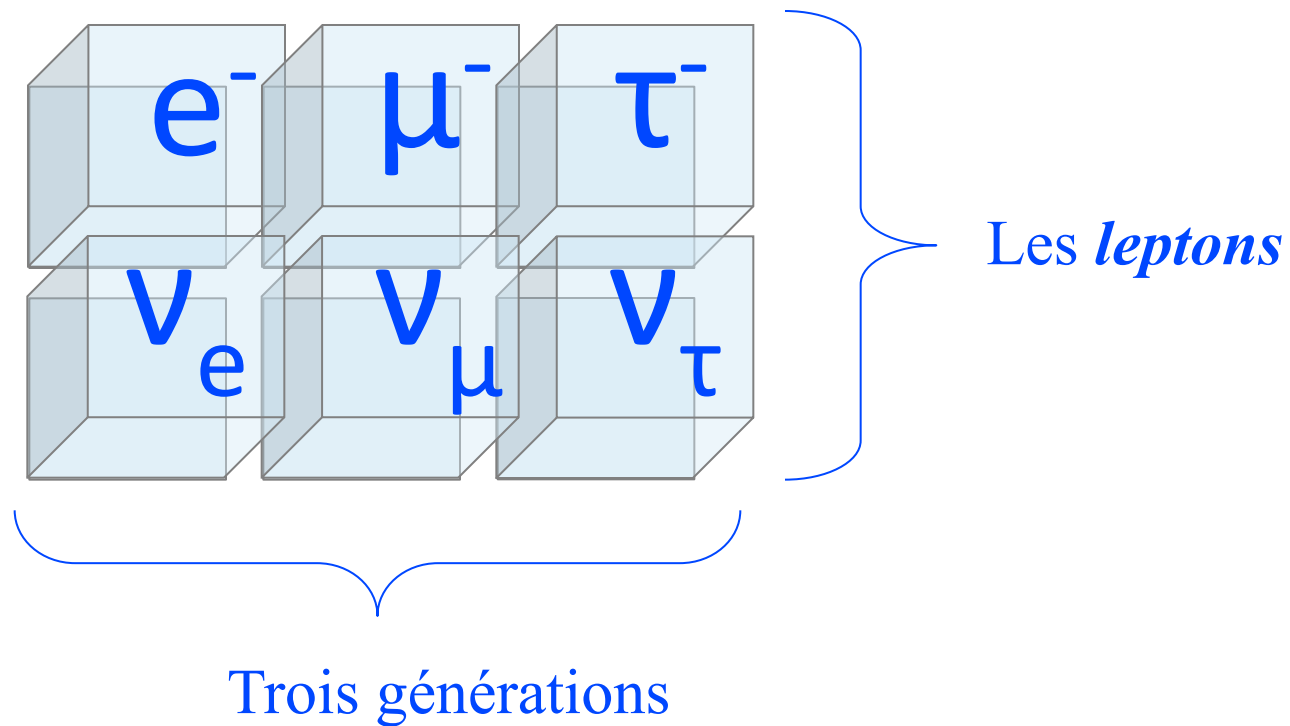


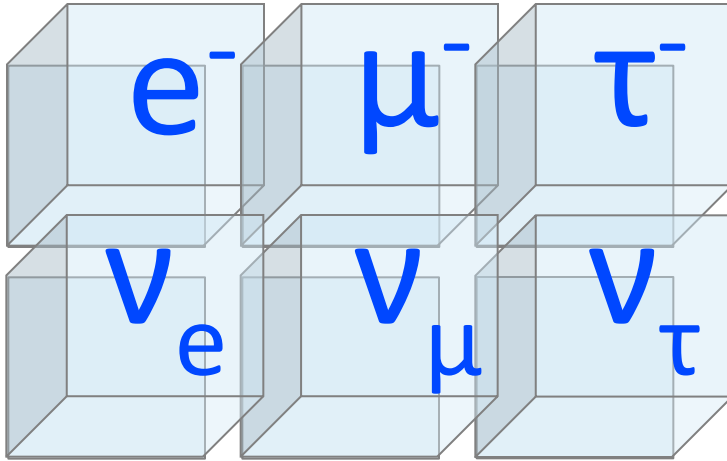


Le tau a les mêmes propriétés physiques que l'électron, mais avec une masse 3500 fois plus grande et il se désintègre en $\tau = 3.10^{-13}$ s.

Il a aussi son neutrino associé.

Les taus ont été découverts grâce aux expériences avec des collisionneurs de particules





Électriquement chargés (-1), massifs

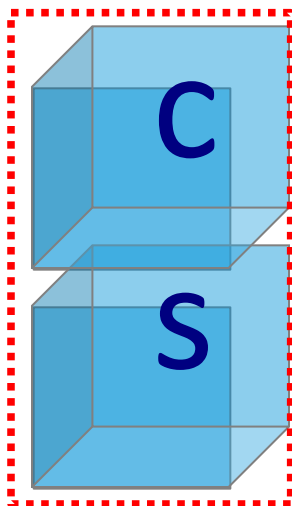
Électriquement neutres, sans masse

De la même façon on a aussi trois générations de quarks (avec des masses de plus en plus lourdes) :

2^e génération :

quark *charm* (550x masse up)

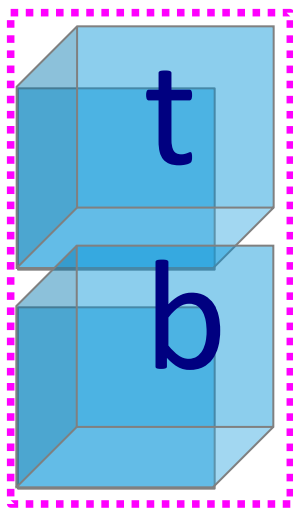
quark *strange* (20x masse down)



Ces quarks ont été découverts grâce aux expériences avec des collisionneurs de particules

De la même façon on a aussi trois générations de quarks (avec des masses de plus en plus lourdes) :

Le quark top a environ la même
masse qu'un atome d'or !!



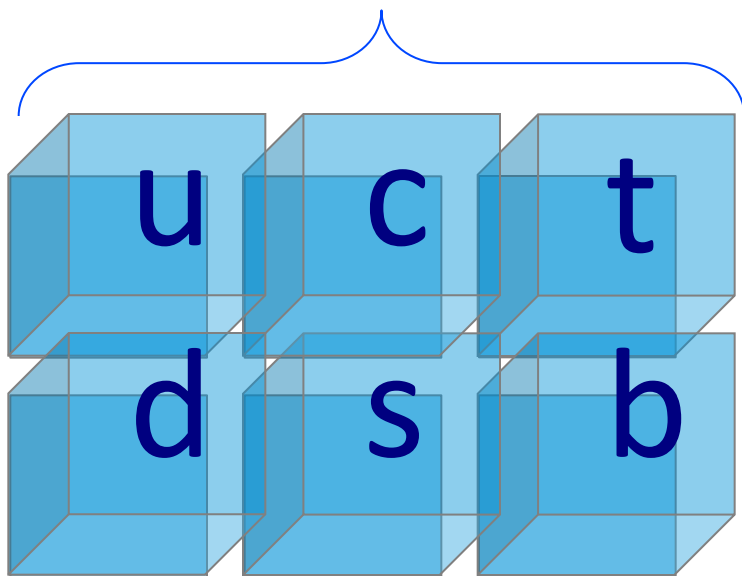
3^e génération :

quark *top* (76000x masse up)

quark *bottom* (980x masse down)

Ces quarks ont été découverts grâce aux expériences avec des collisionneurs de particules

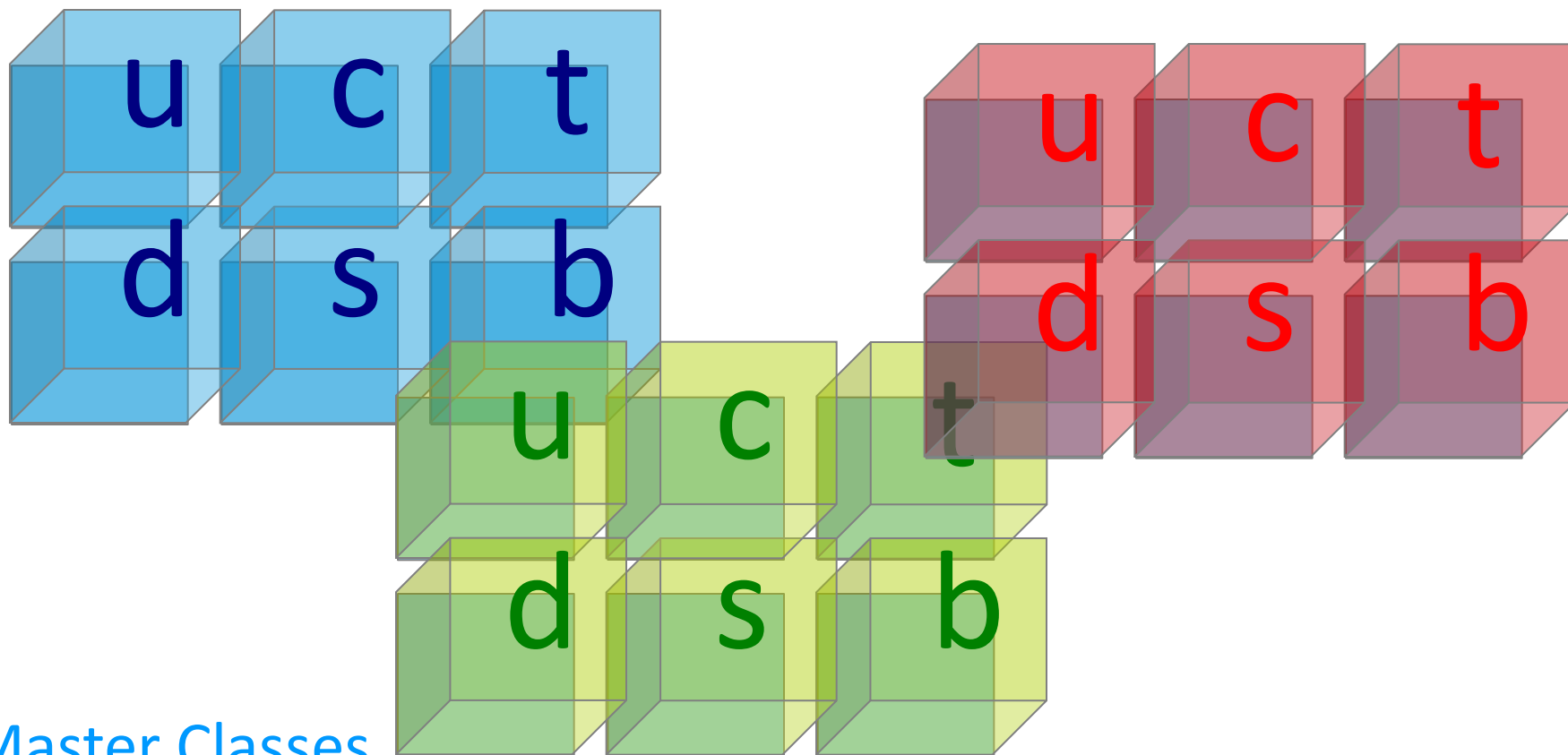
Trois générations

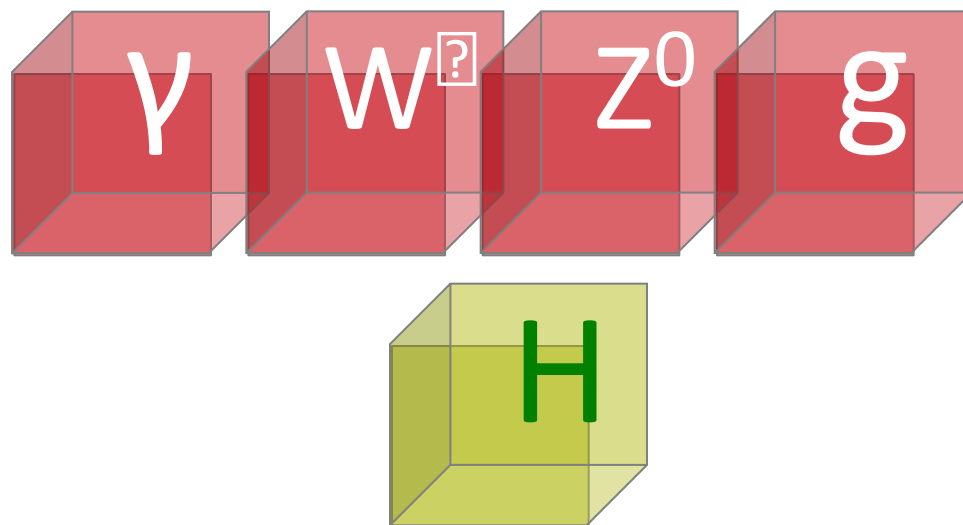
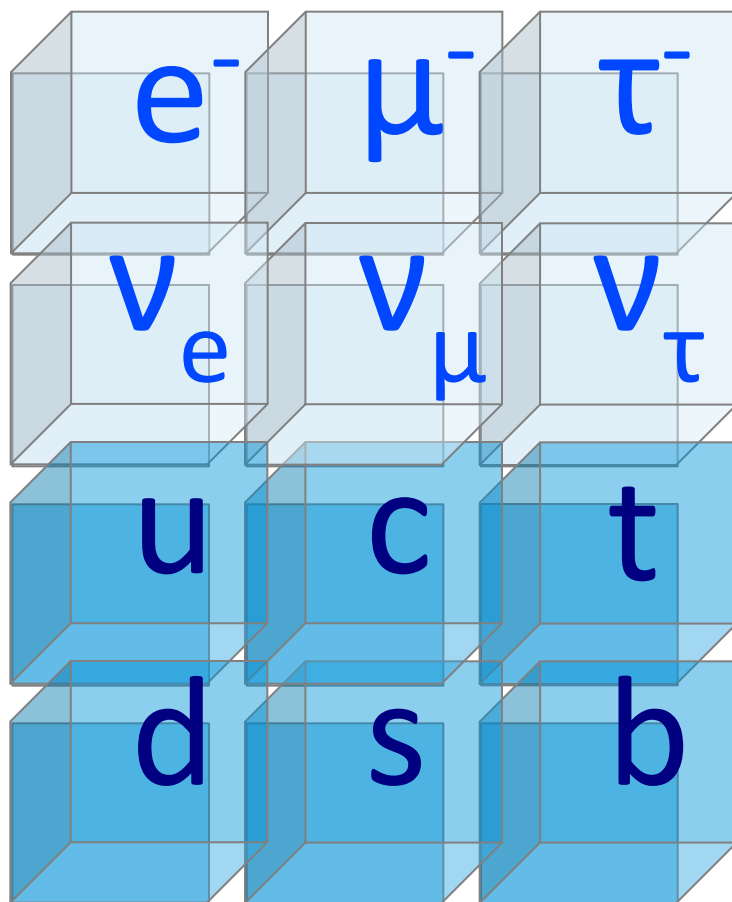


Électriquement chargés (+2/3)

Électriquement chargés (-1/3)

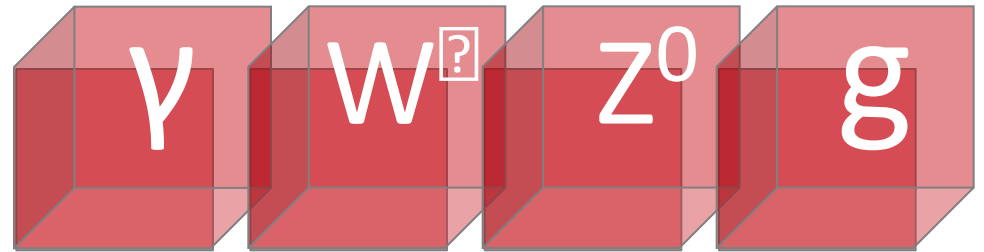
Tous les quarks portent aussi une autre charge dite
'de couleur' : ils peuvent être 'bleus', 'verts' ou 'rouges'





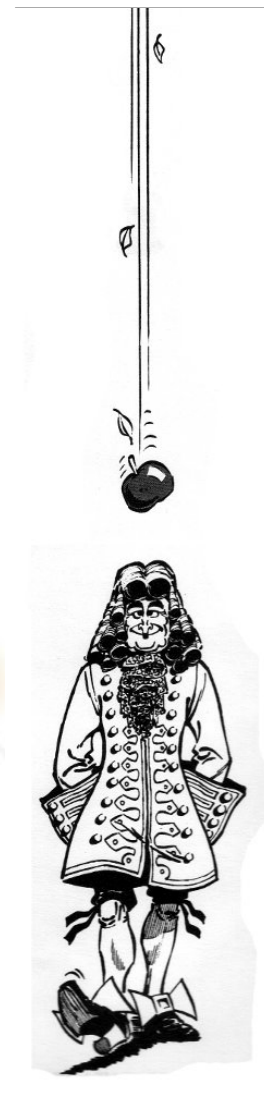


Satyendra Nath Bose



*Les **bosons de jauge** :*
particules d'interactions

Quelles interactions
connaissiez-vous ?

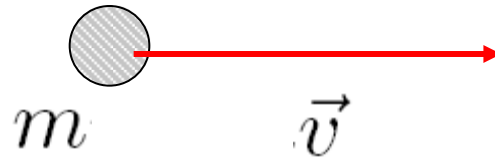




Les interactions décrites dans le Modèle Standard des particules

Quantité de mouvement et énergie

- Mécanique classique :



- Quantité de mouvement

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

- Energie

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$



Isaac Newton

Quantité de mouvement et énergie

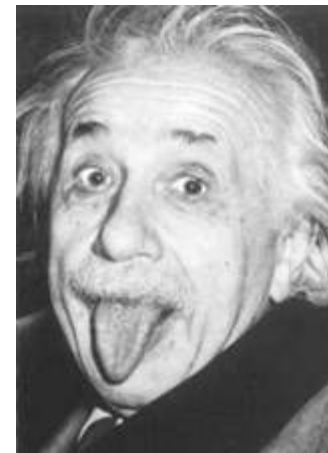
- Relativité restreinte :
 - Quantité de mouvement

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \boxed{m\vec{v}} + \dots$$

- Énergie

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \boxed{mc^2} + \boxed{\frac{1}{2}mv^2} + \dots$$

Énergie de masse ou
'énergie au repos'



Albert Einstein

Particule au repos



Quantité de mouvement et énergie

- La quantité de mouvement est conservée

Si une particule au repos (quantité de mouvement nulle) se désintègre en deux particules, celles-ci vont avoir des quantités de mouvements égales et opposées



- L'énergie est conservée

La masse de la particule initiale (= son énergie au repos) peut être mesurée à partir des énergies des particules émises

Quantité de mouvement et énergie

Remarque :

- L'unité d'énergie en physique des particules est l'électron-volt:

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

- On utilise également

- le KeV ($\times 10^3$)
- le MeV ($\times 10^6$)
- le GeV ($\times 10^9$)
- le TeV ($\times 10^{12}$)

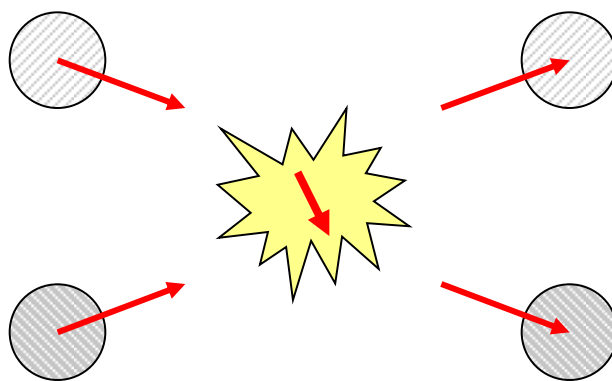
100 TeV = Énergie dépensée par un moustique pour s'élever de 1m!

D'après $E=mc^2$, on peut aussi mesurer une masse en eV/c^2

Exemple : $m(\text{electron})=511 \text{ keV}/c^2$

Interactions fondamentales

- Interaction :
Échange d'énergie et de quantité de mouvement entre deux fermions (les particules de matière) via un boson de jauge (les particules d'interaction)



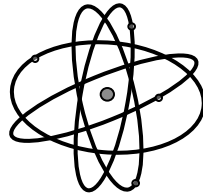


Les interactions décrites dans le Modèle Standard des particules

Interaction électromagnétique



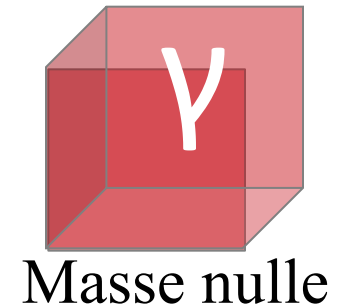
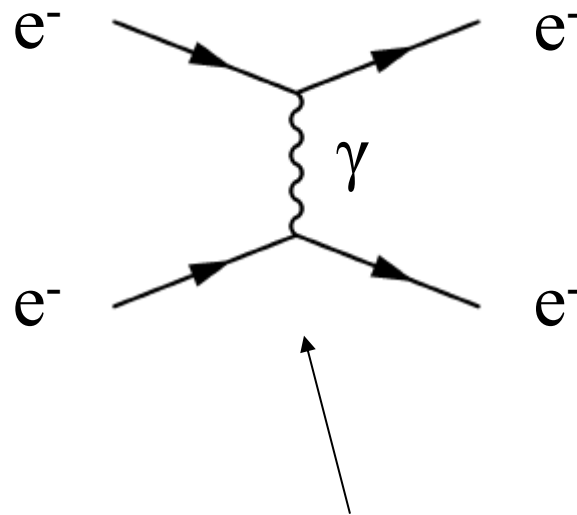
- Elle réunit dans un même formalisme
 - Les phénomènes électriques
 - Les phénomènes magnétiques
 - L'optique
- Elle est responsable de la cohésion de l'atome



Interaction électromagnétique



- Au niveau fondamental :
Échange de photons entre particules chargées



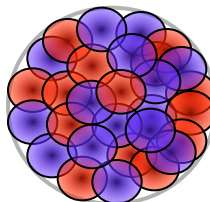
Masse nulle

Diagrammes de Feynman

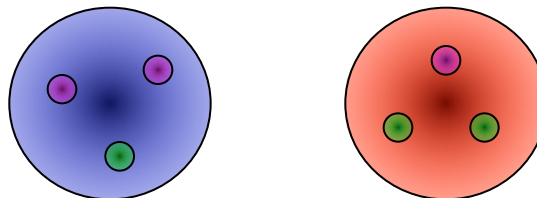
Interaction forte



- Elle est responsable de la cohésion
 - des nucléons dans le noyau atomique



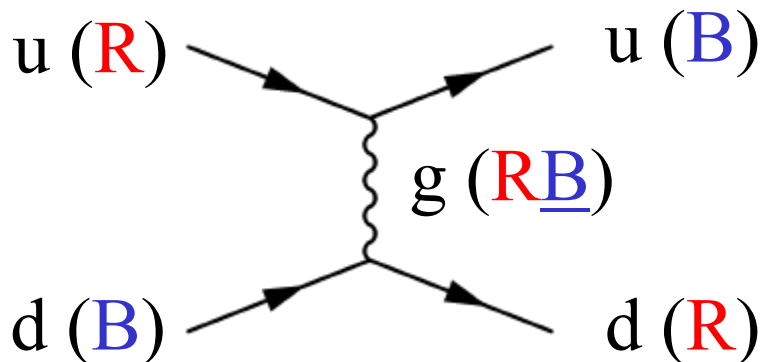
- des quarks dans les protons et neutrons



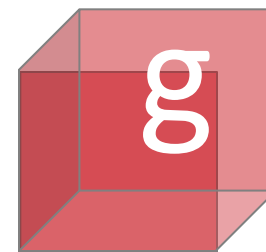
Interaction forte



- Au niveau fondamental :
Echange de gluons entre particules colorées



Masse nulle



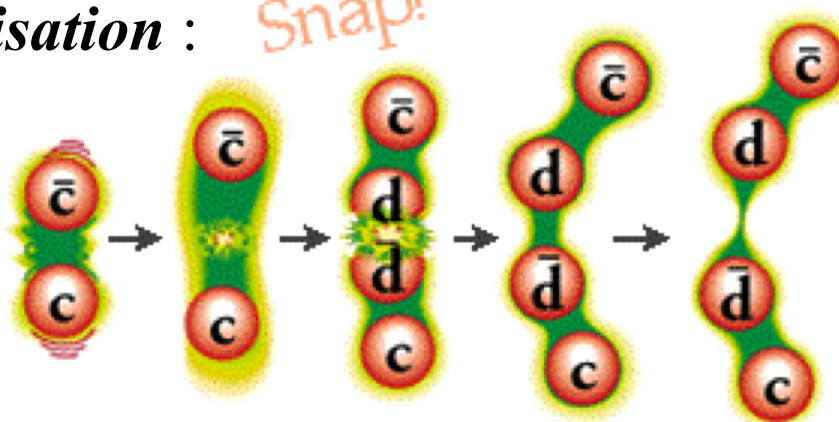
Interaction forte



Les quarks ne s'observent jamais seuls : ils s'associent pour former des particules blanches (les hadrons) :

- Baryon = trois quarks R V B
- Méson = un quark et d'un anti-quark

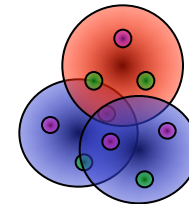
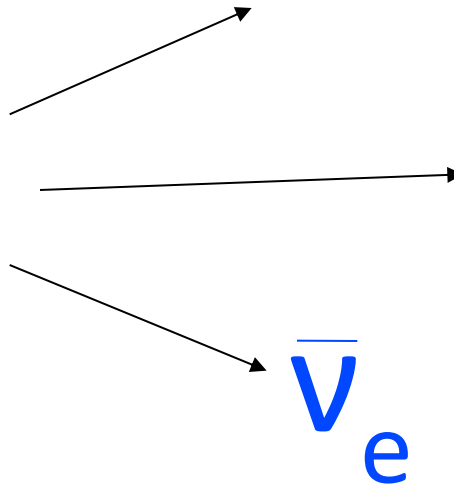
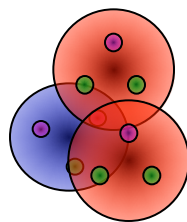
Hadronisation : Snap!



Interaction faible



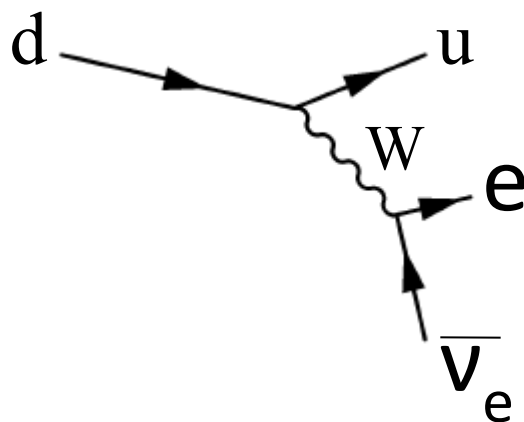
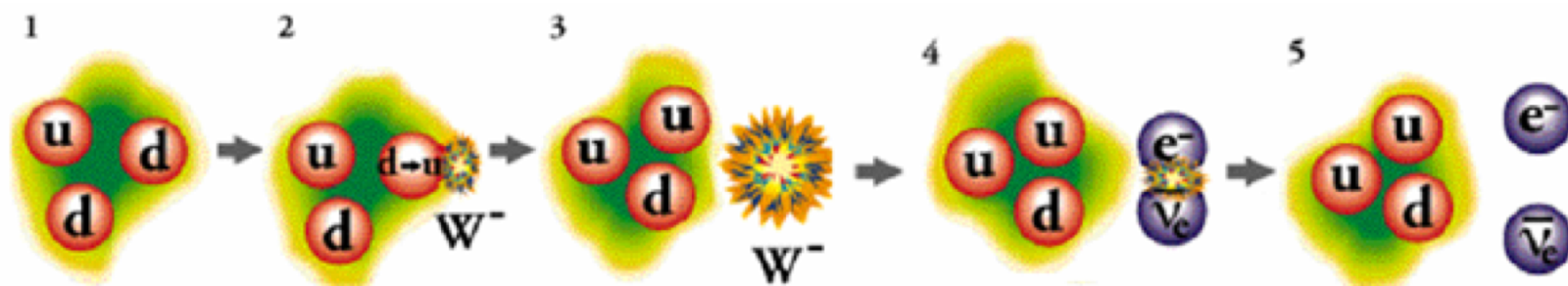
- C'est celle qui entre en jeu dans la radioactivité



Interaction faible



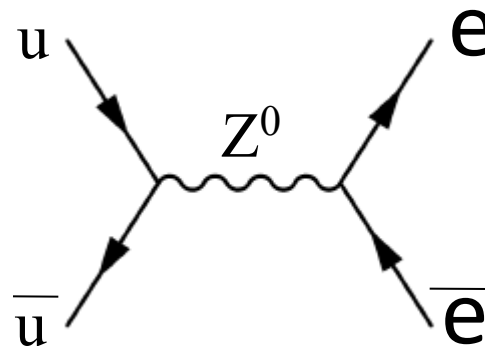
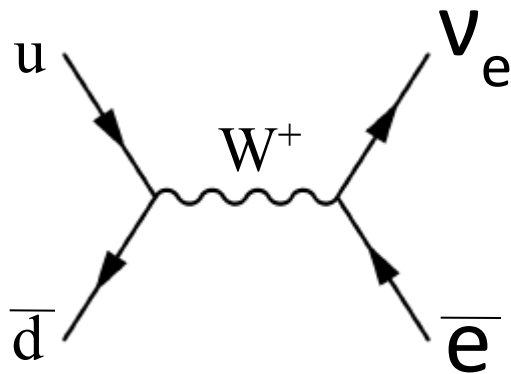
- Désintégration du neutron :



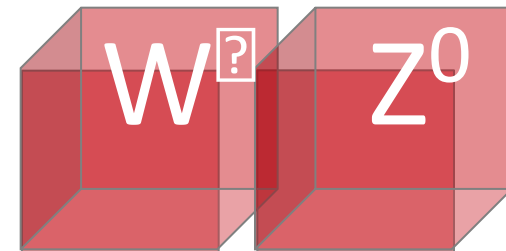
Interaction faible

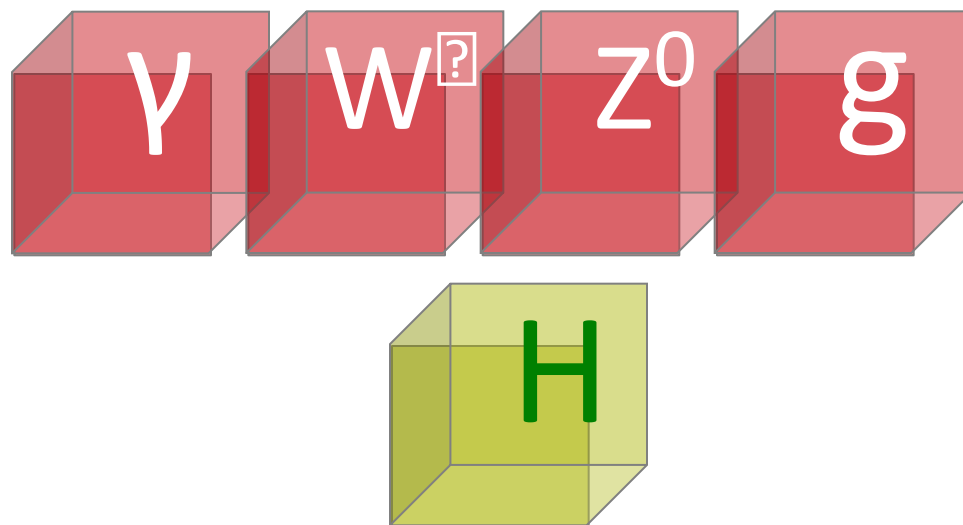
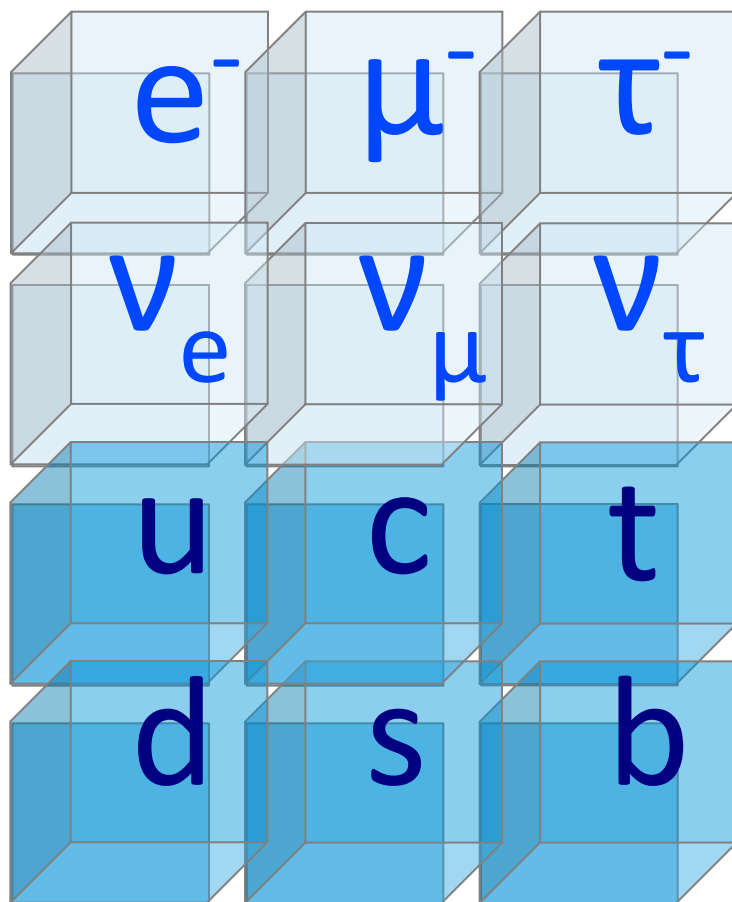


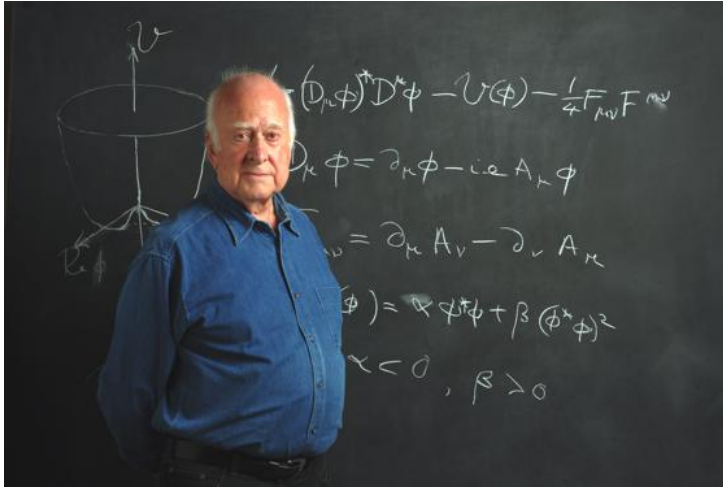
- Au niveau fondamental :
Échange de W^- , W^+ et Z^0



Massifs

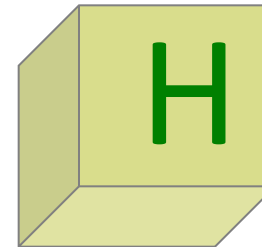






Peter Higgs

Le boson de Higgs : responsable de la masse





Pourquoi le boson de Higgs ?

- Dans la description mathématique du Modèle Standard, les particules n'ont pas de masse
- C'est assez embêtant, puisqu'on sait très bien que la plupart d'entre elles sont massives...

Le boson de Higgs

- **Analogie :**
 - Certaines particules ont une charge électrique (ex. : électrons), d'autres n'en ont pas (ex. : neutrinos)
 - La présence/absence d'une charge électrique définit si oui ou non la particule interagit électromagnétiquement via un couplage avec les photons
 - La masse serait une caractéristique des particules comme la charge électrique. Certaines particules n'en ont pas, d'autres en ont une. La présence ou l'absence de masse est définie par le couplage de la particule au boson de Higgs.

Le champ de Higgs est partout dans l'univers
Imaginons-le comme un champ de neige*



Le boson de Higgs

Le champ de Higgs est partout dans l'univers
Imaginons-le comme un champ de neige



Les particules qui interagissent beaucoup avec le
champ sont ralenties – elles sont plus massives
(par exemple ?)

Le boson de Higgs

Le champ de Higgs est partout dans l'univers
Imaginons-le comme un champ de neige



Les particules qui interagissent moins avec le
champ se déplacent avec facilité – elles sont
moins massives (par exemple ?)

Le boson de Higgs

Le champ de Higgs est partout dans l'univers
Imaginons-le comme un champ de neige



Les particules qui n'interagissent pas avec le
champ se déplacent sans entrave – elles sont sans
masse (par exemple ?)

Le boson de Higgs

Le champ de Higgs est partout dans l'univers
Imaginons-le comme un champ de neige

Boson
de
Higgs

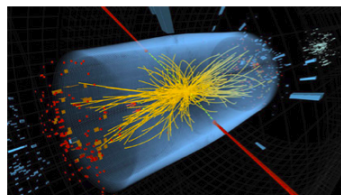


Le boson de Higgs lui-même est une excitation du champ de Higgs.
Il a une masse, mais elle n'est malheureusement pas prédite par la
théorie.

DIRECTO Los científicos del CERN anuncian el descubrimiento de una partícula que podría ser Higgs. Sigue la videoconferencia en la que están explicando un avance que, de confirmarse, supondría un paso esencial de la física para explicar el origen de la materia. »

Hallada "la más sólida evidencia" de la existencia del bosón de Higgs

El posible descubrimiento de la partícula es un paso esencial hacia la explicación del origen de la materia



"Puedo confirmar que se ha descubierto una partícula que es consistente con la teoría del bosón de Higgs", dicen los científicos. El descubrimiento de la partícula ayudaría a explicar el origen de la masa. Los físicos del CERN explican en estos momentos sus hallazgos

- Diccionario para entender en qué consiste el hallazgo
- La "caza" del bosón de Higgs, por A. RUIZ JIMENO
- VIDEO Una explicación del bosón de Higgs
- Sigue en directo la conferencia del CERN
- FOTOGALERÍA Indicios hallados de la "partícula de Dios"
- Hacia la partícula de Dios, por JAVIER SAMPERO

BIOCARBURANTS: leur avenir passera-t-il par les

POUR LA
SCIENC

Septembre 2012 - n° 419 www.pourlascience.fr

Le boson de Higgs
Un nouveau départ pour la physique ?

Les salpes
Un plancton marin expert de la filtration

Paver le rectangle
Des puzzles de polyminos

Télescopes en ballon
L'Univers observé depuis la haute atmosphère

18 02027 - n° F 6,20 €

MON DIEU!
HARPER COZIES UP
TO THE FRENCH P.16

BANK SCANDALS
TOO BIG TO BEHAVE
WHY GLOBAL BANKS CAN'T BE TRUSTED P.34

SHOULD
WE BAN
FLIP-FLOPS? P.14

MACLEAN

CANADA'S NATIONAL MAGAZINE

Teleportation, phasers, alter the Higgs boson discovery than just explain the

THIS CHANGES EVERYTHING
A SPECIAL REPORT FROM SWITZERLAND



Puis, le 4 juillet 2012...



aken nearly 50 years and cost £2.6bn. Now, the Higgs boson particle has been found – and after in our understanding of the universe can be

ed image, above, shows proton collisions expected from the decay of a Higgs boson. Peter Higgs, below right



Le Monde.fr

Mise à jour à 19h02 - Paris

INTERNATIONAL POLITIQUE SOCIÉTÉ ÉCONOMIE CULTURE IDÉES SPORT SCIENCES TECHNO STYLE VOUS ÉDITION ABONNÉS

EN CITOYENS EUROPÉENS
EN CITOYENS ESPAGNOLS

EN CE MOMENT Nicolas Sarkozy Mail Boson de Higgs 1962 : l'indépendance algérienne Microsoft Tour de France Syrie Pakistan

Le boson de Higgs découvert avec 99,9999 % de certitude



Voici la confirmation tant attendue de la recherche nucléaire (CERN)

Boson de Higgs : la fin de la

Orsland 4 juli 2012

Mycket står på spel i veckan

SVENSKA SIMMARESS HOTAS AV USA-MISSIL

23 dagar kvar till OS

ALMEDELEN

350

Mag och tarm- förbundet fick SVT-reporters fördomar om ett av gruppens pimplande flipp på skam

GÖRAN ERIKSSON

350

Mag och tarm- förbundet fick SVT-reporters fördomar om ett av gruppens pimplande flipp på skam

GÖRAN ERIKSSON

350

Mag och tarm- förbundet fick SVT-reporters fördomar om ett av gruppens pimplande flipp på skam

GÖRAN ERIKSSON

350

Mag och tarm- förbundet fick SVT-reporters fördomar om ett av gruppens pimplande flipp på skam

GÖRAN ERIKSSON

350

Découverte !

- Le 4 juillet 2012, le CERN annonce, lors d'une conférence avoir découvert un nouveau boson
- Ce boson a une masse d'environ $125 \text{ GeV}/c^2$
- Jusqu'à présent, tout concorde avec ce que l'on attend du boson de Higgs
- On continue à l'étudier afin de vérifier si cette particule possède l'ensemble des caractéristiques prévues pour le boson de Higgs du Modèle Standard

Puis, en 2013... Prix Nobel !



The Nobel Prize in Physics 2013

François Englert, Peter Higgs

The Nobel Prize in Physics 2013



Robert Brout



Photo: A. Mahmoud

François Englert

Prize share: 1/2



Photo: A. Mahmoud

Peter W. Higgs

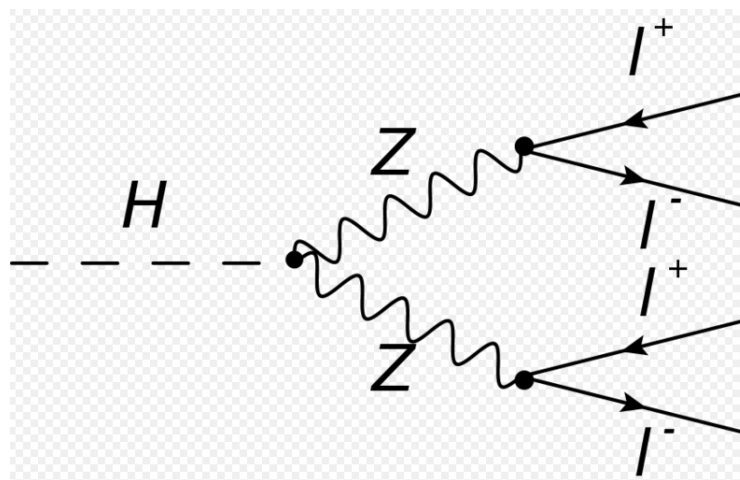
Prize share: 1/2

The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs *"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"*

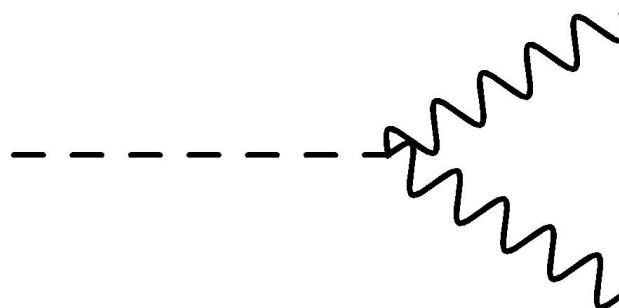
Vous aussi vous allez rechercher le boson de Higgs cet après-midi !

Le boson de Higgs

- On recherchera le boson de Higgs cet après-midi....
- En 4 leptons :

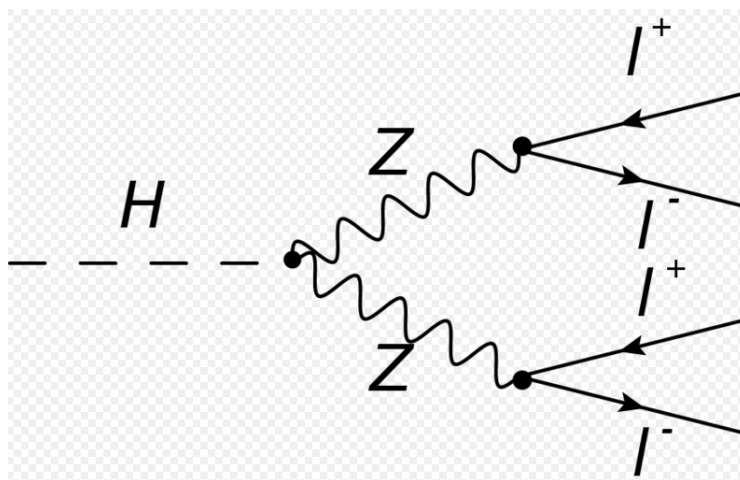


- Ou en 2 photons ... ?

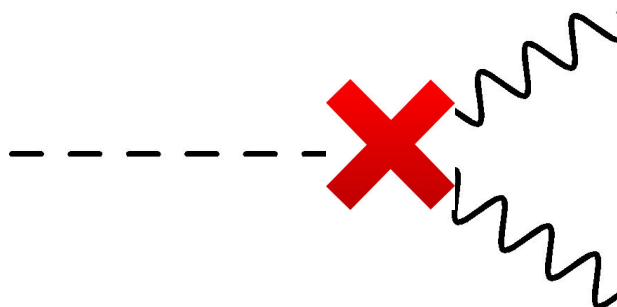


Le boson de Higgs

- On recherchera le boson de Higgs cet après-midi....
- En 4 leptons :

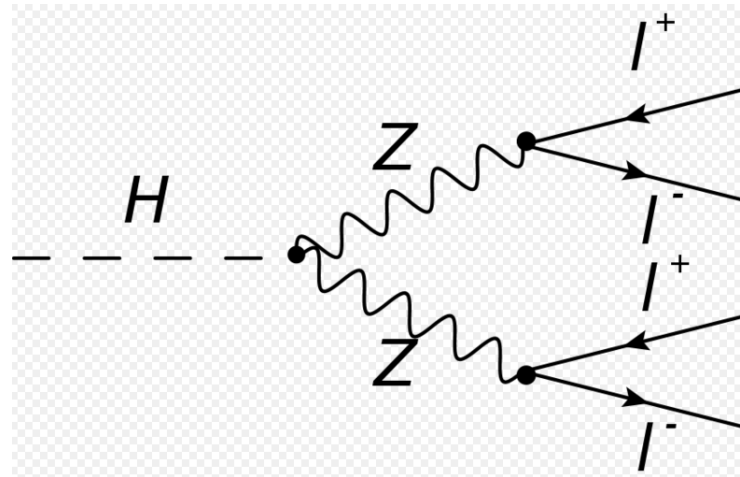


- Ou en 2 photons ... ?

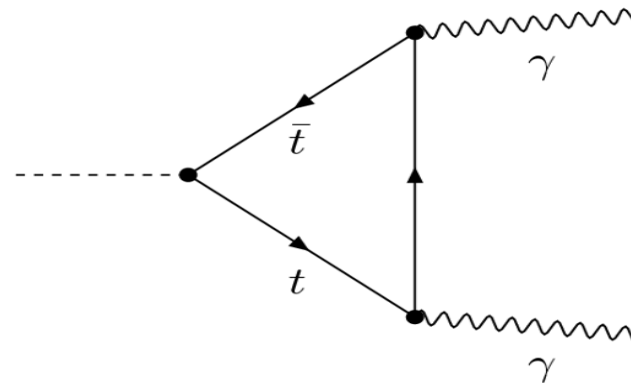


Le boson de Higgs

- On recherchera le boson de Higgs cet après-midi....
- En 4 leptons :



- Ou en 2 photons :



Le Modèle Standard des particules

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & \sum_{\ell=e,\mu,\tau} i\bar{\psi}_{\ell}\gamma^{\mu}\partial_{\mu}\psi_{\ell} + \sum_{\ell'=\nu_e,\nu_{\mu},\nu_{\tau}} i\bar{\psi}_{\ell'}\gamma^{\mu}\partial_{\mu}\psi_{\ell'} + \sum_{q=u,c,t} i\bar{\psi}_q\gamma^{\mu}\partial_{\mu}\psi_q + \sum_{q'=d,s,b} i\bar{\psi}_{q'}\gamma^{\mu}\partial_{\mu}\psi_{q'} \\
 & - \frac{1}{2}(\partial_{\mu}W_{\nu}^{+} - \partial_{\nu}W_{\mu}^{+})(\partial^{\mu}W^{-\nu} - \partial^{\nu}W^{-\mu}) - \frac{1}{4}(\partial_{\mu}Z_{\nu} - \partial_{\nu}Z_{\mu})(\partial^{\mu}Z^{\nu} - \partial^{\nu}Z^{\mu}) \\
 & - \frac{1}{4}(\partial_{\mu}A_{\nu} - \partial_{\nu}A_{\mu})(\partial^{\mu}A^{\nu} - \partial^{\nu}A^{\mu}) - \frac{1}{4}\sum_{a=1}^8(\partial_{\mu}G_{\nu}^a - \partial_{\nu}G_{\mu}^a)(\partial^{\mu}G^{a\nu} - \partial^{\nu}G^{a\mu}) + \frac{1}{2}\partial_{\mu}h\partial^{\mu}h \\
 & - \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \frac{\lambda_{\ell}v}{\sqrt{2}}\bar{\psi}_{\ell}\psi_{\ell} - \sum_{q=u,c,t} \frac{\lambda_q v}{\sqrt{2}}\bar{\psi}_q\psi_q - \sum_{q'=d,s,b} \frac{\lambda_{q'}v}{\sqrt{2}}\bar{\psi}_{q'}\psi_{q'} \\
 & - \left(\frac{gv}{2}\right)^2 W_{\mu}^{+}W^{-\mu} - \frac{1}{2}\left(\frac{gv}{2\cos\theta_W}\right)^2 Z_{\mu}Z^{\mu} - \frac{1}{2}(-2m^2)^2 h^2 \\
 & + \frac{g}{4\cos\theta_W} \left(\sum_{\ell=e,\mu,\tau} \bar{\psi}_{\ell}\gamma^{\mu}(4\sin^2\theta_W - 1 + \gamma^5)\psi_{\ell}Z_{\mu} + \sum_{\ell'=\nu_e,\nu_{\mu},\nu_{\tau}} \bar{\psi}_{\ell'}\gamma^{\mu}(1 - \gamma^5)\psi_{\ell'}Z_{\mu} \right) \\
 & + \frac{g}{4\cos\theta_W} \left(\sum_{q=u,c,t} \bar{\psi}_q\gamma^{\mu}(1 - \frac{8}{3}\sin^2\theta_W - \gamma^5)\psi_qZ_{\mu} + \sum_{q'=d,s,b} \bar{\psi}_{q'}\gamma^{\mu}(\frac{4}{3}\sin^2\theta_W - 1 + \gamma^5)\psi_{q'}Z_{\mu} \right) \\
 & + \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \bar{\psi}_{\nu\ell}\gamma^{\mu}(1 - \gamma^5)\psi_{\ell}W_{\mu}^{+} + \bar{\psi}_{\ell}\gamma^{\mu}(1 - \gamma^5)\psi_{\nu\ell}W_{\mu}^{-} \\
 & + \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_{q=u,c,t} V_{qq'}\bar{\psi}_q\gamma^{\mu}(1 - \gamma^5)\psi_{q'}W_{\mu}^{+} + V_{qq'}^{*}\bar{\psi}_{q'}\gamma^{\mu}(1 - \gamma^5)\psi_qW_{\mu}^{-} \\
 & + g_{em} \left(- \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \psi_{\ell}\gamma^{\mu}\psi_{\ell}A_{\mu} + \frac{2}{3} \sum_{q=u,c,t} \psi_q\gamma^{\mu}\psi_qA_{\mu} - \frac{1}{3} \sum_{q'=d,s,b} \bar{\psi}_{q'}\gamma^{\mu}\psi_{q'}A_{\mu} \right) \\
 & + g_s \left(\sum_{\lambda,q=u,c,t} \sum_{a=1}^8 \bar{\psi}_q\gamma^{\mu}\psi_qG_{\mu}^aT_{a,\lambda} + \sum_{\lambda,q'=d,s,b} \sum_{a=1}^8 \bar{\psi}_{q'}\gamma^{\mu}\psi_{q'}G_{\mu}^aT_{a,\lambda} \right) \\
 & - \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \frac{\lambda_{\ell}}{\sqrt{2}}\bar{\psi}_{\ell}\psi_{\ell}h - \sum_{q=u,c,t} \frac{\lambda_q}{\sqrt{2}}\bar{\psi}_q\psi_qh - \sum_{q'=d,s,b} \frac{\lambda_{q'}}{\sqrt{2}}\bar{\psi}_{q'}\psi_{q'}h \\
 & + ig_{em} [\partial_{\mu}A_{\nu}W^{-\mu}W^{+\nu} + \partial_{\mu}W_{\nu}^{+}W^{-\nu}A^{\mu} + \partial_{\mu}W_{\nu}^{-}W^{+\nu}A^{\mu} - \partial_{\mu}A_{\nu}W^{-\nu}W^{+\mu} \\
 & \quad - \partial_{\mu}W_{\nu}^{+}W^{-\mu}A^{\nu} - \partial_{\mu}W_{\nu}^{-}W^{+\mu}A^{\nu}] \\
 & + ig\cos\theta_W [\partial_{\mu}Z_{\nu}W^{-\mu}W^{+\nu} + \partial_{\mu}W_{\nu}^{+}W^{-\nu}Z^{\mu} + \partial_{\mu}W_{\nu}^{-}W^{+\nu}Z^{\mu} - \partial_{\mu}Z_{\nu}W^{-\nu}W^{+\mu} \\
 & \quad - \partial_{\mu}W_{\nu}^{+}W^{-\mu}Z^{\nu} - \partial_{\mu}W_{\nu}^{-}W^{+\mu}Z^{\nu}] + \frac{g^2v}{2}W_{\mu}^{+}W^{-\mu}h + \frac{g^2v}{4\cos^2\theta_W}Z_{\mu}Z^{\mu}h - \lambda v h^3 \\
 & + g_{em}^2 [W_{\nu}^{+}W^{-\mu}A_{\mu}A^{\nu} - W_{\mu}^{+}W^{-\mu}A_{\nu}A^{\nu}] + g^2\cos^2\theta_W [W_{\nu}^{+}W^{-\mu}Z_{\nu}Z^{\mu} - W_{\mu}^{+}W^{-\mu}Z_{\nu}Z^{\nu}] \\
 & + g^2\cos\theta_W\sin\theta_W [2W_{\mu}^{+}W^{-\mu}Z_{\nu}A^{\nu} - W_{\mu}^{+}W^{-\nu}A_{\nu}Z^{\mu} - W_{\mu}^{+}W^{-\nu}A^{\mu}Z_{\nu}] \\
 & + \frac{g^2}{2} [W_{\mu}^{-}W^{-\mu}W_{\nu}^{+}W^{+\nu} - W_{\mu}^{-}W^{+\mu}W_{\nu}^{-}W^{-\nu}] + \frac{g^2}{4}W_{\mu}^{+}W^{-\mu}h^2 + \frac{g^2}{8\cos^2\theta_W}Z_{\mu}Z^{\mu}h^2 - \frac{\lambda}{4}h^4 \\
 & - \frac{g_s}{2}\sum_{a,b,c} f^{abc}(\partial_{\mu}G^{a\nu} - \partial_{\nu}G_{\mu}^a)G^{\mu b}G^{\nu c} - \frac{g_s^2}{4}\sum_{a,b,c,d,e,f} f^{abc}f^{ade}G_{\mu}^bG_{\nu}^cG^{\mu d}G^{\nu e}
 \end{aligned}$$

$$\text{avec : } g_{em} = g \sin \theta_W \quad , \quad v^2 = \frac{-m^2}{\lambda} \quad , \quad m^2 < 0 \quad , \quad \lambda > 0$$

$$m_f = \frac{\lambda_f v}{\sqrt{2}}, m_w = \frac{gv}{2}, m_z = \frac{gv}{2\cos\theta_W}, m_h = \sqrt{-2m^2}$$

Est-on arrivé au bout de la physique des particules ?

Mais il reste bien des mystères à résoudre !

- Pourquoi existe-t-il trois générations?
- Les trois interactions fondamentales sont-elles réellement différentes ?
- Notre univers est composé essentiellement de **matière** et non d'**antimatière**, pourquoi ?
- Notre univers est composé en grande partie de matière noire qui n'est pas expliquée par le Modèle Standard des particules - quelle est sa nature ?
- Comment inclure la gravitation dans ce schéma ?

... et bien d'autres questions
qui attendent les générations
de physiciens à venir !!!

