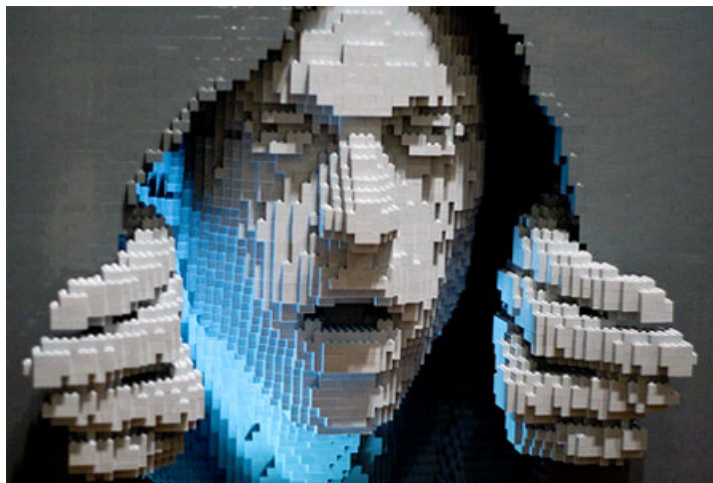


# Petite introduction à la physique des particules

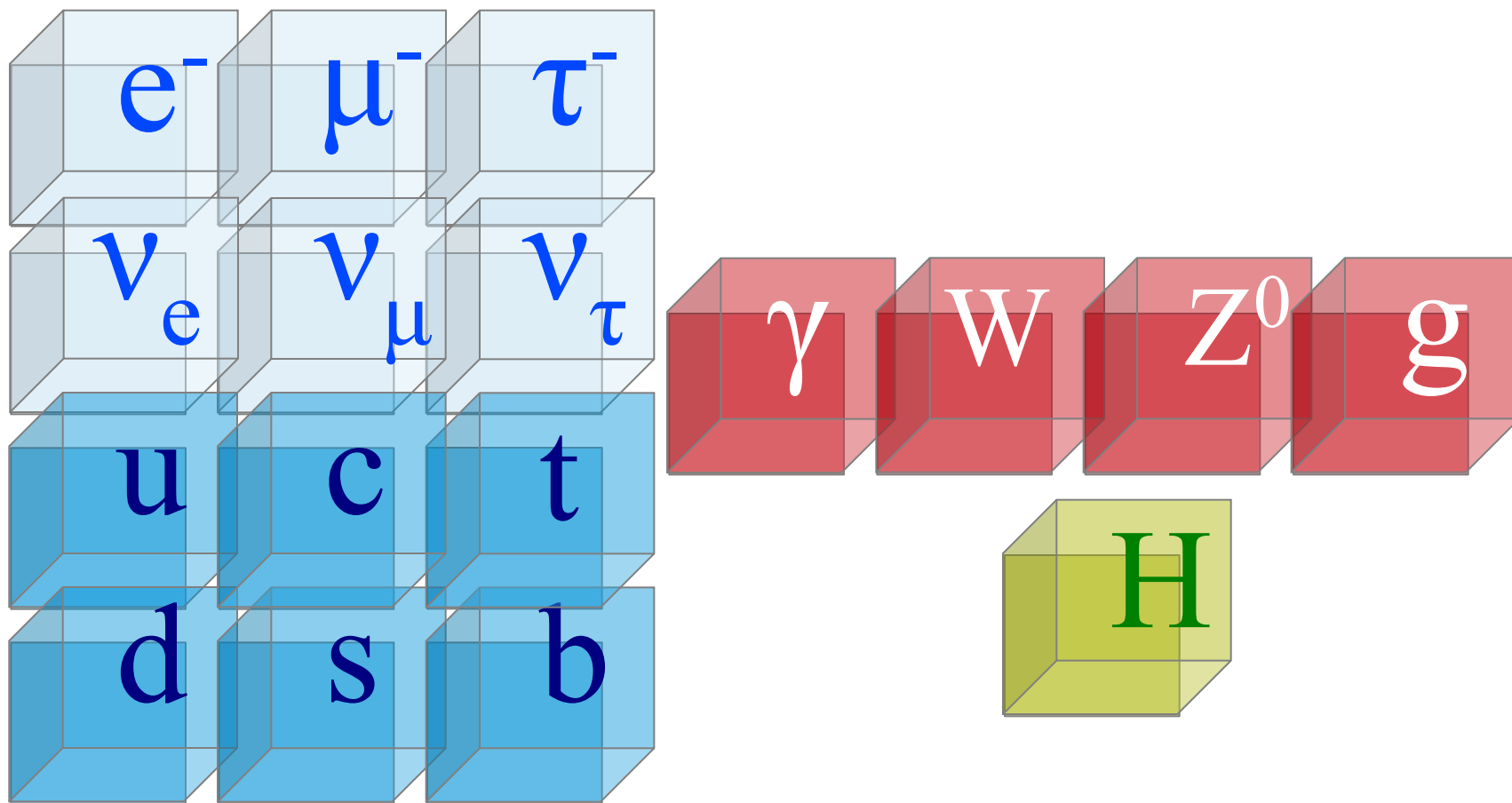


# Le Modèle Standard des particules

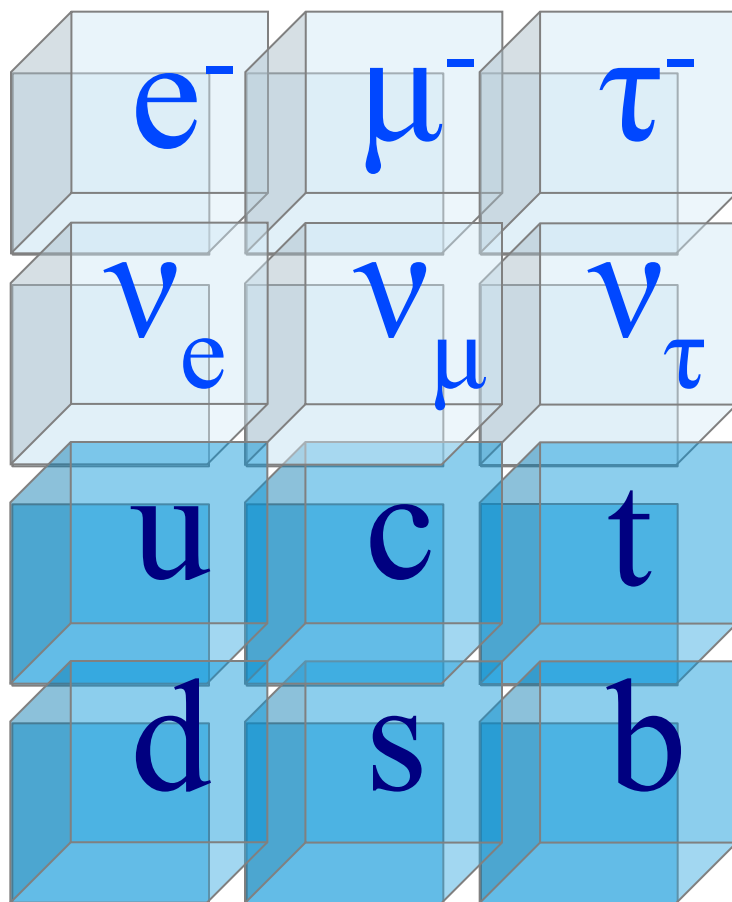
- C'est la théorie physique qui décrit les **particules élémentaires** (les plus petits constituants de l'univers) et leurs **interactions**



Quelles particules élémentaires  
connaissiez-vous ?

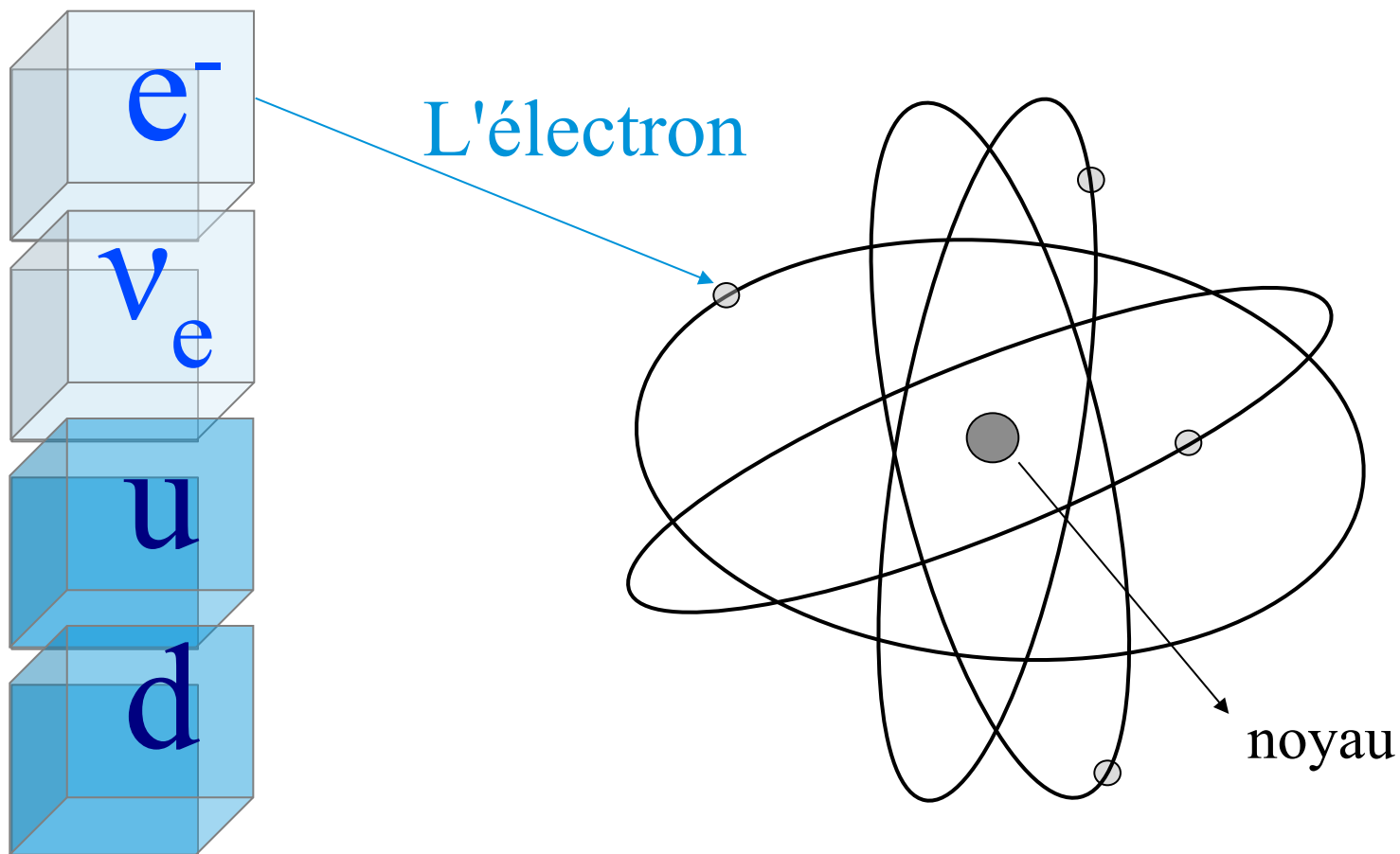


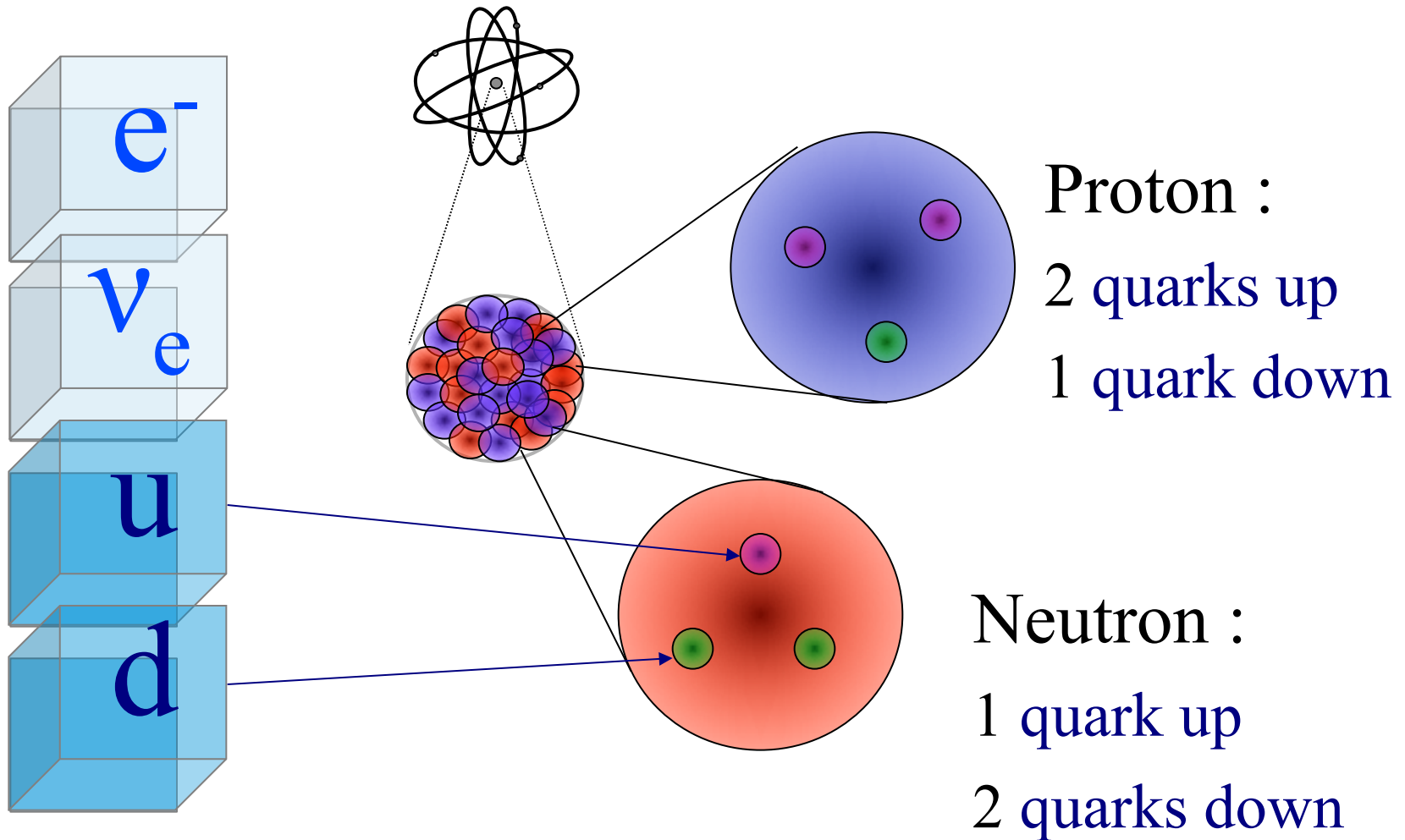




Les *fermions* :  
particules de matière

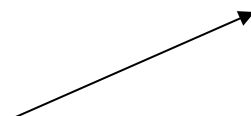
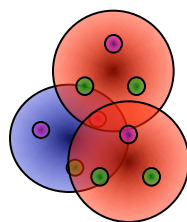
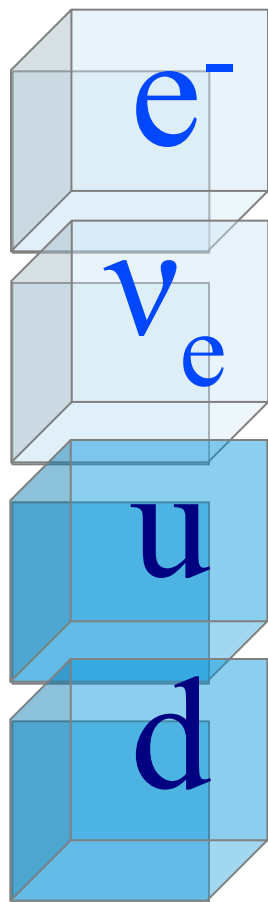
*Il existe aussi les anti-particules :  
les mêmes particules mais leurs charges sont inversées.  
Par exemple :  $e^+$  (aussi notée  $\bar{e}$ ) est l'antiparticule de  $e^-$*



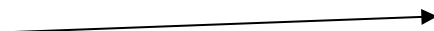




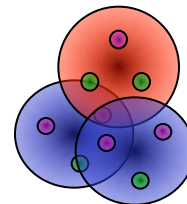
Découvert dans les désintégrations  $\beta$



$e^-$

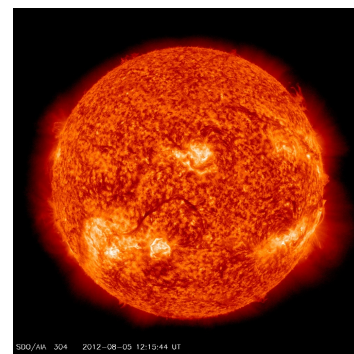


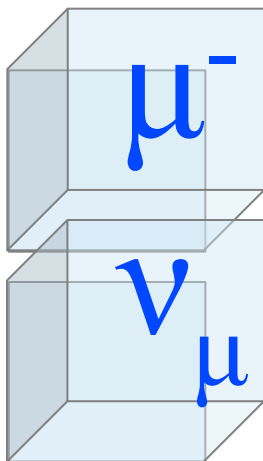
$\bar{\nu}_e$



Le neutrino électronique

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





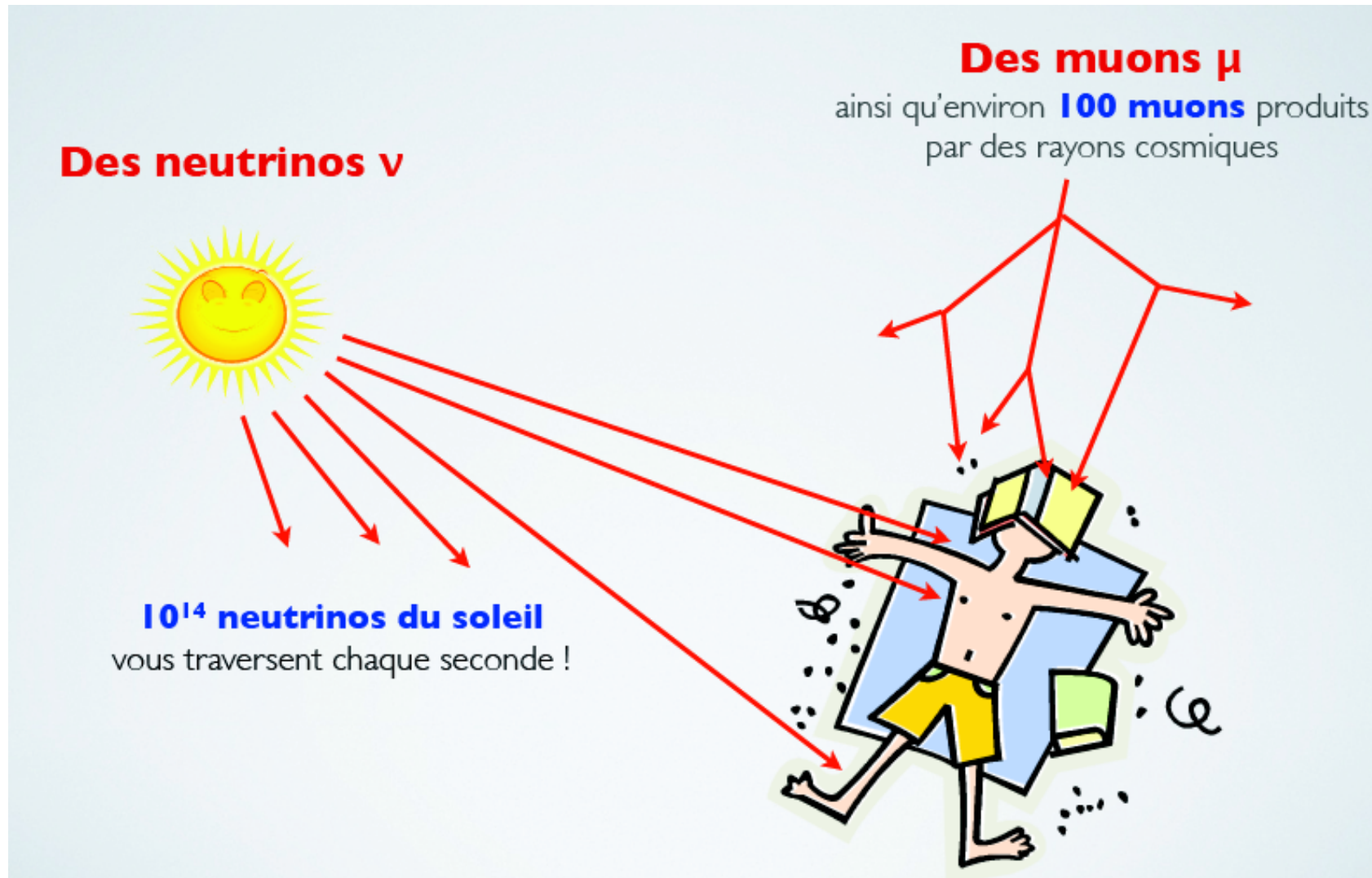
Le muon a les mêmes propriétés physiques que l'électron, mais avec une masse 207 fois plus grande et il se désintègre en  $\tau = 2.10^{-6}$  s

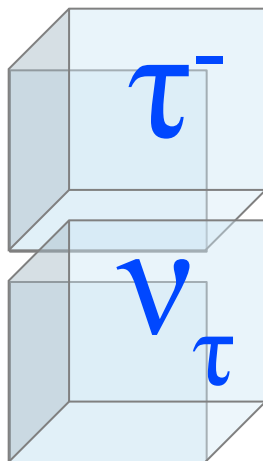
Il a aussi son neutrino associé.

*Les muons ont été découverts dans les rayons cosmiques*



# Des particules élémentaires vous traversent en ce moment !

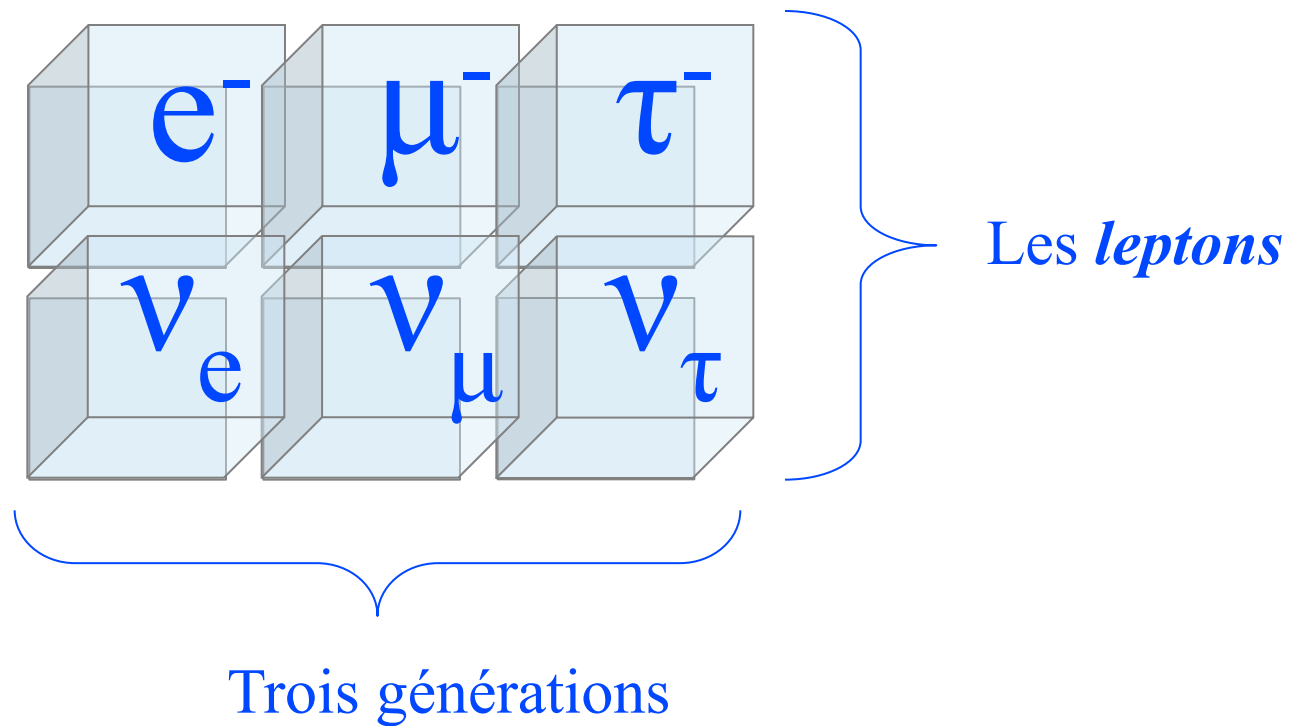


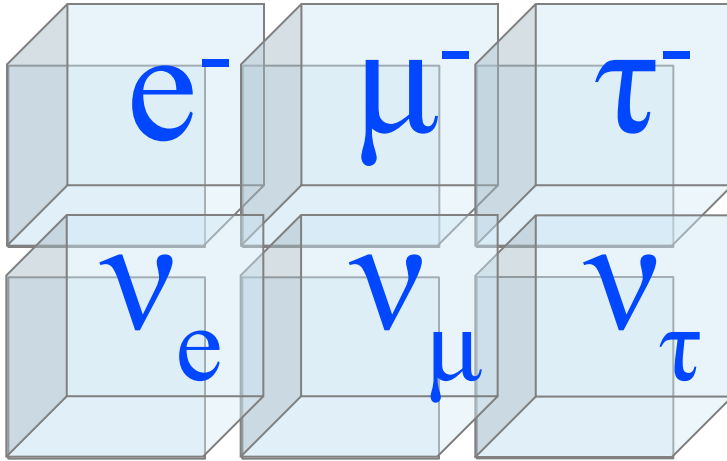


Le tau a les mêmes propriétés physiques que l'électron, mais avec une masse 3500 fois plus grande et il se désintègre en  $\tau = 3.10^{-13}$  s.

Il a aussi son neutrino associé.

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





Électriquement chargés (-1), massifs

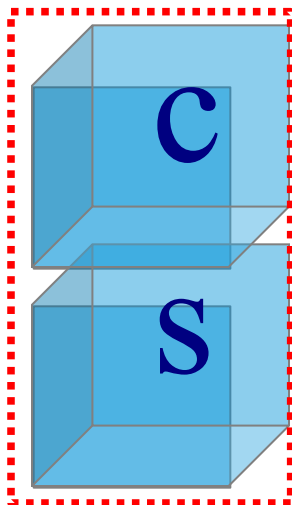
Électriquement neutres, sans masse

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

**2<sup>e</sup> génération** :

quark *charm* (550x masse up)

quark *strange* (20x masse down)

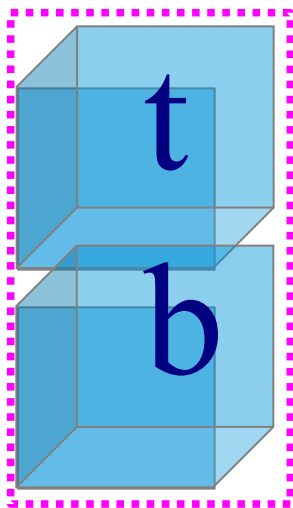


*Ces quarks ont été découverts grâce aux expériences avec des collisionneurs de particules*



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 !!



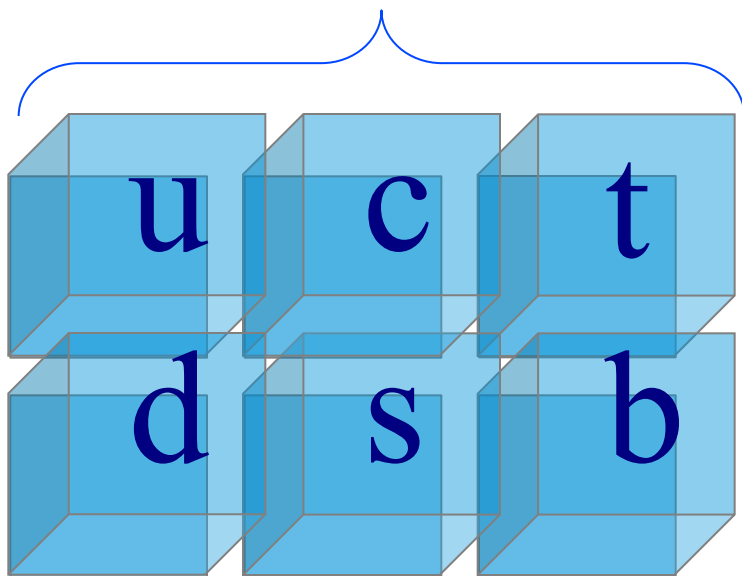
3<sup>e</sup> génération :

quark *top* (76000x masse up)

quark *bottom* (980x masse down)

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

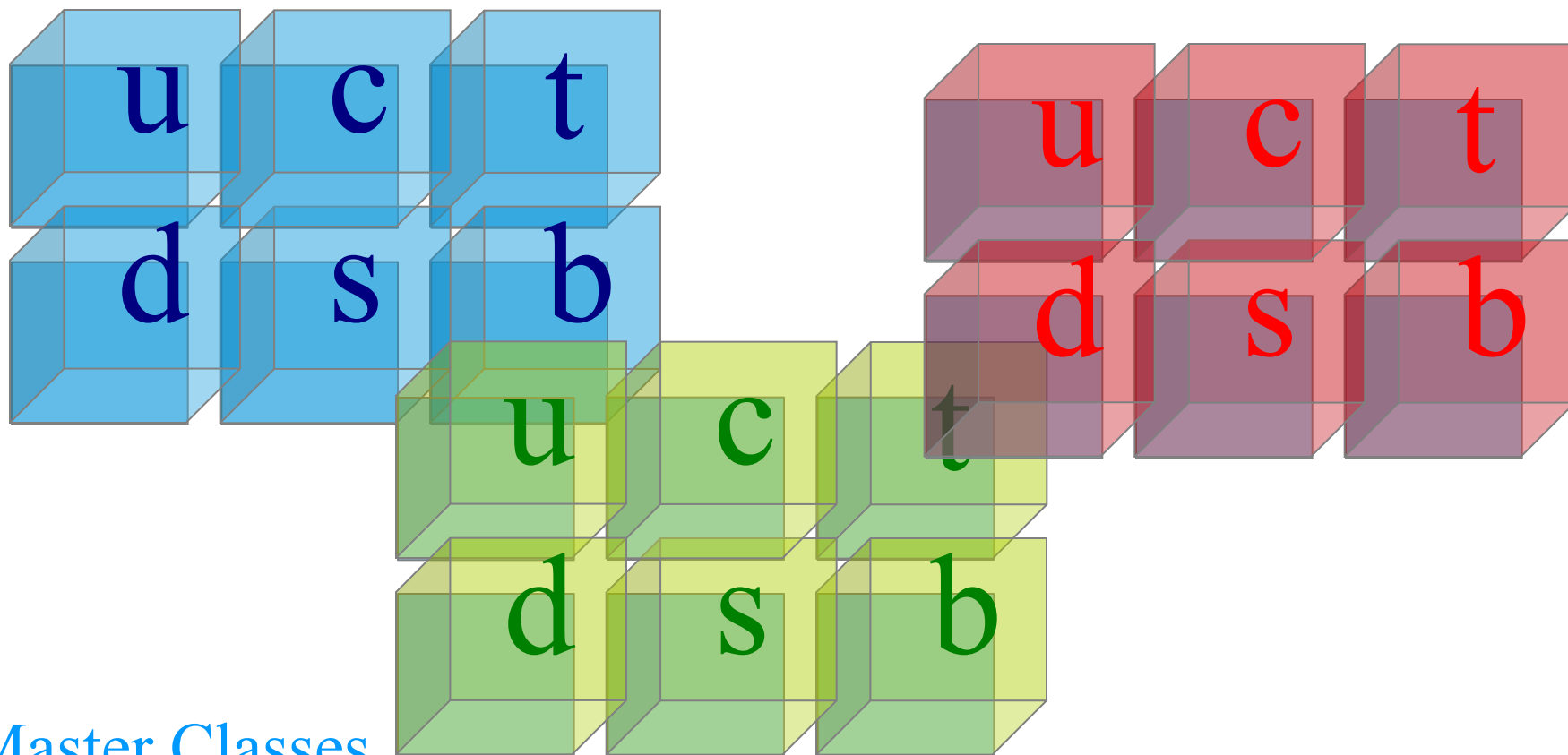
## Trois générations

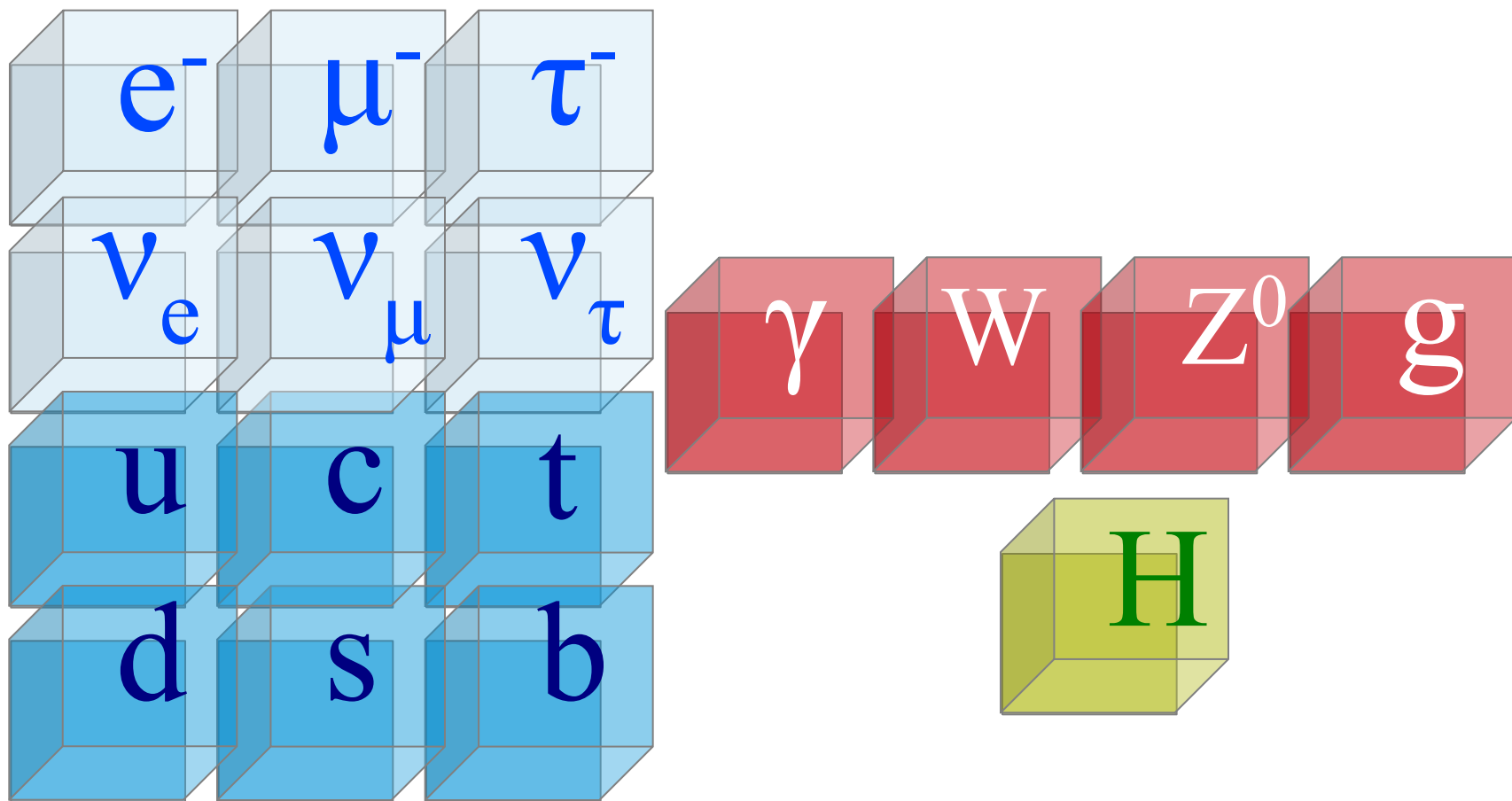


Électriquement chargés ( $+2/3$ )

Électriquement chargés ( $-1/3$ )

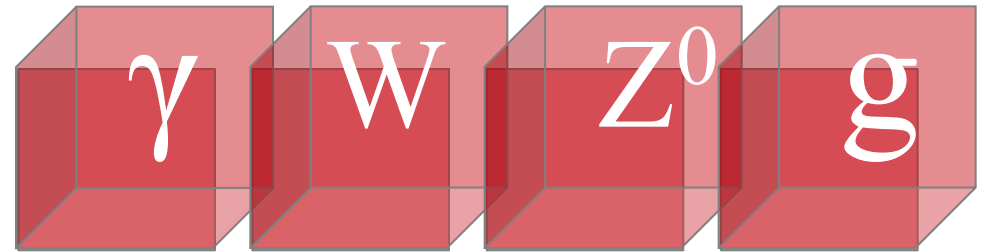
Tous les quarks portent aussi une autre charge dite  
'de couleur' : ils peuvent être 'bleus', 'verts' ou 'rouges'







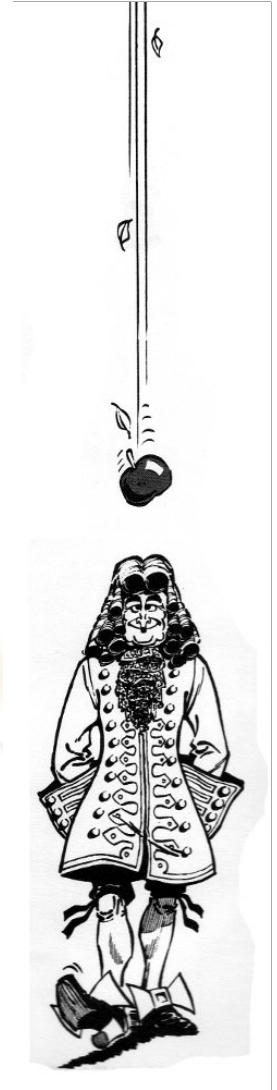
*Satyendra Nath Bose*



*Les bosons de jauge :*  
particules d'interactions



Quelles interactions  
connaissiez-vous ?

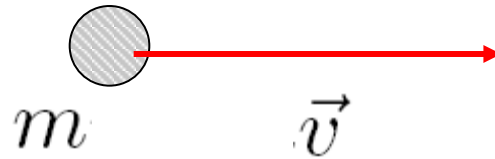




Les interactions décrites dans le Modèle Standard des particules

# 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

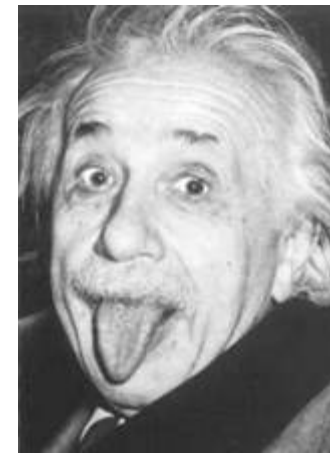
- Relativité restreinte :
  - Quantité de mouvement

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

- 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 quantité 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 ( $\times 10^{12}$ )

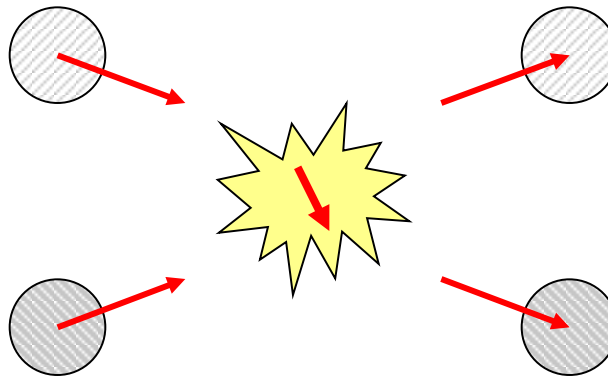
100 TeV = Énergie dépensée par un moustique pour s'élever de 1m!

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

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)



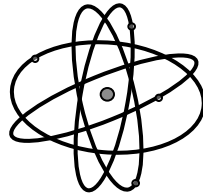


Les interactions décrites dans le Modèle Standard des particules

# Interaction électromagnétique



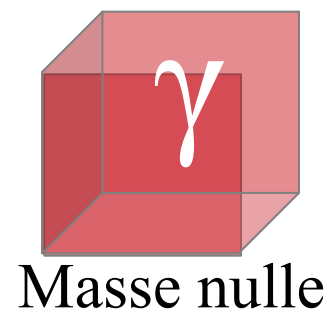
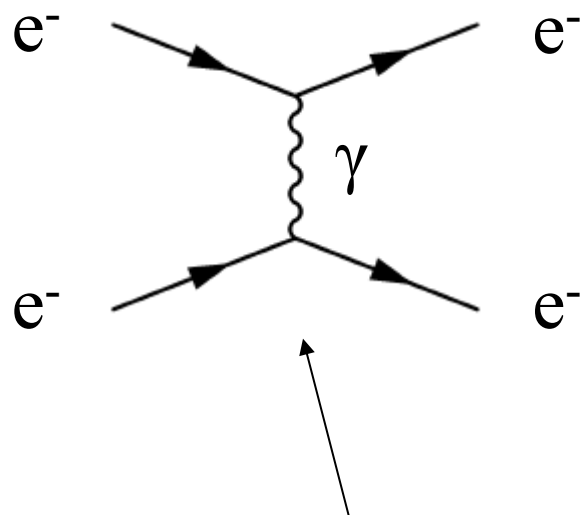
- Elle réunit dans un même formalisme
  - Les phénomènes électriques
  - Les phénomènes magnétiques
  - L'optique
- Elle est responsable de la cohésion de l'atome



# Interaction électromagnétique



- Au niveau fondamental :  
Échange de photons entre particules chargées



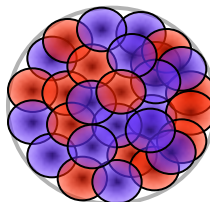
Masse nulle

Diagrammes de Feynman

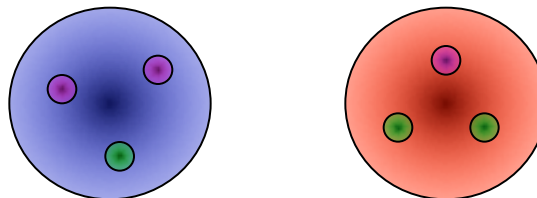
# Interaction forte



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



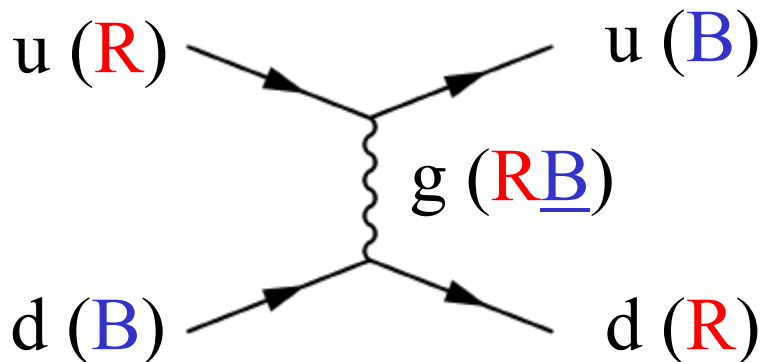
- des quarks dans les protons et neutrons



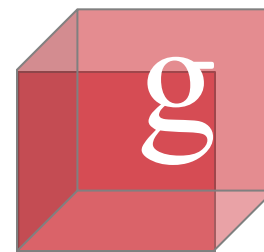
# Interaction forte



- Au niveau fondamental :  
Echange de gluons entre particules colorées



Masse nulle





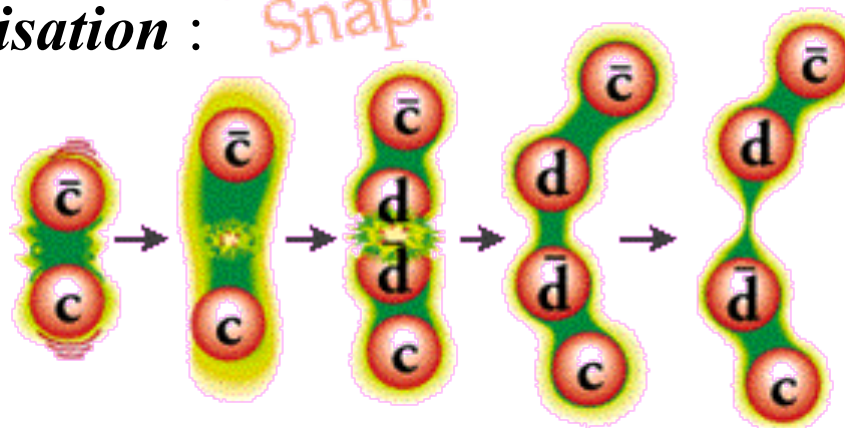
# Interaction forte



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

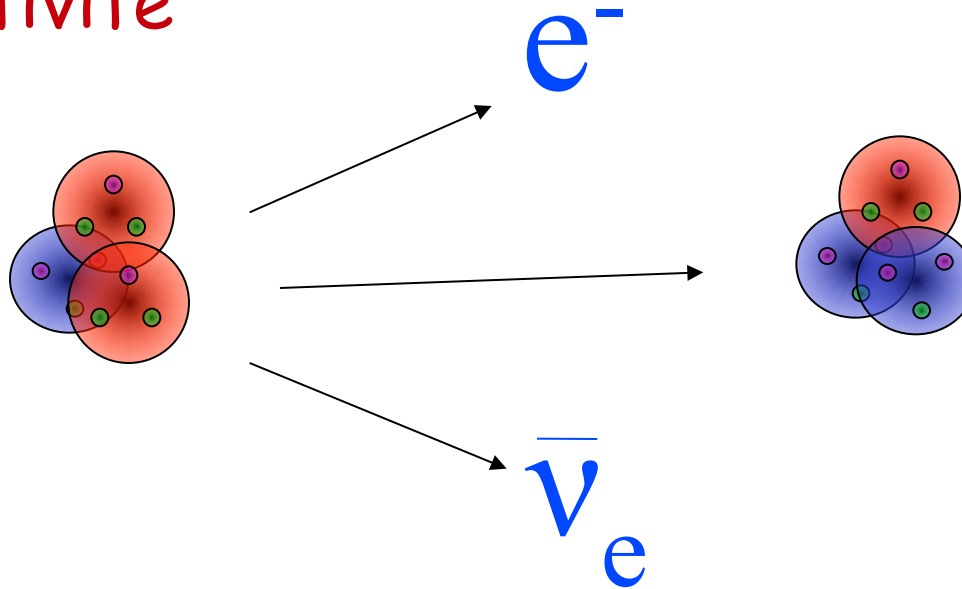
*Hadronisation :* Snap!



# Interaction faible



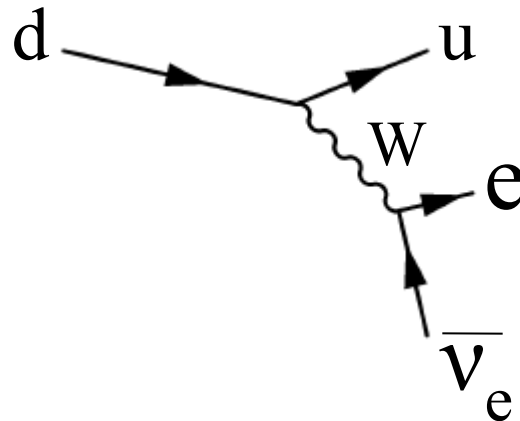
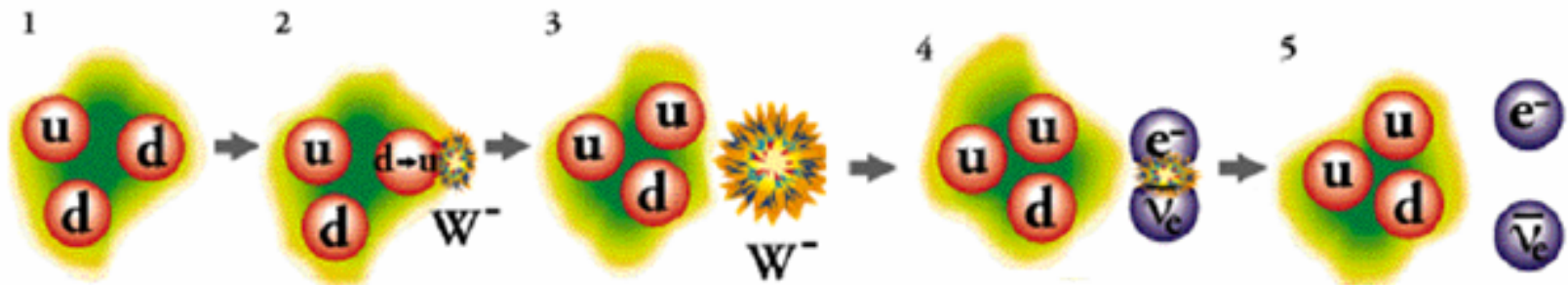
- C'est celle qui entre en jeu dans la radioactivité



# Interaction faible



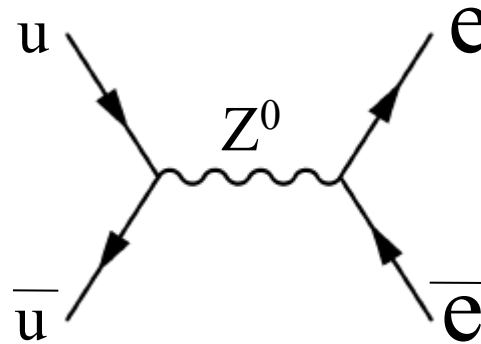
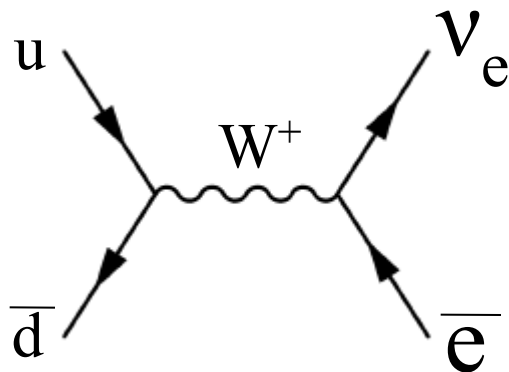
- Désintégration du neutron :



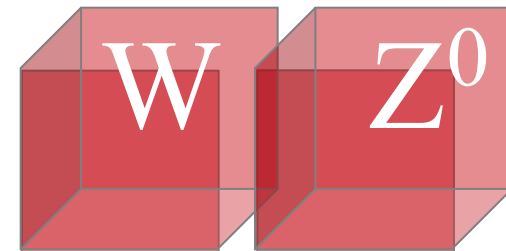
# Interaction faible

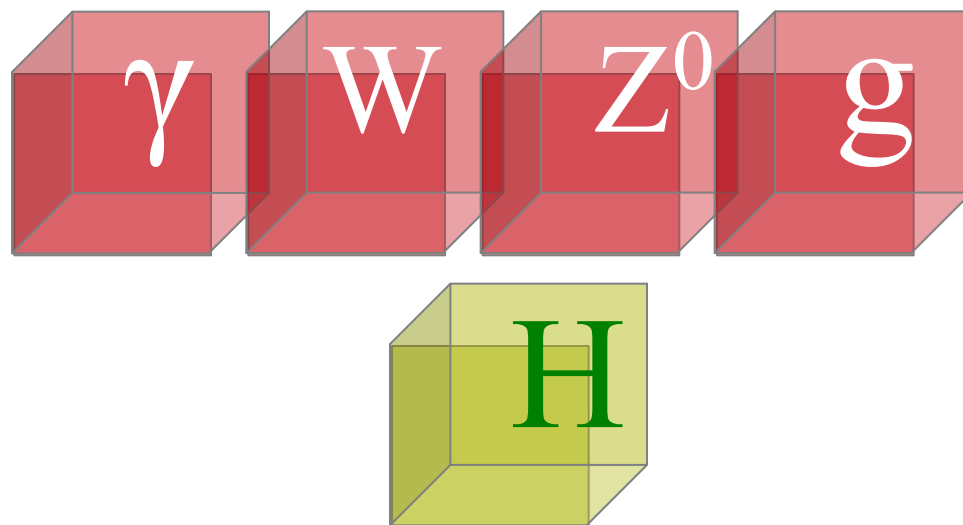
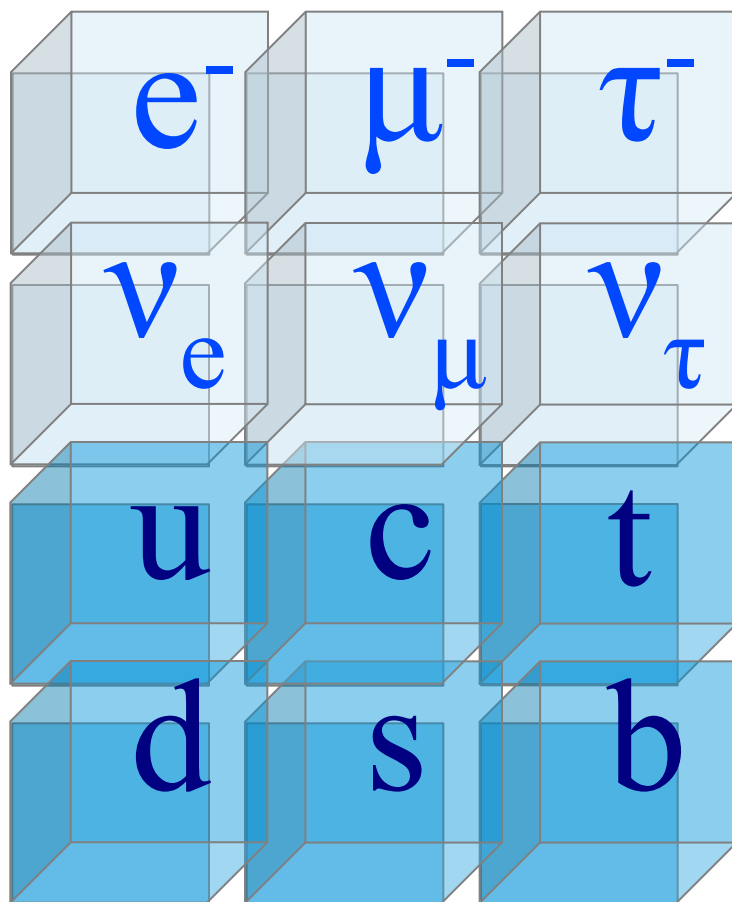


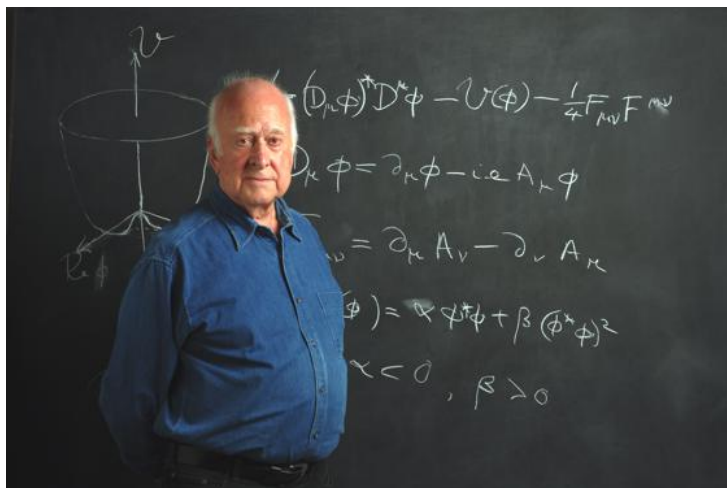
- Au niveau fondamental :  
Échange de  $W^-$ ,  $W^+$  et  $Z^0$



Massifs

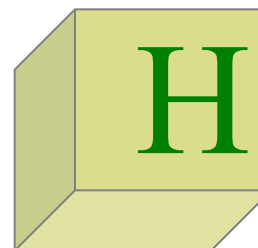






*Peter Higgs*

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\*



*\*Oui, je sais... je viens du Québec !*

# 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.



Puis, le 4 juillet 2012...

miércoles, 4 julio 2012 | Actualizado 09:52 CET | Hemeroteca

EL PAÍS

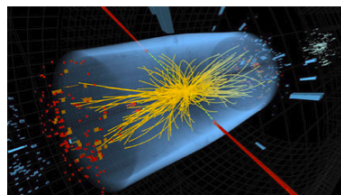
INTERNACIONAL POLÍTICA ECONOMÍA CULTURA SOCIEDAD DEPORTES

ESTÁ PASANDO Bosón Higgs Amnistía fiscal Códex Calixtino Incendios Valencia Caso Barclays Caso Bettencourt Volcán Hiler MÁS TEMAS

**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

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

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

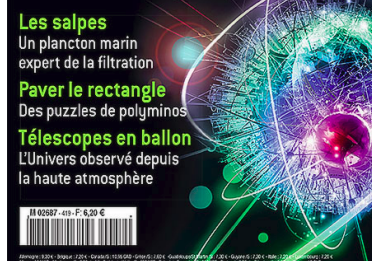
SHOULD WE BAN FLIP-FLOPS? P.14

POUR LA SCIENCE

MACLEAN

Septembre 2012 - n° 419 www.pourlascience.fr

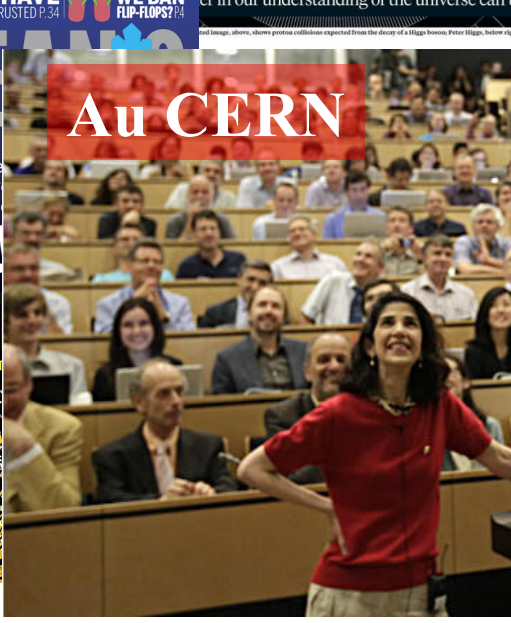
**Le boson de Higgs**  
Un nouveau départ pour la physique ?



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



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



Au CERN

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

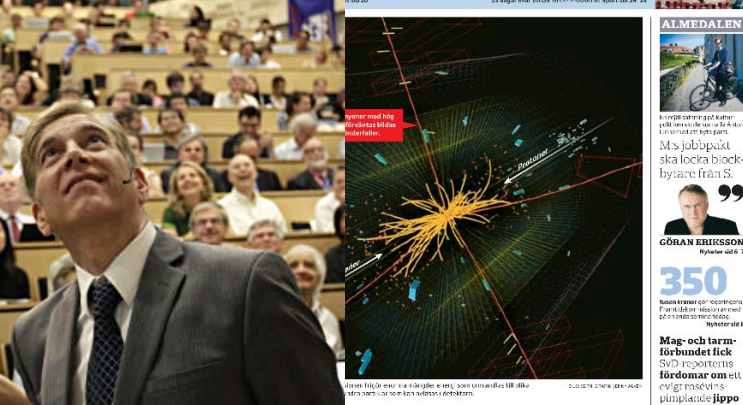
Le boson de Higgs découvert avec 99,9999 % de certitude



SVENSKA DAGBLADET

Mycket står på spel i veckan

SVENSKA SIMMARESS HOTAS AV USA-MISSIL



Äckten ger nya n vår existens

Master Classes

# 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

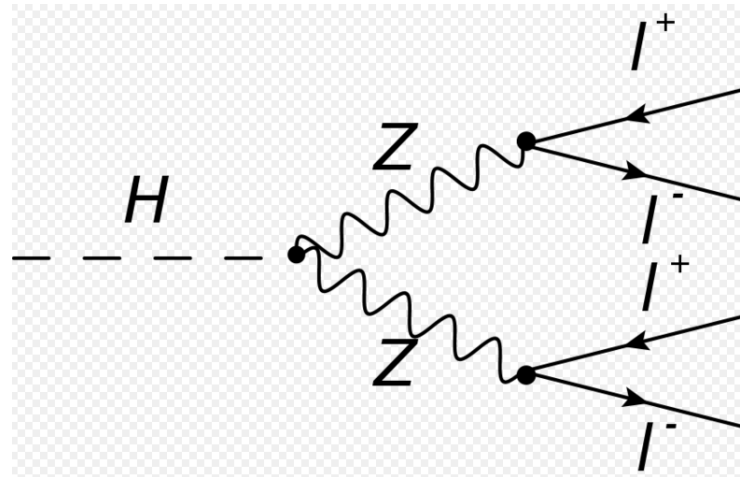
The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs *"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental 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 !*

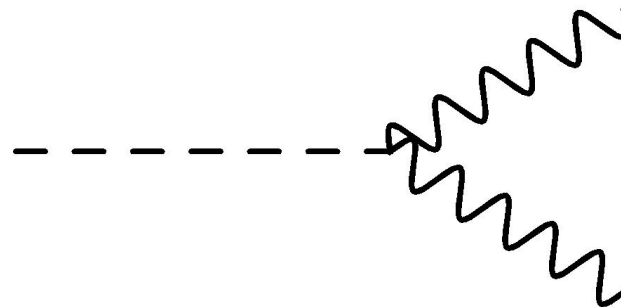


# Le boson de Higgs

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

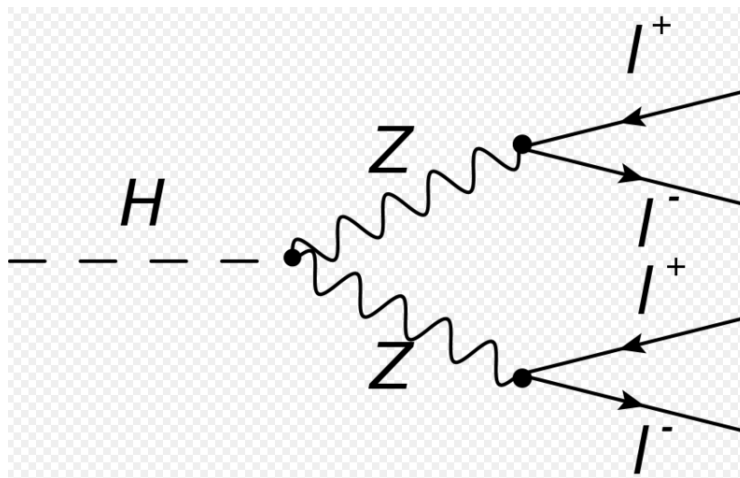


- Ou en 2 photons ... ?

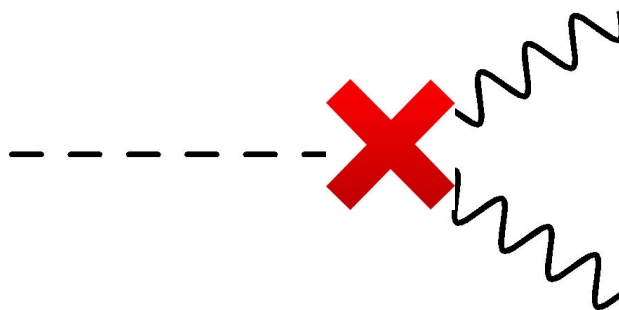


# Le boson de Higgs

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

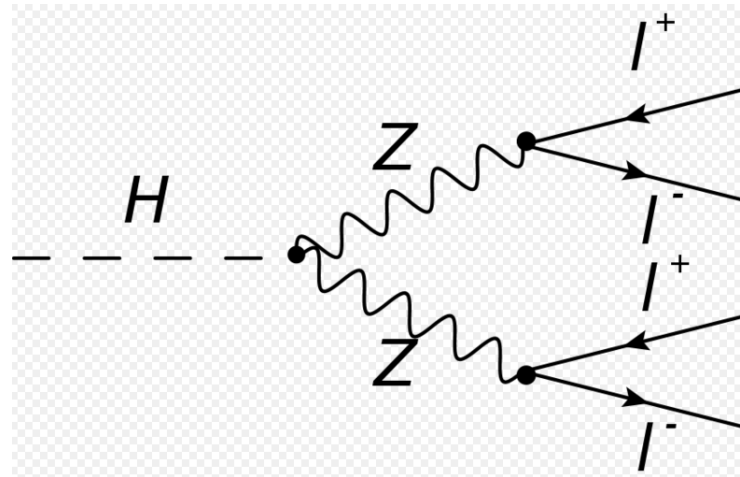


- Ou en 2 photons ... ?

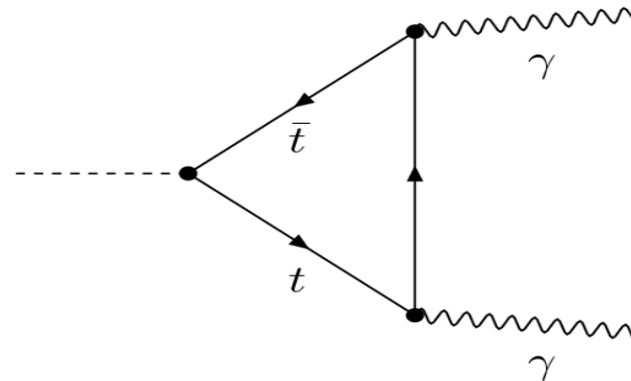


# Le boson de Higgs

- 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_qv}{\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)^2W_{\mu}^{+}W^{-\mu} - \frac{1}{2}\left(\frac{gv}{2\cos\theta_W}\right)^2Z_{\mu}Z^{\mu} - \frac{1}{2}(-2m^2)^2h^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}\sum_{q'=d,s,b}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}\bar{\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 vh^3 \\
& + g_{em}^2[W_{\nu}^{+}W^{-\mu}A_{\mu}A^{\mu} - W_{\mu}^{+}W^{-\mu}A_{\nu}A^{\nu}] + g^2\cos^2\theta_W[W_{\nu}^{+}W^{-\mu}Z_{\mu}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 !!!

