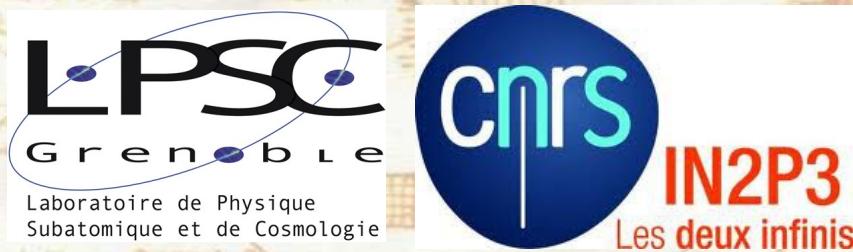


Petite introduction à la physique des particules

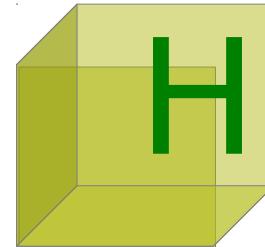
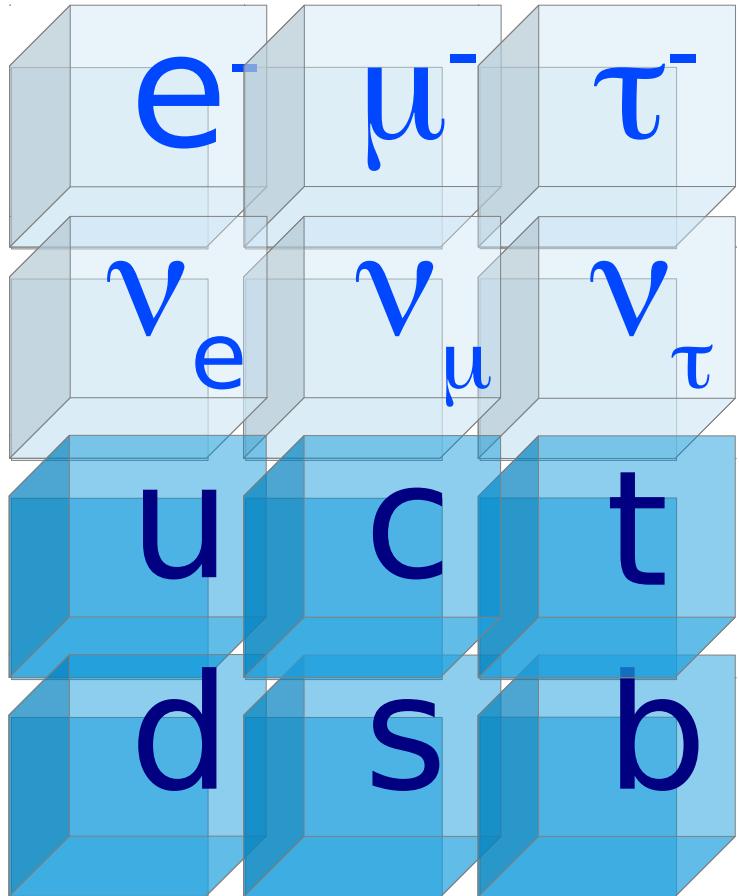


Le Modèle Standard des particules

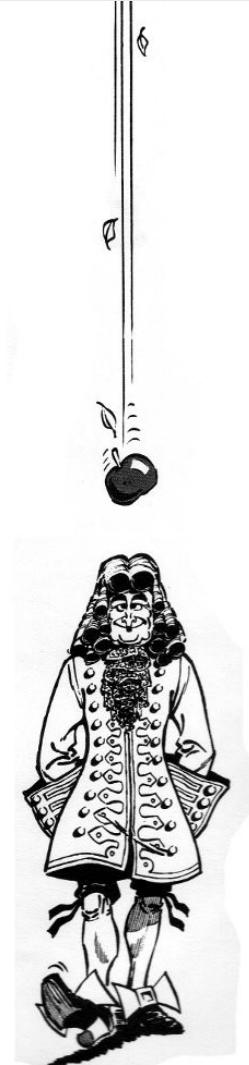
- C'est la théorie physique qui décrit les **particules élémentaires** (les plus petits constituants de l'univers) et leurs interactions



Quelles particules connaissez-vous ?



Quelles interactions connaissez-vous ?

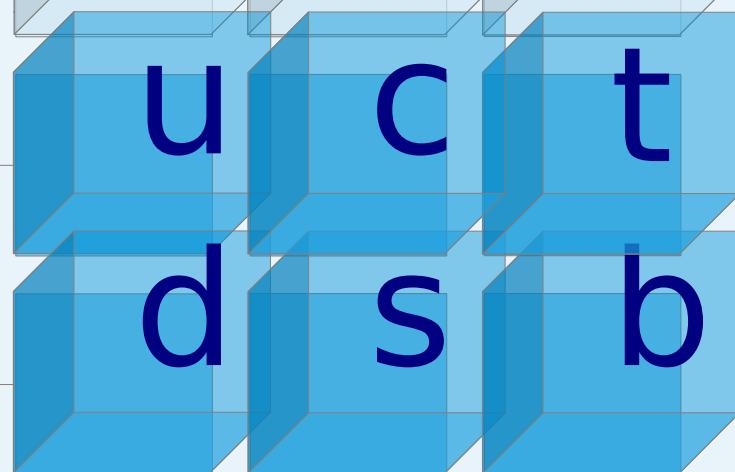


Le Modèle Standard des particules

Les leptons



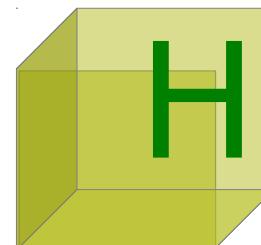
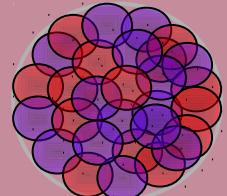
atomes



Les quarks

Les fermions :
particules de matière – chacune
associée à son antiparticule

Les *bosons de jauge* :
particules d'interactions



Le *boson de Higgs* :
responsable de la masse

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'élèver de 1m!

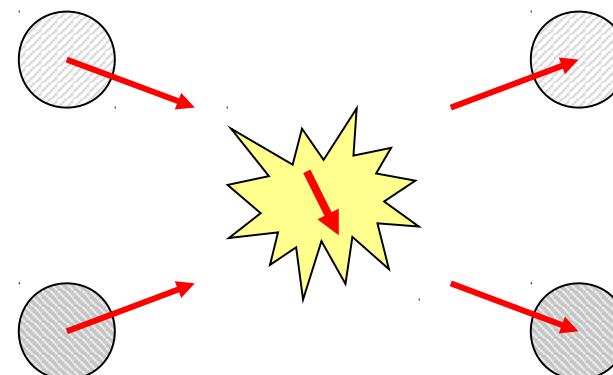
D'après $E=mc^2$, on peut aussi mesurer une masse en eV/c^2

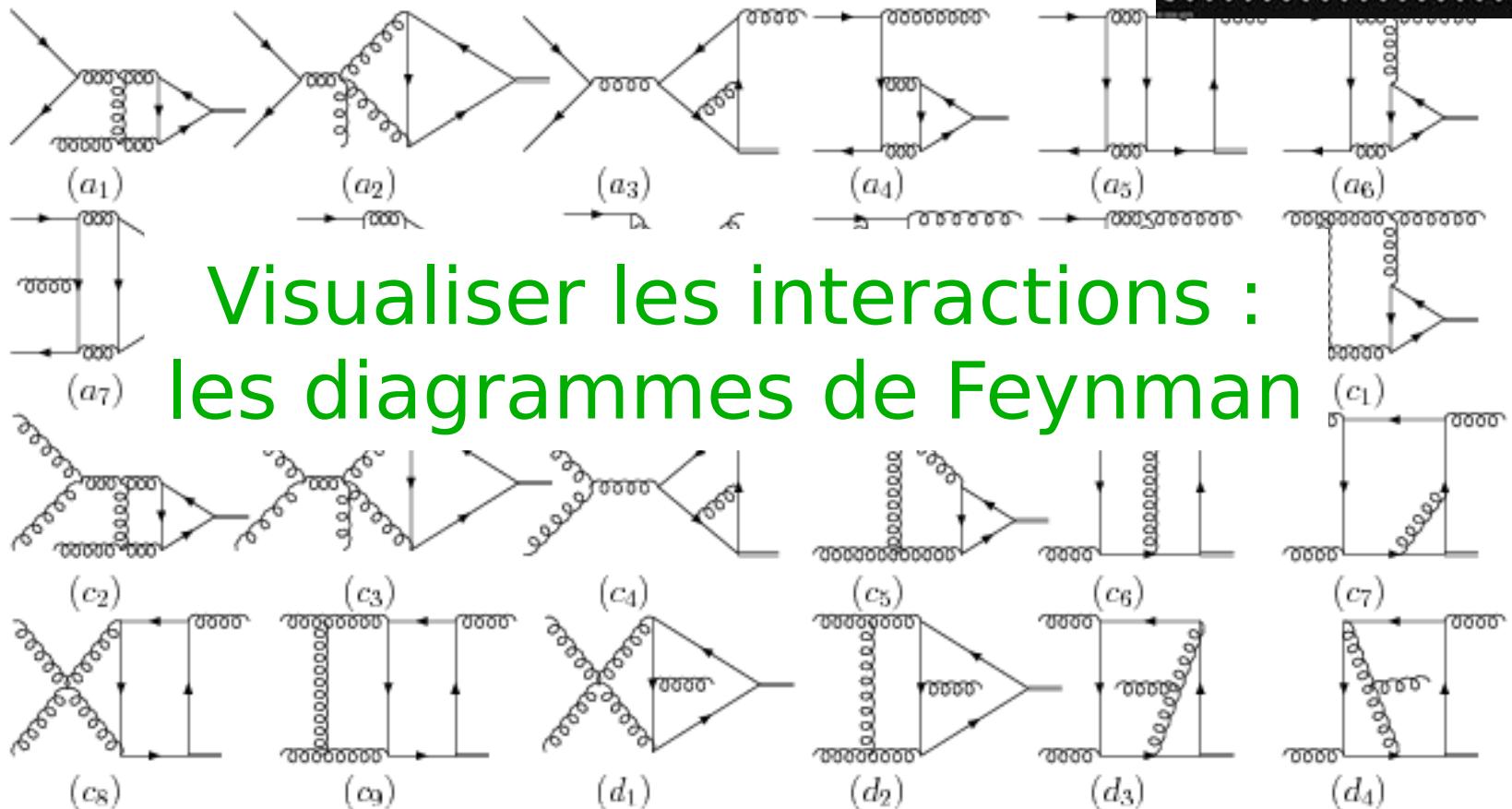
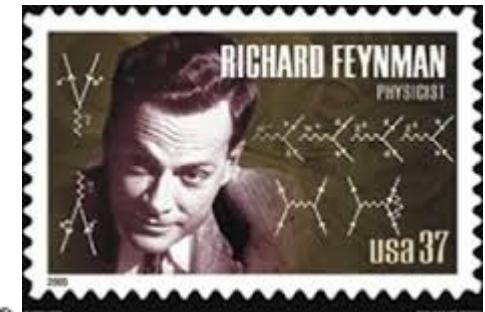
Exemple : $m(\text{electron})=511 \text{ keV}/c^2$

Les 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)





Visualiser les interactions : les diagrammes de Feynman

Les diagrammes de Feynman

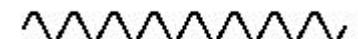
Les règles du jeu :

1. Il y a 4 types de lignes :

- La ligne droite avec une flèche



- La ligne ondulée



- La ligne en spirale



- La ligne pointillée



Les diagrammes de Feynman

Les règles du jeu :

1. Il y a 4 types de lignes (*ligne=particule*)

- La ligne droite avec une flèche

(*les fermions*)



vers la droite=particule; gauche=antiparticule

- La ligne ondulée

(γ , W ou Z)



- La ligne en spirale

(*gluon*)



- La ligne pointillée

(*Higgs*)

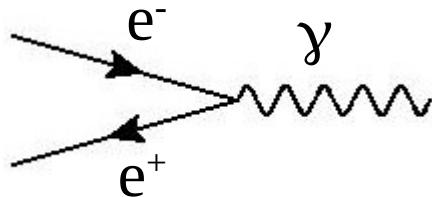


Les diagrammes de Feynman

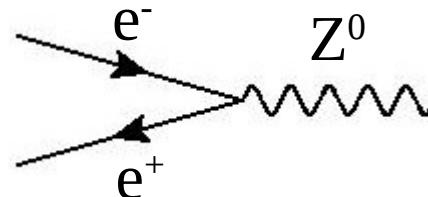
Les règles du jeu :

2. Les interactions seront représentées par des vertex connectant les particules entre elles

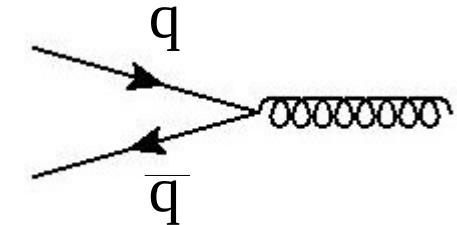
Interactions :



Électromagnétique

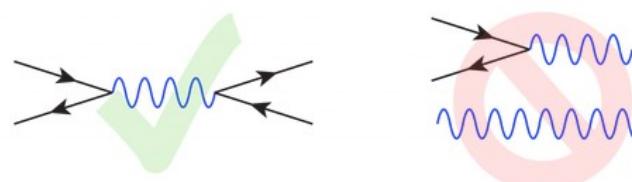


Faible



Forte

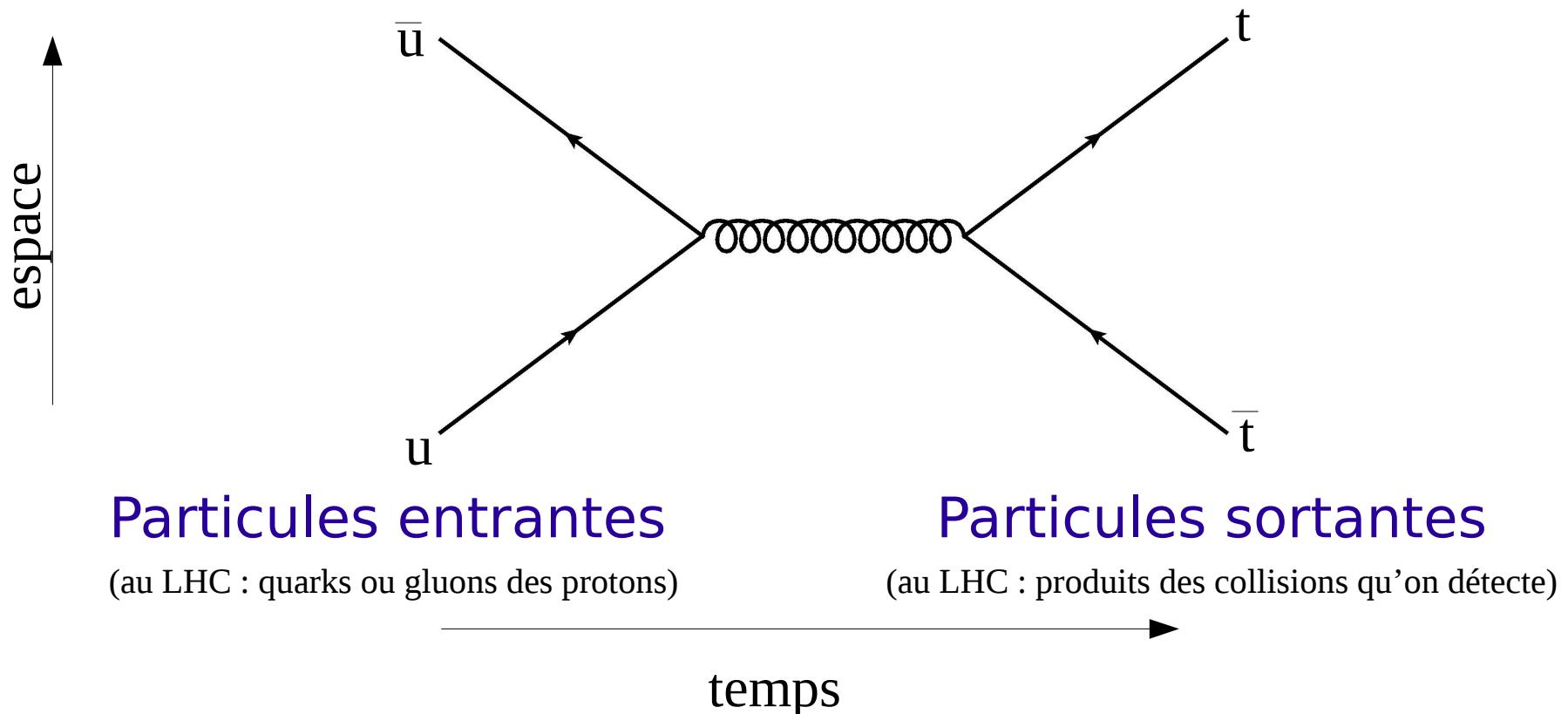
Les diagrammes ne devraient pas contenir de morceaux « déconnectés »



Les diagrammes de Feynman

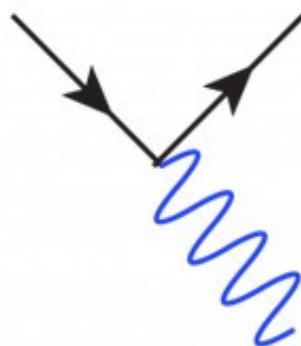
Les règles du jeu :

3. Les diagrammes se lisent de gauche à droite :

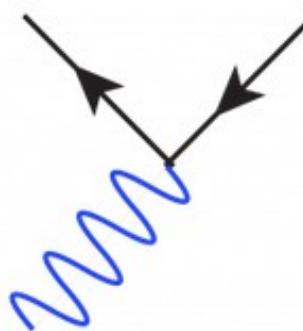


Les diagrammes de Feynman

Note : les diagrammes peuvent être « tournés », ils représentent alors un processus différent !



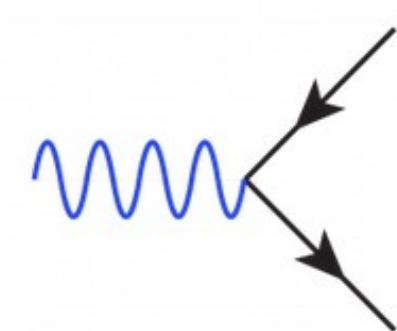
Un électron émet un photon et continue son chemin



Un positron absorbe un photon et continue son chemin



Un électron et un positron s'annihilent en un photon



Un photon produit une paire électron/positron

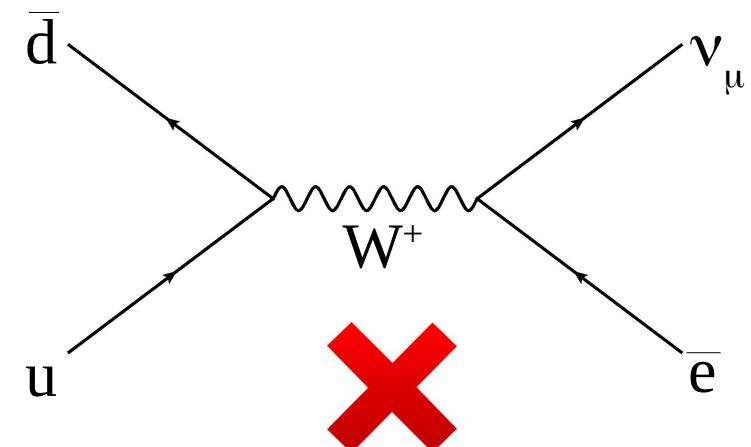
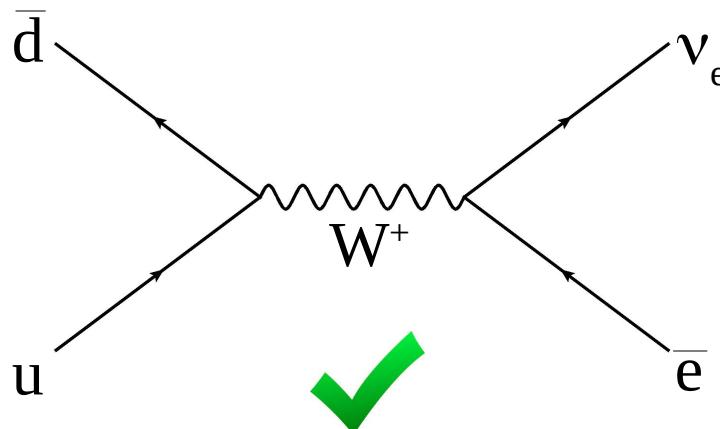
Les diagrammes de Feynman

Les règles du jeu :

4. Les diagrammes doivent respecter toutes les lois de conservations :

- ✓ Énergie et impulsion
- ✓ Charge électrique
- ✓ Autres nombres quantiques conservés...

Par exemple : les lignes représentant des leptons ne peuvent pas « changer de famille » :



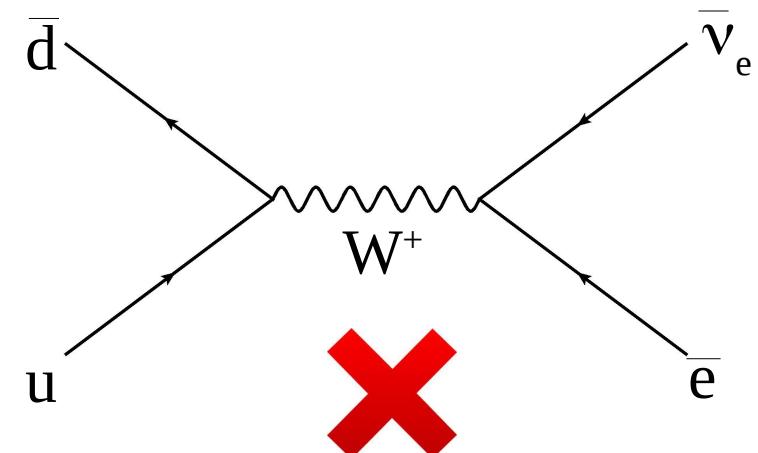
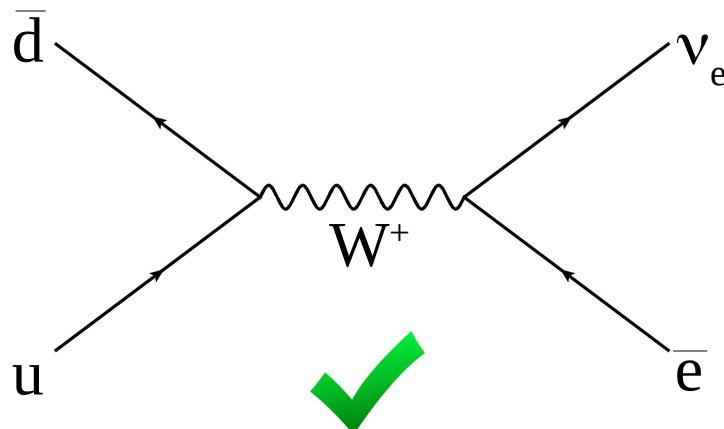
Les diagrammes de Feynman

Les règles du jeu :

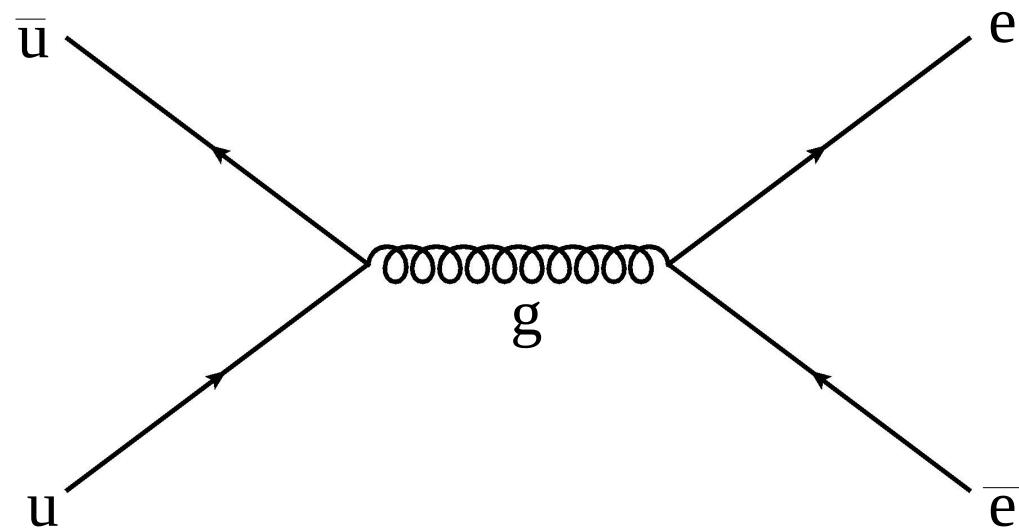
4. Les diagrammes doivent respecter toutes les lois de conservations :

- ✓ Énergie et impulsion
- ✓ Charge électrique
- ✓ Autres nombres quantiques conservés...

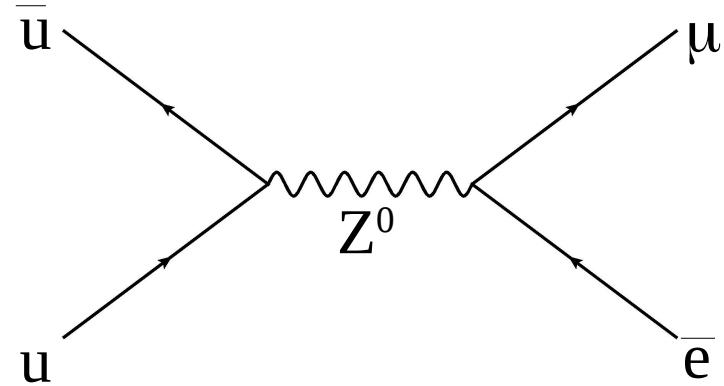
Par exemple : les flèches qui « entrent » doivent « sortir »



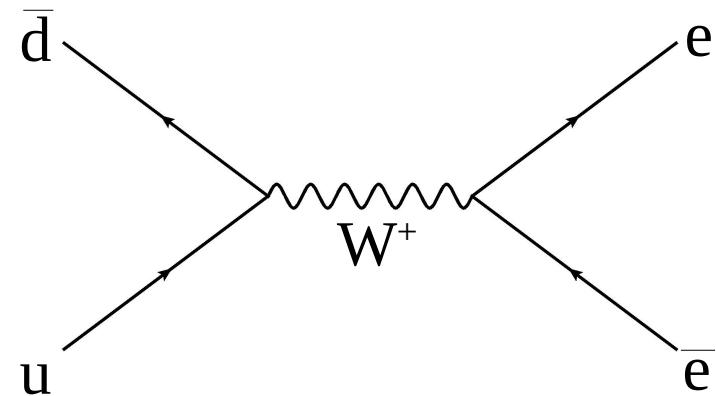
Est-ce que ce diagramme est possible ?



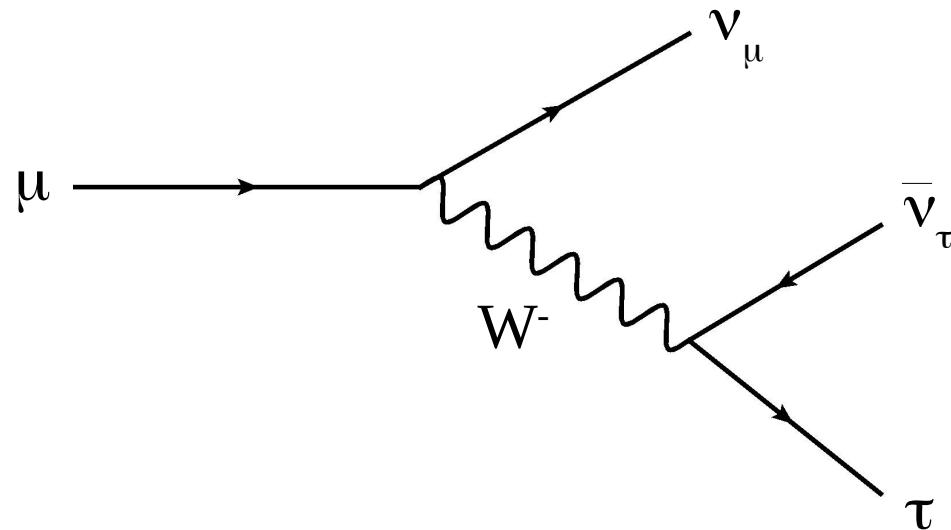
Est-ce que ce diagramme est possible ?



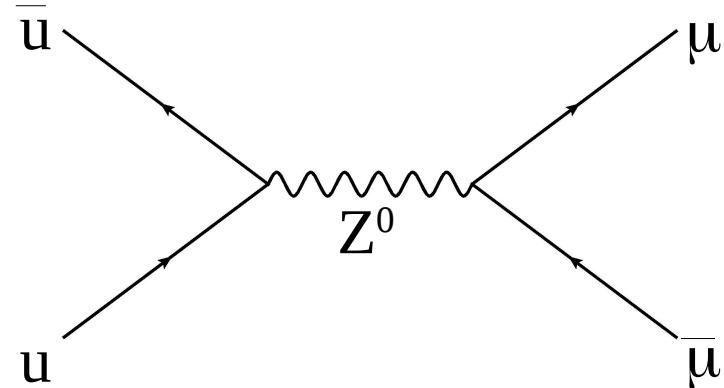
Est-ce que ce diagramme est possible ?



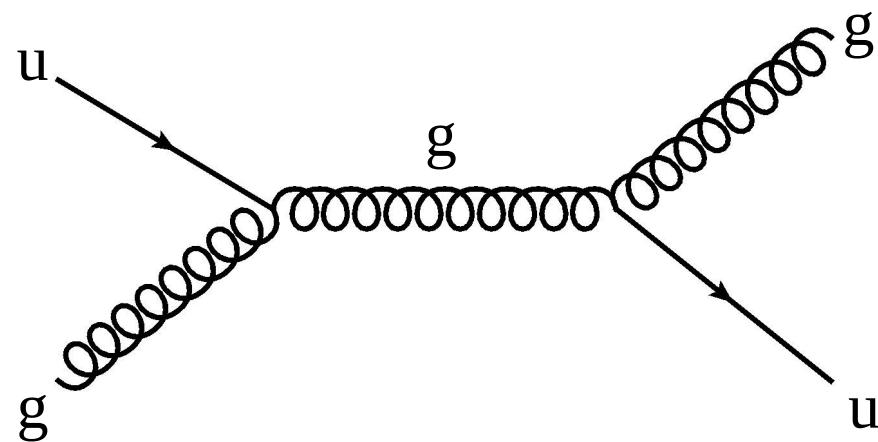
Est-ce que ce diagramme est possible ?



Est-ce que ce diagramme est possible ?

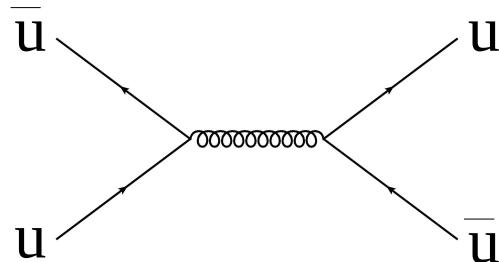


Est-ce que ce diagramme est possible ?

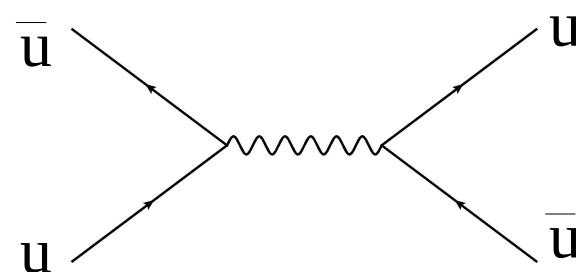


Les diagrammes de Feynman

- Les diagrammes sont en fait des outils de calculs pour les physiciens des particules
- Tout dépendant des particules et du nombre et de la nature des vertex impliqués, chaque diagramme est associé à une probabilité d'interaction



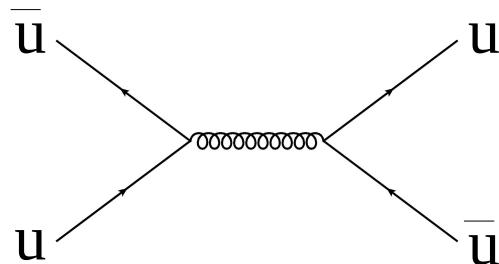
Plus probable



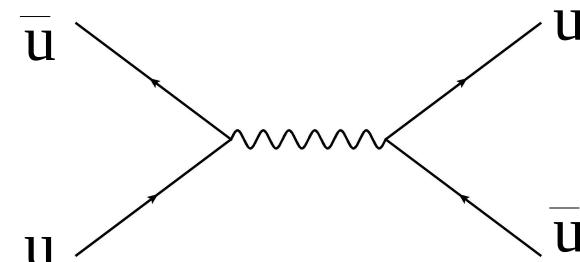
Moins probable

Les diagrammes de Feynman

- Les diagrammes sont en fait des outils de calculs pour les physiciens des particules
- Tout dépendant des particules et du nombre et de la nature des vertex impliqués, chaque diagramme est associé à une probabilité d'interaction

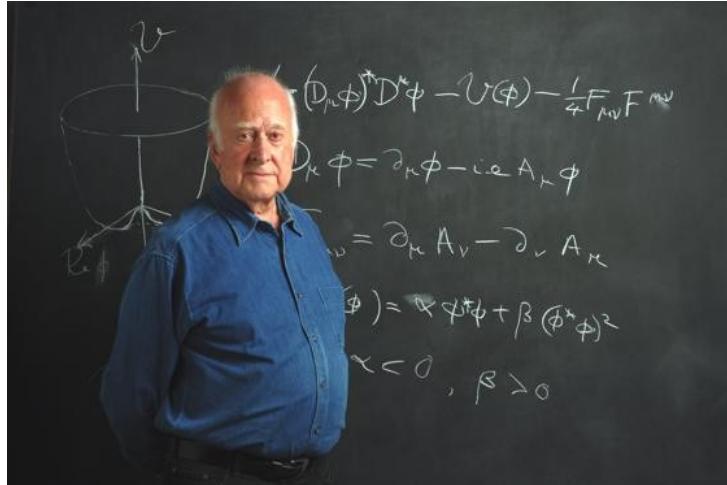


Plus probable



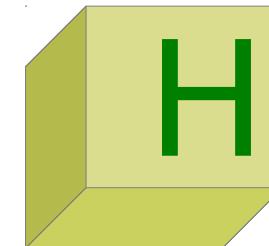
Moins probable

- Plusieurs diagrammes peuvent contribuer à un même phénomène, on doit alors faire la somme de leur contribution
- Tout diagramme qui n'est pas interdit est « obligatoire » !



Le boson de Higgs : responsable de la masse

Peter Higgs



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 prédictée par la théorie.

Le boson de Higgs

En 1964, plusieurs théoriciens proposent un mécanisme pour expliquer comment les particules peuvent acquérir une masse.



Tom Kibble, Gerald Guralnik, Carl Hagen, François Englert, Robert Brout et Peter Higgs

*Boson de Kibble-Guralnik-Hagen-Englert-Brout-Higgs, c'est long à dire.
Mécanisme de Higgs est resté, ou encore mécanisme BEH.*

Puis, le 4 juillet 2012...

The collage includes the following elements:

- EL PAÍS**: Headline "Hallada ‘la más sólida evidencia’ de la existencia del bosón de Higgs".
- INTERNATIONAL MASTERCLASSES**: Logo with the text "hands on particle physics".
- THE INDEPENDENT**: Headline "EUREKA".
- LE MONDE**: Headline "Le boson de Higgs découvert avec 99,999 % de certitude".
- SVENSKA DAGBLADET**: Headline "Boson de Higgs ger nya hopp om vår existens".
- PHOTOGRAPHY**: A large image of a lecture hall at CERN where the discovery was announced.
- NEWSPAPERS**: Headlines from various international newspapers including *El País*, *The Independent*, *Le Monde*, and *Svenska Dagbladet*.
- ARTICLES**: Various articles and infographics related to the Higgs boson discovery.

Découverte !

- Le 4 juillet 2012, le CERN annonce, lors d'une conférence avoir découvert un nouveau boson
- Ce boson aurait une masse d'environ $125 \text{ GeV}/c^2$
- Jusqu'à présent, tout porte à croire qu'il s'agit bien du boson de Higgs
- Des études complémentaires sont en cours pour déterminer si cette particule possède l'ensemble des caractéristiques prévues pour le boson de Higgs

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 !

Pourquoi est-ce important ?

Qu'est-ce que le
Higgs va changer
dans ma vie ?

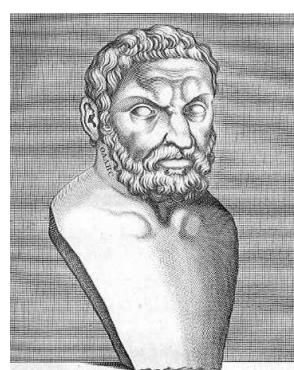
Fort probablement
absolument rien

Ce qui différencie les humains de la plupart des autres espèces...

- Pas trop poilu
(et encore, ça dépend!)
- Pouce opposable
(comme les grands singes)
- Gros cerveau
 - (et les éléphants ?)
- Communication complexe
 - (des chimpanzés ont appris en partie le langage des signes)



S'ils en ont la chance, les humains donnent de la valeur à des activités ou à des connaissances (les arts par exemple, mais aussi la recherche fondamentale, ...) qui ne sont pas du tout reliées au besoin de survie.



Thalès de Milet



Applications



Recherche appliquée

Problèmes spécifiques

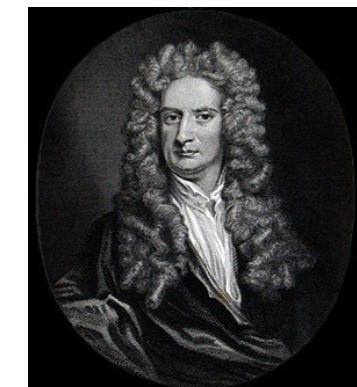
Recherche générale

Mise en commun des savoirs, amélioration méthodes

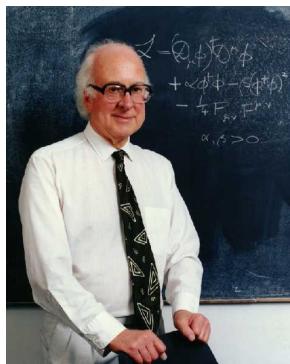
Recherche fondamentale

Outils, connaissances de base

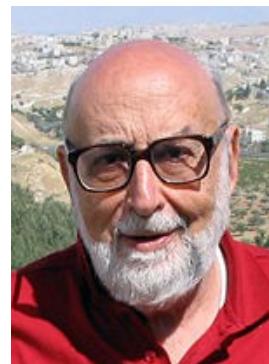
Le boson de



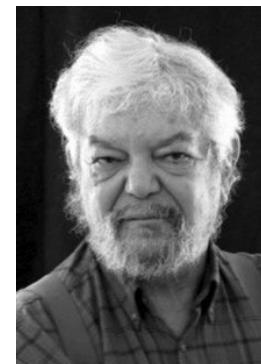
Sir Isaac Newton



Peter Higgs



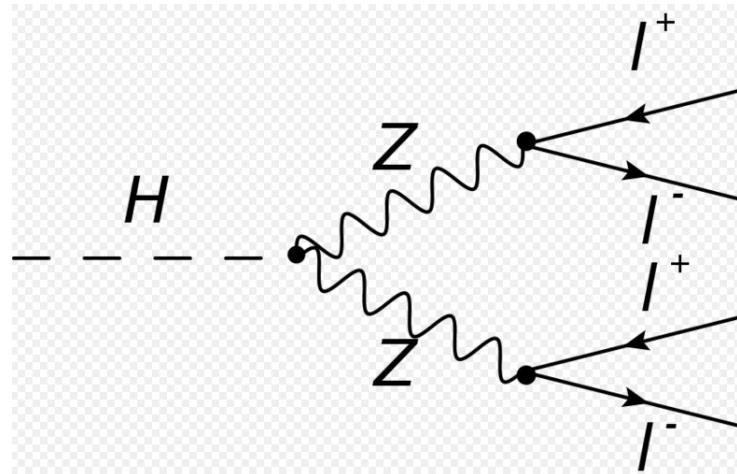
François Englert



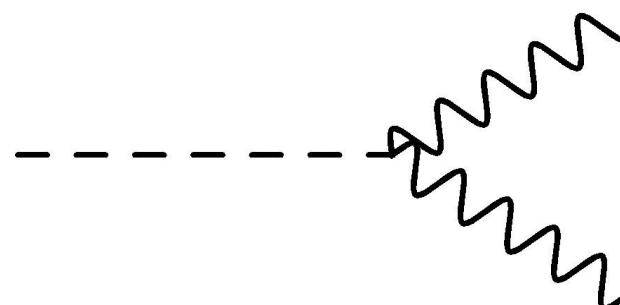
Robert Brout

Le boson de Higgs

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

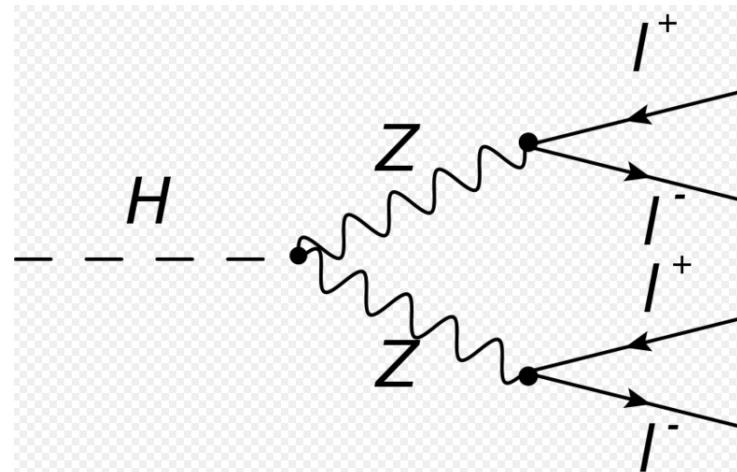


- Ou en 2 photons ... ?

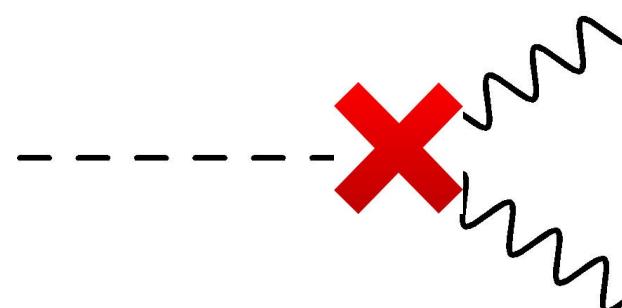


Le boson de Higgs

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

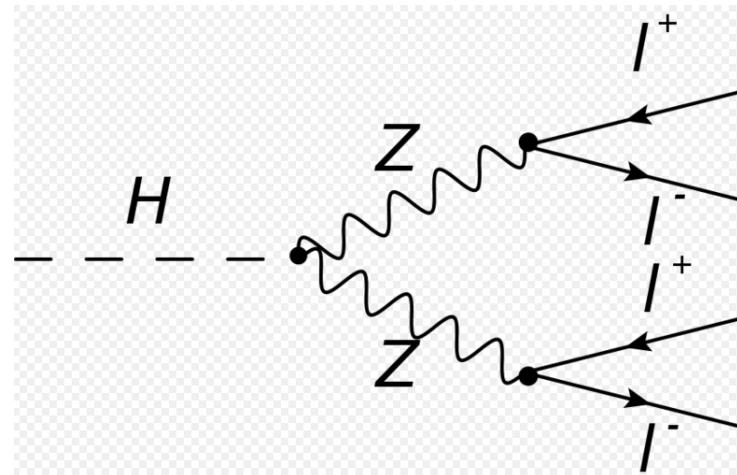


- Ou en 2 photons ... ?

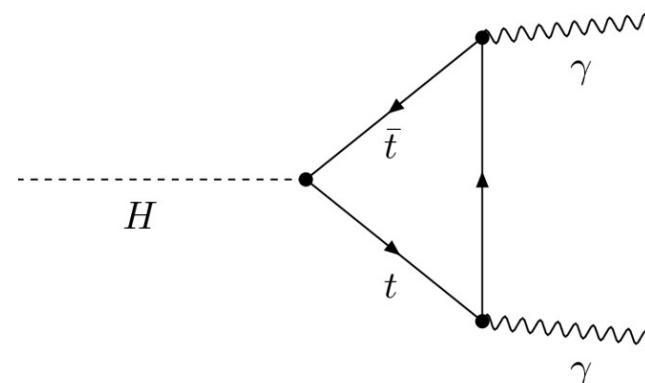


Le boson de Higgs

- 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_a^\nu - \partial_\nu G_a^\mu) (\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_q Z_\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}_\ell \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_\ell W_\mu^+ + \bar{\psi}_\ell \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_\ell W_\mu^- \\
& + \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_{\substack{q=u,c,t \\ 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_q W_\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_q A_\mu - \frac{1}{3} \sum_{q'=d,s,b} \bar{\psi}_{q'} \gamma^\mu \psi_{q'} A_\mu \right) \\
& + g_s \left(\sum_{\substack{j \\ q=u,c,t}} \sum_{a=1}^8 \bar{\psi}_j \gamma^\mu \psi_q G_\mu^a T_{a,j} + \sum_{\substack{j \\ q'=d,s,b}} \sum_{a=1}^8 \bar{\psi}_{q,j} \gamma^\mu \psi_{q'} G_\mu^a T_{a,j} \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_q h - \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^{+\mu} A^\nu - \partial_\mu A_\nu W^{-\nu} W^{+\mu} \\
& \quad - \partial_\mu W_\nu^+ W^{-\mu} A^\nu - \partial_\mu W_\nu^- W^{+\nu} A^\mu] \\
& + 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^{+\mu} Z^\nu - \partial_\mu Z_\nu W^{-\nu} W^{+\mu} \\
& \quad - \partial_\mu W_\nu^+ W^{-\mu} Z^\nu - \partial_\mu W_\nu^- W^{+\nu} Z^\mu] + \frac{g^2 v}{2} W_\mu^+ W^{-\mu} h + \frac{g^2 v}{4 \cos^2 \theta_W} Z_\mu Z^\mu h - \lambda v h^3 \\
& + g_{em}^2 [W_\nu^+ W^{-\mu} A_\nu A^\mu - 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 [2 W_\mu^+ W^{-\nu} Z_\nu A^\nu - W_\mu^+ W^{-\nu} A_\nu Z^\mu - W_\mu^+ W^{-\nu} A^\nu 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^{a\mu}) G^{\mu b} G^{\nu c} - \frac{g_s^2}{4} \sum_{\substack{a,b,c \\ d,e,f}} f^{abc} f^{ade} G_\mu^b G_\nu^c G^{\mu d} G^{\nu e}
\end{aligned}$$

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

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

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 !!!**

