

Un peu de vocabulaire (1)

Et quelques digressions...

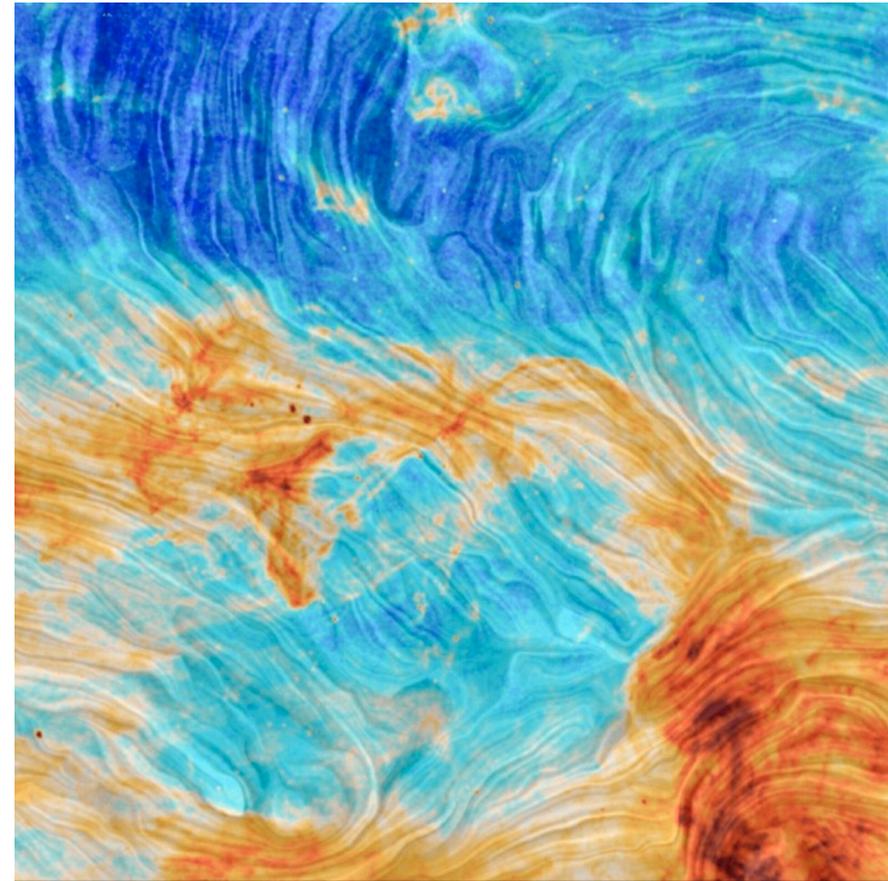
Mécanique quantique et champs

Notions utilisées :

1. Introduction
- 2-3. Structure de la matière
4. Les ondes
7. Mécanique quantique

Pour une meilleure compréhension,
certaines explications pourront être
légèrement simplifiées/tronquées

Images : Wikipédia sauf mention contraire



Couleurs : émission thermique de la poussière de la Voie Lactée
Reliefs : champ magnétique galactique

Variables continues / discrètes

- Variables **continues** :

- Peuvent prendre **n'importe quelle valeur** dans un certain intervalle – **toujours associées à une unité**
- Exemples :
 - La durée d'un phénomène (s)
 - La taille, la masse d'une personne (m, kg)
 - La vitesse d'une voiture (m.s^{-1})

- Variables **discrètes** :

- Ne peuvent prendre que **certaines valeurs**
- Exemples :
 - Nombre de personnes dans une salle (entier)
 - Vitesse **régulée** d'une voiture ($\pm 1\text{km/h}$) (pas la vitesse !)
 - Prix d'un litre de carburant (millième d'euro)



Robert Wadlow et son père

Définitions (Le Robert)

- **Quantum, quanta :**

1. (Droit) Montant (d'une amende, d'une pension, d'une part). Durée (d'une peine d'emprisonnement)

2. (Physique) Quantum d'action, d'énergie : **la plus petite quantité.**

Théorie des quanta, qui suppose que la lumière, l'énergie se manifestent par petites quantités discontinues (particules)

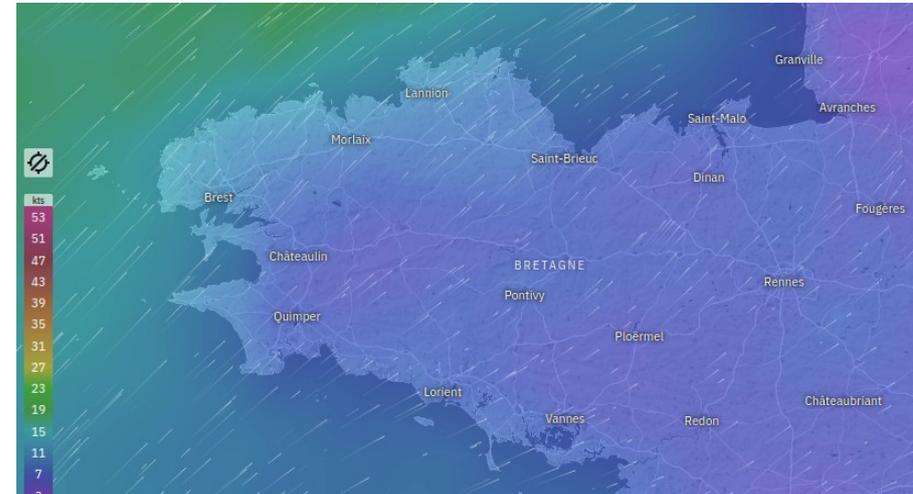
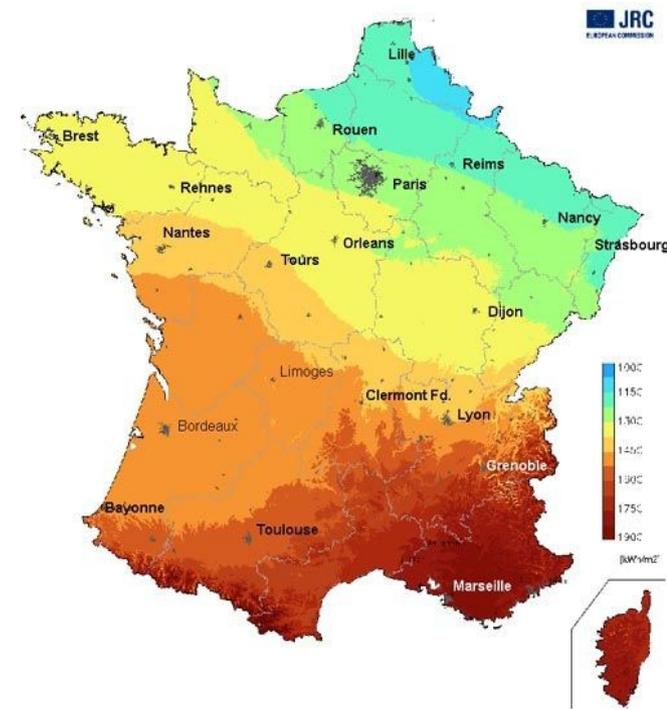
Les champs

- Champ = valeur d'une grandeur physique en tout point de l'espace(-temps)
- Plusieurs types de champs :
 - Un champ **scalaire** associe un **nombre** à tout point d'un espace : température, pression, fonction d'onde
 - Un champ **vectoriel** associe un **vecteur** à tout point d'un espace : vitesse (ex : vent), champ EM, champ gravitationnel classique
 - champ **tensoriel d'ordre ≥ 2** (notamment en **relativité générale**)
- Exemple du champ gravitationnel : le corps de masse M modifie les propriétés locales de l'espace en créant en chaque point un champ gravitationnel

$$\vec{G} = -\frac{GM}{r^2} \vec{e}_r$$

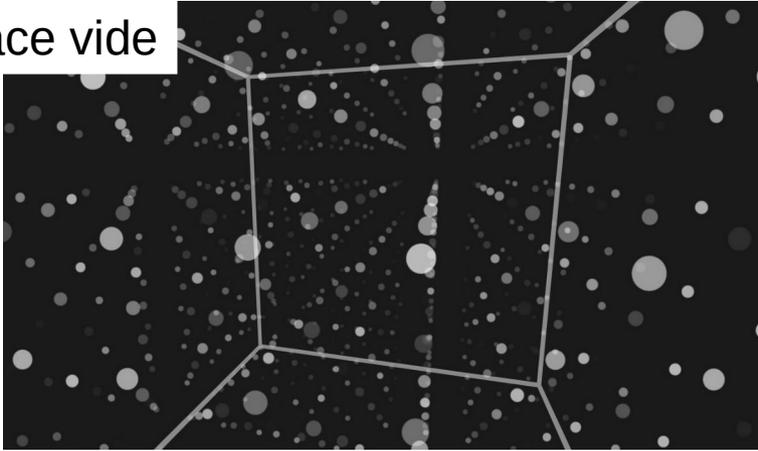
- Dans ce champ, une masse m subit une force

$$\vec{F} = m \vec{G} = -\frac{GMm}{r^2} \vec{e}_r$$

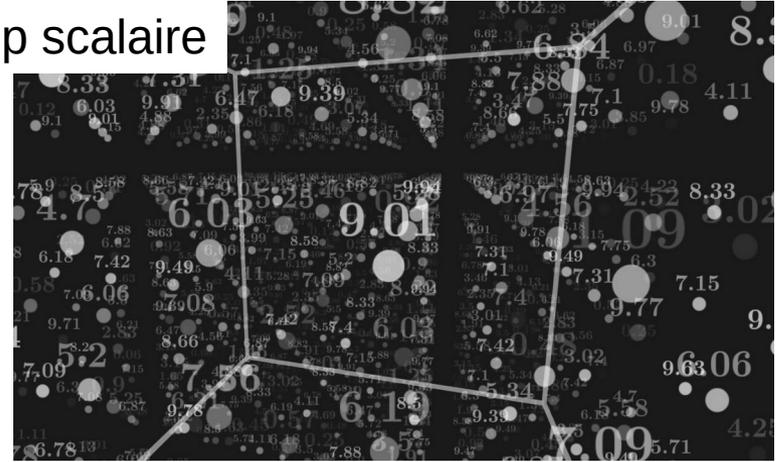


Types de champs

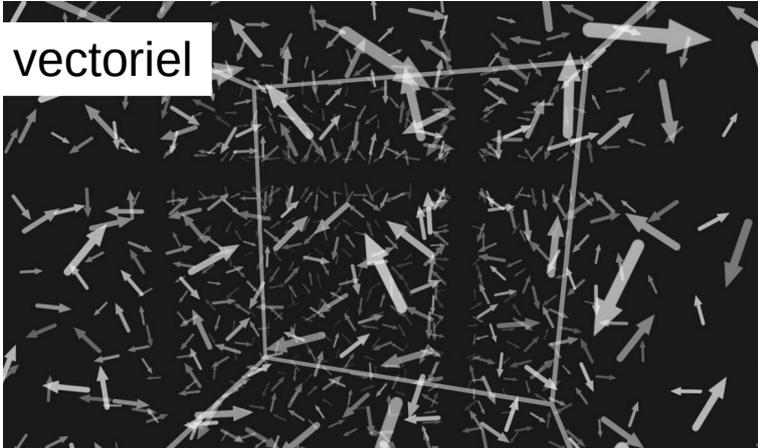
Espace vide



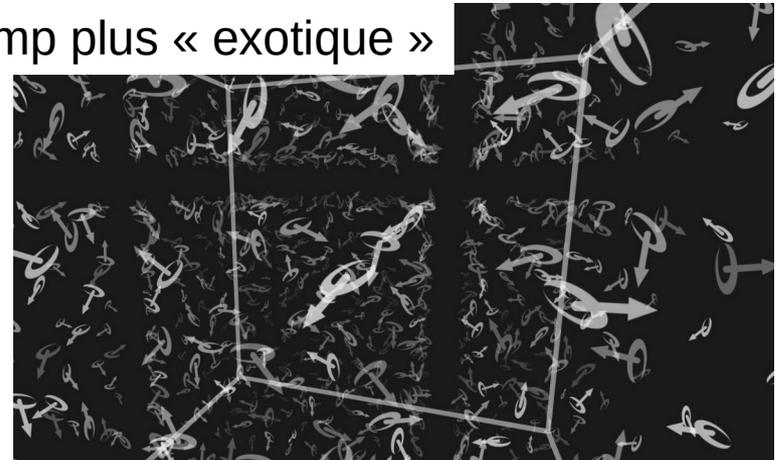
Champ scalaire



Champ vectoriel

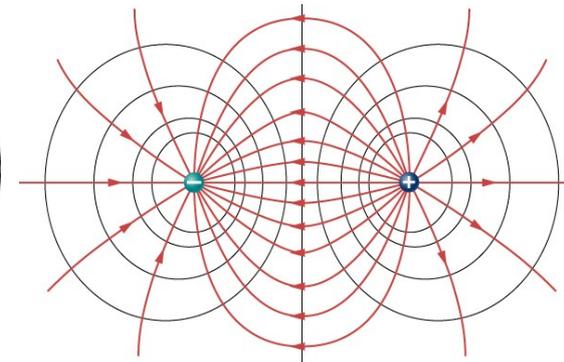
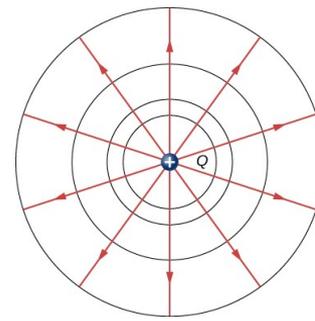


Champ plus « exotique »

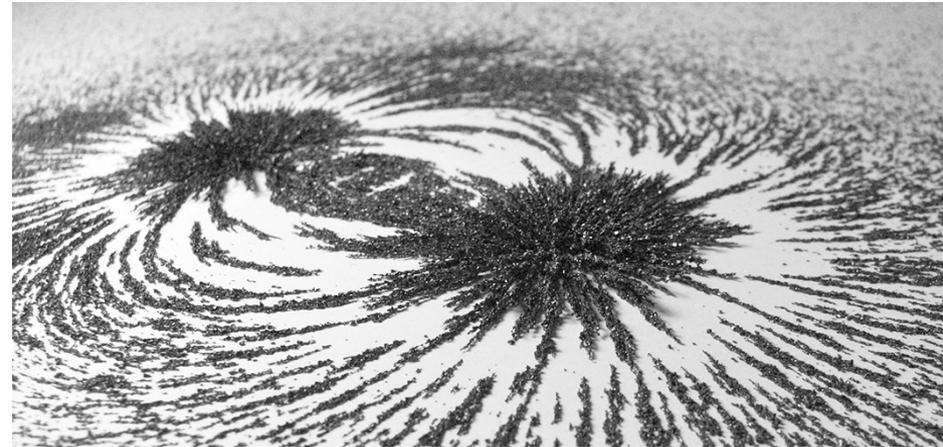


Propriétés des champs

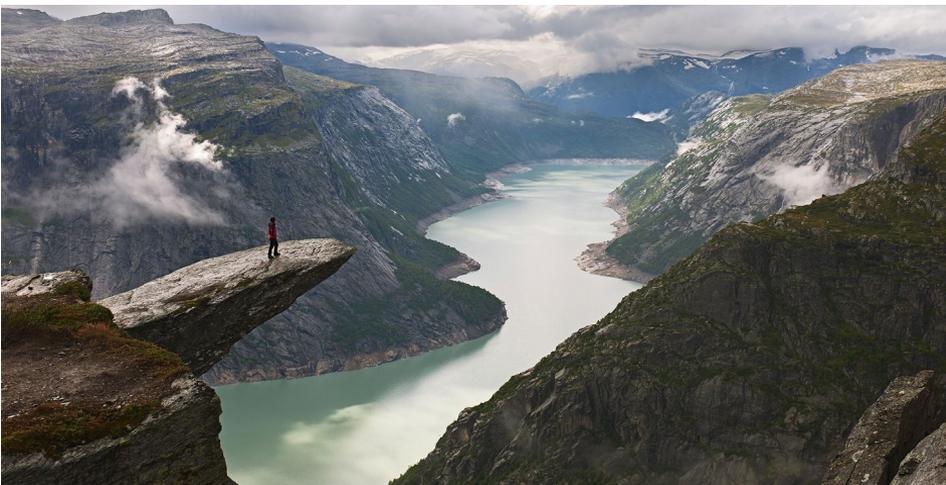
- **Lignes de champ** : courbes orientées représentant les caractéristiques d'un champ vectoriel (**direction**, **orientation** et **intensité**)
 - En tout point **tangentes** au **vecteur champ** → visualisation du **trajet** d'un objet sensible à ce champ
- Certains champs dérivent d'un « **potentiel** »
 - Ex : électrique, gravitationnel, ...
 - Une particule dans un potentiel auquel elle est sensible a une **énergie potentielle**



Lignes de champs et **lignes (surfaces) équipotentielles** d'une charge et d'un dipôle électriques



Lignes de champs d'un aimant (limaille de fer)



[https://query.libretexts.org/Francais/Physique_universitaire_II_-_Thermodynamique%2C_%C3%A9lectricit%C3%A9_et_magn%C3%A9tisme_\(OpenStax\)/07%3A_Potentiel_%C3%A9lectrique/7.06%3A_Surfaces_et_conducteurs_%C3%A9quipotentiels](https://query.libretexts.org/Francais/Physique_universitaire_II_-_Thermodynamique%2C_%C3%A9lectricit%C3%A9_et_magn%C3%A9tisme_(OpenStax)/07%3A_Potentiel_%C3%A9lectrique/7.06%3A_Surfaces_et_conducteurs_%C3%A9quipotentiels)
http://res.cloudinary.com/simpleview/image/upload/v1449651681/clients/norway/Trolltunga-norway-must-see-nature-attractions-2-1_3c2d1d6d-df0f-40f4-89ea-ea0abe488b13.jpg
Windell Oskay, <https://www.flickr.com/photos/oskay/4581194252/>

Théorie quantique des champs

- Décrit l'**évolution** des particules (en particulier **apparition/disparition**) lors des interactions
 - Inclut les **champs** et la **relativité restreinte** dans le **formalisme quantique**
 - Les champs ont des amplitudes d'oscillations minimales/**quantifiées**
 - particules élémentaires = « quanta de champ » (**dualité onde-corpuscule incluse**)
 - **Attention sur les champs et leurs interactions plutôt que sur les particules = nouveau paradigme**
- **Électrodynamique quantique** (champ électromagnétique)
 - 1927 : article fondateur de Dirac : "La théorie quantique de l'émission et de l'absorption du rayonnement"
 - Boson vecteur : **photon**, masse nulle, portée infinie PN 1933
- **Théorie électrofaible** (force faible + force EM)
 - Glashow, Salam et Weinberg, années 1960 → PN 1979
 - Boson vecteur : **Z et W[±]**, masse non nulle, portée finie
- **Chromodynamique quantique** (force forte)
 - Gross, Politzer et Wilczek, années 1970 → PN 2004
 - Boson vecteur : **gluon**, masse nulle, portée finie
- **Les champs sont partout, y compris dans le « vide »**

=
« **modèle standard** »

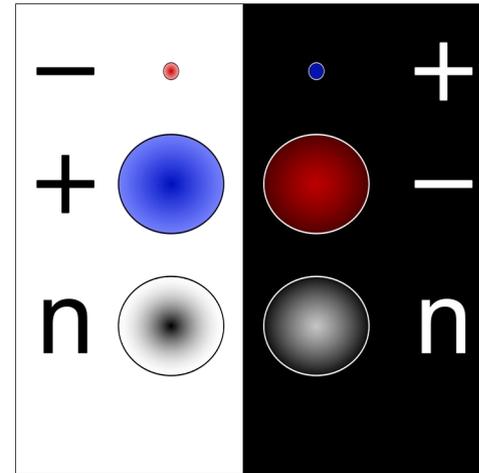
Le « modèle standard »

Ensemble des **particules élémentaires** et des **bosons vecteurs** qui composent toute la matière connue

	<p>masse → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>charge → $2/3$</p> <p>spin → $1/2$</p> <p>u up</p>	<p>$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$</p> <p>$2/3$</p> <p>$1/2$</p> <p>c charm</p>	<p>$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$</p> <p>$2/3$</p> <p>$1/2$</p> <p>t top</p>	<p>0</p> <p>0</p> <p>1</p> <p>g gluon</p>	<p>$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$</p> <p>0</p> <p>0</p> <p>H boson de Higgs</p>
QUARKS	<p>$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>$-1/3$</p> <p>$1/2$</p> <p>d down</p>	<p>$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>$-1/3$</p> <p>$1/2$</p> <p>s strange</p>	<p>$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$</p> <p>$-1/3$</p> <p>$1/2$</p> <p>b bottom</p>	<p>0</p> <p>0</p> <p>1</p> <p>γ photon</p>	
	<p>$0.511 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>-1</p> <p>$1/2$</p> <p>e électron</p>	<p>$105.7 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>-1</p> <p>$1/2$</p> <p>μ muon</p>	<p>$1.777 \text{ GeV}/c^2$</p> <p>-1</p> <p>$1/2$</p> <p>τ tau</p>	<p>$91.2 \text{ GeV}/c^2$</p> <p>0</p> <p>0</p> <p>1</p> <p>Z^0 boson Z^0</p>	BOSONS DE JAUGE
LEPTONS	<p>$< 2.2 \text{ eV}/c^2$</p> <p>0</p> <p>$1/2$</p> <p>ν_e neutrino électronique</p>	<p>$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>0</p> <p>$1/2$</p> <p>ν_μ neutrino muonique</p>	<p>$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>0</p> <p>$1/2$</p> <p>ν_τ neutrino tauique</p>	<p>$80.4 \text{ GeV}/c^2$</p> <p>± 1</p> <p>1</p> <p>W^\pm boson W^\pm</p>	

Ne sont pas représentés :

- Les **antiparticules** des quarks et des leptons (charge opposée)



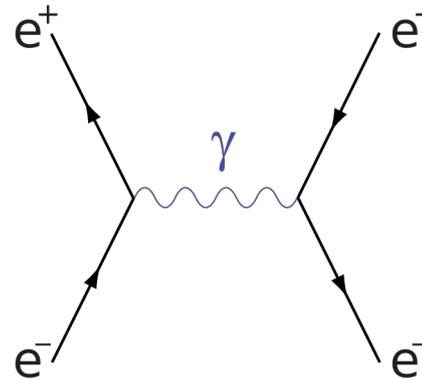
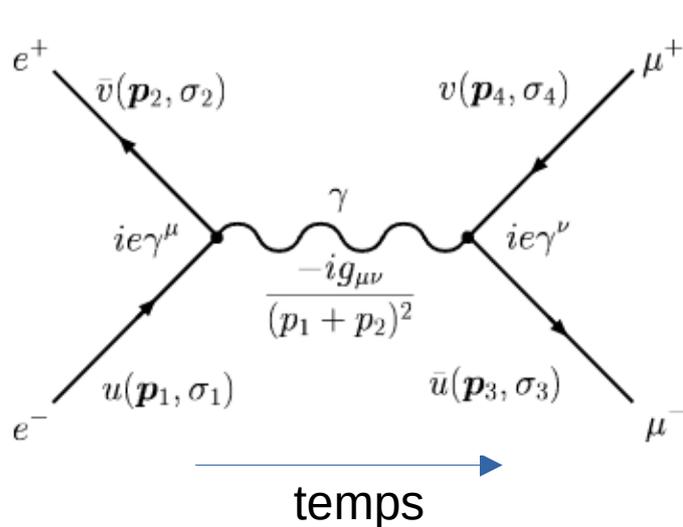
Comparaison de la charge des particules (à gauche) et de celle des antiparticules (à droite) ; avec, de haut en bas : électron et positron, proton et antiproton, neutron et antineutron

- Le **graviton** (postulé)

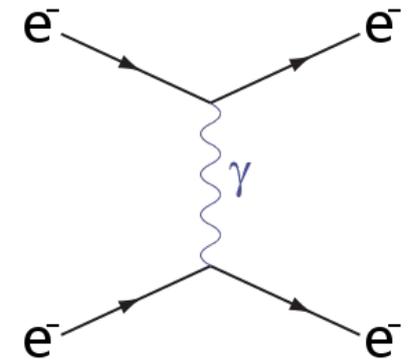
De la matière sans structure interne...

Les diagrammes de Feynman

- **Illustration graphique** de phénomènes physiques / d'interactions entre particules, **y compris créations et annihilations**
- **Lignes** et **vertex** représentent un calcul complexe (\mathbb{C}) permettant de calculer la **probabilité d'occurrence d'un phénomène**
= « **section efficace** »
→ **aspect prédictif, fondement de la science**



Annihilation e^+/e^- puis
création de paire



Diffusion Moller ($2 e^-$)
L'échange d'un photon transfère
de l'énergie-impulsion
(= force EM répulsive)

Illustration (en 2D)

- Mer (infinie) au repos \approx espace vide
- Houle = **excitation du champ**, « perturbation » qui se propage \equiv **particule associée au champ**
- **Champs quantifiés** :
 - Amplitude des vagues **quantifiée** : 1 m, 2 m, 3 m, ... (la hauteur représente le nombre de particules à un endroit)
 - À grande échelle : énergie minimale (**c'est-à-dire sans excitation : vents, courants, ...**) nulle (sauf champ de Higgs)
 - Mais il existe des **fluctuations quantiques à petite échelle** : création de **particules virtuelles** (indétectables mais perceptibles via l'**effet Casimir**), encadrée par le principe d'incertitude de Heisenberg
 - Image classique : la mer semble calme de loin mais petites vaguelettes de près
- **Le vide n'est pas du rien** : il y a toujours les champs et leurs fluctuations !



- **Plusieurs mers pour plusieurs particules fondamentales**
 - Photon = « vague électromagnétique » = excitation du champ électromagnétique
 - Électron = excitation du champ des électrons
 - Quark = excitation du champ des quarks
- **Nous sommes tous composés de vagues (excitations) des mêmes champs quantiques fondamentaux**

Dans un proton

- Officiellement :
 - 3 quarks uud
- Mais un peu plus complexe...
 - « Mer » fluctuante de quarks et d'antiquarks



La réalité perceptible

Excitations of four fields are visible

down quark field

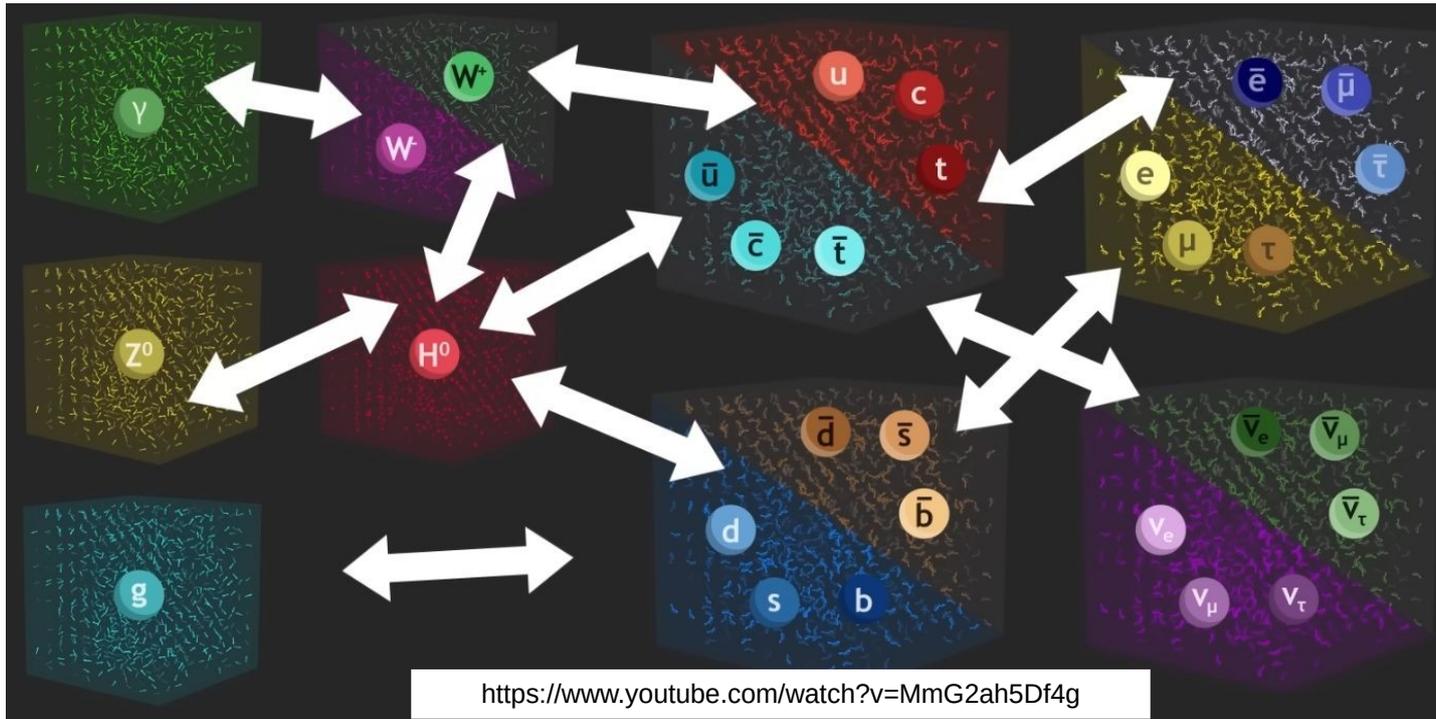
up quark field

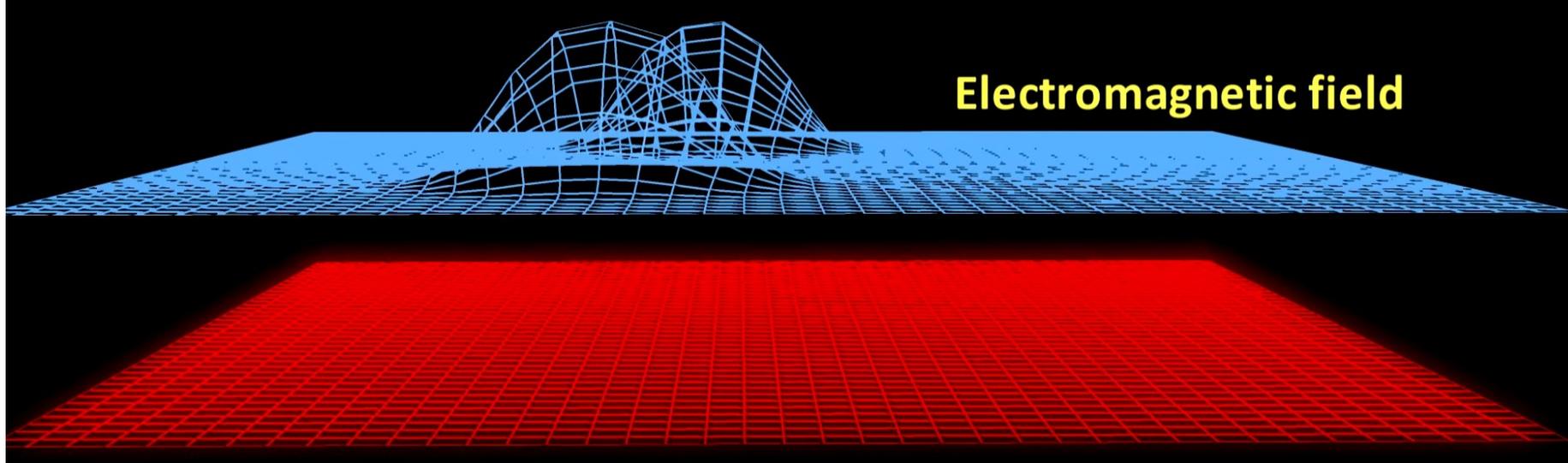
Electron Field

Electromagnetic field

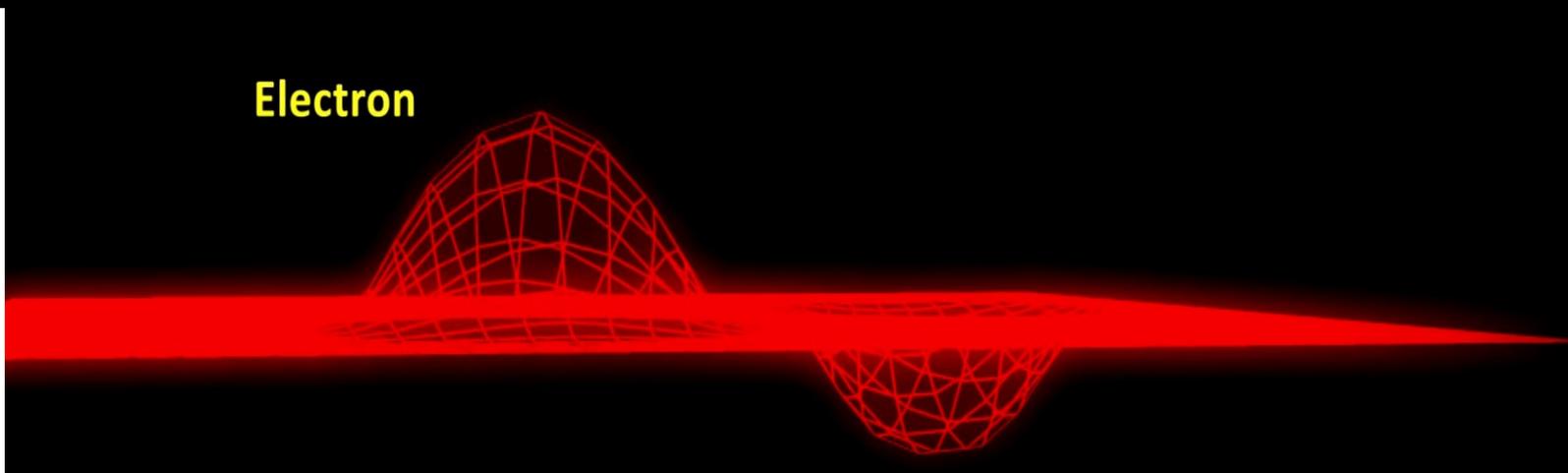
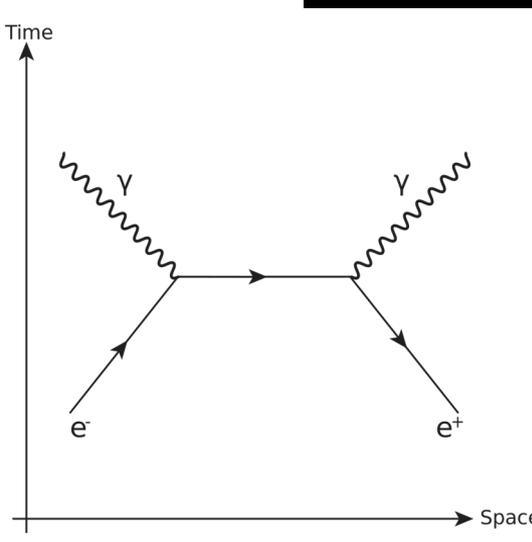
Les champs du modèle standard

- Le modèle standard décrit des **particules de matière (fermions)** et des particules **véhiculant les forces (bosons)**, traitées dans le formalisme des champs : **champ électromagnétique, champs de jauge** et les **champs fermioniques**, ainsi que **champ de Higgs**
- **Chaque type de particule élémentaire a son champ** : 17 champs (+ champ gravitationnel)
- Champs **superposés** et en interaction



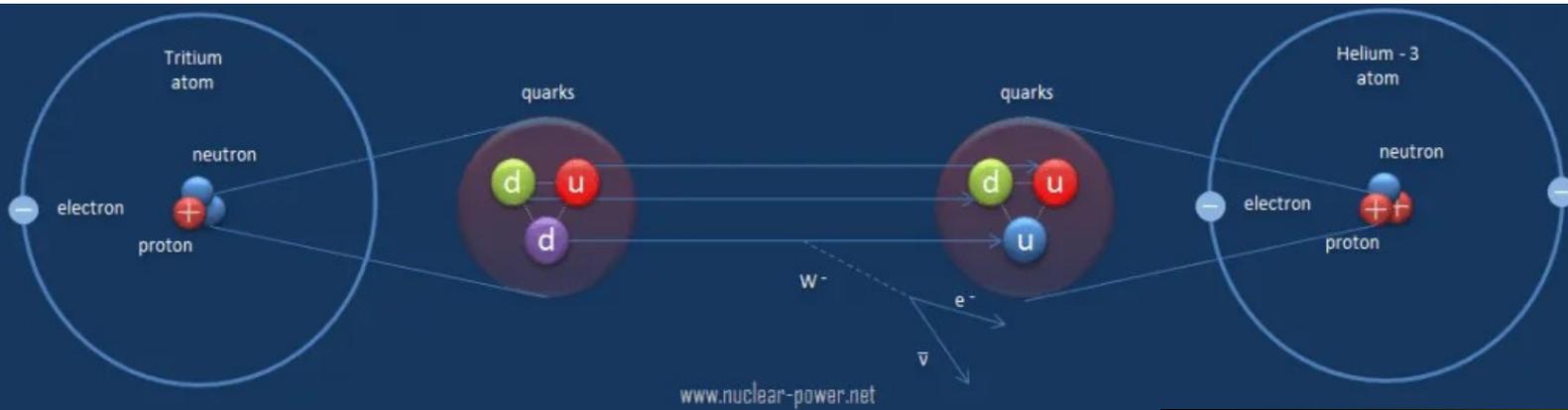


Particles and antiparticles are excitations in the same field

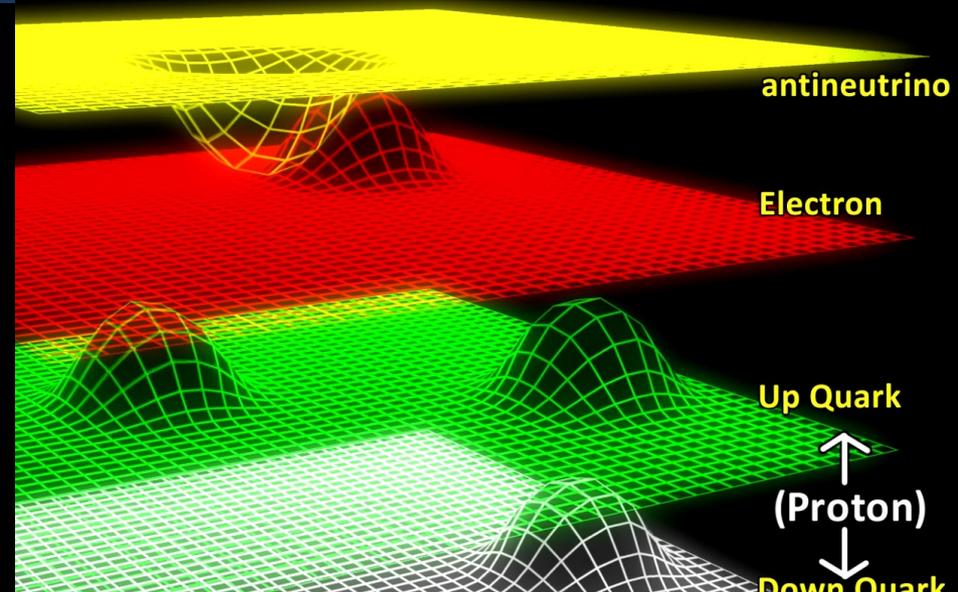
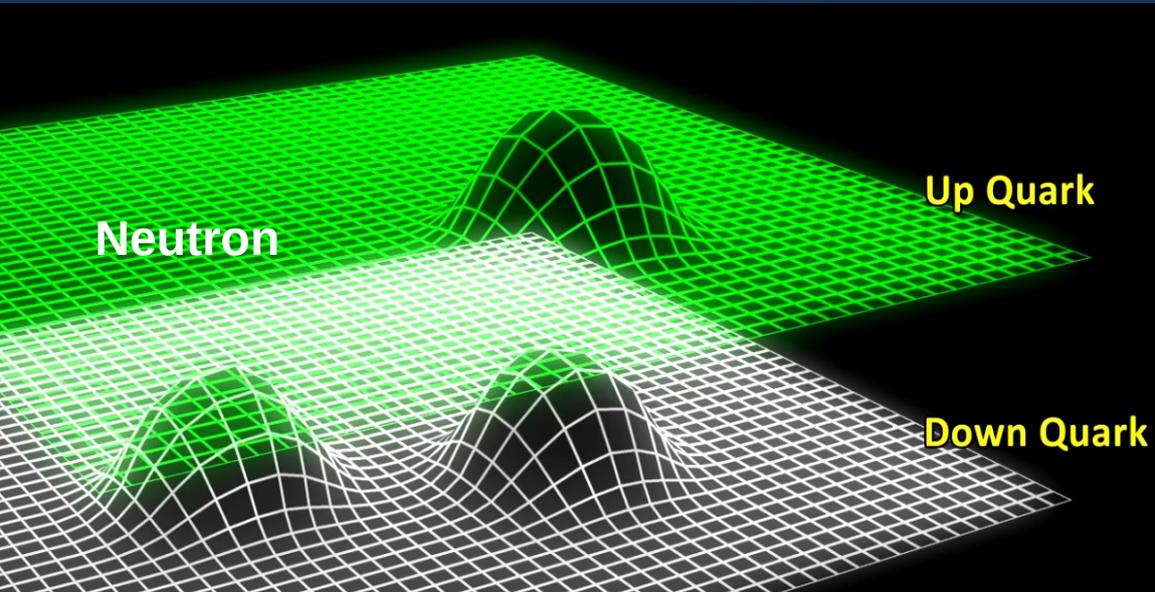


<https://www.youtube.com/watch?v=jlEovwE1oHI>

Autre vision de la radioactivité β^-

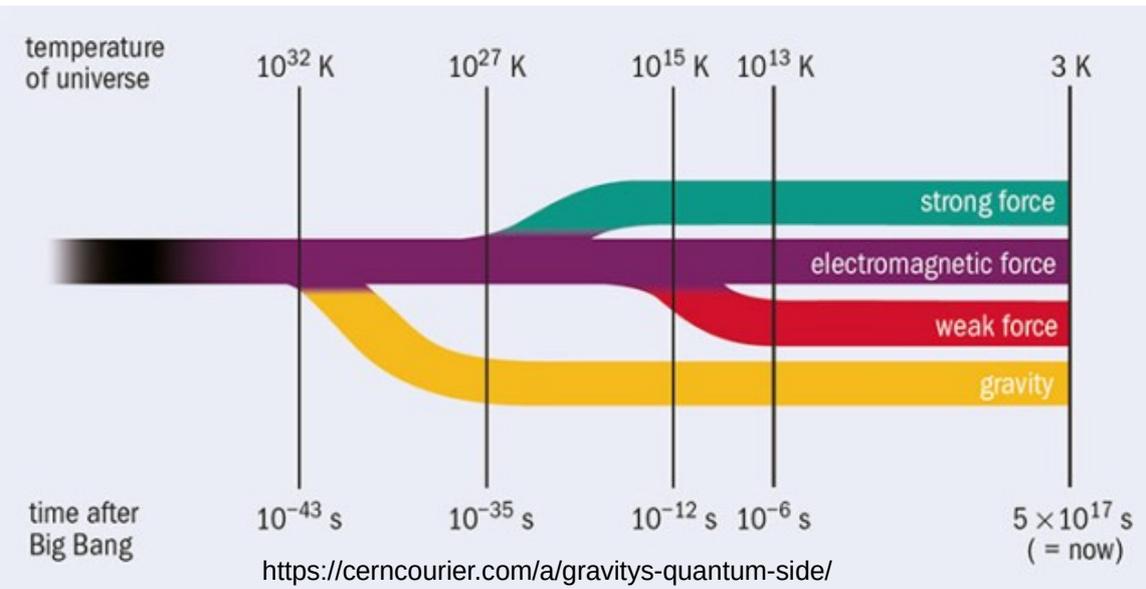


$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$



Le champ de Higgs

- La QED est la théorie **la mieux confirmée expérimentalement** (boson vecteur = photon, $m = 0$)
- Rappel : **but = unifier les forces** → **théorie électrofaible**
- Mais la découverte des bosons vecteurs **massifs** de la force faible (Z & W^\pm) pose un problème dans l'application de la QED, qui suppose des **bosons de masse nulle** !



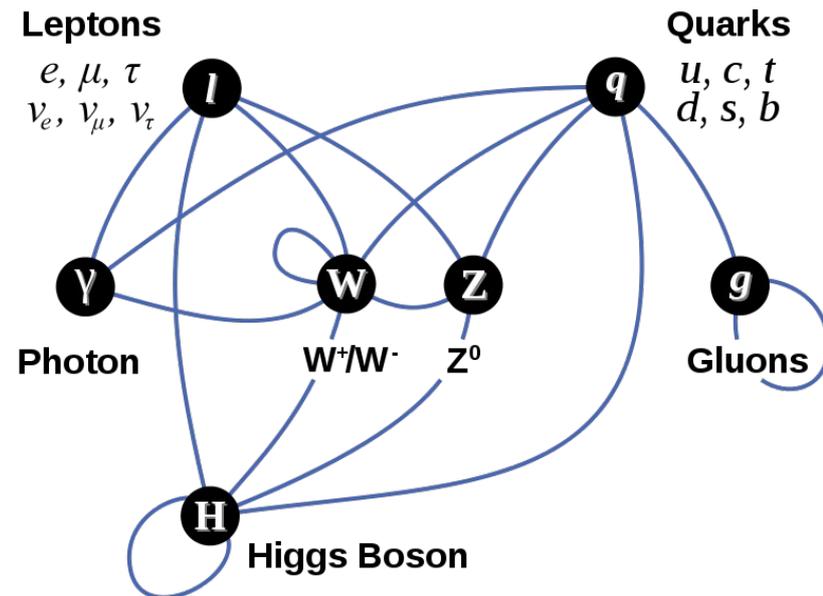
- → hypothèse d'un mécanisme « indépendant » qui confère une masse à ces bosons :

c'est l'interaction avec un « **champ (scalaire (complexe)) de Higgs** » qui donne leur **masse (inertielle)** aux Z & W^\pm (à basse T_p car, à haute T_p , forces unifiées = **brisure de symétrie**)

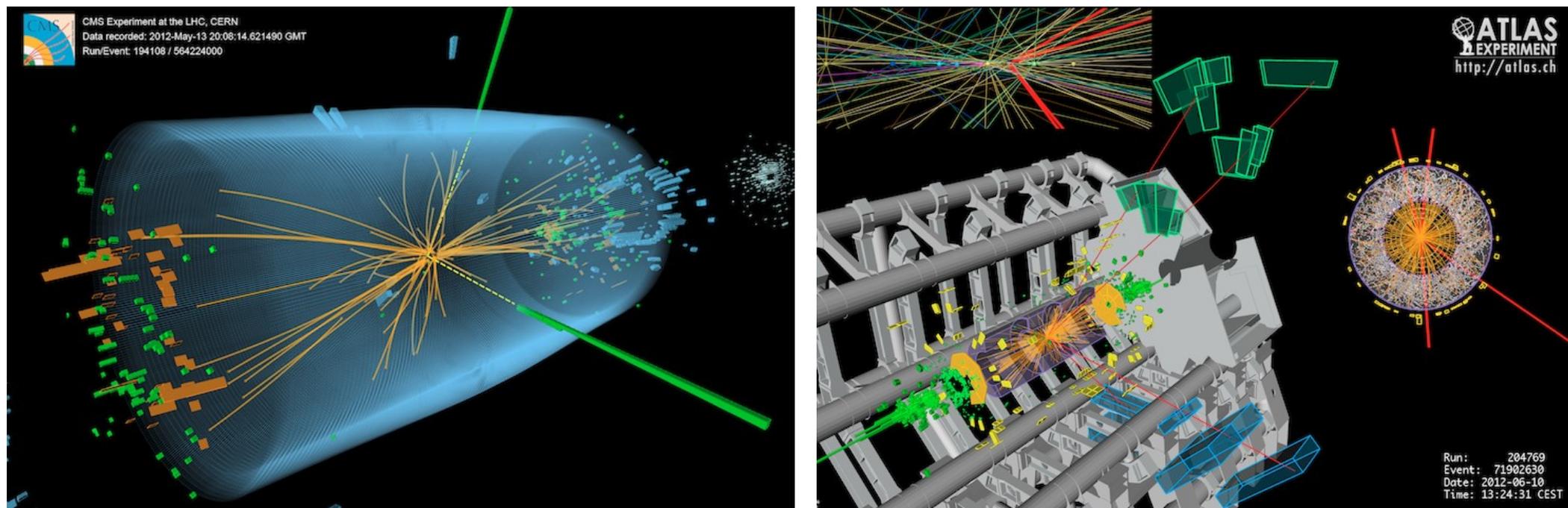
Interactions avec le champ de Higgs

- L'interaction d'une particule avec le **champ de Higgs** entraîne **une résistance à son mouvement**
 - Plus « **couplage** » fort, plus particule « lourde »
 - Photons (et gluons) **n'interagissent pas avec le champ de Higgs** : $m = 0$, $v = c$
- Sans cela, un électron n'aurait **pas de masse**
 - son énergie serait purement sous forme de quantité de mouvement, comme un « photon chargé »
- Illustration sociale : les marches de Cannes sont plus rapides à monter pour un inconnu

https://www.en-vols.com/wp-content/uploads/afmm/2023/03/shutterstock_133963685-1.jpg
<https://depthsofscience.blogspot.com/2012/10/higgs-boson.html>



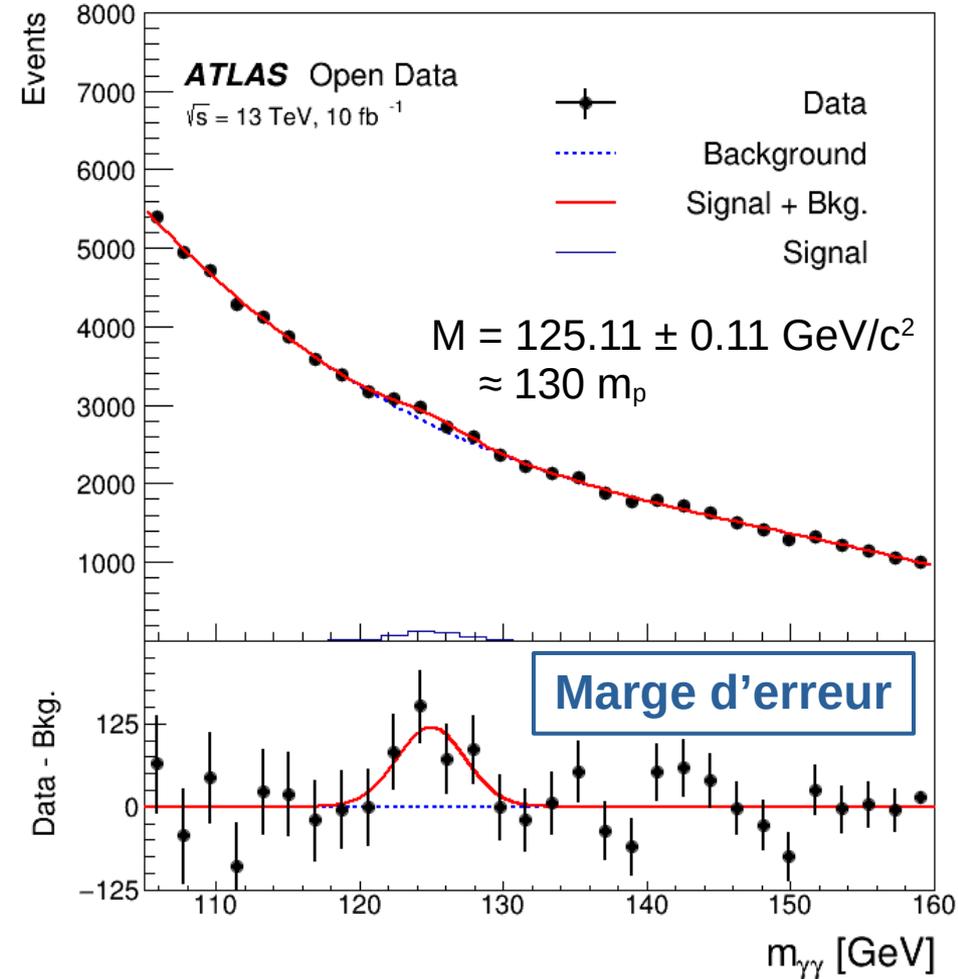
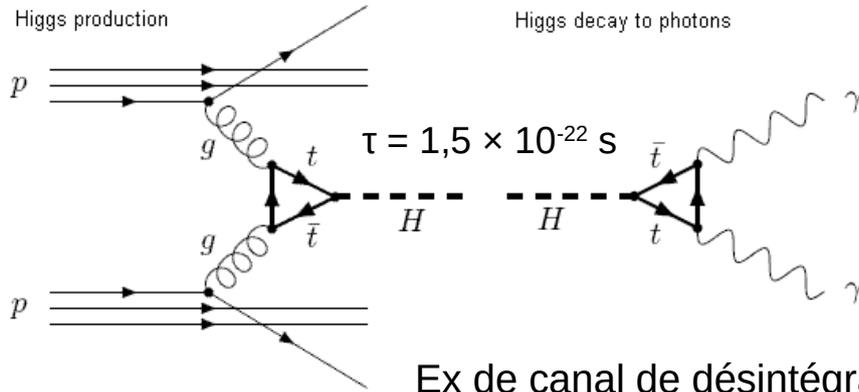
« Higgs en 2 photons & 4 muons »



- Photons = traces **vertes** à g., muons = traces **rouges** à d.
- **Événement « candidat »** : on sait statistiquement \pm combien on en a, mais pas si un événement individuel est « bon »

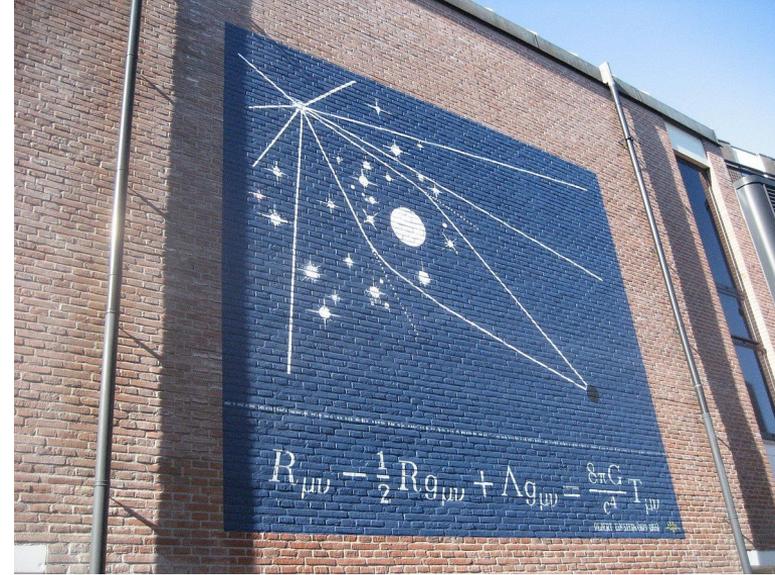
Le boson de Higgs

- Soyons précis... : « Mécanisme de Brout-Englert-Higgs-Hagen-Guralnik-Kibble »
- Qui dit champ dit **quantum de champ** = « **boson de Higgs** »
- Découvert en 2012 au LHC : prix Nobel pour Englert et Higgs en 2013



L'équation de champ d'Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



Cette équation de 1915 décrit comment la courbure de l'espace-temps (partie de gauche) est reliée au contenu masse/énergie de l'Univers (partie de droite)
→ **champ de gravitation**

On n'arrive pas à **coupler le champ gravitationnel et le champ des particules**
= **quantifier la gravité**

La **théorie des cordes** et la **gravité quantique à boucles** sont des candidates

Champ morphogénétique

- Ou « champ morphique », « champ de forme »
- Notion introduite dans les années 1920
- Champ hypothétique d'information / « énergie » qui influencerait les êtres vivants
 - jouerait un rôle dans la morphogénèse (lois déterminant la forme et la structure des organismes)
 - Héritage des habitudes de l'espèce
 - R. Sheldrake : influence sur le comportement des systèmes physiques (augmentation de la vitesse de cristallisation), et même sur les constantes fondamentales – références ?
- Pas mesuré
- Connexe des notions d'**inconscient collectif** et d'**égrégoire**, la **théorie du centième singe** ainsi que d'**épigénétique**
- S'oppose au matérialisme

Pour aller plus loin

- <https://www.youtube.com/watch?v=MmG2ah5Df4g>
- <https://www.youtube.com/watch?v=UoLgIpmOr0>
- <https://www.youtube.com/watch?v=jIEovwE1oHI>
- <https://www.youtube.com/watch?v=ATcrrzJFtBY>
- <https://www.youtube.com/watch?v=R7dsACYTTXE>
- <https://scienceetonnante.com/2011/11/21/le-boson-de-higgs-explique-a-ma-fille/>
- Pour aller beaucoup plus loin :
https://www-fourier.ujf-grenoble.fr/%7Efaure/enseignement/meca_q/cours.pdf