

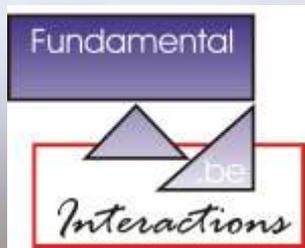
D'un Boson à l'Univers...



- partie 1: Le meilleur des modèles... possibles:
entre Symétries et Empirisme *Jean-Marie Frère*
- partie 2: Le point, après plus de 50 ans de recherches
Barbara Clerbaux

Le meilleur des modèles...possibles:

entre Symétries et Empirisme



- **Mais qu'est-ce qu'une loi physique?**
- Les interactions fondamentaleset les autres
- Le domaine de validité, mais au-delà?
- Les particules, nos outils, et de nouvelles interactions fondamentales
- Y a-t-il des interactions faibles ?
- Le virage théorique – les symétries
- La brisure de symétrie et les scalaires :
un mal nécessaire ou un indice ?
- La violation de la parité gauche-droite et les limitations de l'approche purement théorique ...le dernier mot à l'empirisme!
- De nouvelles interactions « faiblardes » ?

- La défaite de l'antimatière
- Les problèmes qui subsistent...

Parlons-nous de lois:

- pré-existantes, (à deviner)
ou
- construites (inventées) par et pour
notre usage ?



Un exemple caricatural
La règle et l'élastique

Indissociable des lois physiques, le choix d'un système de mesure.

A priori, nous ne savons pas quel est le meilleur objet à choisir comme unité de longueur (on ne peut le faire qu'en comparant...à un autre étalon de longueur) ...Dans le désert ou en Belgique, un morceau de métal ou un morceau de bois ont des comportements opposés...

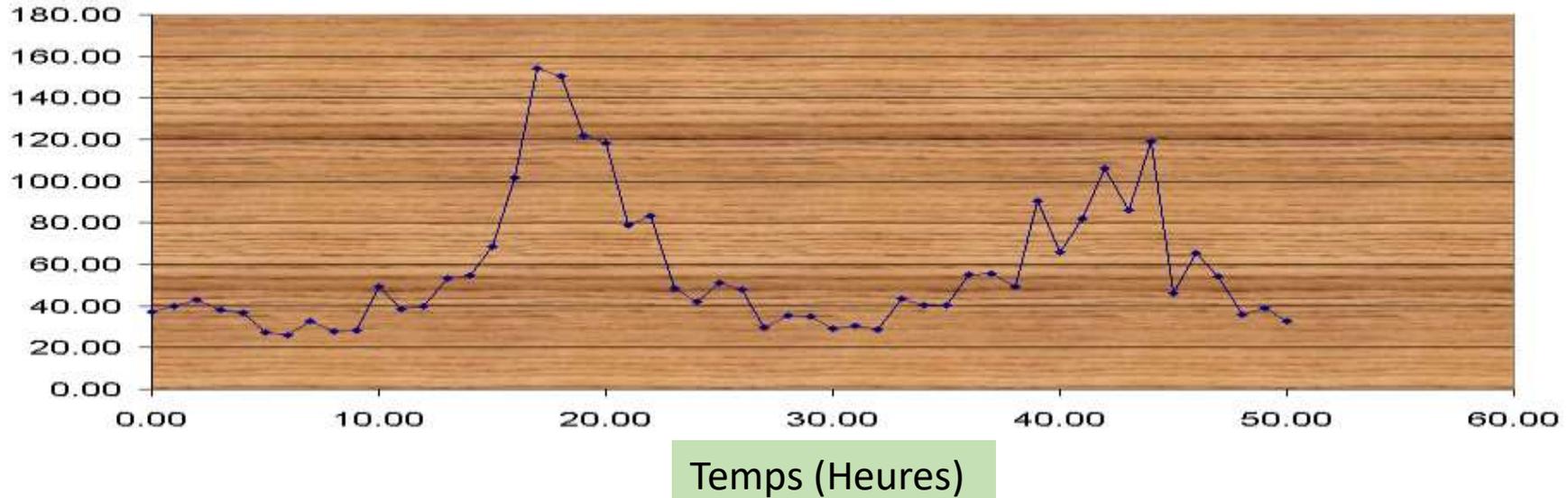
A titre d'exercice, prenons
un objet un peu improbable:
Une bande élastique (« un élastique »)

[EL] = [elastique]

Mesure de la longueur d'une table (pendant > 50 heures ..)

Longueur de la table [EL]

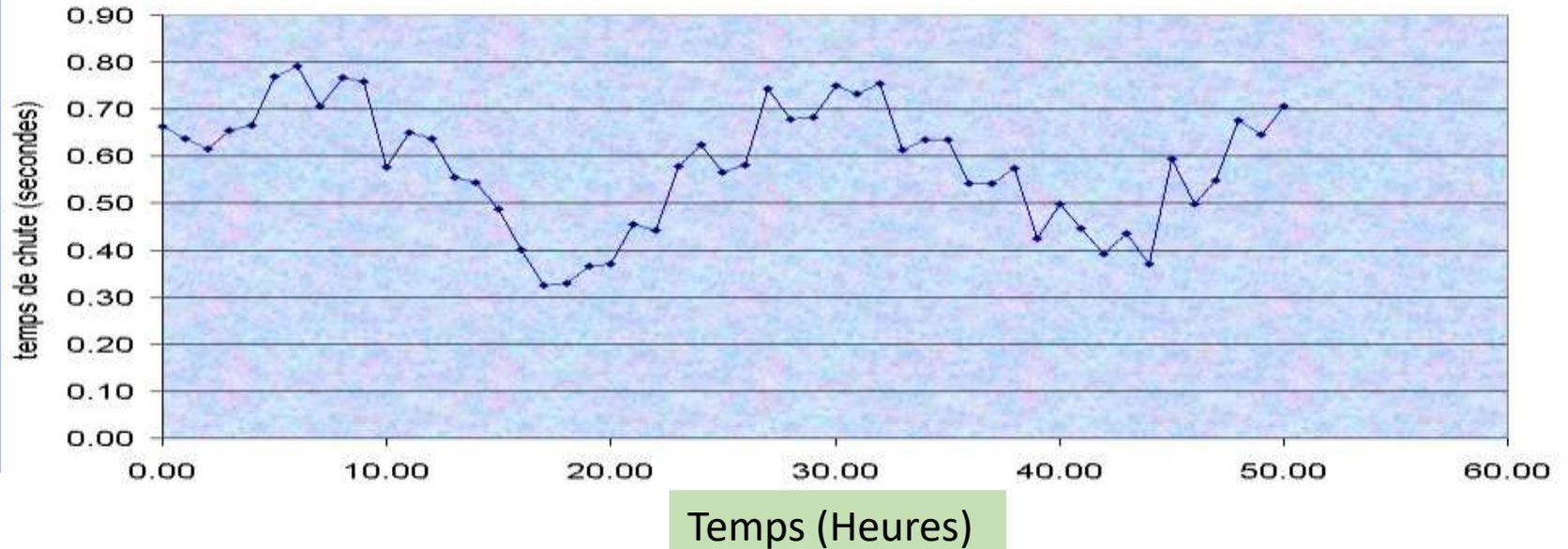
Longueur de la table [EL]



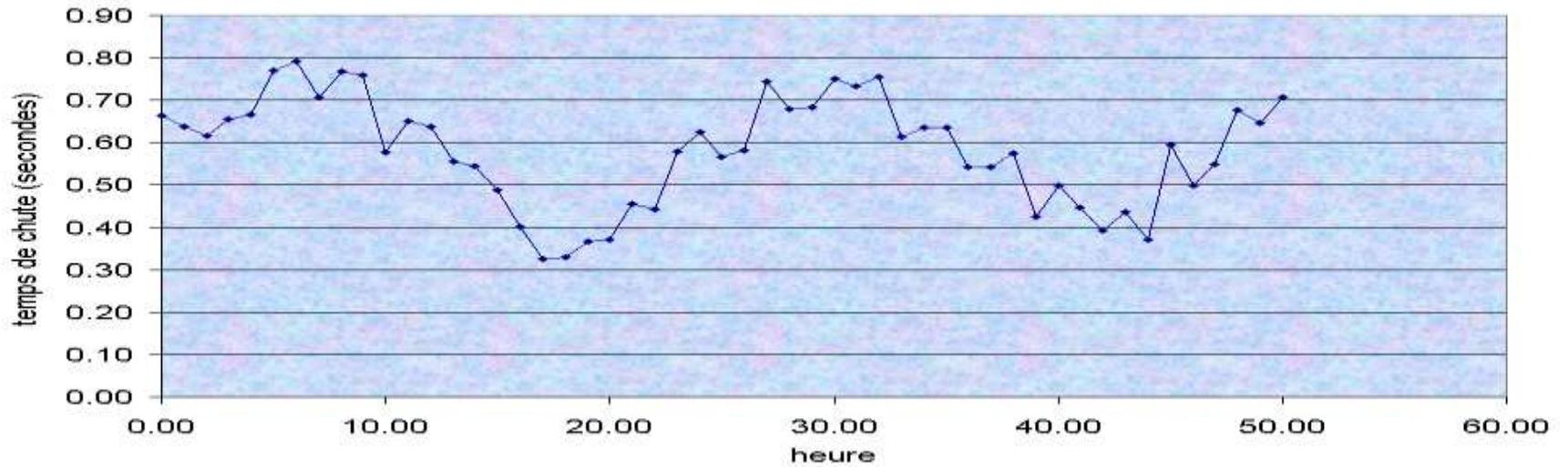
Dans le même temps on mesure (pour simplifier, avec un « bon chronomètre ») le temps de chute d'une bille, lâchée à une hauteur de 40 élastiques

Temps de chute (d'une hauteur de 40 EL) [s]

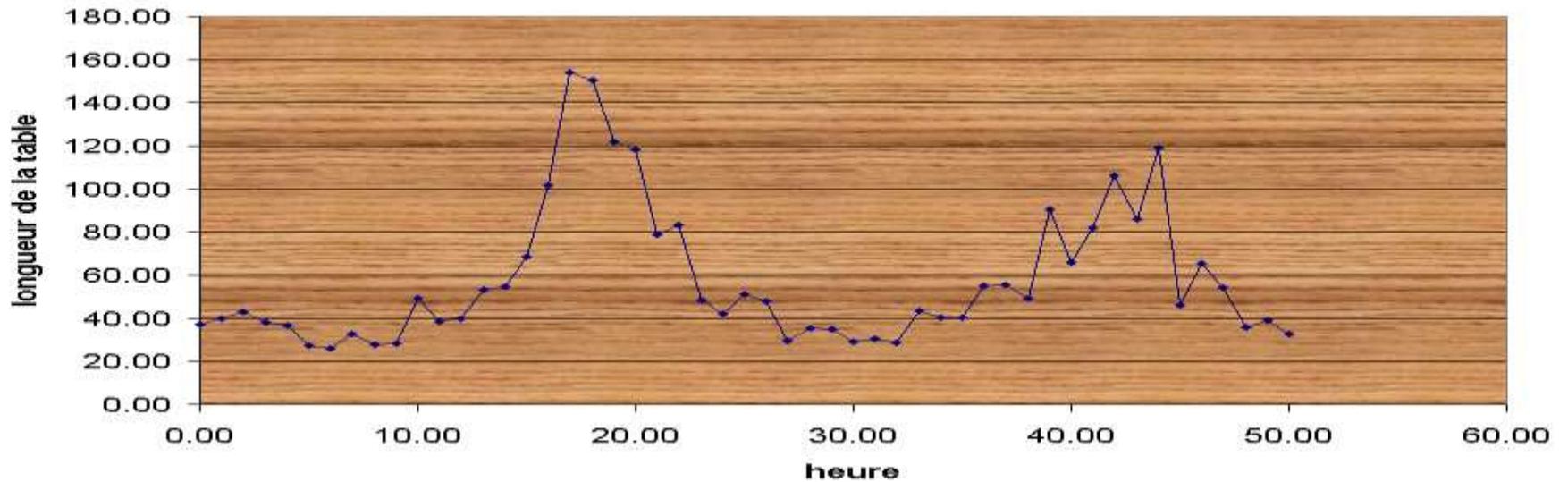
Temps de chute
(d'une hauteur de 40 EL) [s]



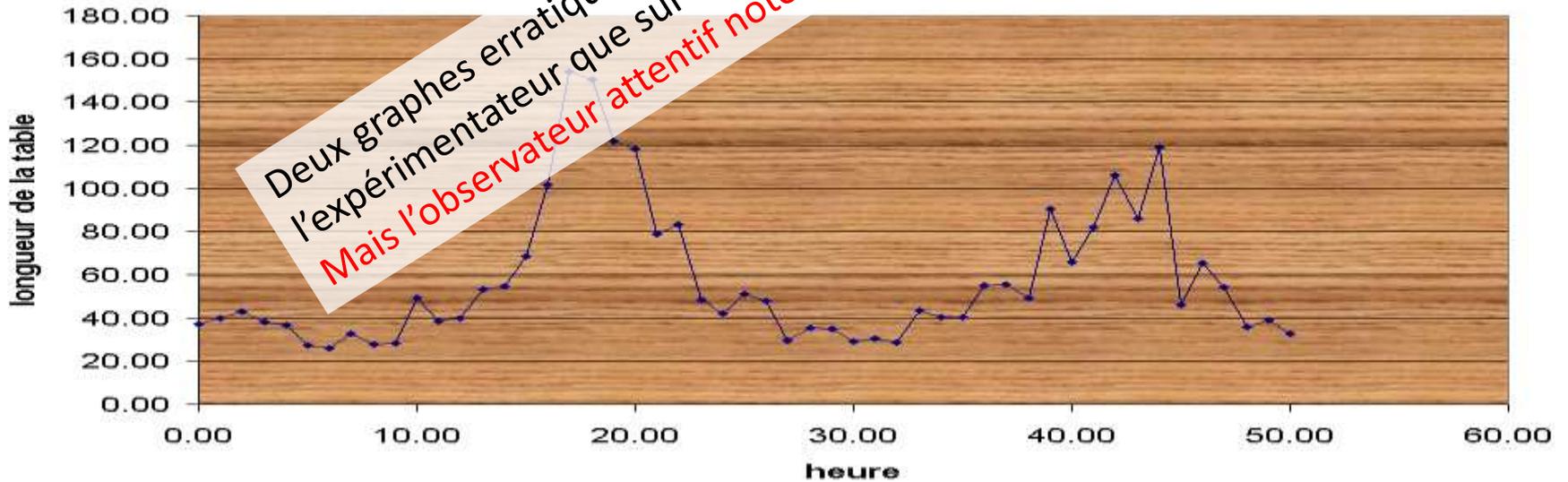
T chute 40 élastiques



L-table

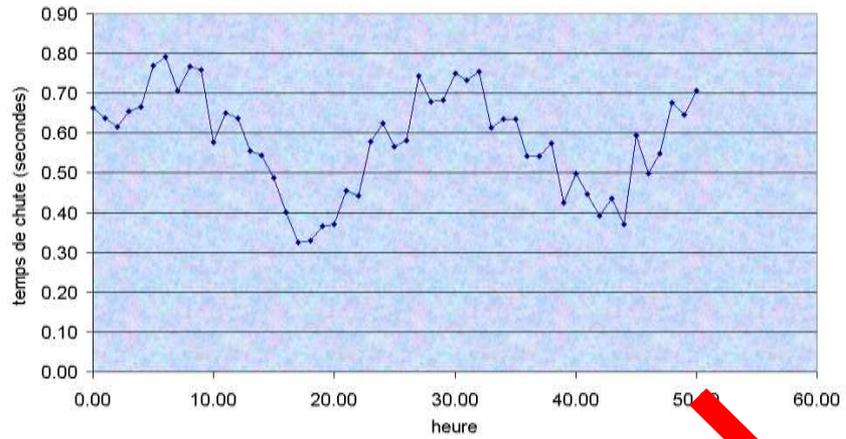


T chute 40 élastiques

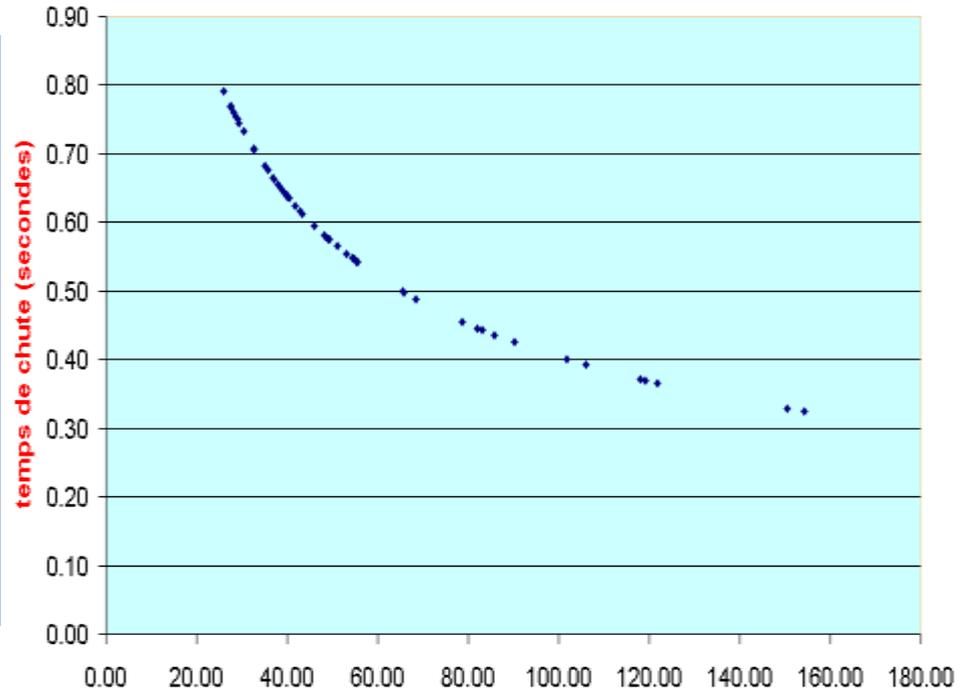


Deux graphes erratiques, et qui en disent plus sur la psychologie de l'expérimentateur que sur la physique ?
Mais l'observateur attentif note des (anti) corrélations

T chute 40 élastiques

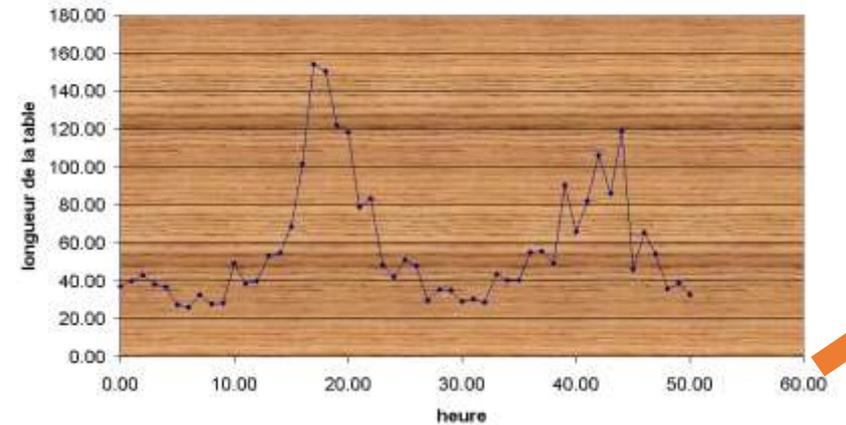


Temps de chute de 40 EL [s]



Longueur de la table [EL]

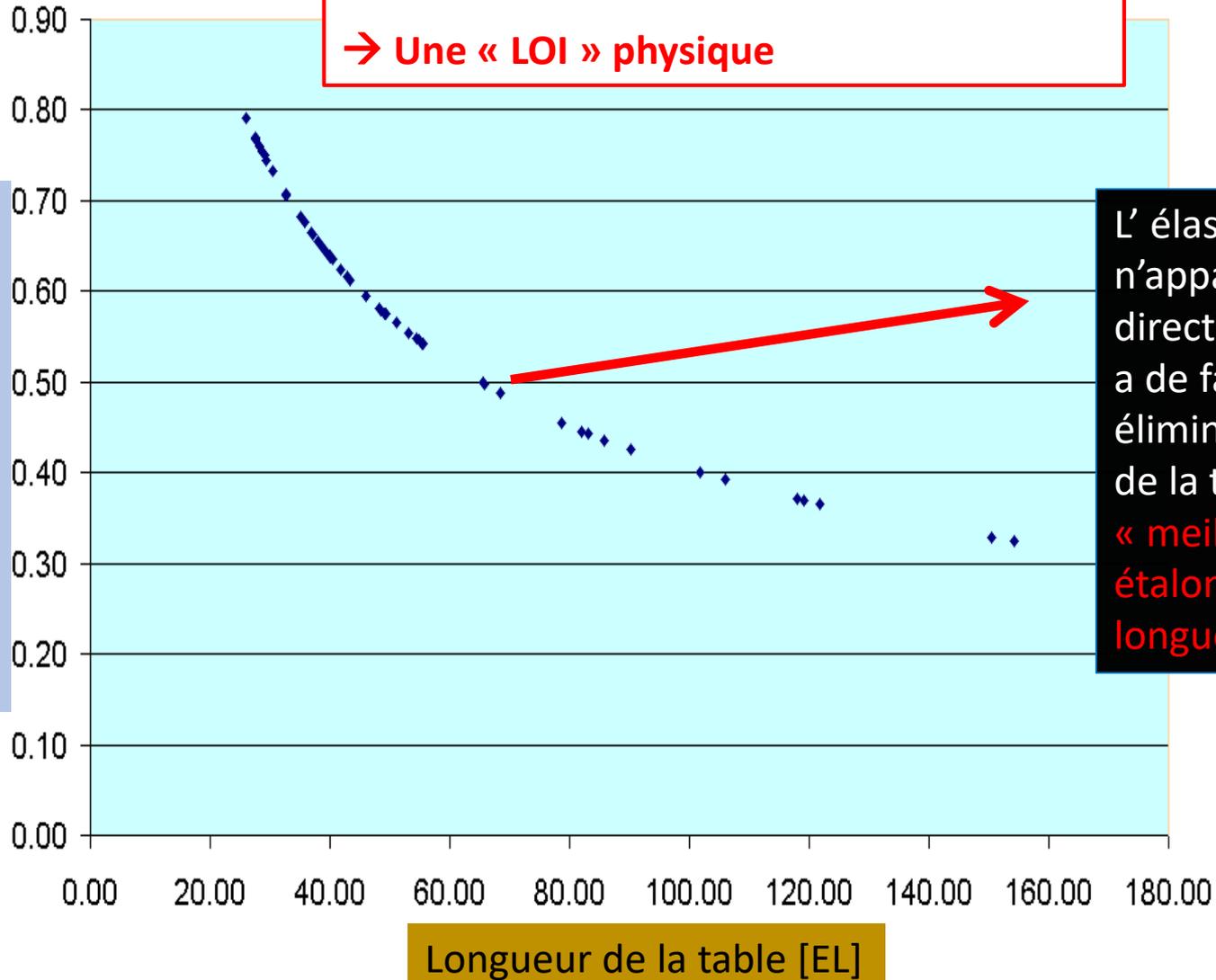
L-table



Une courbe régulière,
UTILISABLE POUR FAIRE DES PREDICTIONS

→ Une « LOI » physique

Temps de chute
(d'une hauteur de 40 EL) [s]



L' élastique [EL]
n'apparaît plus
directement Il
a de fait été
éliminé au profit
de la table ... un
« meilleur »
étalon de
longueur.

Un premier niveau de remarques:

Le mètre est la distance parcourue dans le vide par la lumière en 1/299 792 458 seconde.

Cette démarche, pour caricaturale qu'elle soit, évoque aussi l'évolution historique. On est passé d'unités telles la coudée ... à une barre métallique (la fameuse barre de platine irridié), puis à la définition officielle basée sur la vitesse de la lumière ...

**Ainsi, dans le but de simplifier les « lois physiques »,
pour les rendre « utilisables »,
nous avons dû nous adapter aux phénomènes rencontrés,
de sorte que nos choix sont finalement décidés par l'empirisme.**

Ce que nous trouvons « simple » est souvent le fait d'une longue éducation ... (calcul différentiel, mécanique quantique, ..)

Pour paraphraser VOLTAIRE

$$\square\Psi = -m^2\Psi$$

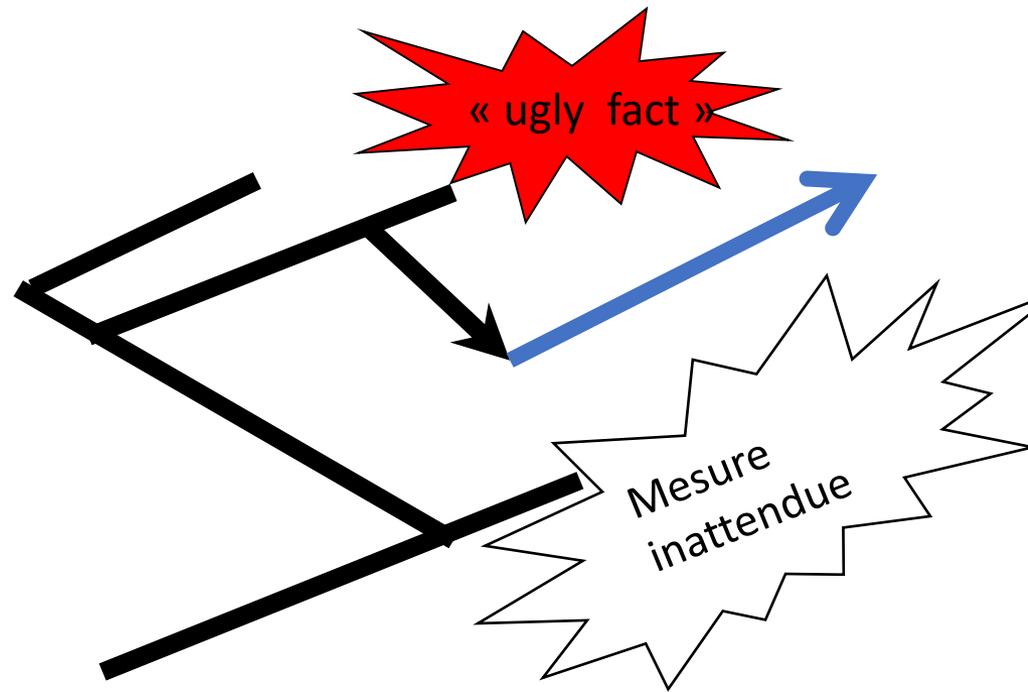
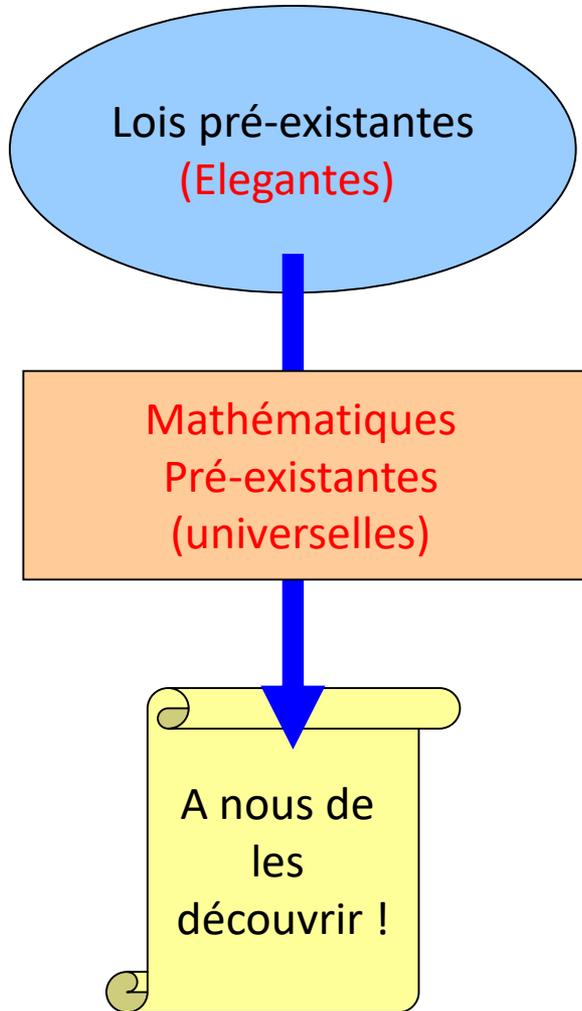
**Nous utilisons les plus simples des équations
... possibles**

Pangloss disait quelquefois à Candide :

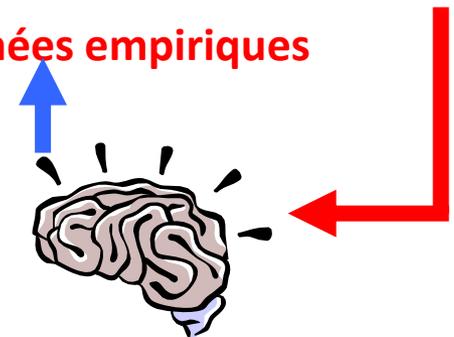
*Tous les événements sont enchaînés **dans le meilleur des mondes possibles** ;
car enfin si vous n'aviez pas été chassé d'un beau château à grands coups de pied
dans le derrière pour l'amour de mademoiselle Cunégonde,
si vous n'aviez pas été mis à l'Inquisition, si vous n'aviez pas couru l'Amérique à pied,
si vous n'aviez pas donné un bon coup d'épée au baron,
si vous n'aviez pas perdu tous vos moutons du bon pays d'Eldorado,
vous ne mangeriez pas ici des cédrats confits et des pistaches.. ..*

– Cela est bien dit, répondit Candide, mais il faut cultiver notre jardin.

VISION « PLATONICIENNE »



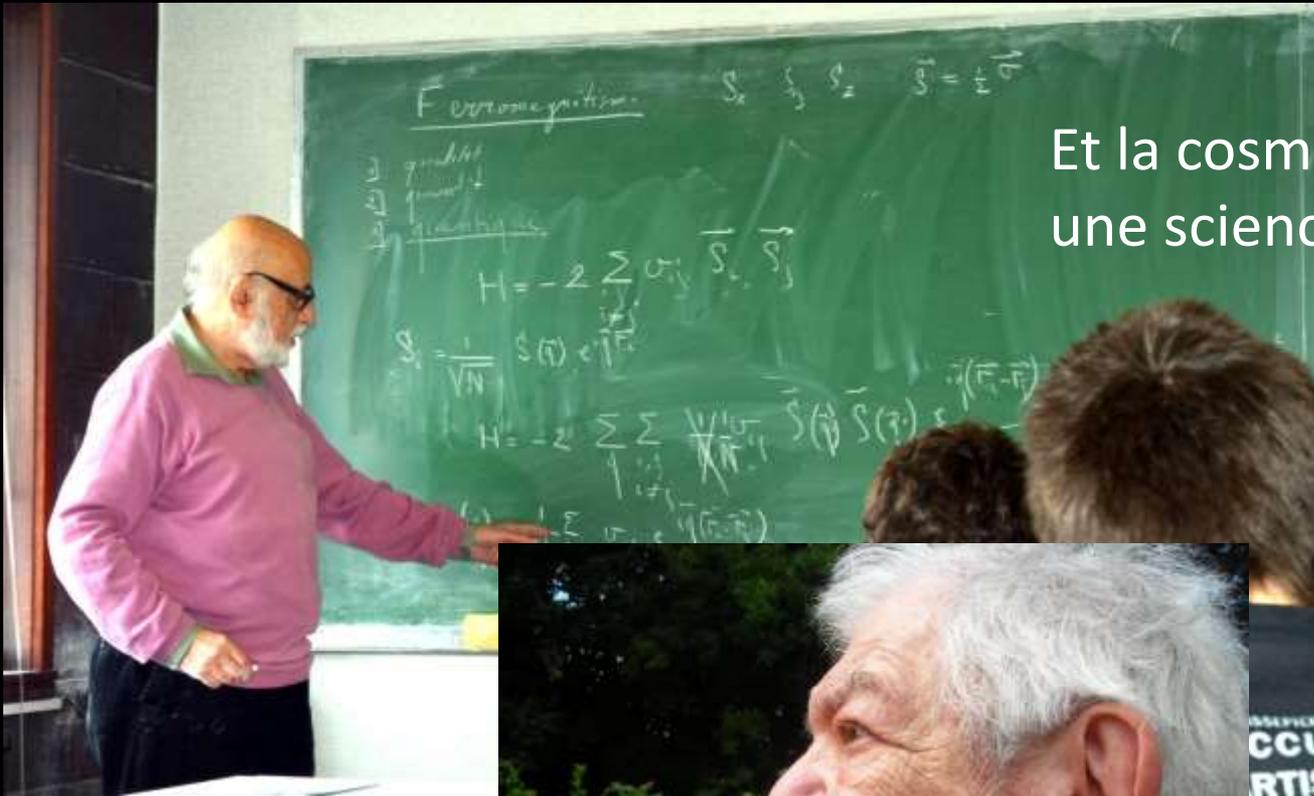
Pas de lois « simples » ,
Mais les lois les plus simples,
utilisables pour nous,
Compatibles avec les données empiriques



DEVINER une loi

CREER une loi

Et la cosmologie est devenue
une science d'observation ...

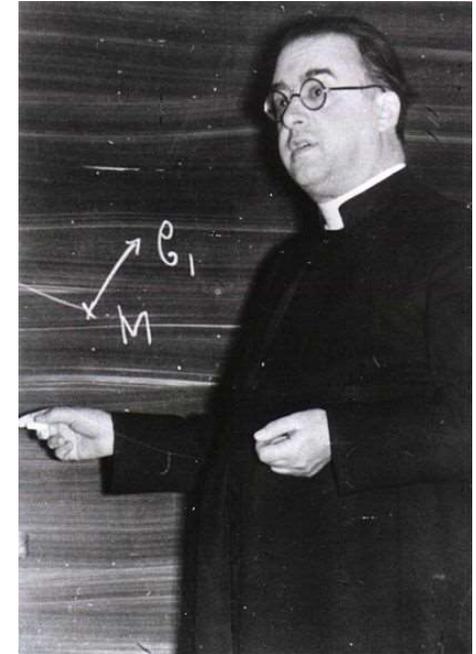


Robert Brout
François Englert,
Georges Lemaître :
Une incroyable aventure,
de l'infiniment petit à l'Univers

Crédit images : JMF, K Graham, KULeuven

L'acceptation d'un Univers en expansion, plutôt qu'un Univers statique est un bon exemple.

L'observation empirique impose une solution plus complexe (mais à terme plus riche, car elle permet d'investiguer la naissance de l'Univers, objet actuel de la physique des interactions fondamentales).



- Mais qu'est-ce qu'une loi physique?
- **Les interactions fondamentaleset les autres**
- Le domaine de validité, mais au-delà?
- Les particules, nos outils, et de nouvelles interactions fondamentales
- Y a-t-il des interactions faibles ?
- Le virage théorique – les symétries
- La brisure de symétrie et les scalaires :
un mal nécessaire ou un indice ?
- La violation de la parité gauche-droite et les limitations de l'approche purement théorique ...le dernier mot à l'empirisme!
- De nouvelles interactions « faiblardes » ?

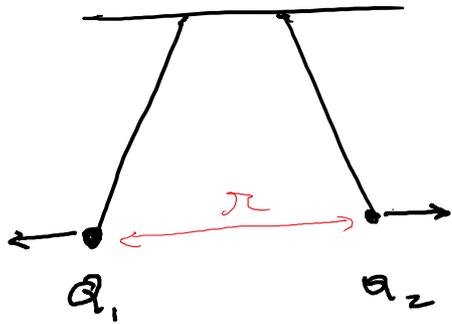
- La défaite de l'antimatière
- Les problèmes qui subsistent...



Les interactions fondamentales

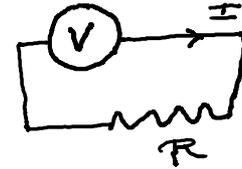
...et les autres

A l'école, nous avons tous appris (hélas, parfois de mémoire) des « lois » physiques.



$$|F| \sim \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

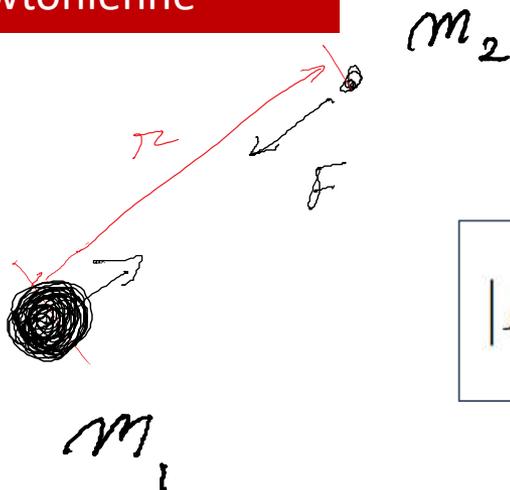
Electrostatique



$$V = I R$$

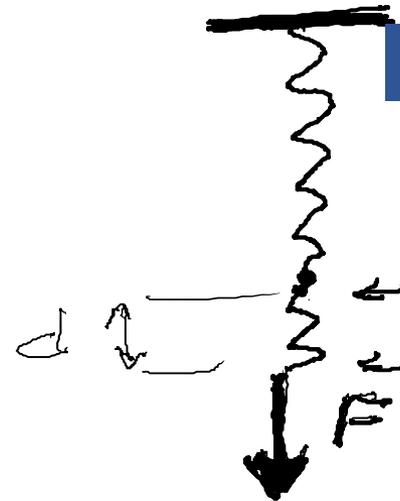
Loi d'Ohm

Gravitation newtonienne



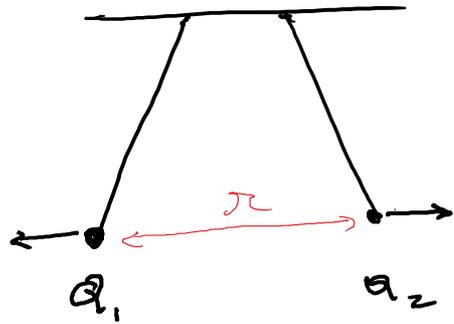
$$|F| \sim \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Loi de Hooke

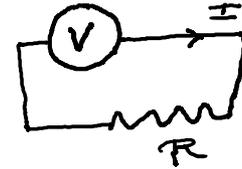


$$|F| = kd$$

A l'école, nous avons tous appris (hélas, parfois de mémoire) des « lois » physiques.

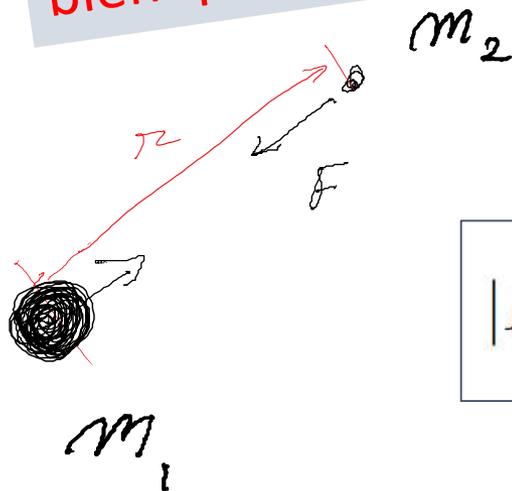


$$|F| \sim \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

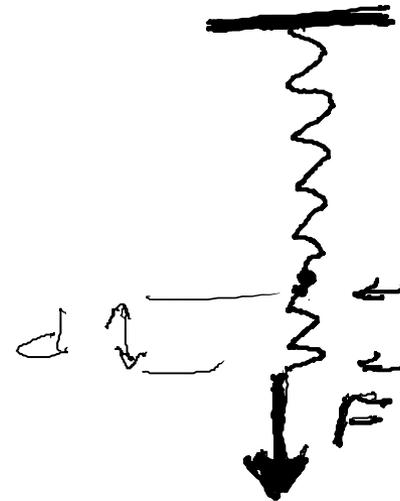


R

Certaines sont générales, (universelles),
d'autres ne sont que des outils limités,
bien qu'utiles pour décrire les objets que nous utilisons.

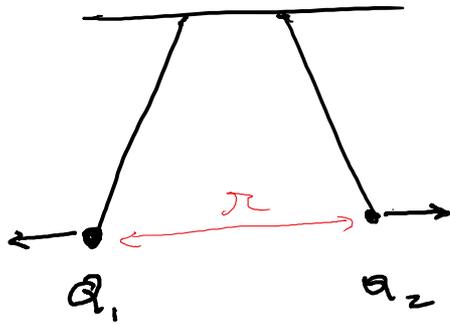


$$|F| \sim \frac{m_1 m_2}{r^2}$$



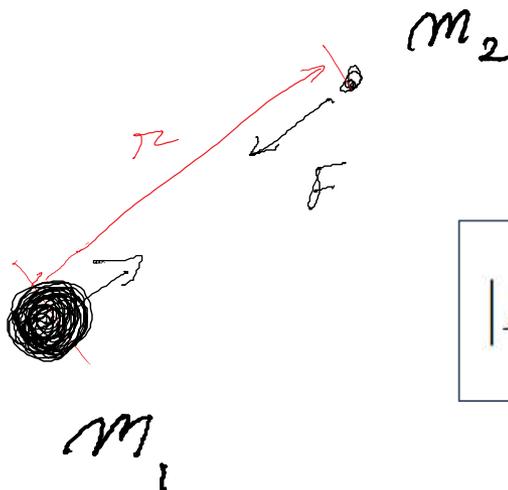
$$|F| = kd$$

A l'école, nous avons tous appris (hélas, parfois de mémoire) des « lois » physiques.



$$|F| \sim \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

Fondamentales
(universelles) ?

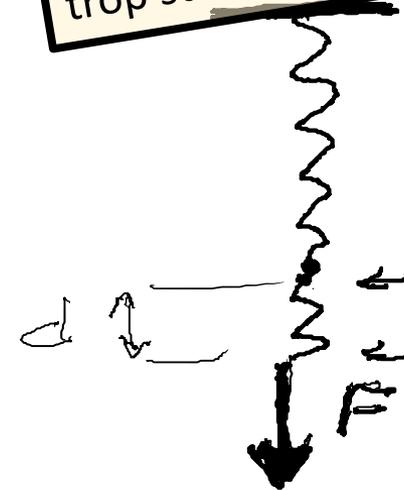


$$|F| \sim \frac{m_1 m_2}{r^2}$$



Techniques, liées à certains matériaux, ...si le courant n'est pas trop fort, ... si on ne tire pas trop sur le ressort

$$V = I R$$



$$|F| = kd$$

- Mais qu'est-ce qu'une loi physique?
- Les interactions fondamentaleset les autres
- **Le domaine de validité, mais au-delà?**
- Les particules, nos outils, et de nouvelles interactions fondamentales
- Y a-t-il des interactions faibles ?
- Le virage théorique – les symétries
- La brisure de symétrie et les scalaires :
un mal nécessaire ou un indice ?
- La violation de la parité gauche-droite et les limitations de l'approche purement théorique ...le dernier mot à l'empirisme!
- De nouvelles interactions « faiblardes » ?

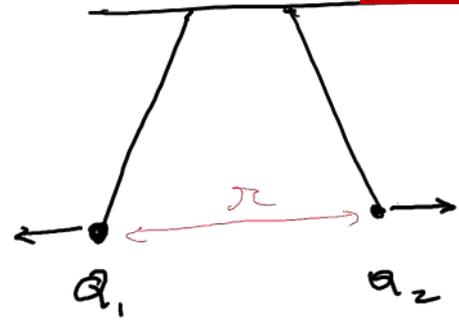
- La défaite de l'antimatière
- Les problèmes qui subsistent...

A dense field of galaxies, likely from a deep space survey, showing a variety of colors (yellow, orange, red, blue, green) and orientations (spiral, elliptical, irregular) against a black background. The galaxies are scattered across the frame, with some appearing larger and brighter than others.

Le domaine de validité

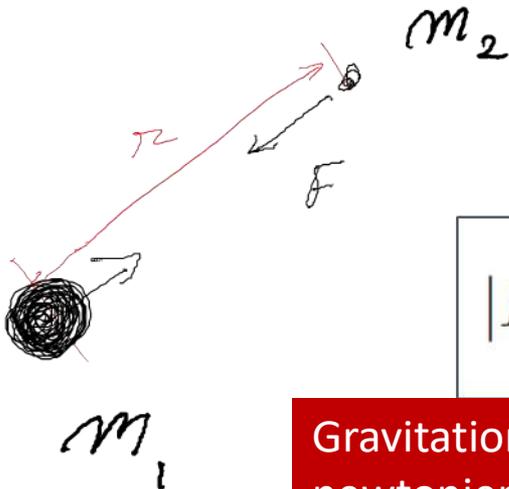
Crédit image : NASA

Electrostatique



$$|F| \sim \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

Fondamentales
(universelles) ?



$$|F| \sim \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Gravitation
newtonienne

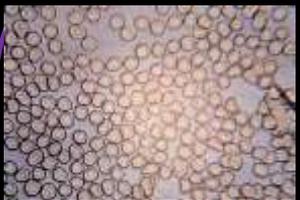
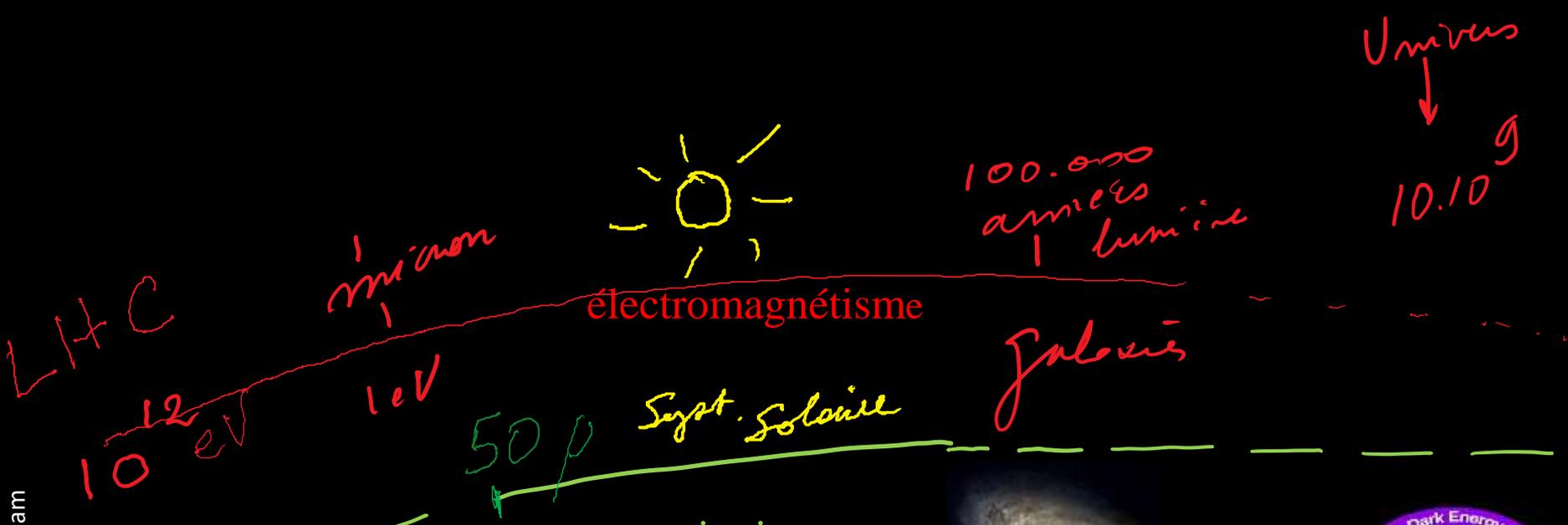
+ Relativité
+ mécanique
quantique

Electrodynamique
quantique

Généralisations théoriques

+ Relativité

Relativité générale,
Cosmologie,



Le comportement en $1/R^2$ n'est pas testé en-dessous de 1/20 mm

gravitation

Il faut ajouter la matière noire ...depuis 1933...
 mais depuis 1990, on sait qu'il ne peut s'agir de « Jupiters » (naines brunes)



Il faut ajouter l'énergie noire (mi- 1990)

L'électrodynamique quantique (électromagnétisme) est testée de façon détaillée entre des échelles **10000 milliards de fois inférieures au micron** (correspondant à l'énergie de nos plus puissants accélérateurs, comme le LHC au CERN), et des distances **supérieures à la taille des galaxies** (champs magnétiques). En outre, le photon (la lumière) se propage sur des distances correspondant à la taille de l'Univers visibles (> 10 milliards d'années-lumière).

La gravitation est testée de façon détaillée entre des échelles correspondant à **50 microns** (presque visible à l'œil nu), **et la taille du système solaire;**
*au-delà, la relativité générale peut décrire
la dynamique des galaxies si on accepte la présence (probable) de matière noire,
et l'évolution de l'Univers entier, si on
accepte la présence d'énergie noire (constante cosmologique).*

- Mais qu'est-ce qu'une loi physique?
- Les interactions fondamentaleset les autres
- Le domaine de validité, mais au-delà?
- **Les particules, nos outils, et de nouvelles interactions fondamentales**
- Y a-t-il des interactions faibles ?
- Le virage théorique – les symétries
- La brisure de symétrie et les scalaires :
un mal nécessaire ou un indice ?
- La violation de la parité gauche-droite et les limitations de l'approche purement théorique ...le dernier mot à l'empirisme!
- De nouvelles interactions « faiblardes » ?

- La défaite de l'antimatière
- Les problèmes qui subsistent...

Les particules (nos outils) et de nouvelles interactions fondamentales

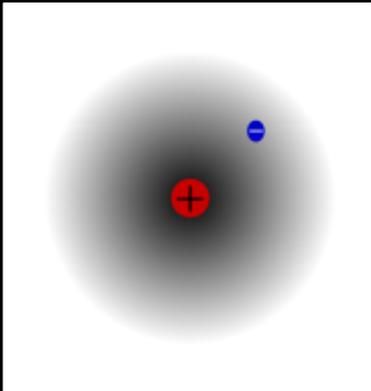


**Comme les interactions fondamentales
s'appliquent de façon universelle, le plus
simple est de voir comment elles
agissent sur les composants ultimes de
la matière**

Au microscope, on voit des détails
de 0,001 mm

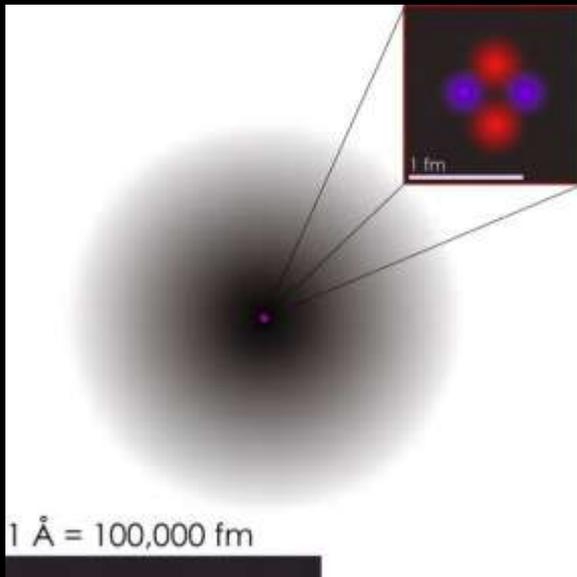


Cellules de ma langue



10000 fois plus petit, l'atome,
composé d'électrons
et d'un noyau

Toute la chimie ...



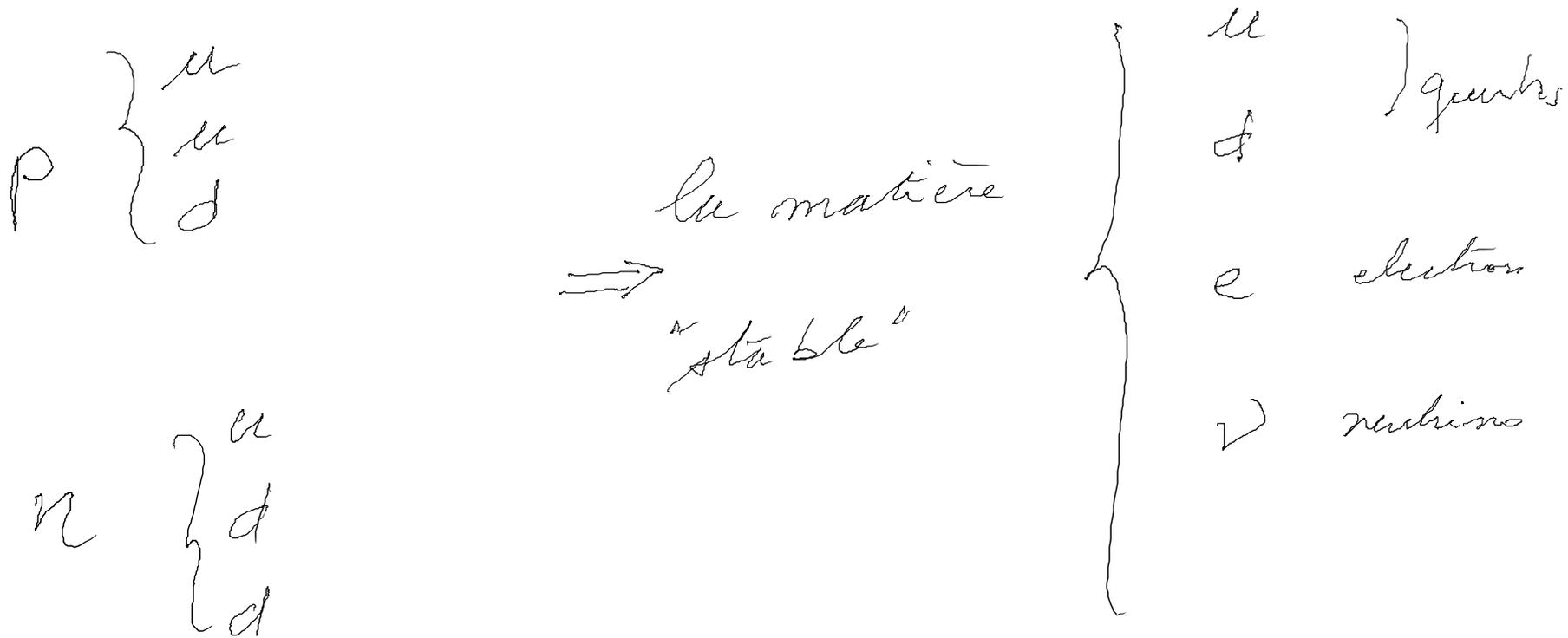
100 000 fois plus petit, le noyau ,
composé de **protons** et **neutrons**



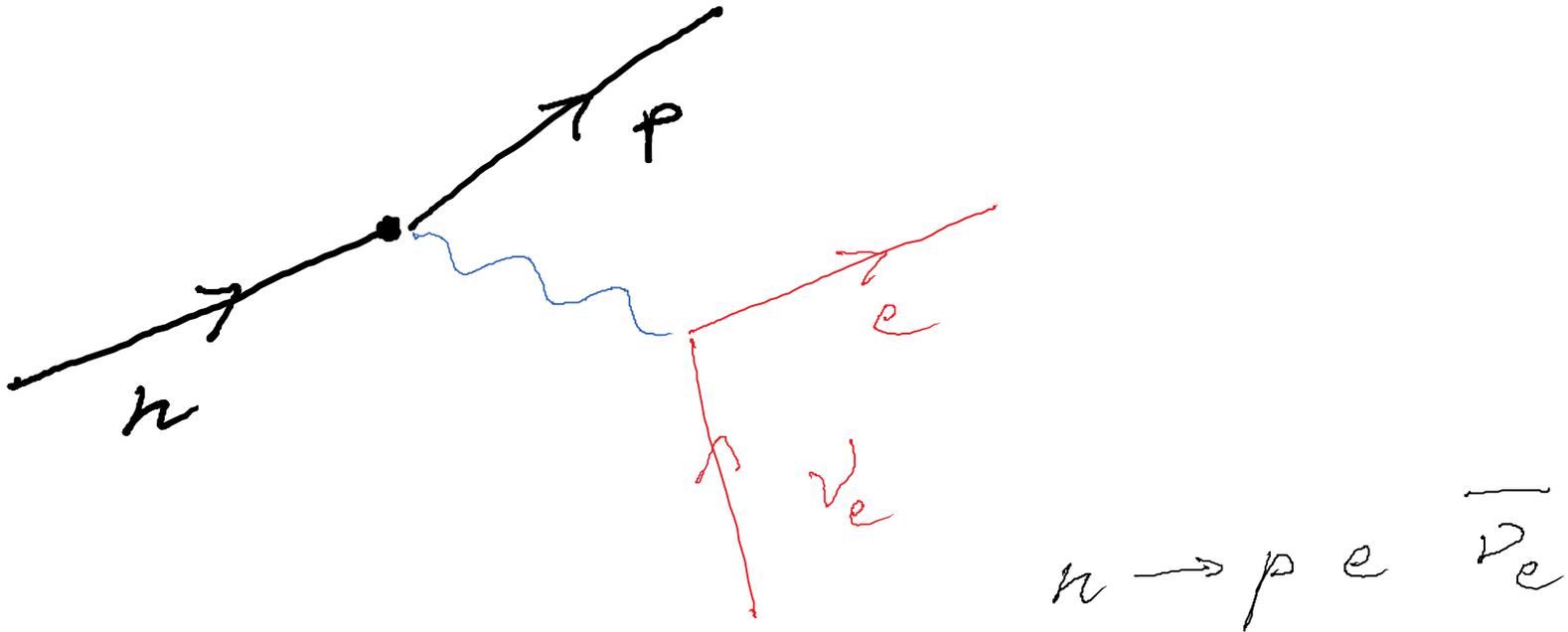
L'énergie,
la médecine nucléaires

Le **proton et le neutron** sont, eux-mêmes composés de QUARKS, (de type u, charge 2/3 de la charge du proton) et d, de charge -1/3 , que nous savons maintenant liés (« confinés » par des gluons.

Dans les processus chimiques, nous voyons les noyaux intacts, mais lors des collisions à très haute énergie (LHC), la structure interne se manifeste, et ce sont ces composants qui entrent en collision



Un grand oublié : LE NEUTRINO



Le neutrino, émis dans les réactions nucléaires les plus banales, est l'une des particules les plus abondantes, mais les moins connues.

Les neutrinos sont abondants : **des centaines de milliards (de l'ordre de 10 milliards par centimètre carré) nous traversent chaque seconde, ...** en provenance du Soleil, mais sans nous affecter! D'ailleurs, ils nous atteignent la nuit aussi car ils traversent sans peine la Terre!

Les réacteurs nucléaires émettent aussi des flux considérables, cette fois d' « antineutrinos »..

Une fois encore, on parle en milliards d' anti-neutrinos par centimètre carré par seconde à quelques centaines de mètres d'un cœur ...

Ils font, au même titre que les photons, partie de la « radiation de fond », relique du big bang, qui baigne tout notre Univers ...

Et pourtant, on en entend rarement parler.

Le point de départ

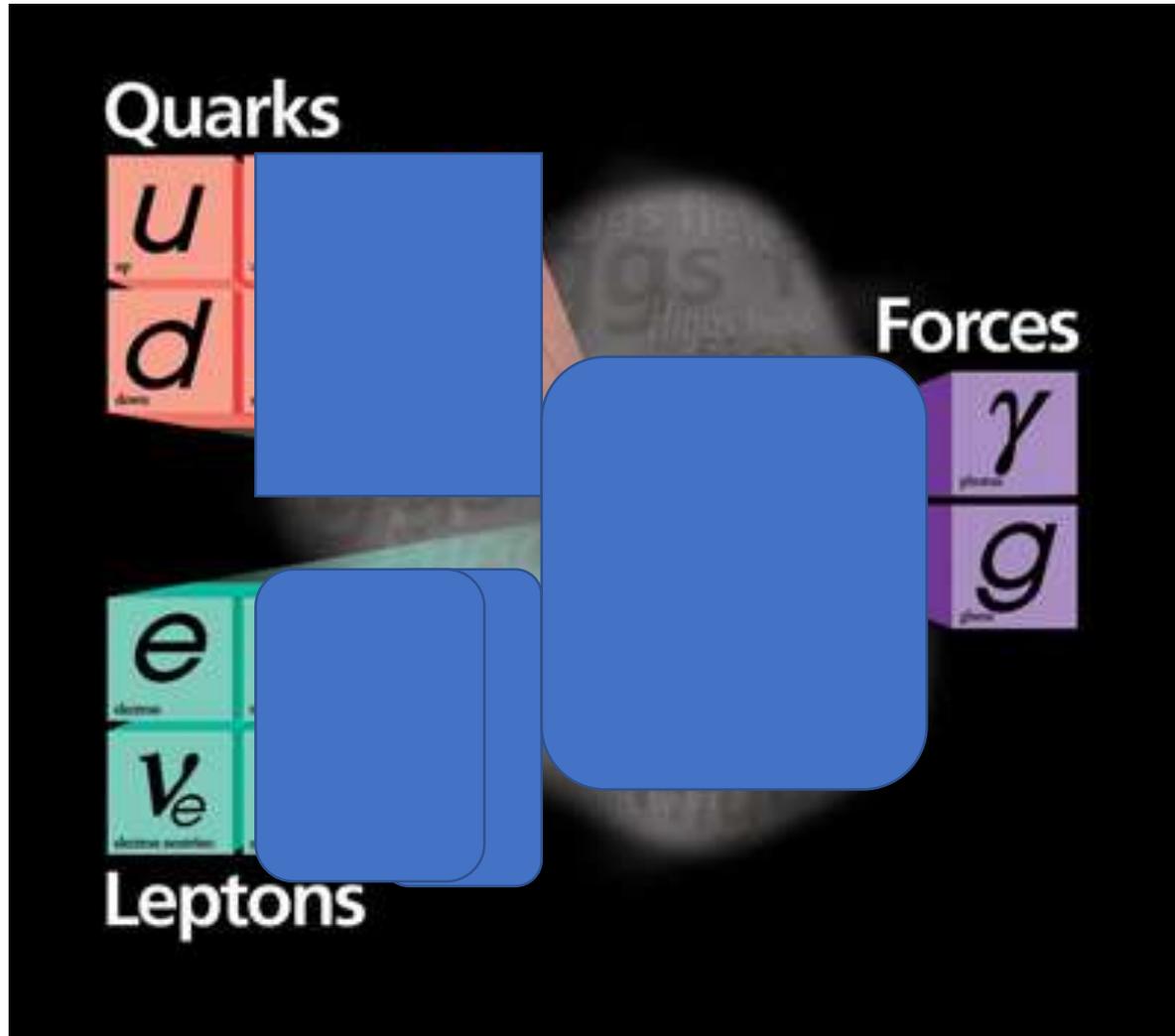


Image : Fermilab

En fait, on découvre très tôt une autre particule, le muon (analogue à l'électron mais 200 fois plus lourd) dans le rayonnement cosmique .

Et les quarks u et d peuvent se combiner pour former nombre de particules instables (résonnances) .. Voir Particle Data Table

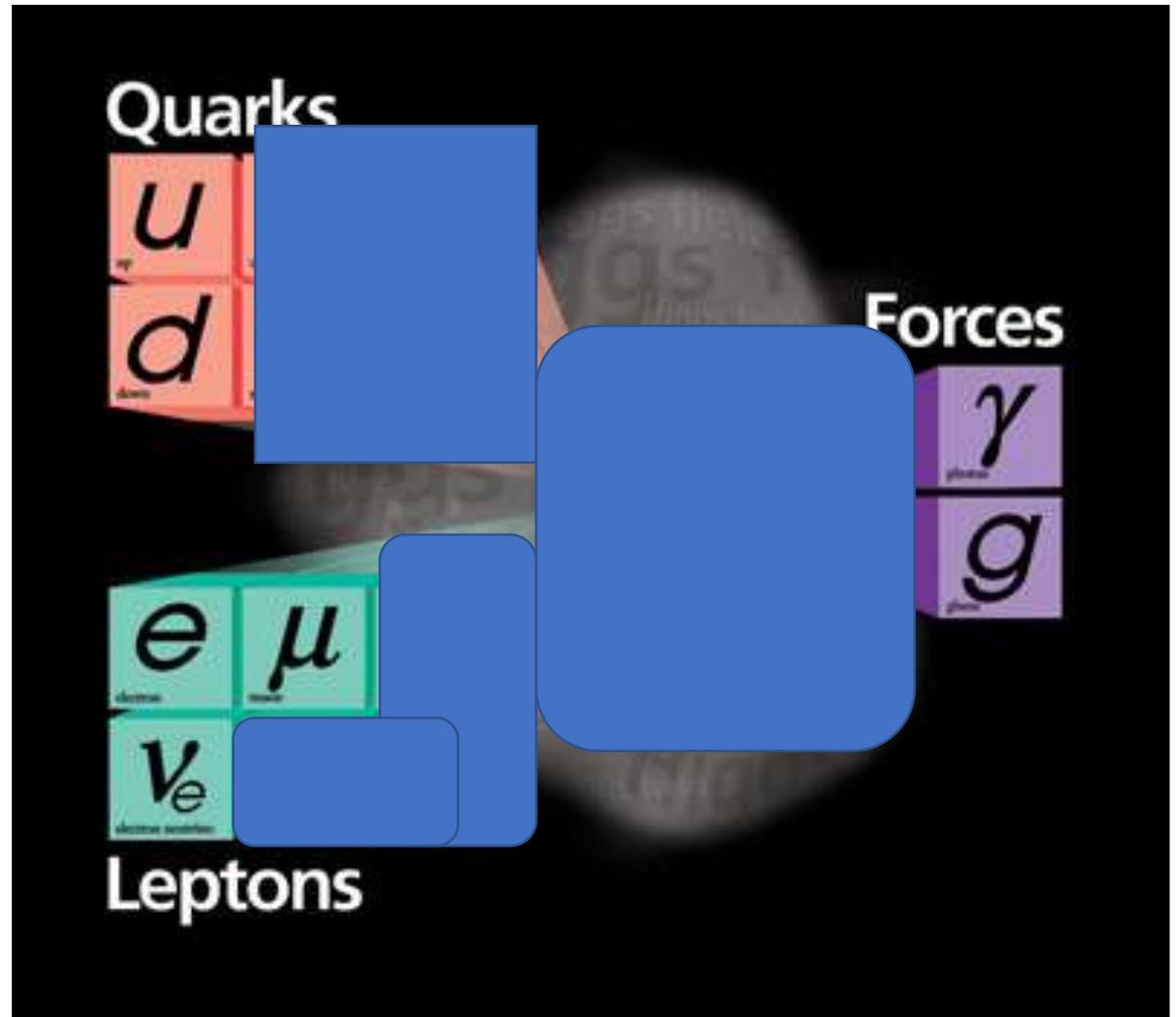


Image : Fermilab

En fait, on découvre très tôt une autre particule, le muon (analogue à l'électron mais 200 fois plus lourd) dans le rayonnement cosmique .

Et les quarks u et d peuvent se combiner pour former nombre de particules instables (résonnances) .. Voir « Particle Data Table »

http://pdg.lbl.gov/2016/tables/contents_tables.html

Pour notre propos, nous anticiperons et mentionnerons dès maintenant aussi le « lepton tau », noté τ , qui ne sera découvert que bien plus tard

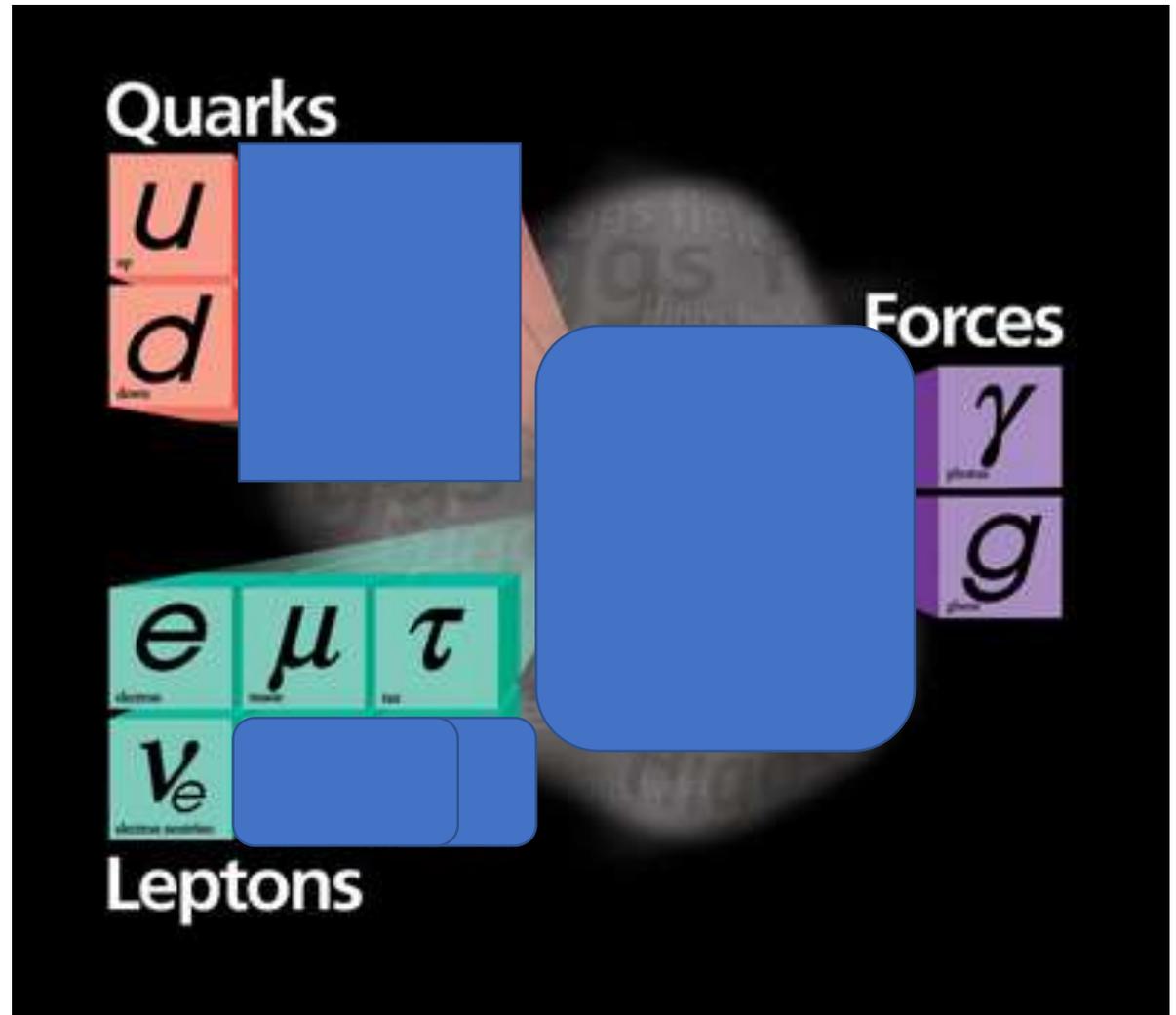
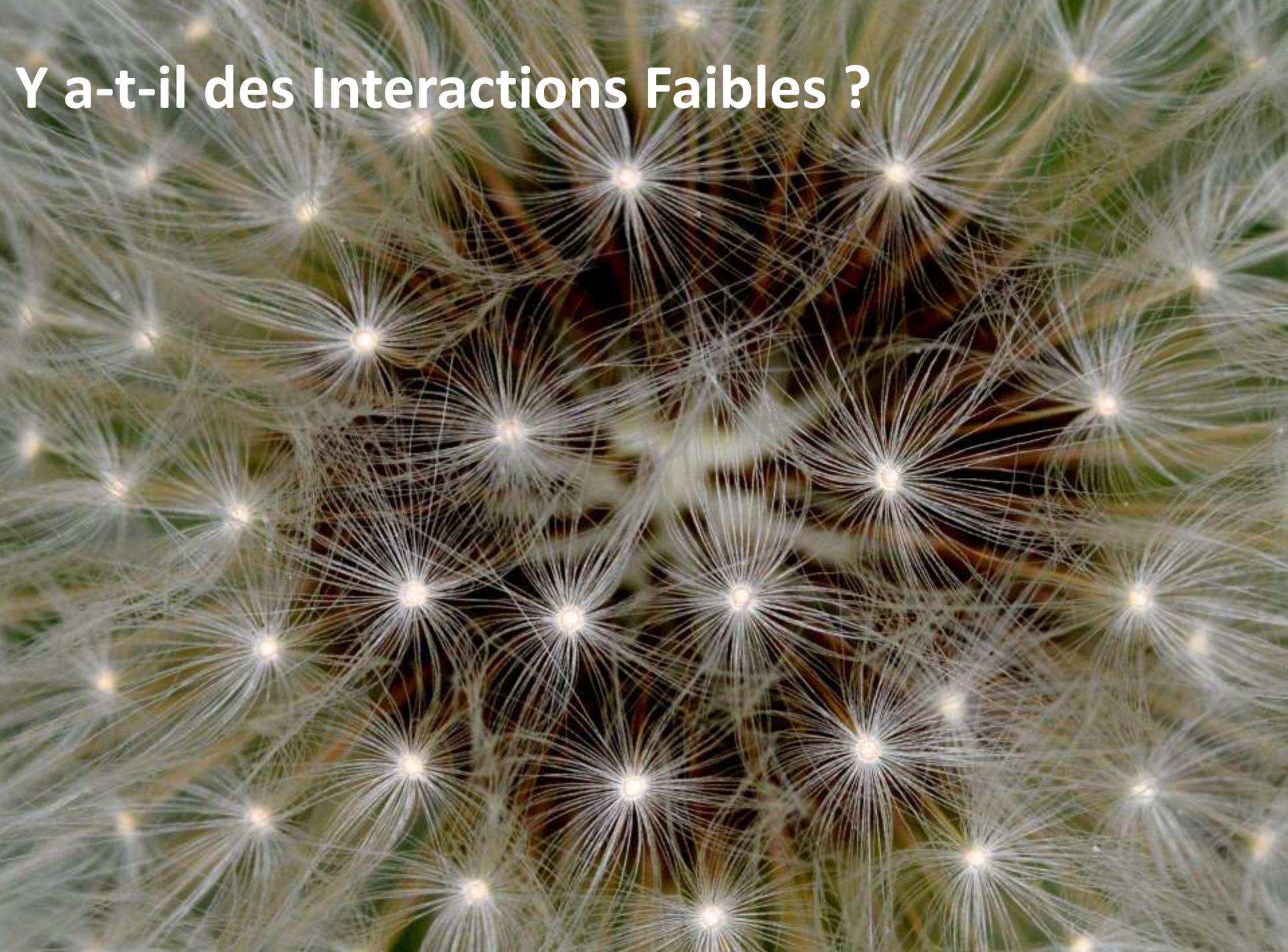


Image : Fermilab

- Mais qu'est-ce qu'une loi physique?
- Les interactions fondamentaleset les autres
- Le domaine de validité, mais au-delà?
- Les particules, nos outils, et de nouvelles interactions fondamentales
- **Y a-t-il des interactions faibles ?**
- Le virage théorique – les symétries
- La brisure de symétrie et les scalaires :
un mal nécessaire ou un indice ?
- La violation de la parité gauche-droite et les limitations de l'approche purement théorique ...le dernier mot à l'empirisme!
- De nouvelles interactions « faiblardes » ?

- La défaite de l'antimatière
- Les problèmes qui subsistent...

Y a-t-il des Interactions Faibles ?



Y a-t-il des interactions faibles?

Les particules (élémentaires ou non) sont susceptibles d'interagir, mais aussi de se désintégrer. Plus l'interaction est forte, plus on s'attend à une désintégration rapide ... voici quelques chiffres, pour des particules de masses modestes ..

particule	Masse (GeV/c ²)	« temps de vie »
π (1800)	1.8	$3.3 \cdot 10^{-24}$ s
lepton τ	1.777	$2.9 \cdot 10^{-13}$ s
neutron	0.9396	880 s
proton	0.938	$> 10^{+31}$ années
muon	0.113	$2.2 \cdot 10^{-6}$ s

A quoi aurions-nous dû nous attendre ?
L'outil du pauvre: l'analyse dimensionnelle...

Dans le contexte de la **mécanique quantique** et de la **relativité**,
les concepts de masse, énergie, temps, sont reliés ...
à une masse donnée, on associe un temps, une énergie, une section efficace ..

1 GeV (1 masse du proton)

$$E = mc^2$$

$$\longrightarrow T = 6.58 \cdot 10^{-25} \text{ s}$$

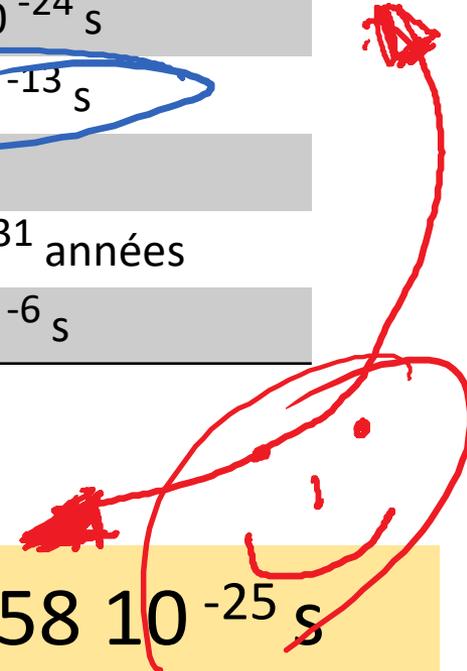
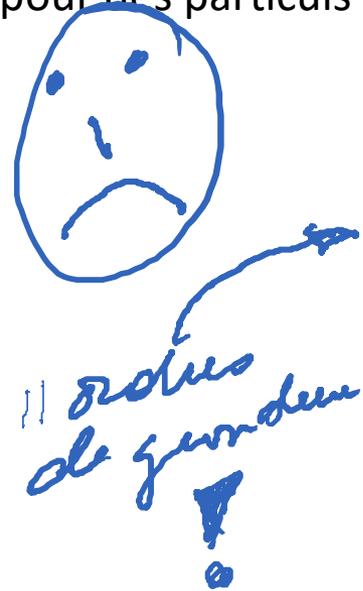
$$E = h\nu = h/T$$

Si une seule échelle de masse intervient (par exemple, une particule lourde qui se désintègre en particules de masse négligeable), on s'attend à ce que ces ordres de grandeur soient respectés ...

Y a-t-il des interactions faibles?

Les particules (élémentaires ou non) sont susceptibles d'interagir, mais aussi de se désintégrer; plus l'interaction est forte, plus on s'attend à une désintégration rapide ... voici quelques chiffres, pour des particules de masses modestes ..

particule	Masse (GeV/c ²)	« temps de vie »
π (1800)	1.8	$3.3 \cdot 10^{-24}$ s
lepton τ	1.777	$2.9 \cdot 10^{-13}$ s
neutron	0.9396	880 s
proton	0.938	$> 10^{31}$ années
muon	0.113	$2.2 \cdot 10^{-6}$ s



POUR 1 GeV (1 masse du proton) $T = 6.58 \cdot 10^{-25}$ s

Désormais, nous prendrons la vitesse de la lumière comme unité, $c=1$, pour simplifier la typographie ... suivant la pratique des théoriciens ...

D'où une terminologie (provisoire) :

Interactions fortes : celles qui semblent avoir une intensité « normale »

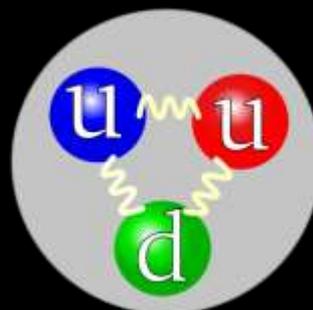
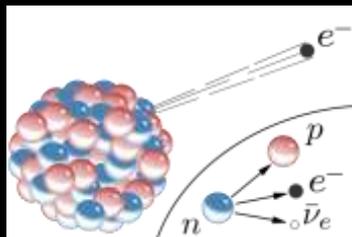
Interactions faibles : celles dont les effets semblent fortement supprimés

à ce stade, pas de demi-mesure :

> 10 ordres de grandeur entre les deux situations!

(ce qui est rare en physique ...)

Maxwell, Einstein



Electro-Magnétisme

Interactions faibles

Interactions fortes

Gravitation

Unification électrofaible

Energie = 1 000 masses du proton
Test ultime au LHC ...

Grande Unification

Energie = 10 000 000 000 000 000 m_p

Théorie du Tout

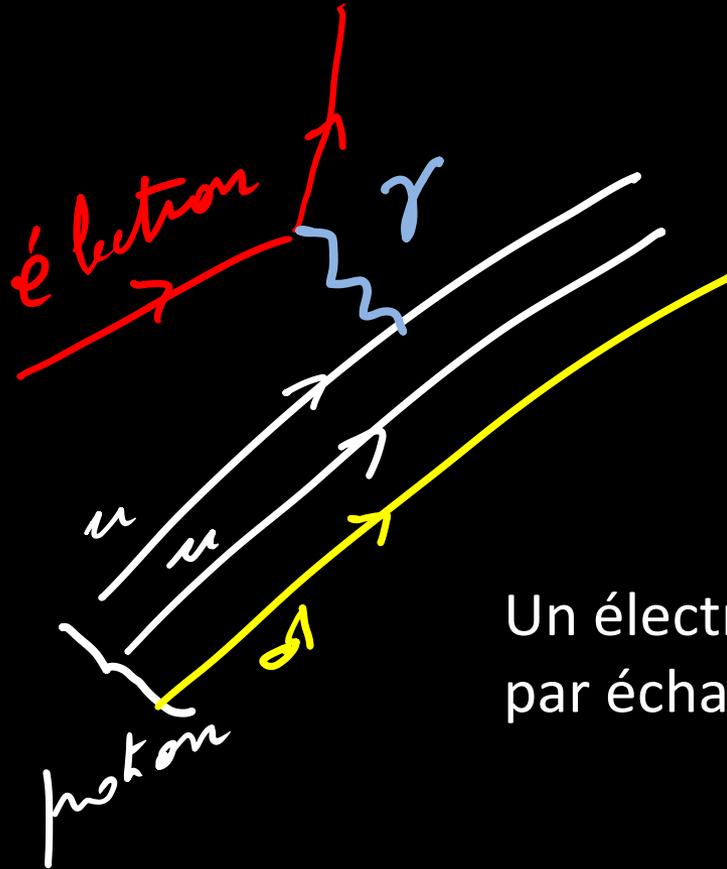
Energie de l'Univers,
Cosmologie

Crédits images:
Nassiba Tabti +
Wikimedia commons
[Inductiveloop](#)
[Arpad Horvath](#)



Théorie des Cordes ??

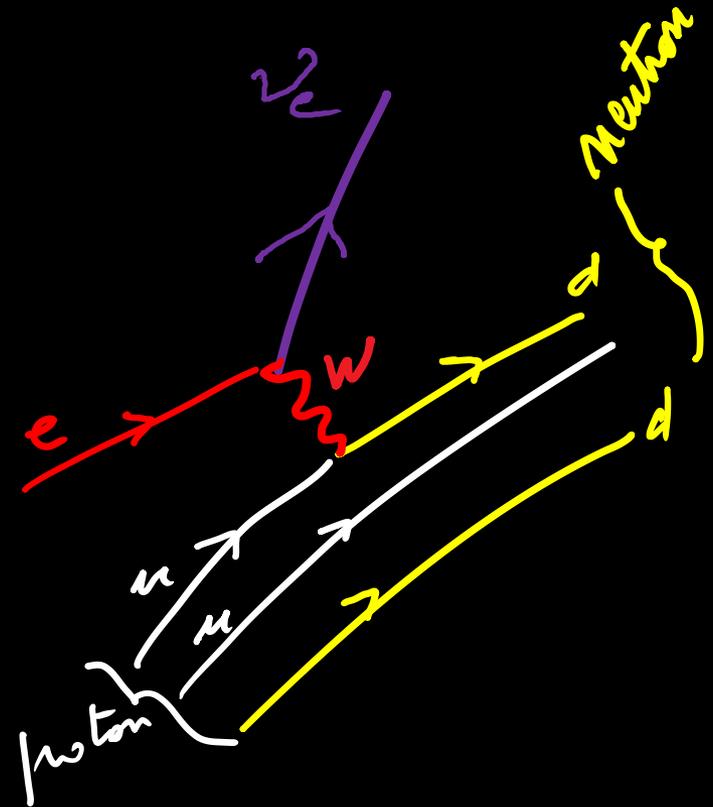
Tentative d'unification : interaction faible et interaction électromagnétique

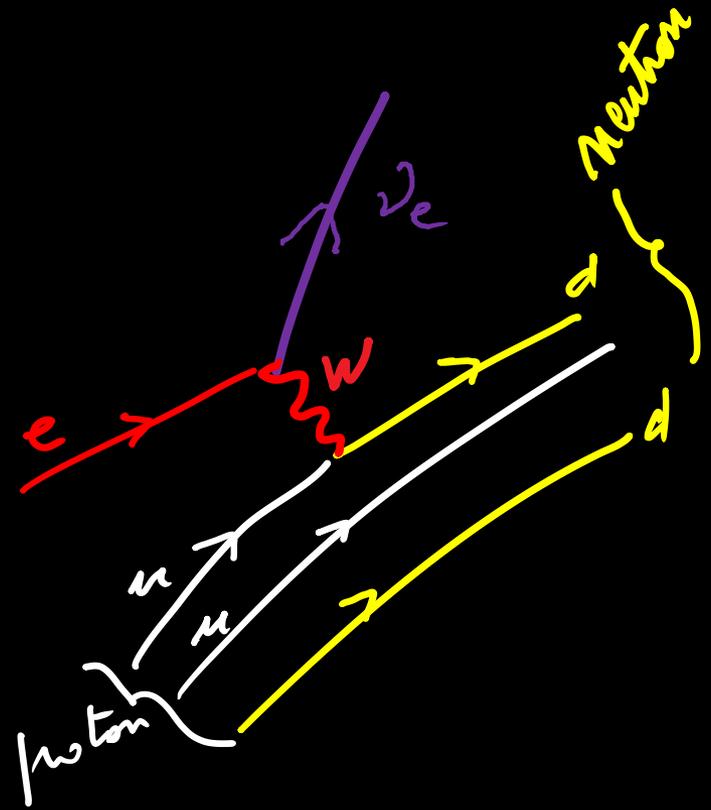
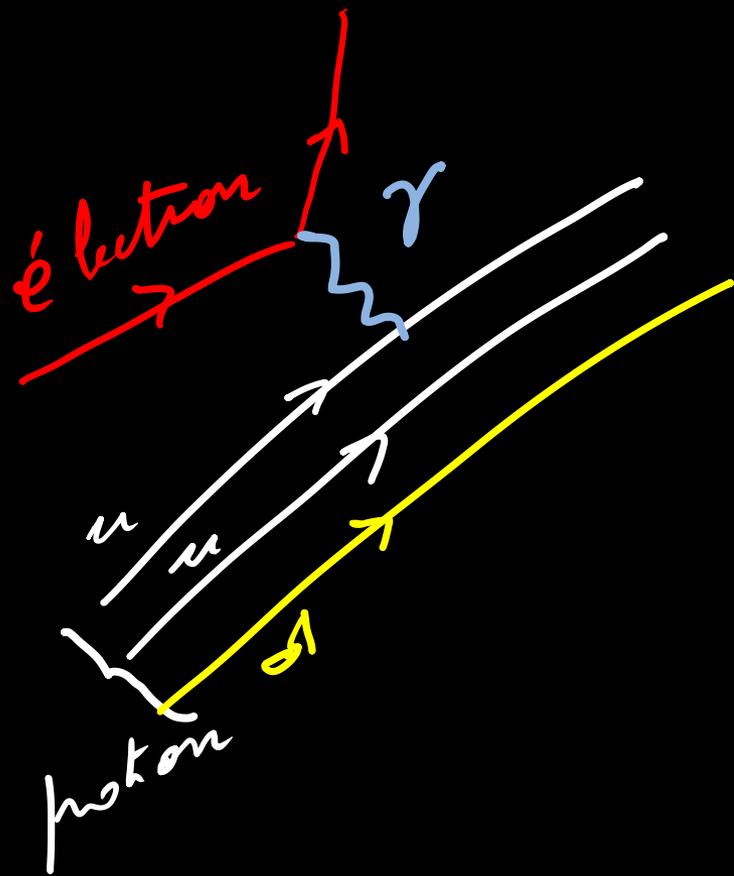


Un électron interagit avec un proton,
par échange d'un photon γ

Un électron entre en collision avec un proton, qu'il transforme en neutron tout en se changeant en neutrino..

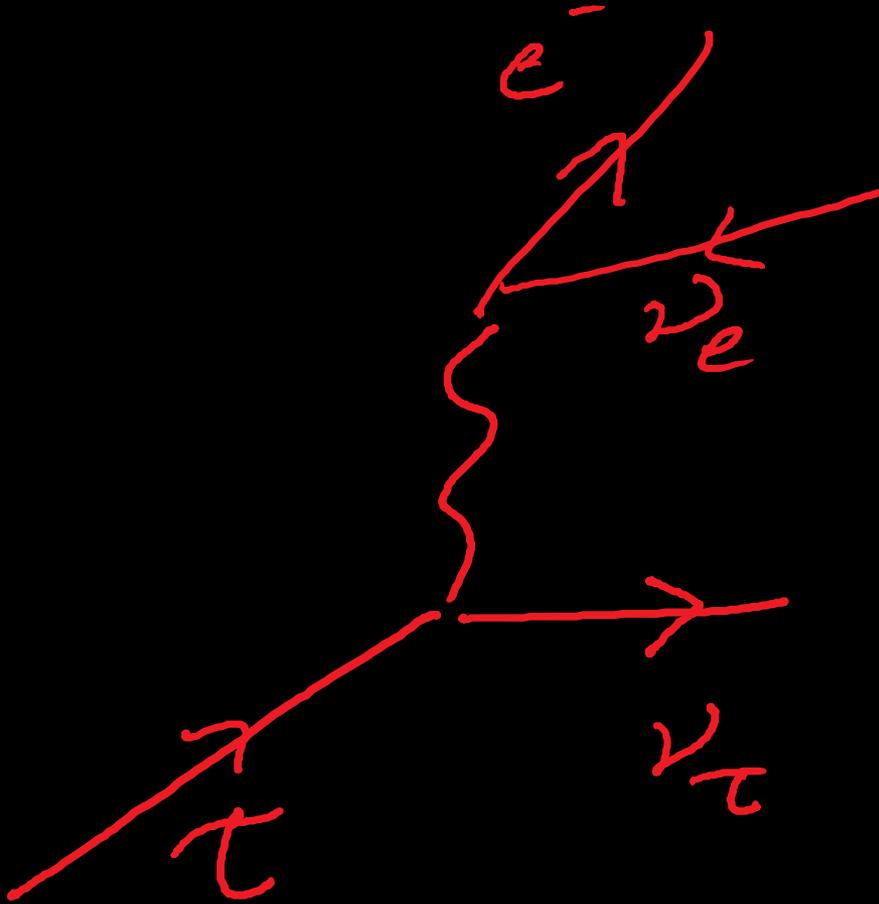
On suppose un processus similaire, à l'intervention cette fois d'un vecteur d'interaction nouveau, le W Que l'on suppose massif (sans quoi il aurait été découvert bien plus tôt)

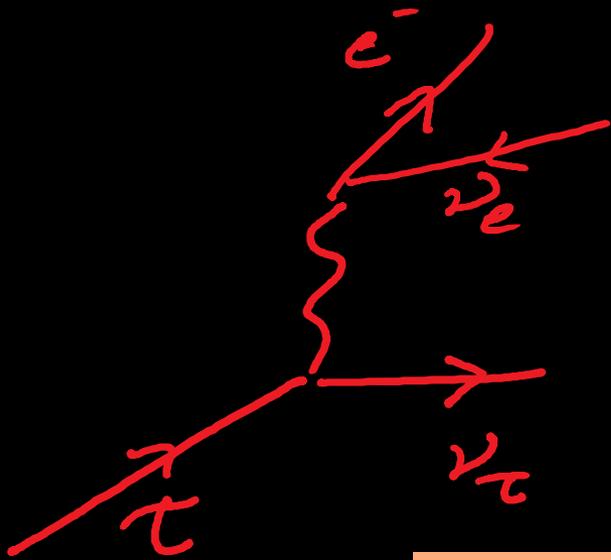




De même, le « lepton tau » se désintègre
par l'intervention du W ...

$$\tau \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$$





$$\Gamma \sim m_{\tau} * g^4 * \left(\frac{m_{\tau}}{M_W}\right)^4$$

$$\text{Temps de vie} \sim \frac{1}{m_{\tau}} * (1/g)^4 * \left(\frac{M_W}{m_{\tau}}\right)^4$$

Si nous voulons rendre compte d'un « temps de vie (moyen) » du lepton Tau allongé de nombreux ordres de grandeur,

nous pouvons **à priori opter**

- pour une petite valeur de la « charge faible » g ,
- pour une masse élevée du W (de l'ordre de $100 \text{ GeV}/c^2$)
...en gardant g proche de la charge électrique (qui dans le choix présent est de l'ordre de $|e| = 0.3$)

Y a-t-il des interactions faibles?

- une petite valeur de la « charge faible » g , **OU**
- une masse élevée du W (de l'ordre de 100 GeV) ...en gardant g proche de la charge électrique (qui dans le choix présent est de l'ordre de $|e| = 0.3$)

$$\text{Temps de vie} \sim \frac{1}{m_\tau} * (1/g)^4 * \left(\frac{M_W}{m_\tau}\right)^4$$

Pour rendre compte de tous les temps de vie*, seule la solution $M_W \sim 100 \text{ GeV}$, $g \sim 1$ subsiste

* (Pour le neutron, il faut remplacer « m » par l'énergie libérée)

particule	Masse (GeV/c ²)	« temps de vie »
π (1800)	1.8	$3.3 \cdot 10^{-24} \text{ s}$
lepton τ	1.777	$2.9 \cdot 10^{-13} \text{ s}$
neutron	0.9396	880 s
proton	0.938	$> 10^{+31}$ années
muon	0.113	$2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$

POUR 1 GeV (1 masse du proton) l'analyse dimensionnelle donnait $T = 6.58 \cdot 10^{-25} \text{ s}$

La « faiblesse » des interactions «faibles » n'est donc pas due à des couplages faibles, mais résulte simplement de la masse élevée de son vecteur , le W

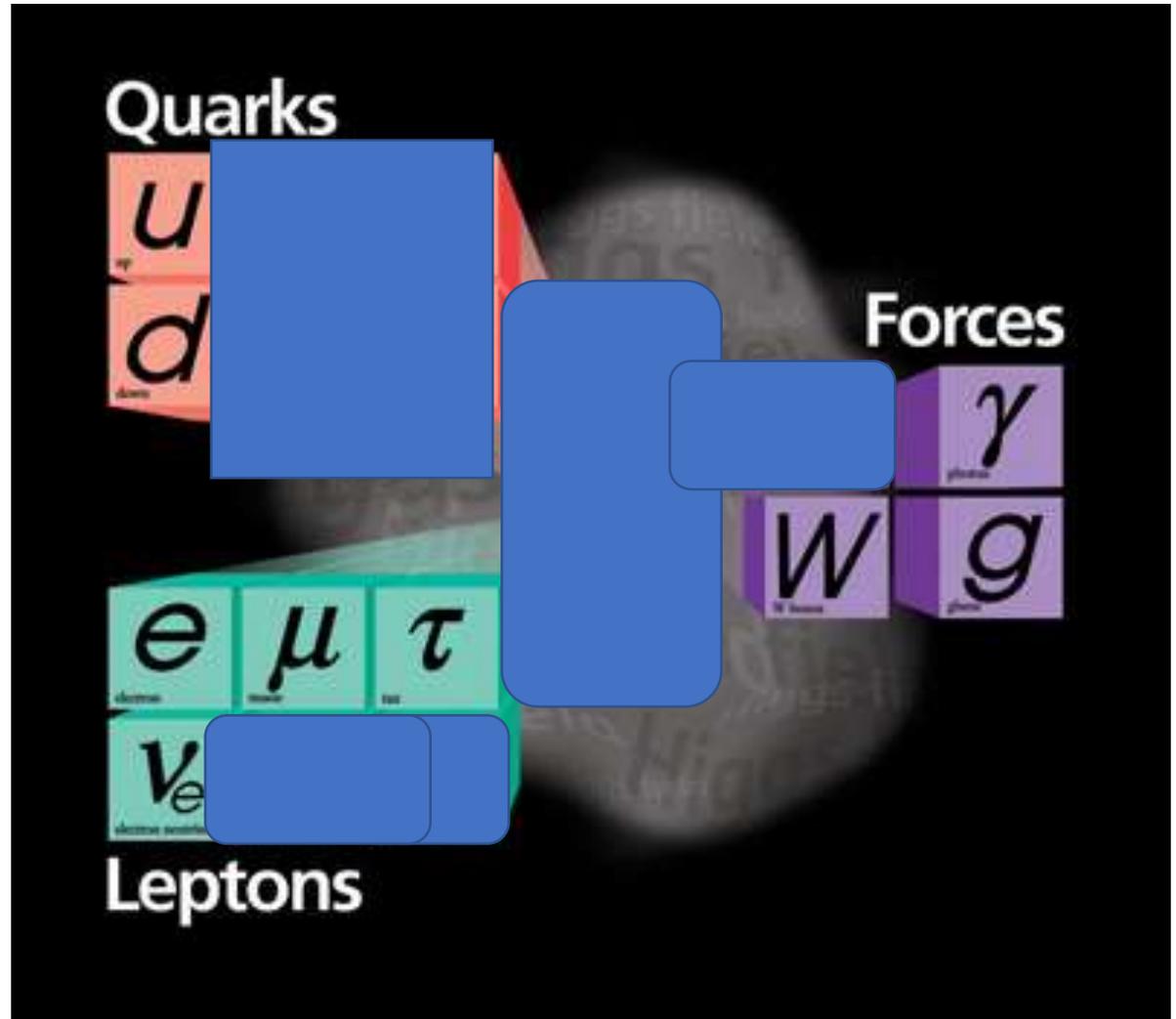


Image : Fermilab

Conclusions provisoires ...

- **Il n'y a pas ici à proprement parler d'interactions faibles ...** seulement l'effet aux énergies usuelles de l'existence d'une échelle de masse plus élevée ...(d'ailleurs, le W lui-même a un temps de vie de l'ordre de 10^{-25} s)
- Une unification des interactions se dessine, sur le modèle de l'électrodynamique avec unification des couplages.

Des mesures de précision à basse énergie (1 GeV), permirent d'inférer la présence de particules beaucoup plus massives (80 GeV), alors que les accélérateurs ne permettaient pas encore de les produire.

- Mais qu'est-ce qu'une loi physique?
- Les interactions fondamentaleset les autres
- Le domaine de validité, mais au-delà?
- Les particules, nos outils, et de nouvelles interactions fondamentales
- Y a-t-il des interactions faibles ?
- **Le virage théorique – les symétries**
- La brisure de symétrie et les scalaires :
un mal nécessaire ou un indice ?
- La violation de la parité gauche-droite et les limitations de l'approche purement théorique ...le dernier mot à l'empirisme!
- De nouvelles interactions « faiblardes » ?

- La défaite de l'antimatière
- Les problèmes qui subsistent...



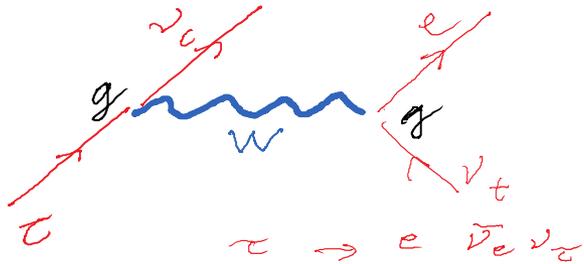
Le triomphe des symétries

Le triomphe des symétries ...

- La cohérence mathématique de l'approche (analogie avec l'électromagnétisme) imposait l'existence de symétries, ainsi, la présence du boson vectoriel W **imposait la présence d'une autre particule, le Z, de masse similaire ...**

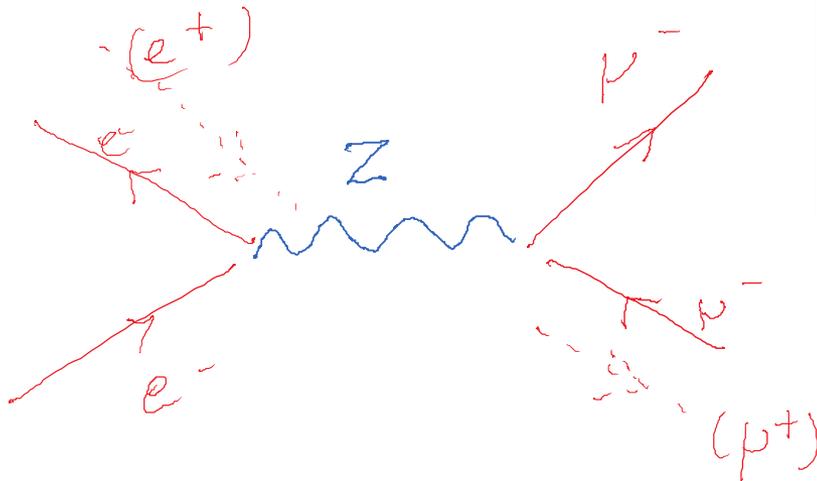
dont l'existence fut vérifiée...

Un mot à propos des diagrammes de Feynman



Il s'agit avant tout d'un instrument de calcul, une façon de traduire les équations; Ici, la force « faible » intervient par la présence d'une ligne étiquetée W ... mais l'énergie nécessaire pour produire cette particule n'est pas présente... On parle de « particule virtuelle », ... il s'agit surtout d'une façon de symboliser le calcul ...

Ici, le processus peut devenir réel: la collision d'un électron et d'un positon à haute énergie au CERN produit un boson Z bien réel, qui se désintègre ensuite en une paire muon – antimuon



A noter que la même ligne décrit une particule « sortante » ou une antiparticule « entrante ».

La découverte des bosons W et Z au CERN (1983) sera un triomphe du Modèle Standard.

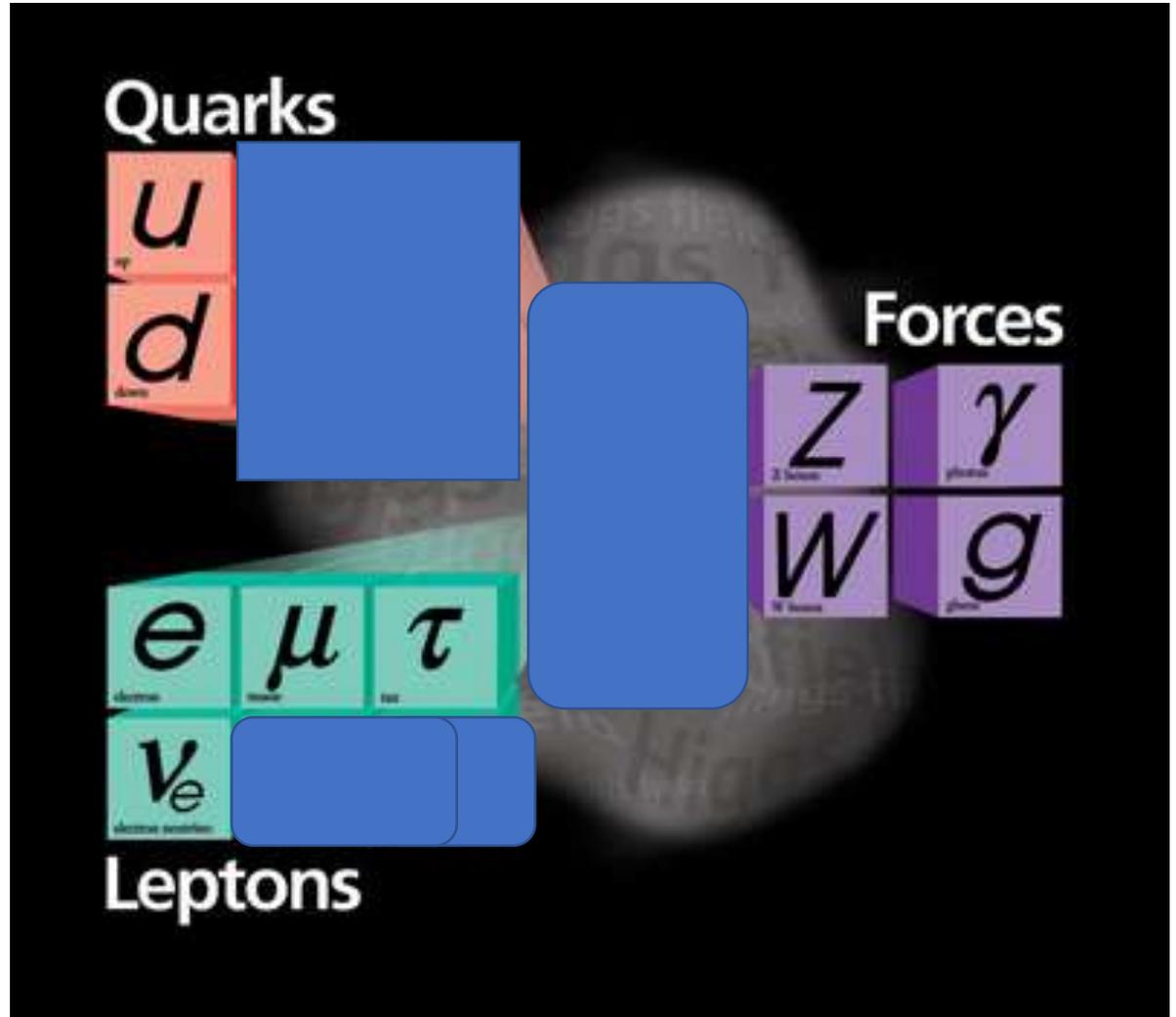


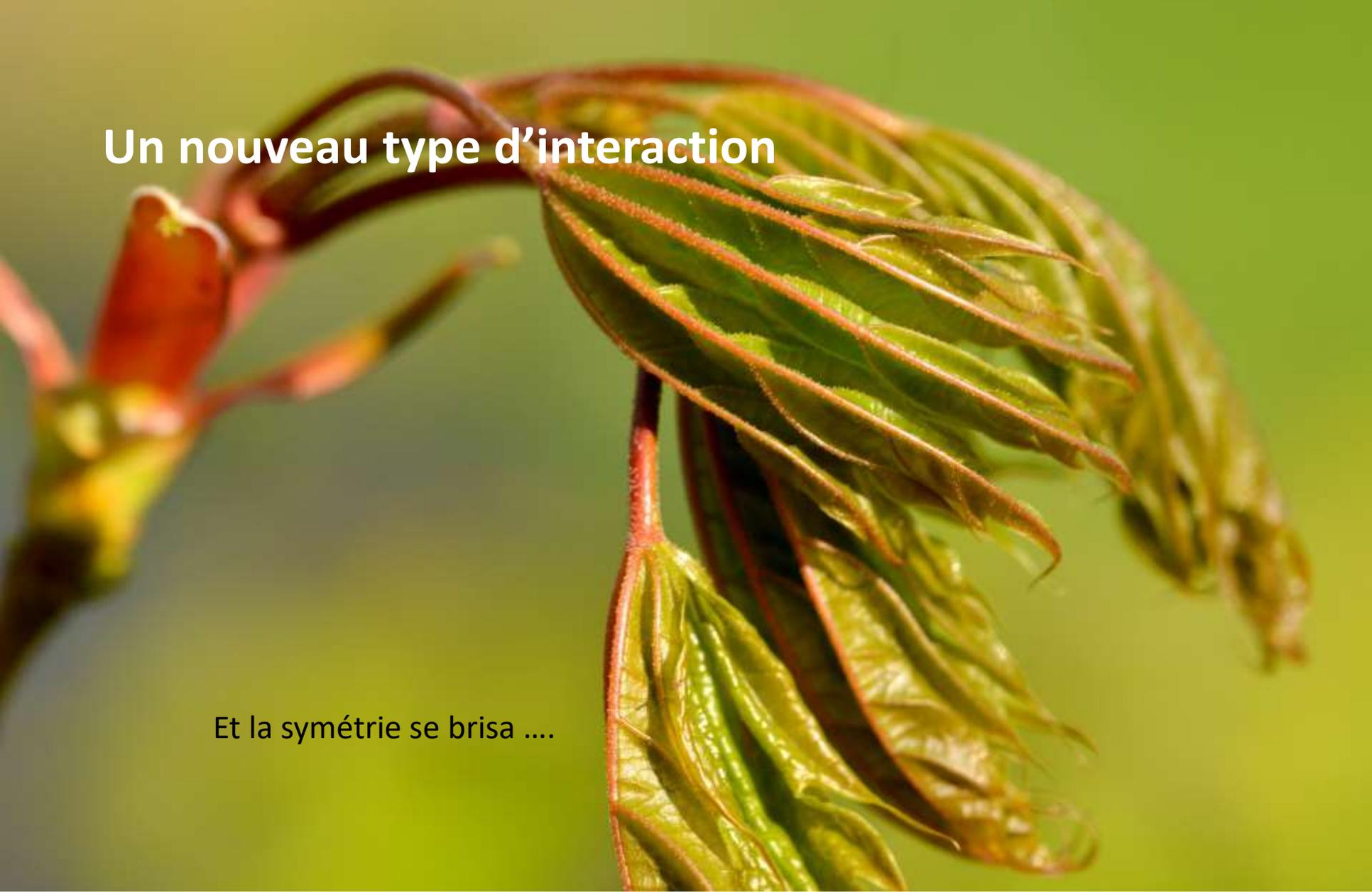
Image : Fermilab

L'importance des travaux de Brout, Englert et Higgs, c'est de montrer que toutes les interactions sont de même nature, mais ne diffèrent que parce que certains des intermédiaires acquièrent de la masse, et d'autres pas

Les vecteurs de l'interaction faible W, Z et le photon γ sont diverses manifestations des mêmes forces ...

- Mais qu'est-ce qu'une loi physique?
- Les interactions fondamentaleset les autres
- Le domaine de validité, mais au-delà?
- Les particules, nos outils, et de nouvelles interactions fondamentales
- Y a-t-il des interactions faibles ?
- Le virage théorique – les symétries
- **La brisure de symétrie et les scalaires :**
un mal nécessaire ou un indice ?
- La violation de la parité gauche-droite et les limitations de l'approche purement théorique ...le dernier mot à l'empirisme!
- De nouvelles interactions « faiblardes » ?
- La défaite de l'antimatière
- Les problèmes qui subsistent...

Un nouveau type d'interaction

A close-up photograph of a plant branch. The leaves are bright green with prominent, reddish-brown veins and serrated edges. A reddish-brown flower bud is visible on the left side of the branch. The background is a soft, out-of-focus green.

Et la symétrie se brisa

Toutefois, une pièce du « puzzle » manquait: les symétries supposées, (comme celle correspondant à la conservation de la charge électrique – la raison pour laquelle il faut 2 fils pour faire fonctionner un appareil électrique)

devaient aussi conduire à des W et Z sans masse ...

*Il y a une symétrie entre eux, W, Z et Photon γ
Mais cette symétrie est brisée,
car les uns acquièrent une masse,
et l'autre pas ...*

A cette roulette, le photon a gagné!



Crédit image : Toni Lozano, Wikimedia commons,

Pour donner une masse aux W et Z,
la symétrie (dite *de jauge*) entre interactions doit
être brisée « spontanément » .

La solution que nous observons a moins de symétrie
que les équations qui les gouvernent ...

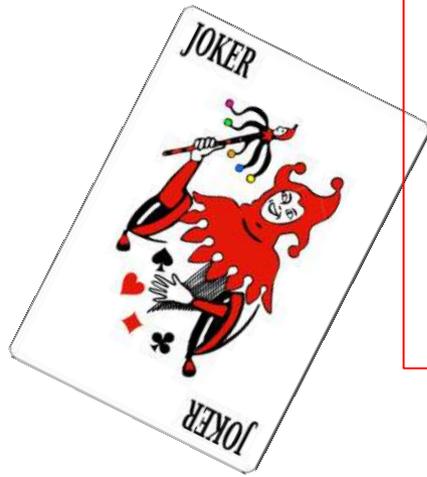
Électro-
magnétisme



Interaction faible

Au départ, l'image de la supraconductivité (les paires de Cooper) laissait
penser à une brisure « dynamique » due aux interactions
elles-mêmes...

Mais l'histoire du Modèle Standard a introduit UN JOKER (peut-être vu comme
une étape transitoire : **le Boson scalaire H ou boson de Brout-Englert-Higgs**)

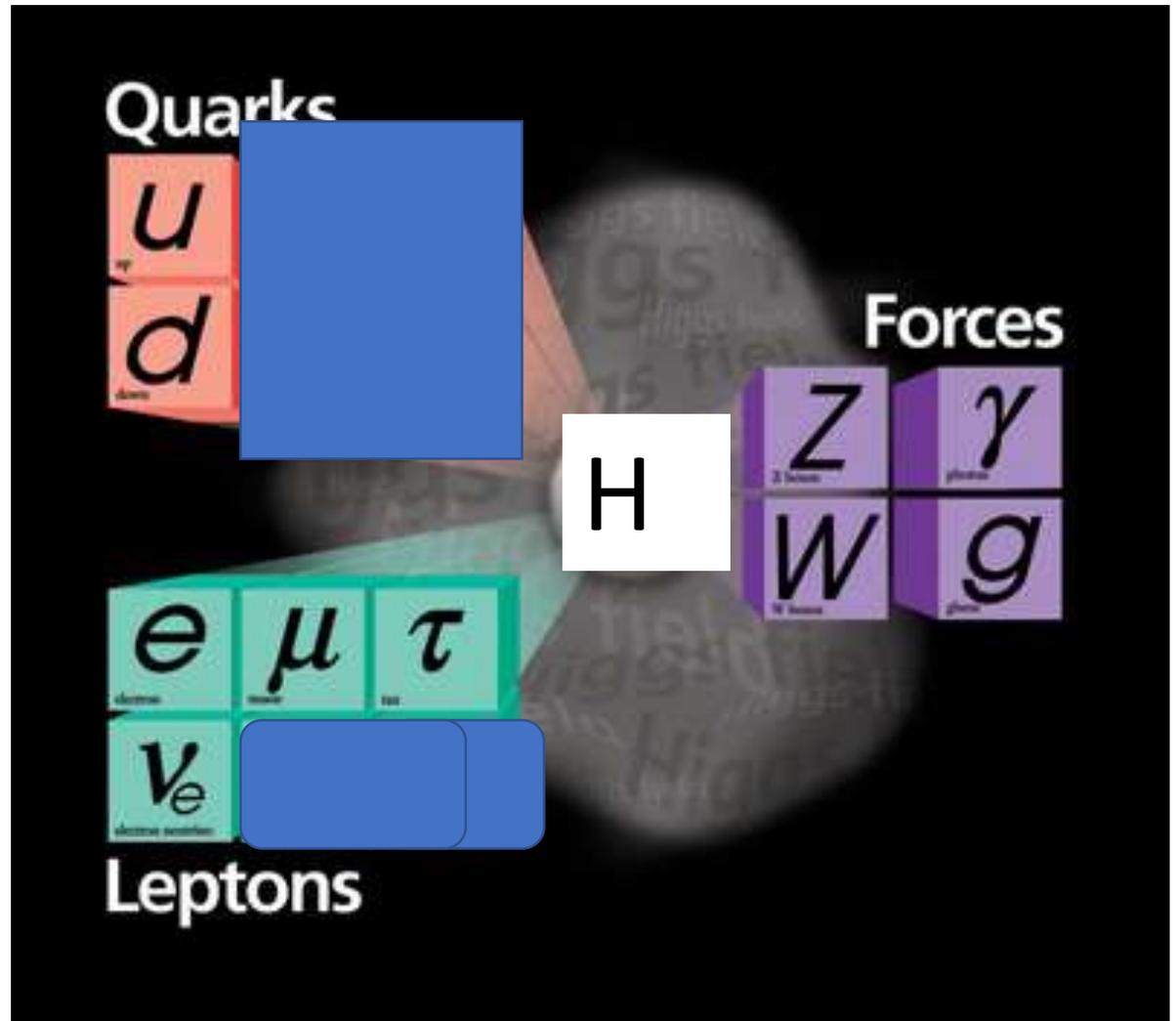


le Boson scalaire H ou boson de Brout-Englert- Higgs



Pourquoi dire que le scalaire est un « joker » ?

C'est en quelque sorte une solution de facilité, une particule facile à introduire dans une théorie, mais le manque de contraintes entraîne un prix: une grande flexibilité s'accompagne d'un grand nombre de paramètres, là où les théories de jauge évoquées plus tôt tendaient à l'unification des couplages.

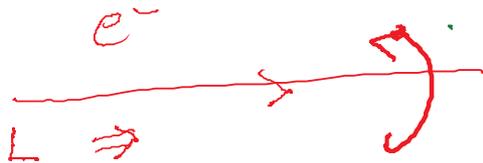


Le boson H est le premier scalaire découvert,
Nous verrons que c'est aussi la première particule *véritablement faiblement couplée*
à la matière que nous connaissons.

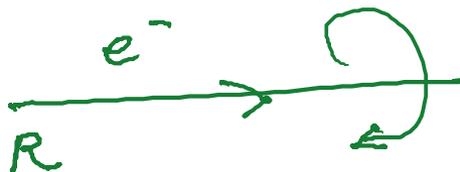
Explications un peu:
Qu'est-ce qu'un scalaire, qu'est-ce que le spin?



A haute énergie (et en particulier à celles pratiquées au CERN,
l'électron, comme tous les fermions chargés (quarks, leptons ..) apparaît sous deux
états distincts:



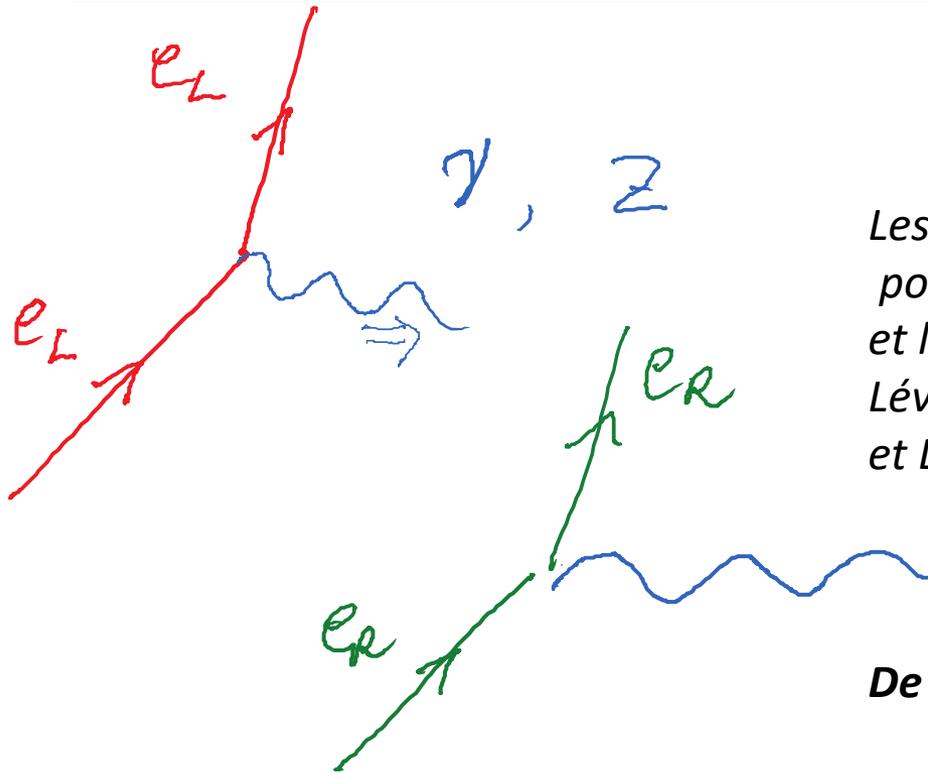
e_L Se comporte comme s'il tournait sur lui-même,
à gauche (lévogyre) dans le sens du mouvement



e_R Idem , mais à droite (dextrogyre)

Un match bien étrange ...

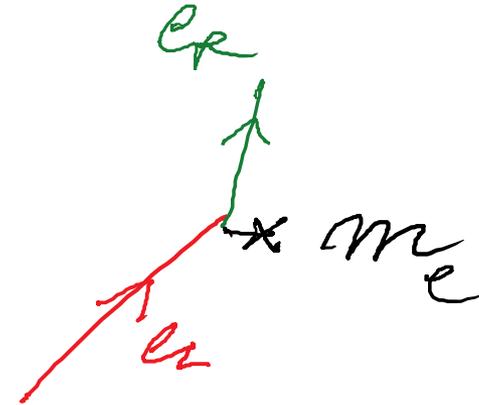
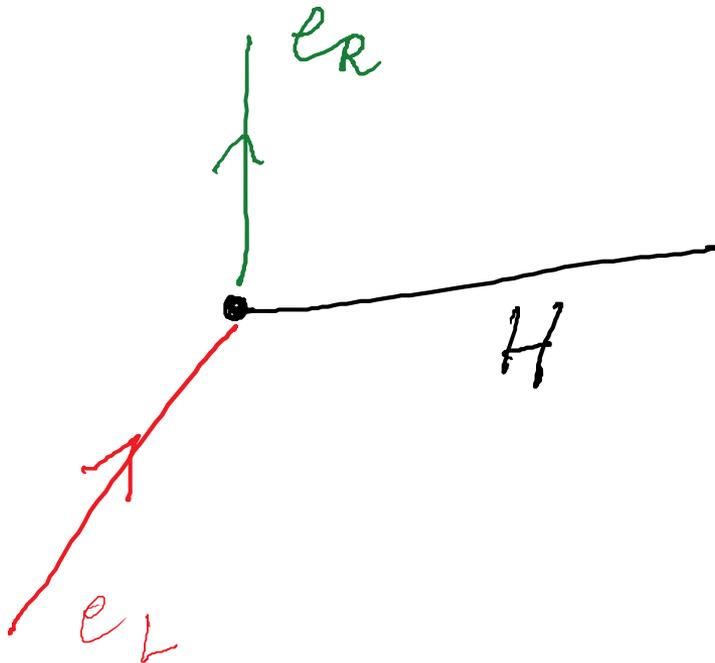
On peut penser à ces particules (bien qu'elles soient ponctuelles) comme à des balles de tennis: jusqu'ici on a assistait à des échanges où toutes les balles ont un « effet » !



Les vecteurs d'interaction (photon, W, Z, ...) portent eux aussi un spin et leurs interactions gardent les particules Lévo-gyres (L) et Dextro-gyres (R) séparées.

De bien curieuses raquettes !

**Le Boson scalaire – c'est le sens de son nom – ne porte aucun spin ..
C'est l'équivalent d'une balle « plate »
...et il mélange les deux états de l'électron**



Tout comme la masse d'ailleurs, et ce n'est pas un accident, car le scalaire est à l'origine de la masse des particules élémentaires (mais ne fournit que $< 2\%$ de la masse du proton!)



Outre d'être un objet d'un type nouveau, vu au départ comme une solution de facilité, le boson scalaire est la première particule qui interagit de façon **VRAIMENT FAIBLE** avec la matière qui nous entoure...

$$\lambda_e = \frac{g}{\sqrt{2}} \frac{m_e}{M_W} \approx 6 \cdot 10^{-6} \frac{g}{\sqrt{2}}$$

Une interaction « faiblarde »

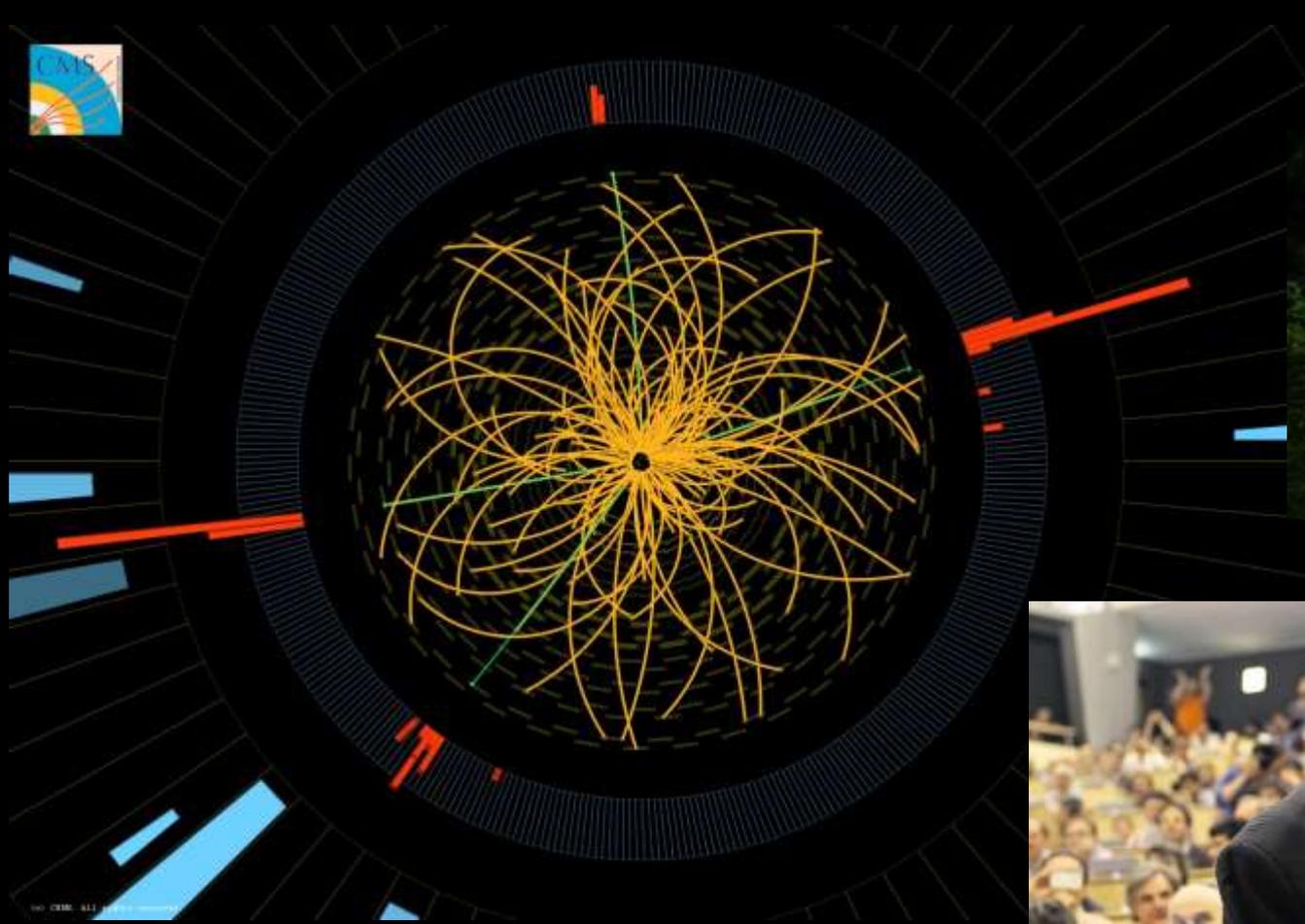


Image : K Graham



Image : CERN

Enfin, la découverte ...CERN,
Juillet 2012 ...

Et le droit à la « glace Nobel »



- Mais qu'est-ce qu'une loi physique?
- Les interactions fondamentaleset les autres
- Le domaine de validité, mais au-delà?
- Les particules, nos outils, et de nouvelles interactions fondamentales
- Y a-t-il des interactions faibles ?
- Le virage théorique – les symétries
- La brisure de symétrie et les scalaires :
un mal nécessaire ou un indice ?
- **La violation de la parité gauche-droite et les limitations de l'approche purement théorique ...le dernier mot à l'empirisme!**
- De nouvelles interactions « faiblardes » ?
- La défaite de l'antimatière
- Les problèmes qui subsistent...



Retour au
Modèle Standard,

Les limites des
symétries
postulées

...

*La bande au professeur Nimbus est arrivée
Qui s'est mise à frapper les cieux d'alignement ...*

Georges Brassens, « Le Grand Pan »

Archives INA

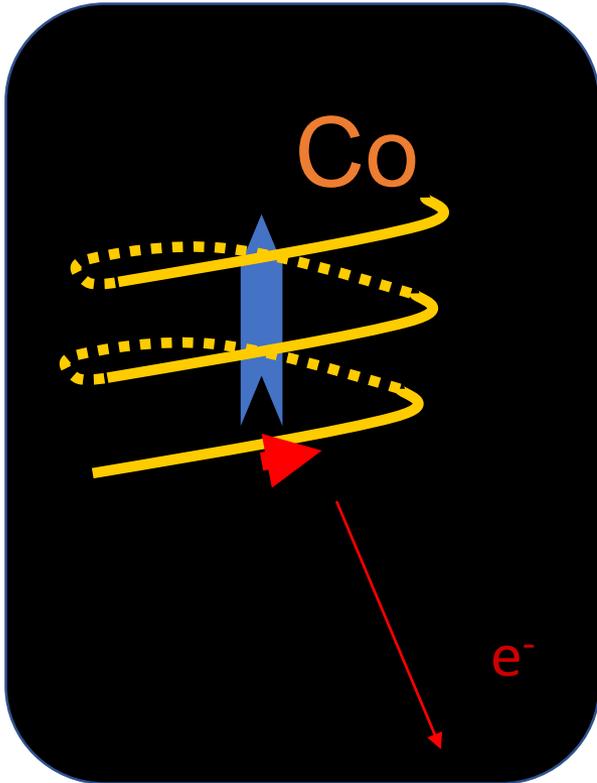
<http://www.youtube.com/watch?v=SaKeQjjzExA>

Mais parfois, les symétries les plus évidentes ne sont pas respectées ...

Ce fut une surprise que la parité gauche-droite soit violée

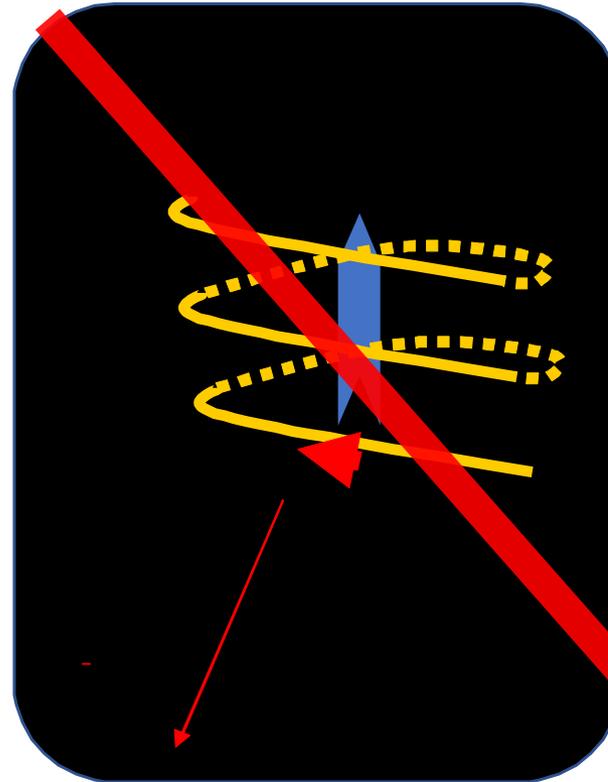
L'empirisme triomphe!

1950 's



(enroulement selon
« la main droite »)

L'autre côté du Miroir



Impossible à
réaliser:
L'électron partirait
dans la direction
opposée

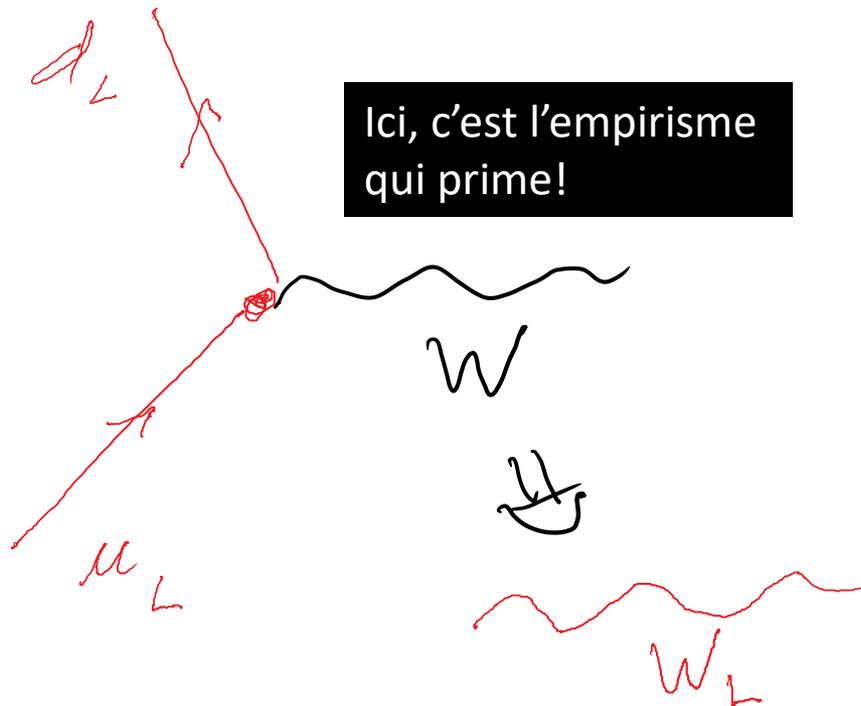
(enroulement selon
« la main gauche »)

Un vilain fait qui brise une belle symétrie (ou une belle théorie)

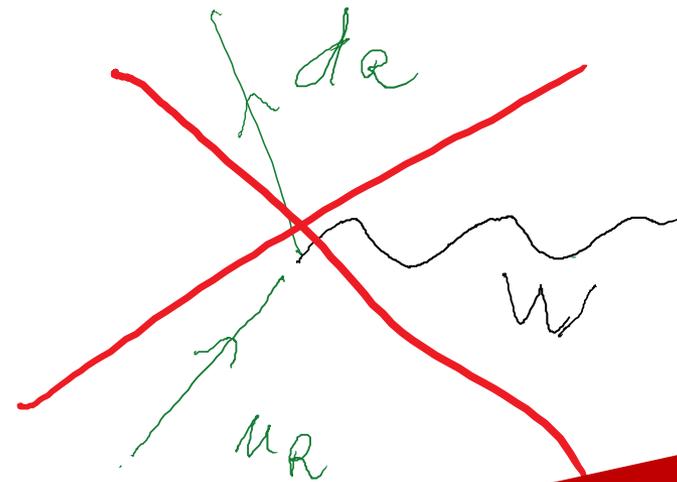
Une digression (et un anachronisme)

Malgré la puissance de l'approche théorique basée sur les symétries (depuis les années 1960), même les symétries les plus évidentes peuvent être violées ...

Les interactions faibles violent ainsi la symétrie gauche-droite ... les particules « dextrogynes » n'interagissent pas avec les bosons W



Ici, c'est l'empirisme qui prime!



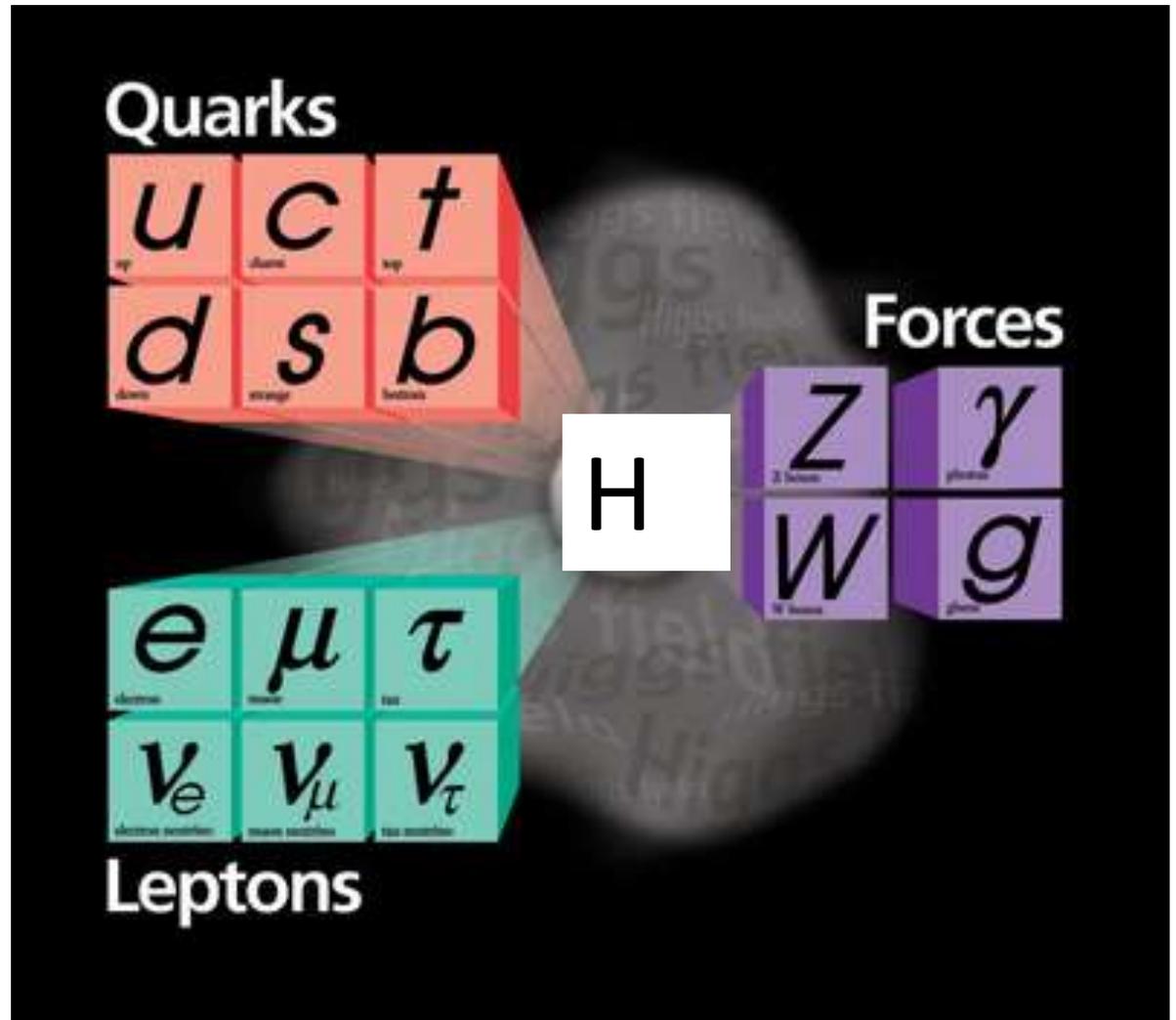
Remarque: la violation de parité n'a RIEN à voir avec les neutrinos Elle existe dans des processus où ils n'interviennent pas ...

- Mais qu'est-ce qu'une loi physique?
- Les interactions fondamentaleset les autres
- Le domaine de validité, mais au-delà?
- Les particules, nos outils, et de nouvelles interactions fondamentales
- Y a-t-il des interactions faibles ?
- Le virage théorique – les symétries
- La brisure de symétrie et les scalaires :
un mal nécessaire ou un indice ?
- La violation de la parité gauche-droite et les limitations de l'approche purement théorique ...le dernier mot à l'empirisme!
- **De nouvelles interactions « faiblardes » ?**
- La défaite de l'antimatière
- Les problèmes qui subsistent...

L'instabilité des familles

Les propriétés étranges
des interactions « faiblardes »

Au fil des recherches, de nouvelles familles de particules ont été découvertes (s , τ), certaines (c , t , b) étant d'ailleurs prédites par des arguments théoriques



Les saveurs: une constatation empirique,
 un échange entre extrapolations théoriques (le mécanisme de Glashow Iliopoulos
 Maiani, -> 2^{ème} famille, les travaux de Cabibbo, Kobayashi, Maskawa -> 3^{ème} famille) et
 découvertes expérimentales.

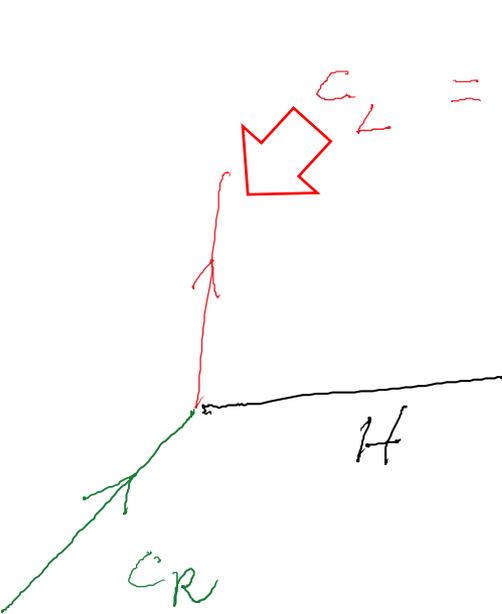
Aboutissant au schéma : (nous avons utilisé 1, 2, 3 pour désigner les familles L)



Si seules les interactions « fondamentales » (faible, électromagnétique et forte),
 agissent, chacune des familles est stable: elles ne communiquent pas ...
 Toutefois, nous ne les observons pas autour de nous

Le boson scalaire H apparaît ici pleinement comme une NOUVELLE INTERACTION.

Il agit dans une direction différente, indépendante des interactions faibles, et définit les états « de masse » des quarks.



$$C_L = \alpha u_{1L} + \beta u_{2L} + \gamma u_{3L}$$

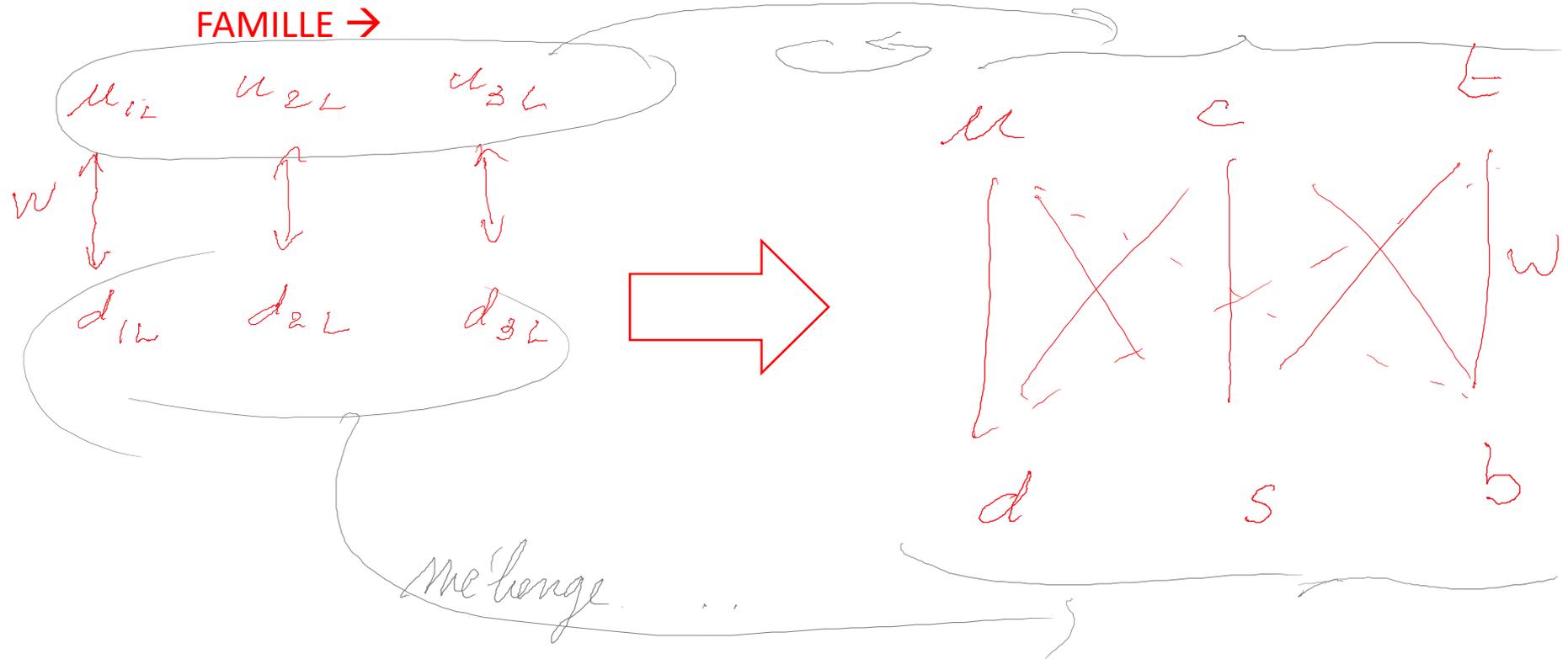
Mélange des familles ..
Un rôle fondamental, mais pas encore
« compris » des scalaires.

$$u_L = m \quad u_{1L} + \frac{1}{2} u_{2L} + \dots + u_{3L}$$

$$C_L = \alpha \quad u_{1L} + \beta u_{2L} + \gamma u_{3L}$$

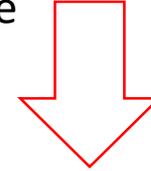
$$C_L = m \quad u_{1L} + \frac{1}{2} u_{2L} + \dots + u_{3L}$$

Si nous privilégions maintenant la base de « masses » (ce que font les accélérateurs, puisque les particules les moins massives sont les plus faciles à produire), l'image change alors,



et seule la famille la plus légère reste stable.

L'unification des interactions nous a permis de « comprendre » cette colonne



particule	Masse (GeV/c²)	« temps de vie »
lepton τ	1.777	$2.9 \cdot 10^{-13}$ s
neutron	0.9396	880 s
proton	0.938	$> 10^{+31}$ années
muon	0.113	$2.2 \cdot 10^{-6}$ s



Mais nous nous posons maintenant un nouveau défi ... comprendre les masses!

L'origine du spectre de masses ?

Particule (quark)	Masse	Particule (lepton)	
u	(estimé) 0.002 GeV	electron	0.000549 GeV
d	(estimé) 0.005 GeV	neutrino 1	< 1eV = 0.000001 GeV
s	(estimé) 0.096 GeV	muon	0.113 GeV
c	1.27 GeV	neutrino 2	< 1eV = 0.000001 GeV
t	173 GeV	tau	1.776 GeV
b	4.18 GeV	neutrino 3	< 1eV = 0.000001 GeV

Pour chaque particule, la masse correspond à un coefficient de couplage ARBITRAIRE au boson H.

Les interactions scalaires jouent un rôle essentiel, mais ne sont PAS COMPRISES .. Alors que nous approchons d'une unification des forces fondamentales, elles introduisent un grand nombre de paramètres, incontrôlés, s'étagant sur de nombreux ordres de grandeur (*6 ordres de grandeur pour les particules chargées, > 12 si on tient compte des neutrinos*).

Ils sont l'emblème de particules « très faiblement couplées » à la matière usuelle (première famille)

Les scalaires (dont le H) sont-ils une force fondamentale, ou l'indice d'autres interactions, encore à découvrir ?

In tempore non suspecto ... UNE théorie prédisait des scalaires fondamentaux. La SuperSymétrie (SuSy) associe scalaires et fermions, fermions et vecteurs. (Pierre Fayet y a fait allusion dans son introduction) ... elle prévoyait donc des SCALAIRES FONDAMENTAUX.

Elle n'explique pas les couplages 'baroques » du H, **mais fournit une prédiction essentielle: le H ne vient pas seul !**

La SuperSymétrie (SuSy) fournit une prédiction essentielle: le H ne vient pas seul !

Outre le H, (et c'est la prédiction la plus incontournable de la supersymétrie, il faut trouver 4 autres particules apparentées, deux chargées, (H^+ H^-) et deux neutres (h , a)
Comme le H, ces particules sont faiblement couplées (plus faiblement encore, selon toute vraisemblance) à notre univers familier.

A ce jour, aucun signe de la supersymétrie n'a encore été détecté, mais il n'est même pas obligatoire qu'elle soit réalisée à nos énergies ...

**A la différence des machines précédentes, le LHC est LA machine pour découvrir des particules faiblement couplées:
il allie une grande énergie (qui permet de produire des particules de masse élevée)
à une grande intensité des faisceaux (qui compense le faible couplage).**

Ce n'est pas un accident, il a été conçu pour vérifier l'existence du H, qui réunit ces propriétés.

*Cela explique aussi le délai énorme
entre la découverte des bosons W et Z (80 et 91 GeV) (1983)
et celle du H (125 GeV), dont la masse n'est pas si différente (2012).*

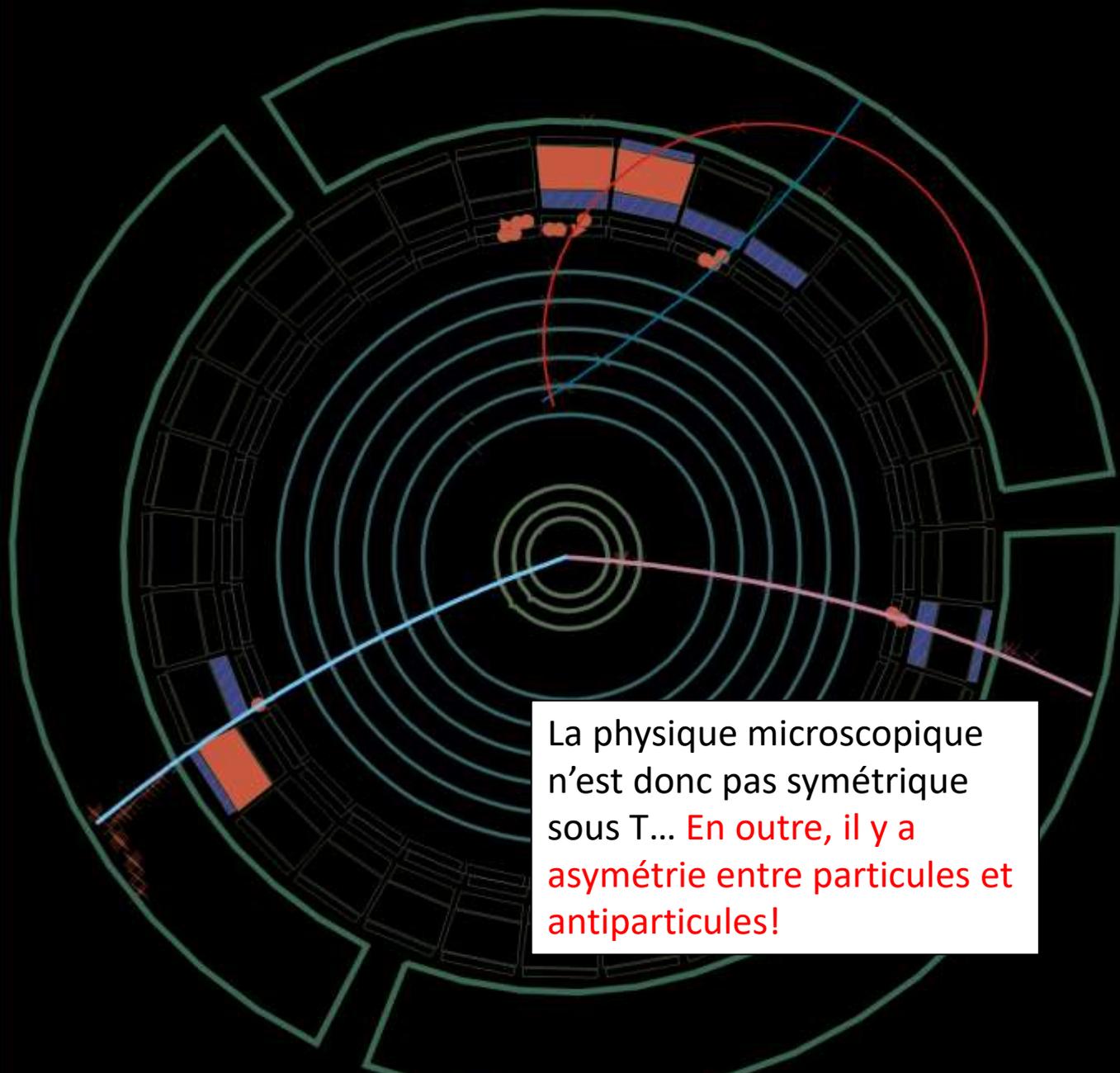
Mais les couplages scalaires sont aussi responsables d'autres surprises.

Si les interactions « de jauge » (W et Z) brisent la symétrie gauche-droite (Parité spatiale),

les interactions scalaires brisent les symétries:

- renversement du temps et
- particule-antiparticule (CP)

- Mais qu'est-ce qu'une loi physique?
- Les interactions fondamentaleset les autres
- Le domaine de validité, mais au-delà?
- Les particules, nos outils, et de nouvelles interactions fondamentales
- Y a-t-il des interactions faibles ?
- Le virage théorique – les symétries
- La brisure de symétrie et les scalaires :
un mal nécessaire ou un indice ?
- La violation de la parité gauche-droite et les limitations de l'approche purement théorique ...le dernier mot à l'empirisme!
- De nouvelles interactions « faiblardes » ?
- **La défaite de l'antimatière**
- Les problèmes qui subsistent...

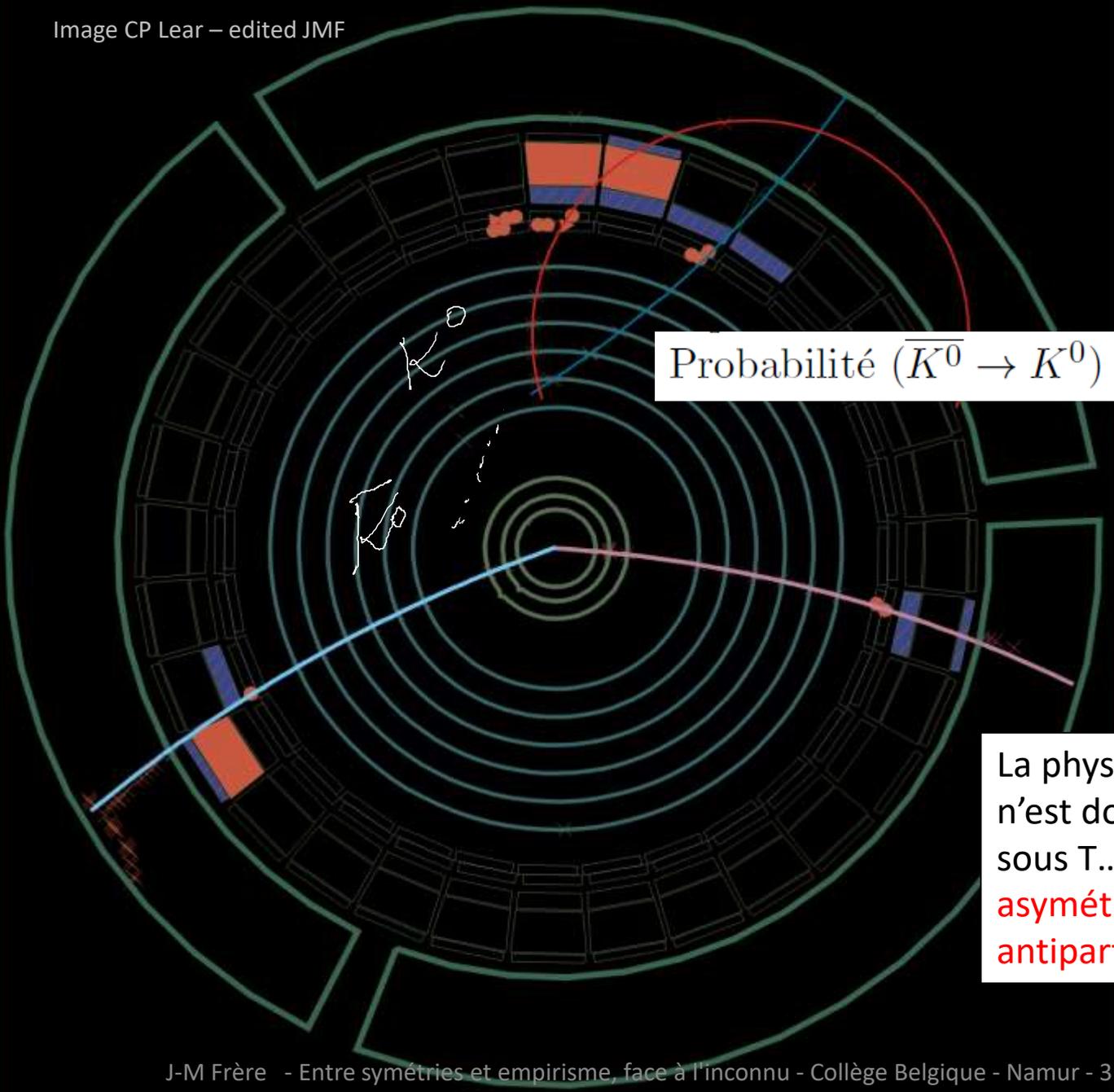


La physique microscopique n'est donc pas symétrique sous T... **En outre, il y a asymétrie entre particules et antiparticules!**

Un anti-K produit au centre du détecteur avec d'autres particules (K^-) se propage vers le haut, puis se désintègre. La trace du K^0 est invisible, car il est neutre

La désintégration, avec un e^+ (trajectoire représentée ici en rouge) montre qu'il s'est transformé en vol en K^- .

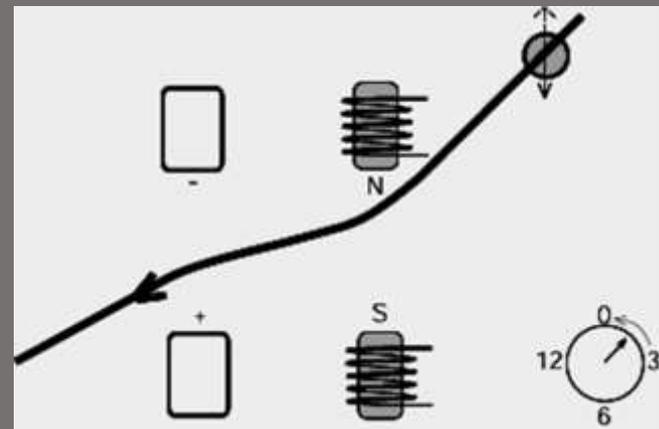
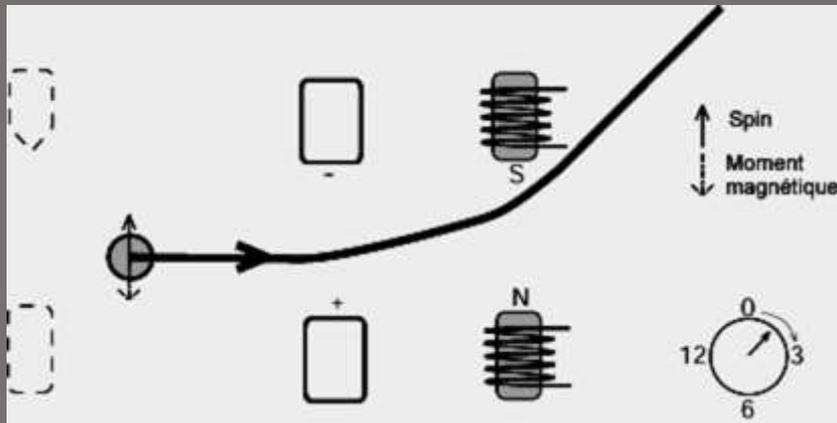
L'expérience montre que la transition anti-K vers K^- est légèrement plus probable (de 0.6 %) que la réciproque,



Probabilité ($\bar{K}^0 \rightarrow K^0$) > Proba ($K^0 \rightarrow \bar{K}^0$)

La physique microscopique n'est donc pas symétrique sous T... **En outre, il y a asymétrie entre particules et antiparticules!**

L'expérience montre que les interactions faibles sont associées à une irréversibilité microscopique,.....qui n'a rien à voir avec l'entropie (ici, un exemple n'impliquant qu'une seule particule dans l'hypothèse où l'on peut mettre en évidence le moment électrique dipolaire du neutron.... Ce n'est pas encore le cas



Irréversibilité microscopique

Cette flèche du temps est-elle indépendante du temps entropique d'une part, et de l'expansion de l'Univers par ailleurs?

Tant la présence de 3 familles (c'est ainsi qu'on l'avait prédite !) que les couplages du scalaire (6 masses, 3 angles de mélange, 1 phase violant CP) sont responsables de cette violation du renversement du temps et de la symétrie « particule-antiparticule » (CP).

*Un mot sur l'antimatière: rien d'effrayant,
une prévision de la mécanique quantique relativiste: à toute particule est associée une antiparticule de charge(s) opposée(s).
Mais on n'en voit guère autour de nous (sauf si elle est « fabriquée » spécialement, par exemple celle utilisées en médecine dans les caméras à positons.*

La défaite de l' antimatière...

Dans une approche cosmologique, il est logique de supposer que la matière a été créée (sous forme de paires particules – antiparticules) par l'interaction gravitationnelle. Dans ce contexte, on s'attend à voir autant de matière que d'antimatière,

hors, c'est loin d'être vrai ... on ne voit aucune antimatière autour de nous comme la majorité de la matière et de l'antimatière s'annihilent en photons, on mesure

$$\frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} \sim 6 \cdot 10^{-10}$$

Nous avons tous les mécanismes dans le Modèle Standard pour expliquer qu'une asymétrie entre matière et antimatière se développe, mais pas à un taux suffisant!

De nouvelles sources d'asymétrie sont donc nécessaires

Un candidat possible: des neutrinos très lourds (leptogénèse),
Difficile à confirmer , mais infirmable si on découvre un WR au LHC.



Pour nous résumer ...

L'interaction scalaire (boson scalaire de Brout-Englert-higgs) introduite au début comme un « joker » pour expliquer la différence entre photon et bosons W et Z, s'avère un nouveau type d'interaction.

- C'est la première interaction véritablement faiblement couplée aux particules usuelles.
- Pour le moment, elle paraît très arbitraire: elle nécessite un grand nombre de paramètres dans lesquels nous ne discernons pas de logique (de 10^{-6} à 1 pour les masses de l'électron et du quark top, 10 paramètres pour les masses et mélanges des quarks, autant pour les leptons...)
- Elle est responsable de l'instabilité des 2 familles « lourdes » de particules
- Alors que les interactions faibles sont responsables de l'asymétrie entre « gauche » et « droite », (Parité), les interactions scalaires sont responsables de
 - L'asymétrie entre particule et antiparticule (CP)
 - L'asymétrie entre passé et futur (T)

$$P_{\text{proba}} (K^0 \rightarrow \bar{K}^0) \neq P_{\text{proba}} (\bar{K}^0 \rightarrow K^0)$$

Perspectives



D'autres interactions à découvrir ?

Alors que la montée en énergie du LHC n'a pas apporté de nouvelles particules, telles par exemple un W_R qui rétablirait la parité, (mais il peut se trouver à des énergies plus élevées).

Le domaine d'exploration se tourne vers les particules peu couplées, et, notamment, **celles responsables de la matière noire, ainsi que de nouveaux vecteurs intermédiaires (dark photon)**. Ici aussi, le LHC offre des perspectives intéressantes.

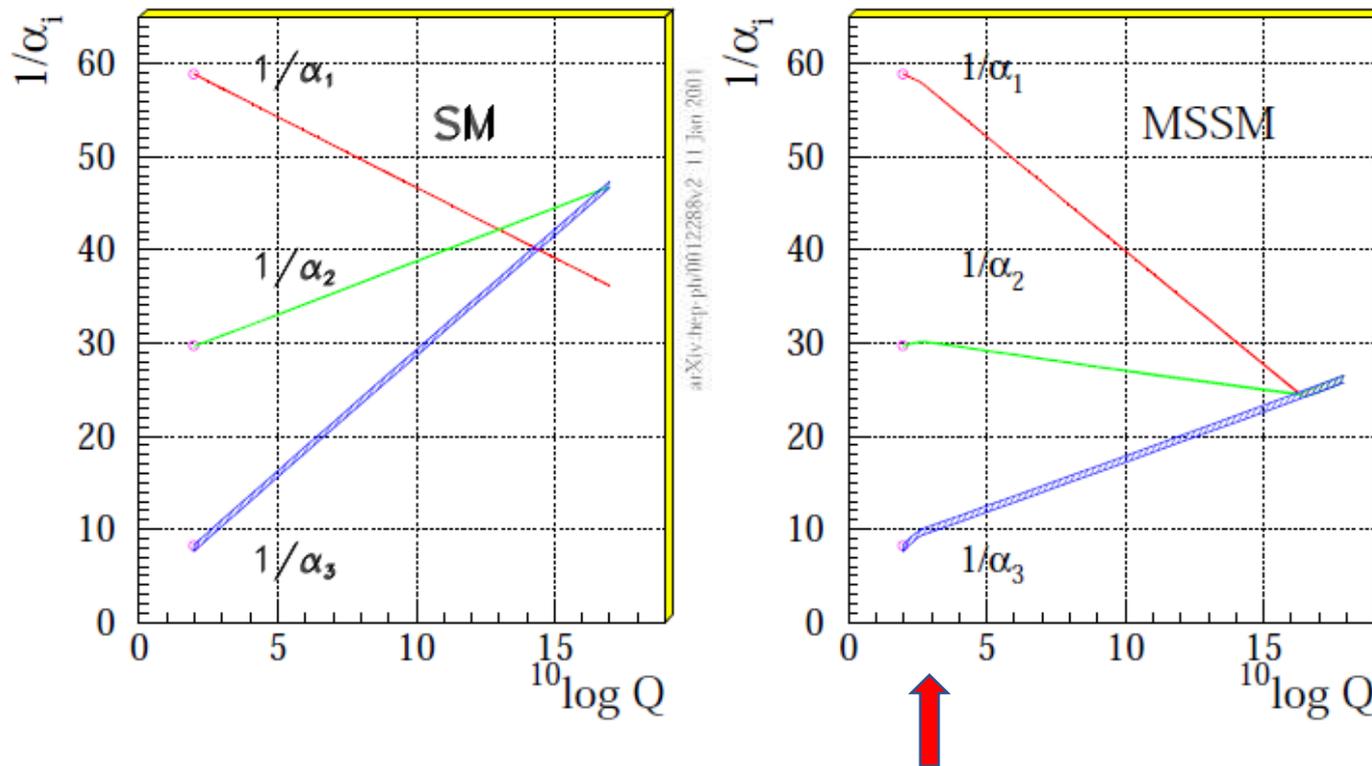
Des théories d'unification, par exemple entre interactions fortes et électrofaibles, sont probables $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, avec 3 couplages serait inclus dans $SU(5)$, $SO(10)$, voire $E(6)$ avec un seul couplage. Mais les échelles impliquées sont de l'ordre de 10^{16} GeV...hors de portée du LHC

Toutefois, l'unification n'est possible que si de nouvelles particules sont découvertes dans le domaine de masses du TeV ... un espoir donc !

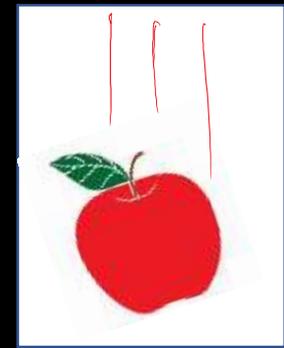
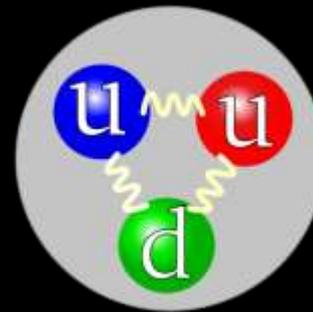
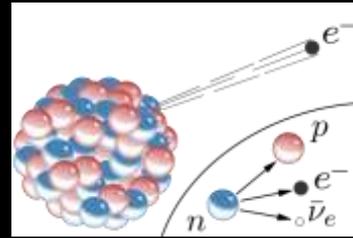
Des théories d'unification, par exemple entre interactions fortes et électrofaibles sont probables $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, avec 3 couplages serait inclus dans $SU(5)$, $SO(10)$, voire $E(6)$ avec un seul couplage. Mais les échelles impliquées sont de l'ordre de 10^{16} GeV...hors de portée du LHC. Toutefois, l'unification n'est possible que si de nouvelles particules sont découvertes dans le domaine de masses du TeV (voire 10 TeV ?) ... (mais on n'a aucune précision sur la valeur exacte): un espoir donc !

Unification of the Coupling Constants in the SM and the minimal MSSM

Picture D Kazakov



Maxwell, Einstein



Interactions
faibles

Interactions
fortes

Gravitation

Electro-Magnétisme

Unification électrofaible

Energie = 1 000 masses du proton
Test ultime au LHC ...

Grande Unification

Energie = 10 000 000 000 000 000 m_p

Théorie du Tout

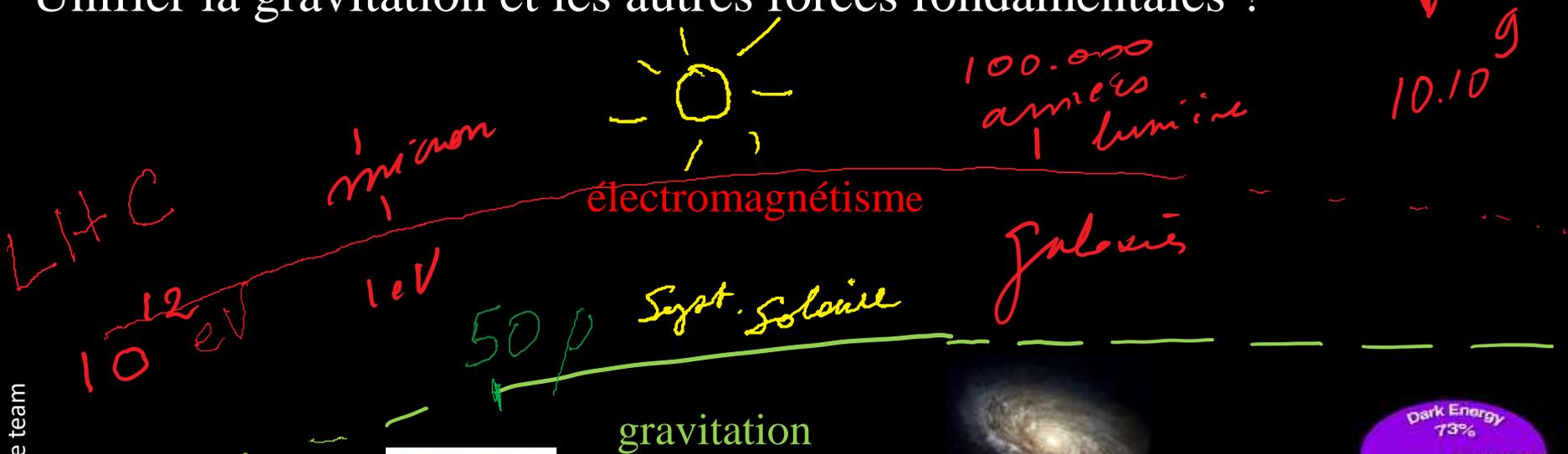
Energie de l'Univers,
Cosmologie

Crédits images:
Nassiba Tabti +
Wikimedia commons
[Inductiveloop](#)
[Arpad Horvath](#)

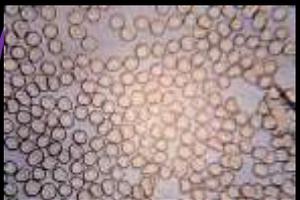


Théorie des Cordes ??

Unifier la gravitation et les autres forces fondamentales ?



Crédit images: LBL, Kapner et al, 1997, Hubble heritage team



Le comportement en $1/R^2$ n'est pas testé en-dessous de $1/20$ mm

gravitation



Il faut ajouter la matière noire ...depuis 1933...
 mais depuis 1990, on sait qu'il ne peut s'agir de « Jupiters » (naines brunes)



Il faut ajouter l'énergie noire (mi- 1990)

L'unification de la gravitation et des autres forces fondamentales pose problème à très courtes distances (ou très hautes énergies, de l'ordre de 10^{28} eV)
 Un candidat à l'unification est la théorie des cordes, mais aucune prévision spécifique n'a pu être testée à ce jour .

Le domaine d'exploration se tourne vers les particules peu couplées, et, notamment, **celles responsables de la matière noire, ainsi que de nouveaux vecteurs intermédiaires (dark photon)**. Ici aussi, le LHC offre des perspectives intéressantes.

Quant à l'unification entre les interactions électrofaible, forte et la gravitation, elle se heurte à des problèmes théoriques... Une solution est la théorie des cordes...mathématiquement séduisante. Malheureusement, malgré des décennies de recherche, **aucune prédiction solide n'en émerge encore.**

Notons aussi que les problèmes liés à l'unification se situent à très courte distance, (très haute énergie), là où la gravitation n'est pas testée.

Comprendre le spectre de masse ?

- Des particules chargées
- Des neutrinos (ce serait l'objet d'un autre cours)

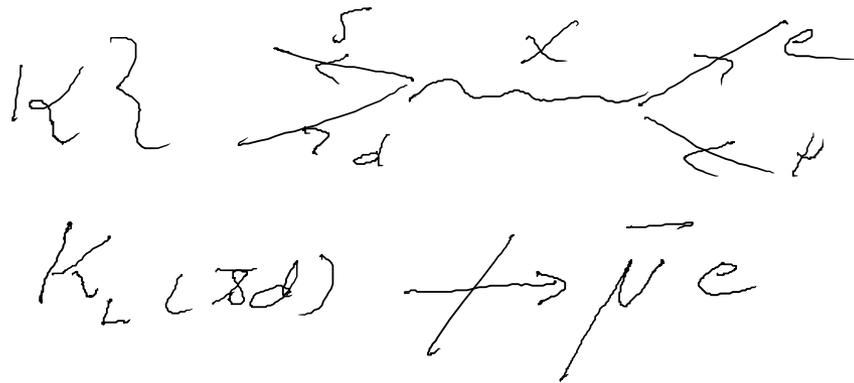
Une interaction reliant les familles ne devrait pas être visible avant des énergies supérieures à 100 TeV ... inaccessibles aux accélérateurs même en projet lointain!

L'argument de la précision.

- 1 Masse du proton ~ 1 GeV
- 1 TeV = 1000 * Masse du proton
- Masse du 80 ~ 81 * Masse du proton

Comme nous l'avons souligné au début de cet exposé, des mesures de phénomènes rares permettent de suggérer la présence de particules lourdes.

Ainsi, si nous pensons aux familles de fermions, la présence de symétrie les reliant amène à fixer des bornes inférieures très sévères, Par exemple:



Proba $\frac{K_L \rightarrow \bar{\mu} e}{\mu_L \rightarrow \text{all}} < 10^{-12}$

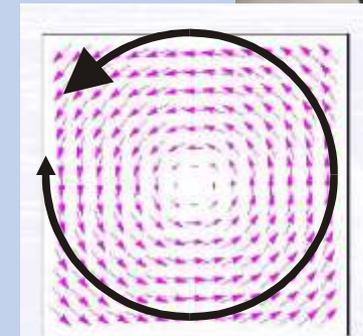
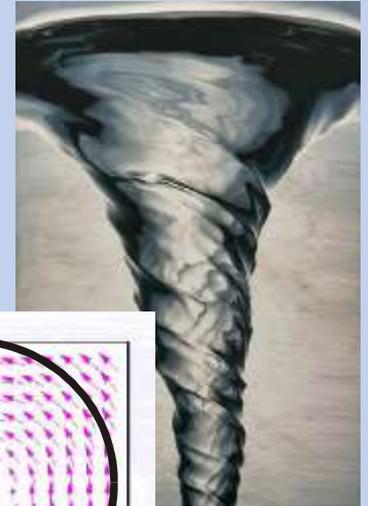
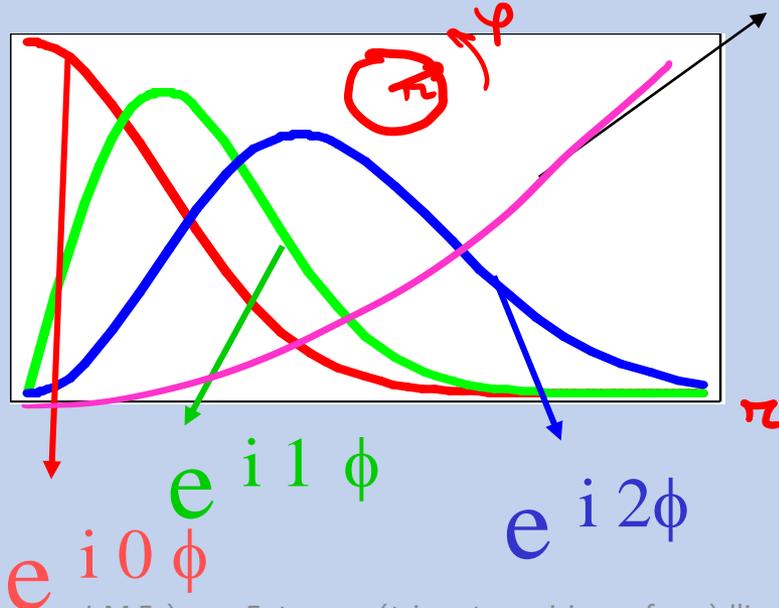
$\Rightarrow m_X > 100 \text{ TeV}$

En comparaison, les ambitions de précision au LHC (1% sur les couplages du H est une hypothèse assez optimiste) ne permet que d'atteindre des échelles de l'ordre du 1 TeV ... qui sont déjà explorées.

L'origine du spectre de masses est-elle plus exotique ?

Que les bosons H soient fondamentaux, liés à la supersymétrie ou le reflet d'une structure plus complexe, la question du spectre de masses subsiste. Une possibilité est liée aux dimensions supplémentaires (4+1, 4+2 dimensions), mais s'il y a moyen d'y trouver les rapports de masse très élevés qu'on observe, la motivation fondamentale fait encore défaut.

Par exemple, dans un modèle à (3+1) + 2 dimensions, une famille de fermions à 6D \rightarrow 3 familles à 4D localisées sur un vortex... avec des rapports de masses fixés par la géométrie



Crédits: photo
https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Natural_Phil
Graphiques: Troitsky, Libanov, JMF



Conclusions

Conclusions ?

Depuis les années '60, une unification des interactions, sur le modèle de l'électrodynamique s'est avérée incroyablement fructueuse, et nous pouvons décrire, avec une poignée de paramètres les interactions « faibles, électromagnétiques et fortes.

- L'approche à partir de la fin des années 60 s'est avérée très déterminée, avec des inférences contraignantes résultant de l'approche unificatrice et de l'évidence empirique
- Elle a abouti à la découverte annoncée des vecteurs d'interaction, W et Z, ainsi qu'à celle d'un (premier?) boson scalaire H

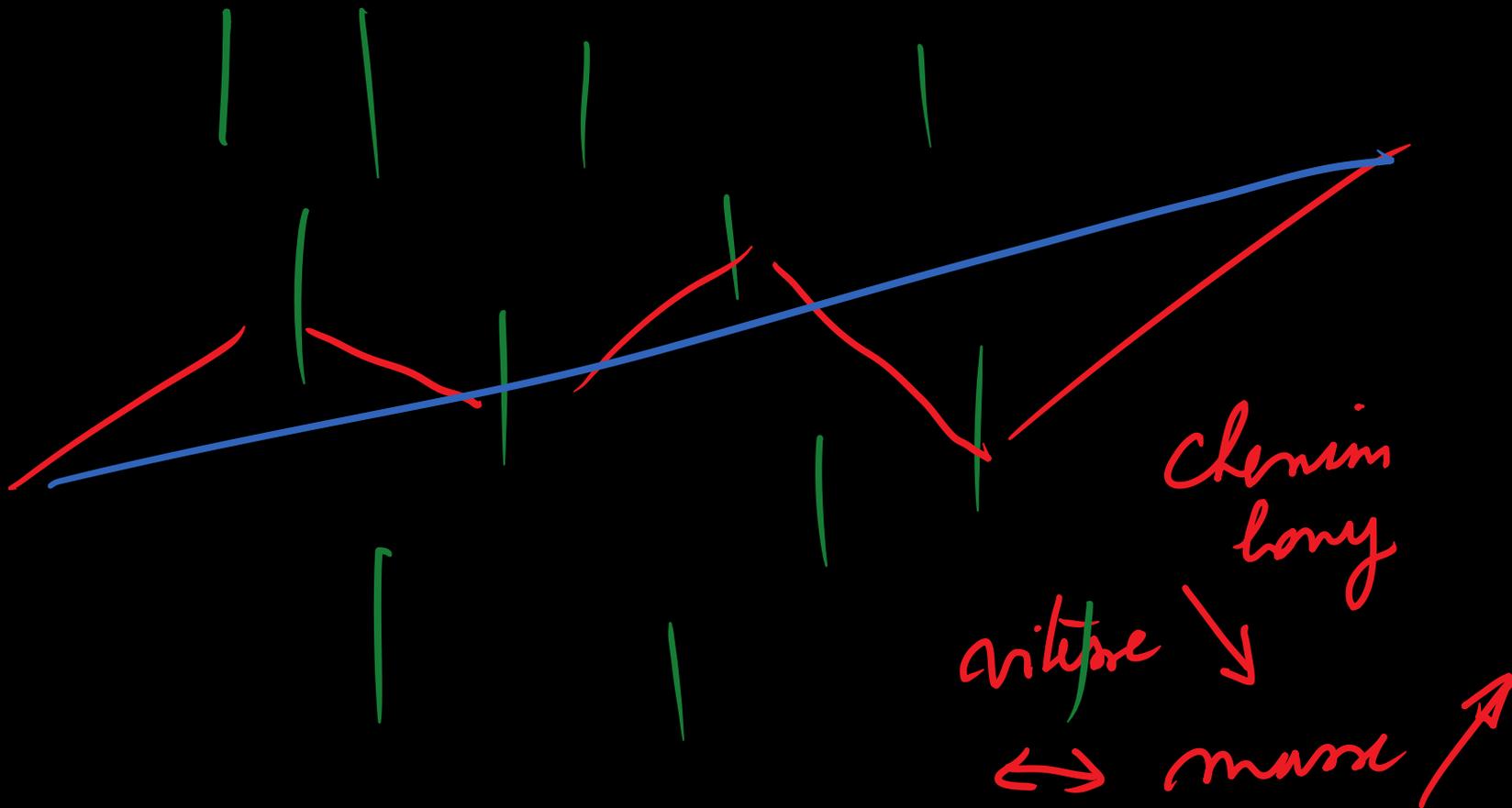
- Aujourd'hui le chemin paraît moins tracé, et si nous avons une théorie satisfaisante, nos ambitions ont grandi, et nous nous retrouvons, comme en 1960, devant un nombre de paramètres que nous voulons expliquer
- Ainsi, la question des masses s'est déplacée: au lieu de demander « qui donne la masse », **nous nous interrogeons sur l'origine du spectre étendu de masses des « fermions »** (u,c,t, d,s,b, e, muon, tau, ...et neutrinos), nombre de ces particules n'ayant été découvertes qu'au cours de la quête précédente.
- La nature du boson scalaire: est-il seul, est-ce le premier signe de la supersymétrie, comment comprendre ses couplages et sa relation à la brisure des symétries T et particule-antiparticule (CP)
- **Notre ambition s'est aussi étendue à décrire l'évolution de l'Univers,** et nous voulons alors expliquer:
 - L'évolution (expansion) de l'Univers (d'autres scalaires ?)
 - L'asymétrie entre matière et antimatière (en relation avec la nature des neutrinos ?)
 - La nature de la matière noire
 - L'unification entre gravitation et les autres forces fondamentales
- ...

Compléments

Pourquoi il donne de la masse aux vecteurs des interactions faibles (W,Z) et pas au photon?

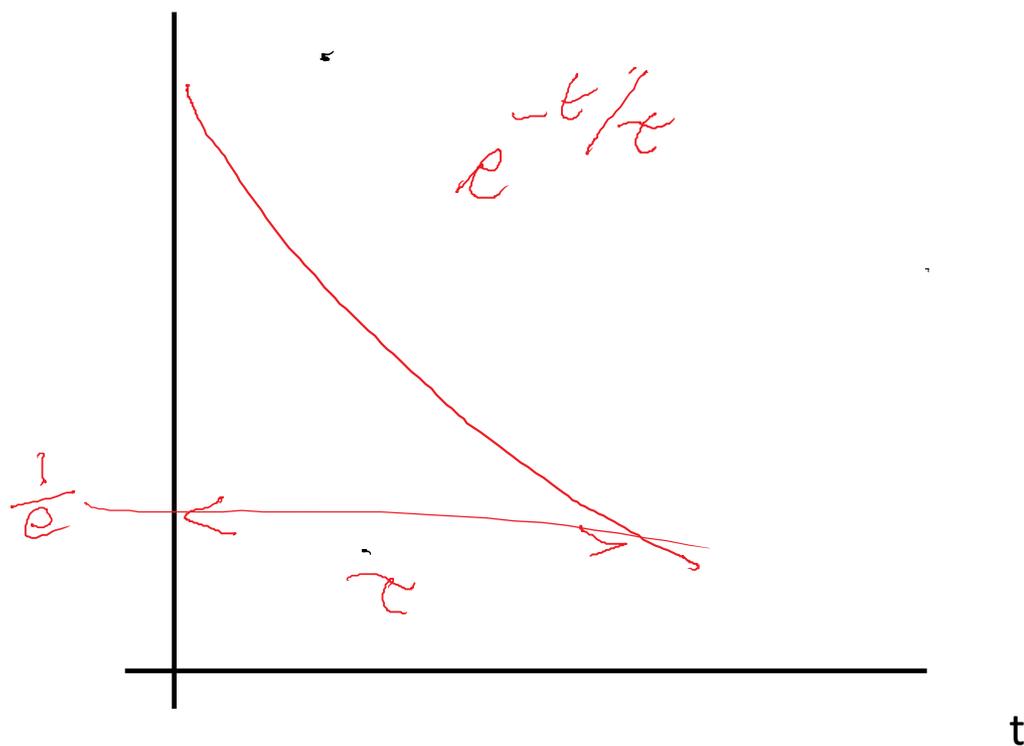
/ = scalaire

— W, Z
— γ

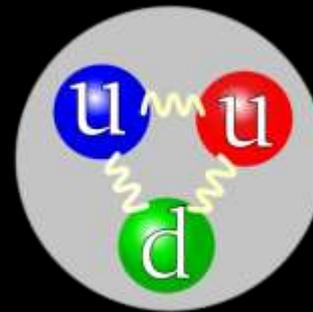
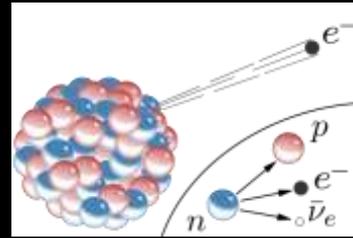


« Temps de vie » et probabilité de désintégration

Nombre de particules



Maxwell, Einstein



Interactions
faibles

Interactions
fortes

Gravitation

Electro-Magnetisme

Unification électrofaible

Energie = 1 000 masses du proton
Test ultime au LHC ...

Grande Unification

Energie = 10 000 000 000 000 000 m_p

Théorie du Tout

Energie de l'Univers,
Cosmologie

Crédits images:
Nassiba Tabti +
Wikimedia commons
[Inductiveloop](#)
[Arpad Horvath](#)



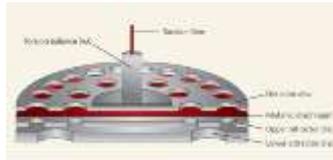
Théorie des Cordes ??

La découverte d'ondes gravitationnelles a-t-elle amélioré les choses ?

l'échelle du système de trous noirs,

PAS à la distance de l'objet! → pas (peu) de gain véritable sur ce plan

Mais confirmation s'il en est besoin de l'existence des ondes gravitationnelles, et suggestion du « graviton » y associé.



We find with 95% confidence that the mean-square low-frequency (< 200 Hz) noise in a length scale of $\lambda = 25$ μm and that an extra dimension must have a size $R \approx 44$ μm . Kaplan et al., 2007

1/20 mm



Terre-Soleil
= 8,3 minutes-lumière

Système solaire
Pluto: 5,5 heures-lumière

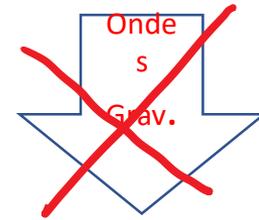
Ondes Grav.
GW
150914



Galaxies :
100.000 années lumière



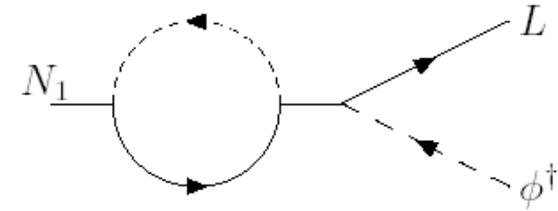
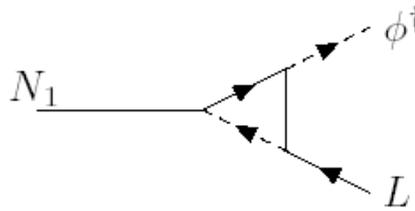
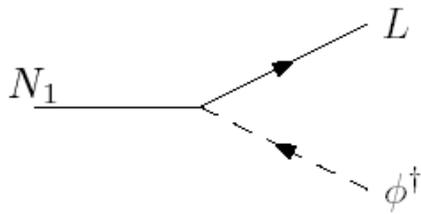
Univers :
> 10 milliards a-lumière



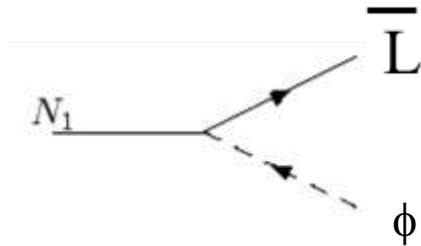
Non testé

OK, si on ajoute de la
matière noire
(non encore observée)

OK,
si on ajoute
de l'énergie noire
(non encore observée)



Le mécanisme de « baryogénèse » par « leptogénèse »



Un neutrino lourd N se désintègre de façon asymétrique, Préférentiellement en antileptons, par exemple, et le nombre leptonique ainsi généré est ensuite converti en nombre baryonique : nous !!!

Des mesures de basse énergie peuvent-elles confirmer la leptogénèse?

Pas directement, mais la découverte d'une masse de Majorana serait certes un encouragement, de même qu'une violation de la symétrie matière-antimatière dans ce secteur (qui est probable).

Est-il possible d'infirmer le schéma « leptogénèse » conduisant à « La défaite de l'antimatière » ?

En général, c'est très difficile, les particules invoquées se trouvant généralement hors de portée des accélérateurs (par 10 ordres de grandeur).

Toutefois, la présence d'un neutrino dextrogyre peut évoquer un W associé, Le W_R , partenaire plus lourd du W_L .

La découverte d'un W_R à un accélérateur près de chez vous infirmerait la leptogénèse !

ν_L	ν_R	Dirac	Majorana	Scalars	remarques
1	1	m	0	H	rien à signaler
1	1	m	M	H	Baryogénèse si M lourd
1	0		m	H + triplet	Pas de neutrino dextrogyre
... et d'autres variantes (neutrinos multiplier par 3 , pour 3 familles)					

Petite illustration de la créativité des théoriciens pour la masse des neutrinos.
D'autres schémas plus baroques existent (avec 3 neutrinos par famille, par exemple)