

D'un Boson à l'Univers ... et ensuite ?

Boson à l'Univers

1: Les interactions fondamentales *Jean-Marie Frère*

2: Le point, après plus de 50 ans de recherches


Barbara Clerbaux

3: Quelles nouvelles voies, quelles nouvelles expériences?

(rappels + débat) *JMF + BC + François Englert,*

médiateur :

Frédéric Soumois



Entre symétries
et empirisme,
face à l'inconnu ...

Jean-Marie Frère

,

- **Mais qu'est-ce qu'une loi physique?**
- Les interactions fondamentaleset les autres
- Le domaine de validité, mais au-delà?
- Les particules, nos outils
- De nouvelles interactions fondamentales;
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 ?

A white ruler with a scale from 0 to 30 centimeters is shown diagonally. The ruler has the brand name 'MINERVA' and 'MADE IN FRANCE' printed on it. A rubber band is placed on the ruler, forming a loop. The ruler also has a logo and 'M-5300' printed on it.

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...

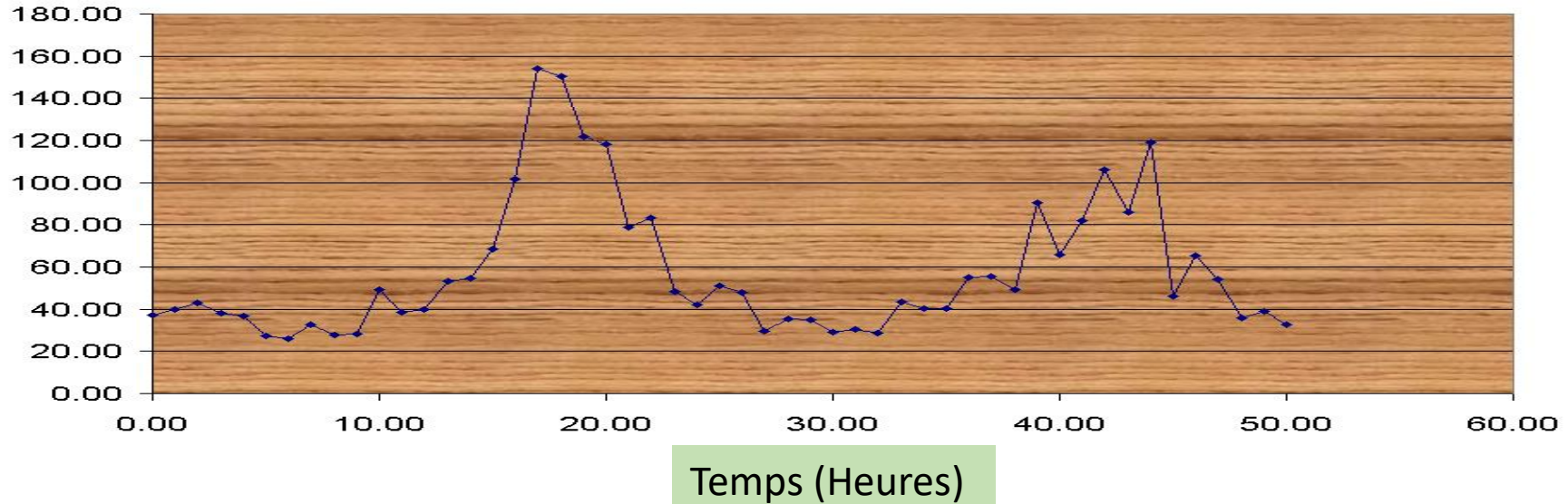
A titre d'exercice, prenons un objet un peu improbable:
Une bande élastique (« un élastique »)

[EL] = [unite:élastique]

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

Longueur de la table [EL]

Longueur de la table [EL]

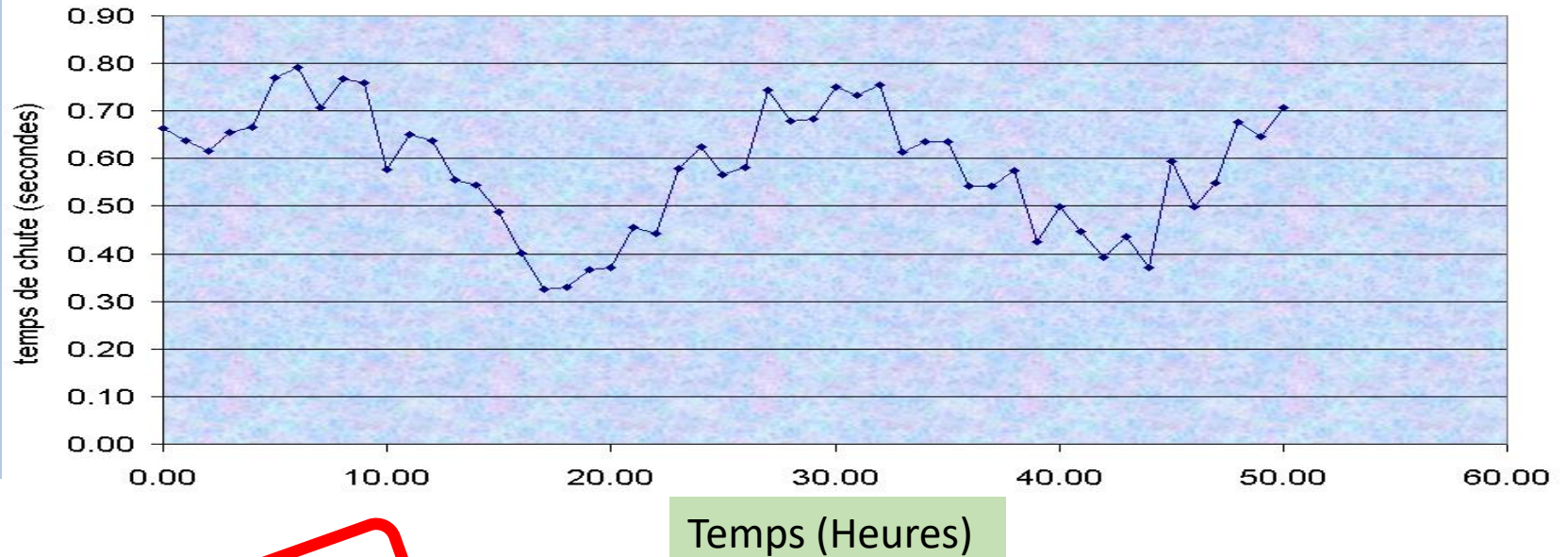


Simulated data

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

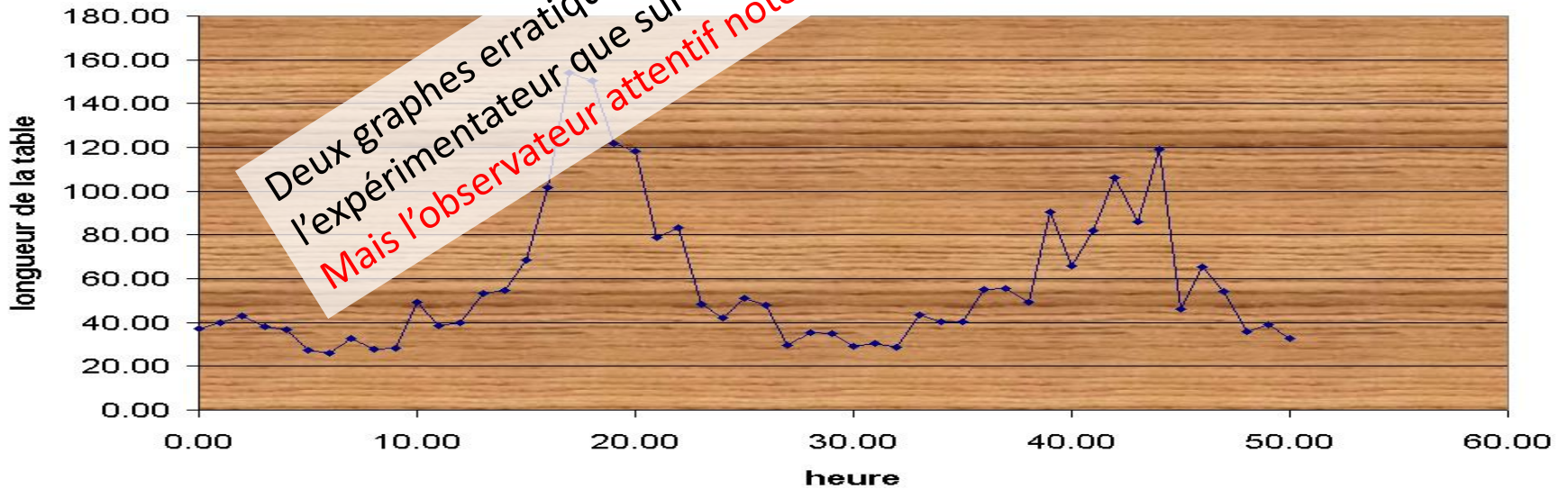
Temps de chute
(d'une hauteur de 40 EL) [s]

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



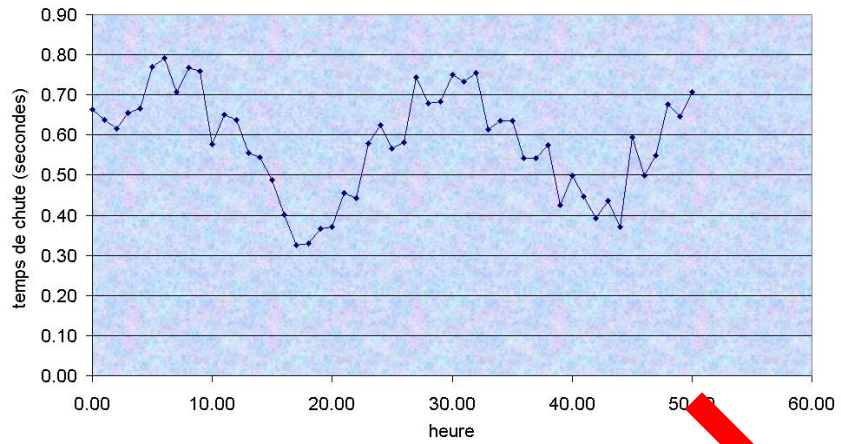
Simulated data

T chute 40 élastiques

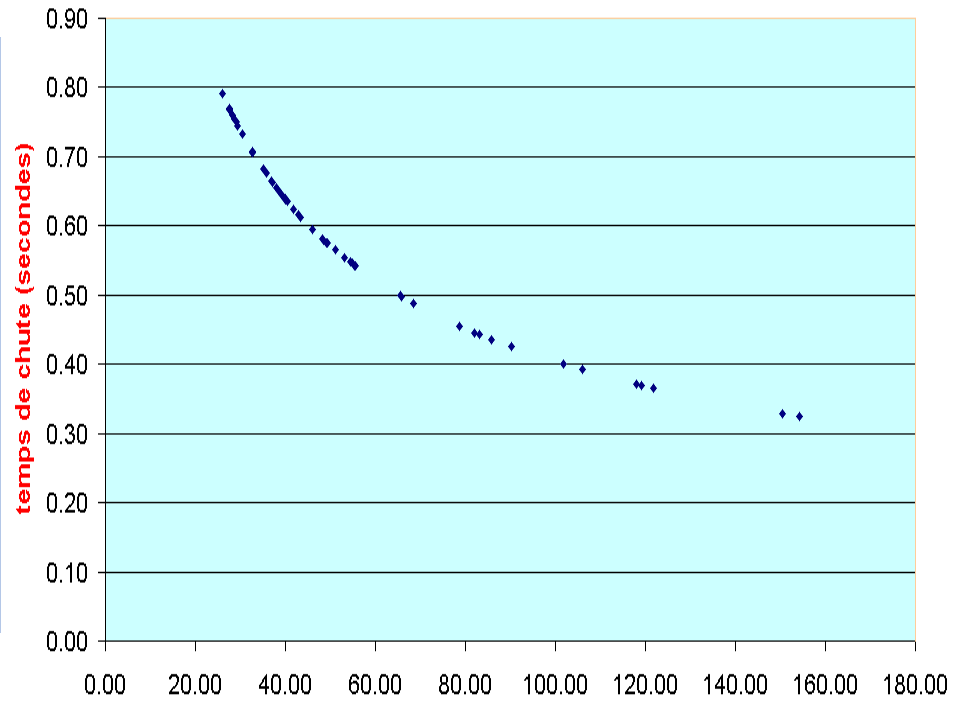


Deux graphes erratiques, et qui en disent plus sur la psychologie de l'expérimentateur que sur la physique ?
Mais l'observateur attentif note des (anti) corrélations

T chute 40 élastiques

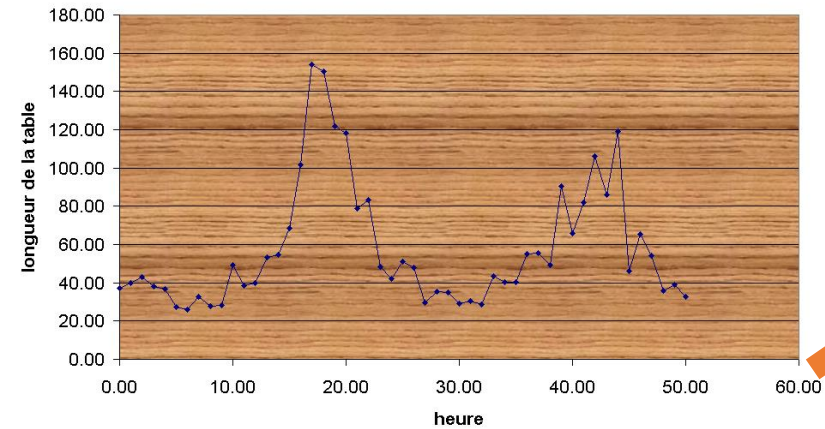


Temps de chute de 40 EL [s]



Longueur de la table [EL]

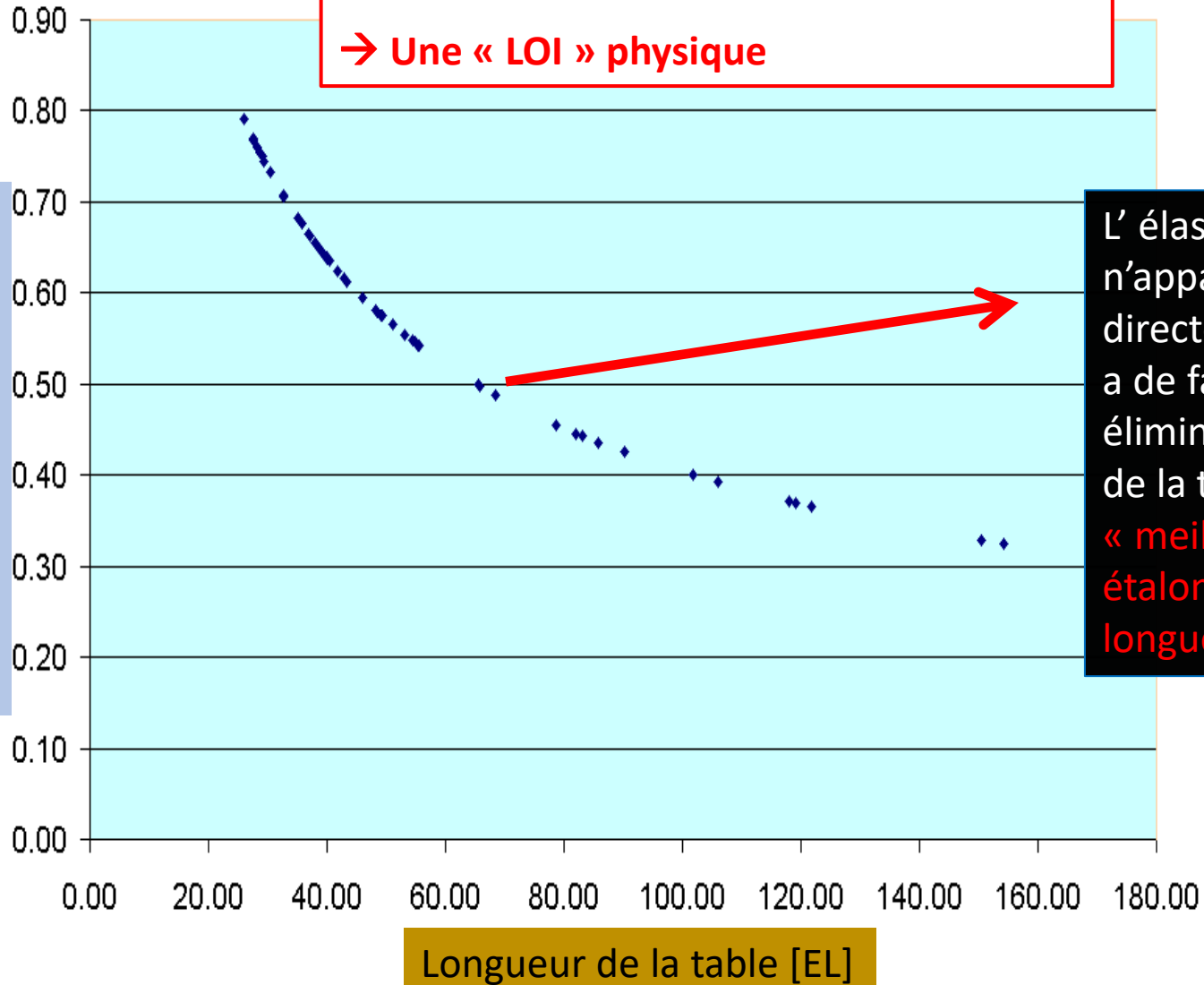
L-table



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 ou le pied du roi à une barre métallique (*la fameuse barre de platine irridié*), puis à notre définition légale 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 gouvernés par l'empirisme.**

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

Pour paraphraser VOLTAIRE

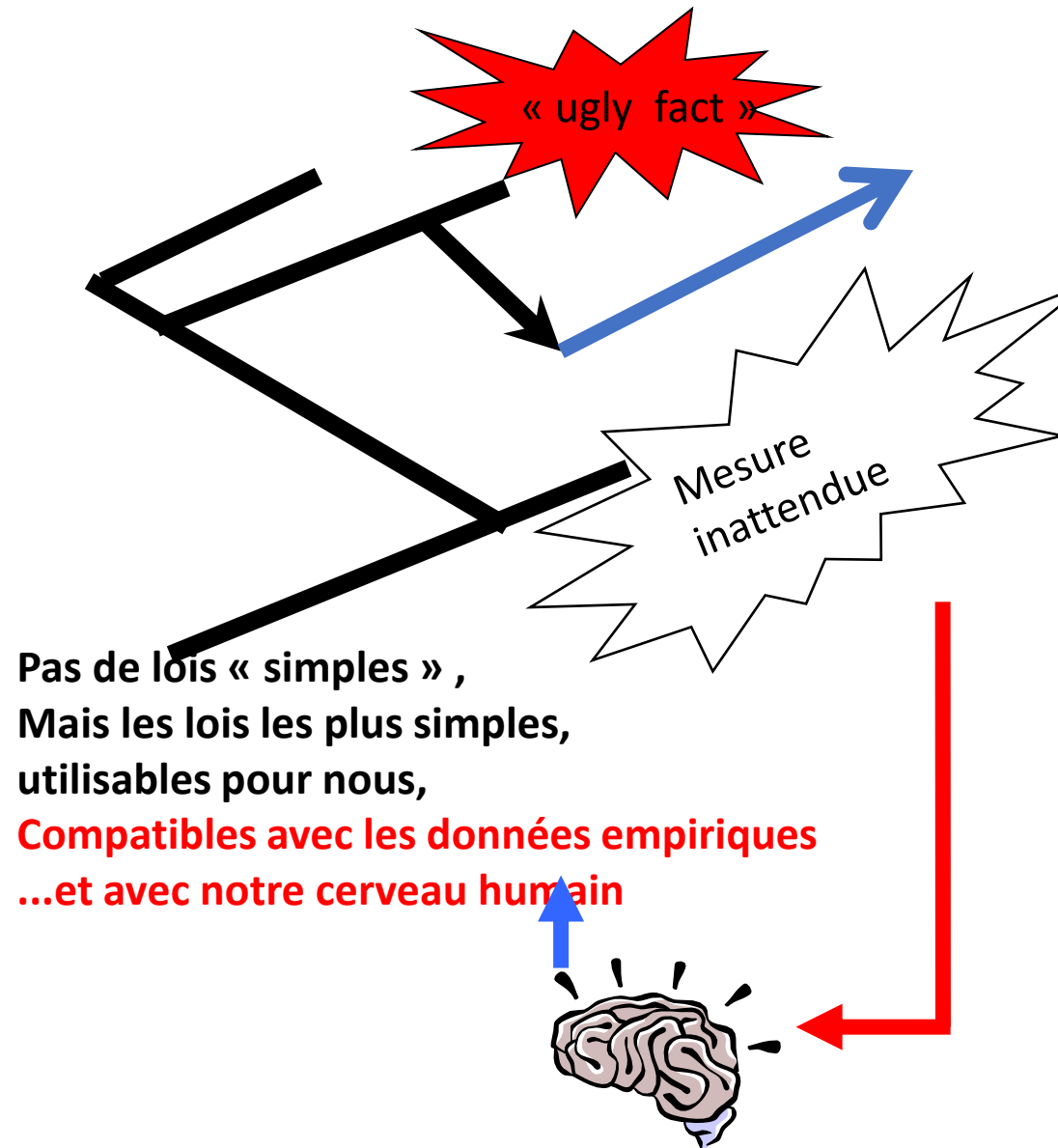
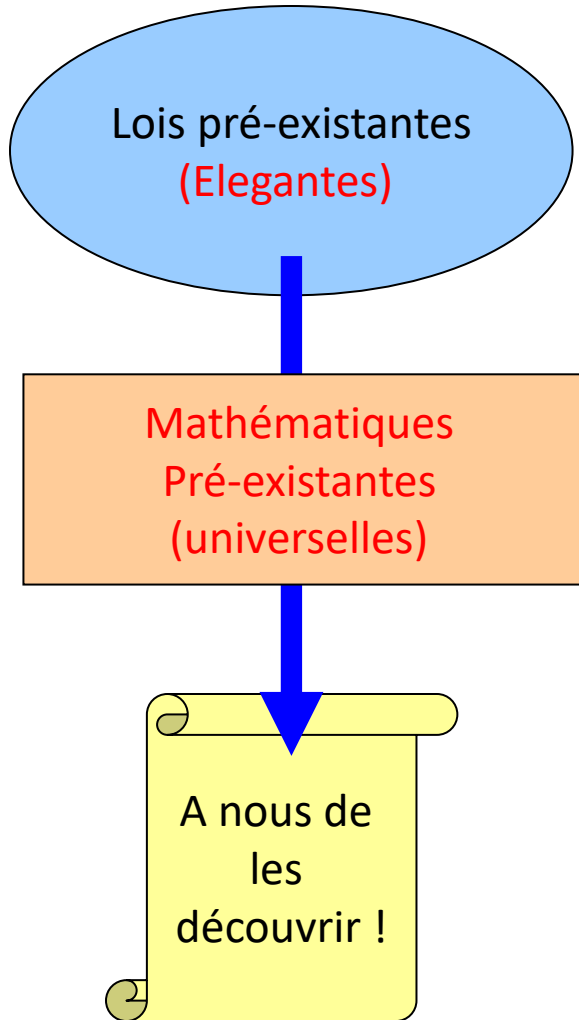
$$\square\Psi = -m^2\Psi$$

**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 »

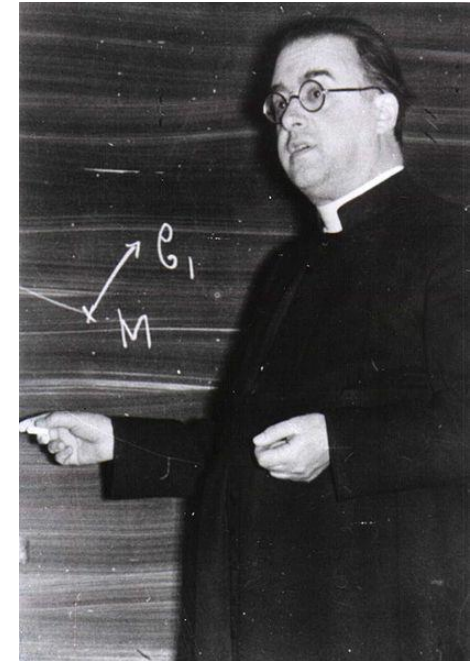


DEVINER une loi

CREER une loi

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

Alors qu'Albert Einstein voulait maintenir un univers statique,
l'observation empirique imposa 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 commençons par rappeler ce que sont

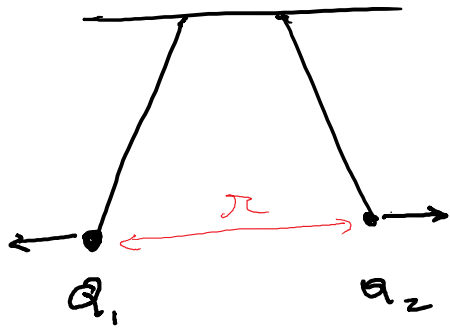
Les interactions fondamentales

...et les autres

- Mais qu'est-ce qu'une loi physique?
- **Les interactions fondamentaleset les autres**
- Le domaine de validité, mais au-delà?
- Les particules, nos outils
- De nouvelles interactions fondamentales;
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 » ?

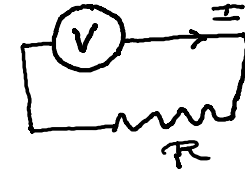
- La défaite de l'antimatière
- Les problèmes qui subsistent...

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



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

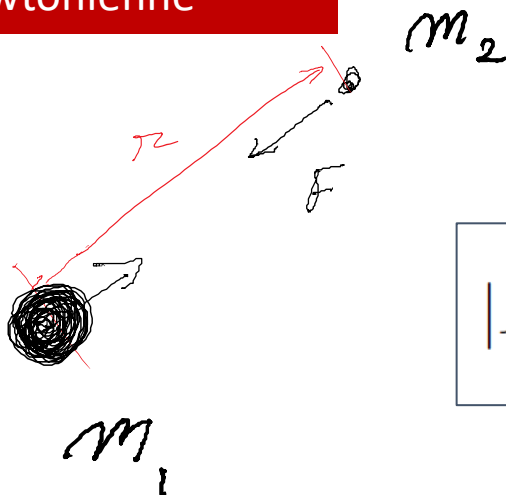
Electrostatique



$$V = I R$$

Loi d'Ohm

Gravitation newtonienne



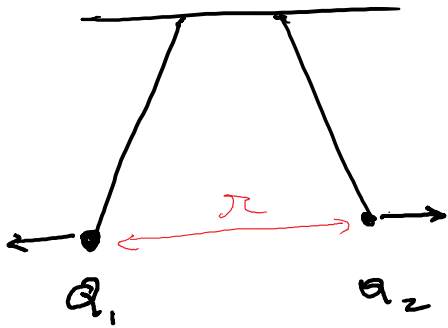
$$|F| \sim \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Loi de Hooke

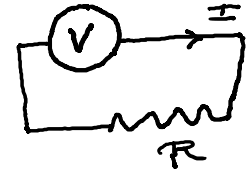


$$|F| = k d$$

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

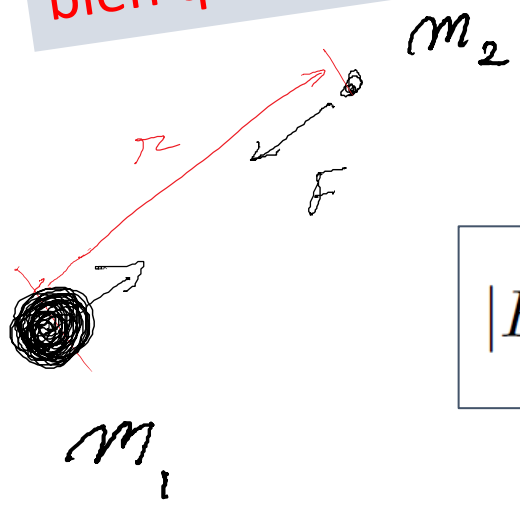


$$|F| \sim \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

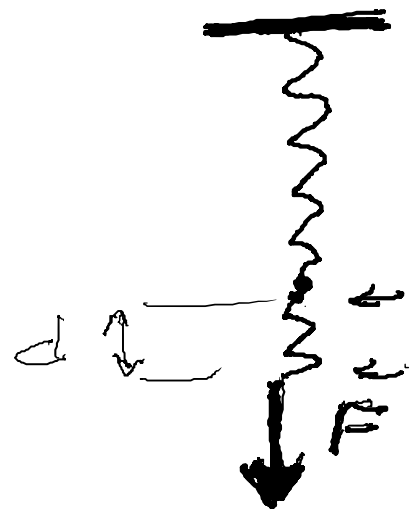


R

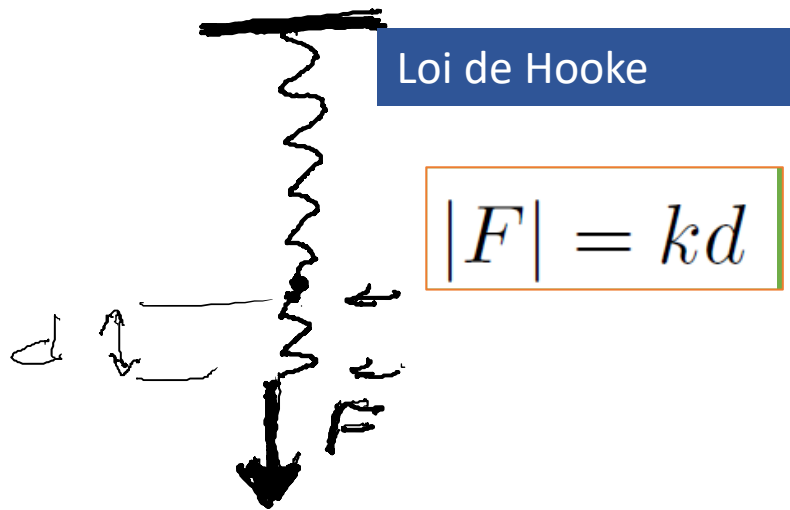
Certaines sont générales, (universelles),
d'autres ne sont que des outils limités,
bien qu'utiles pour décrire les objets que nous utilisons.



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



$$|F| = kd$$

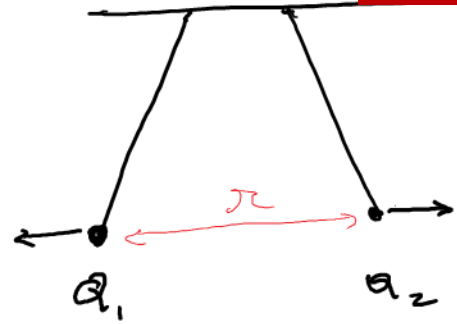


Un ressort s'allonge d'une longueur d ,
qui augmente avec la force appliquée
(proportionnellement)

...si on a choisi un bon métal pour le ressort
Et aussi longtemps qu'il ne casse pas ... Donc ces lois
s'appliquent

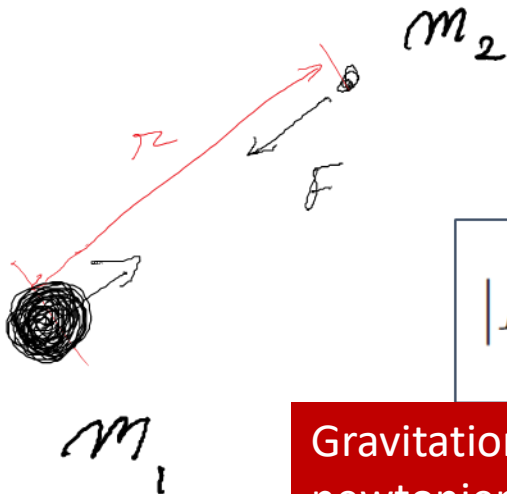
... aux seuls corps auxquels elles s'appliquent
....et dans les limites de leur application !!!!

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

"Modèle
Standard"

+ Relativité

Relativité générale,
Cosmologie,

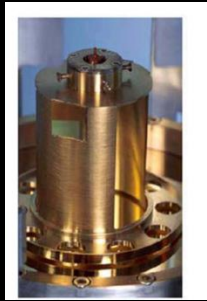
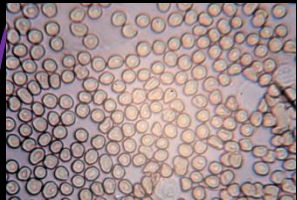
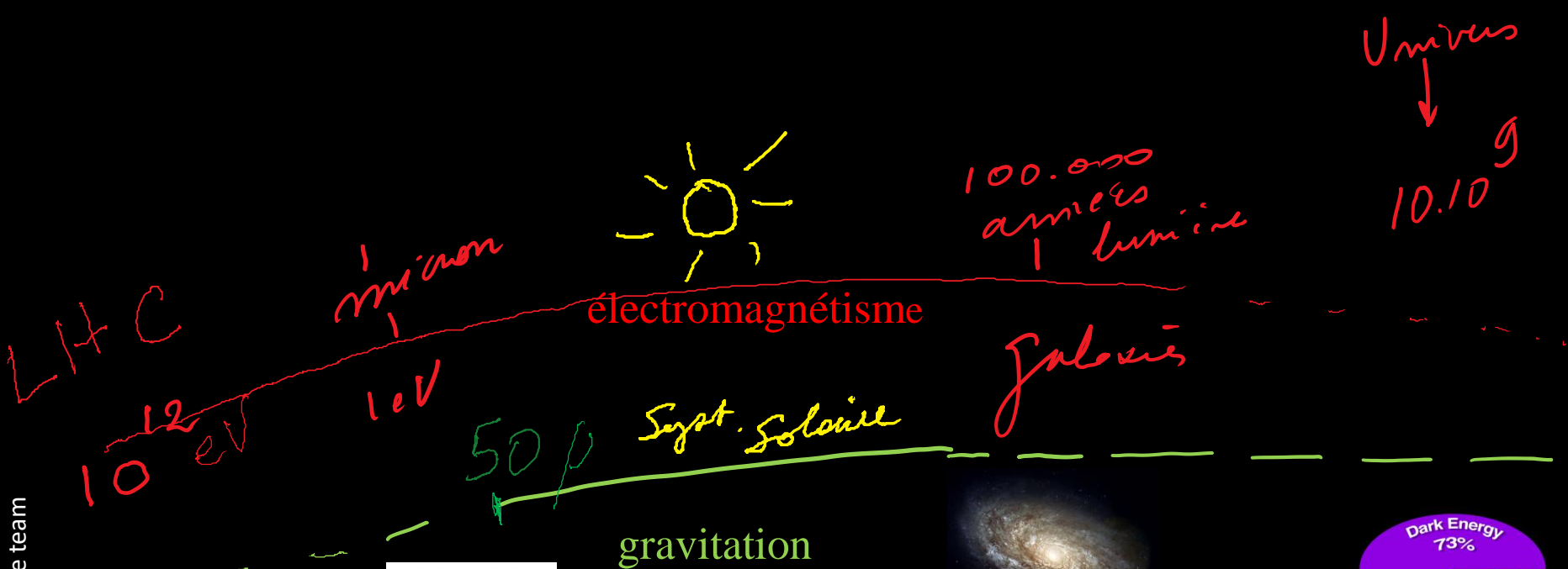
- Mais qu'est-ce qu'une loi physique?
- Les interactions fondamentaleset les autres
- **Le domaine de validité, mais au-delà?**
- Les particules, nos outils, et de nouvelles interactions fondamentales
- Y a-t-il des interactions faibles ?
- Le virage théorique – les symétries
- La brisure de symétrie 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 vast field of galaxies, likely from a deep space survey, showing a wide variety of colors including yellow, orange, red, blue, and green. The galaxies are scattered across the frame, with some appearing as bright, smooth spots and others as more complex, irregular shapes. The background is a deep black, making the individual galaxies stand out prominently.

Le domaine de validité

Crédit image : NASA



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

Il faut ajouter la matière noire ...depuis 1933...
Il faut ajouter l'énergie noire mais depuis 1990, on sait qu'il ne peut s'agir de « Jupiters » (naines brunes) (mi- 1990)
Récemment, l'étude des ondes gravitationnelles a révélé l'existence de populations de trous noirs inattendus ...

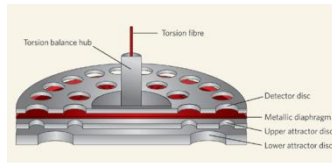


----- Domaine de validité testée de la gravitation

↓ 1 eV



1 micron = 1/1000 mm



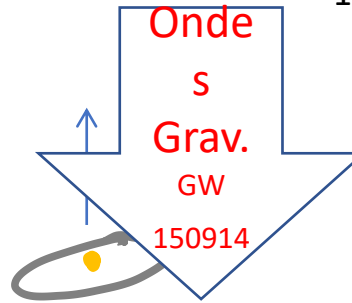
We find with 95% confidence that the inverse-square law holds ($|q| \leq 1$) down to a length scale $\lambda = 56 \mu\text{m}$ and that an extra dimension must have a size $R \leq 44 \mu\text{m}$. Kapner et al., 2007

1/20 mm = 50 micron



Terre-Soleil = 8,3 minutes-lumière

Système solaire
Pluto: 5,5 heures-lumière

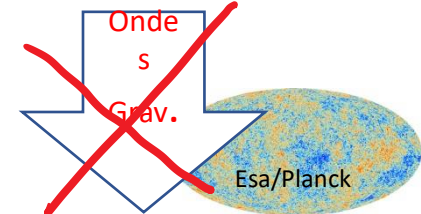


Galaxies :
100.000 années lumière



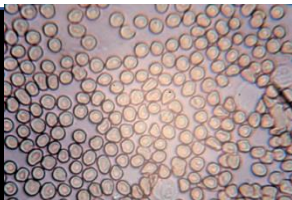
OK, si on ajoute de la matière noire (non encore observée par d'autres voies)

Univers :
> 10 milliards a-lumière



OK, si on ajoute de l'énergie noire (non encore observée par d'autres voies)

Non testé



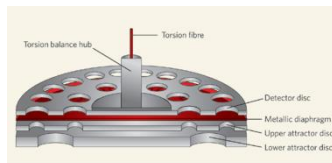
↓ 1 eV

----- Domaine de validité de l'électromagnétisme



1 micron

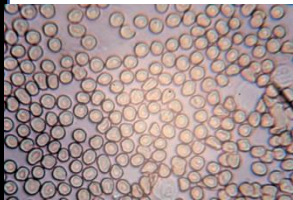
= 1/1000 mm



We find with 95% confidence that the inverse-square law holds ($|a| \leq 1$) down to a length scale $\lambda = 56 \mu\text{m}$ and that an extra dimension must have a size $R \leq 44 \mu\text{m}$. Kapner et al., 2007

1/20 mm

= 50 micron



Terre-Soleil

= 8,3 minutes-lumière



Système solaire

Pluto: 5,5 heures-lumière

Galaxies :

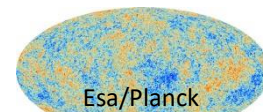
100.000

années lumière



Univers :

> 10 milliards a-lumière



OK, si on ajoute de la matière noire (non encore observée par d'autres voies)

OK, si on ajoute de l'énergie noire (non encore observée par d'autres voies)

Non testé

----- Domaine de validité testée de la gravitation

1 000 000 000 000 eV
= 1 TeV

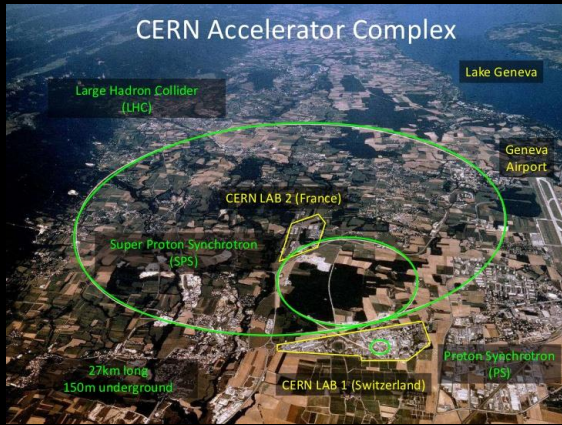
1 eV

1 mille – milliardième de micron

1 micron
= 1/1000 mm

----- Domaine de validité de l'électromagnétisme et Modèle Standard des particules

LHC
CERN



Non testé

----- Domaine de validité testée de la gravitation

1/20 mm = 50 micron

100.000 années lumière

Galaxies > 10 m

Univ

Es/P

OK, si on ajoute de la matière (non encore d'autres

OK, si on ajoute de l'énergie

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 visible (> 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).*
*Le graviton (ondes gravitationnelles) se propage sur des distances de milliards
d'années-lumière, comparables à la taille de l'Univers visible.*

- Mais qu'est-ce qu'une loi physique?
- Les interactions fondamentaleset les autres
- Le domaine de validité, mais au-delà?
- **Les particules, nos outils**
- De nouvelles interactions fondamentales;
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...

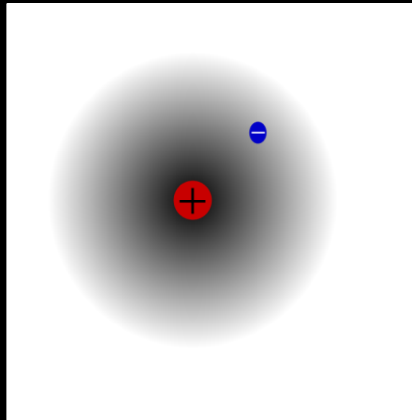


Les particules (nos outils)
...et de nouvelles interactions fondamentales

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



Cellules de ma langue

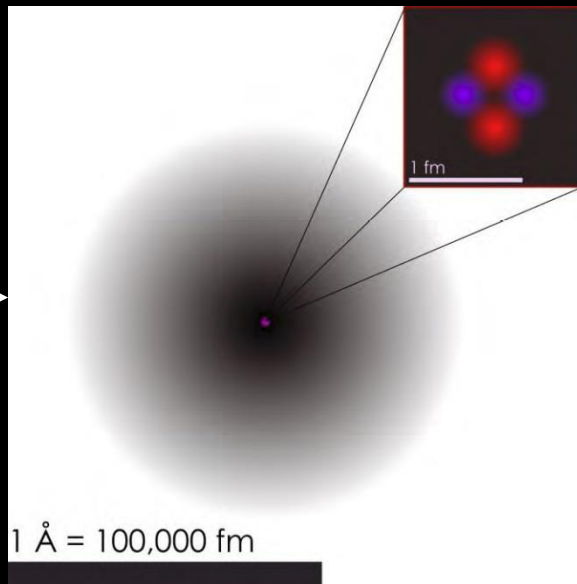


10000 fois plus petit, l'atome,
composé d'électrons
et d'un noyau

Toute la chimie ...



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



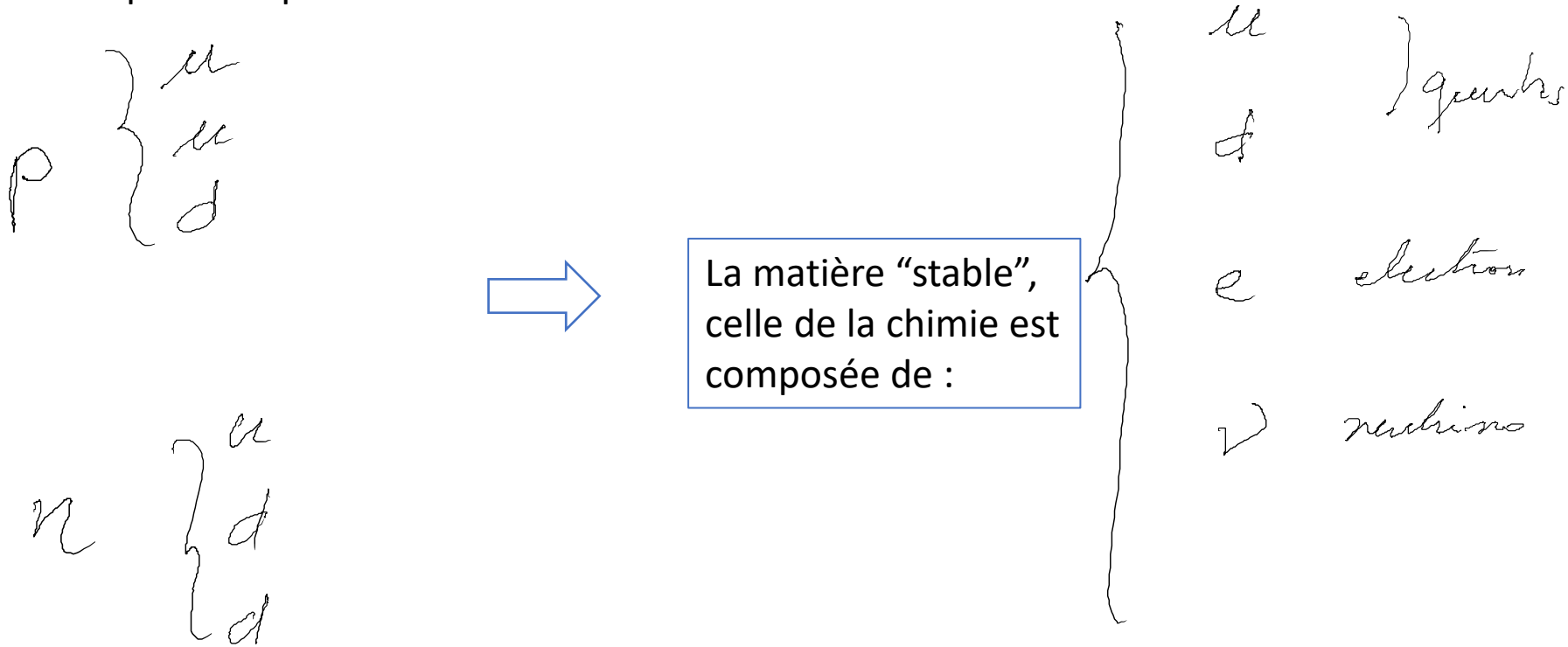
L'énergie,
la médecine nucléaires



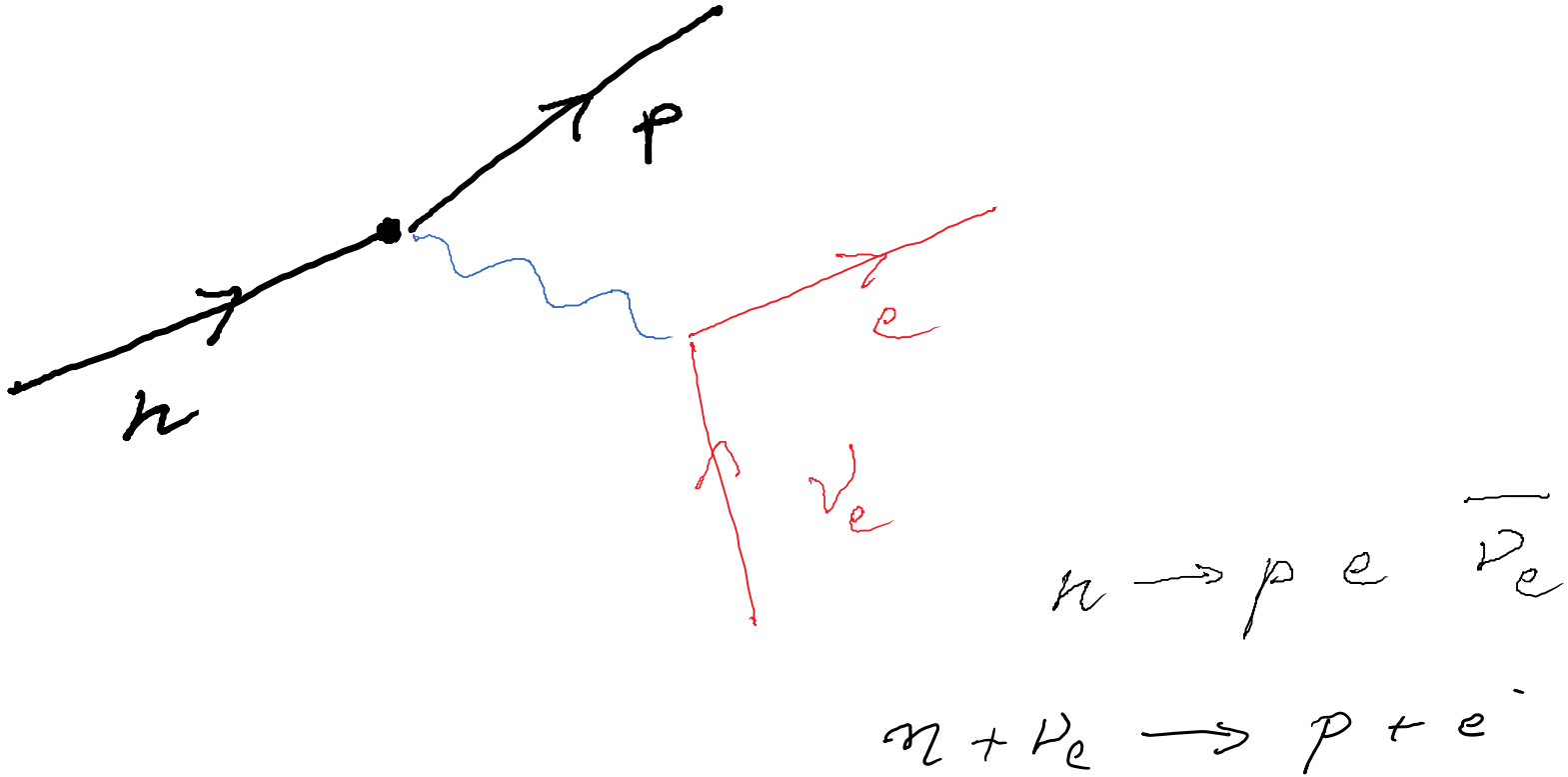
Le **proton et le neutron** sont, eux-mêmes composés de QUARKS, (de type u, charge 2/3 de la charge du proton) et d, de charge -1/3 , que nous savons maintenant liés - « confinés »- par des gluons.

...on n'a jamais pu isoler un quark ...comme il est impossible de séparer le pôle Nord et Sud d'un aimant (si on casse un aimant en 2, on obtient...2 aimants).

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 »..

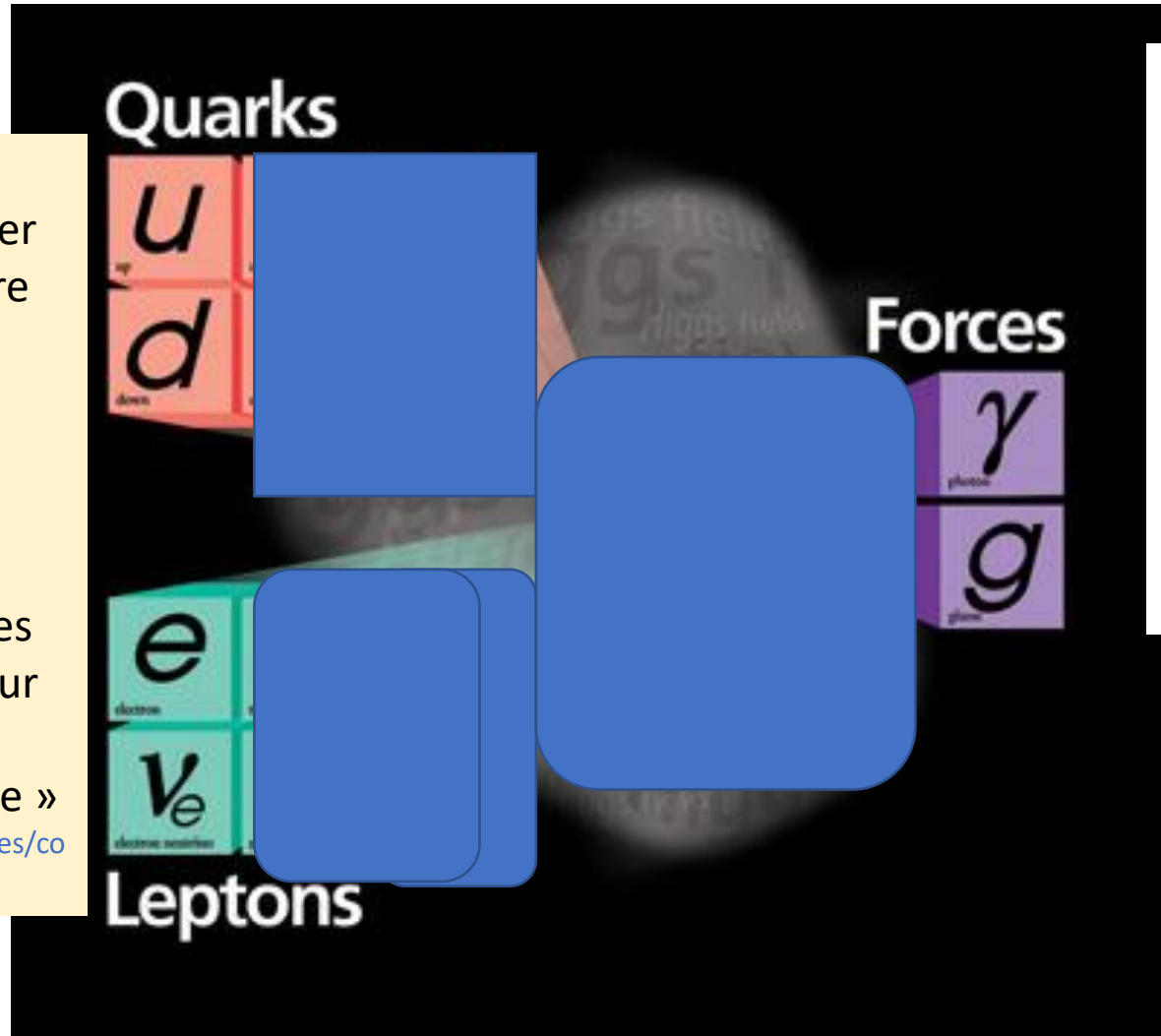
Une fois encore, on parle en milliards d' anti-neutrinos par centimètre carré par seconde à quelques centaines de mètres d'un cœur ...

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, ils sont le plus souvent absents du curriculum: manque d'effets pratiques, peur d'effrayer par ces flux énormes?

Le point de départ ...jusqu'ici

Et les quarks u et d peuvent se combiner pour former nombre d'objets stables (chimie), mais aussi de nouveaux états "particules composite" instables (résonnances) .. Pour une zoologie, voir « Particle Data Table » http://pdg.lbl.gov/2016/tables/contents_tables.html



“médiateurs”

photon,
symbolisé
par les
“rayons gamma”

le graviton

Image : Fermilab

En fait, on découvre très tôt (1936) une autre particule, le muon (analogue à l'électron mais 200 fois plus lourd) dans le rayonnement cosmique .

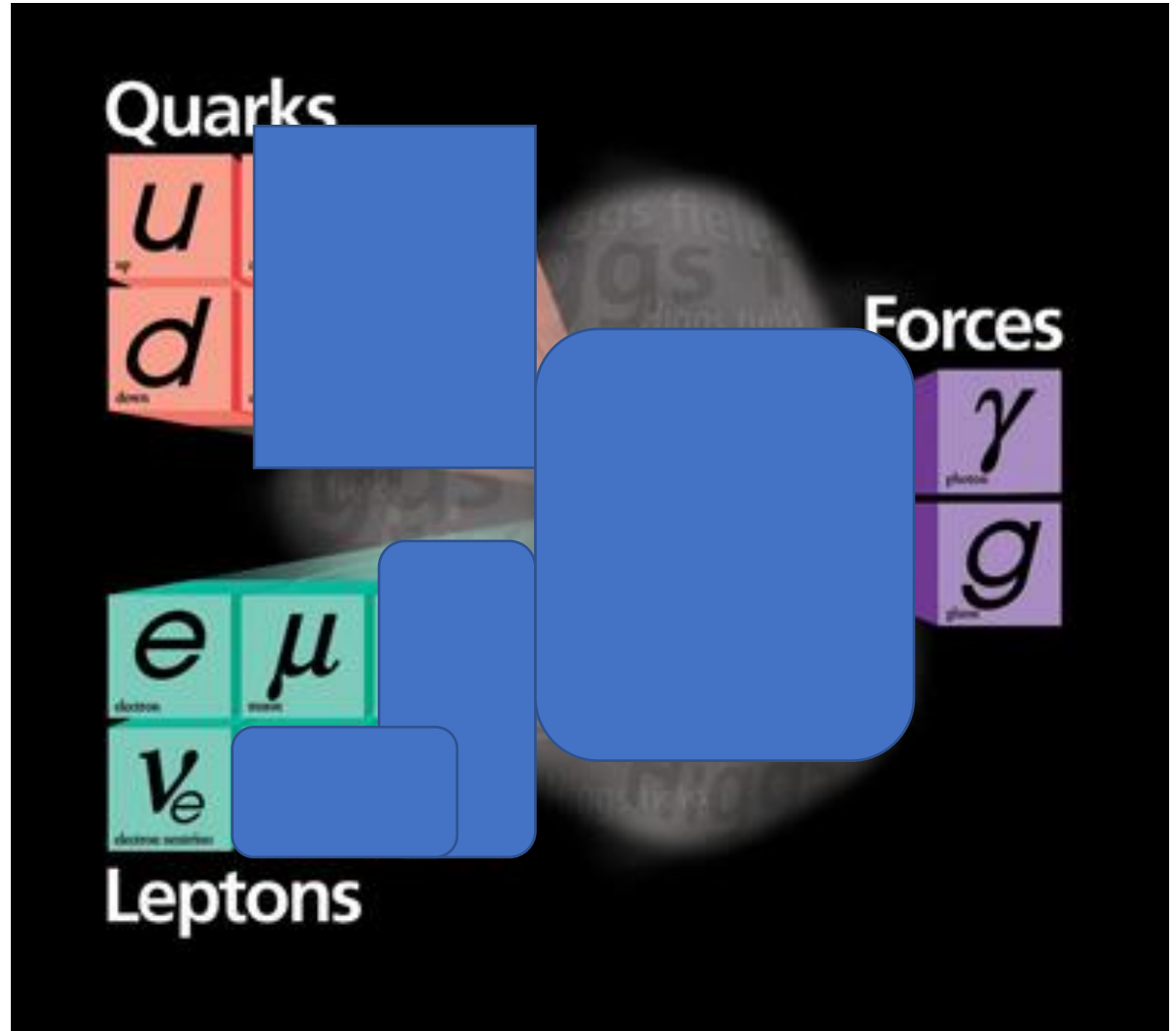


Image : Fermilab

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

Pour notre propos, nous anticiperons et mentionnerons dès maintenant aussi le « lepton tau », noté τ , qui ne sera découvert que bien plus tard (1975)

Ces particules sont instables, et n'ont aucun rôle dans la matière que nous côtoyons tous les jours.

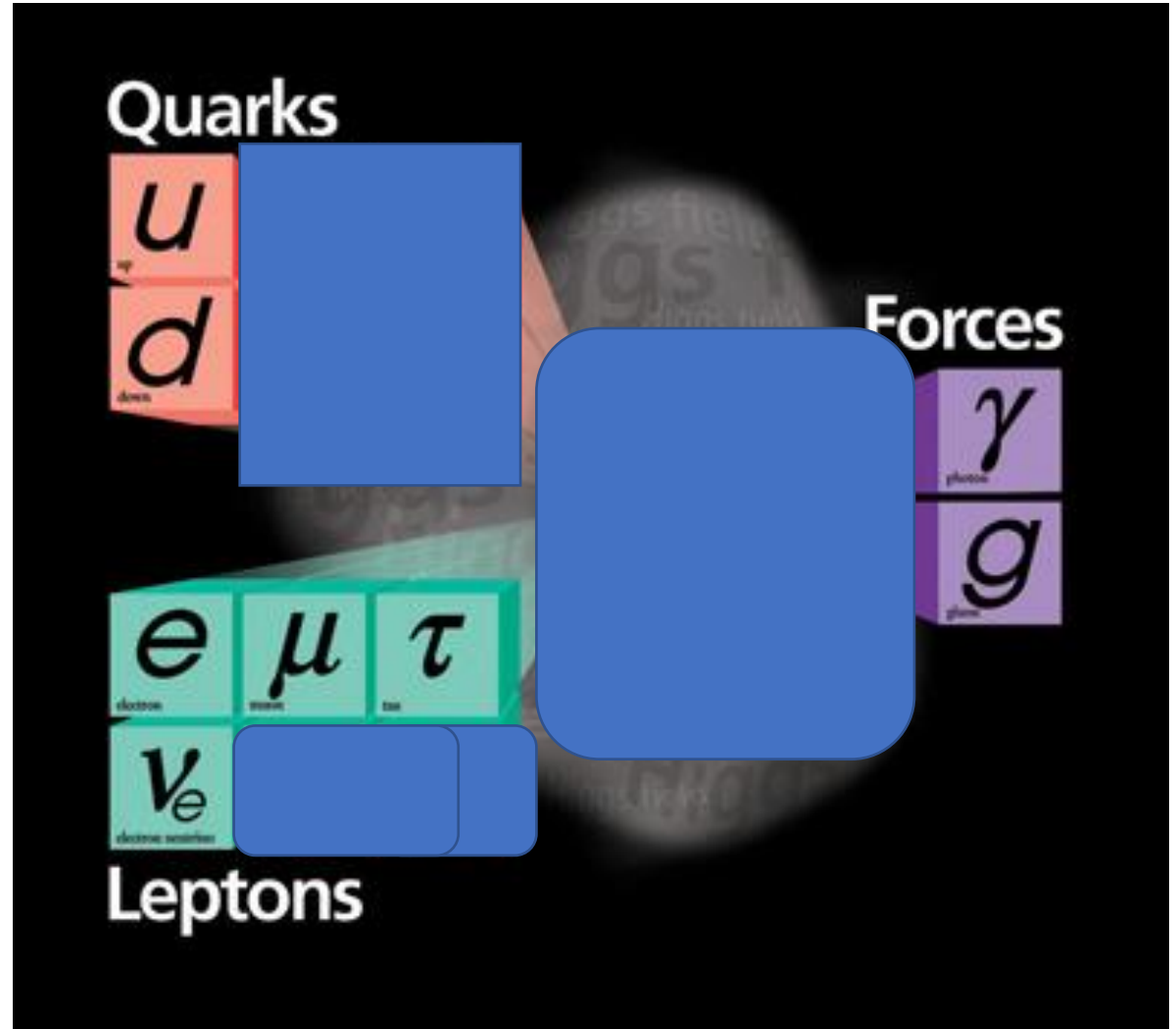
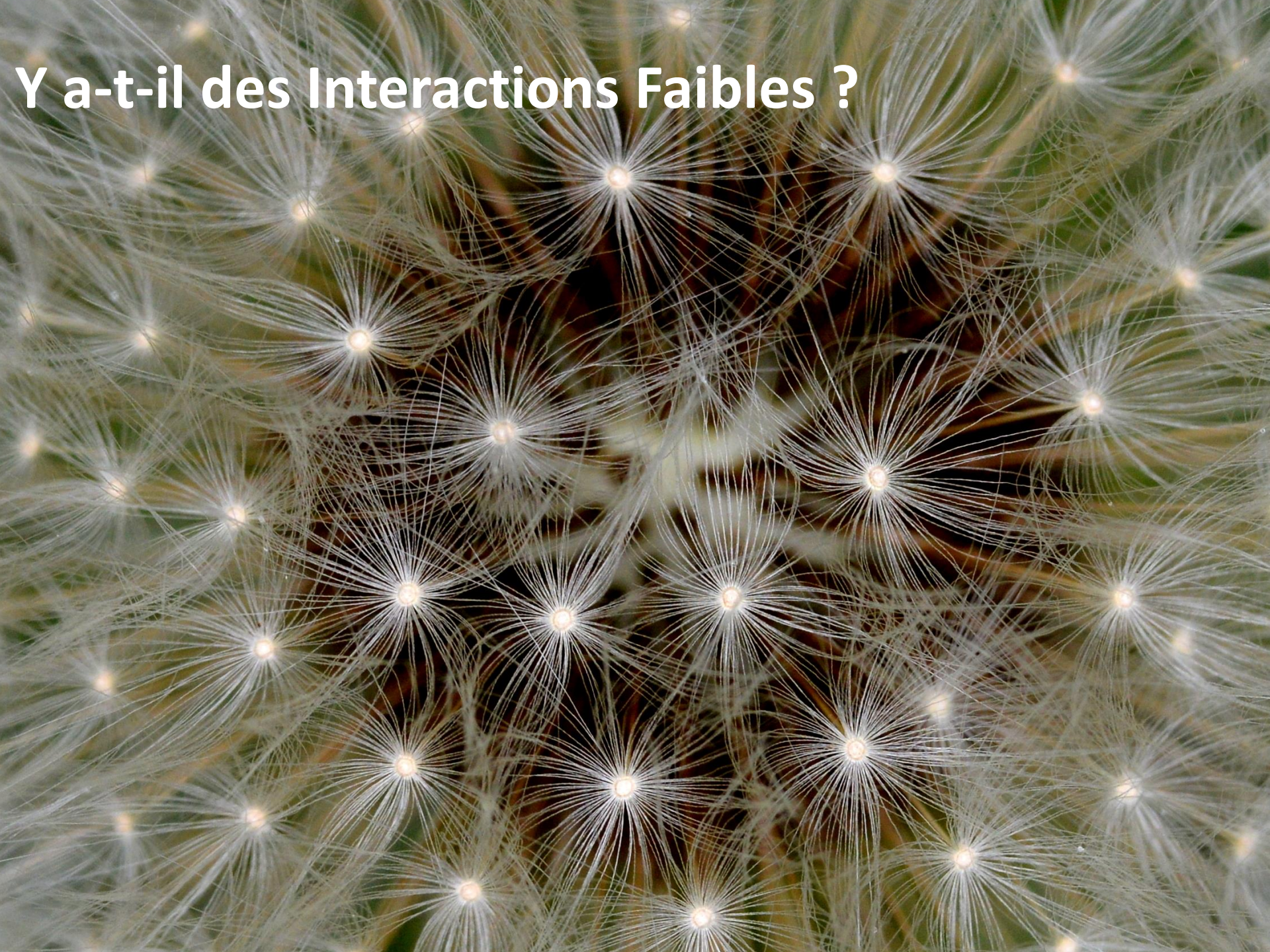


Image : Fermilab

- Mais qu'est-ce qu'une loi physique?
- Les interactions fondamentaleset les autres
- Le domaine de validité, mais au-delà?
- Les particules, nos outils
- **De nouvelles interactions fondamentales;
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

Temps typique des interactions fortes : 10^{-24} s soit un millionième de milliardième de milliardième de seconde (1/ 1suivi de 24 zeros) se désintègre vite = réagit fort ...

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 ..comparons les 2 premières lignes...

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

!! ordres de grandeur !!

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

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) :

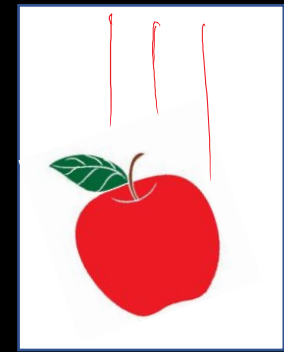
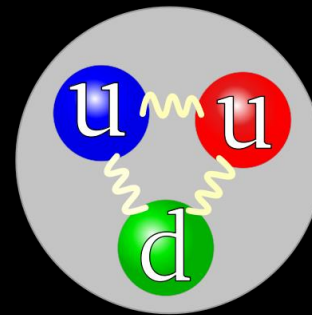
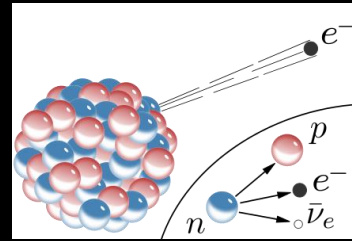
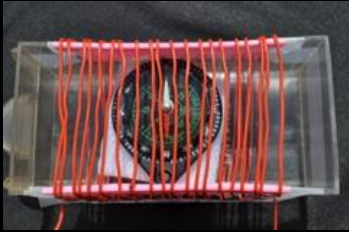
Interactions fortes : celles qui semblent avoir une intensité « normale »

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



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

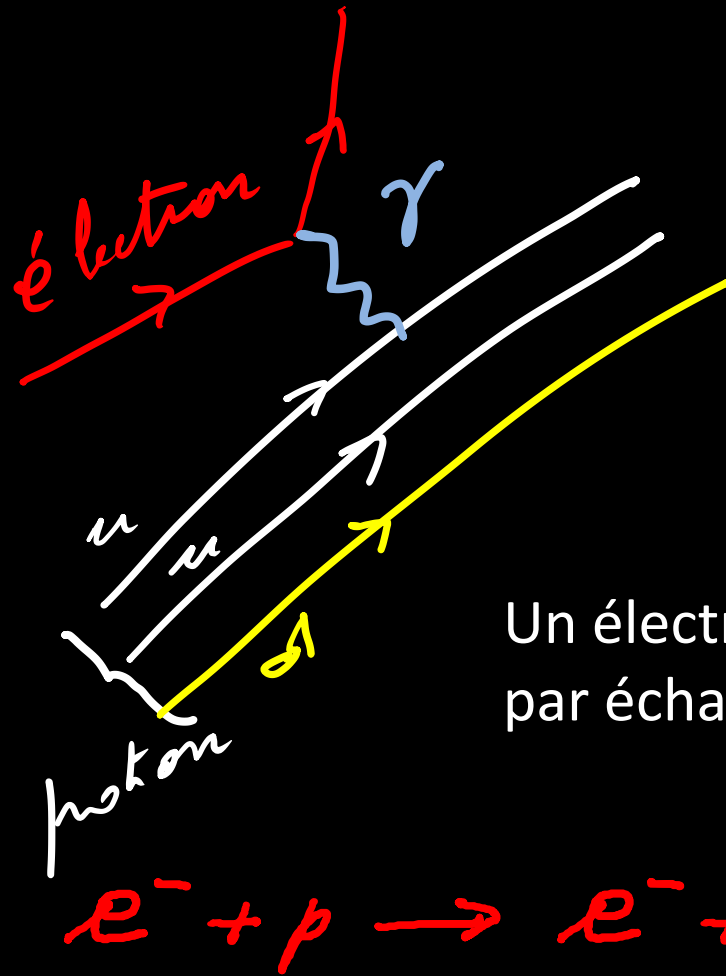
Energie de l'Univers,
Cosmologie

?

Théorie des Cordes ??

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

Tentative d'unification : interaction faible et interaction électromagnétique

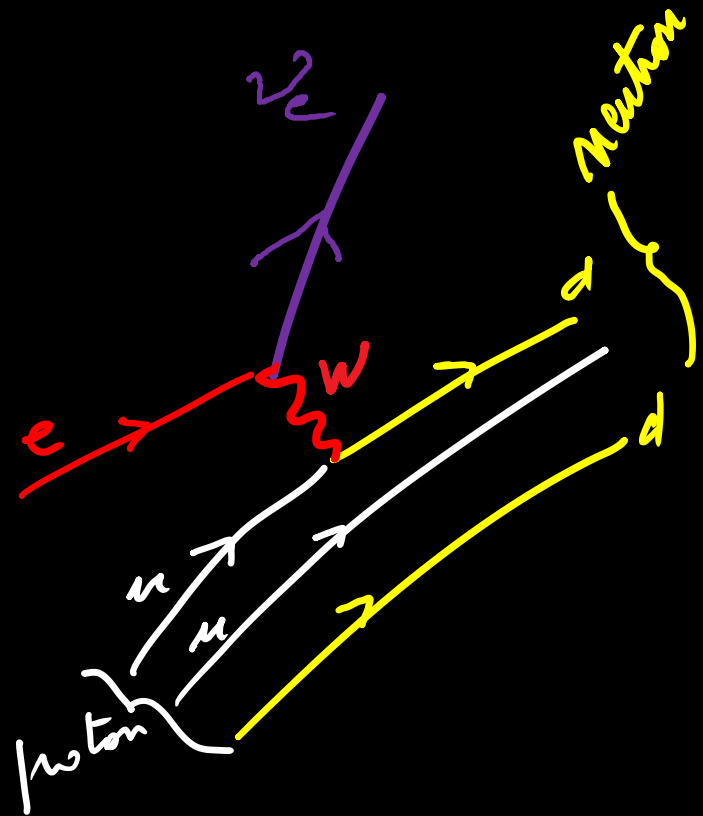


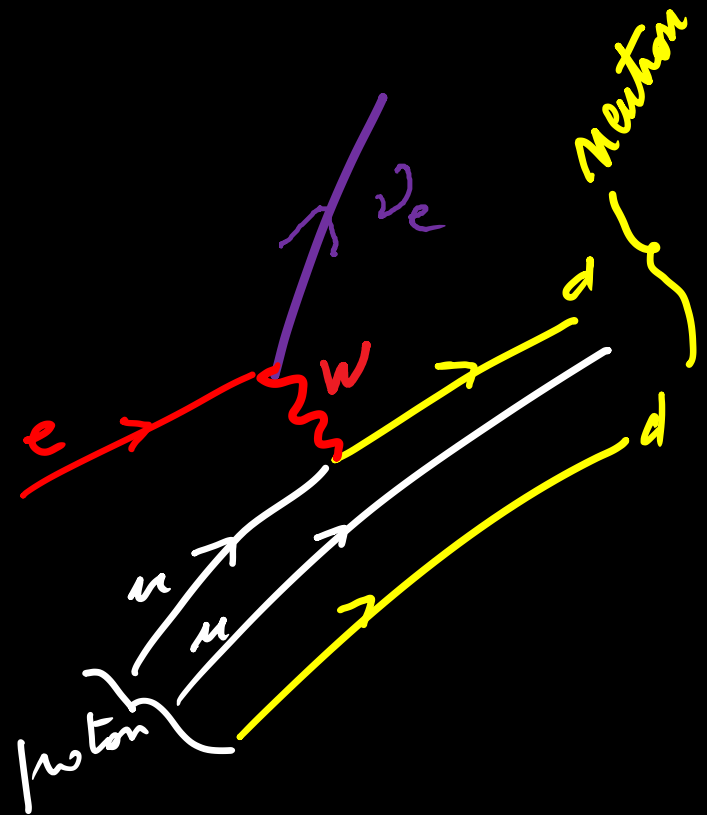
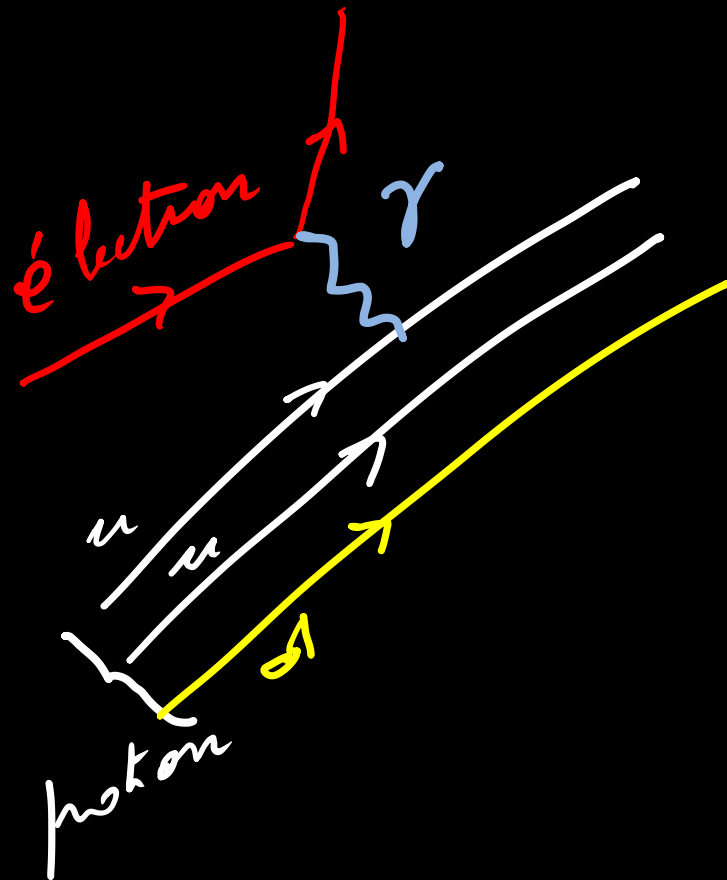
Un électron interagit avec un proton,
par échange d'un photon γ

(seules les vitesses
changent)

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

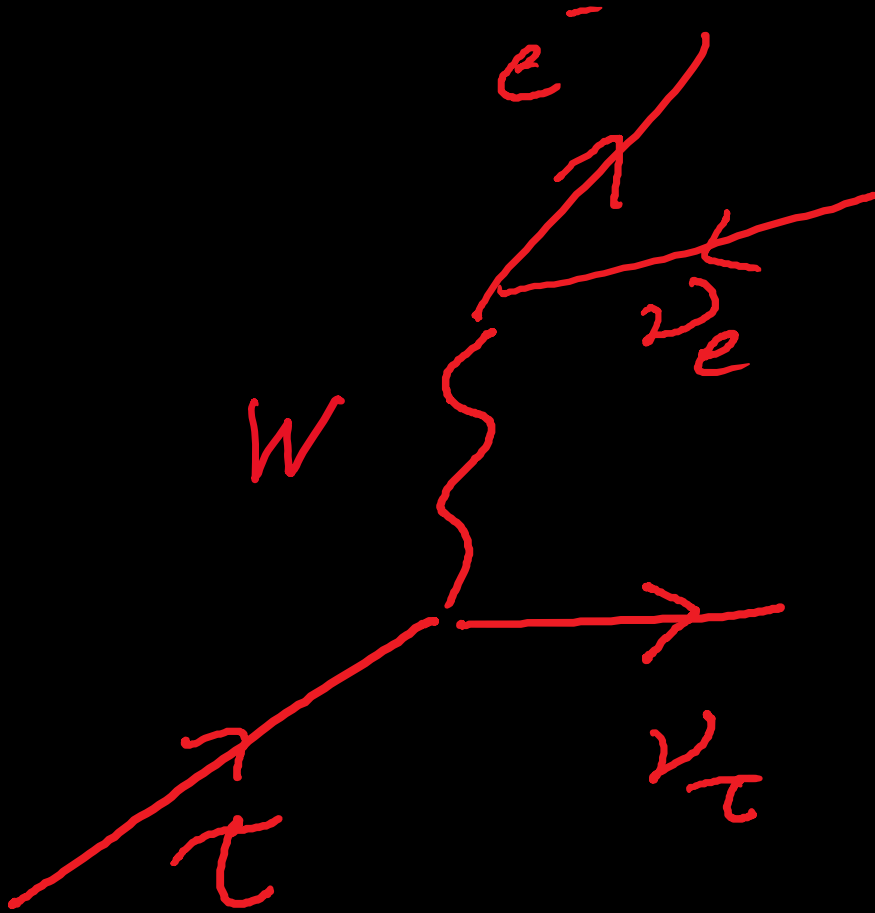
On suppose un processus similaire, à l'intervention cette fois d'un vecteur d'interaction nouveau, le W Que l'on suppose massif (sans quoi il aurait été découvert bien plus tôt, comme le photon), il y a cette fois échange de charge et d'impulsion





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

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

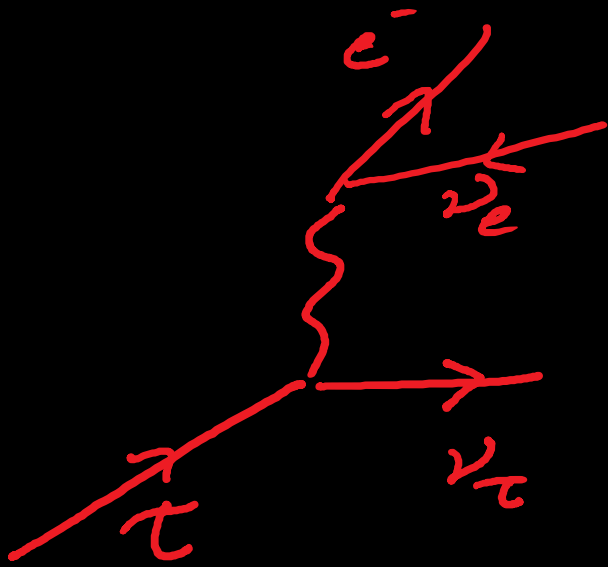


A la différence du photon (sans masse), une particule lourde, comme le W, introduit une nouvelle échelle de masse.
(bien plus lourde que les particules envisagées)

Dans ces conditions, on peut calculer le “temps de (demi) vie” à l’aide d’une formule assez simple

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

où la masse du W intervient à la quatrième puissance $M_W * M_W * M_W * M_W$ soit un effet considérable si M_W/m est grand.



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

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 GeV/c²)
...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

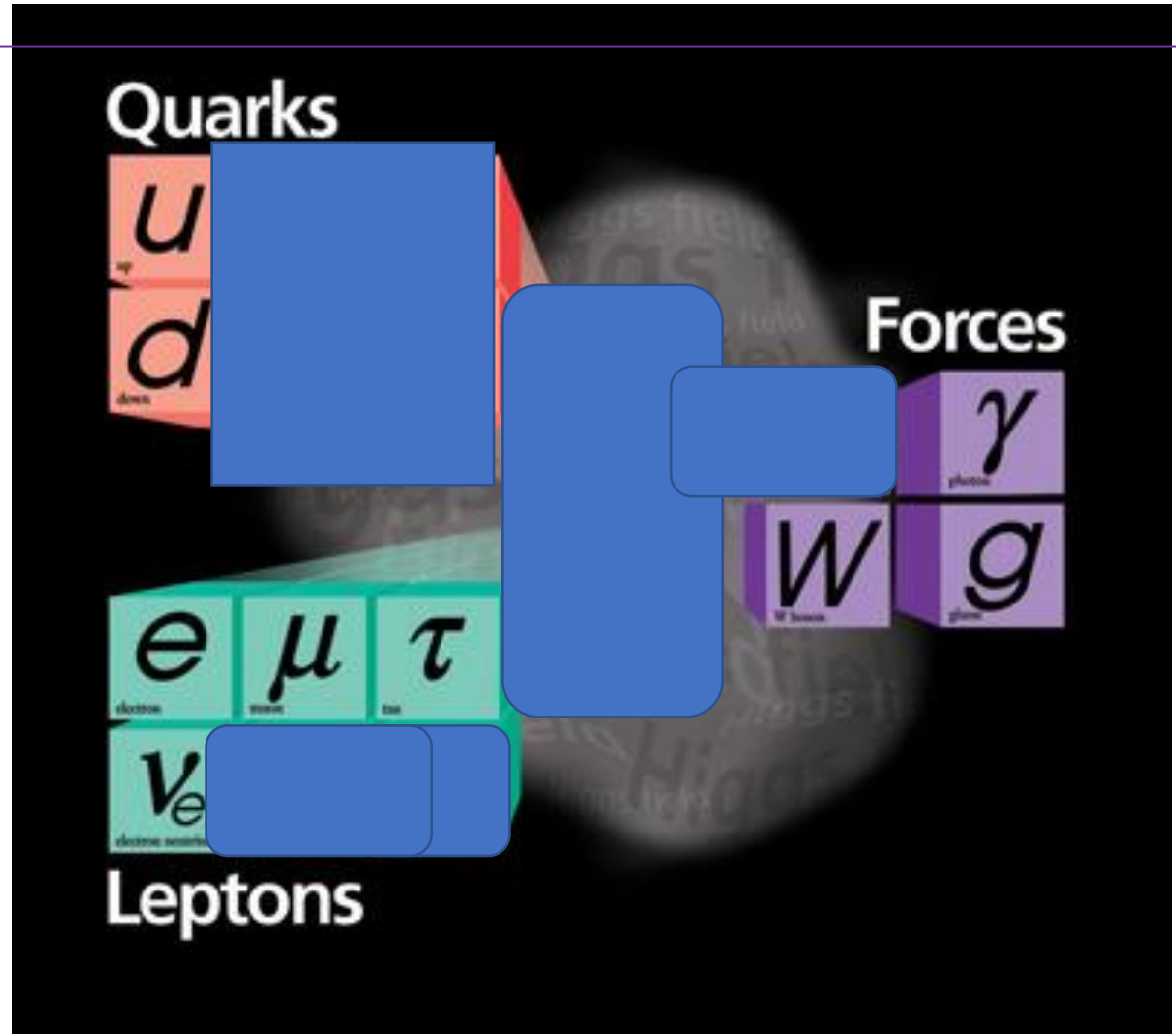


Image : Fermilab

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 l'ordre de 10^{-25} s)
- Cette observation **permet l'unification des interactions "dites faibles" et de l'électrodynamique avec une seule force d'interaction.**

- Mais qu'est-ce qu'une loi physique?
- Les interactions fondamentaleset les autres
- Le domaine de validité, mais au-delà?
- Les particules, nos outils
- De nouvelles interactions fondamentales;
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



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

Des mesures de précision à basse énergie (1 GeV), permirent d'inférer la présence de particules beaucoup plus massives comme le W (80.38 GeV), alors que les accélérateurs ne permettaient pas encore de les produire.

- 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...

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

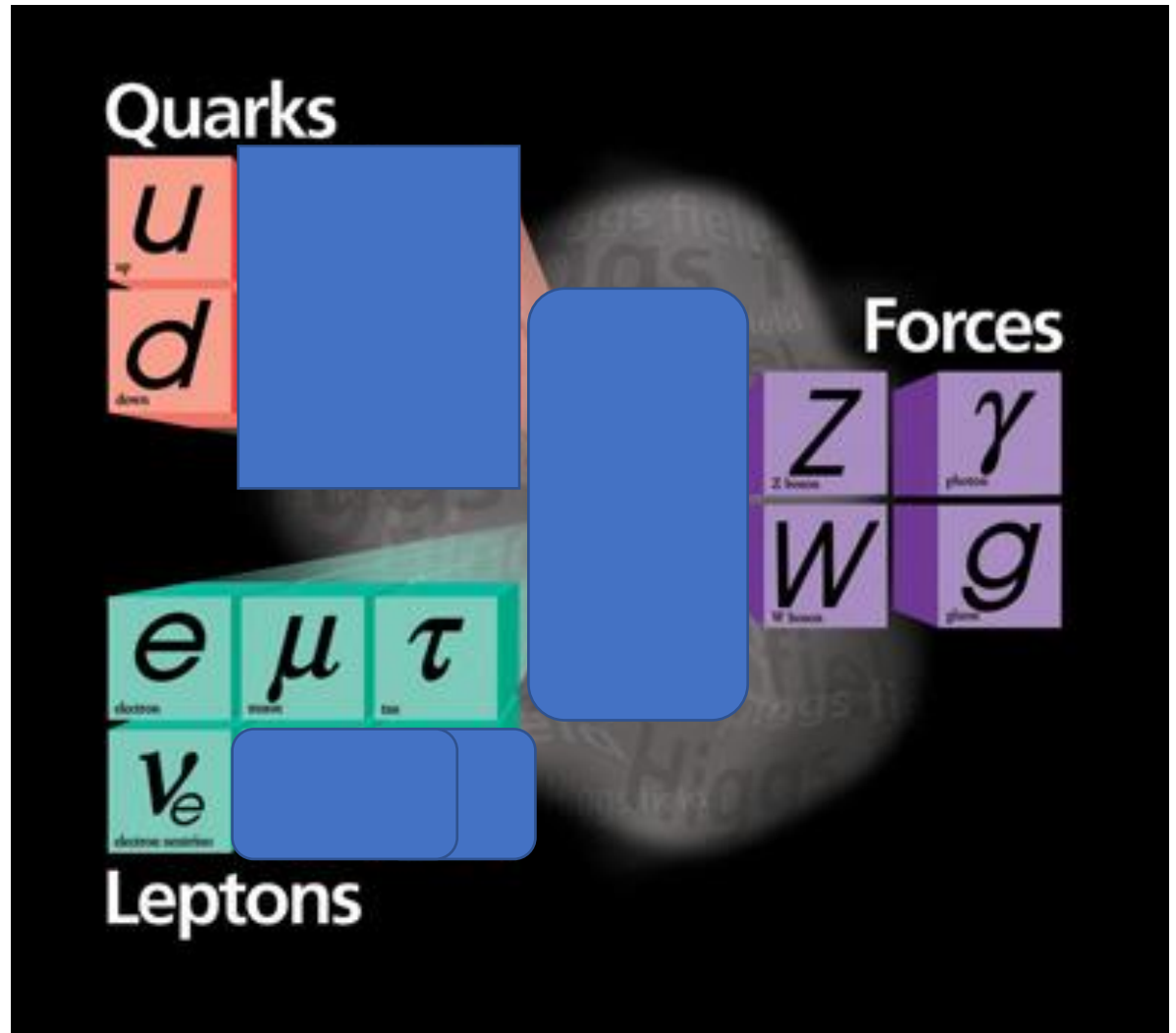


Image : Fermilab

L'importance des travaux de Brout, Englert et Higgs, c'est de montrer que toutes les interactions sont de même nature, **et 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 ...

Une parenthèse s'impose ici, pour parler des prédictions indirectes et des découvertes de particules.

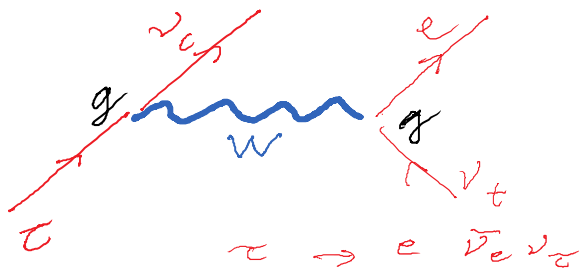
Dans notre description actuelle, une force, à laquelle est associée une particule, se manifeste de 2 façons.

Ainsi, le photon se manifeste tantôt comme particule de lumière (c'est une particule "réelle), tantôt comme un intermédiaire "virtuel" qui sert simplement à calculer la force coulombienne entre 2 boules de sureau (ou toutes autres charges): aucun photon réel n'est émis dans ce cas.

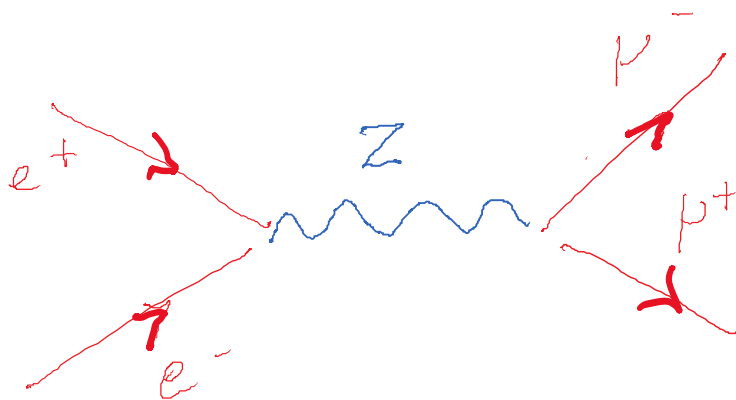
Mais, de l'attraction coulombienne, on peut établir l'existence de l'électromagnétisme et inférer l'observation possible du photon.

Le problème lorsque nous rencontrons une interaction nouvelle, c'est qu'on peut parfois imaginer diverses formes de particules qui l'expliquent...seule la production et l'observation directe (qui, comme pour le Z et le W nécessitent des énergies au moins égales à leur masse) permet de décider.

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 positron à haute énergie au CERN produit un boson Z bien réel, qui se désintègre ensuite en une paire muon – antimuon

- Mais qu'est-ce qu'une loi physique?
- Les interactions fondamentaleset les autres
- Le domaine de validité, mais au-delà?
- Les particules, nos outils
- De nouvelles interactions fondamentales;
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

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 (comme une roulette de casino
est supposée symétrique) , 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 ».

C'est-à-dire que nous introduisons une théorie symétrique,
mais de telle façon que sa solution la plus stable
ne le soit pas.

*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**

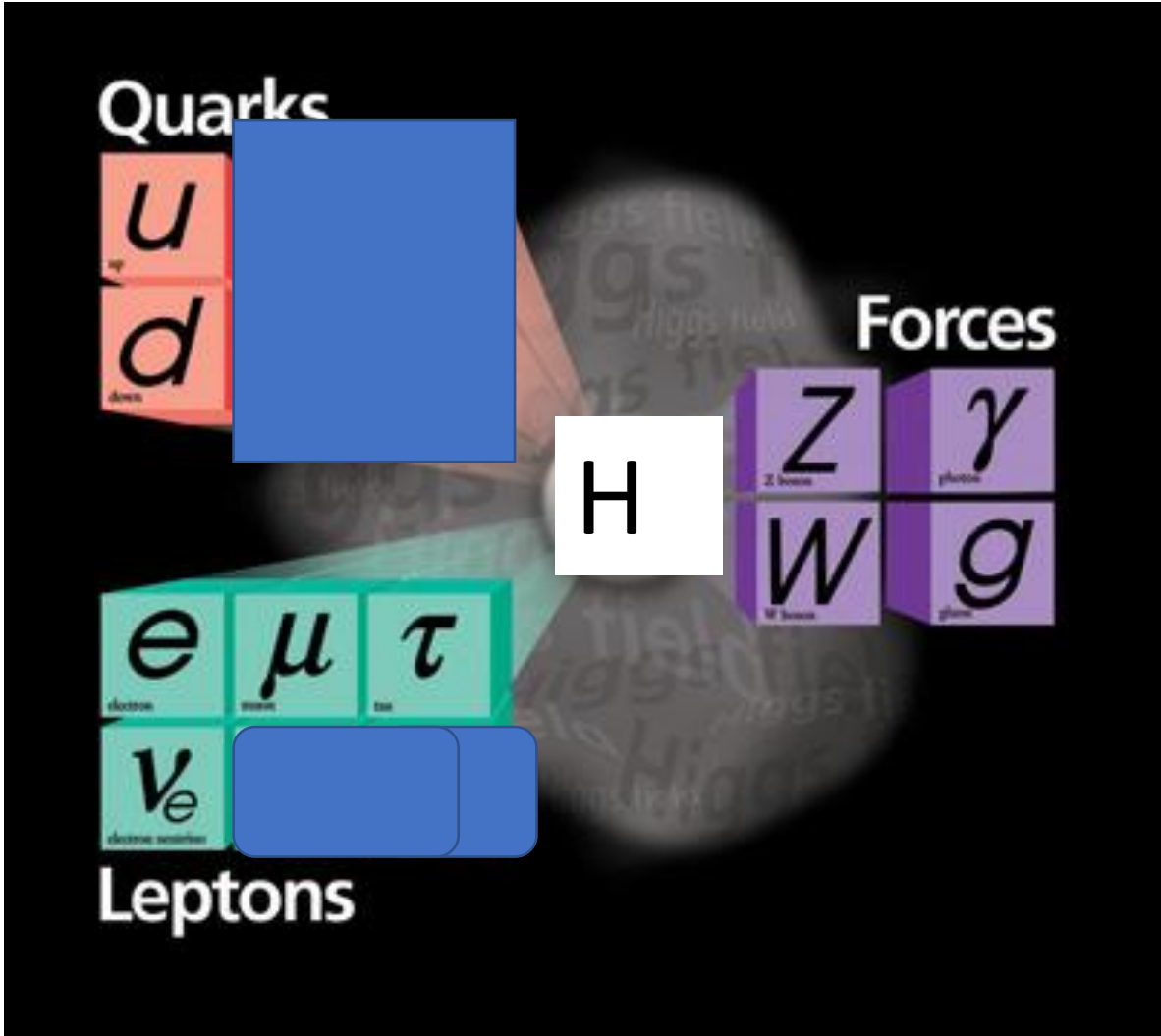


le Boson scalaire H ou boson de Brout-Englert- Higgs

?

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.



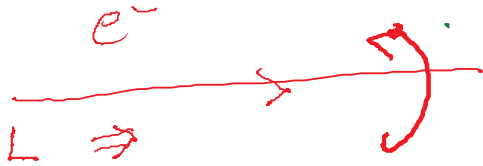
Le boson H est le premier scalaire découvert,
Nous verrons que c'est aussi la première particule *véritablement faiblement couplée*
à la matière que nous connaissons.

Explications un peu:

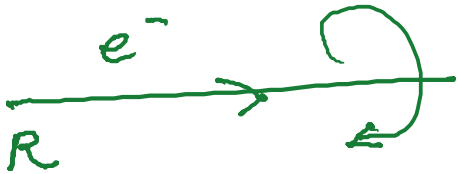
Qu'est-ce qu'un scalaire, qu'est-ce que le spin?



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

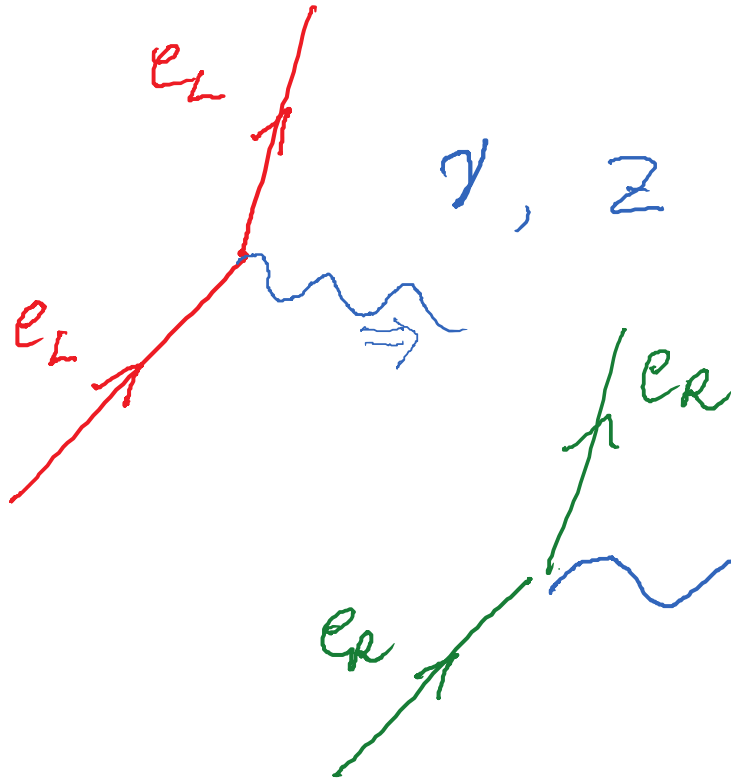
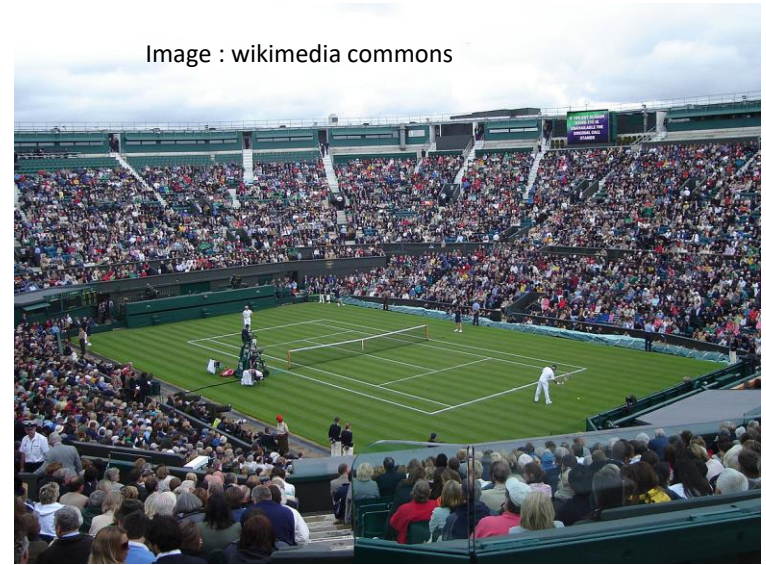


e_R Idem , mais à droite (dextrogyre)

pensons par exemple à 2 joueuses de tennis dont toutes les balles seraient "coupées", soit à gauche, soit à droite...

Un match bien étrange ...

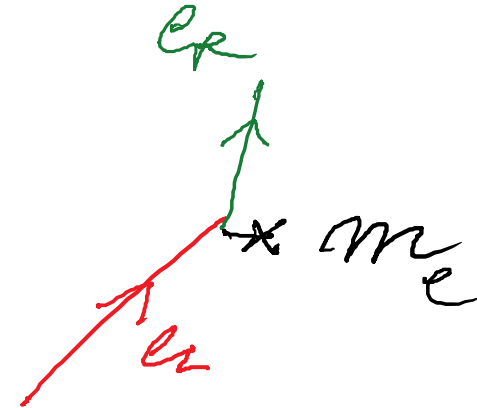
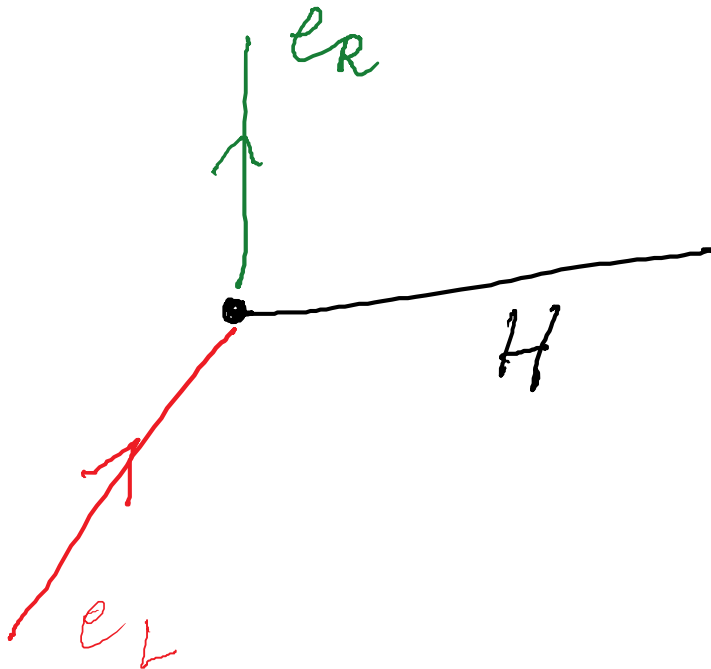
On peut penser à ces particules (bien qu'elles soient ponctuelles) comme à des balles de tennis: jusqu'ici on a assistait à des échanges où toutes les balles ont un « effet » !



Les vecteurs d'interaction (photon, W, Z, ...) portent eux aussi un spin et interagissent séparément avec les particules lévogyres et dextrogyres

De bien curieuses raquettes ? Pas tellement, elles renvoient les balles "coupée" ...telles quelles

**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 nécessairement 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!)



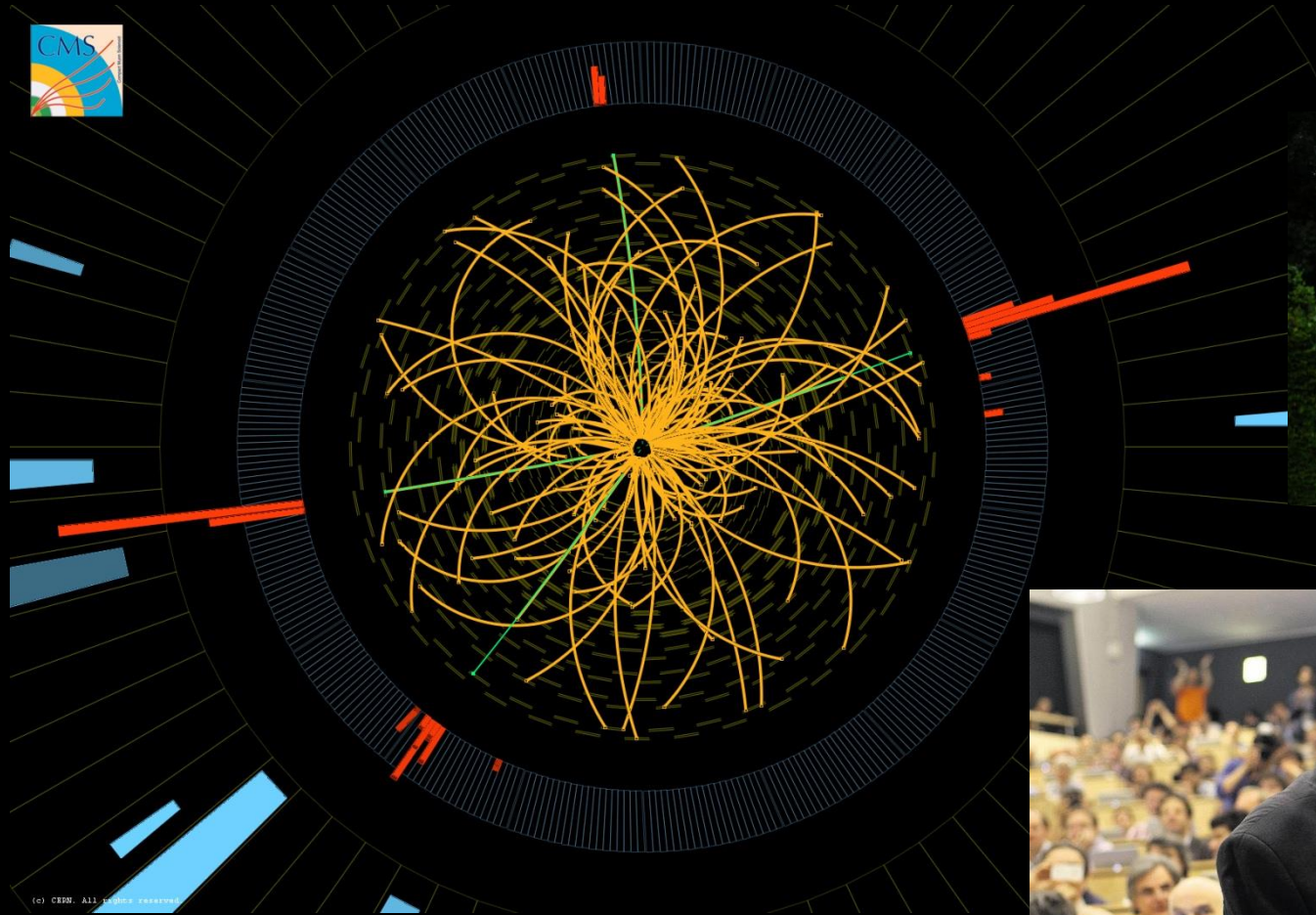
Outre d'être un objet d'un type nouveau, vu au départ comme une solution de facilité, le boson scalaire est la première particule qui interagit de façon **VRAIMENT FAIBLE** avec la matière qui nous entoure...

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

Une interaction « faiblarde »
un million de fois plus faible que les autres pour l'électron



Mais, jusqu'à sa découverte (2012), cette particule n'était qu'une hypothèse parmi d'autres possibles: une particule ou plusieurs? Un simple état lié d'autres composants?
C'est tout le problème des prédictions indirectes.



(c) CERN. All rights reserved.

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



Image : K Graham



Image : CERN

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
- De nouvelles interactions fondamentales;
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

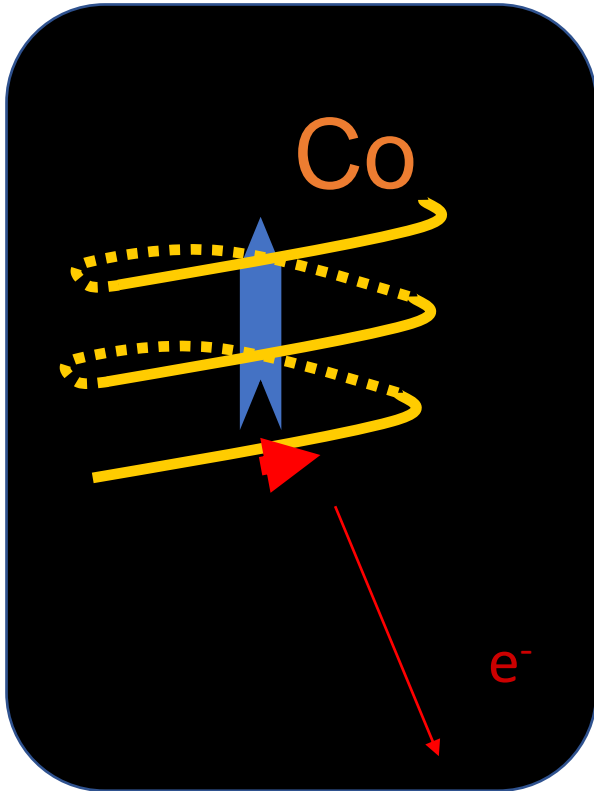
<http://www.youtube.com/watch?v=SaKeQjjzExA> (00:38)

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

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

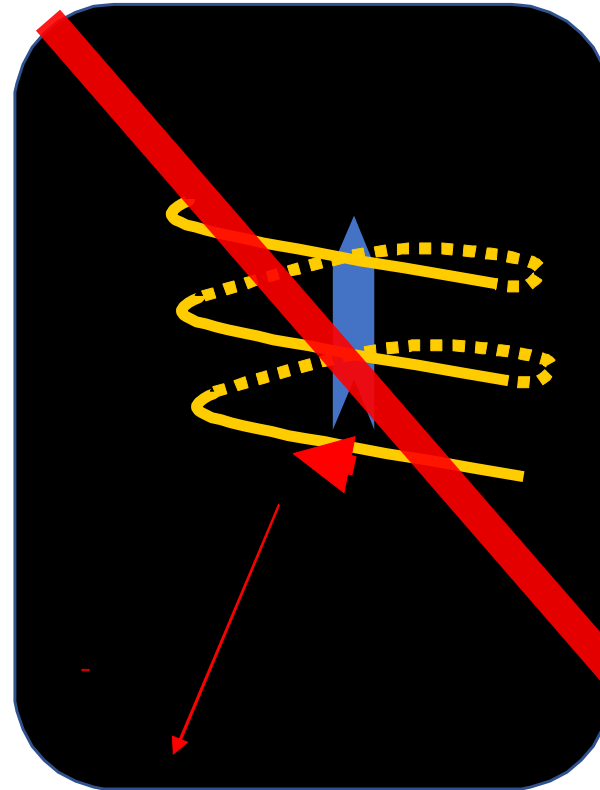
L'empirisme triomphe!

1950 's



(enroulement selon
« la main droite »)

L'autre côté du Miroir



(enroulement selon
« la main gauche »)

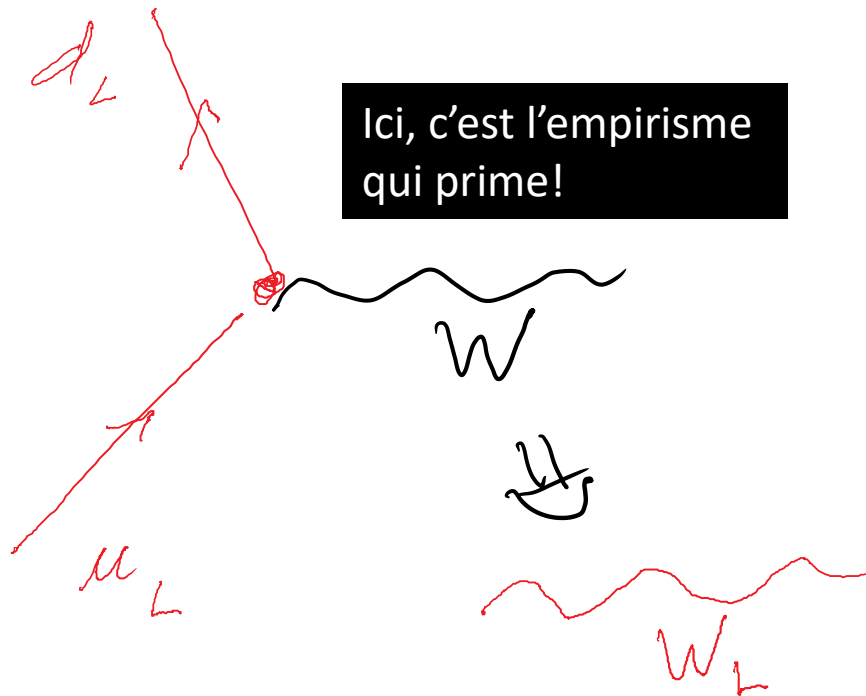
L'expérience
telle que vue
dans le miroir
est **Impossible** à
réaliser:
L'électron partirait
dans la direction
opposée

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

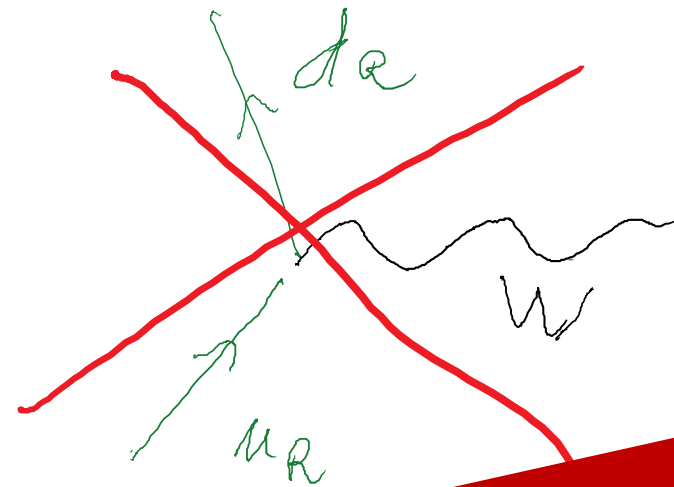
Une digression (et un anachronisme)

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...

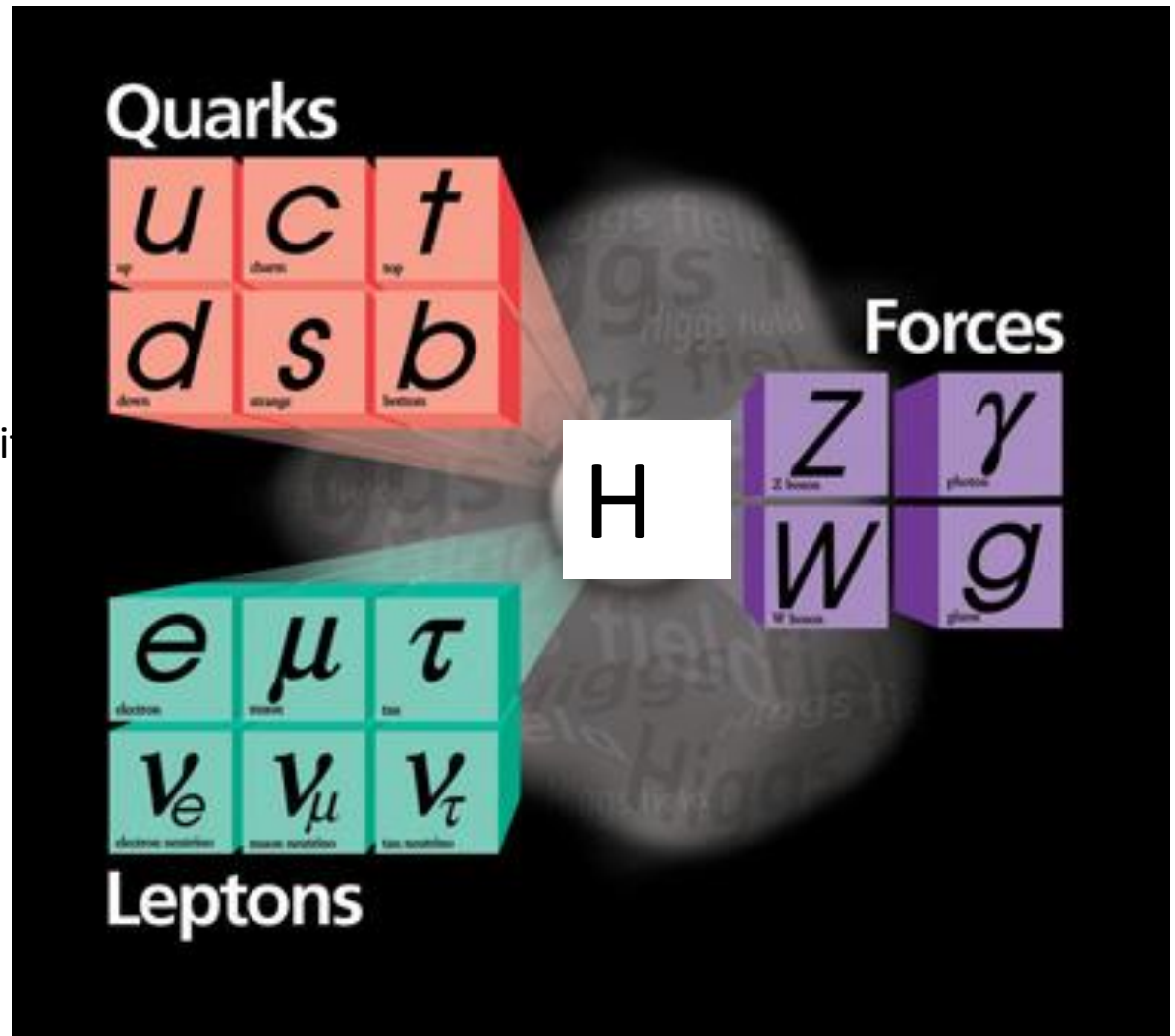
L'instabilité des familles



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

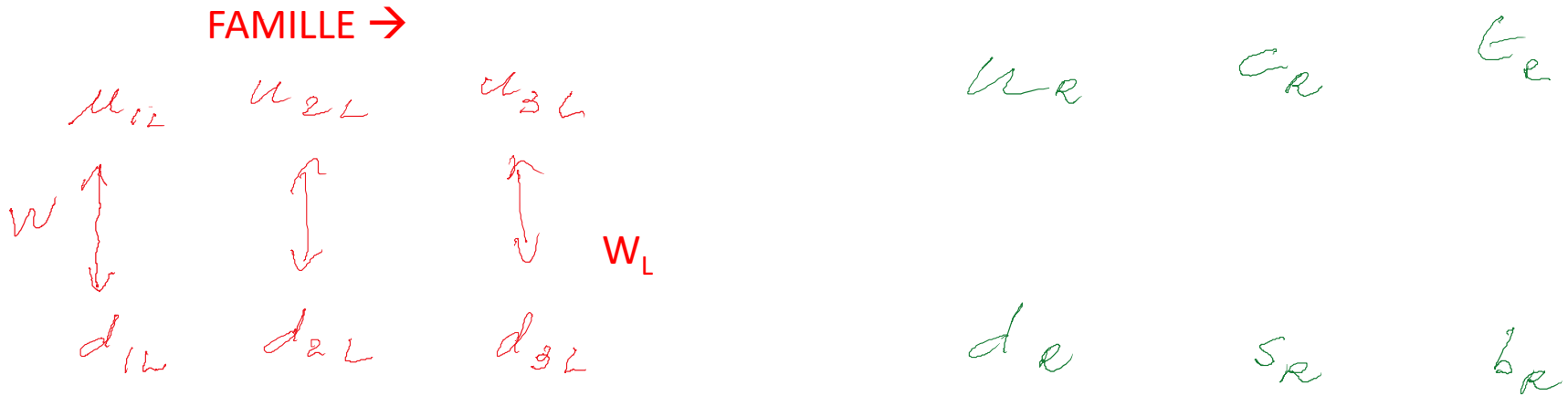
En somme, c'est ce qu'annonçai déjà la découverte du muon.

Toutes ces particules sont Instables, elles ne jouent aucun rôle dans la chimie, et ne sont produites qu'à haute énergie (accélérateurs, rayons cosmiques, début de l'Univers)



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.

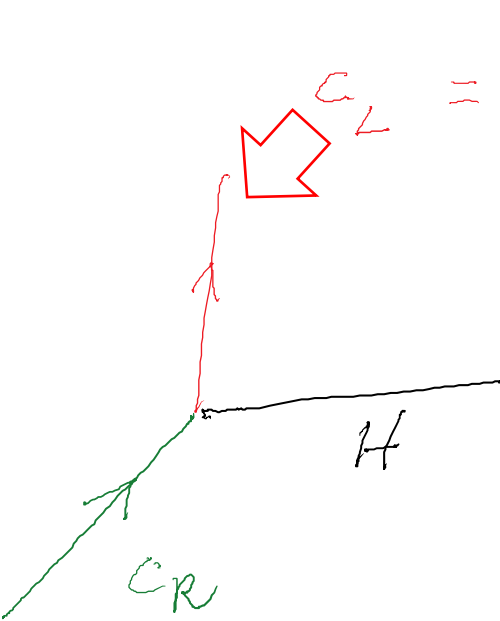
Aboutissant au schéma : (nous avons utilisé 1, 2, 3 pour désigner les familles L)



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.



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

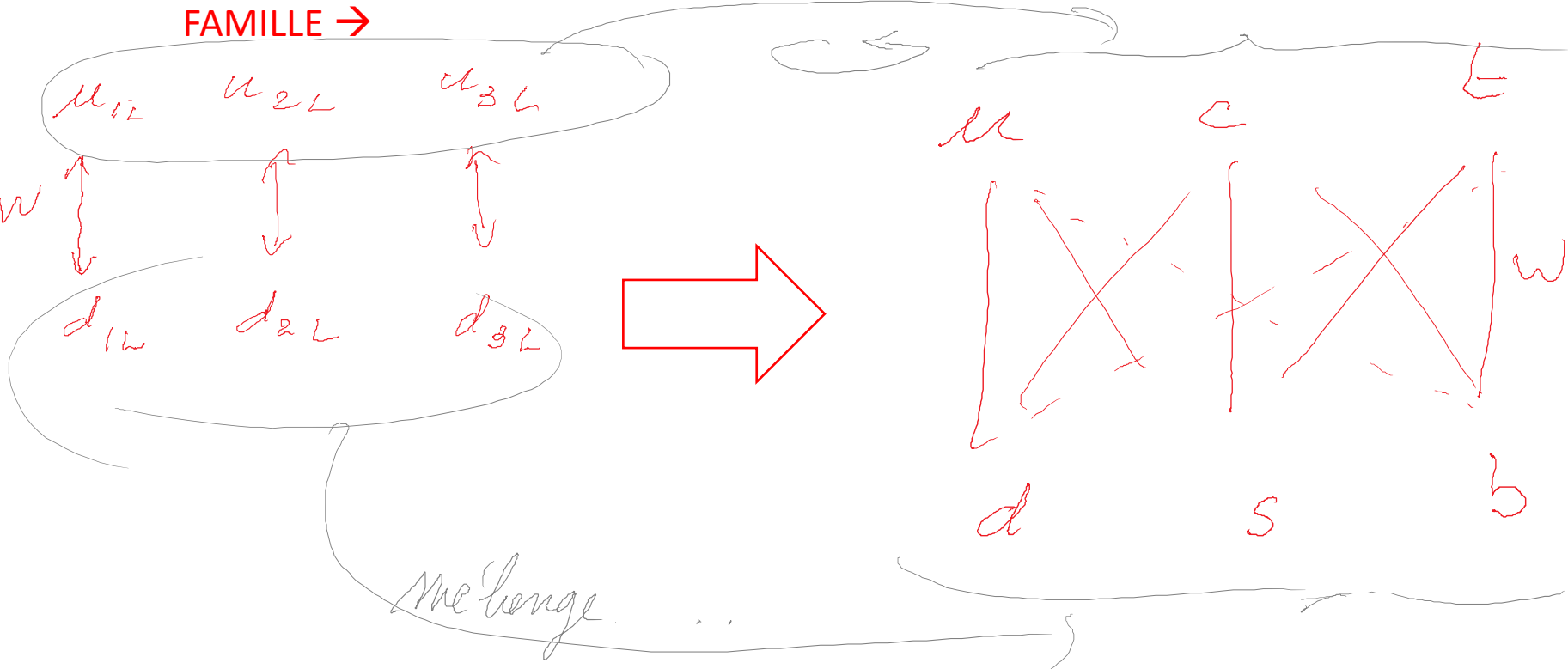
Mélange des familles ..
Un rôle fondamental, mais pas encore
« compris » des scalaires.

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

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

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

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,



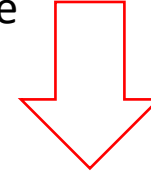
et seule la famille la plus légère reste stable.



Les bosons scalaires, s'ils permettent de paramétrer nos connaissances, n'apportent pas de réponse fondamentale, mais posent en fait d'avantage de questions.

Il est clair que nous n'avons pas une "affaire classée" !

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 qu'est-ce qu'une loi physique?
- Les interactions fondamentaleset les autres
- Le domaine de validité, mais au-delà?
- Les particules, nos outils
- De nouvelles interactions fondamentales;
a-t-il des interactions faibles ?
- 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 large flock of birds, possibly terns, is captured in flight against a sunset sky. The birds are arranged in a circular pattern, with their wings creating a dense, textured ring. The sky transitions from a bright orange glow near the horizon to a deep blue at the top. The overall scene conveys a sense of coordinated movement and natural beauty.

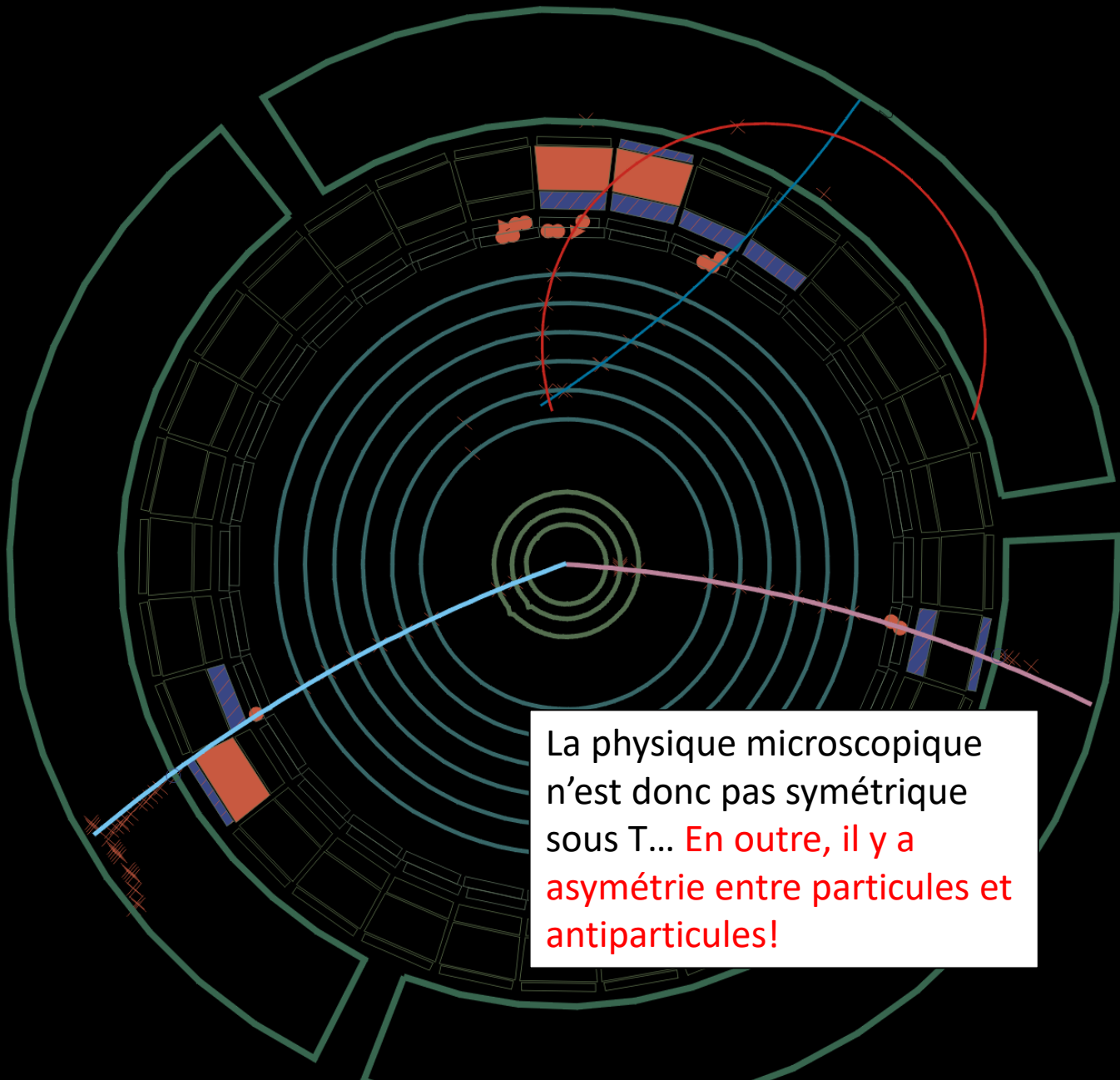
Les propriétés étranges
des interactions « faiblardes ».

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 (faiblardes) brisent les symétries:

- renversement du temps, qui dans notre contexte est équivalent à
- la symétrie particule-antiparticule (CP)

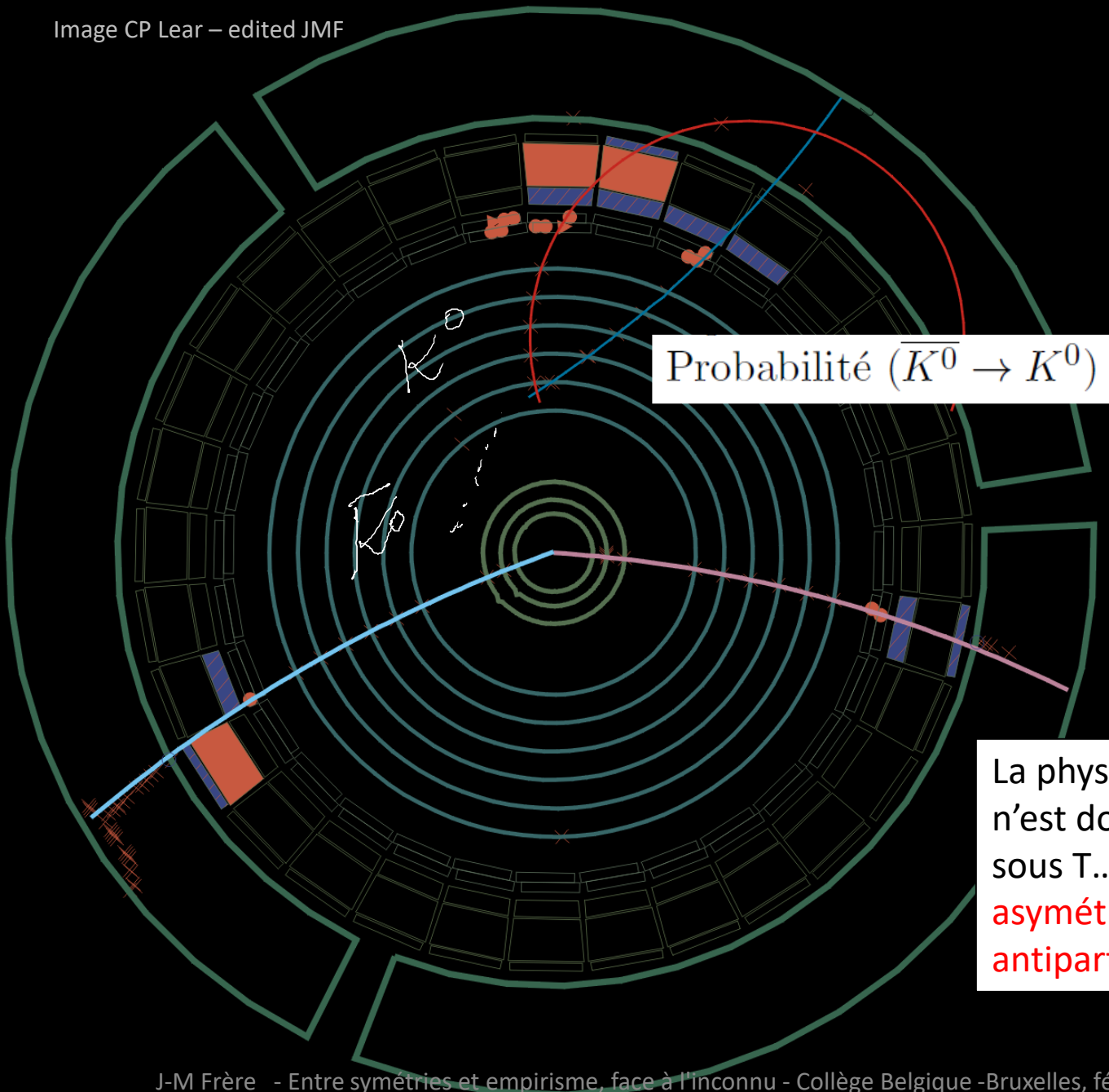


La physique microscopique n'est donc pas symétrique sous T... **En outre, il y a asymétrie entre particules et antiparticules!**

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^- .

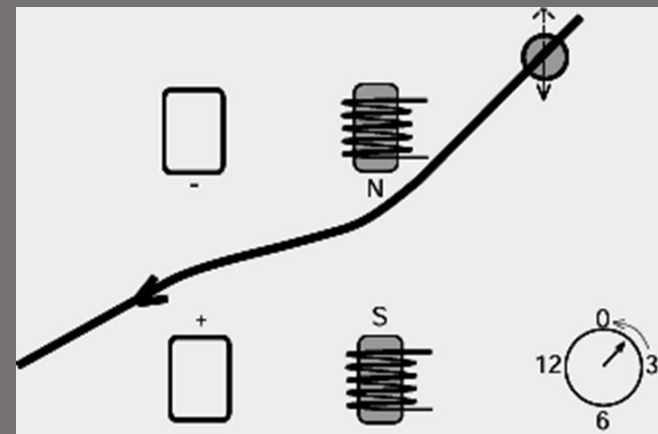
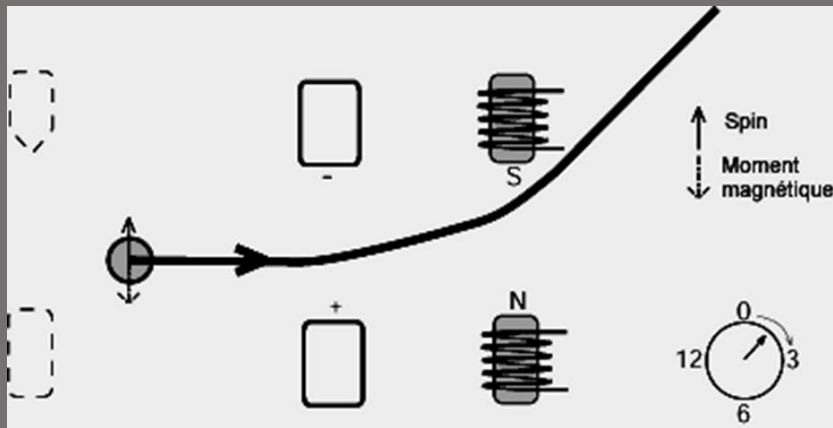
L'expérience montre que la transition anti-K vers K^- est légèrement plus probable (de 0.6 %) que la réciproque,



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 pour les caméras à positons "PET").*

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

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

Spontanément, matière et antimatière vont s'annihiler quasi complètement, pour parvenir à maintenir cette petite difference, il faut une interaction qui privilégie la matière par rapport à l'antimatière

Comme nous l'avons vu, les interactions "faiblardes" –en gros, liées au boson de Brout-Englert-Higgs, ne respectent pas la symétrie matière-antimatière. Elles sont une preuve que ce genre de mécanisme peut exister, ... Mais s'avèrent bien trop faibles...

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

Depuis Sakharov, qui a lancé le sujet, de nombreuses études s'y sont consacrées; pour le moment, le modèle le plus convaincant suppose de nouvelles particules, des neutrinos dextrogyres extrêmement lourds...

Mais il est difficile de trancher entre les modèles, car la plupart se situent typiquement à des énergies inaccessibles aux accélérateurs.



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)

- Mais qu'est-ce qu'une loi physique?
- Les interactions fondamentaleset les autres
- Le domaine de validité, mais au-delà?
- Les particules, nos outils
- De nouvelles interactions fondamentales;
a-t-il des interactions faibles ?
- 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 Perspectives**

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 plus larges,

par exemple entre interactions fortes et électrofaibles, sont probables.

Les 3 couplages encore présents dans le modèle actuel $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, seraient remplacés par un seul dans un groupe de symétrie unique $SU(5)$, voire $SO(10)$, voire $E(6)$ avec un seul couplage.

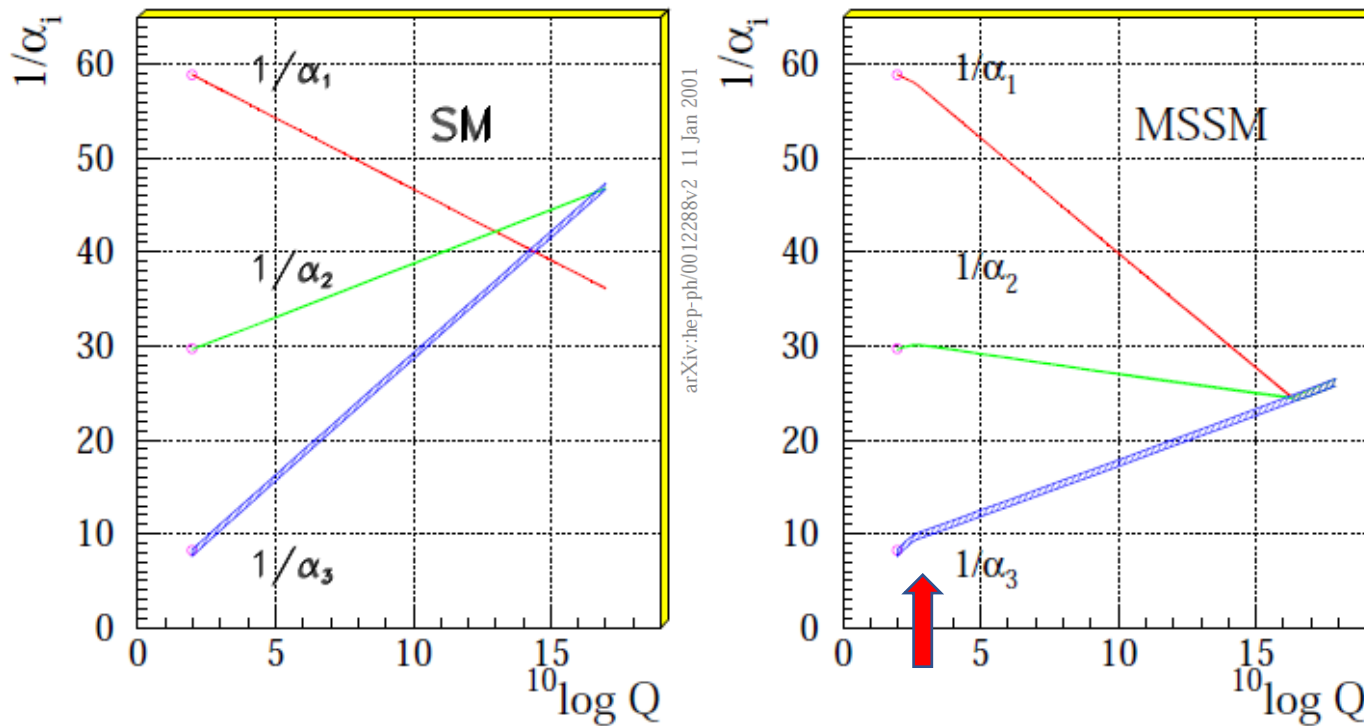
Mais les échelles impliquées sont de l'ordre de 10^{16} GeV...hors de portée du LHC

Toutefois, l'unification n'est possible que si de nouvelles particules sont découvertes dans le domaine de masses du TeV (celui du LHC!) ... 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 !

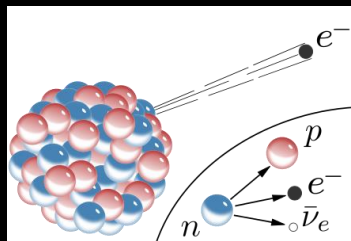
Unification of the Coupling Constants in the SM and the minimal MSSM

Picture D Kazakov

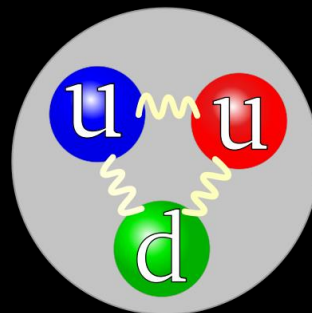


Nouvelles particules (qq TeV)
accessibles aux accélérateurs

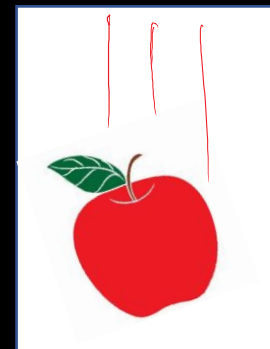
Maxwell, Einstein



Interactions
faibles



Interactions
fortes



Gravitation

Electro-Magnetisme

Unification électrofaible

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

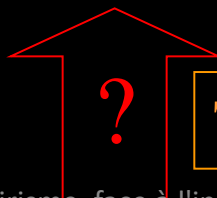
Grande Unification

Energie = 10 000 000 000 000 000 m_p

Théorie du Tout

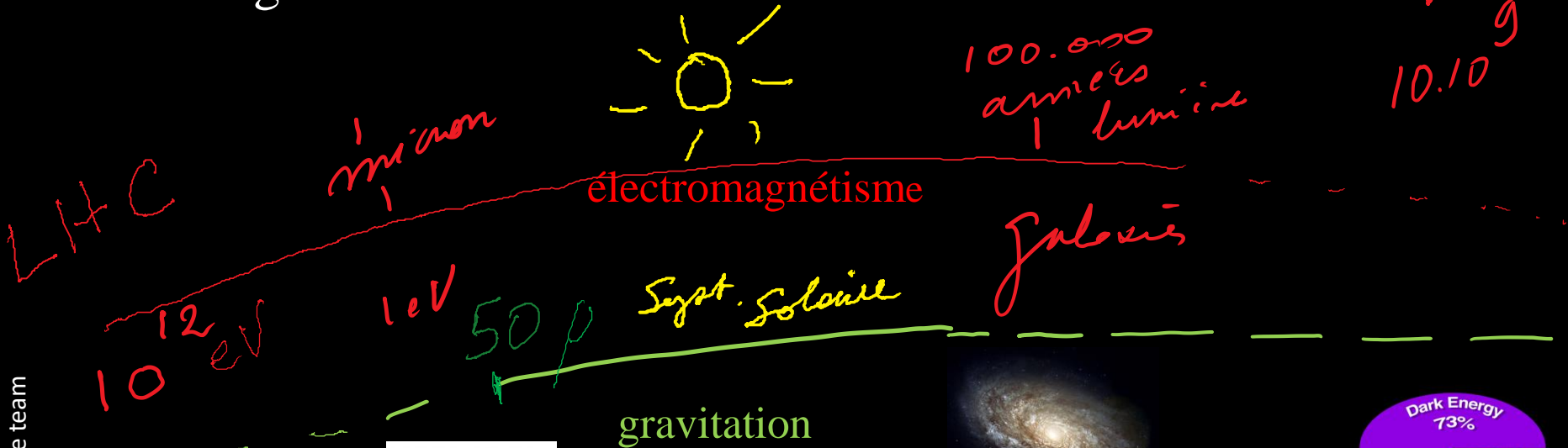
Energie de l'Univers,
Cosmologie

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

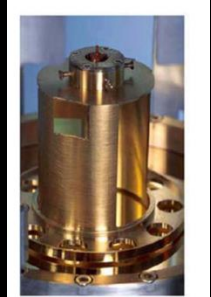
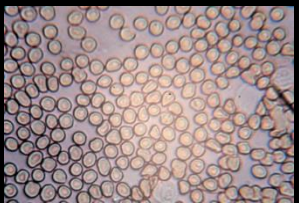


Théorie des Cordes ??

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



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)...domaine où la gravitation n'est pas testée ...

Un candidat à l'unification est la théorie des cordes, mais aucune prévision spécifique n'a pu être testée à ce jour .

Comprendre le spectre de masse ?

Si on sait comment la masse est générée

(par interaction avec le boson de Brout-Englert-Higgs, l'échelle des masses semble assez aléatoire ... Il existe des modèles,

- Pour les particules charges, toutes les masses sont aujourd'hui connues, une seule a été prédite (par une expérience indirecte) → impossible de tester une nouvelle prédiction!
- Pour les neutrinos (ce serait l'objet d'un autre cours) nous ne connaissons que les différences de masses (en fait, les différences des carrés des masses), pas les masses elles-mêmes : les expériences en cours vont les déterminer, et il reste donc une petite fenêtre pour faire des prédictionsfaites vos jeux!

Une possibilité d'interprétation passerait par une nouvelle interaction reliant les familles mais les tests indirects nous disent que leurs vecteurs devraient dépasser 100 TeV ... inaccessibles aux accélérateurs même en projet lointain!

L'argument de la précision

Et pourquoi ces particules nous échappent

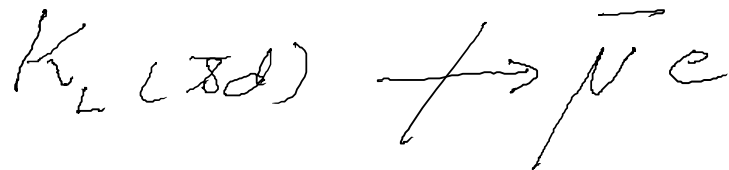
1 Masse du proton ~ 1 GeV

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 $\frac{K_L \rightarrow \pi e}{K_L \rightarrow \text{all}} < 10^{-12}$

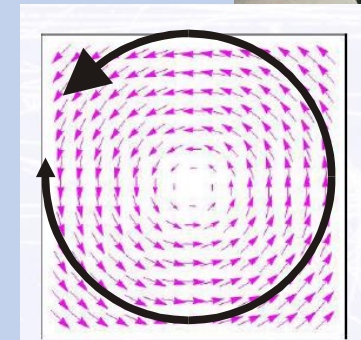
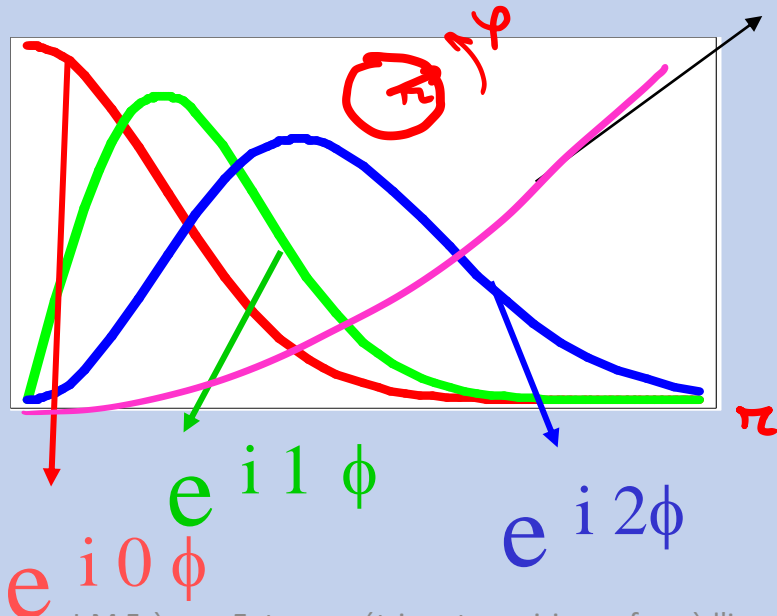
$\Rightarrow m_X > 100 \text{ TeV}$

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 déterministe, 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 , le boson de Brout-Englert-Higgs

- 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 (**l'énergie noire** : 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
- ...

Ainsi, la situation s'inverse, et nous n'avons plus, pour les accélérateurs, de prévisions contraignantes, juste des "possibles", **nous sommes à l'affût de nouvelles mesures surprenantes!**

Par contre, la description avec une précision croissante de l'évolution cosmologique aidée par les observations terrestres et de satellites, (l'astronomie "multimessenger") nous confirme la nécessité d'avoir "une physique au-delà du modèle standard"

Pour cette "nouvelle physique, 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).**

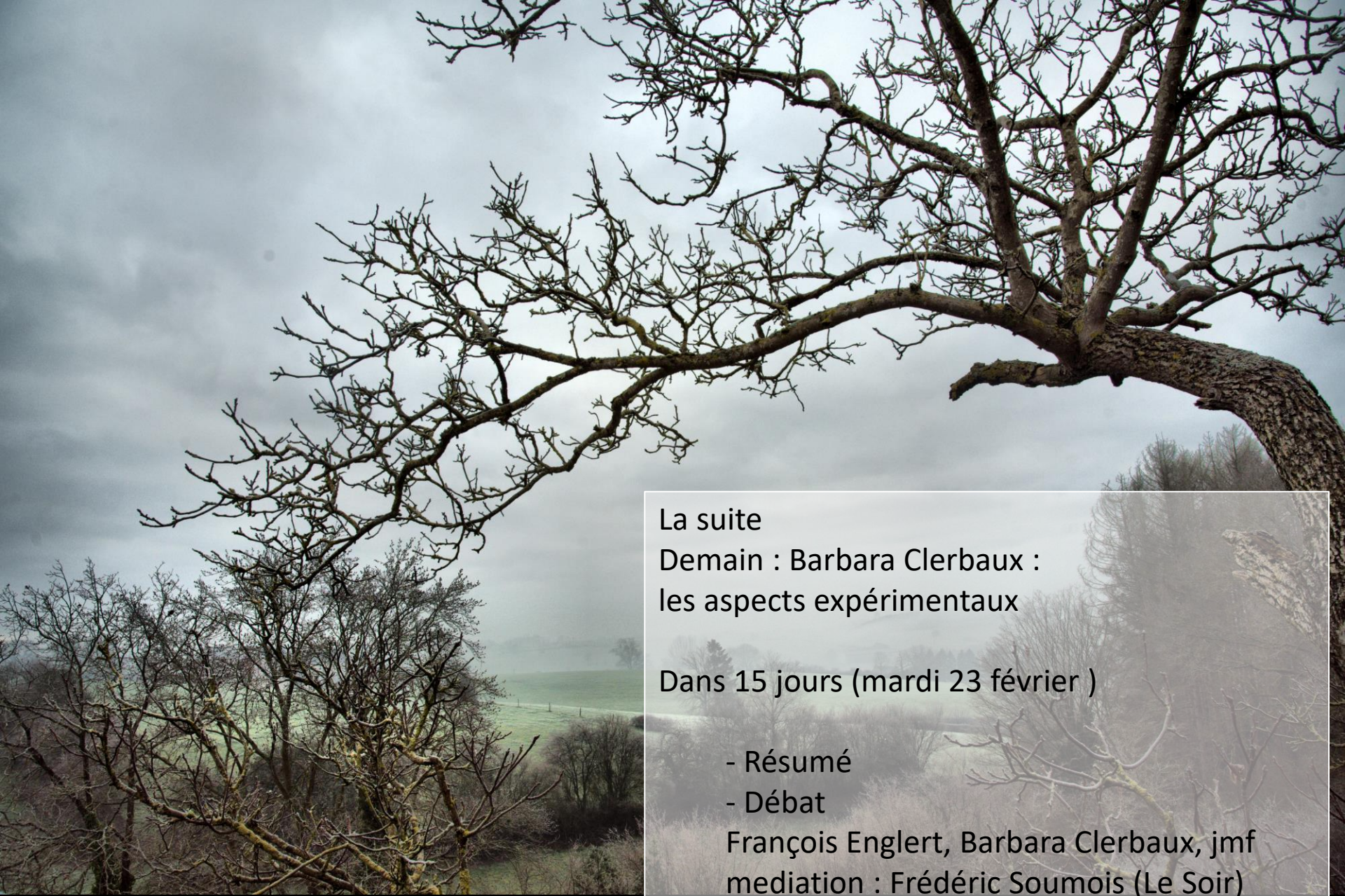
Ici aussi, le LHC offre des perspectives intéressantes.

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 cette unification se situent à très courte distance, (très haute énergie), là où la gravitation n'est pas testée.



La suite

Demain : Barbara Clerbaux :
les aspects expérimentaux

Dans 15 jours (mardi 23 février)

- Résumé
- Débat

François Englert, Barbara Clerbaux, jmf
mediation : Frédéric Soumois (Le Soir)