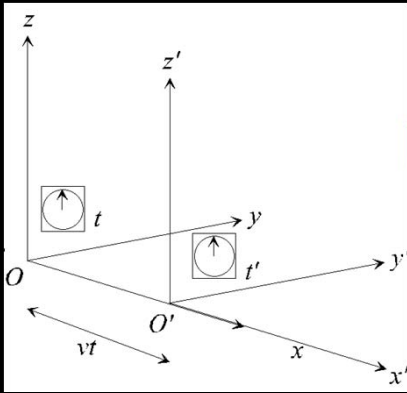


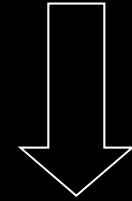
Au-delà du Boson Scalaire de Brout-Englert et Higgs...

succès et questions ouvertes.

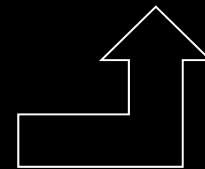


Einstein

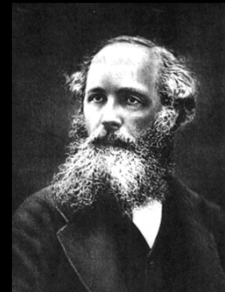
Les lois sont les mêmes
pour tous...les observateurs



$$E=mc^2$$



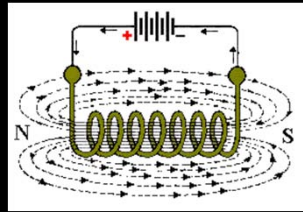
$c =$ vitesse de la
Lumière = Cte



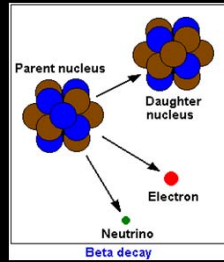
Maxwell

A la fin du XIXème et au début de XXème siècle,
l'unification de l'électricité et du magnétisme
offre l'exemple d'approches inductives et **déductives**

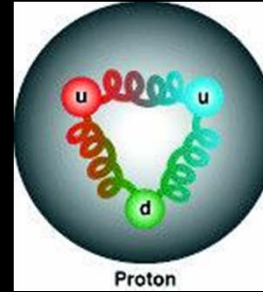
Maxwell, Einstein



Electro-Magnetisme



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 ??

étoile



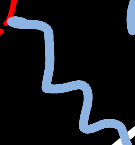
γ



électron



γ

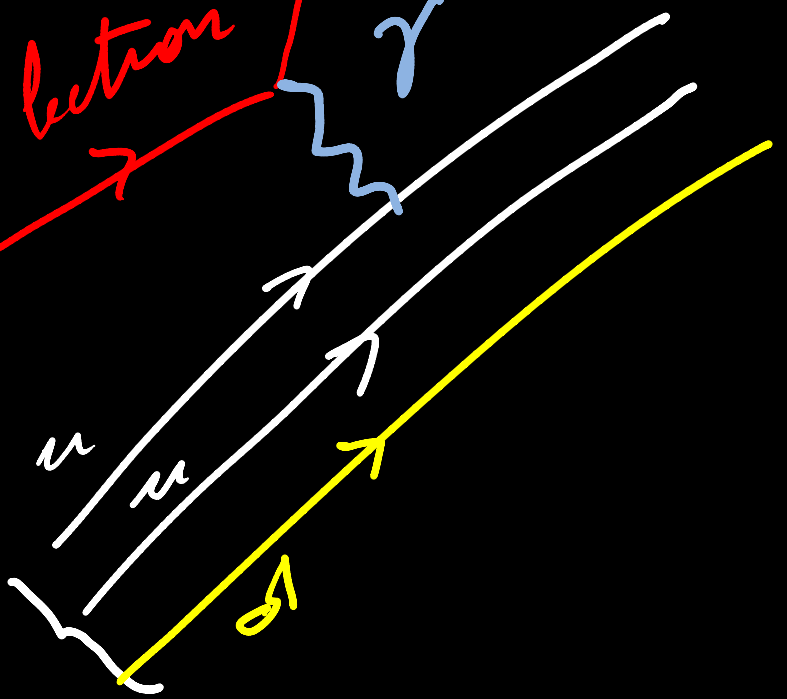


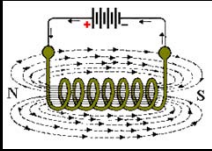
ν

ν

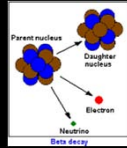
neutron

β





Electro-Magnetisme

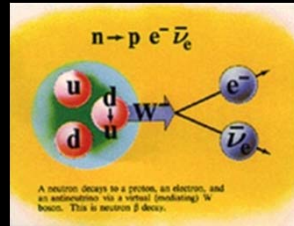


Interactions faibles

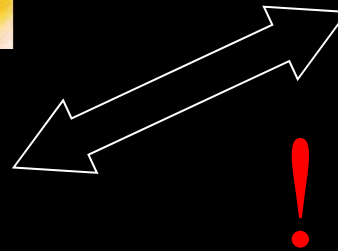
Unification électro-faible:
Beaucoup plus difficile que l'unification électromagnétique, car ici, les forces sont en apparence très différentes



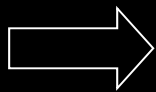
Portée = tout l'Univers



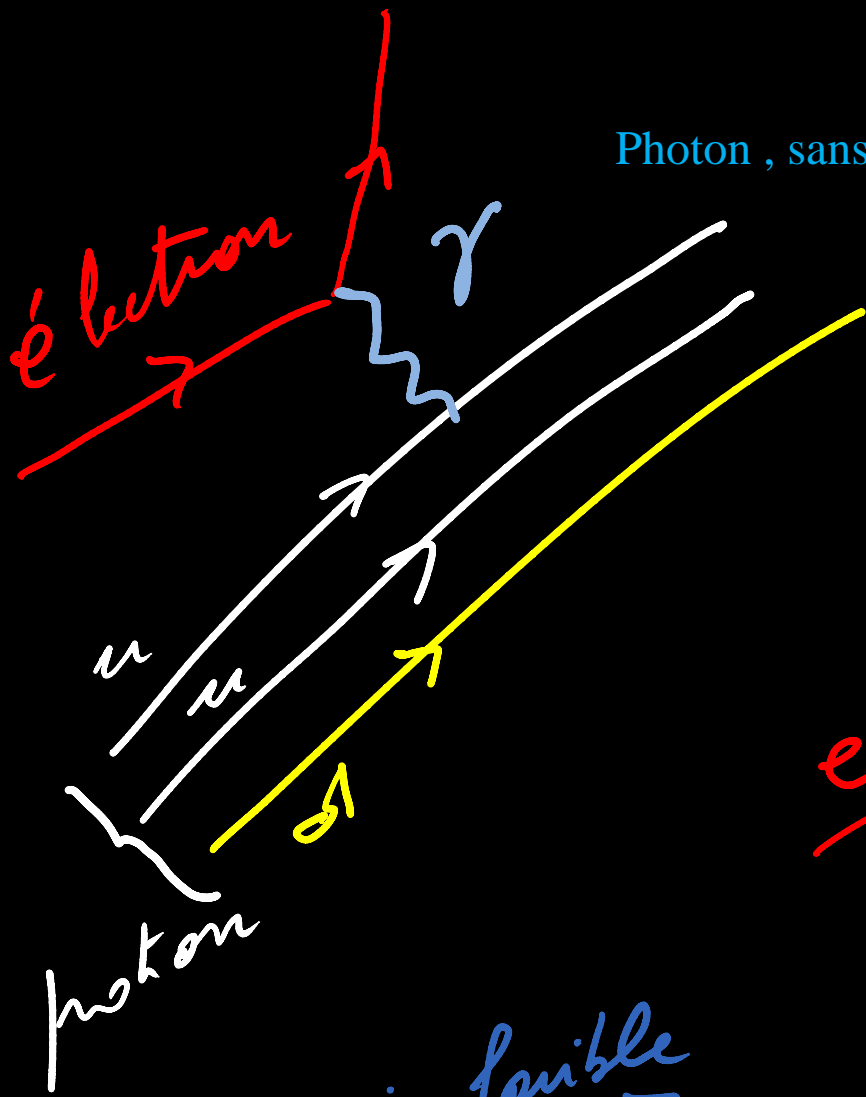
Portée = 1/100 000 000 000 000 mm



L'unification est un vrai tour de force, et une réussite maintenant bien établie, permettant les calculs les plus précis de toute la physique ...

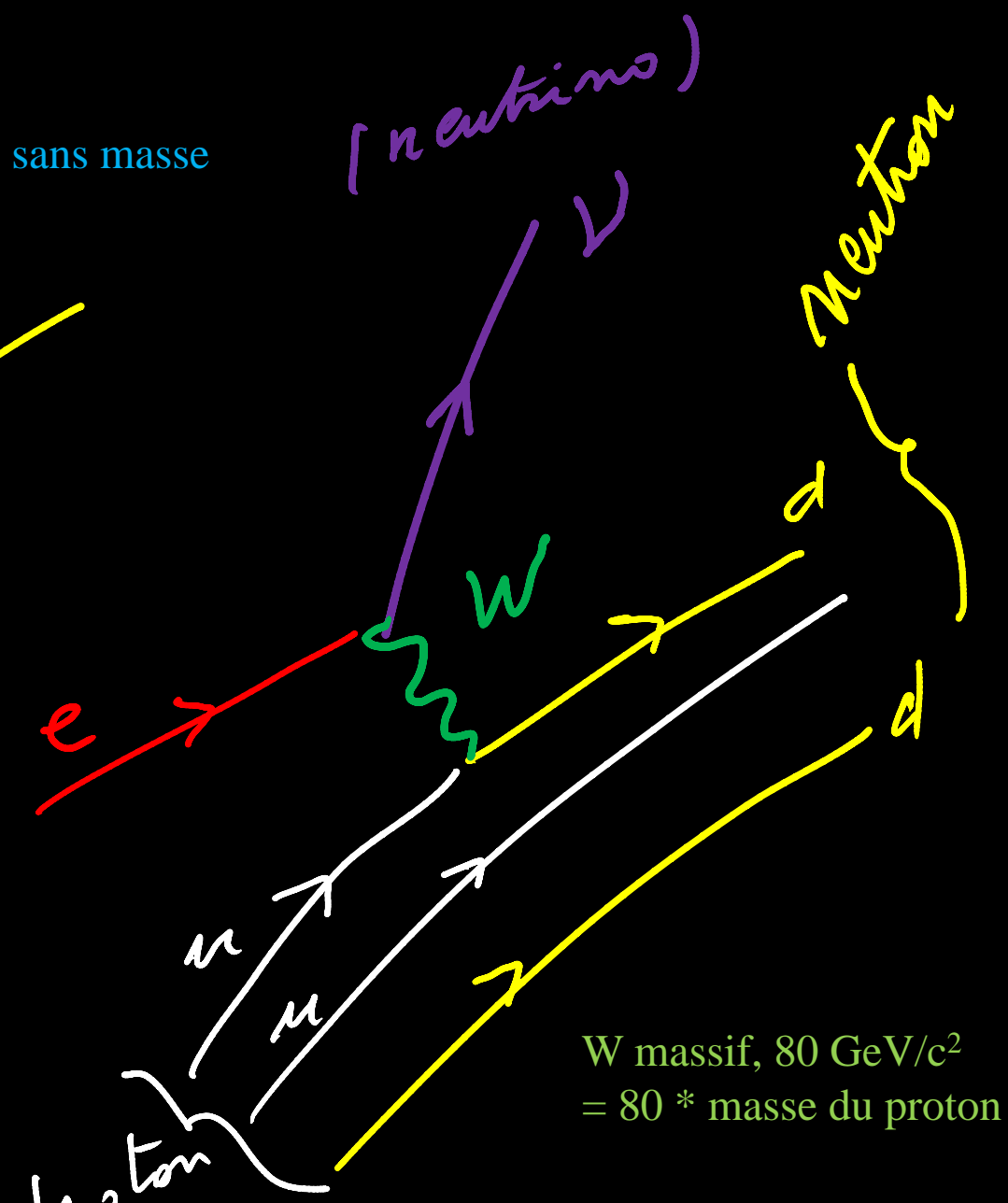


Brisure de Symétrie = mécanisme de Brout-Englert-Higgs



interaction faible

$p \rightarrow n + e + \bar{\nu}$



W massif, $80 \text{ GeV}/c^2$
 $= 80 * \text{masse du proton}$

Interaction faible
 Électron + proton \rightarrow neutron + neutrino

L'interaction faible et l'interaction électromagnétique sont très semblables par plusieurs aspects, mais diffèrent significativement

Notamment, par le fait que l'électromagnétisme, dont le porteur est le photon a une portée **infinie**, tandis que l'interaction faible, dont le porteur est le « vecteur W », a une **portée = 1/100 000 000 000 000 mm**

En physique des particules,

portée infinie \leftrightarrow masse du photon = 0

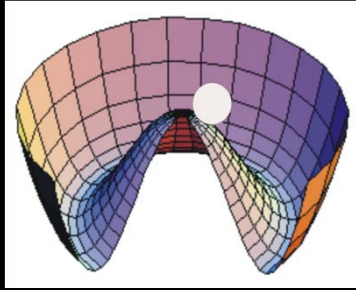
portée finie \leftrightarrow masse du W non nulle

Expérimentalement : masse du W 80 X masse du proton
(80 GeV/c²)

Hypothèse: il s'agit de la même famille
d'interactions au départ,
(il y a une symétrie entre toutes les interactions) ,

mais cette symétrie est
brisée par un mécanisme qui donne une masse à
l'une, et pas à l'autre..

Brisure de Symétrie et Modèle Standard (Brout Englert Higgs)



1964 brisure spontanée de la symétrie

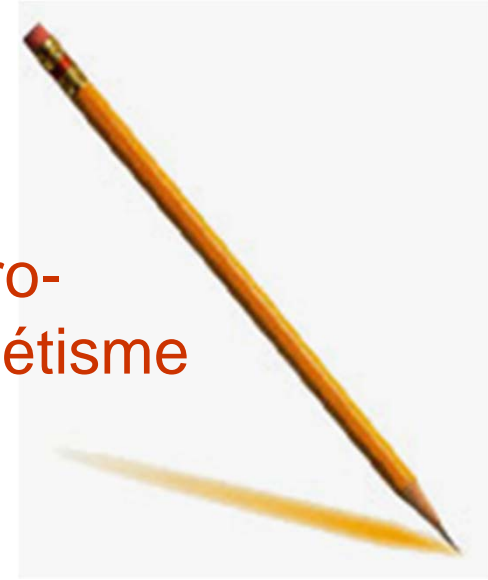
...1967 Modèle unifié des interactions électromagnétiques et faibles,

1971 Cohérence mathématique

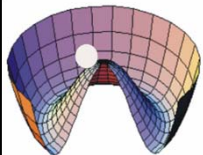
1973 Première confirmation expérimentale (courants neutres)

1983 Découverte des bosons W et Z (CERN)

Électro-
magnétisme



Interaction faible



Symmetry breaking and Standard Model

1963 Quark mixing

1964 Spontaneous symmetry breaking

1967 Standard Model (Electro-Weak),

1970 The need for a 4th Quark:
STRANGENESS → CHARM

1971 Mathematical consistency

1973 Direct experimental confirmation of
SM – neutral currents

1973 The need for 6 quarks

1974 Discovery of the 4th quark (Charm)

1983 Découverte des bosons W et Z
(CERN)

Il manque une particule!

N. G.

W.

R. F.

Nobel 1979

S. Weinberg, S. Glashow, A. Salam

S. Glashow, J Iliopoulos, L. Maiani

Nobel 1999 M. Veltman G 't Hooft

Nobel 2008 M Kobayashi, T Maskawa

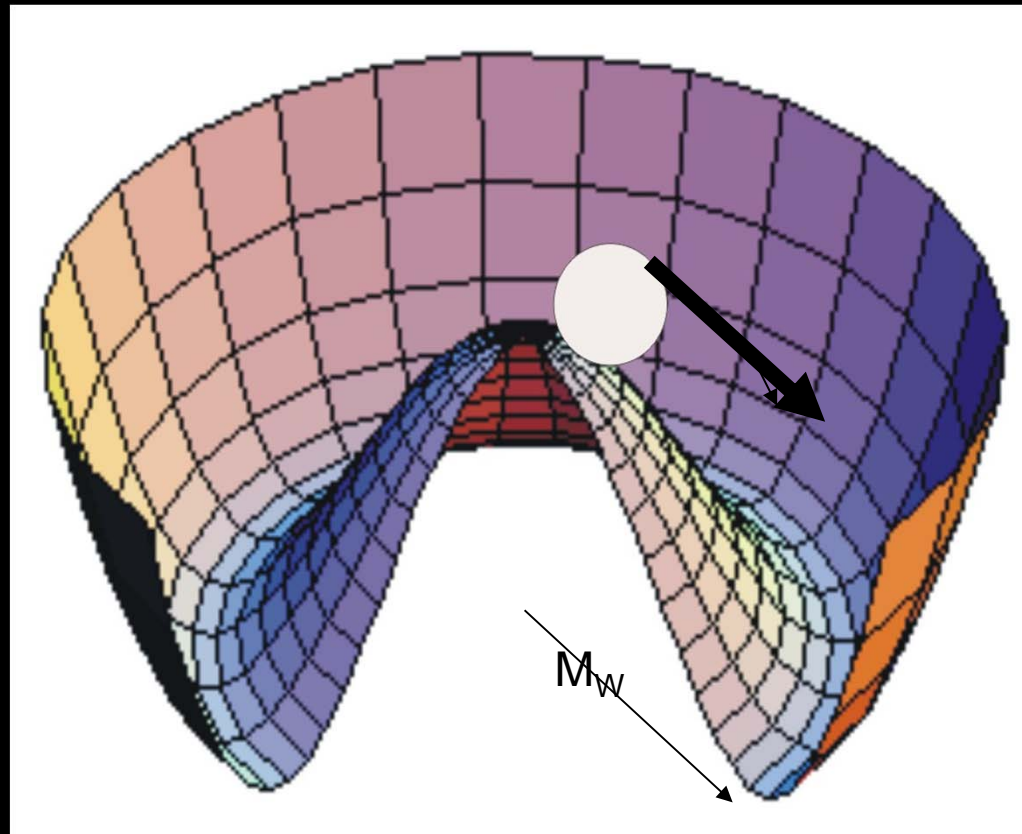
Nobel 1976 B Richter, S Ting

Nobel 1984 C. Rubbia-S. van der Meer

Pour briser la symétrie entre photon et W, Brout, Englert, puis Higgs prédisent une nouvelle forme de matière: le boson scalaire (ou boson de Brout-Englert et Higgs).

Cette nouvelle particule est placée dès l'abord dans une situation instable: pensons à une bille sur un sombrero... ici aussi, elle tombera, ...mais restera prisonnière dans le fossé....

L'équivalent physique de cette distance a été mesuré avec grande précision, c'est précisément la masse du boson de jauge W (ce qui le différencie du photon), mais la forme détaillée du « sombrero » n'est pas connue.



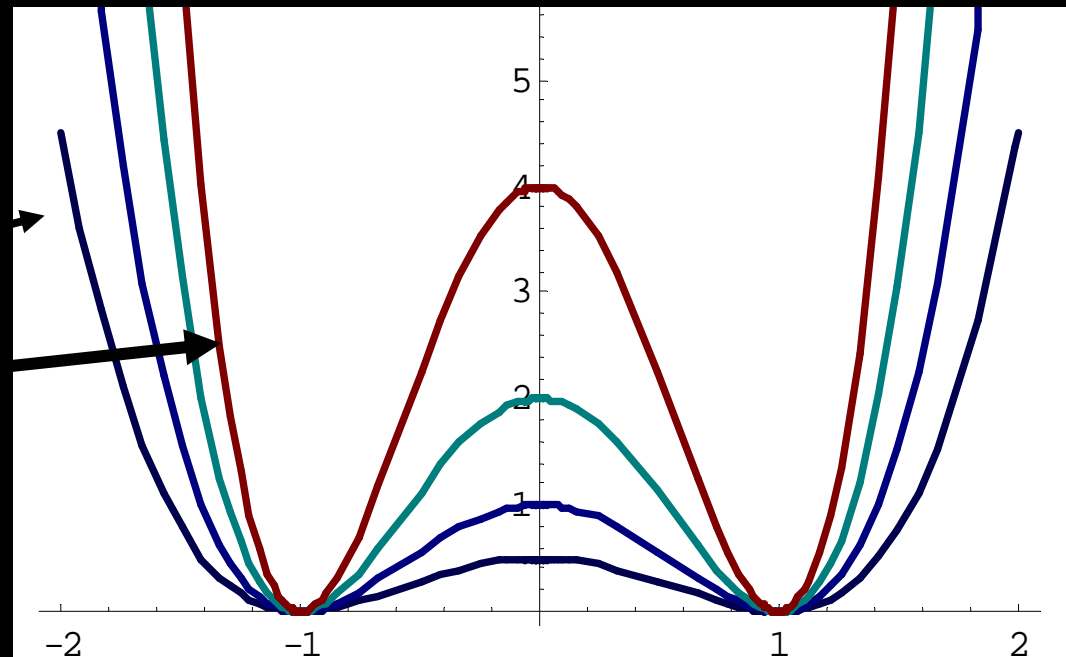
Au départ, on pouvait deviner la plupart des propriétés de cette particule,
et surtout elle devait provoquer la brisure de symétrie entre électricité et interactions faibles...

Mais on ne connaissait pas sa masse,
... ce qui rendait la recherche difficile!

Dans le cas présent, la courbure du chapeau correspond , *dans la réalisation la plus simple du mécanisme*, à la masse d'une particule nouvelle:

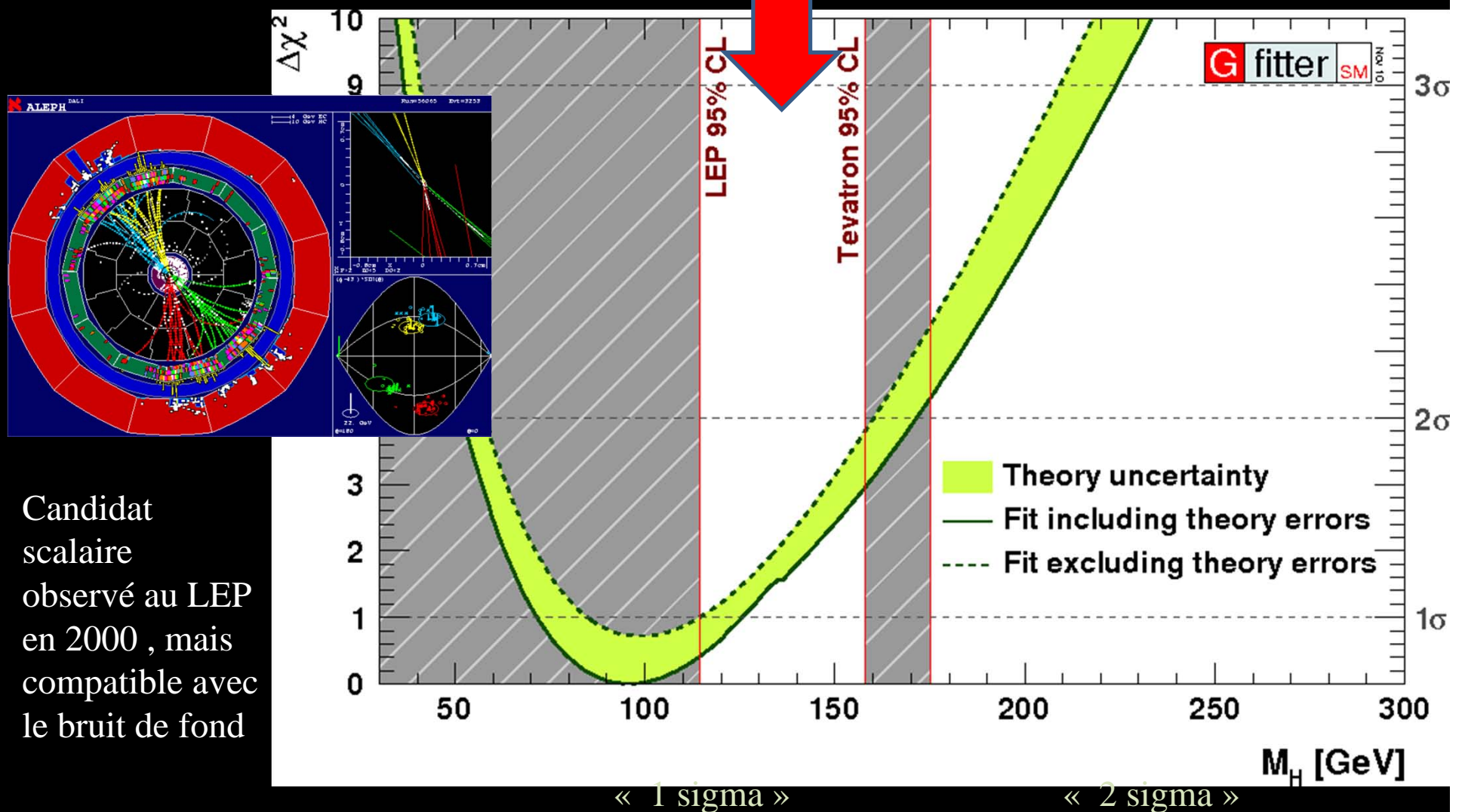
le boson scalaire (de Brout-Englert-Higgs)

On s'attend à une masse comprise entre 100 et 1000 fois celle de l'atome d'hydrogène.



Et de cette masse, dépendait sa production aux accélérateurs,

Des limites indirectes, résultant de mesures de son effet indirect sur d'autres expériences, avaient permis de cerner le **domaine de masses autorisé** ...

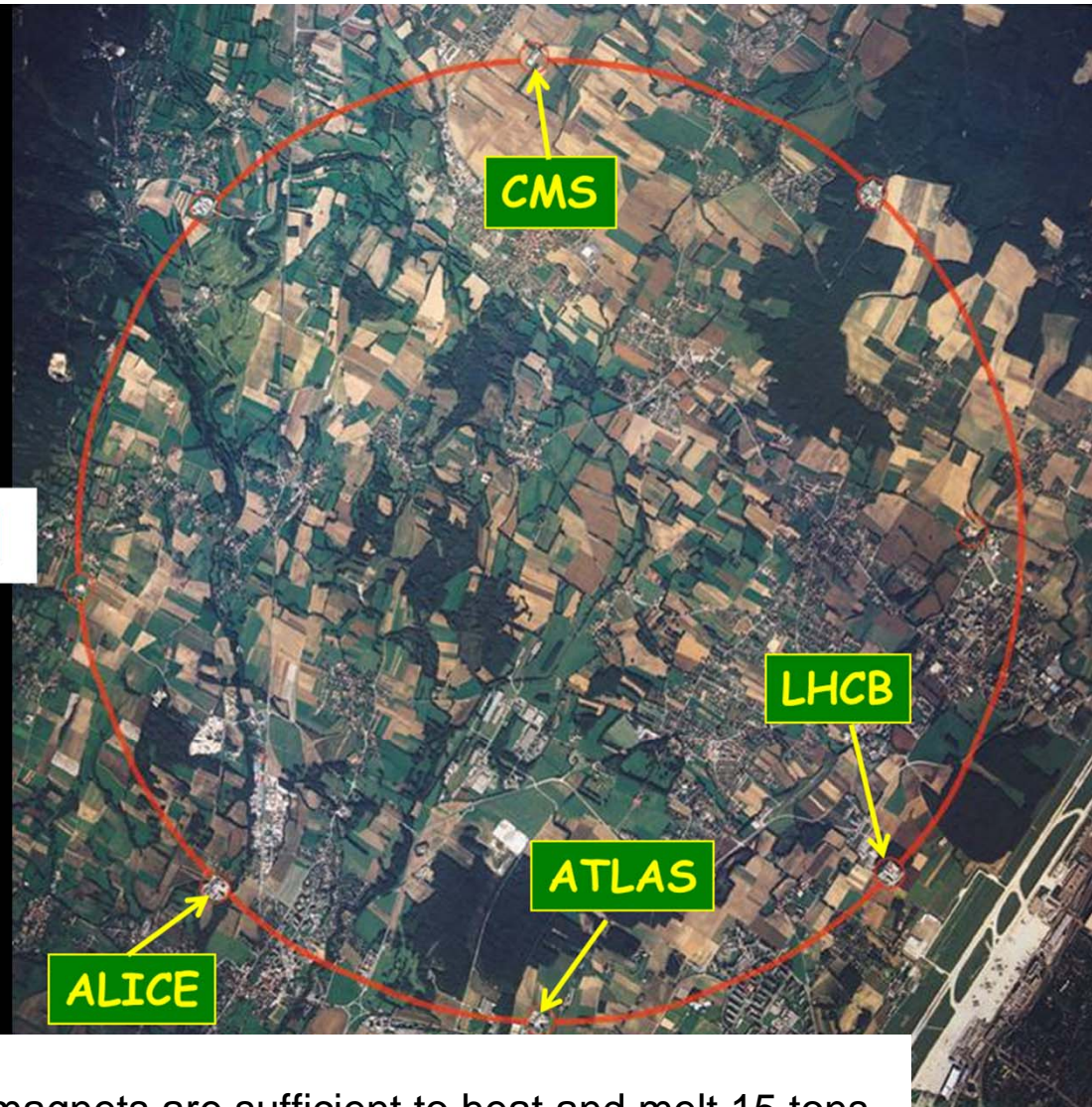


Candidat scalaire observé au LEP en 2000, mais compatible avec le bruit de fond

Le LEP est la machine précédente du CERN,
Le Tevatron est une machine analogue au LHC,
mais moins puissante située à FERMILAB, près de Chicago

Le LHC ...

26.7 km LEP/LHC tunnel

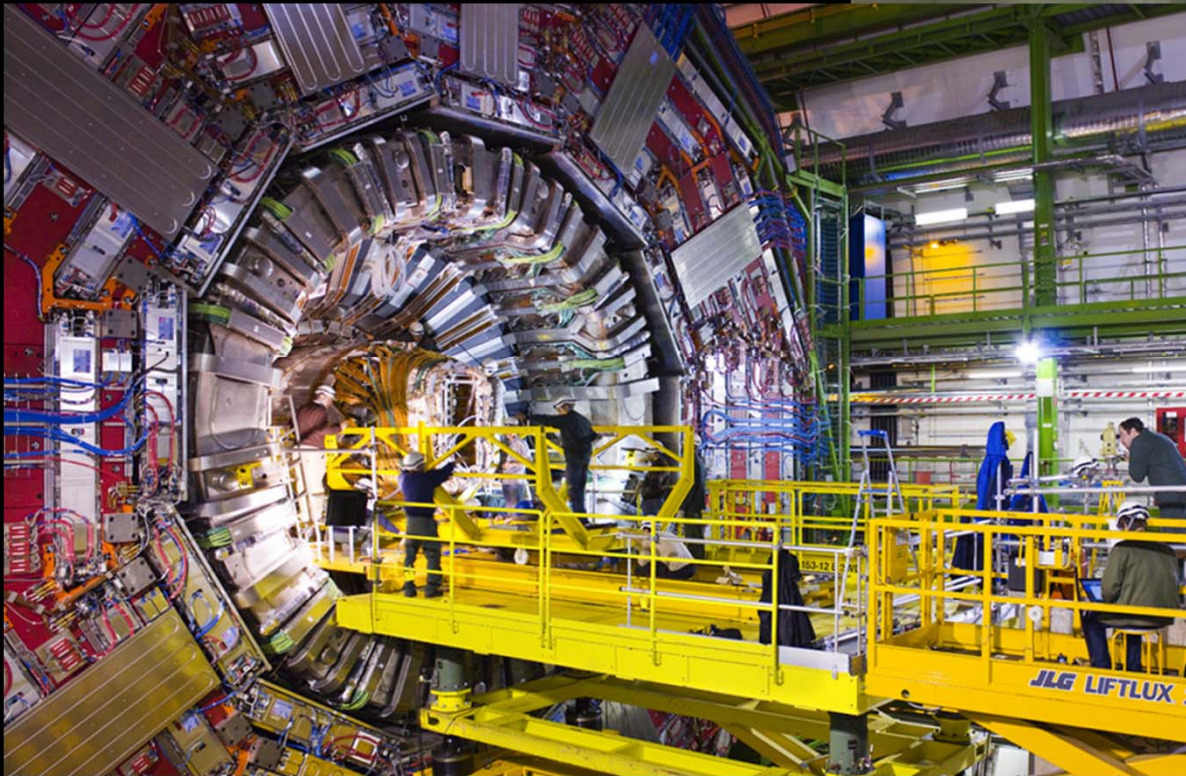


D'après les présentations du CERN :

- The **11 GJ** of energy stored in the magnets are sufficient to heat and melt 15 tons of Copper ($\sim 1.7 \text{ m}^3$).
- The **350 MJ** stored in each beam correspond to $\sim 90 \text{ kg}$ of TNT.

Plasma-hydrodynamic simulations indicate that the beam will drill a $\sim 30 \text{ m}$ long hole into Copper.

Aimants supraconducteurs
→ réduction de la consommation,
Mais aussi des mois de refroidissement/réchauffement
en cas d'intervention



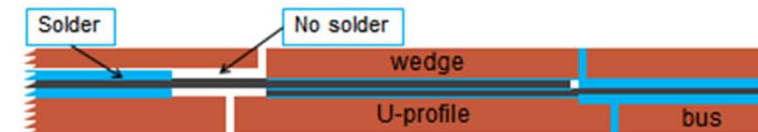
CMS



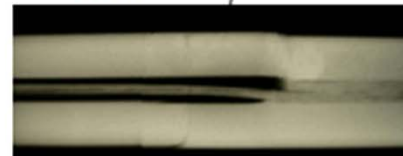
Joint quality



- The copper stabilizes the bus bar in the event of a cable quench (=bypass for the current while the energy is extracted from the circuit).
Protection system in place in 2008 not sufficiently sensitive.
- A copper stabilizer with reduced continuity coupled to a superconducting cable badly soldered to the stabilizer may lead to a serious incident.



X-ray of joint



- During repair work in the damaged sector, inspection of the joints revealed systematic voids caused by the welding procedure.

Status of the LHC - Rencontres de Moriond
7.03.2010

22

Mais ... accident au démarrage le 19 sept 2008

Main damage area covers ~ 700 metres.

- **39** out of 154 main **dipoles**,
- **14** out of 47 main **quadrupoles**

from the sector had to be moved to the surface for repair (16) or replacement (37).

Le LHC ... ENFIN !

Paramètres prévus :

Energie $7 + 7$ TeV

Luminosité (accumulée par an) : $10 - 30$ fb⁻¹

Mais ... accident au démarrage le 19 sept 2008

Redémarrage en Nov 2009

Aujourd'hui:

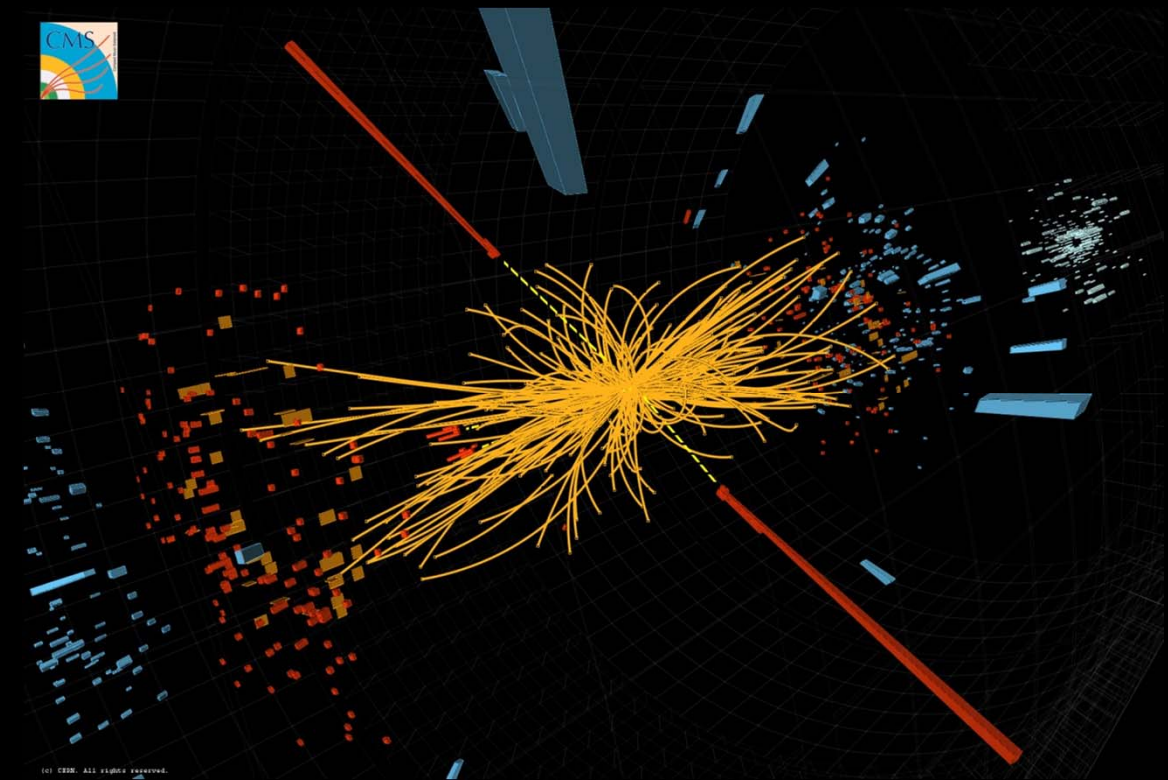
$3.5 + 3.5$ TeV

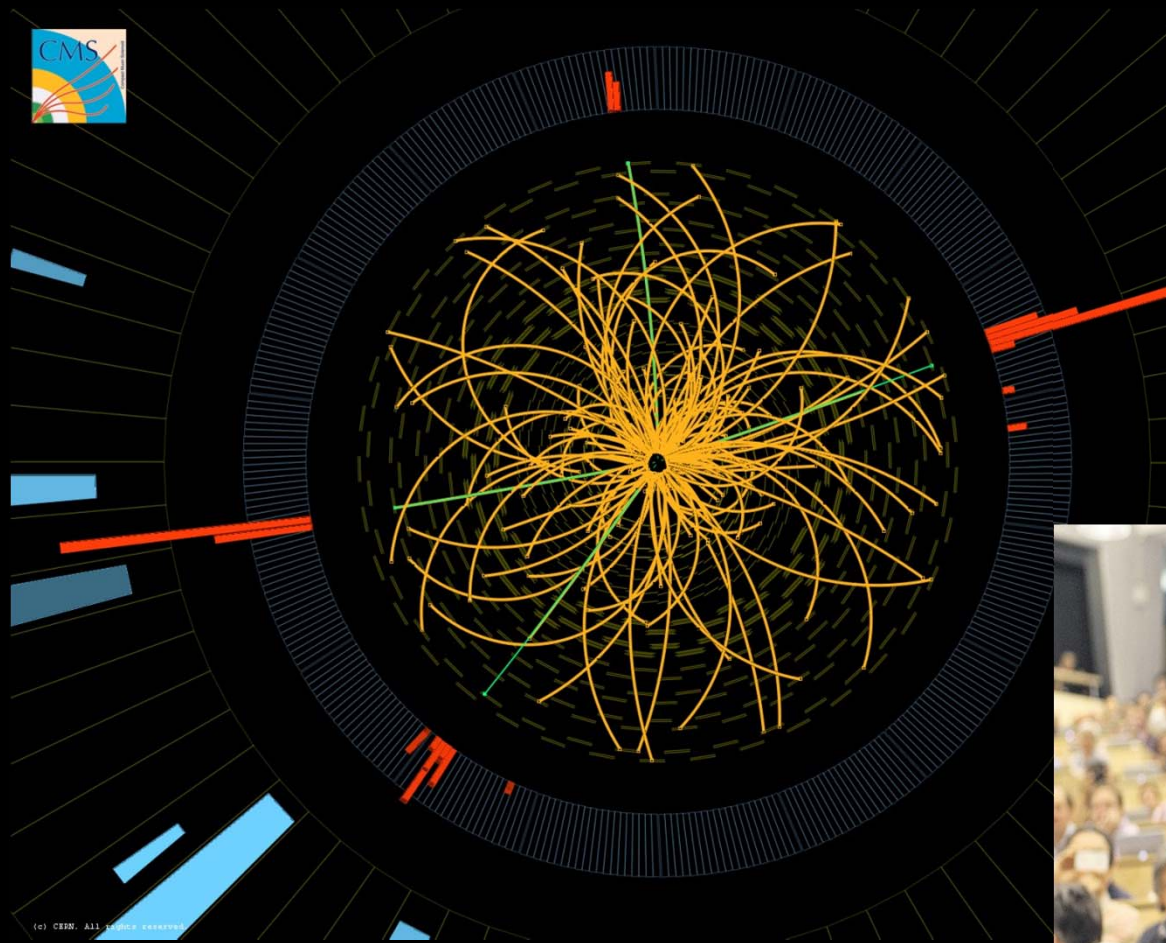
Luminosité intégrée à ce jour : 20 fb⁻¹

1 TeV = 1000 GeV (approx 1000 * masse du proton)

1 fb = 10^{-43} m²

Le 4 juillet 2012 ...la découverte





(c) CERN. All rights reserved.

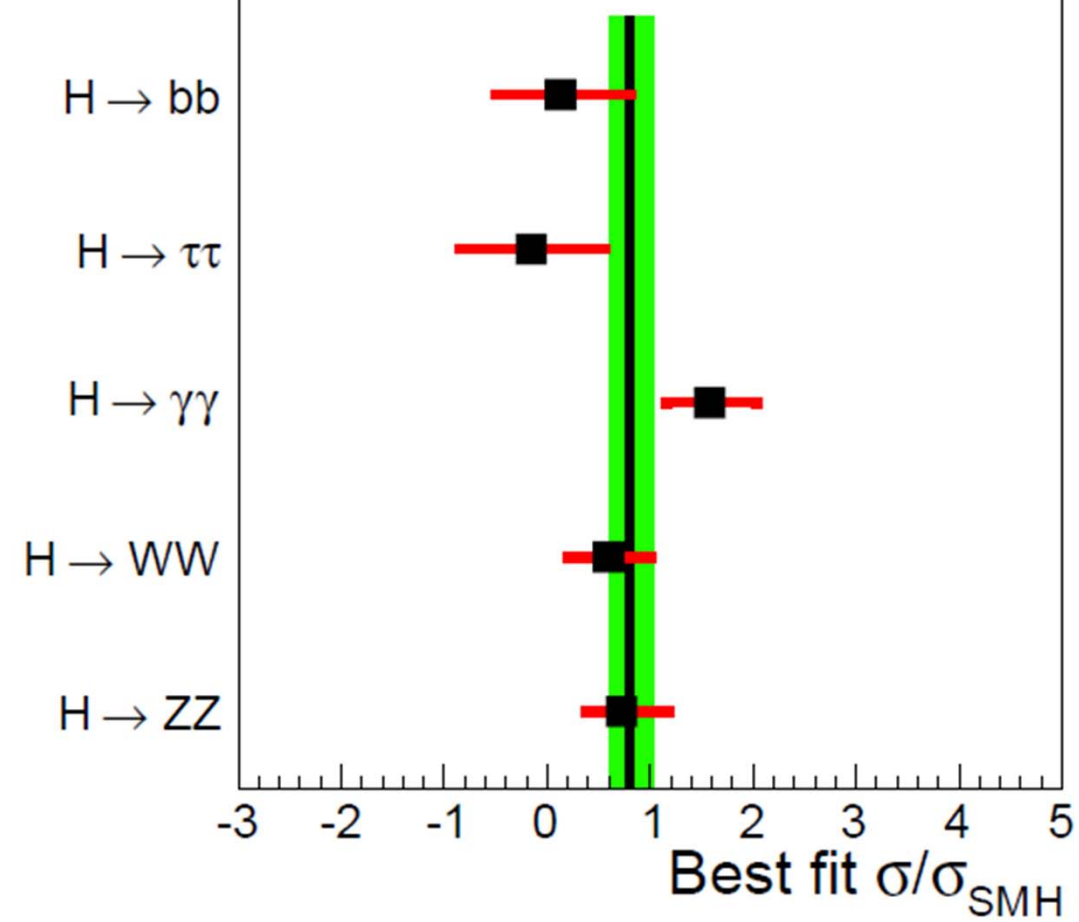
Convaincant? .. Oui :.... Tant la masse (125 GeV) que les principaux modes de production et désintégration sont en accord/compabibles avec les prédictions (b-anti b, 2 photons, 2 gluons, ZZ*, WW*, ...)

$m_H = 125 \text{ GeV}$

CMS Preliminary

$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}, L = 5.1 \text{ fb}^{-1}$

$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}, L = 5.3 \text{ fb}^{-1}$





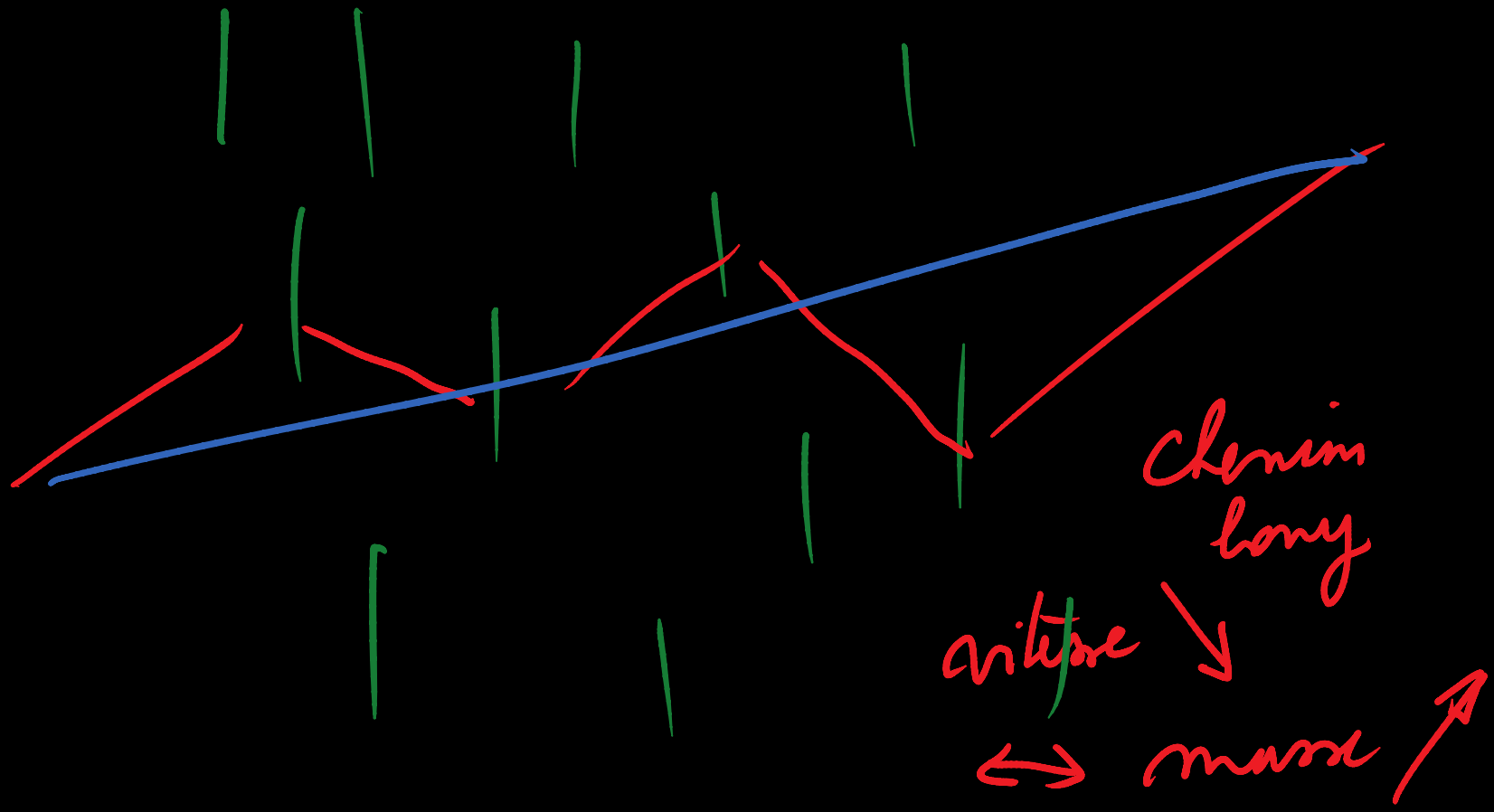
	Article	Reception date	Publication date
1	F. Englert and R. Brout Phys. Rev. Letters 13 (1964) 321	26/06/1964	31/08/1964
2	P.W. Higgs Phys. Letters 12 (1964) 132	27/07/1964	15/09/1964
3	P.W. Higgs Phys. Rev. Letters 13 (1964) 508	31/08/1964	19/10/1964
4	G.S. Guralnik, C.R. Hagen and T.W.B. Kibble Phys. Rev. Letters 13 (1964) 585	12/10/1964	16/11/1964

Le challenge du Secteur Scalaire...

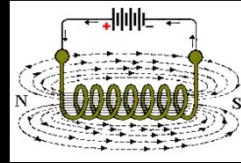
Pourquoi il donne de la masse aux vecteurs des interactions faibles (W,Z) et pas au photo?

/ = scalaire

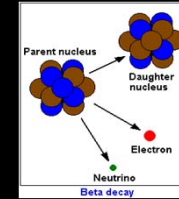
— W, Z
— γ



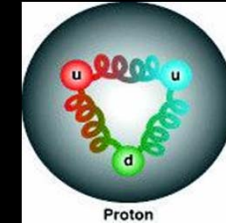
Interactions de jauge et interactions scalaires ..



Electro-Magnétisme



Interactions
faibles



Interactions
fortes

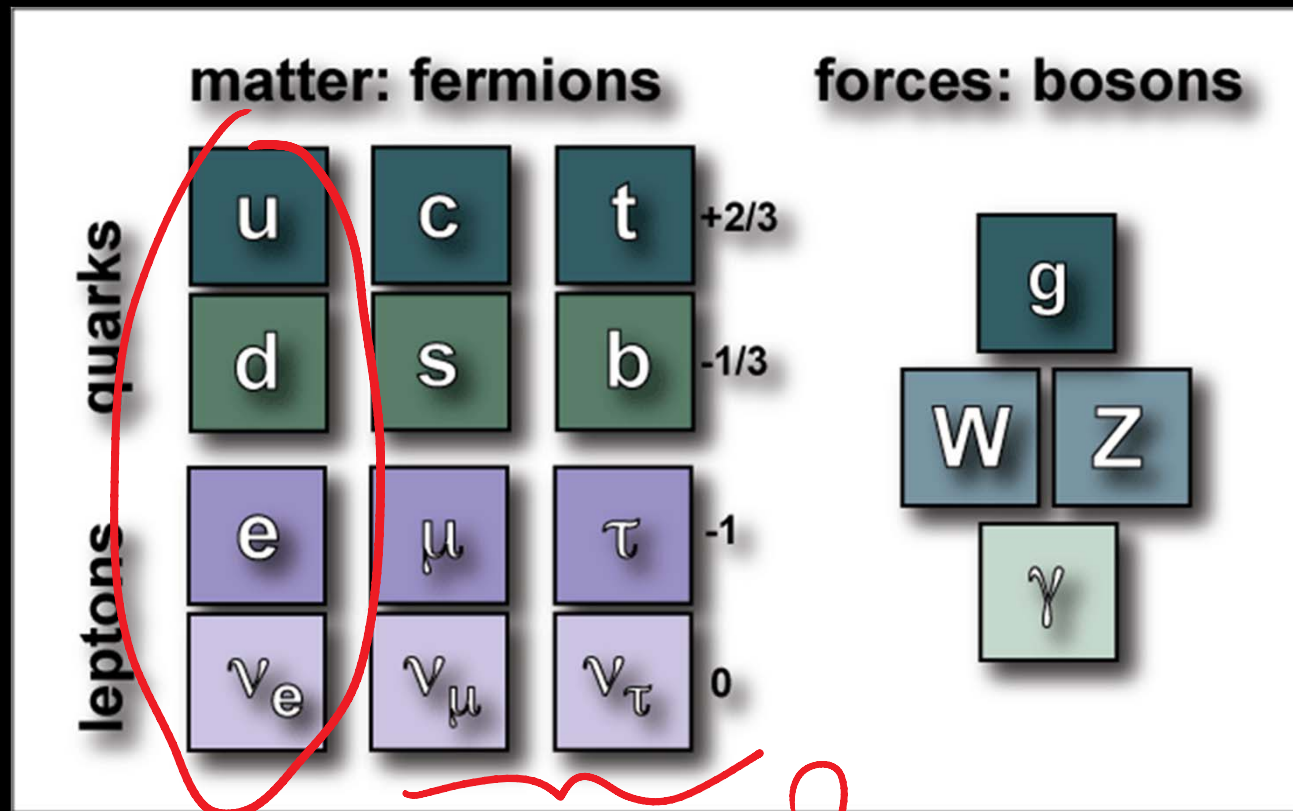
L'unification des interactions est relativement bien comprise; toutes apparaissent comme des interactions dite « de jauge », càd analogues au photon.

Elles permettent même de rendre compte de particularités curieuses des interactions faibles, telles :

- violation de la parité P (l'expérience vue dans le miroir n'est pas réalisable)
- asymétrie sous l'échange particule-antiparticule C

A elles seules, elles ne rendent pas compte

- De l'asymétrie entre matière et antimatière (à laquelle nous devons d'exister)
- De l'existence d'un sens du temps microscopique
- De la multiplication des familles de particules, de leurs masses et mélanges.



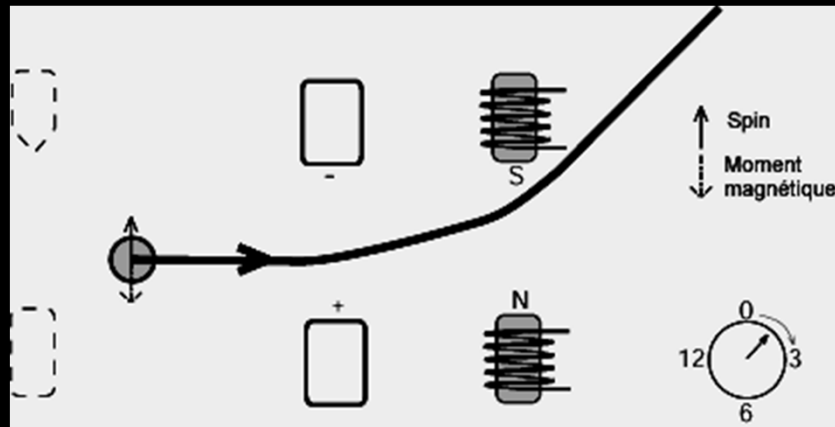
Contre chimie!

Sans les scalaires, les 2 familles supplémentaires seraient stables,
Et parmi nous ...

Les masses et mélanges, l'irréversibilité sont décrits de façon adéquate par le secteur scalaire, mais au prix de > 20 paramètres fixés uniquement par la mesure...

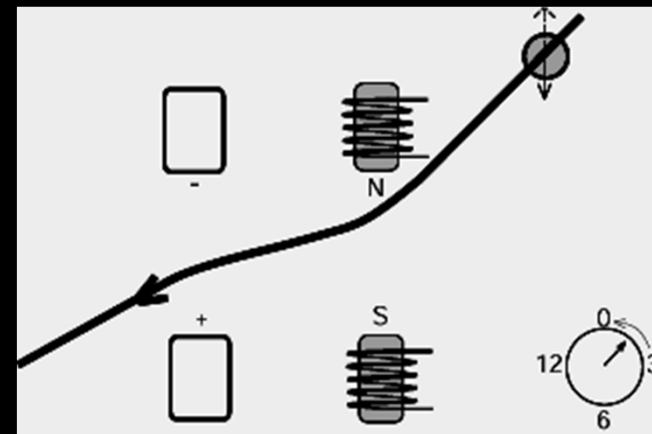
L'expérience montre que les interactions faibles sont associées à une irréversibilité microscopique,.....qui n'a rien à voir avec l'entropie

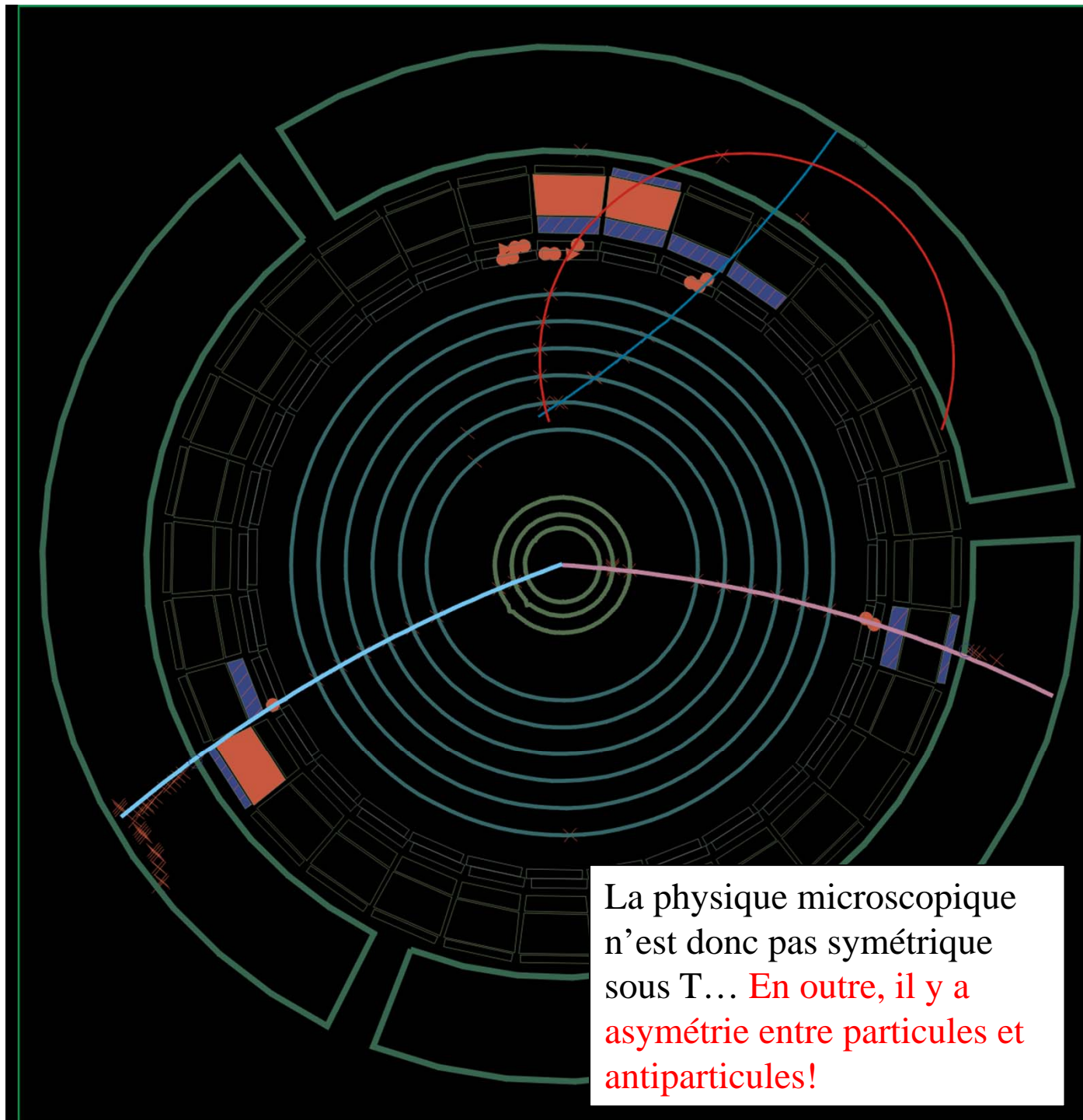
(ici, un exemple n'impliquant qu'une particule dans l'hypothèse où l'on peut mettre en évidence le moment électrique dipolaire du neutron.... Ce n'est pas le cas pour le moment, mais des situations similaires existent dans le système K^0 -anti K^0 ne, où la transition $K^0 \rightarrow$ anti K^0 diffère de la réaction opposée.



Irréversibilité microscopique

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





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,

Une autre conséquence de ces notions

Au début de l'Univers:
La gravité produit autant de matière
que d'antimatière:

$$N_{\text{matière}} = N_{\text{anti-matière}}$$

Matière et antimatière s'annihilent,
Pour former (entre autres) des photons γ

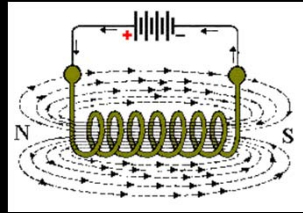
Aujourd'hui, nous ne voyons plus **aucune**
antimatière primordiale,
Mais un excès de matière subsiste:

Aujourd'hui, nous ne voyons plus **aucune**
antimatière primordiale,
Mais un excès de matière subsiste:

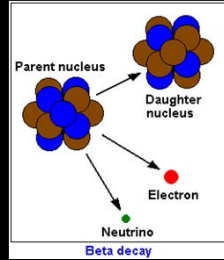
$$N_{\text{matière}} - N_{\text{anti-matière}} = n_{\gamma}/10\,000\,000\,000$$

Cette asymétrie, minuscule, c'est
toute la matière de notre Univers
(nous compris) – Elle est très
probablement due à une
interaction scalaire

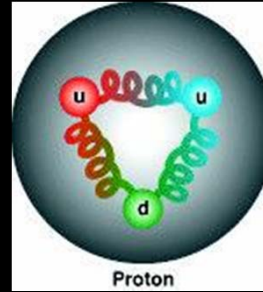
Maxwell, Einstein



Electro-Magnetisme



Interactions faibles



Interactions fortes



Gravitation

Unification électrofaible

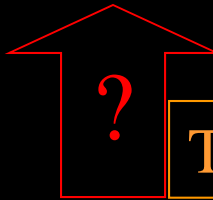
Test ultime au LHC ...
Energie = 1 000 masses du proton

Grande Unification

Energie = 10 000 000 000 000 000 m_p

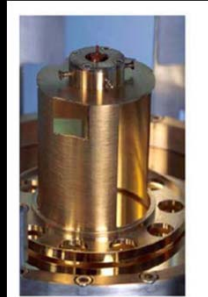
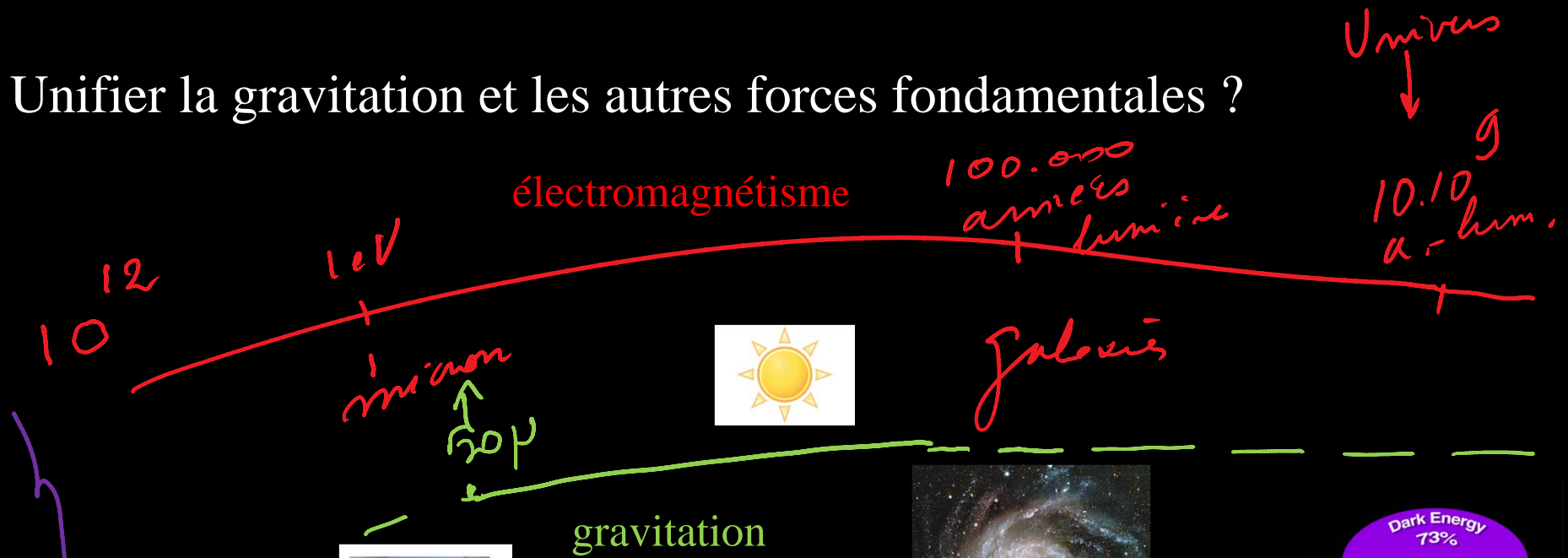
Théorie du Tout

Energie de l'Univers,
Cosmologie



Théorie des Cordes ??

Unifier la gravitation et les autres forces fondamentales ?



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

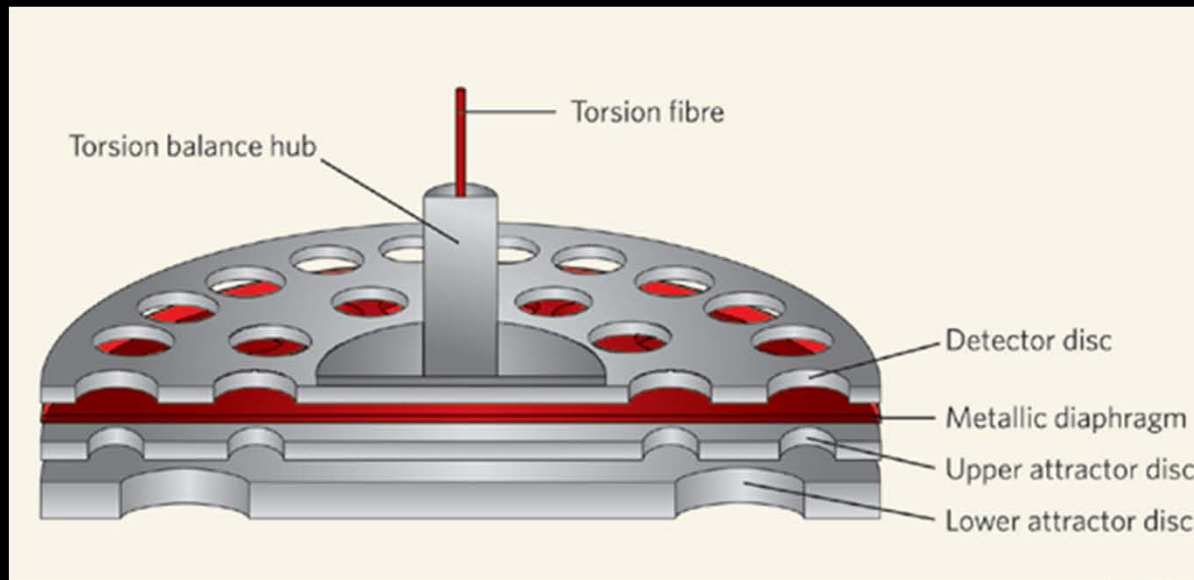


Il faut ajouter la matière noire
 ...depuis 1933...
 mais depuis 1990, on sait qu'il ne peut s'agir de « Jupiters » (naines brunes)

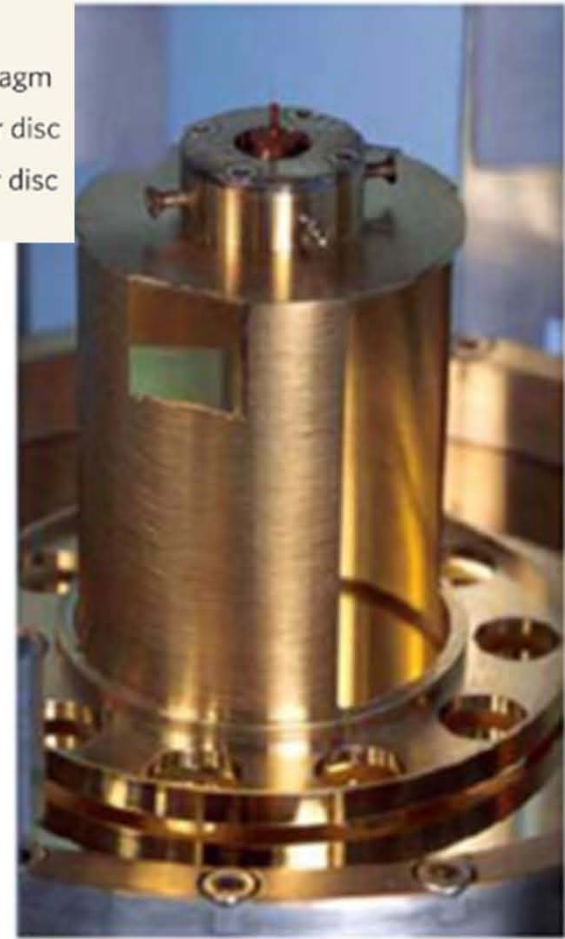


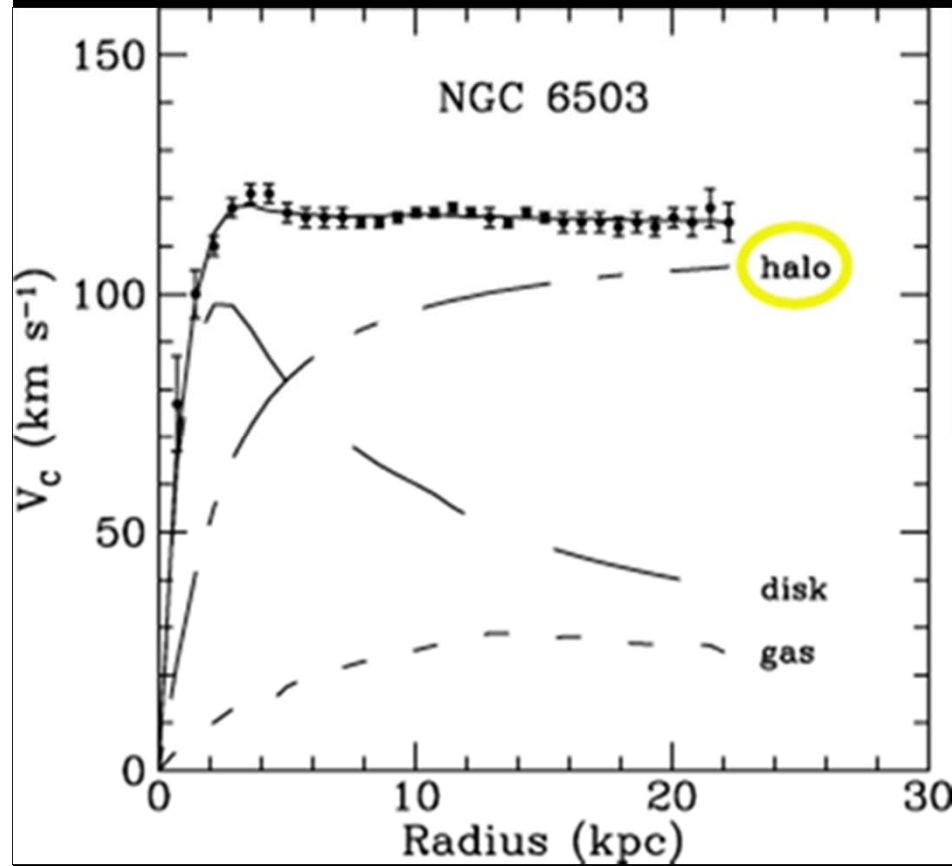
Il faut ajouter l'énergie noire (mi- 1990)

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)



We find with 95% confidence that the inverse-square law holds ($|\alpha| \leq 1$) 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

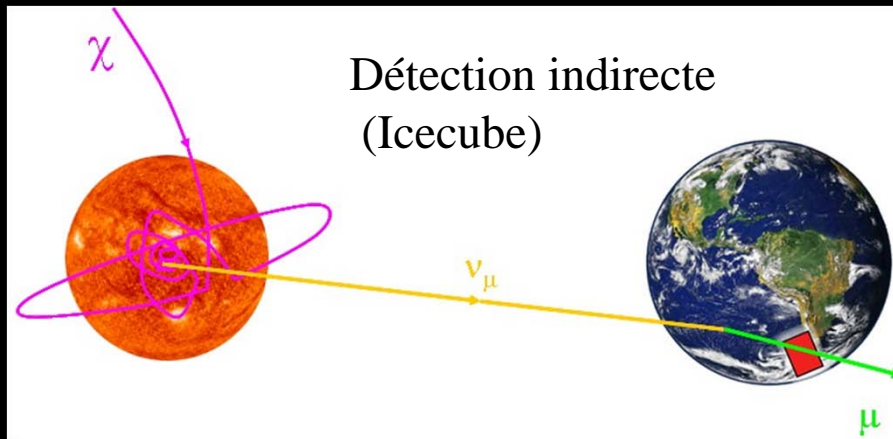
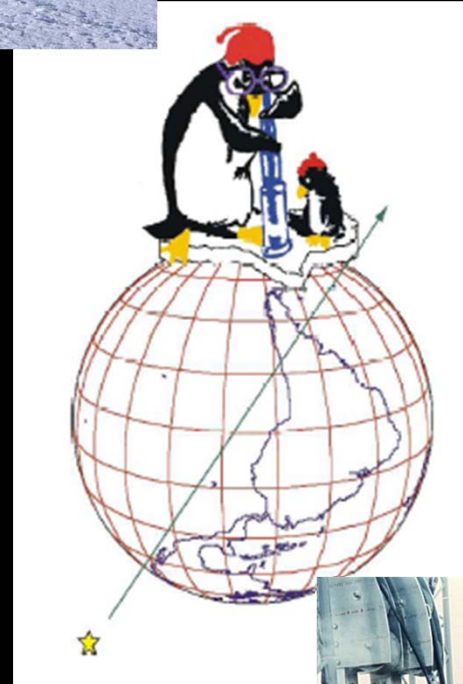
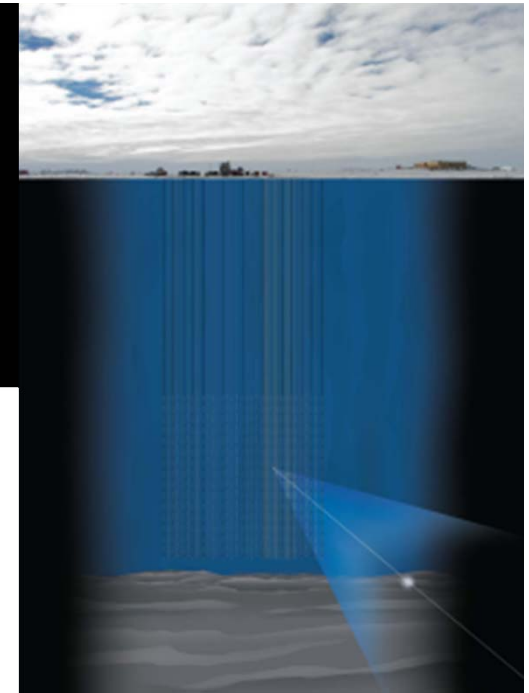




Il faut de la matière noire ..
... les scalaires sont un des candidats possibles



Nous ne sommes pas à la nouvelle base belge en Antarctique, mais avec nos équipes, exactement au Pôle Sud, qui construisent un détecteur dans la glace, à 2000m de profondeur ...



L'annihilation de matière noire (WIMPS) dans la Galaxie, le Soleil ou la Terre produit des neutrinos, qui traversent la Terre et sont détectés au Pôle Sud.

La recherche en interactions fondamentales ne se limite pas aux accélérateurs:

- Recherche directe de matière noire,
- Rayons cosmiques, neutrinos cosmiques et détection indirecte de matière noire
- Physique du neutrino ... le neutrino est-il sa propre anti-particule?
- Observations cosmologiques (satellites Planck, Fermi, ...)
- Mesures de précision (désintégration double beta sans neutrino – physique nucléaire
- Recherche d'ondes gravitationnelles ...

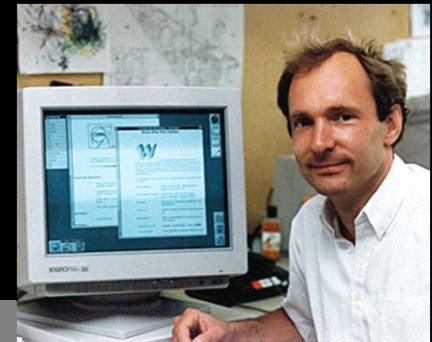
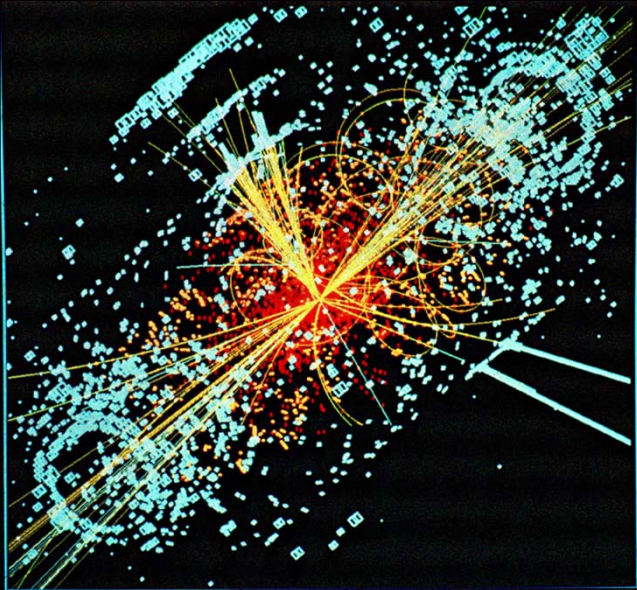
Pôle d'attraction Interuniversitaire « Interactions Fondamentales »:

Théoriciens et expérimentateurs de .

Coordonné par l'ULB, inclut VUB, UA, UGent, KUL, UCL , Orsay, Nikhef ,
INR(Moscow, Durham

(aussi en collaboration avec ULg, Umons...)

Un énorme défi, auquel nos équipes participent sur tous les fronts:
Expérimentation , prise de données, analyse, théorie, observation



Au fait: exemple de retombées technologiques de la recherche fondamentale : le WEB fut inventé au CERN pour **partager l'info** entre membres de ces grandes collaborations (en fait, dès le LEP); Aujourd'hui, l'initiative suivante est le GRID, qui **partage le calcul**

Un domaine en évolution constante

1964: brisure spontanée (Brout-Englert-Higgs)

1964: découverte de la violation de CP (exp)

1967: modèle standard (Glashow Weinberg Salam)

1974: prédiction du 4^{ème} quark

1971: cohérence mathématique ('t Hooft- Veltman)

1973: découverte des courants neutres (confirmation du MS)

1973: prédiction des 6 quarks, pour rendre compte de CP

1974: découverte du 4^{ème} quark (c)

1975: découverte du 3^{ème} lepton (tau)

1977: découverte du quark b

1983: découverte des W, Z au CERN

1990: max 3 familles de fermions (conventionnels)

1995: quark top

Mi-1990 : évidence croissante pour l'énergie noire

1990-2000's détermination précise des fluctuations du rayonnement de fond,

étude intense des conséquences cosmologiques

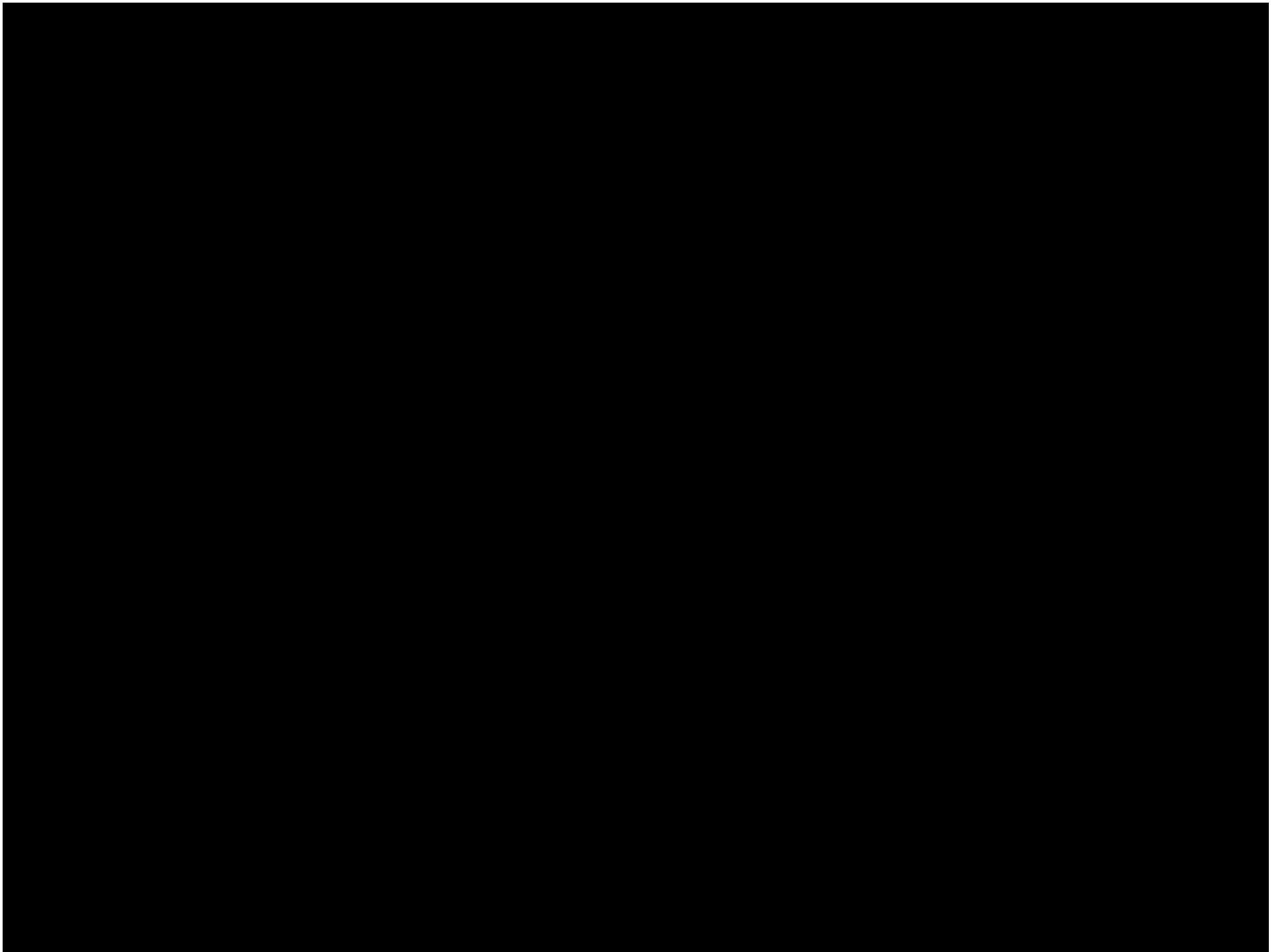
2000: violation de CP dans les B (confirme la paramétrisation par les scalaires)

2001: preuve décisive des oscillations de neutrinos (soupçonnés depuis 1960 pour le Soleil et 1980 pour les atmosphériques)

2007: GZK cut-off (rayons cosmiques de haute énergie) observé

2012: Observation du Boson Scalaire (Brout-Englert-Higgs) au CERN

Activité intense dans la recherche de matière noire, de particules scalaires, de la



Accélérateurs à hadrons ou à électrons?

Les électrons sont des particules « ponctuelles » (fondamentales), qui participent intégralement à l'interaction, en outre, il y a peu de bruit de fond, et l'énergie de la collision est bien connue

Mais les protons sont des états composites (quarks, gluons). A haute énergie, ce sont ces constituants qui interagissent. La part d'énergie qu'ils portent est modeste, et non mesurable au préalable; en outre, l'interaction forte provoque un bruit de fond important.

Il ne faut donc pas s'étonner que des énergies de protons de plusieurs TeV soient nécessaires pour produire de façon significative des scalaires de masse < 1 TeV