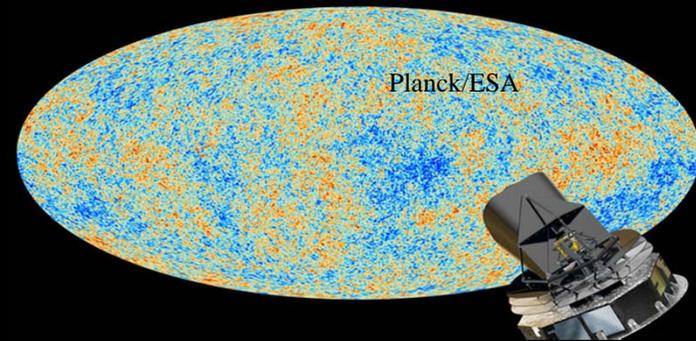
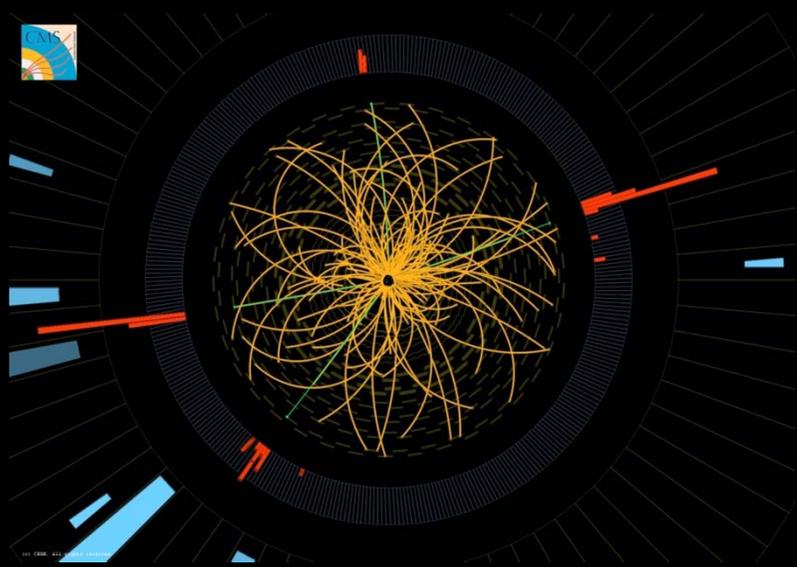
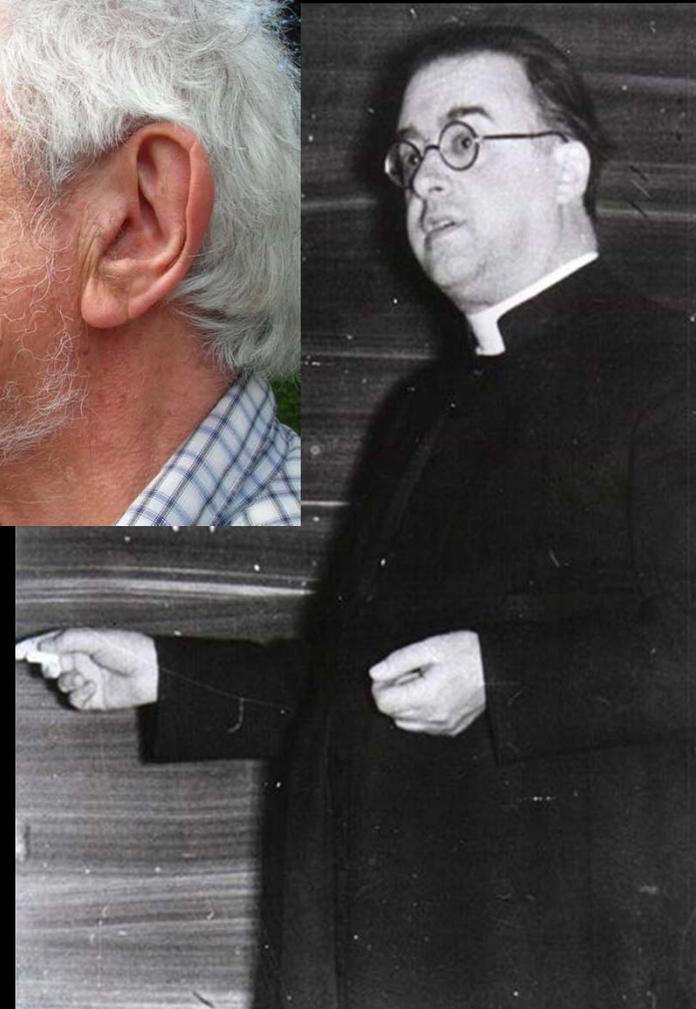
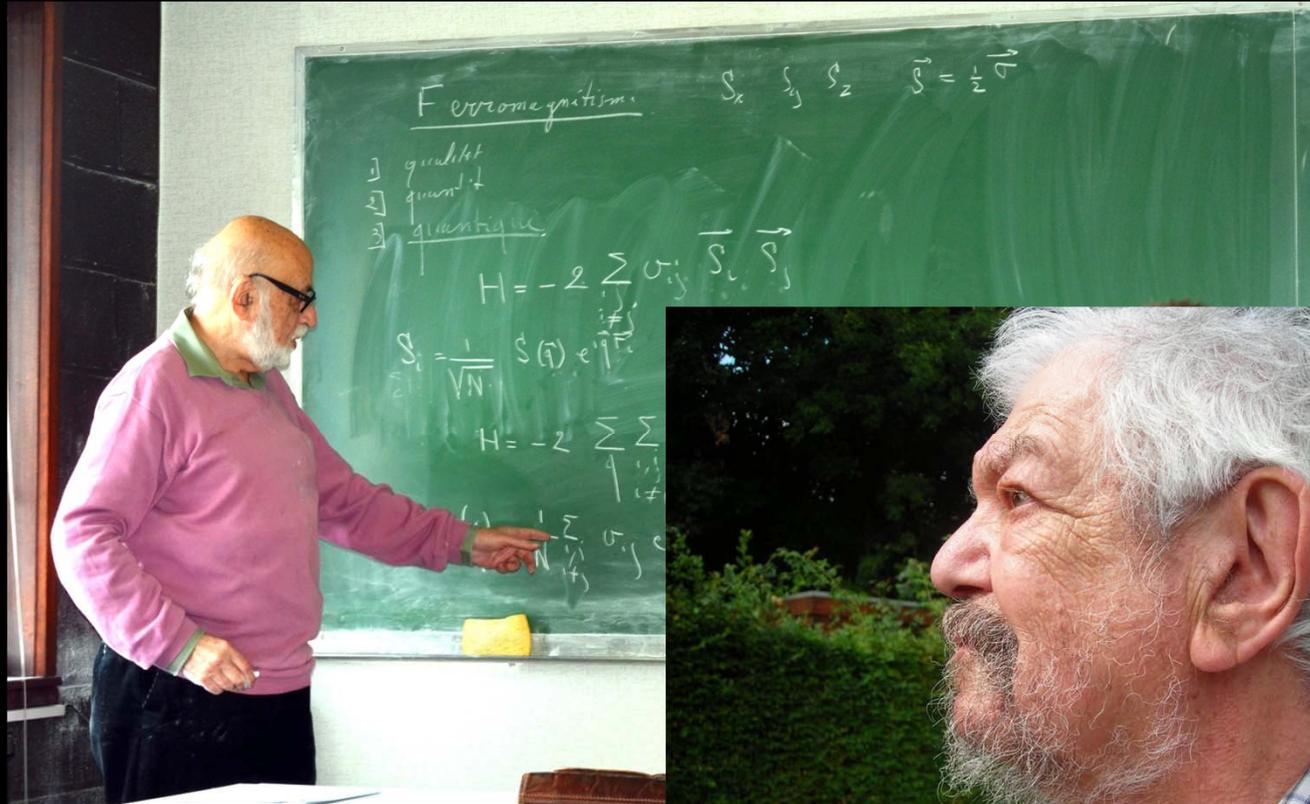


D'un boson à l'Univers, des particules aux satellites



Jean-Marie Frère, ULB
coordinator, IAP VII/37

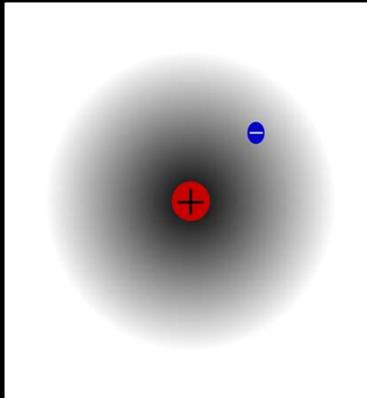


Robert Brout
François Englert,
Georges Lemaître :
Une incroyable aventure,
de l'infiniment petit à l'Univers

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



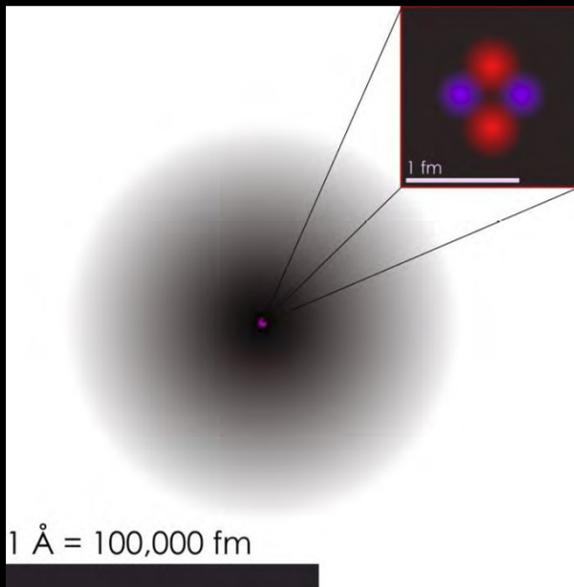
Cellules de ma langue



10000 fois plus petit, l'atome



Toute la chimie

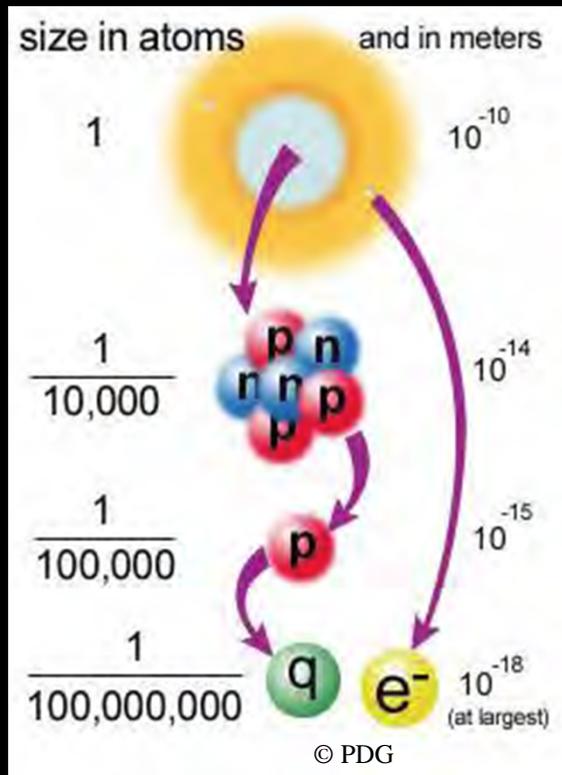


100 000 fois plus petit, le noyau ,
composé de **protons** et **neutrons**



L'énergie,
la médecine nucléaires





Aujourd'hui nous regardons des distances 100 à 1000 fois plus petites ,

Le proton et le neutron sont composés des quarks « u » et « d »

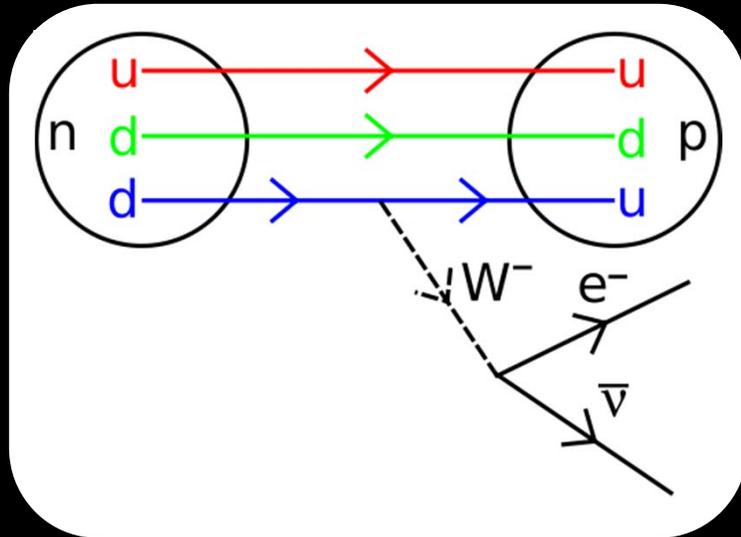
Beaucoup d'autres particules ont été découvertes.

A notre échelle , nous ne voyons pas les forces, les interactions entre ces particules...

on parle d'interactions à (TRES) courte portée ..

Et jusqu'en 1964 elles étaient très mal comprises

Le proton et le neutron sont composés des quarks « u » et « d »

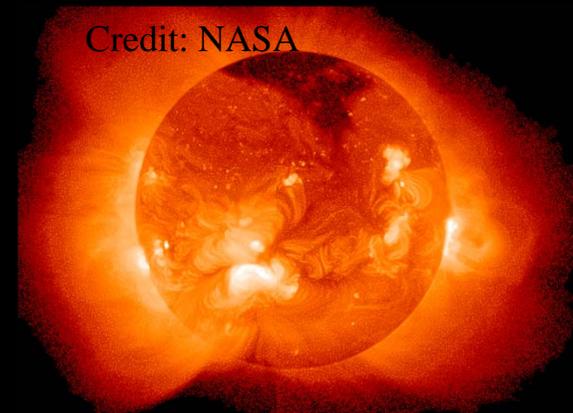


Et se désintègrent l'un dans l'autre par les interactions faibles .

Les interactions faibles changent la nature chimique par exemple, du Cobalt se transforme en Nickel, (mais pas le plomb en or...)

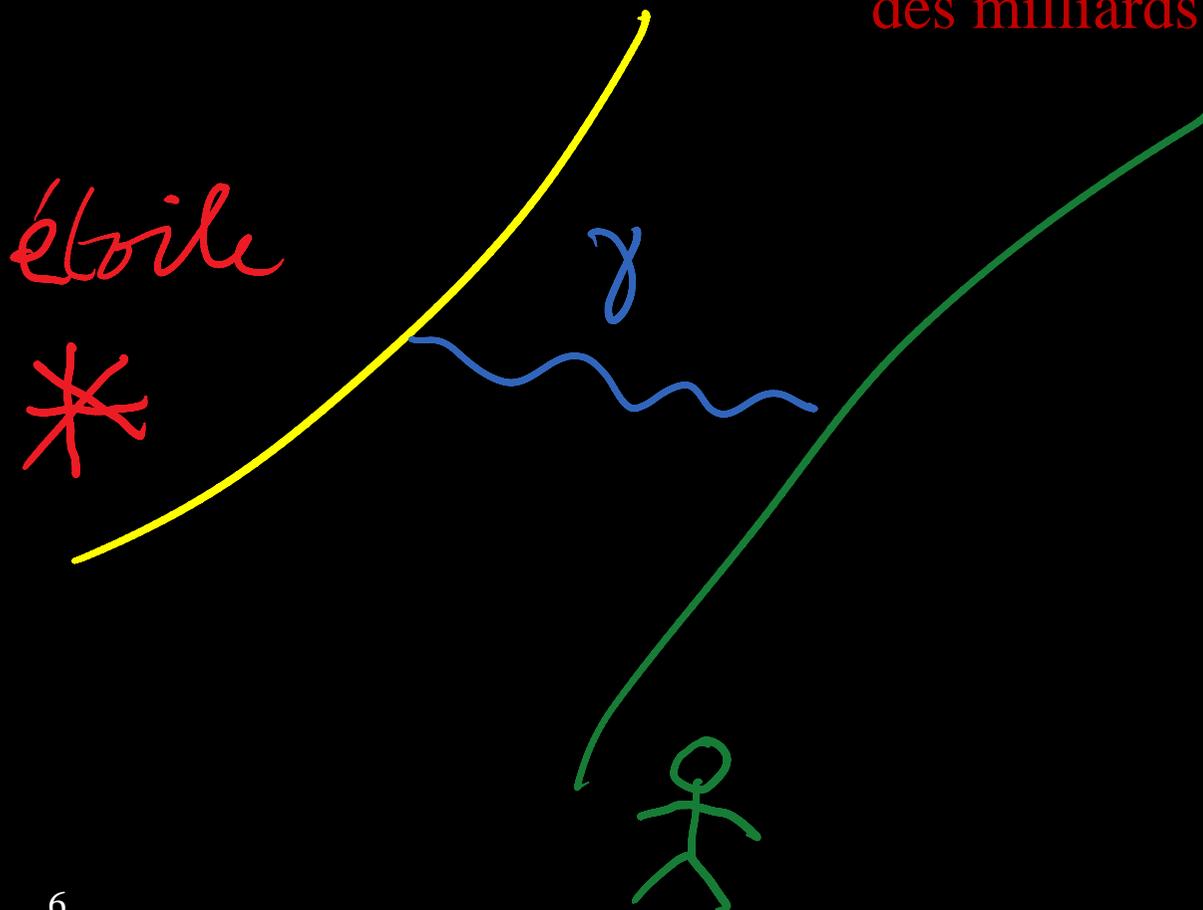
Elles sont très discrètes ... mais responsables de l'énergie du Soleil ... et donc de toutes les énergies renouvelables ..

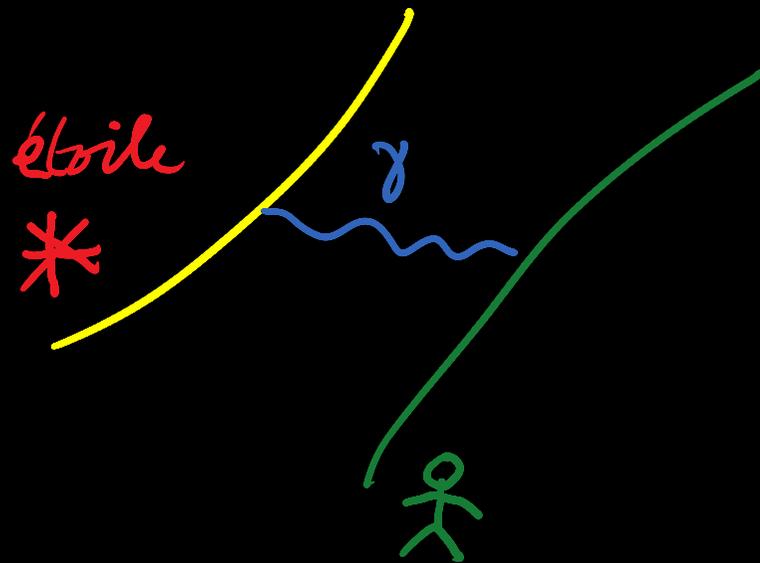
Et jusqu'en 1964 ces interactions à très courte portée étaient très mal comprises. On avait même un peu baissé les bras ...



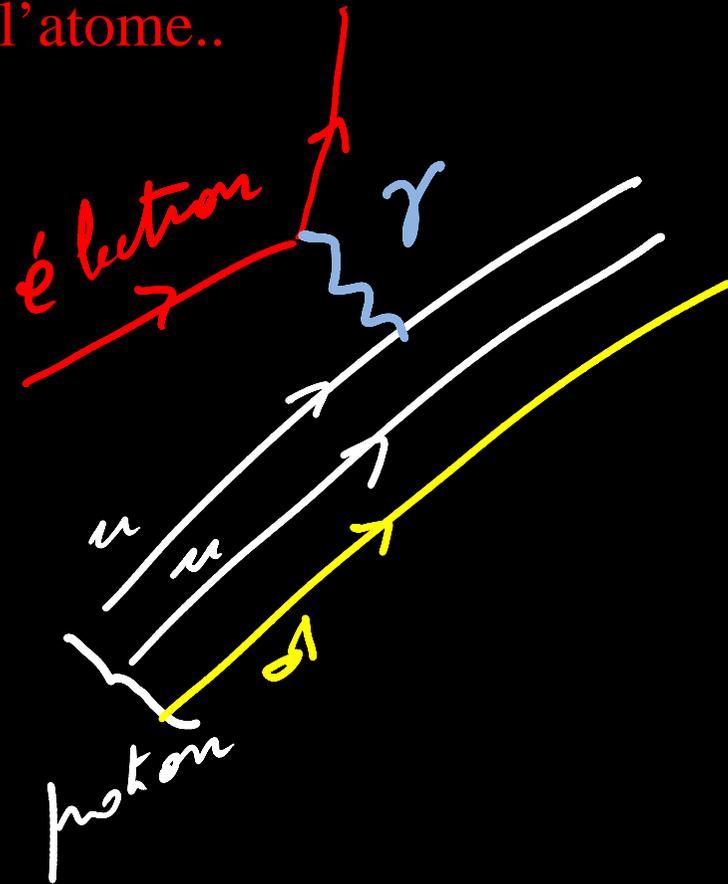
Le génie de Brout, Englert et Higgs fut de montrer que ces forces mal comprises, à portée microscopique, étaient en fait de même nature que quelque chose de très différent: la lumière... que l'on comprenait très bien ... et qui nous parvient de très loin :

des milliards d'années-lumière.





Les mêmes forces agissent dans l'atome..



La lumière, associée à l'électricité et au magnétisme, est portée par des photons ..

La longue portée de l'interaction électro-magnétique est associée au fait que le photon n'a pas de masse.

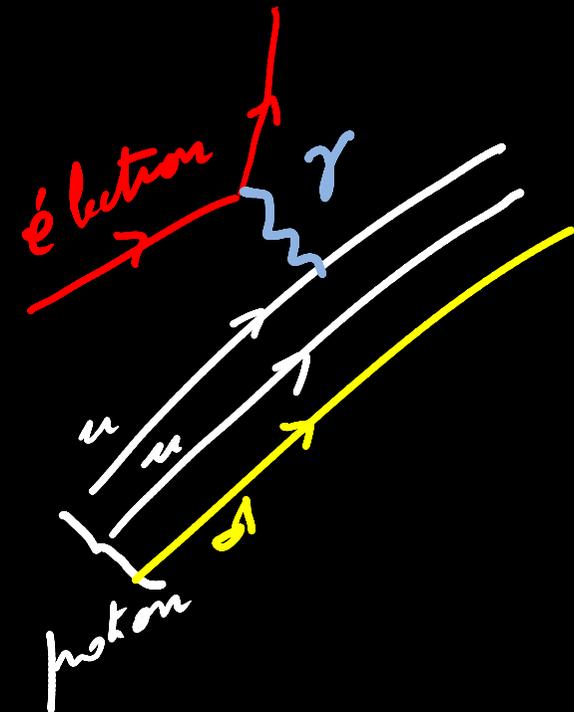
Et à notre échelle





Comme des joueurs de tennis interagissent entre eux en échangeant des balles,

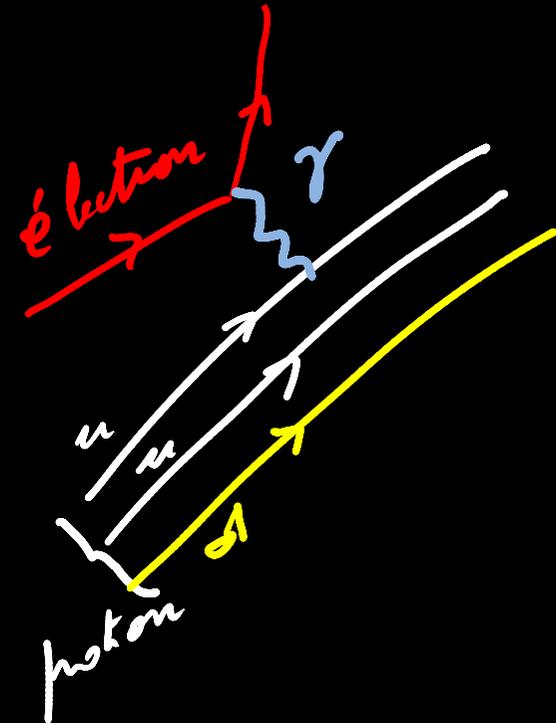
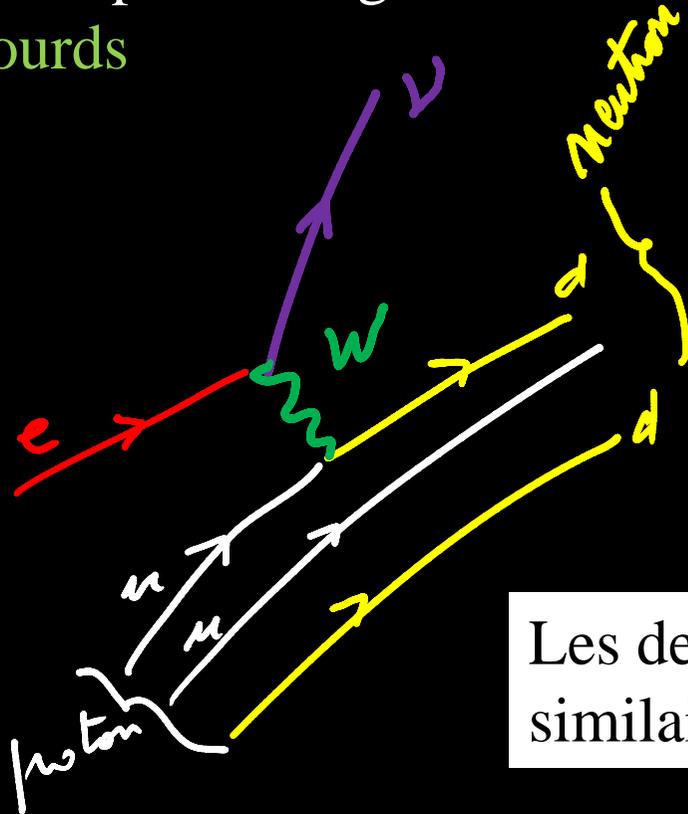
L'électron et le proton interagissent en échangeant des photons



L'électron et le proton échangent des photons ou des W

l'interaction faible est à très courte portée, elle procède par échange de W lourds

L'interaction électromagnétique traverse l'Univers



Les dessins sont similaires???

Masse(W) = 80 * masse du proton \longleftrightarrow Masse du photon (γ) = 0

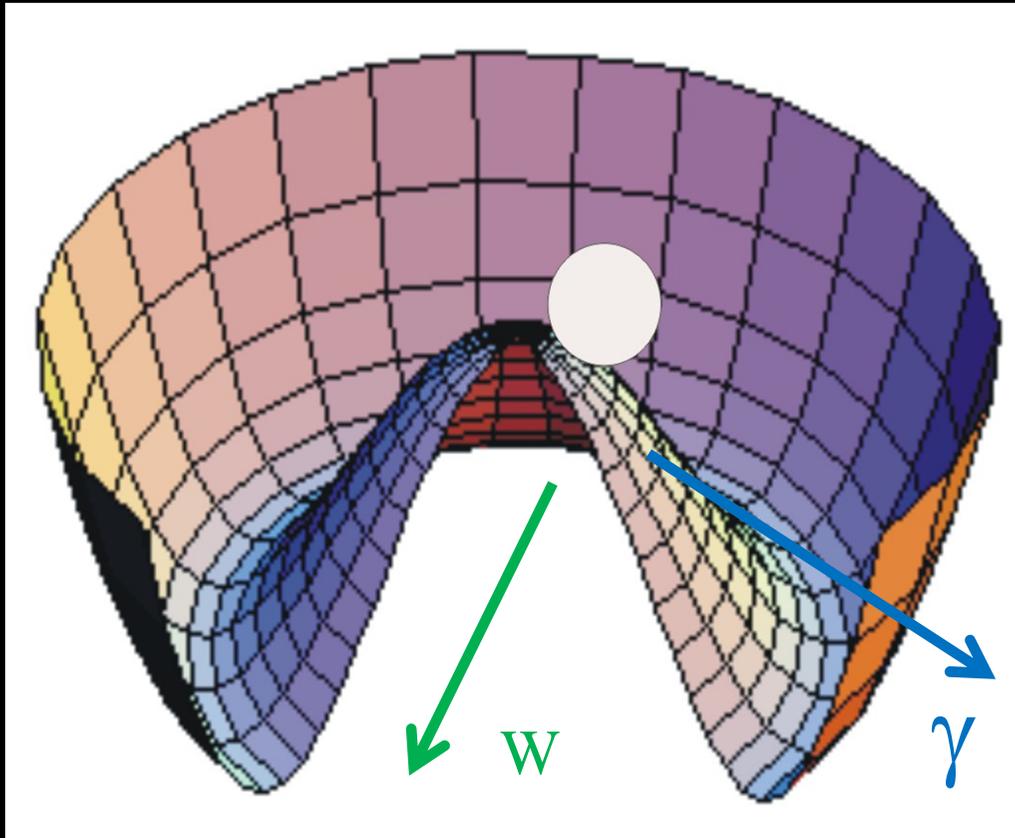
L'importance des travaux de Brout, Englert et Higgs, c'est de montrer que toutes les interactions sont de même nature, mais ne diffèrent que parce que certains des intermédiaires acquièrent de la masse, et d'autres pas

Le vecteur de l'interaction faible W et le photon γ sont diverses manifestations des mêmes forces ...

*Il y a une symétrie entre eux,
Mais cette symétrie est brisée,
car l'un acquiert une masse,
et l'autre pas ...*

A cette roulette, le photon a gagné!



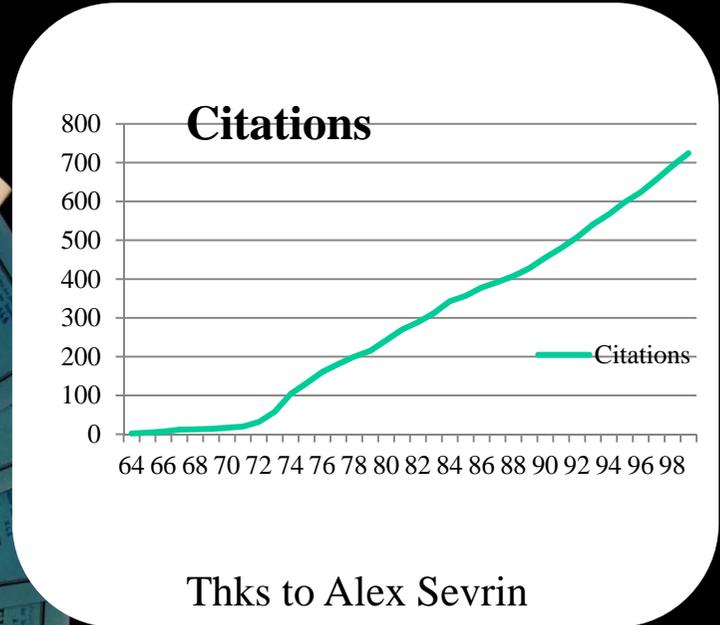


Il y a une symétrie entre les forces, mais elle est instable, La bille ci-contre finira par tomber, désignant une direction favorisée, qui n'aura pas de masse (le photon est le grand gagnant) .

Mais qui joue le rôle du « Sombrero » ?

C'est le champ de Brout-Englert-Higgs, et une nouvelle particule qui lui est associée, le boson scalaire... découvert en 2012

En 1964, les articles historiques....



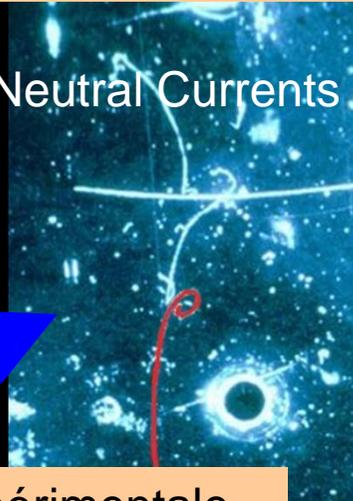
Attirent peu d'attention !

1964 brisure spontanée de la symétrie

...1967 Modèle unifié des interactions électromagnétiques et faibles

1971 Cohérence mathématique

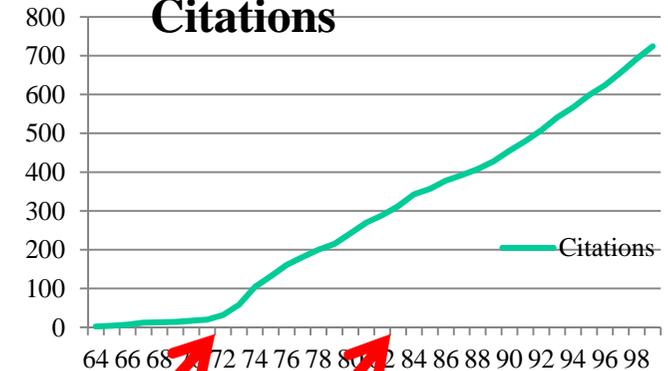
Neutral Currents



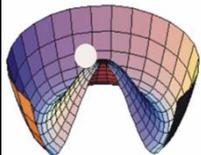
1973 Première confirmation expérimentale (courants neutres) (les exp belges y sont associés)

1983 Découverte des bosons W et Z (CERN)

Citations



Pourquoi allez-vous travailler chez eux?



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)

N. Cabibbo

Wolf Prize 2004

R. Brout, F. Englert, P. Higgs

Nobel 1979

S. Weinberg, S. Glashow, A. Salam

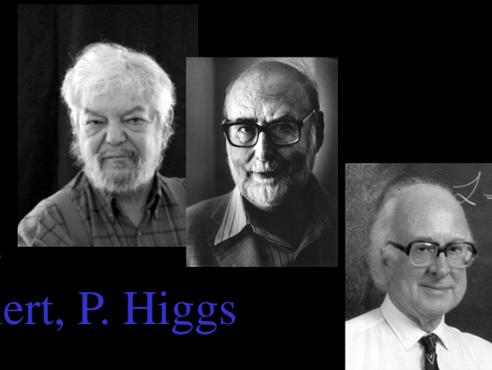
S. Glashow, J Iliopoulos, L. Maiani

Nobel 1999 M. Veltman G 't Hooft

Nobel 2008 M Kobayashi, T Maskawa

Nobel 1976 B Richter, S Ting

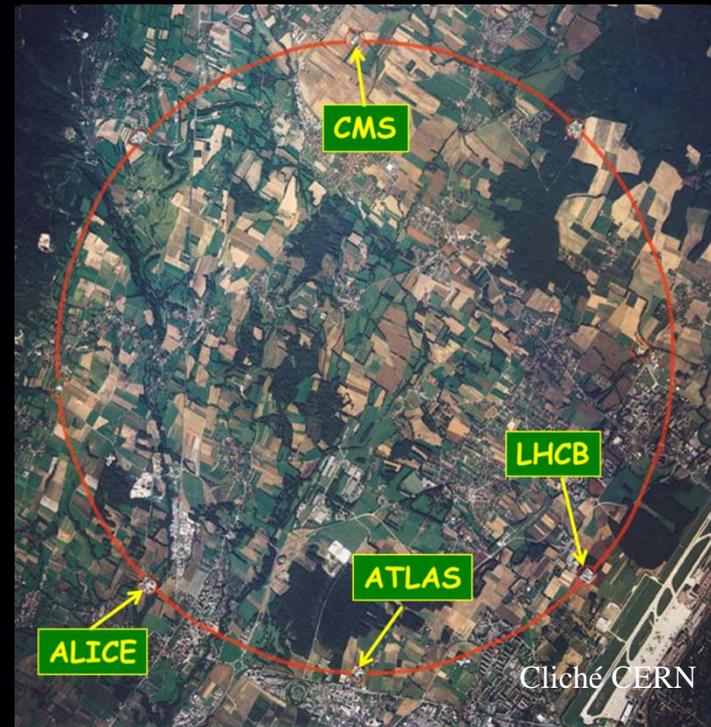
Nobel 1984 C. Rubbia-S. van der Meer



*Mais il manque toujours une particule,
le boson de Brout-Englert-Higgs, responsable de la brisure
de symétrie (et du Sombrero)*

Pour pénétrer de si petites distances , il faut des appareils énormes
et de grandes collaborations internationale .. Ici au CERN

26.7 km LEP/LHC tunnel

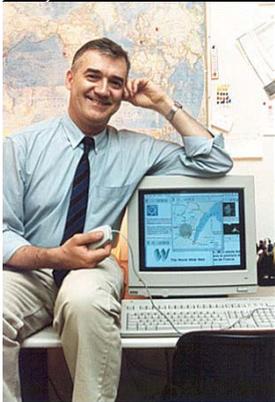


Recherche fondamentale

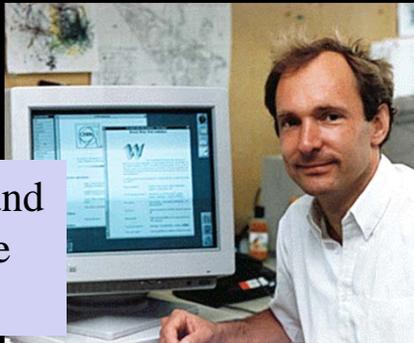
D'énormes défis

Recherche technologique

De nouvelles bases

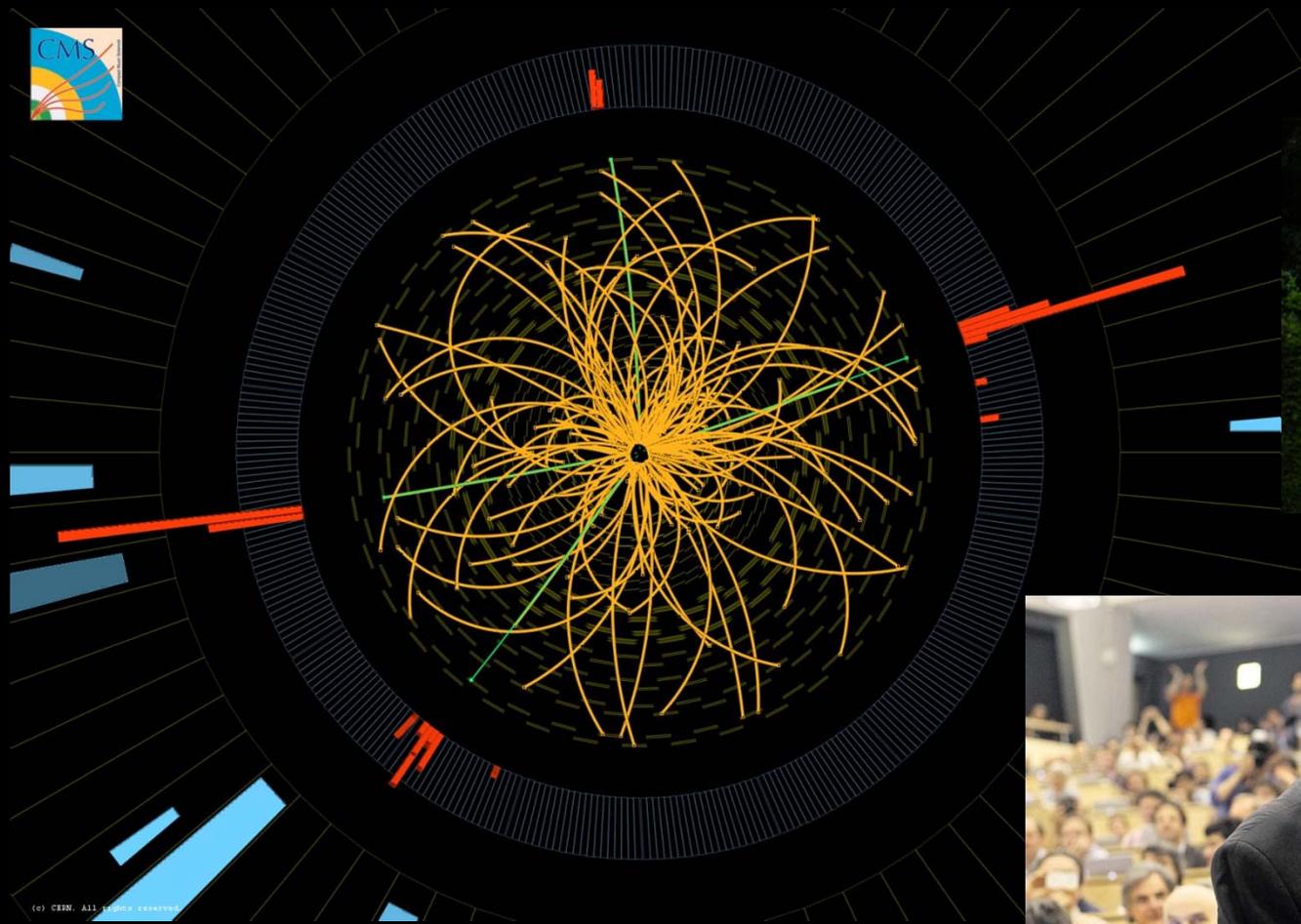


Robert Cailliau and
Tim Berners-Lee
photo cern



*Les retombées sont qualitatives, souvent imprévisibles
Financer la recherche fondamentale sur base des retombées attendues serait contre-productif ...*

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



Enfin, la découverte ...

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*, ...) &²²²²²&

Et le droit à la « glace Nobel »



Les nouveaux défis

Comment est né l'Univers ?

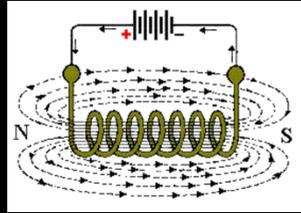
Pourquoi la matière l'a-t-elle emporté sur l'antimatière?

De quoi sont faites la matière noire, l'énergie noire?

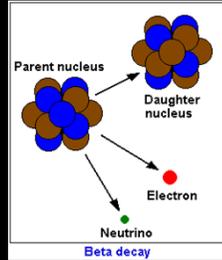
Pourquoi 3 familles de particules ?...

Pourquoi ces valeurs de masses si étranges?

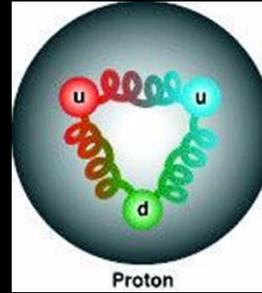
Maxwell, Einstein



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

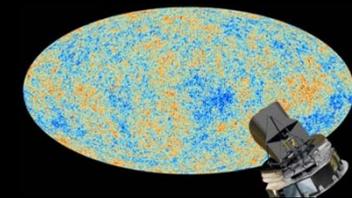
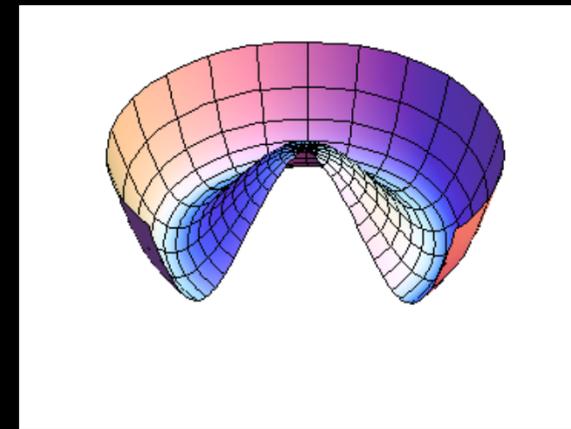
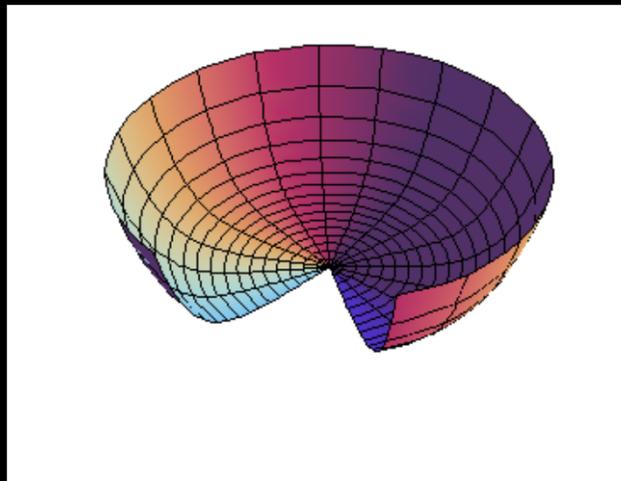
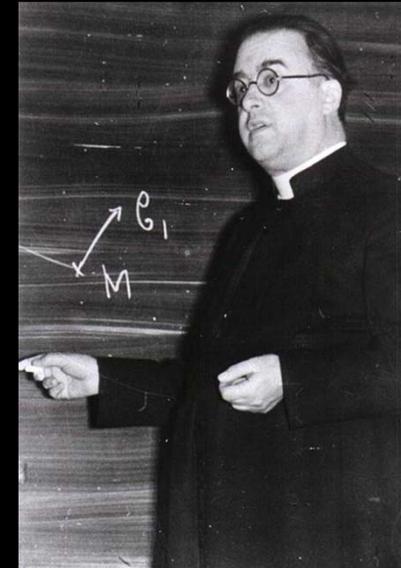


Comment est né l'Univers ?

Les nouveaux défis

Lemaître : Big Bang -- >
haute température au début de l'Univers ...

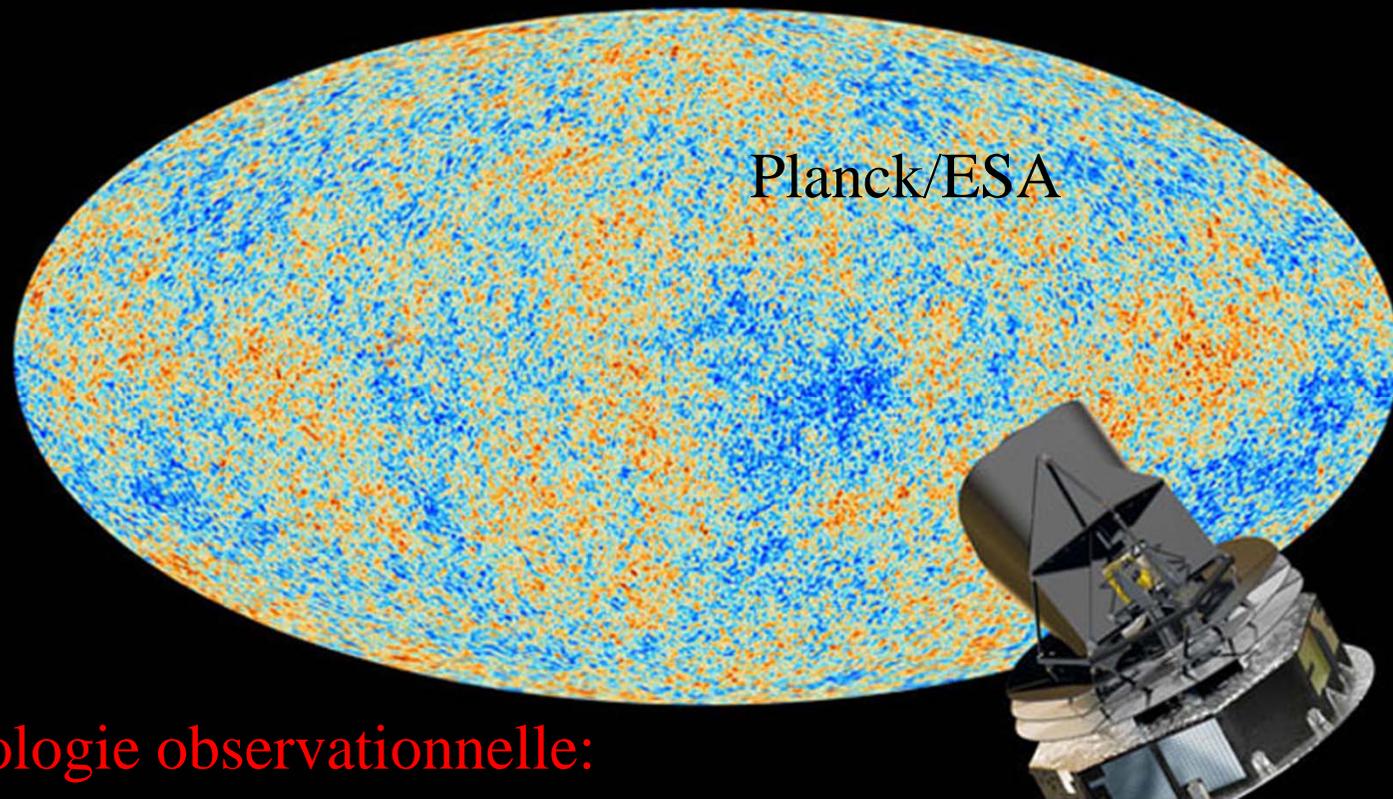
La symétrie n'est plus brisée .. Toutes les forces sont à longue portée ... la brisure de symétrie devient un des moteurs de l'Univers, son observation, un des meilleurs tests de nos théories ..



Nous pouvons mesurer aujourd'hui l'évolution de l'Univers depuis
> 10 milliards d'années ...

Et ceci nous fournit de nouvelles vérifications et de nouveaux défis

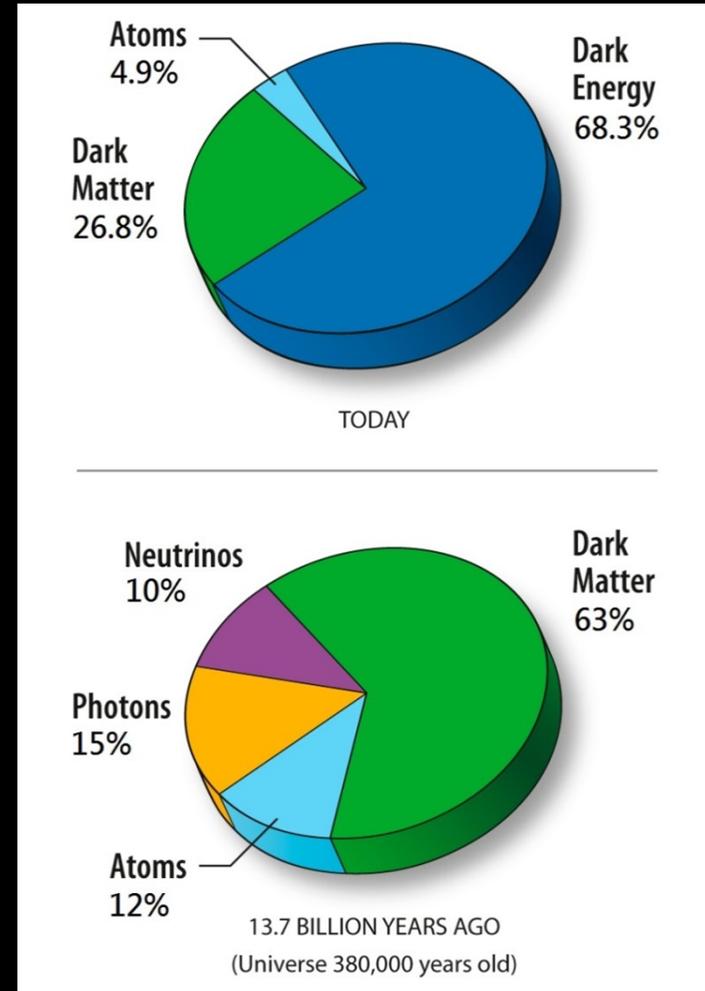
Le rayonnement fossile en garde les traces ..



**Cosmologie observationnelle:
une nouvelle discipline**

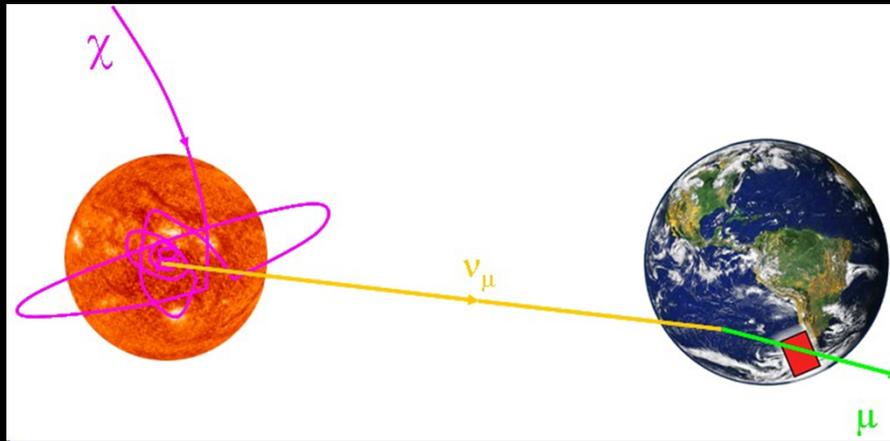
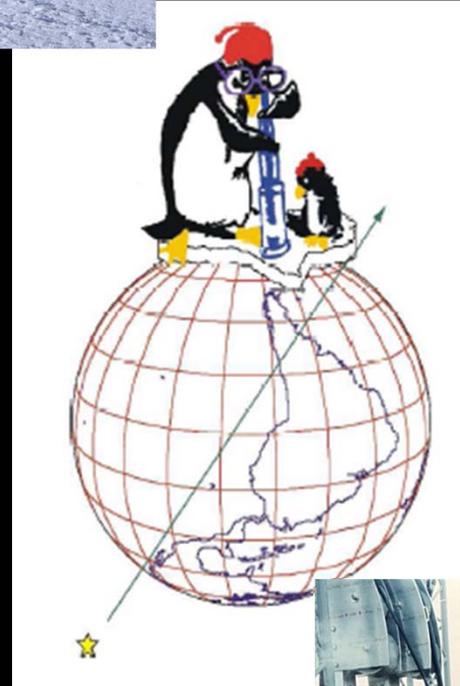
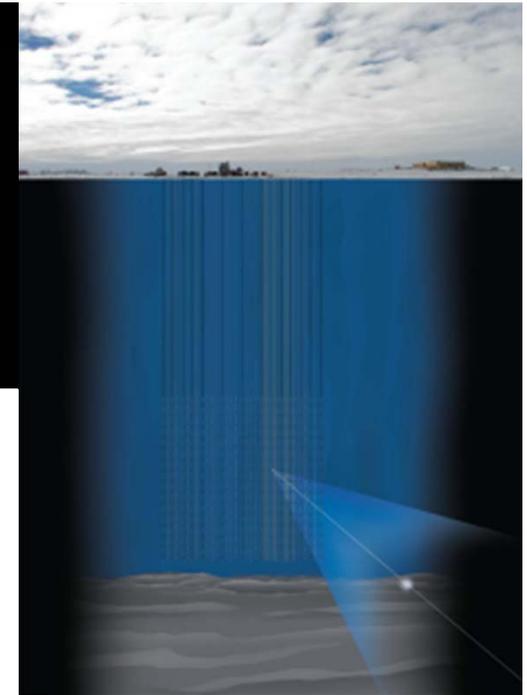


Images Nasa/ESA



La cohésion des galaxies requiert de la **matière noire**,
L'accélération de l'Univers, de **l'énergie noire** ...
(données de Planck)

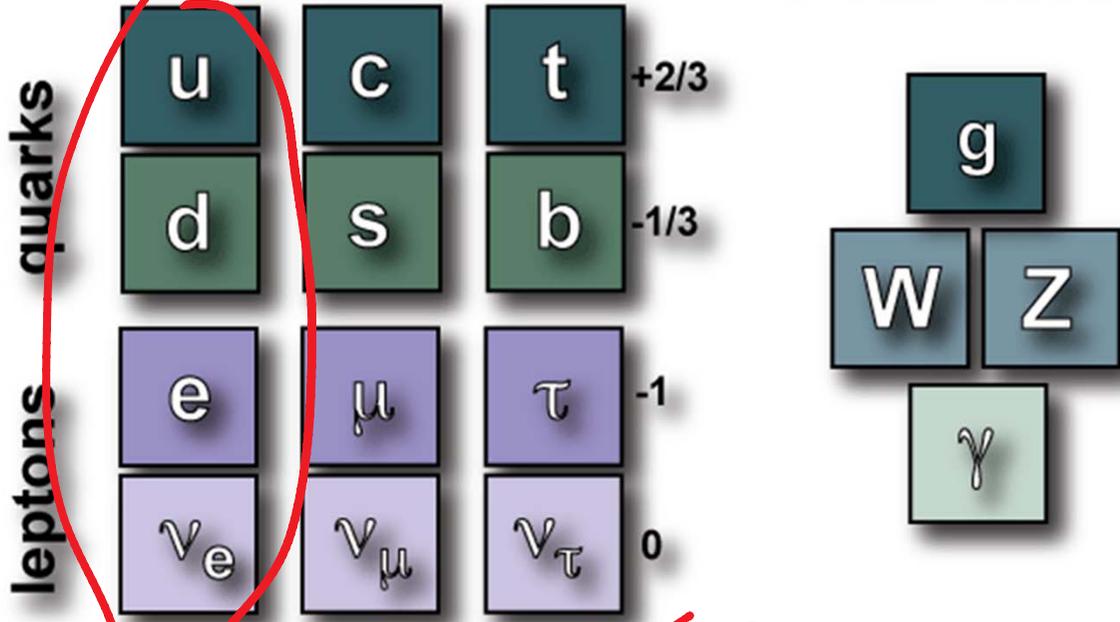
Nous ne sommes pas à la nouvelle base belge en Antarctique, mais avec nos équipes, exactement au Pôle Sud, qui construisent un détecteur dans la glace, à 2000m de profondeur ...ICECUBE



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

matter: fermions

forces: bosons



Pourquoi
3X trop
de particules?

*Compte
la chimie*

*3x trop de
particules!*

*20
paramètres
arbitraires.*

Relèverez-vous ces défis ?

Beaucoup de métiers différents (ingénierie, technique de précision, informatique, ...) techniques comme scientifiques doivent collaborer → pour tous les goûts !

Bac	3 ans
Master	2
Doctorat	3-4 ans



Obligation de voyager ...
Postdoc à l'étranger 2* 2 ans

Soit ..12-13 ans
avant le simple espoir
d'un poste académique

~~650 000 €~~

mais..

**La liberté
de comprendre**

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

LA SUITE
Activité intense dans la recherche de
matière noire, de particules scalaires, de la
supersymétrie, de la masse des neutrinos,

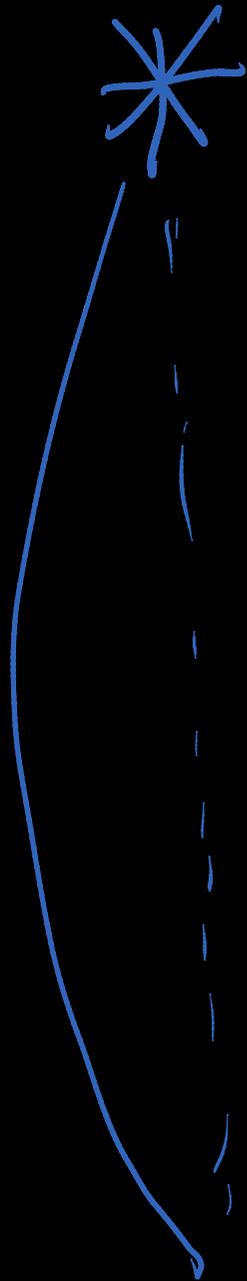
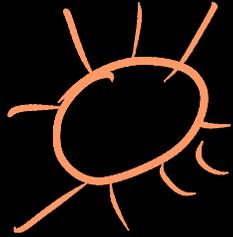
Masse .. Et Photon sans masse



<http://www.youtube.com/watch?v=3lzn3gnur6g> <http://www.youtube.com/user/QuestionsOfficial>

Pas la bonne façon de mesurer!

*D'ailleurs la balance n'indiquerait pas 0
(et si on vous pesait le steack en le
lançant sur la balance ????)*

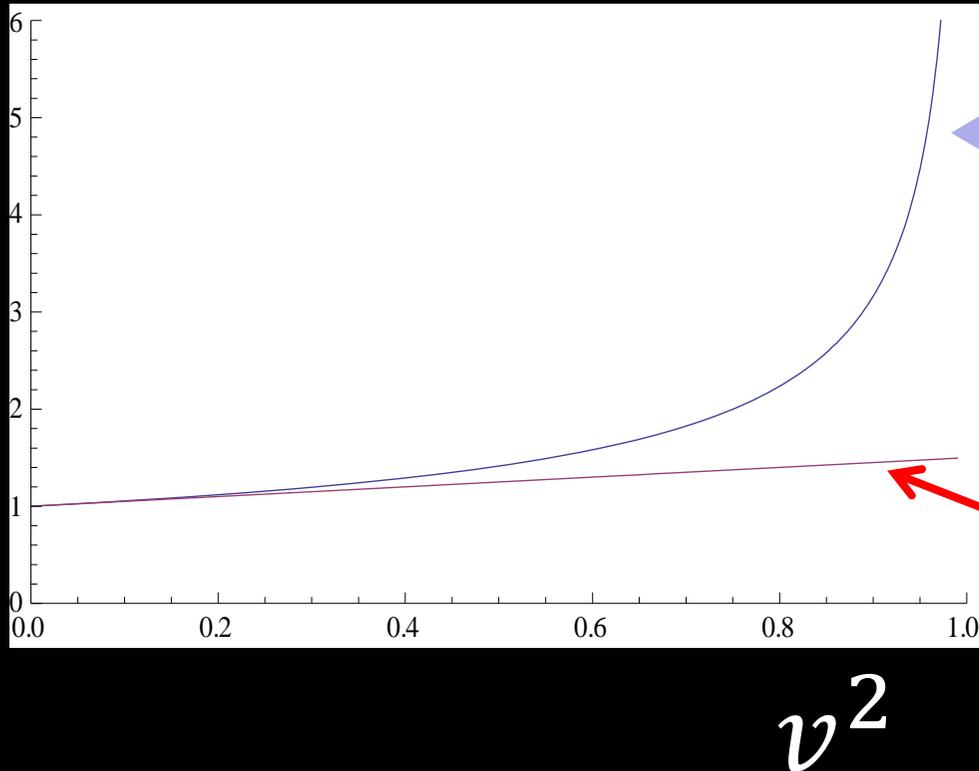


étoile

Même un photon
sans masse « sent »
la gravitation
... et est dévié par le Soleil

-- ce qui compte ici,
c'est l'énergie ... dont la
masse n'est qu'une composante

Energie E



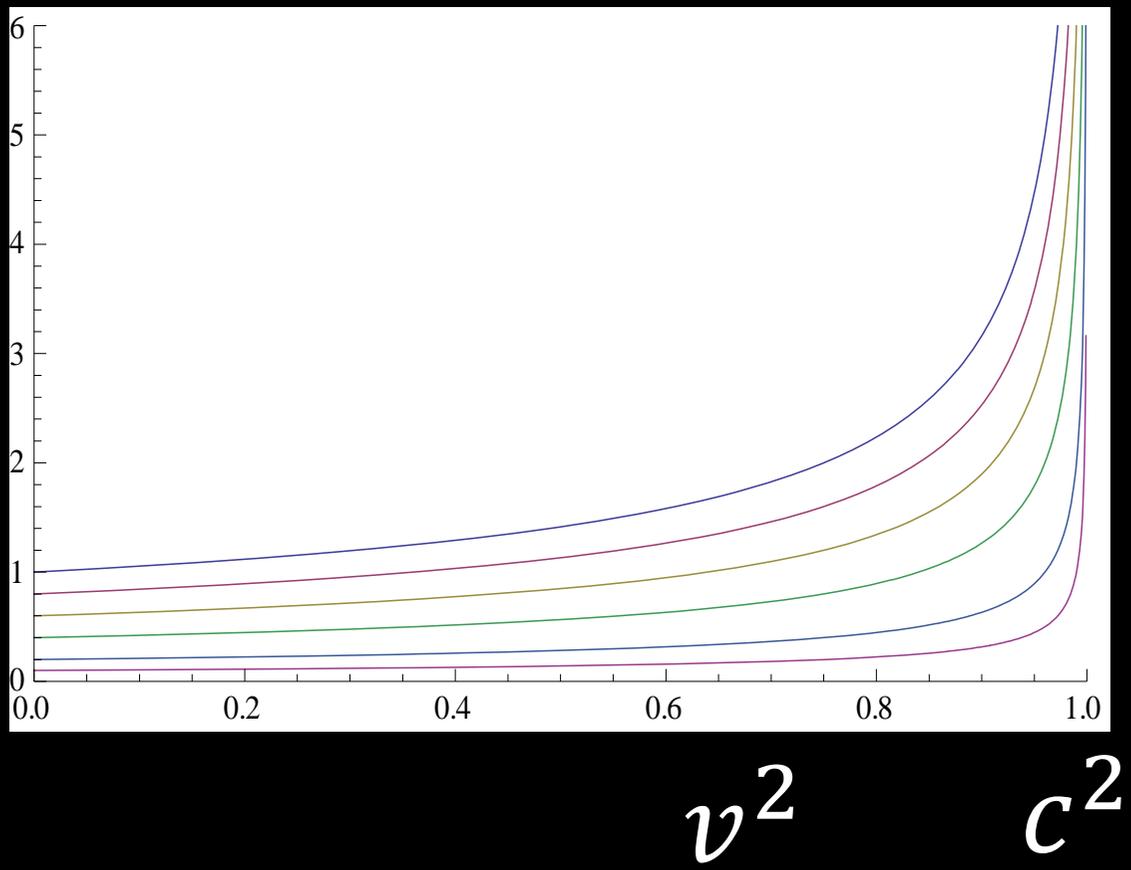
$$E = \frac{m c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$E = m c^2 + \frac{1}{2} m v^2$$

Masse = énergie minimale d'une particule

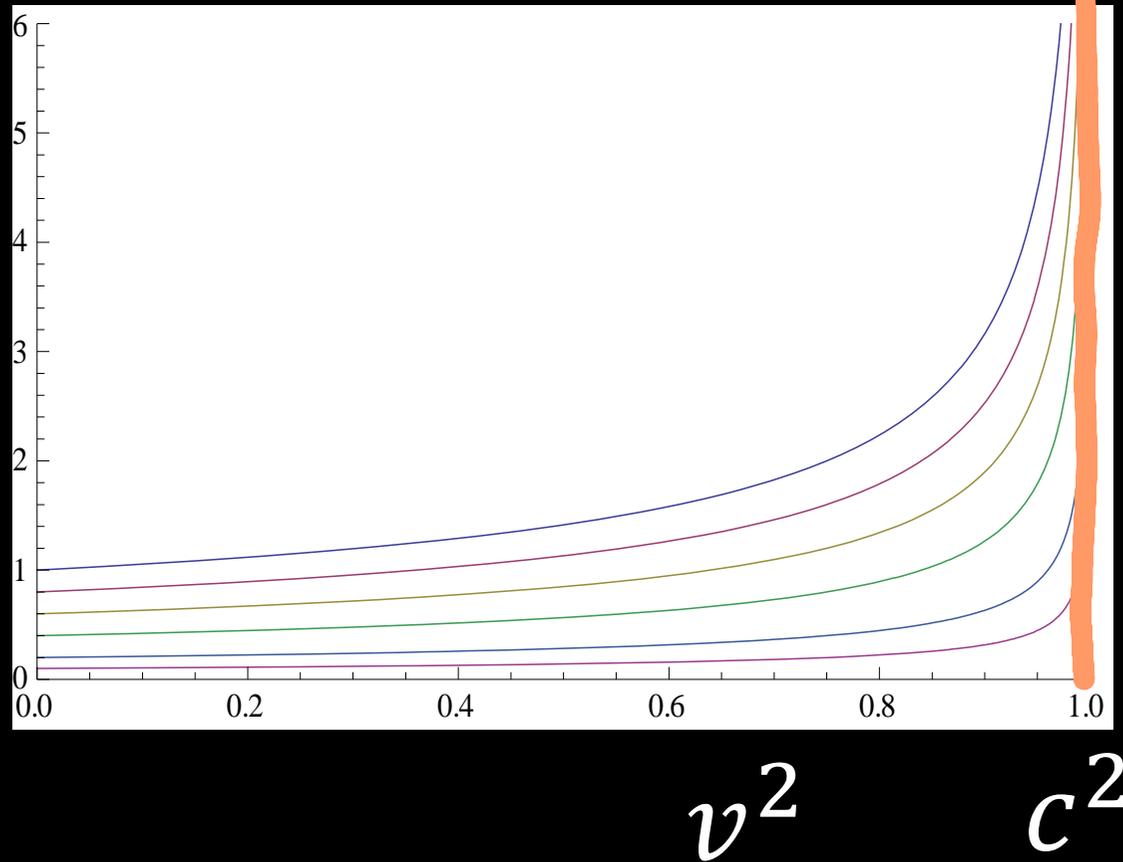
Energie E

Pour des masses
de plus en plus petites..

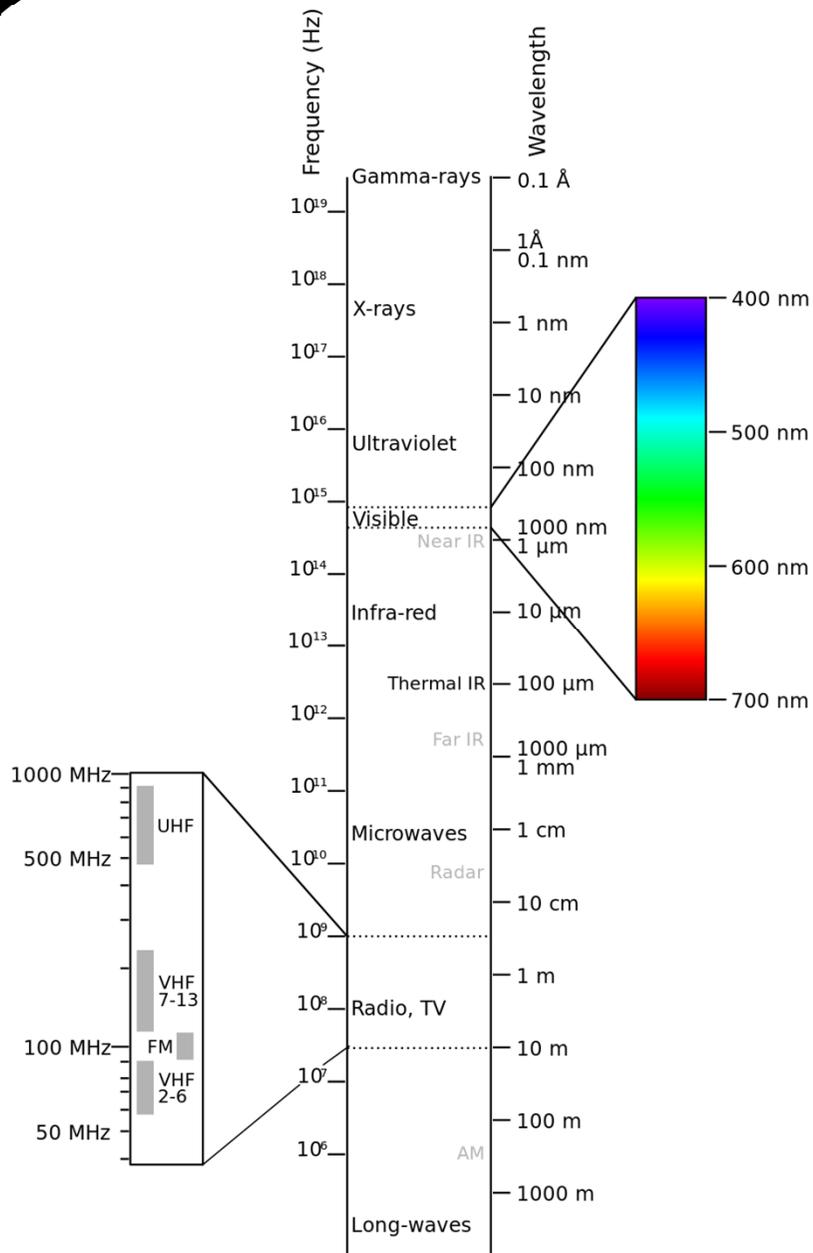


Energie E

Pour des masses
de plus en plus petites..



Pour le photon,
 $m=0$
 $v=c$



∞

Des photons de toutes les couleurs ...

↑

Énergie

Et de toutes les énergies, Un photon rouge a presque 2X moins d'énergie qu'un violet ..

↓ 0

L'énergie peut $\rightarrow 0$, donc $m = 0$

$$v = c$$



$$m = 0$$

$$v < c$$

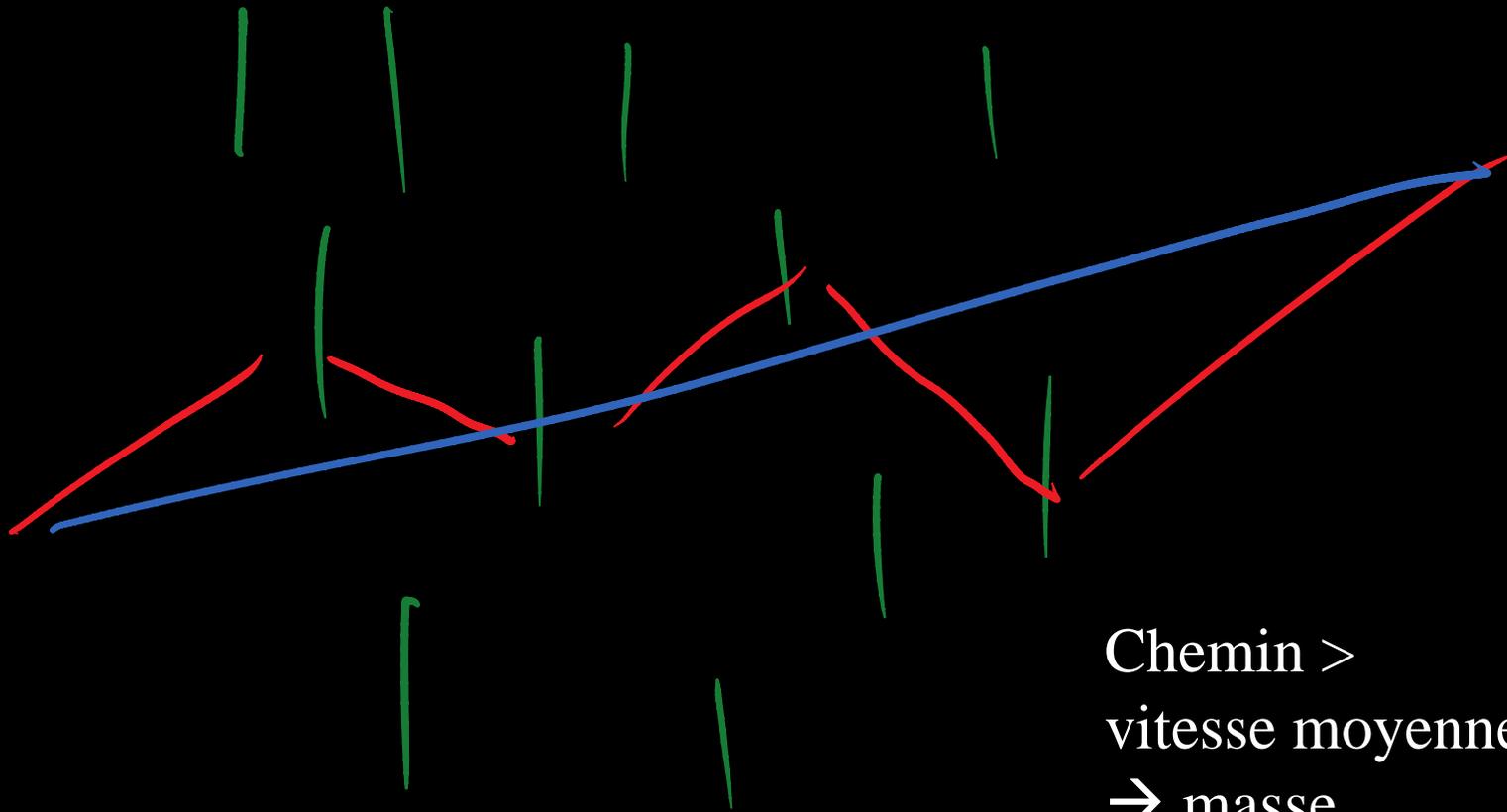


$$m > 0$$

Pourquoi le « champ scalaire »
donne de la masse aux vecteurs des interactions faibles
(W,Z) et pas au photon?

/ = scalaire

— W, Z
— γ



Fundamental



(Illustrations wikimedia commons, sauf autre crédit)