

# Les enjeux scientifiques du LHC



Gautier Hamel de Monchenault  
conférence Cyclope, octobre 2008

# Accélérateur de particules Remonter jusqu'au Big Bang

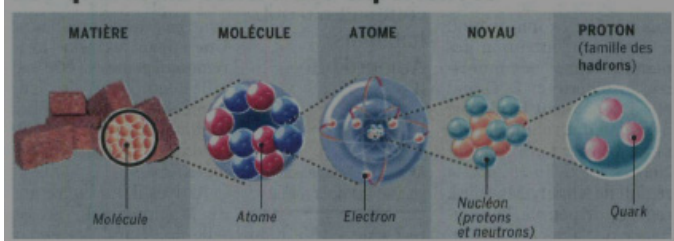
Cet été, le grand collisionneur d'hadrons de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN) entrera en service. Le plus imposant instrument scientifique jamais construit devrait percer quelques secrets de la matière et de la formation de l'Univers

## Les physiciens à la recherche de la « soupe » originelle de l'Univers

Cet été, le plus gigantesque instrument scientifique jamais construit, le grand collisionneur de hadrons, va entrer en service. Cet accélérateur de particules, anneau de 27 kilomètres de circonférence creusé 100 mètres sous la frontière franco-suisse, a pour ambition de percer quelques secrets de la matière

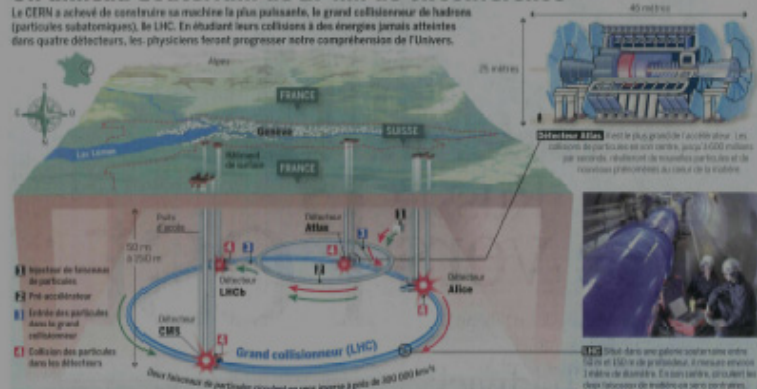
et de la formation de l'Univers. Pourquoi les choses ont-elles une masse ? Où est passée l'antimatière ? De quelles étoffes sont faites la matière noire et l'énergie sombre ? En brisant des particules, les physiciens espèrent enfin capter l'empreinte du fantomatique boson de Higgs. ■

### Les quarks au centre des expériences



### Un anneau souterrain de 27 km de circonférence

Le CERN a achevé de construire sa machine la plus puissante, le grand collisionneur de hadrons (particules subatomiques), le LHC. En étudiant leurs collisions à des énergies jamais atteintes dans quatre détecteurs, les physiciens forcent progresser notre compréhension de l'Univers.



### Recréer la « soupe » originelle



**Comment s'est formé l'Univers ?**

Juste après la déflagration originelle du Big Bang, notre Univers était un plasma – une « soupe » incommensurablement dense et chaude – de particules fondamentales. Quelques fractions de seconde plus tard sont apparus les quarks, qui se sont agglutinés en protons et neutrons, et ont formé les noyaux des atomes. En reconstituant ces conditions initiales, il devrait être possible de libérer les quarks et de comprendre comment ils se sont agglomérés pour former la matière.

# Accélérateur de particules: Remonter le temps vers le Big Bang

Etudier l'infiniment petit pour comprendre l'infiniment grand



# Equivalence masse-énergie

- ★ En mécanique newtonienne,  
la masse précède l'énergie



Newton

- il n'y a pas d'énergie sans masse
- la masse se conserve



- ★ En relativité, l'énergie précède logiquement la masse

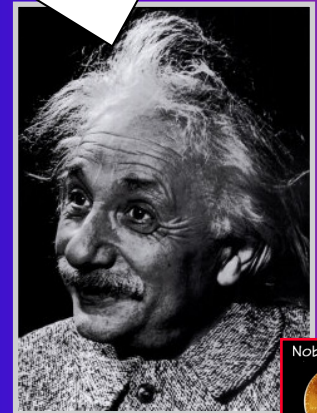
énergie  
au repos

$$E_0 = mc^2$$

vitesse  
de la lumière

- il y a de l'énergie sans masse
- il n'y a pas de masse sans énergie
- l'énergie se conserve... pas la masse !

qu'est-ce que la masse ?  
une forme d'énergie !



Einstein

- ★ L'énergie précède **chronologiquement** la masse  
(dans l'histoire de l'Univers...)





# Cinématique relativiste

- ★ L'inertie d'une particule massive augmente avec son énergie

lorsqu'on « accélère » une particule  
on augmente son énergie... et son inertie  
dans les mêmes proportions

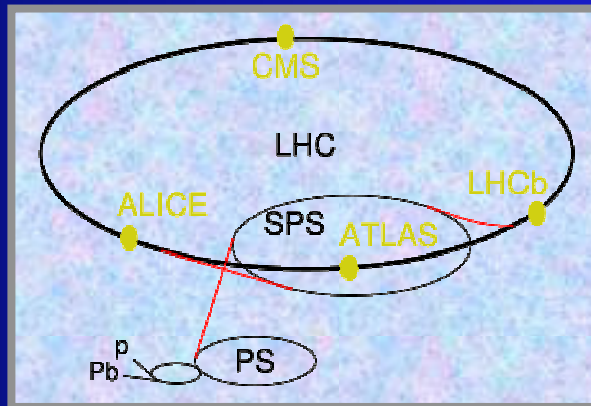
la vitesse de la lumière est indépassable !



- ★ Protons du LHC

LHC : 27 km de  
circonférence

$$E/mc^2 \sim 7000$$




$$v \simeq 0.99999996 \times c$$

# Autres équivalences

## ★ Equivalence énergie-température



Maxwell Boltzmann

équiartition  
de l'énergie

$$E = \frac{1}{2}kT$$

k = constante de Boltzmann



catastrophe  
ultra-violette

## ★ Equivalence énergie-rayonnement

Planck (1900) – Einstein (1905)

énergie  
quantum de lumière  
(« photon »)

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

fréquence

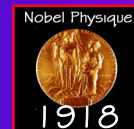
longueur  
d'onde

h = constante de Planck



Planck

Loi du rayonnement  
du corps noir



# Unités en physique des particules

L'unité d'énergie est le « Giga-électron-Volt » (GeV)

$$m(\text{proton}) \simeq 1 \text{ GeV}$$

$$m(\text{électron}) \simeq 0.0005 \text{ GeV}$$

$$\text{Un « Méga-électron-Volt » (MeV)} = 0,001 \text{ GeV}$$

$$\text{Un « Téra-électron-Volt » (TeV)} = 1000 \text{ GeV}$$



constante de Boltzmann  $k = 10^{-13} \text{ GeV/K}$

constante de Planck  $h = 4 \cdot 10^{-24} \text{ GeV.s}$

$$10^{-15} \text{ m} \sim 1 \text{ GeV}^{-1}$$

température & fréquence  
en unité d'énergie

correspondance  
énergie / longueur d'onde



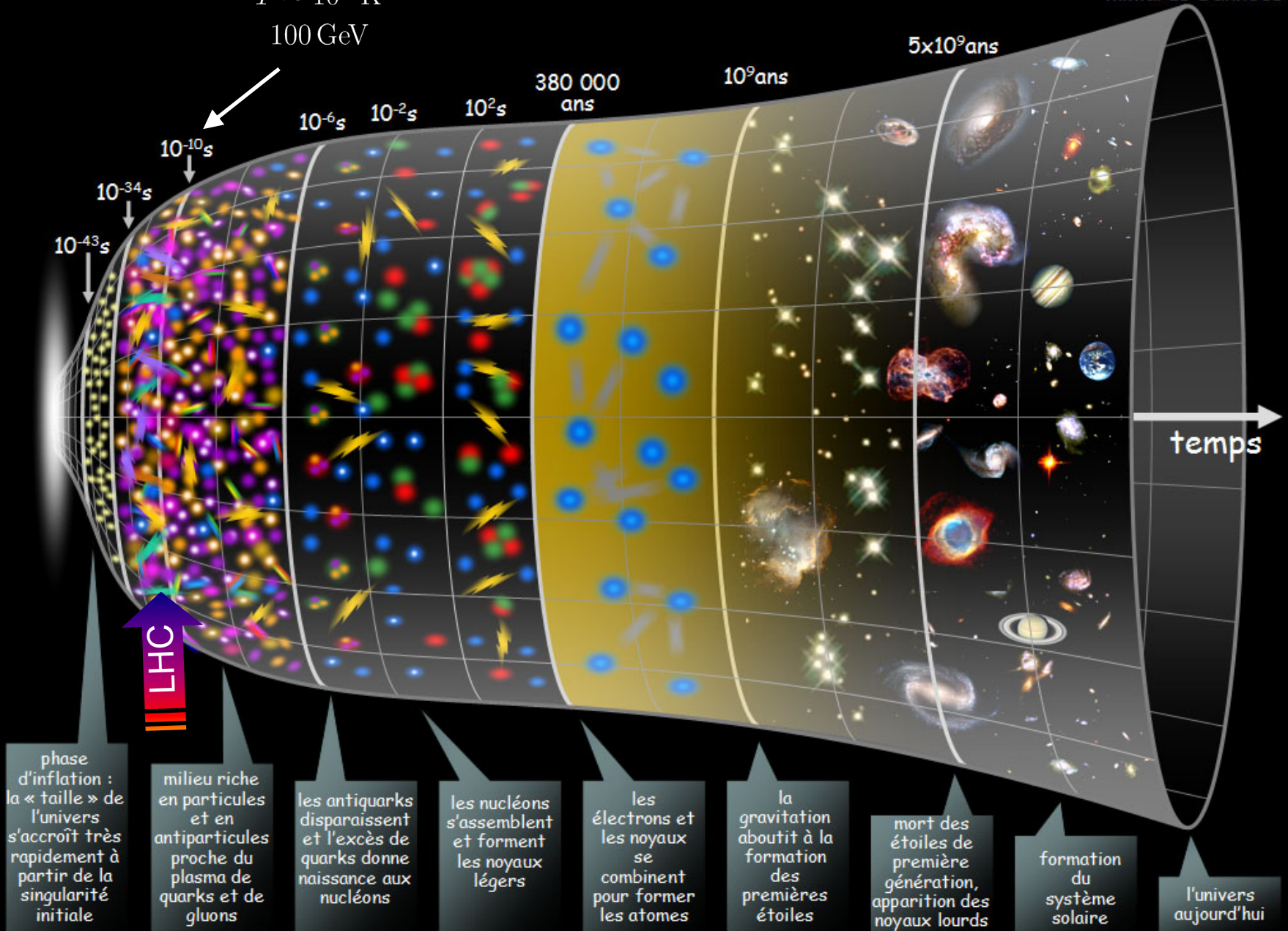
# Modèle de Big-Bang

électrofaible

$T \sim 10^{15} \text{K}$

100 GeV

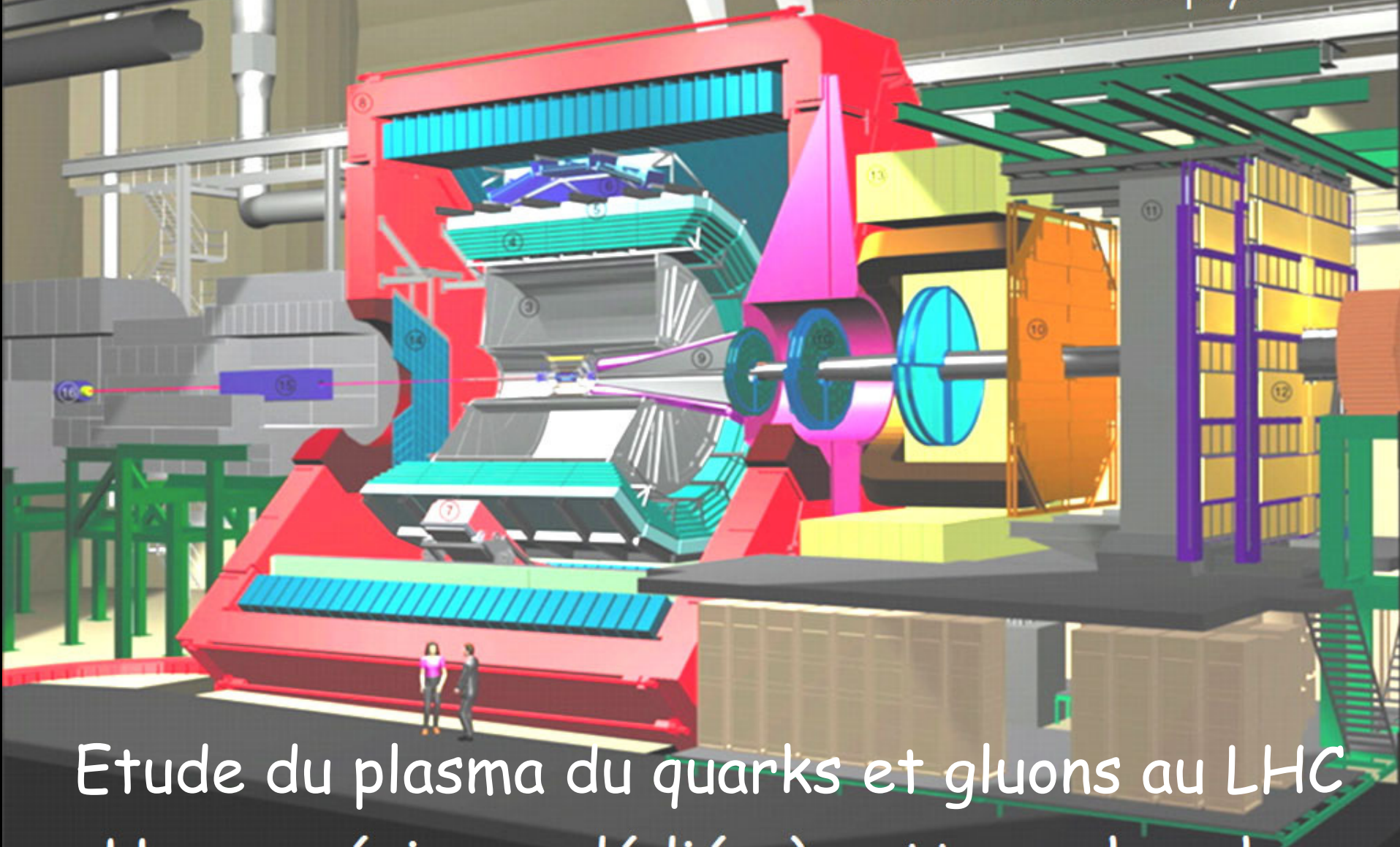
environ 14  
milliards d'années



# ALICE

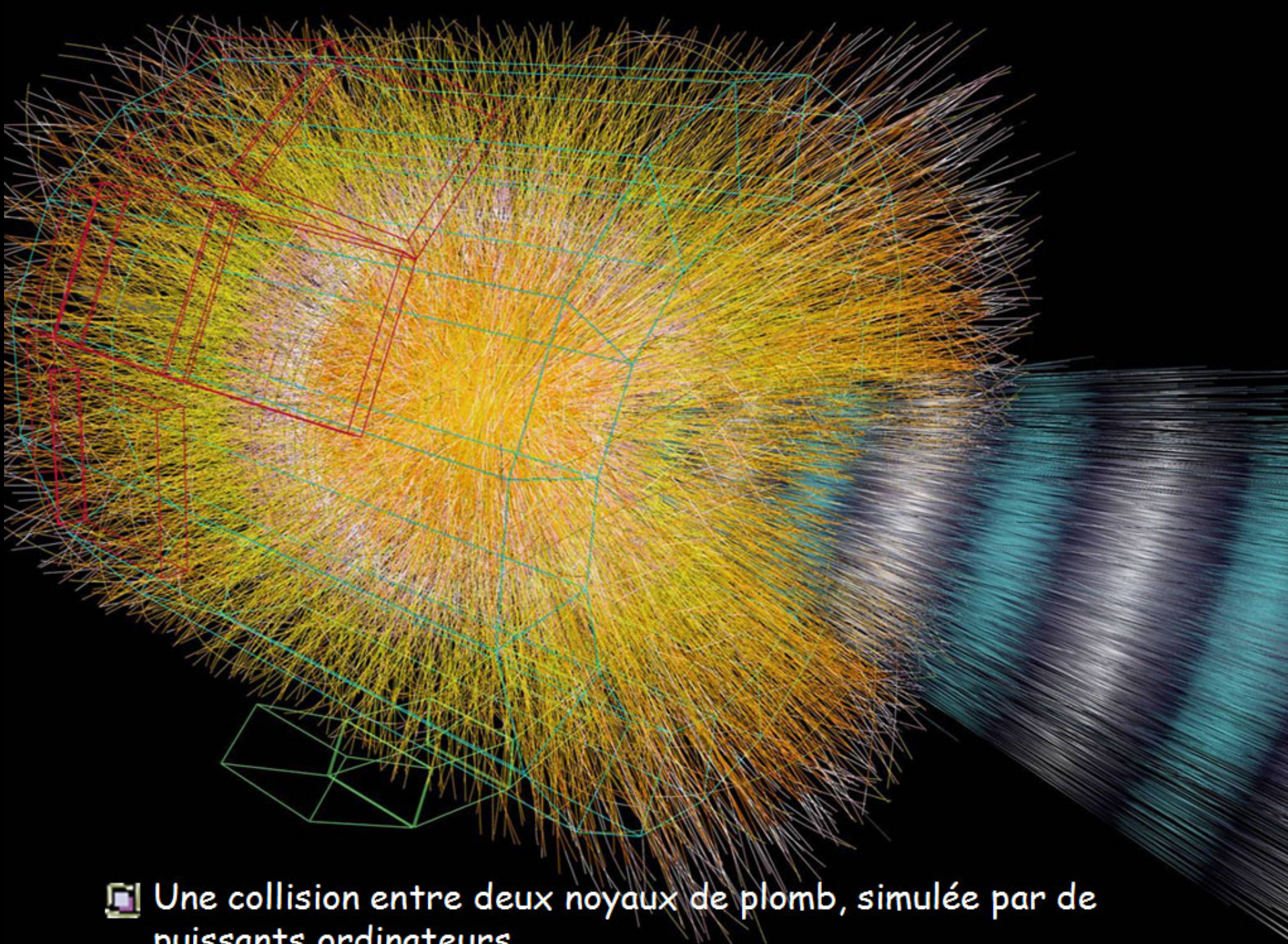
L'expérience ALICE


Plus de 1000 physiciens de 105 laboratoires de 30 pays



Etude du plasma du quarks et gluons au LHC  
Une expérience dédiée à cette recherche





 Une collision entre deux noyaux de plomb, simulée par de puissants ordinateurs



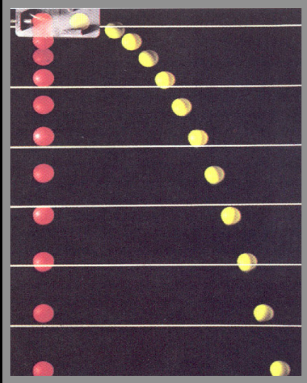
**Pourquoi les choses ont-elles une masse ?** D'après la théorie, dans les fractions de seconde qui ont suivi le Big Bang, aucune particule n'avait de masse. Comment en ont-elles acquies une ? Pourquoi certaines, comme l'électron, sont-elles si légères et d'autres si lourdes ? Et pourquoi le neutron et le proton (constituants du noyau de l'atome) sont-ils plus lourds que la somme des quarks qui les composent ? La réponse pourrait être le boson de Higgs, une particule fantomatique dont l'existence a été prédite dans les années 1960 par le physicien britannique Peter Higgs mais qui n'a jamais été observée. A ce boson serait associé un « champ de Higgs » : un champ de force invisible baignant tout l'Univers, qui se serait formé lorsque celui-ci aurait commencé à refroidir et qui, par sa « viscosité », ralentirait les particules élémentaires en leur conférant une masse. Si ce mystérieux boson reste introuvable, une nouvelle physique devra être élaborée.

# Quelle est l'origine de la masse ?

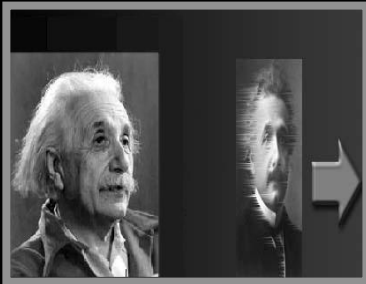
La quête du boson de Higgs se poursuit au LHC

# Royaumes des théories physiques

Petit →



Rapide ↓

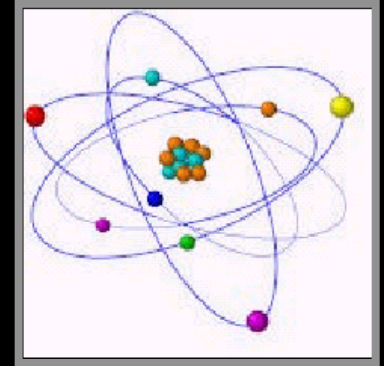


mécanique  
classique

mécanique  
quantique

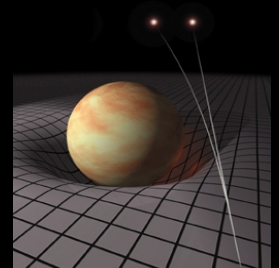
relativité  
restreinte

théorie  
quantique  
des champs

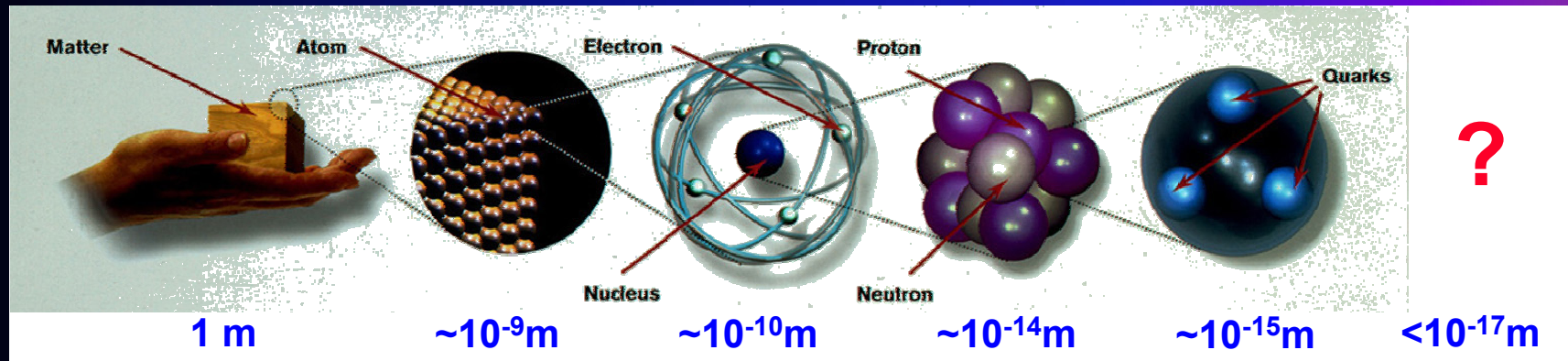


Aux grandes échelles : **relativité générale**

La relativité générale et la mécanique quantique  
sont-elles compatibles ?




# Constituants ultimes de la matière



# Classification des éléments chimiques

## tableau périodique de Mendeleev

1 H																	2 He						
3 Li	4 Be																	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg																	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr						
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe						
55 Cs	56 Ba	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn						
87 Fr	88 Ra	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt															
57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb										
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No										



La masse de l'atome se concentre dans son noyau (protons + neutrons)

Le proton et le neutron sont constitués de quarks

L'électron et les quarks sont des particules « fondamentales »



# Quarks & Leptons

## ★ Briques élémentaires de la matière « ordinaire »

<u>Quarks</u>	Up “u”	Down “d”
<u>Charge</u>	+2/3	-1/3
<u>Masse (MeV)</u>	~3	~5

(1ère famille)

<u>Leptons</u>	électron	neutrino
<u>Charge</u>	-1	0
<u>Masse (MeV)</u>	0.5	~0

+ antiquarks & antileptons

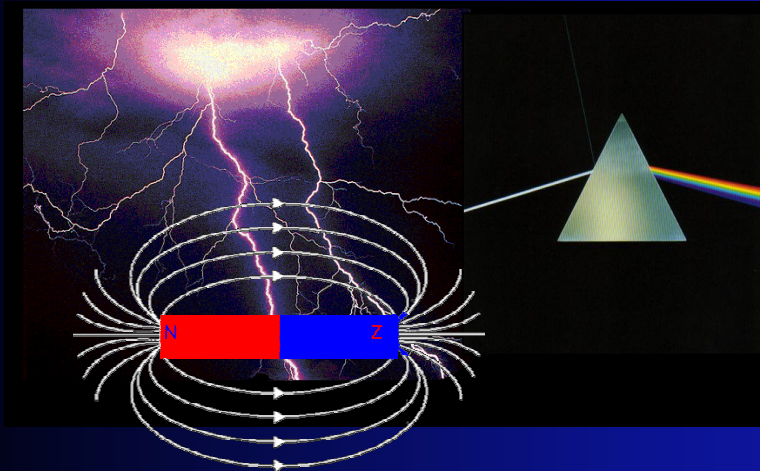
Les quarks n'existent pas à l'état libre :  
ils sont confinés dans les particules « hadroniques »

- ★ Quarks & leptons sont des « fermions » (=particules de matière)
  - spin  $\frac{1}{2}$
  - principe d'exclusion de Pauli

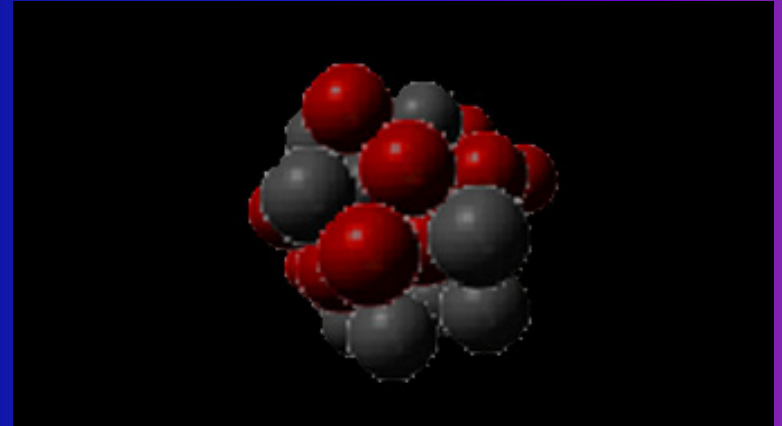
- ★ Proton et neutron sont des « baryons »
  - proton = ( u u d )
  - neutron = ( u d d )

- ★ Le neutrino est produit dans la radioactivité « bêta »

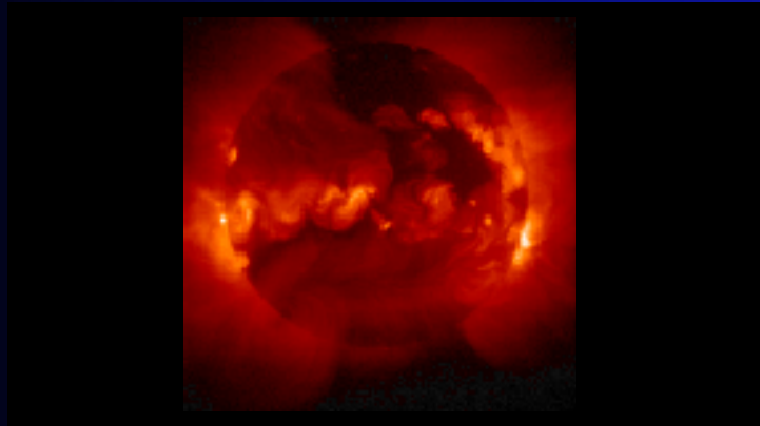
# Quatre forces fondamentales



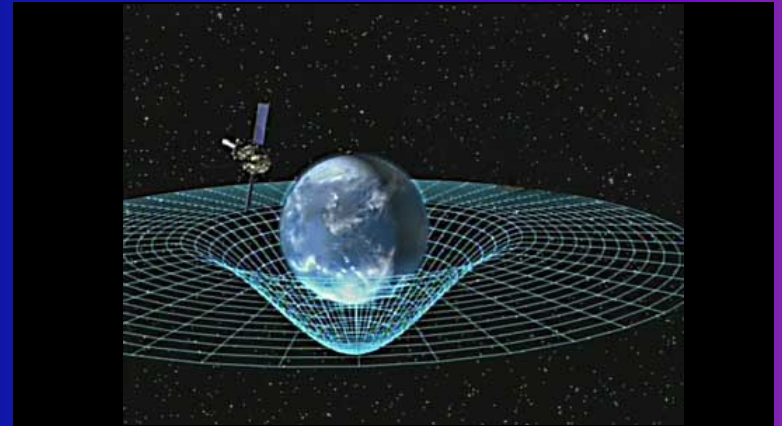
électromagnétique



nucléaire forte



nucléaire faible



gravitationnelle

# Interactions entre particules

- ★ Les interactions entre particules de matière (« fermions ») sont transmises par l'échange de particules médiatrices (« bosons vecteurs »)

Bosons (=particules de force) :

- spin entier
- pas de principe d'exclusion

La « portée » d'une force est **inversement proportionnelle** à la masse de la particule médiatrice

<u>interaction</u>	<u>“charge”</u>	<u>boson(s)</u>	<u>masse (GeV)</u>	<u>portée (m)</u>
<u>électromagnétique</u>	électrique	photon ( $\gamma$ )	0	infinie
<u>nucléaire faible</u>	isospin faible	$W^+$ , $W^-$ , $Z^0$	81 / 91	$\sim 10^{-17}$
<u>nucléaire forte</u>	« couleur »	8 gluons (g)	0	(effective) $\sim 2 \cdot 10^{-15}$
<u>gravitationnelle</u>	masse	graviton ?	0	infinie

→ interaction gravitationnelle : négligeable en physique des particules !



# Les symétries en physique



Théories modernes : construites sur le  
**Principe d'invariance de jauge**  
origine « géométrique »  
des interactions fondamentales

Stratégie pour construire une « théorie de jauge » :

- considérer une invariance globale des équations du mouvement « libre »
- imposer à cette invariance de devenir locale (en chaque point)
- ajouter un « champ » pour connecter les points : c'est l'interaction !

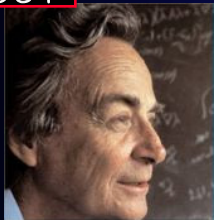
Exemples :

- liberté de choix de potentiel → champ électromagnétique (Maxwell)
- invariance par translation → champ gravitationnel (Relativité générale)

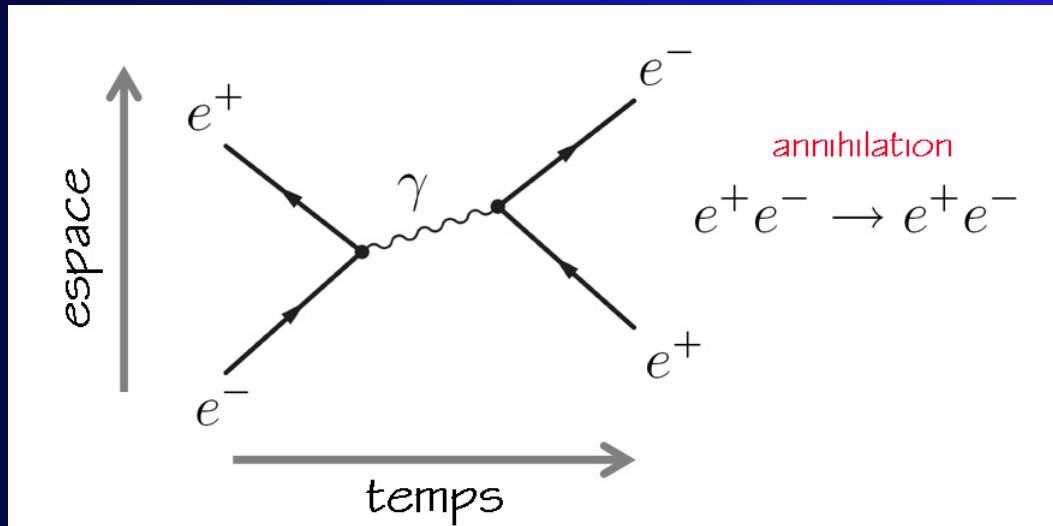
# Electrodynamique quantique (QED)

## ★ Electrodynamique quantique

Feynman, Schwinger, Tomonaga (1945)



Feynman



boson vecteur  
de QED :  
photon  
(masse nulle)

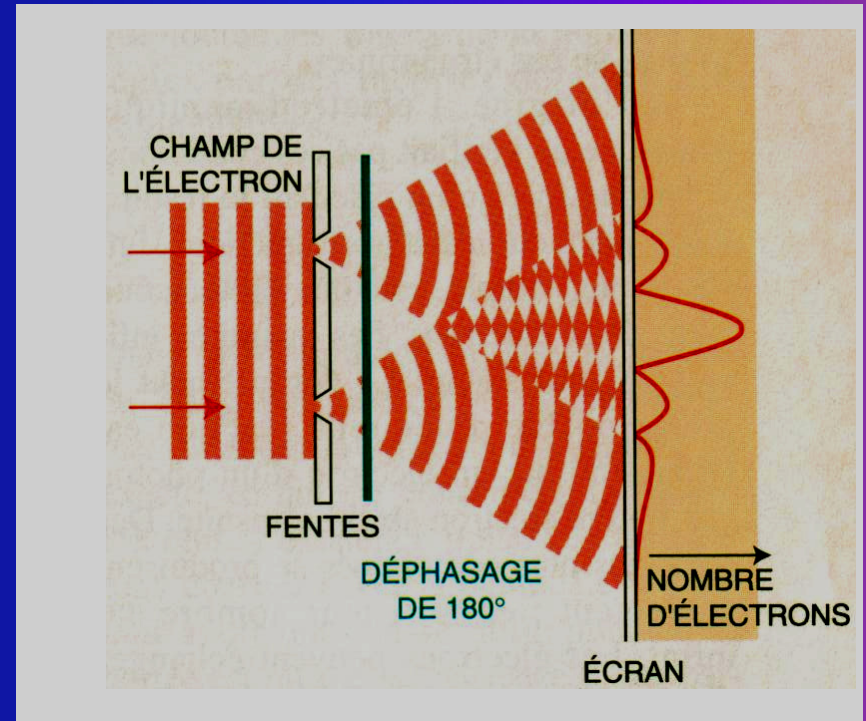
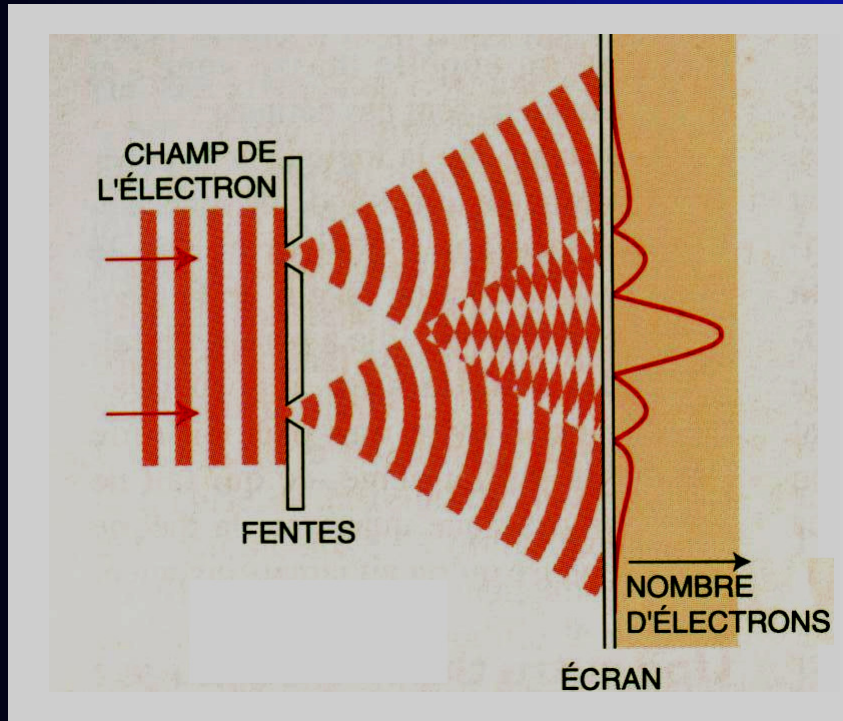
diagramme  
de Feynman :  
visualisation  
et outil de calcul

Exemple de prédiction :  
« moment magnétique » de l'électron

Théorie de Dirac  
QED  
Expérience

1.0  
1.00115965221(4)  
1.00115965246(20)

# La symétrie de l'électrodynamique



- ★ ce qui compte c'est la différence de phase entre les deux ondes
- ★ symétrie globale : liberté de choisir la phase absolue
- ★ symétrie globale  $\rightarrow$  locale : apparaît le champ électromagnétique !

# Interaction nucléaire forte

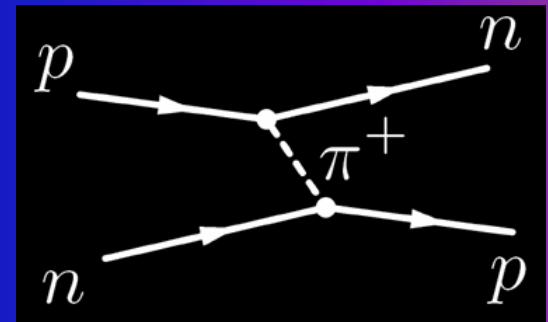
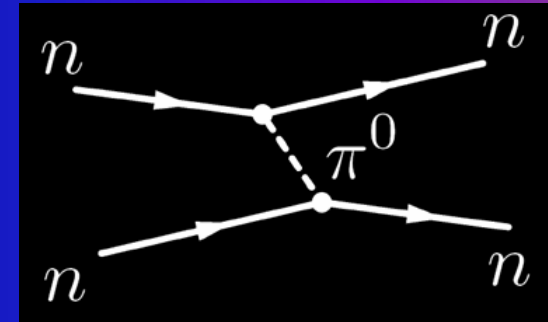
## ★ Théorie des mésons

Yukawa (1935)

cohésion du noyau atomique  
par échange de « **pions** »  
entre « **nucléons** »

notion de **symétrie de spin isotopique**  
(=**isospin**)

« doublet » d'isospin des **nucléons**  
« triplet » d'isospin des **pions**

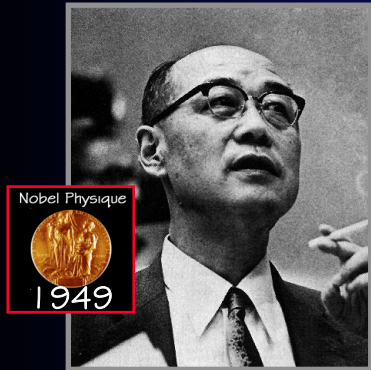


**portée**  $R \sim 2 \times 10^{-15} \text{ m}$    $m(\text{pion}) \sim 0,1 \text{ GeV}$

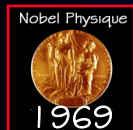
## ★ Modèle des quarks

Gell-Mann, Zweig (1964)

classification des particules hadroniques  
selon des principes de symétrie



Yukawa



Gell-Mann



# Chromodynamique quantique (QCD)

## ★ Théorie de jauge de l'interaction nucléaire forte

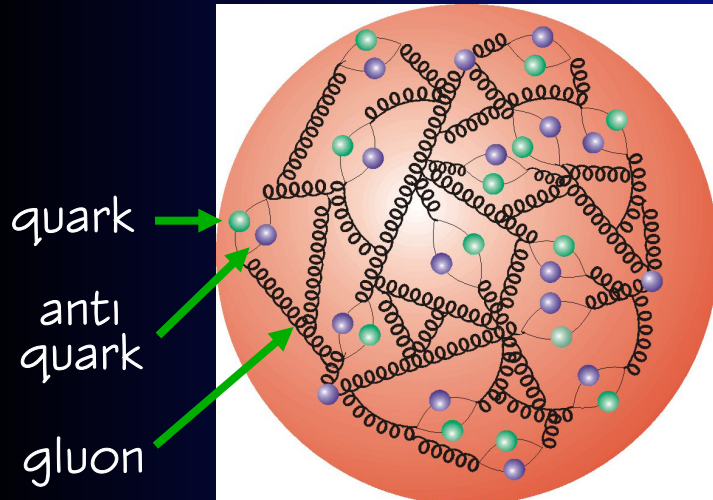
- quarks
- 8 gluons (masse nulle)
- confinement des quarks dans les hadrons

Wilcek Politzer Gross

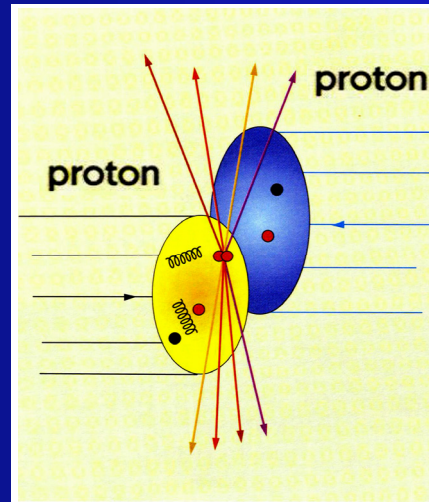


## ★ Liberté asymptotique

sondés à très haute énergie (= à très courte distance) les hadrons semblent être constitués de quarks & gluons « libres »



le proton « vu »  
à très courte distance



au LHC  
on étudiera en fait  
des interactions « dures »  
entre :

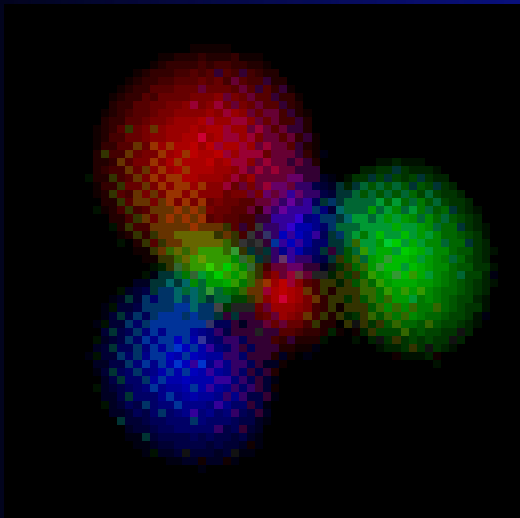
- quark & quark
- quark & antiquark
- quark & gluon
- gluon & gluon
- ... etc.

# L'origine de (presque toute) masse

- masse du proton :  $\sim 1 \text{ GeV}$
- masse des quarks u & d  $< 0,01 \text{ GeV} !!$

d'où vient la masse du proton ?

QCD (=des mois de calculs sur des ordinateurs surpuissants !)  
reproduit les masses du proton, du neutron  
et de la plupart des particules hadroniques...



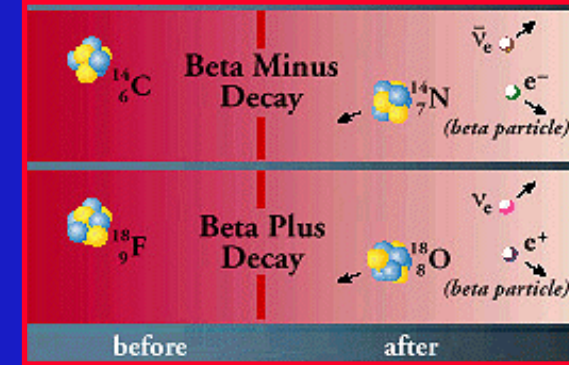
les calculs montrent que  
la contribution de masse des quarks  
dans le proton est faible ( $< 10\%$ )

la majeure partie de la **masse** ( $\sim 90\%$ )  
résulte de **l'énergie stockée** dans  
les **interactions** incessantes  
entre **quarks et gluons** !

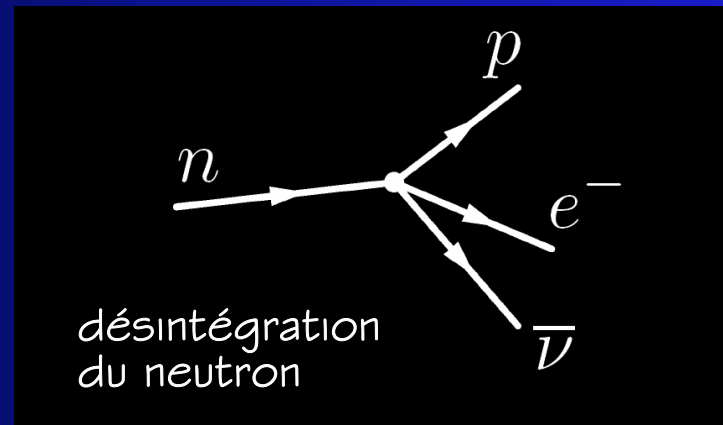
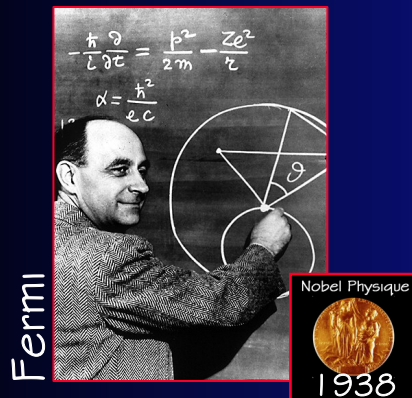
plus que jamais :  $\text{masse} = \text{énergie}$  !

# Interaction nucléaire faible

- désintégrations radioactives (« bêta »)
- réactions nucléaires dans le soleil



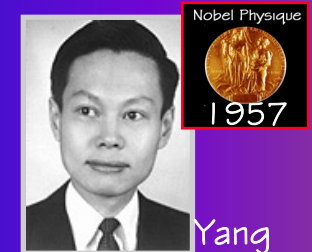
## ★ Théorie de Fermi (1932)



problème :  
théorie valable à  
« basse » énergie

nécessairement  
l'approximation  
d'une théorie  
plus générale

## ★ Théorie de Yang & Mills (années 50)



➡ trois bosons vecteurs (de masse nulle)  
dont un ressemble beaucoup au photon

doublets d'isospin :

proton  $\leftrightarrow$  neutron  
neutrino  $\leftrightarrow$  électron

# Le problème : la masse des bosons

- ★ propriété générale des théories de jauge: masse des bosons = 0
- ★ mais l'interaction nucléaire faible est de très courte portée ( $R \sim 10^{-17} \text{m}$ )  
... donc les bosons médiateurs de l'interaction sont  
nécessairement très massifs ( $M \sim 100 \text{ GeV}$ )
- ★ si on introduit des bosons massifs dans la théorie  
on « brise » explicitement la symétrie de jauge  
... la théorie perd sa cohérence mathématique  
... les calculs n'ont plus aucun sens !

**question** : peut-on construire une théorie respectant rigoureusement la symétrie de jauge et contenant des bosons vecteurs massifs ???

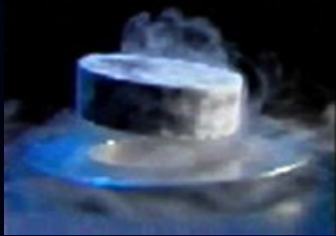
*La clé vient de la physique du solide ...*



# Mécanisme de Higgs

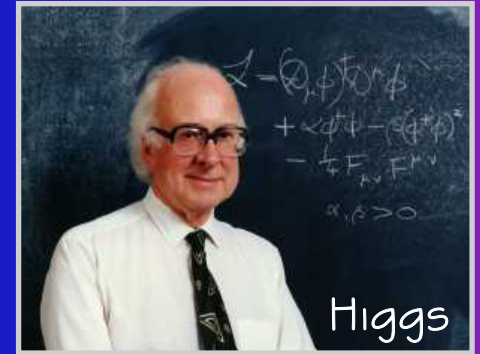
Higgs, Englert & Brout (1964)

effet Meißner



Nambu

appliquer les idées  
de la physique du solide  
à la physique  
des particules



Higgs

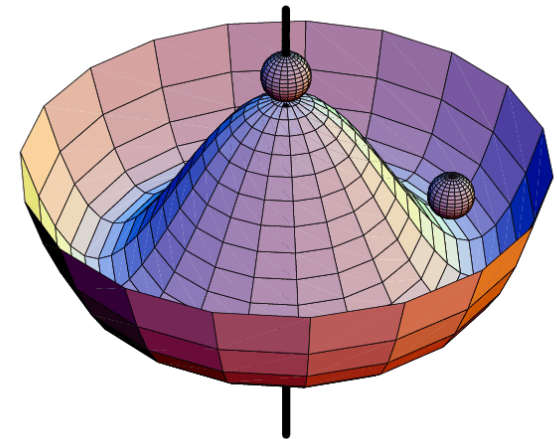
★ Brisure spontanée de la symétrie

champ de Higgs : 4 particules de spin 0



le minimum d'énergie du champ de Higgs  
brise spontanément la symétrie d'isospin

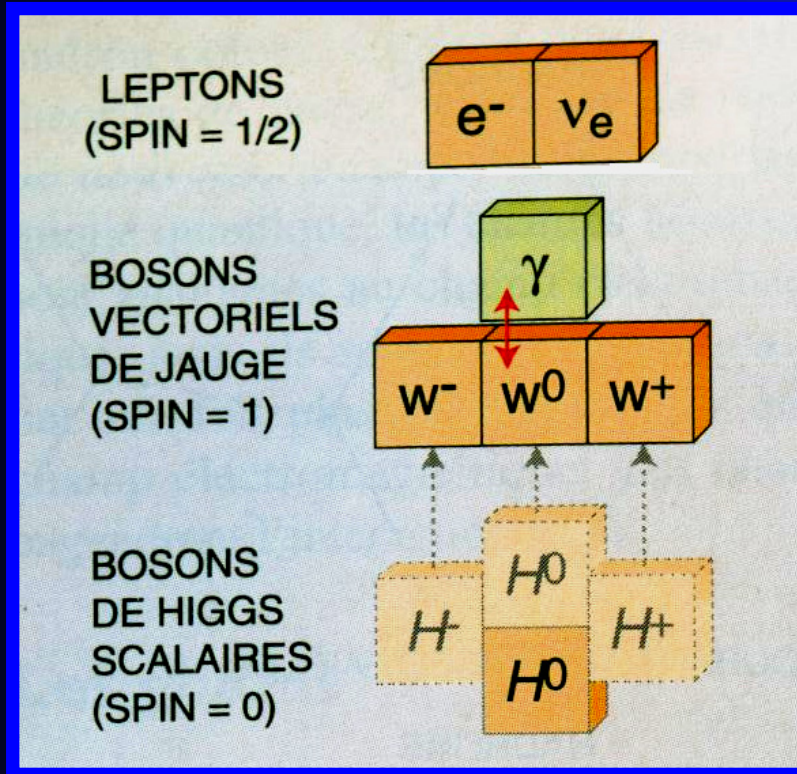
après  
la transition de phase  
électrofaible



Le champ de Higgs indique  
une direction dans  
l'espace d'isospin !

# Les bosons acquièrent une masse

Après brisure spontanée de la symétrie



conclusion :

- trois bosons massifs
- un boson de masse nulle

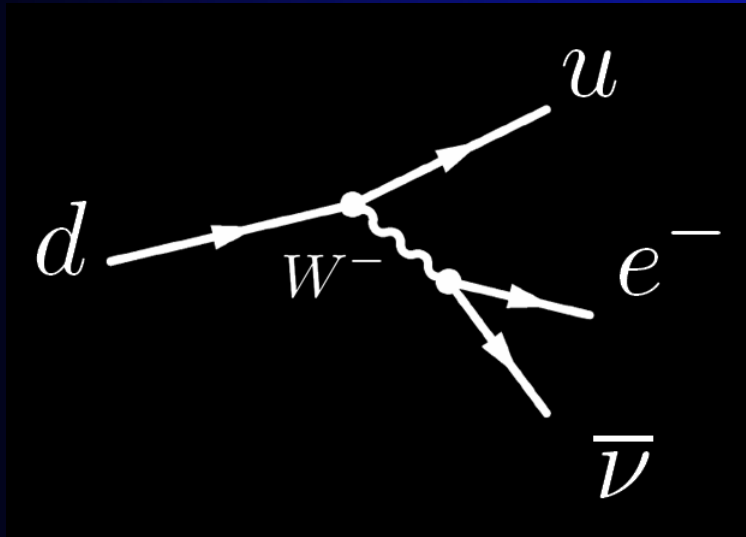
c'est le **photon** !

La théorie prédit l'existence  
d'une **particule neutre**  
**de spin 0**

le **boson de Higgs**

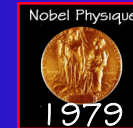
# Théorie électrofaible

« mariage » des interactions  
électromagnétique et nucléaire faible



+ mécanisme  
de Higgs

S. Glashow,  
S. Weinberg,  
A. Salam  
(~1969)



Trois bosons intermédiaires,  
vecteurs des interactions faibles

Courants faibles chargés :  $W^+$  &  $W^-$

$M \sim 80 \text{ GeV}$

Courants faibles neutres :  $Z^0$

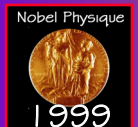
$M \sim 90 \text{ GeV}$

... et le photon

$M = 0$



M. Veltman,  
G. 't Hooft  
(1970-72)





# Mécanisme de Higgs en BD

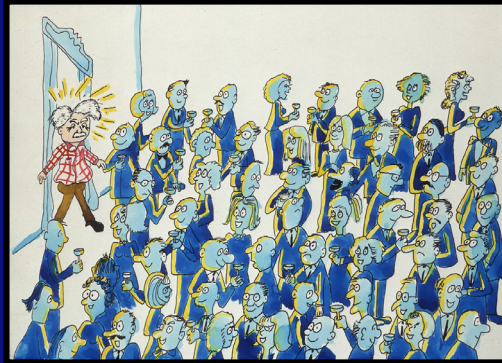
Le mécanisme de Higgs fournit une masse aux particules de matière...

1



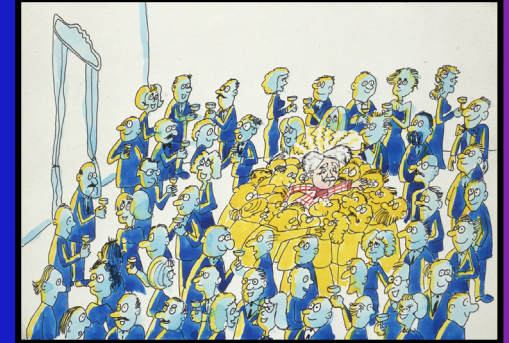
Une assemblée de  
physiciens:  
le « vide quantique »

2



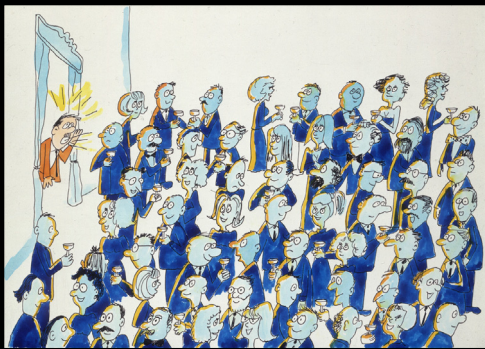
Arrive une personnalité libre  
de ses mouvements

3



Un amas s'accumule autour:  
la personnalité a « acquis »  
une masse !

1



Une rumeur est lancée dans  
la pièce...

2



Un amas se forme... c'est une  
nouvelle particule!

La théorie prédit  
l'existence d'une  
nouvelle particule,  
le boson de Higgs

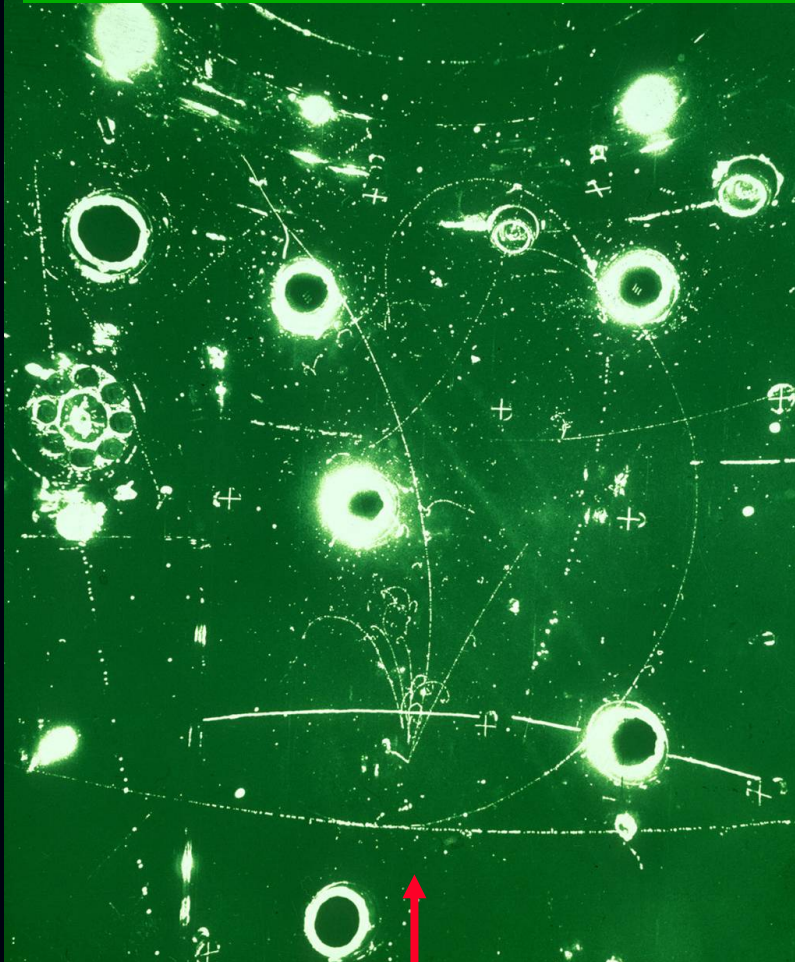
... mais ne dit  
rien de sa masse !



# Courants neutres, bosons W et Z

Découverte des courants neutres  
(CERN, 1974)

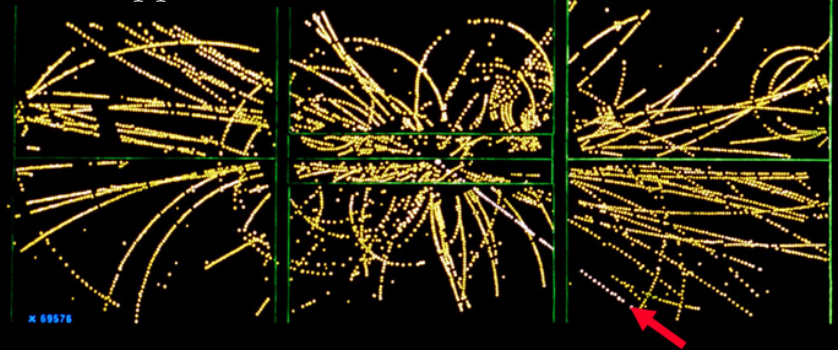
Gargamelle, faisceau de neutrinos  
équipe de P. Lagarrigue



Découverte des bosons W et Z  
(CERN, 1982)

$$p\bar{p} \rightarrow W + X$$

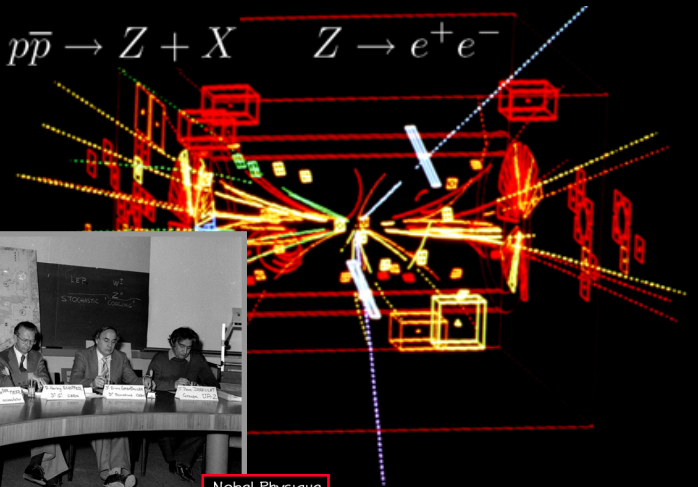
$$W \rightarrow e\nu$$



UA1  
&  
UA2

$$p\bar{p} \rightarrow Z + X$$

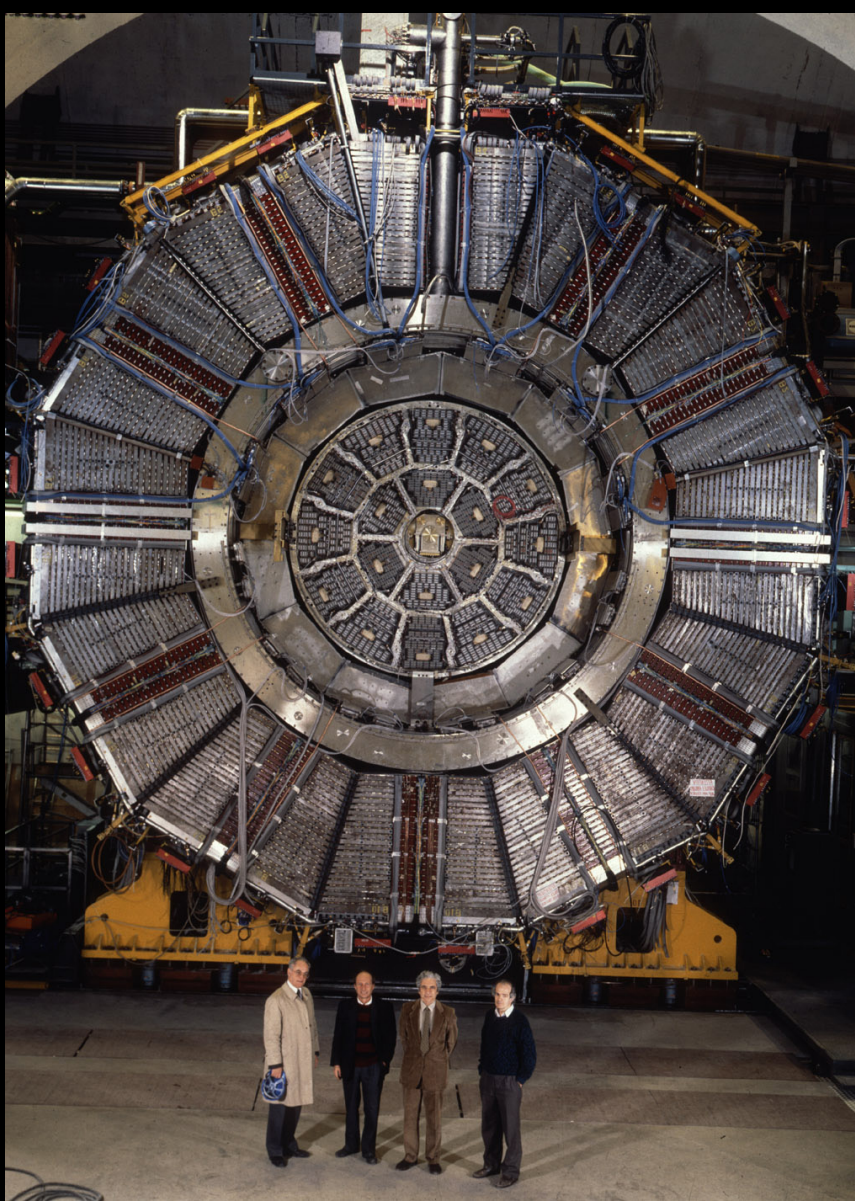
$$Z \rightarrow e^+e^-$$



Rubbia  
Van Der Meer



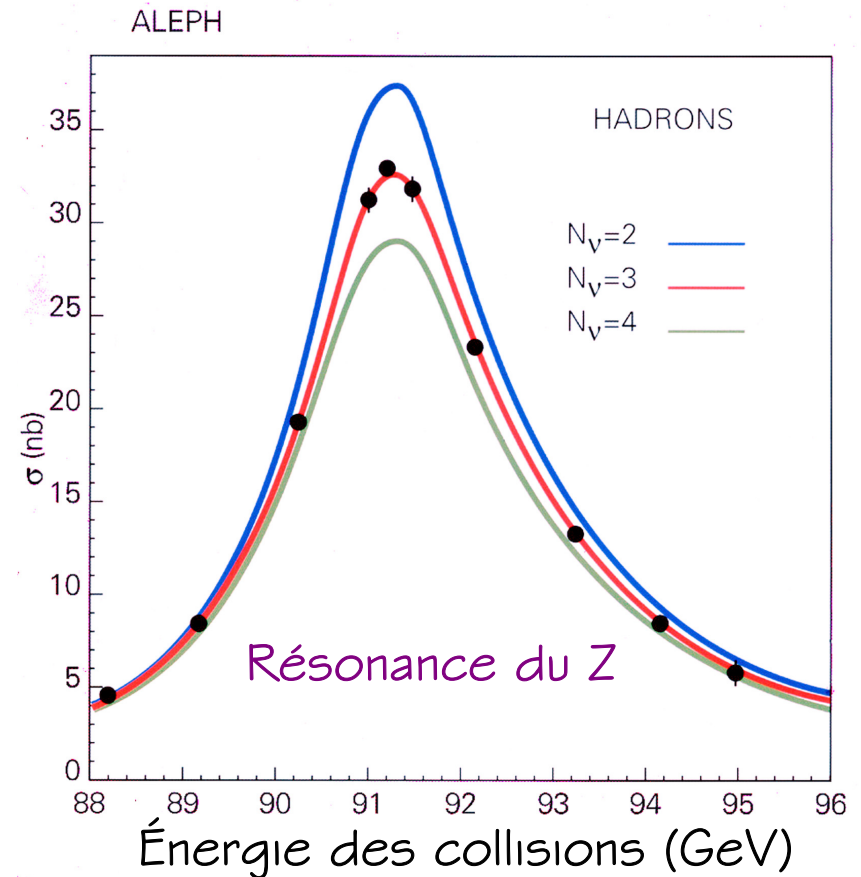
# Trois familles de neutrinos



LEP (CERN, années 90)

Expériences

ALEPH, DELPHI, L3, OPAL

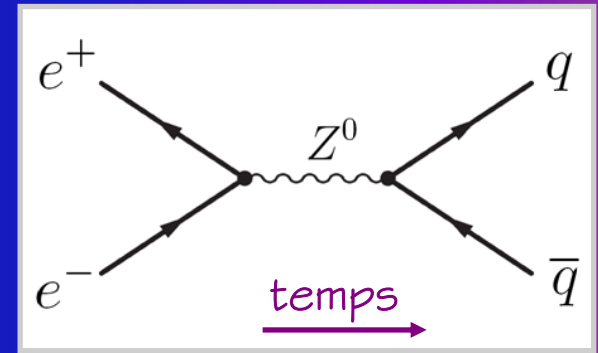
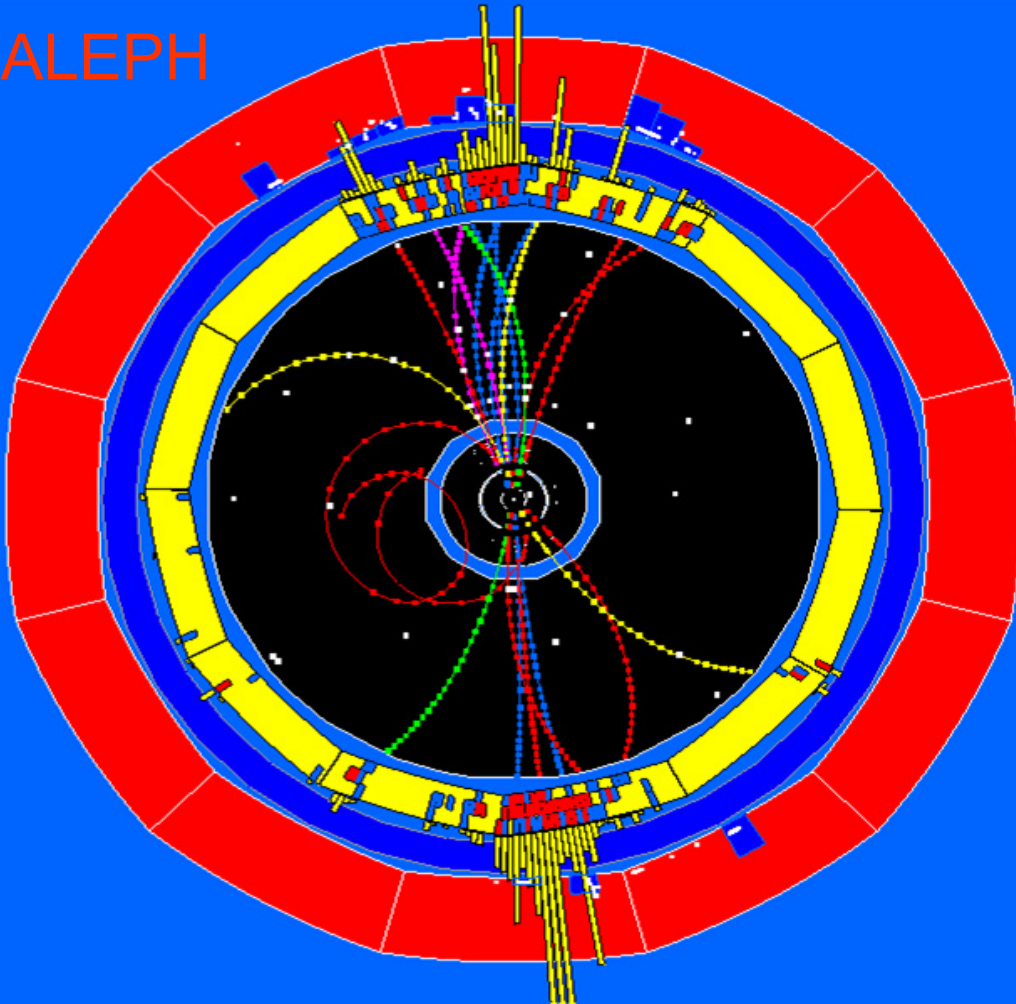




$e^+ e^- \rightarrow q \bar{q} \rightarrow \text{hadrons}$

Run=15

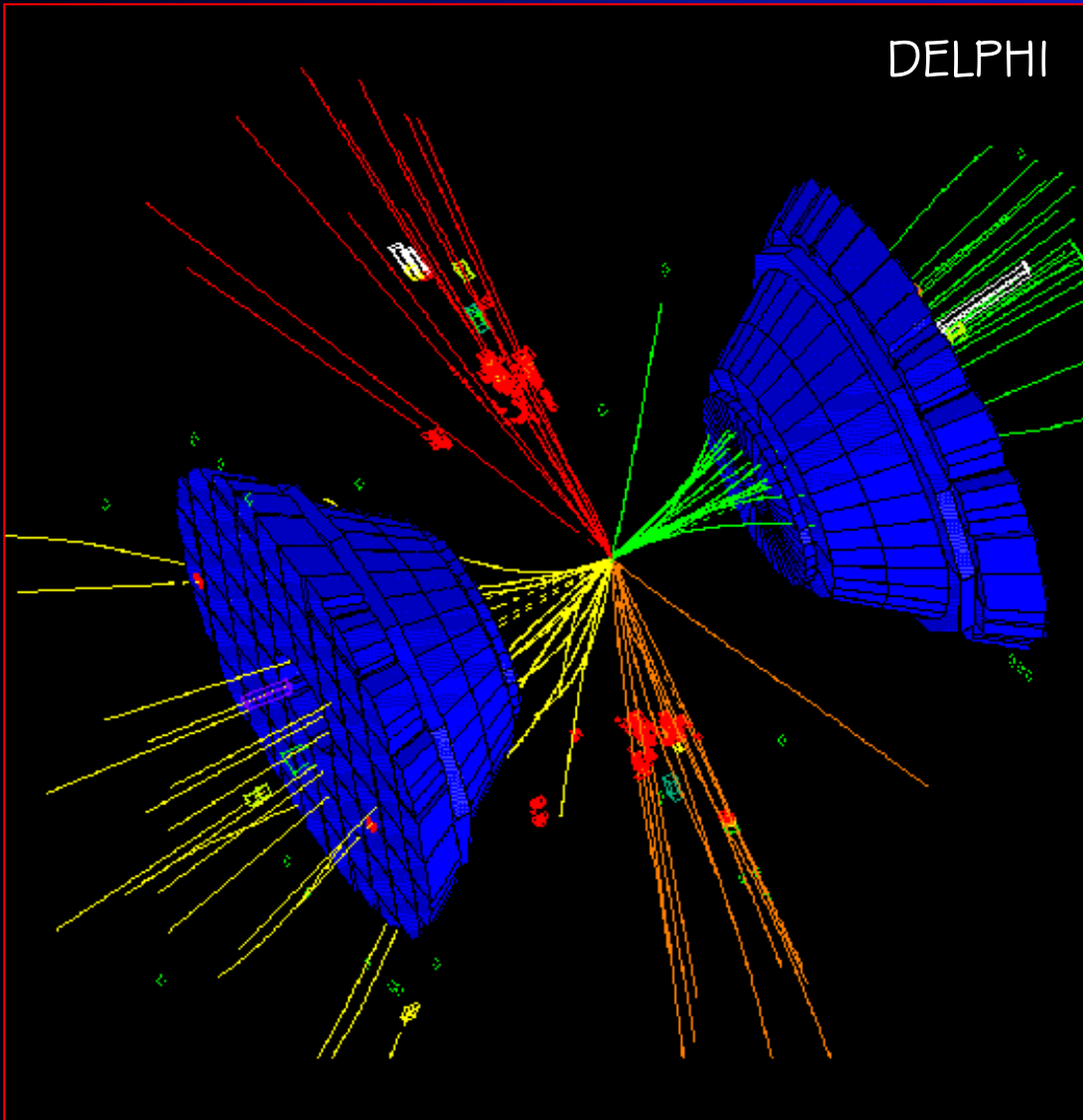
ALEPH



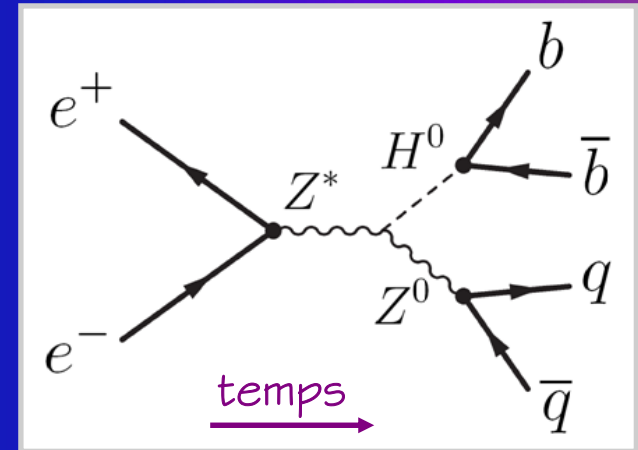
événement  
« deux jets »  
au LEP-1  
(70% de  
probabilité)



DELPHI



recherche  
(infructueuse) du  
boson de Higgs en  
au LEP-II  
(à la plus  
haute énergie)



contrainte  
expérimentale (LEP) :

$$m(H) > 115 \text{ GeV}$$

contrainte théorique :

$$m(H) < 1 \text{ TeV}$$

➡ LHC !

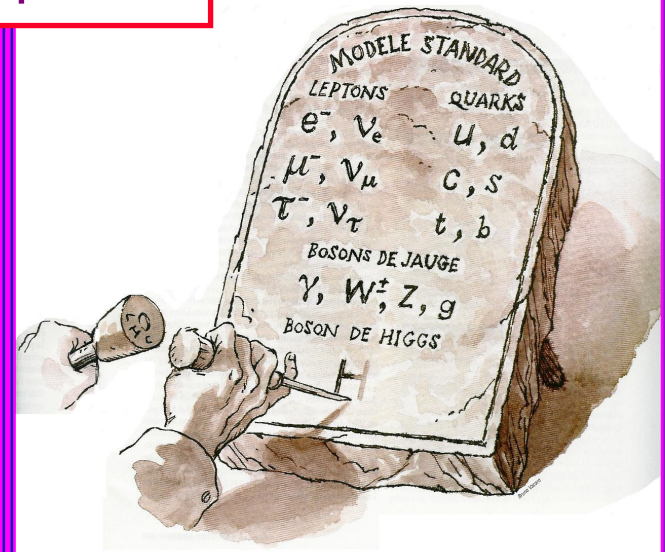
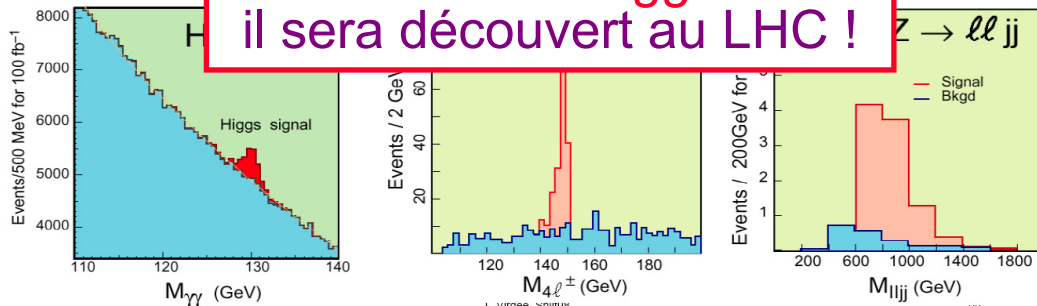
# Le Boson de Higgs au LHC ?



→ venez nombreux assister à la présentation de **Bruno Mansoulié** jeudi prochain !



Si le **boson de Higgs** existe il sera découvert au LHC !



**De quoi sont faites la matière noire et l'énergie sombre ?** Tout ce que nous voyons et appelons « matière » ne représente que 4 % de l'Univers. Le reste est constitué de matière noire (26 %) et d'énergie sombre (70 %), des substances invisibles qui n'émettent aucun rayonnement électromagnétique et ne peuvent donc être détectées, sinon par leurs effets gravitationnels qui font tourner les galaxies plus vite et accélèrent l'expansion de l'Univers. La matière noire serait faite de nouvelles particules, dites supersymétriques, qui restent à détecter.

## Que sont la matière noire et l'énergie sombre ?

Le LHC peut-il apporter des éléments de réponse sur la nature de la matière noire ?

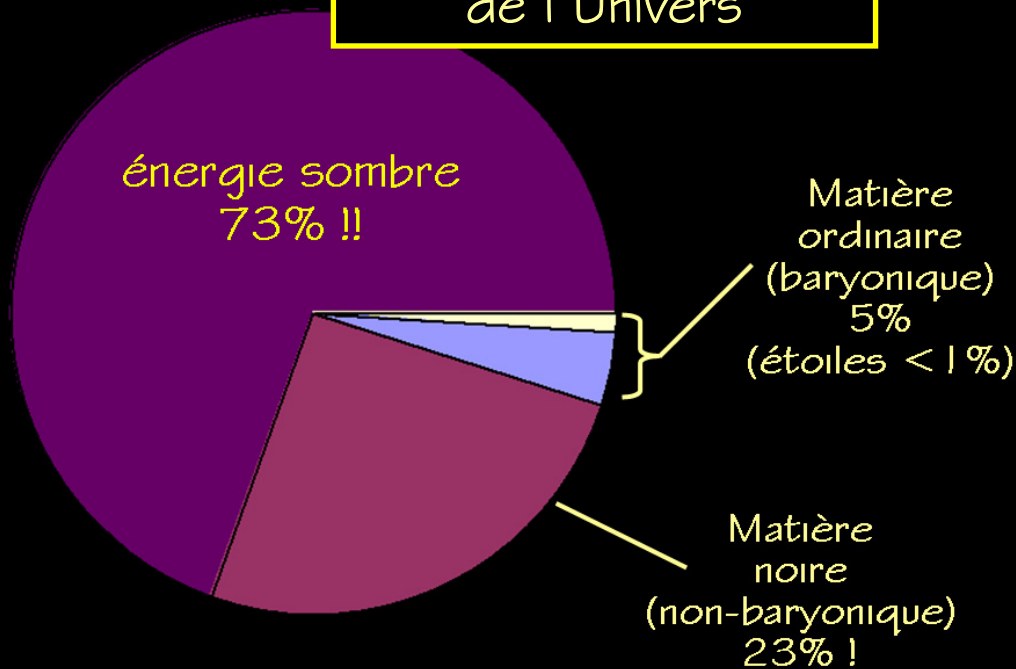


# La composition de l'Univers

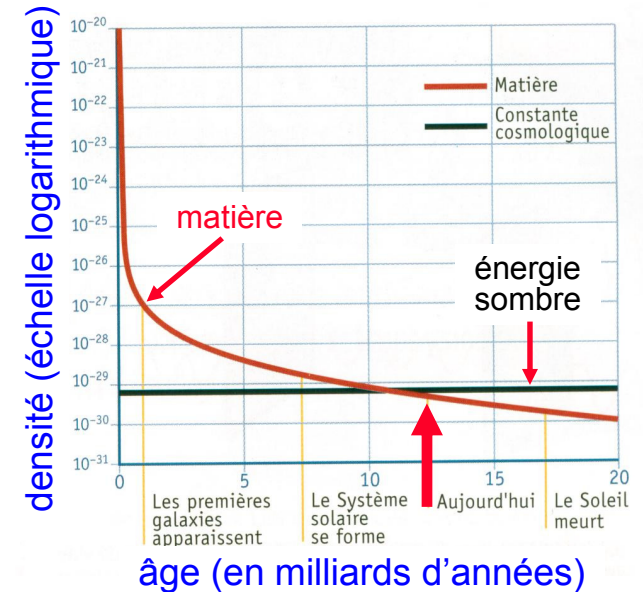
A partir des données concordantes

- des super-novae de type 1A
- du rayonnement diffus cosmologique
- de la répartition des galaxies

contenu énergétique  
de l'Univers



## La coïncidence cosmique



nous vivons à un moment  
de l'histoire de l'Univers  
très particulier !

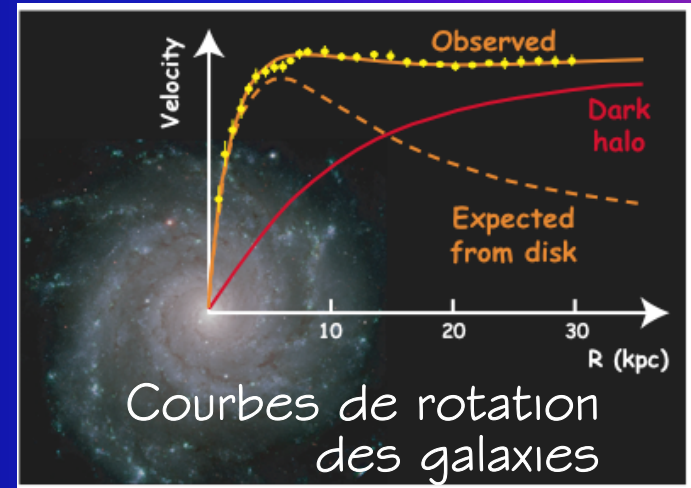
hasard ou nécessité ??

# La matière noire

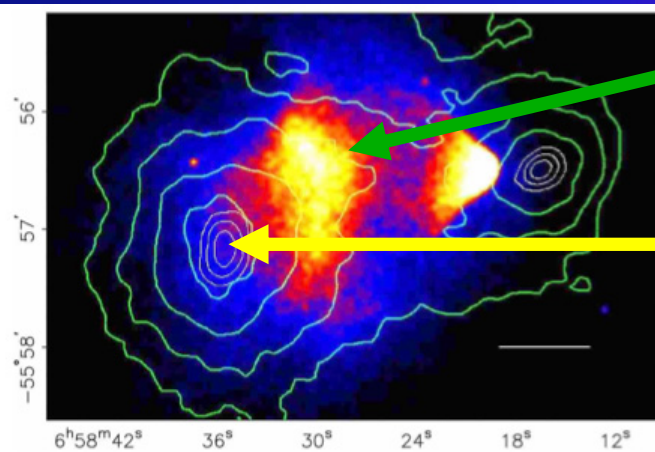
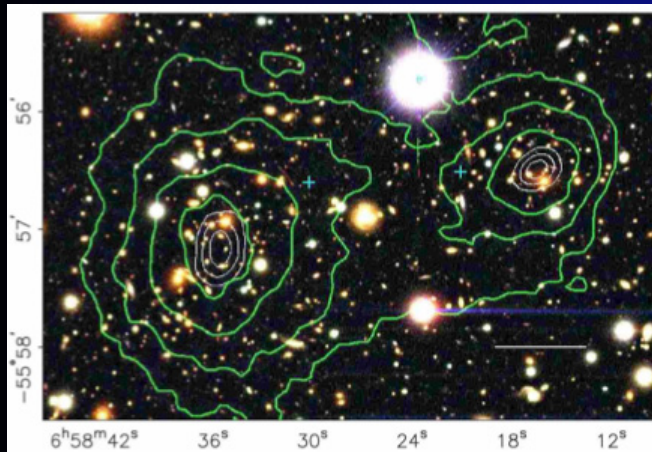
Zwicky



un problème connu  
depuis les années 30  
(étude des amas de galaxies)



« Juste » après une collision entre deux amas de galaxies



matière  
ordinaire (gaz)  
vue en rayons X

matière  
noire froide  
« vue » par  
ses effets  
gravitationnels

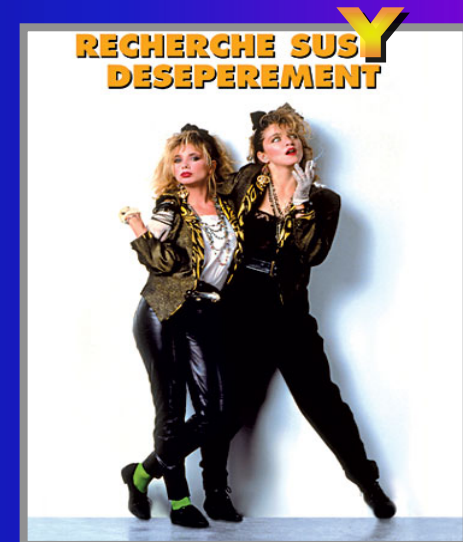
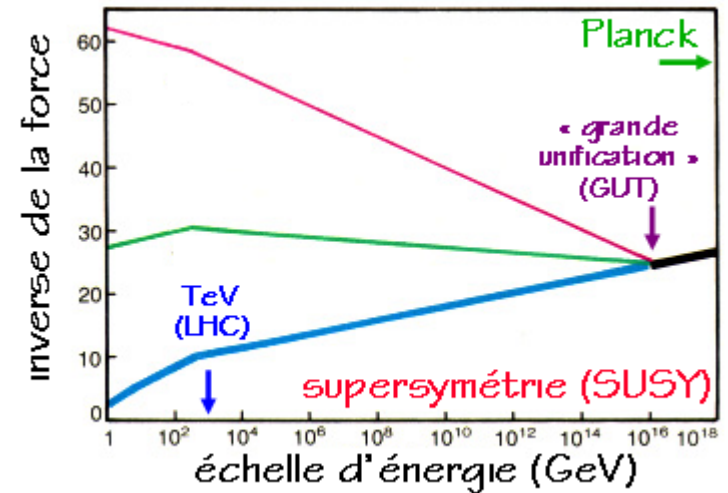
# La Super Symétrie (SUSY)

- ★ « neutralino » = candidat matière noire
- ★ Convergence des interactions à l'échelle de la Grande-unification
- ★ SUSY est un ingrédient de la théorie des supercordes

MAIS...

- ★ Toute particule du modèle standard a un partenaire « supersymétrique »
- ★ Où sont donc les particules supersymétriques ??

Si la Nature est supersymétrique  
SUSY devrait être découverte au LHC





**Où est passée l'antimatière ?** A chaque particule de matière correspond une particule d'antimatière de charge électrique opposée (par exemple l'électron et le positon). Particule et antiparticule s'annihilent lorsqu'elles se rencontrent, en se transformant en énergie. Or la théorie veut qu'au tout début de l'Univers, matière et antimatière aient été produites en quantités égales. Pourquoi alors ne se sont-elles pas mutuellement annihilées ? D'où vient que nous vivons dans un monde fait de matière ? Qu'est devenue l'antimatière ? D'infimes différences entre matière et antimatière, que recherchera le LHC, pourraient expliquer que la nature ait favorisé la première.

# Où est passée l'antimatière ?

Etude de l'asymétrie matière-antimatière au LHC

# Victoire de la matière

L'univers :

~ 0 antiproton

~  $10^9$  photons par proton

Voie lactée



Antimatière  
dans  
l'Univers

?

Atome d'hélium

La grande annihilation ( $t \sim 1$  microseconde)

quarks

1 000 000 001

antiquarks

1 000 000 000

1  
quark

(nous !)

Baryogénèse :

phénomène  
à l'origine de cet  
excès minuscule de  
matière



Sakharov

3 conditions nécessaires

lors de la baryogénèse

- **violation de CP**
- violation du nombre baryonique
- hors équilibre thermodynamique

1967

INFLATION

VICTOIRE  
DE LA MATIÈRE  
SUR L'ANTIMATIÈRE

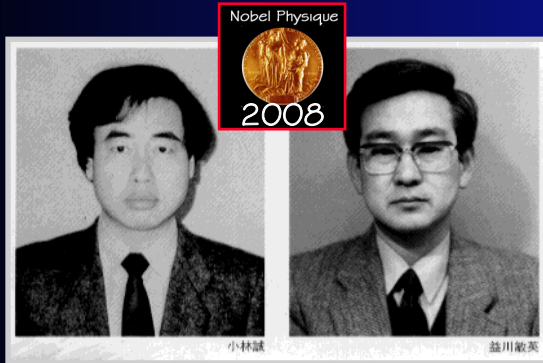
$10^{-43}$  seconde

$10^{-32}$  seconde

$10^{-6}$  seconde

# Violation de CP

un processus qui « viole CP » fournit  
une méthode absolue pour distinguer  
un monde de matière  
d'un monde d'anti-matière



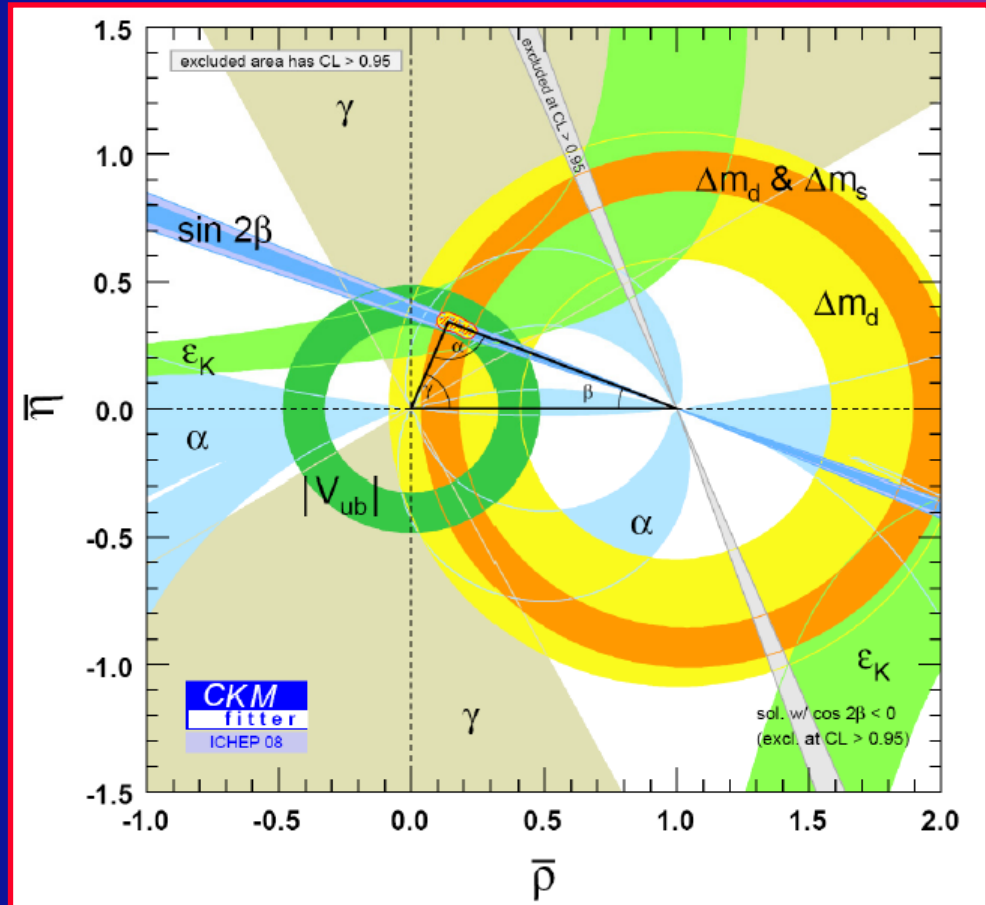
Kobayashi Maskawa

1972 : théorie KM

- prédiction d'une troisième famille de quarks
- tous les phénomènes de saveur et de violation de CP sont liés

l'expérience confirme  
la théorie de façon éclatante !

1964: découverte de la violation de CP  
dans la désintégration des mésons K





# LHCb : étude de la violation de CP

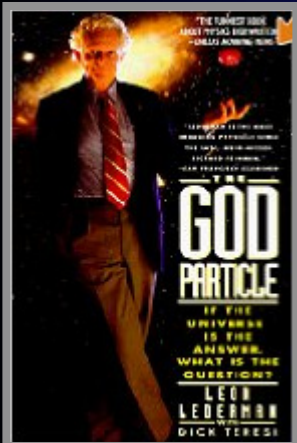


LHCb est une expérience LHC  
dédiée à une étude détaillée  
de la violation de CP  
qui pourrait révéler de la nouvelle physique (SUSY ?)  
par ses effets « virtuels »

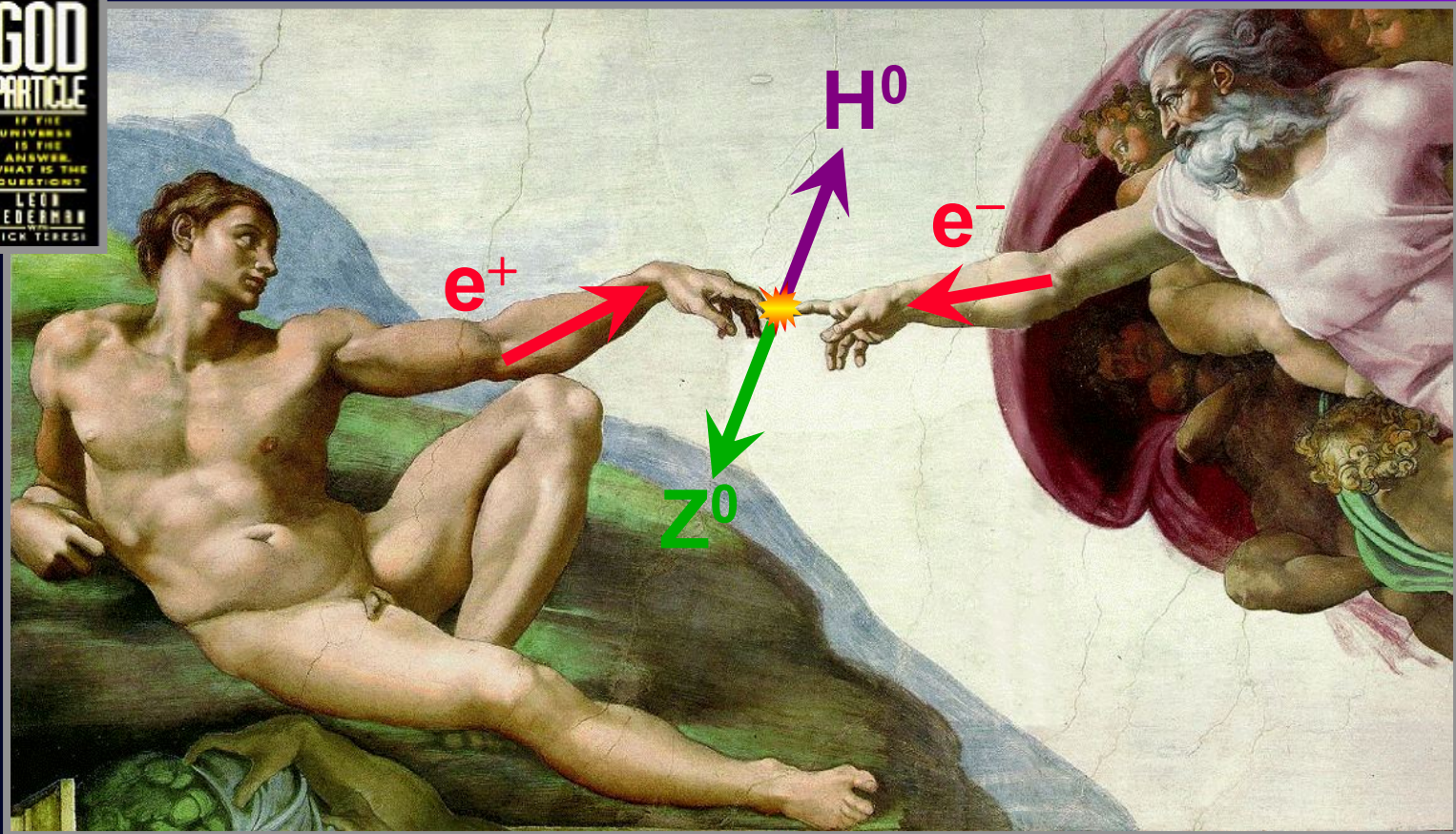
# En résumé : la science du LHC

- Le boson de **Higgs**
  - ✓ Brisure spontanée de la symétrie électrofaible
  - ✓ Mécanisme par lequel
    - les bosons W et Z sont devenus massifs
    - et les constituants de la matière aussi
  - ✓ Épreuve de vérité pour l'ensemble de la théorie
    - quelque chose doit survenir à l'échelle du TeV !
- Recherche de **nouvelle physique**  
au-delà du Modèle standard
  - ✓ Supersymétrie ?
    - → candidat matière noire ?
  - ✓ Dimensions supplémentaires ?
- Etude de l'asymétrie **matière – antimatière**
- Etude du plasma de **quarks et gluons**
  - ✓ Formation des protons et des neutrons

# La particule de Dieu ?



Lederman : « La particule de Dieu »  
« Si l'Univers est la réponse, quelle est la question ? »



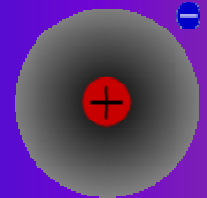
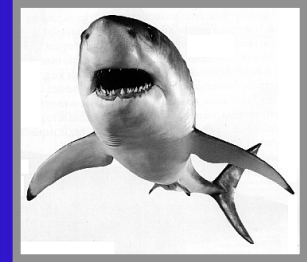
Lederman est un physicien sérieux ... Que veut-il dire vraiment ?



# Imaginer un Monde sans « Higgs »...

*plus précisément : sans brisure spontanée de la symétrie électrofaible*

- ★ Les quarks et les leptons seraient de masse nulle  
(jamais au repos !)
- ★ Les bosons W et Z auraient des masses très faibles  
la portée de l'interaction faible s'étendrait  
bien au-delà du noyau
- ★ La masse des nucléons serait à peu près la même, mais ...  
... le proton serait légèrement plus massif que le neutron  
et se désintégrerait rapidement !
- ★ Donc pas d'atome d'hydrogène !
- ★ Pas de chimie, pas de solides, de liquides, de molécules, etc.
- ★ Pas de vie ...  
... un Monde bien différent du notre !



comprendre le mécanisme  
de **brisure de la symétrie  
électrofaible**  
est **l'une des questions les  
plus profondes** de  
la science moderne