



Des particules au cosmos: les mystères des deux infinis

Michel Davier

Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire
IN2P3/CNRS et Université Paris-Sud



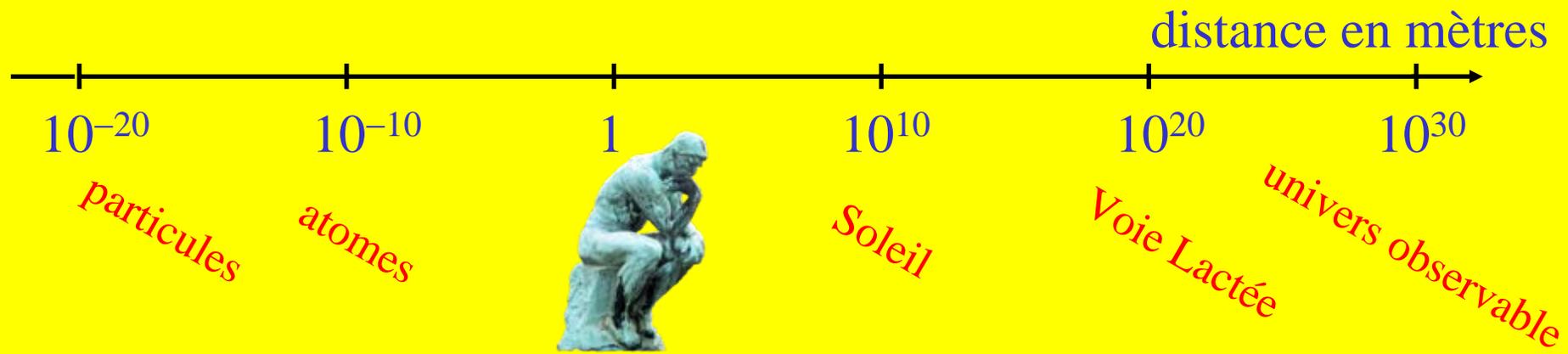
Voyage aux deux infinis

Deux mondes extrêmes dont l'Homme explore les frontières
avec des instruments de plus en plus puissants

astres visibles les plus lointains à 10^{25} m

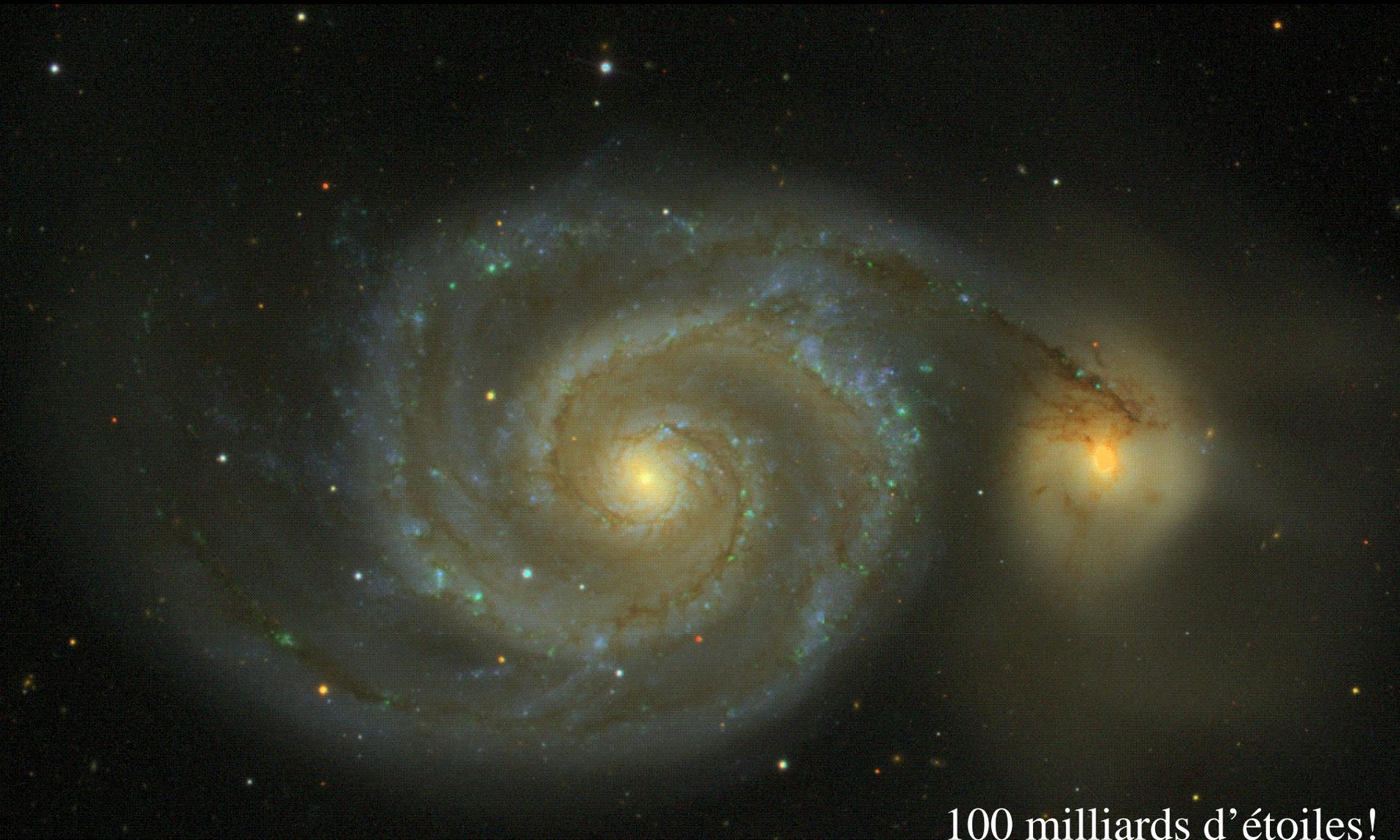
matière microscopique explorée jusqu'à 10^{-18} m

Notation: $10^3 = 10 \times 10 \times 10$ $10^{-3} = 1 : (10 \times 10 \times 10)$



Cet exposé: (1) l'exploration du cosmos
 (2) l'infiniment petit
 (3) liens puissants entre ces 2 domaines
⇒ compréhension de l'Univers dans son ensemble

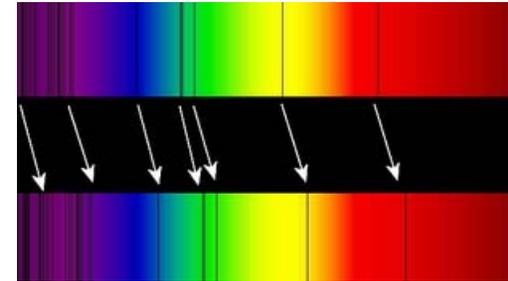
Une galaxie parmi 100 milliards...



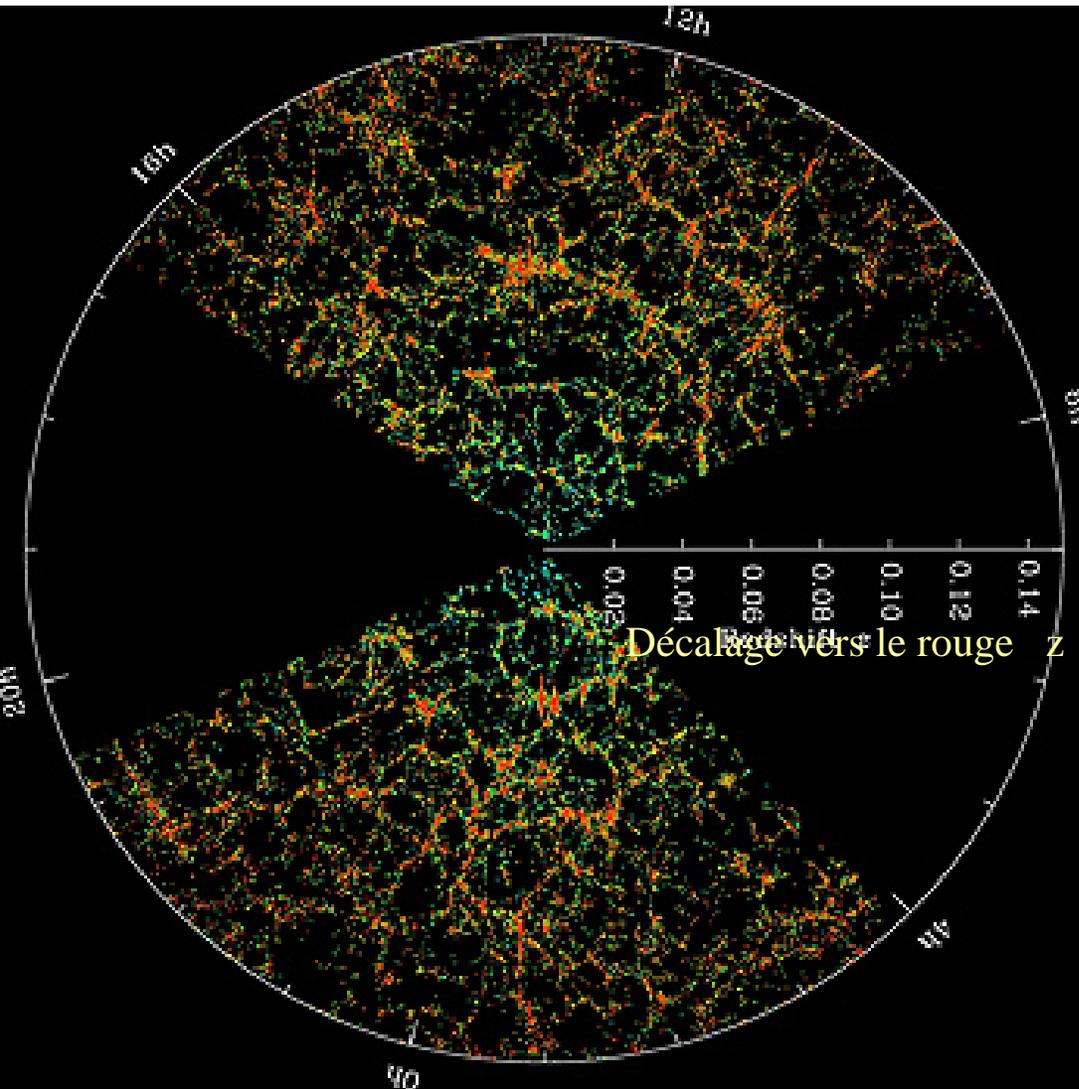
100 milliards d'étoiles!

Structure à grande échelle de l'Univers

Un outil fondamental:
le décalage vers le rouge
des raies spectrales



Naivement: effet Doppler
Les galaxies lointaines
s'éloignent de nous avec
une fraction z de la vitesse
de la lumière (300000 km/s)



En fait, c'est l'espace
lui-même qui s'étire

Le modèle cosmologique standard

Cosmologie: étude de l'Univers considéré dans son ensemble

Les trois piliers du modèle cosmologique standard (BIG BANG):

- fuite des galaxies lointaines
- abondance primordiale des éléments légers
- rayonnement de fond

Le modèle cosmologique standard

Cosmologie: étude de l'Univers considéré dans son ensemble

Les trois piliers du modèle cosmologique standard (BIG BANG):

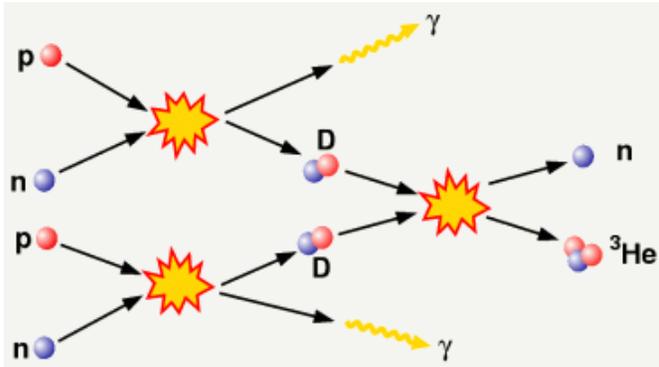
- fuite des galaxies lointaines
 - les galaxies lointaines s'éloignent de nous
 - plus elles sont loin, plus elles s'éloignent vite
 - l'espace est en **expansion**
- abondance primordiale des éléments légers
- rayonnement de fond

Le modèle cosmologique standard

Cosmologie: étude de l'Univers considéré dans son ensemble

Les trois piliers du modèle cosmologique standard (BIG BANG):

- fuite des galaxies lointaines
- abondance primordiale des éléments légers



- noyaux légers (d, He, Be, Li)
- présents dans les astres les plus anciens
- fusion thermonucléaire
- phase **dense et chaude**
- conditions réunies 3 minutes après le Big Bang et valables pendant 17 minutes!

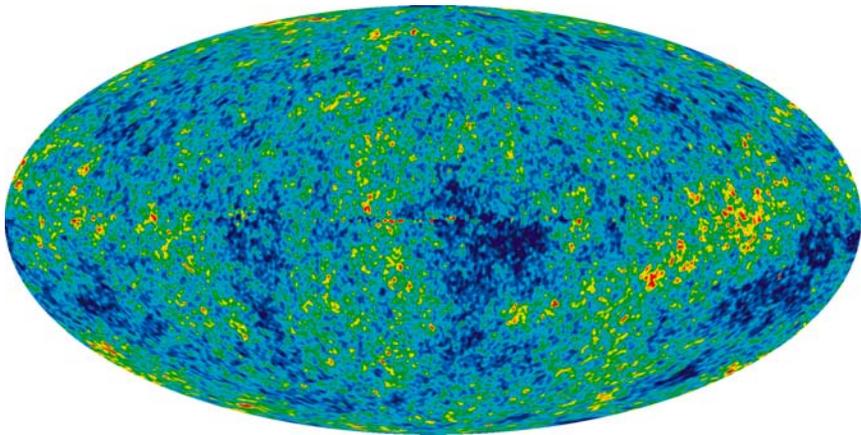
- rayonnement de fond

Le modèle cosmologique standard

Cosmologie: étude de l'Univers considéré dans son ensemble

Les trois piliers du modèle cosmologique standard (BIG BANG):

- fuite des galaxies lointaines
- abondance primordiale des éléments légers
- rayonnement de fond



- photons piégés dans le plasma de particules chargées (p, e, noyaux)
- formation d'atomes stables (neutres)
⇒ les photons s'échappent
- la plus vieille lumière du cosmos (micro-ondes), émise 380 000 ans après le Big Bang

Le modèle cosmologique standard

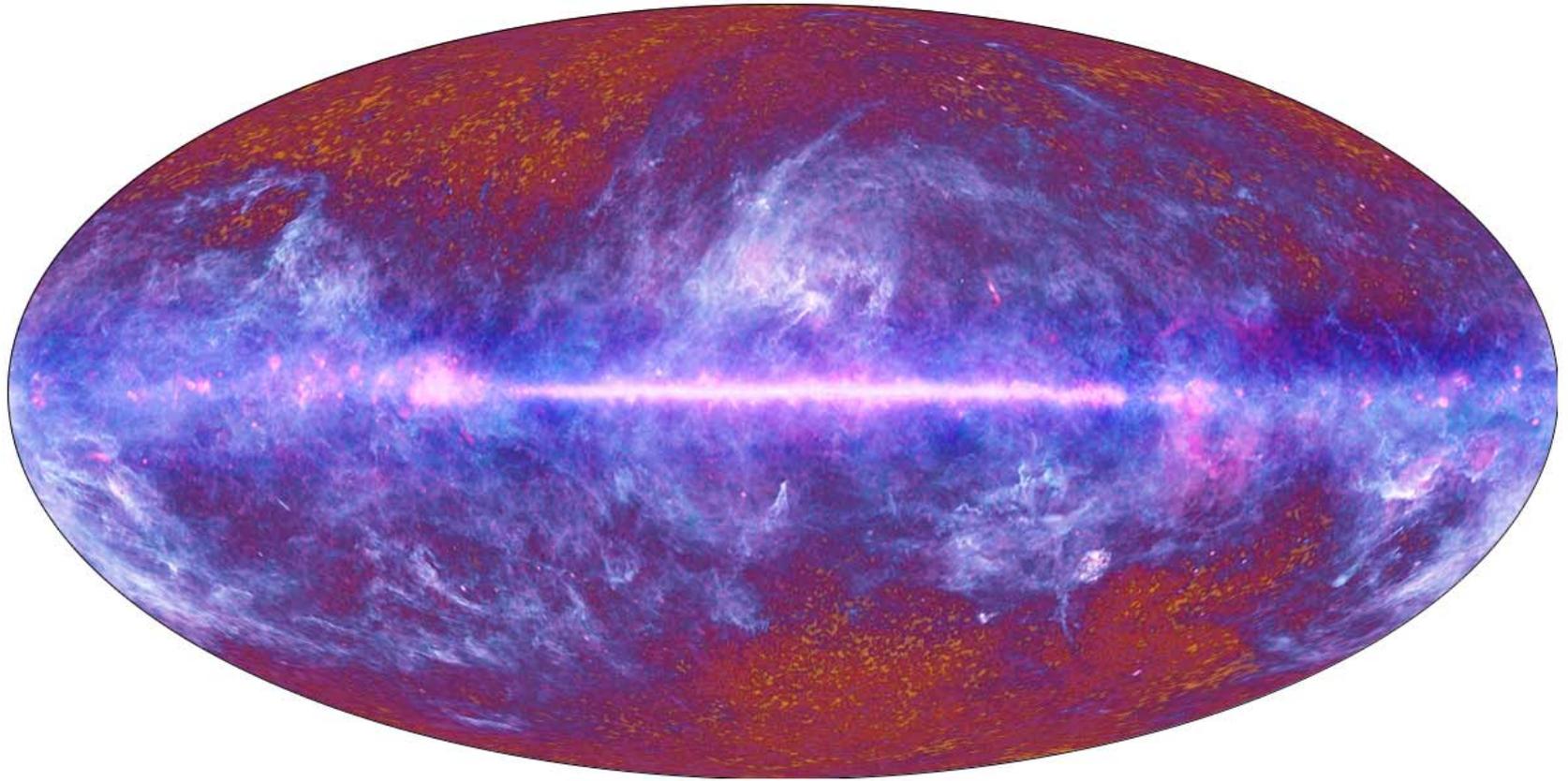
Cosmologie: étude de l'Univers considéré dans son ensemble

Les trois piliers du modèle cosmologique standard (BIG BANG):

- récession des galaxies lointaines
- abondance primordiale des éléments légers
- rayonnement de fond

⇒ “explosion” initiale qui a engendré l'espace-temps
⇒ la phase primordiale très dense et très chaude a donné naissance aux particules (énergie → matière)
⇒ l'univers en expansion progressivement refroidi

Dernières nouvelles du cosmos



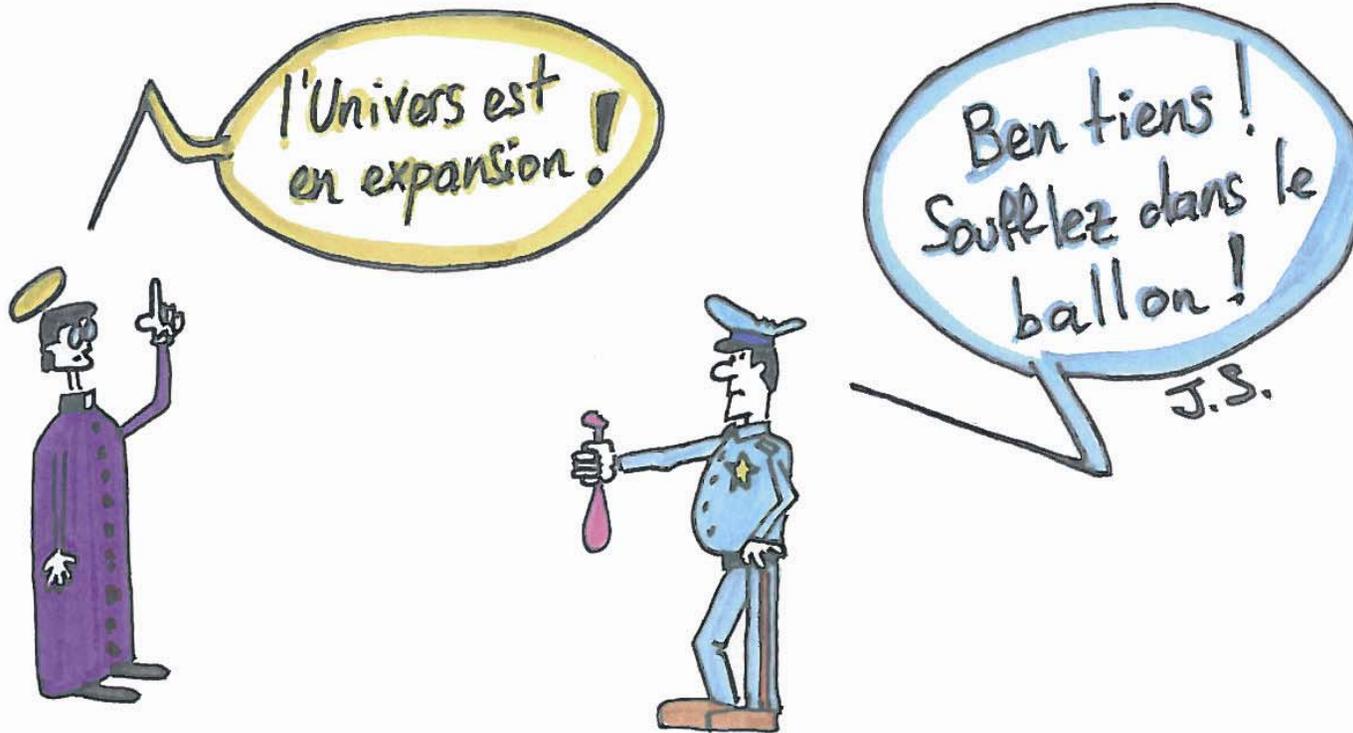
The Planck one-year all-sky survey



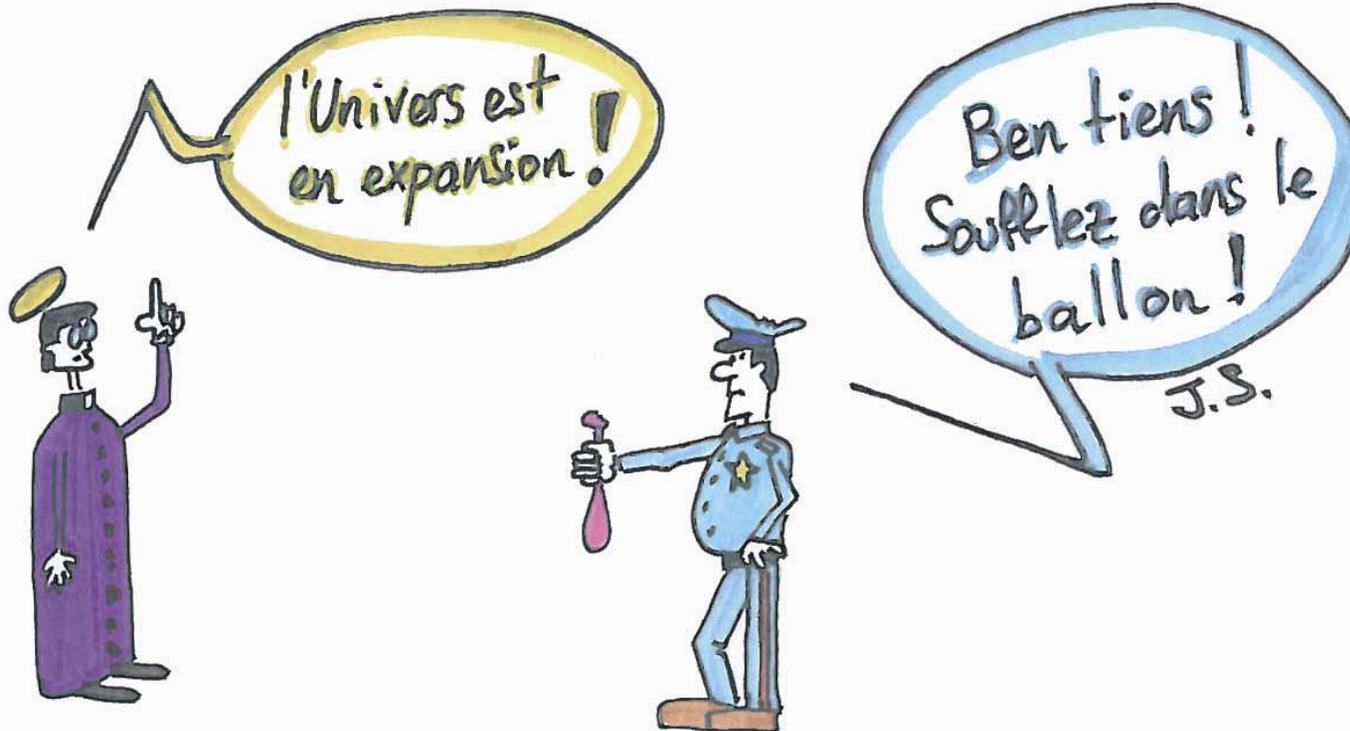
(c) ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

Carte complète du ciel de fond diffus établie par le satellite Planck
un an après son lancement

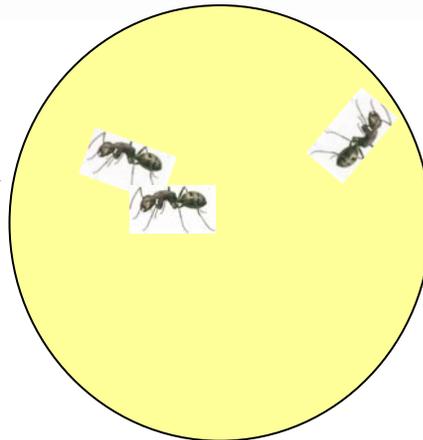
L'expansion de l'Univers



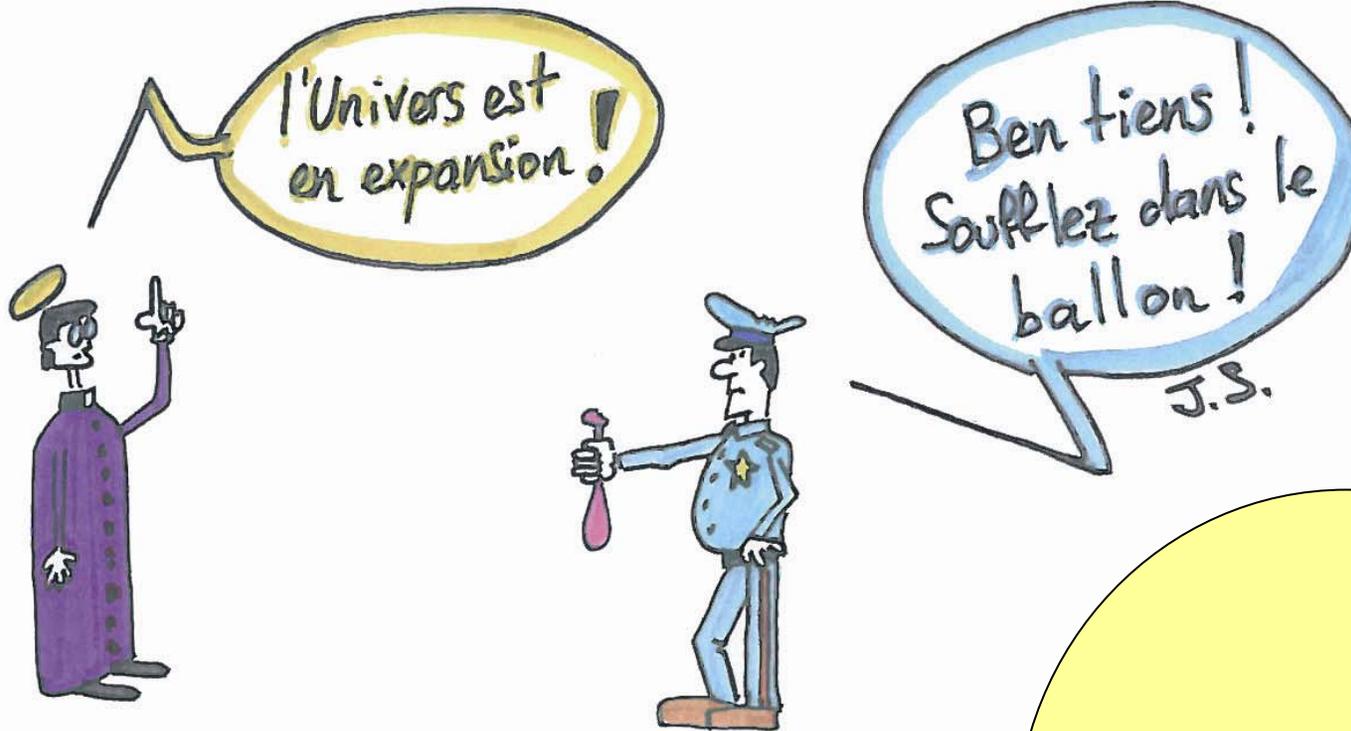
L'expansion de l'Univers



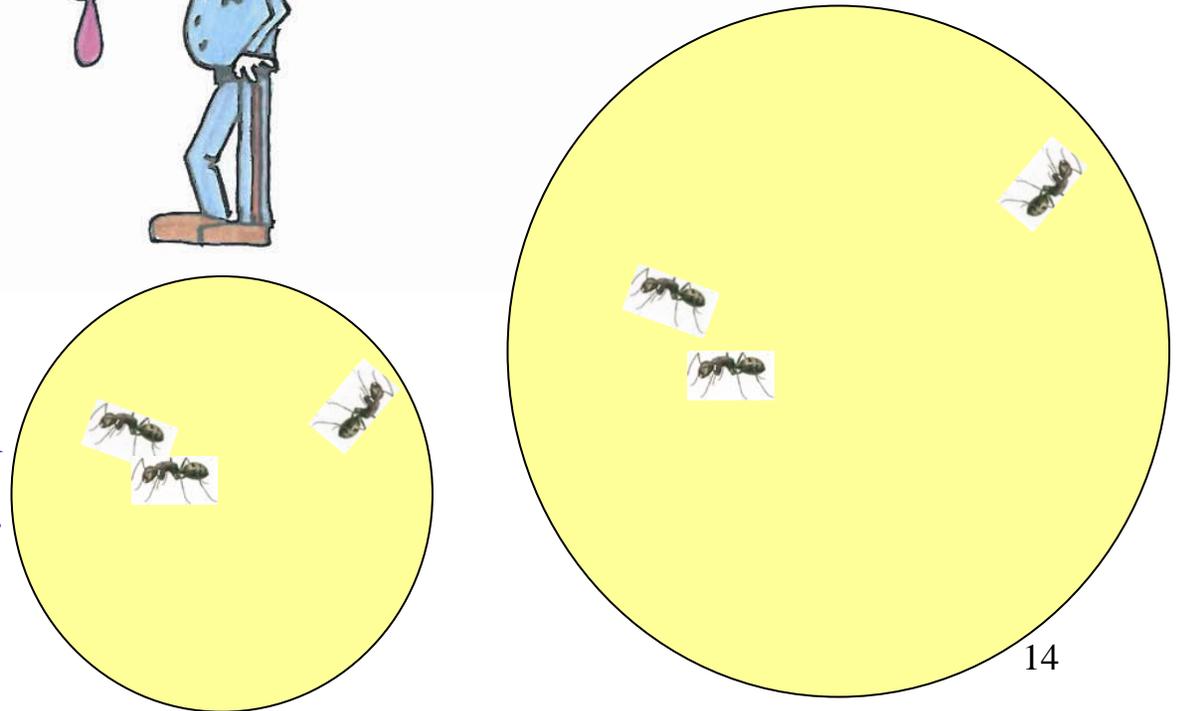
La surface d'un ballon
est un univers à 2 dim.
pour une fourmi



L'expansion de l'Univers



La surface d'un ballon est un univers à 2 dim. pour une fourmi



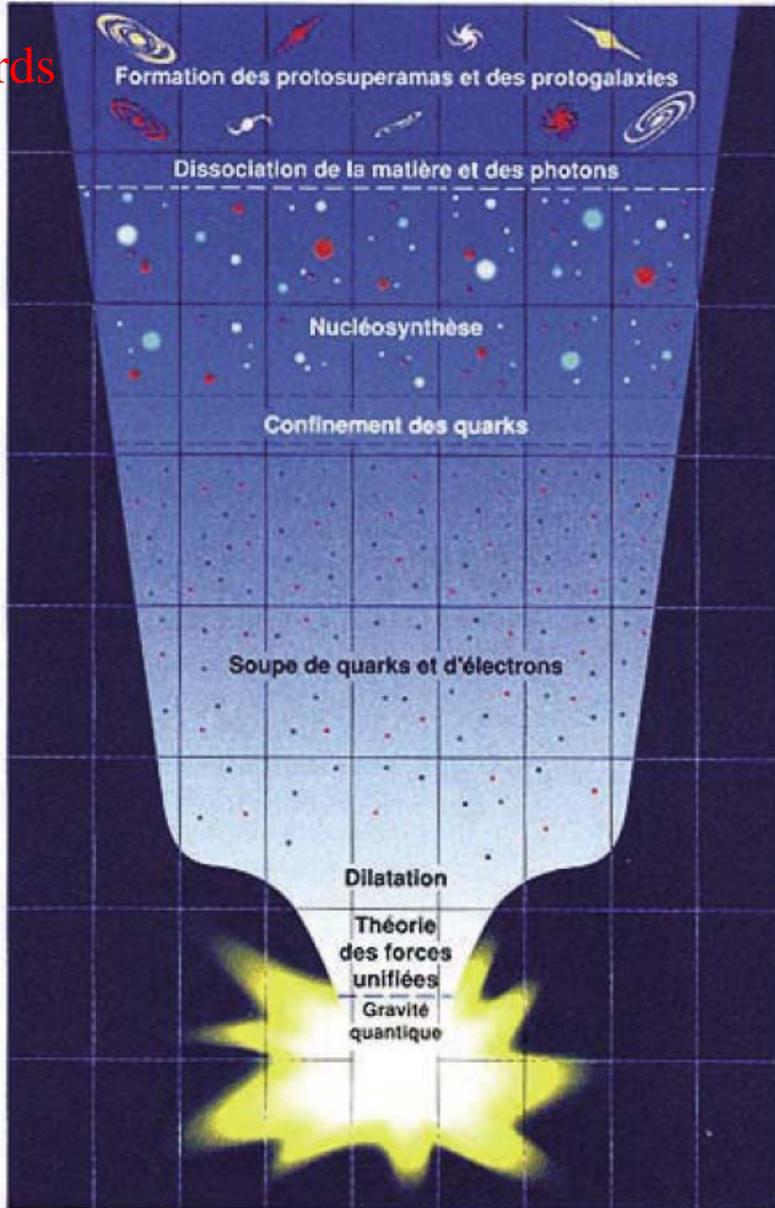
Le film du cosmos

4×10^{17} s
(13.7 milliards d'années)

3 mn

10^{-43} s

durée (s)



rayon de l'Univers (cm) 10^{-40} 1 10^{40}

Gravitation \Rightarrow structures:
galaxies, étoiles, planètes
Photons libérés (fond diffus)

les premiers atomes

Nucléosynthèse:

les premiers noyaux

Expansion "lente":

soupe de particules

Expansion rapide: inflation

Big bang (?)

Ph. nucléaire

Physique des particules

Astrophysique

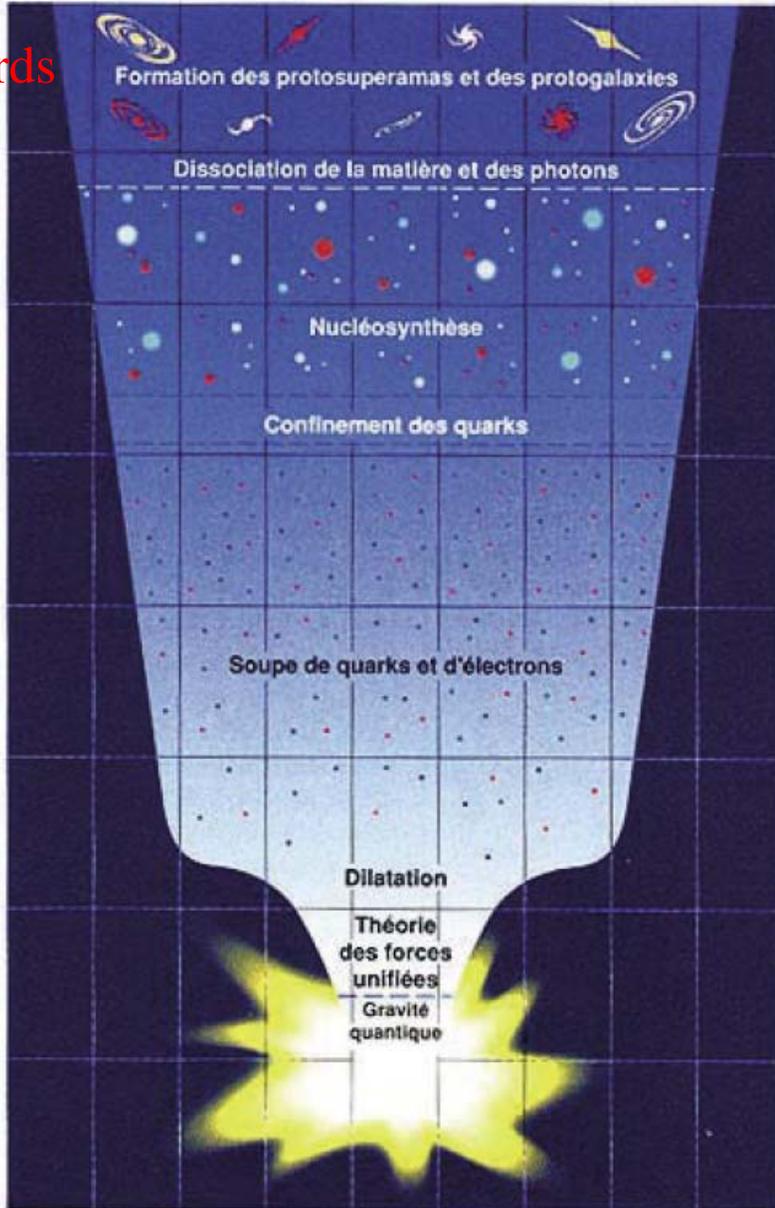
Le film du cosmos

4×10^{17} s
(13.7 milliards d'années)

3 mn

10^{-43} s

durée (s)



rayon de l'Univers (cm) 10^{-40} 1 10^{40}

Gravitation \Rightarrow structures:
galaxies, étoiles, planètes

Photons libérés (fond diffus)

les premiers atomes

Nucléosynthèse:

les premiers noyaux

Expansion "lente":

soupe de particules

Expansion rapide: inflation

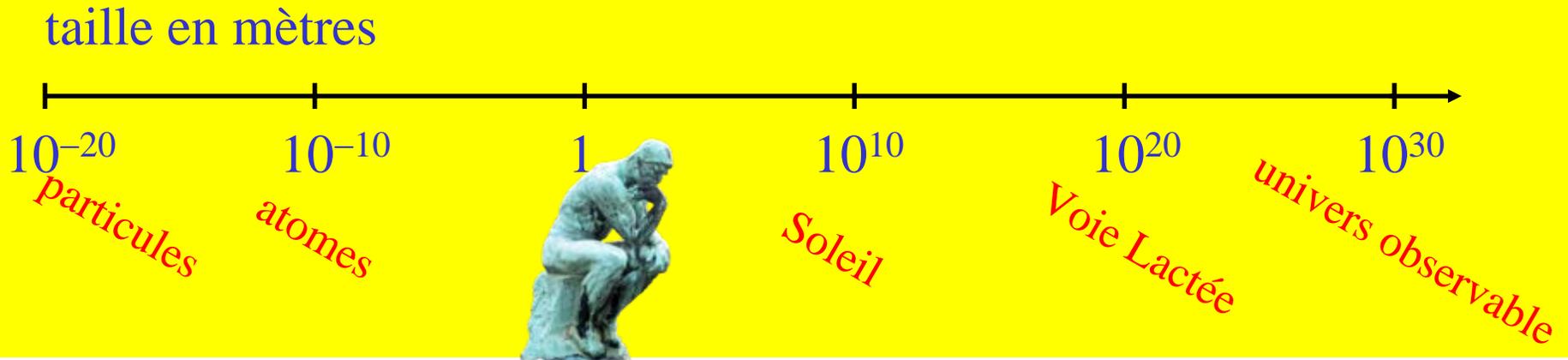
Big bang (?)

Astrophysique

Ph. nucléaire

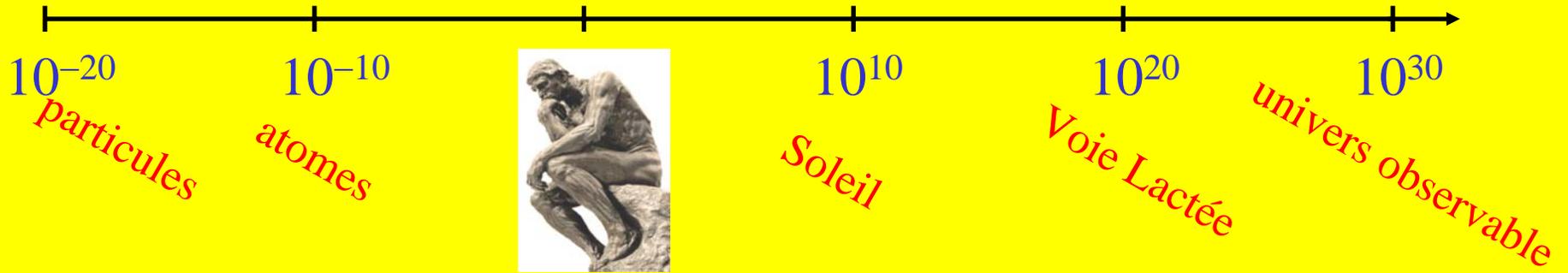
Physique des particules

Vers l'infiniment petit: la structure de la matière



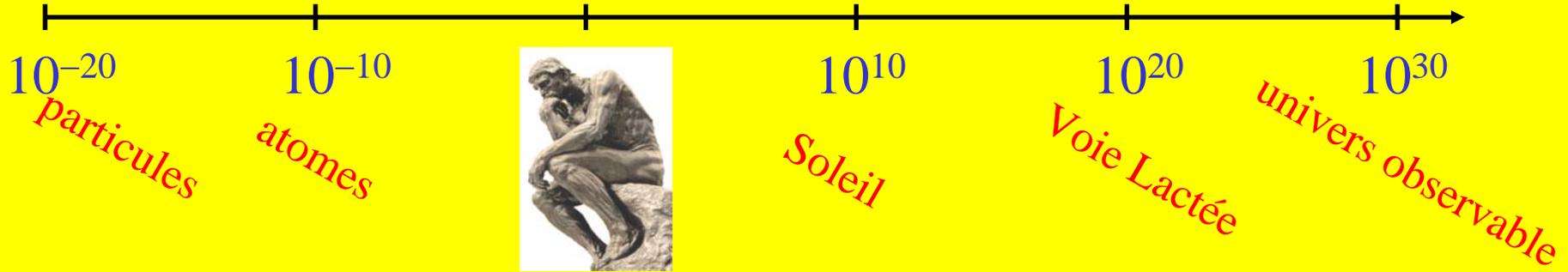
Vers l'infiniment petit: la structure de la matière

taille en mètres



Vers l'infiniment petit: la structure de la matière

taille en mètres



Avancées des
connaissances



- atomes 10⁻¹⁰ m fin 19ème siècle
- noyaux 10⁻¹⁴ m ~1910
- proton, neutron 10⁻¹⁵ m ~1930
- quarks, leptons < 10⁻¹⁸ m ~1970

La physique des particules étudie les constituants les plus fondamentaux de la matière:

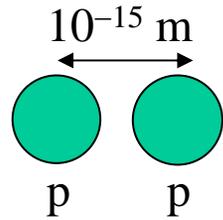
les **quarks** et les **leptons** sont les particules les plus élémentaires

Les quatre interactions fondamentales

Un autre aspect de la physique des particules est l'étude des **forces fondamentales** (ou comment les particules interagissent entre elles)

Il existe des **PARTICULES ASSOCIÉES** aux interactions fondamentales permettant leur propagation.

Gravitation Attraction universelle, planètes, galaxies. GRAVITON?
Interaction faible Désintégrations radioactives. Z^0, W^+, W^-
Interaction électromagnétique Électricité, magnétisme, cohésion de l'atome et du cristal, chimie. PHOTON
Interaction forte Cohésion des protons et des noyaux. GLUON



10^{-40}

← négligeable au niveau microscopique

10^{-8}

10^{-2}

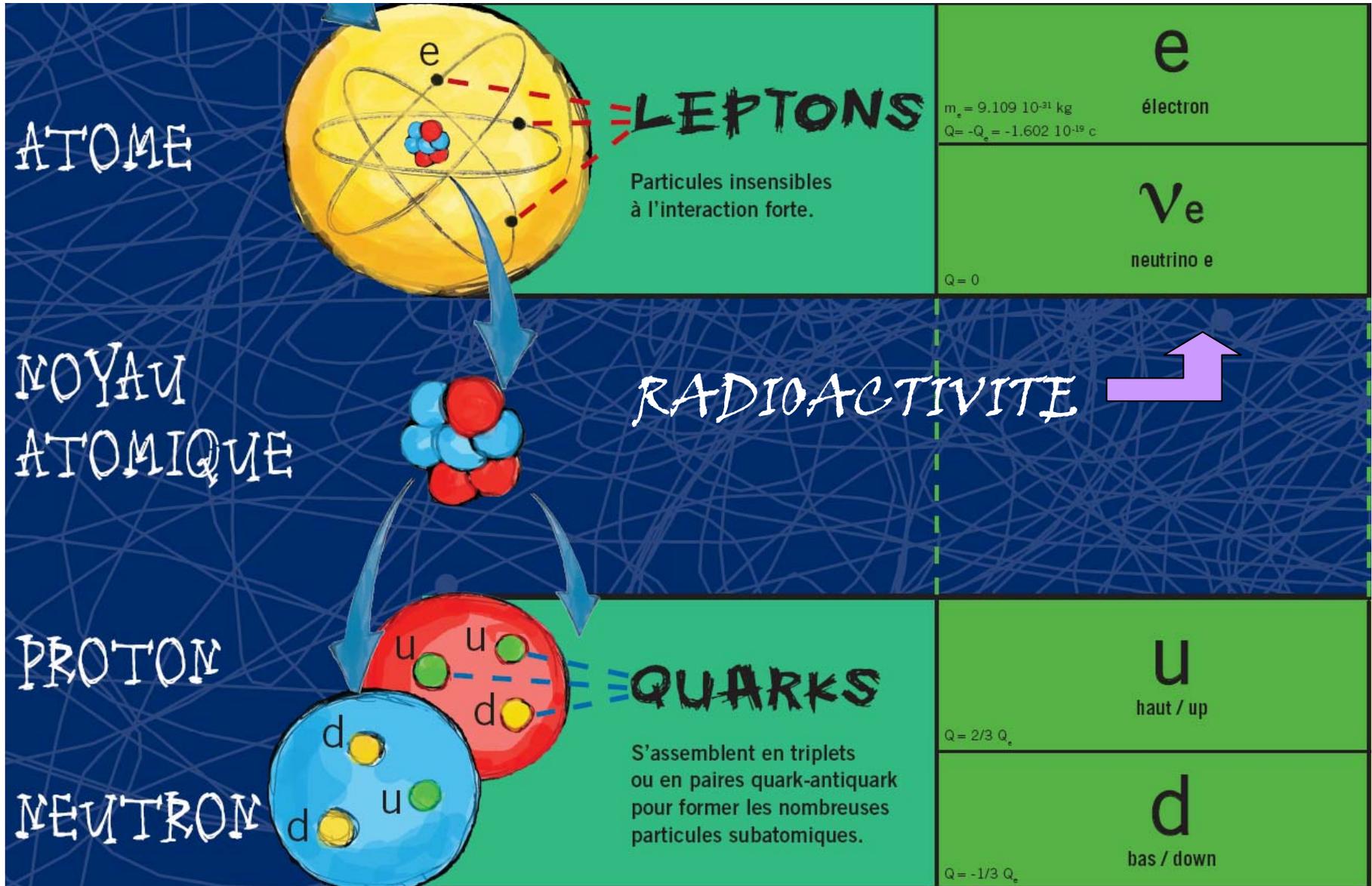
1

intensité relative

description quantique:
particule ↔ onde ↔ champ

interaction: échange de particules
(bosons associés aux champs)
photon ↔ champ électromagnétique

Les constituants fondamentaux: leptons et quarks



Trois familles de leptons et de quarks

1 ^{re} famille	2 ^e famille	3 ^e famille
<p>Les membres de la 1^{re} famille composent l'ensemble de la matière ordinaire (protons, neutrons, atomes...).</p>	<p>Réplique plus massive et instable de la 1^{re} famille. Le muon est ainsi 200 fois plus lourd que l'électron.</p>	<p>Réplique encore plus massive et instable de la 1^{re} famille. Le lepton τ est ainsi 3600 fois plus lourd que l'électron.</p>
<p>e électron $m_e = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ $Q = -Q_e = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$</p>	<p>μ muon $Q = -Q_e$</p>	<p>τ tau $Q = -Q_e$</p>
<p>ν_e neutrino e $Q = 0$</p>	<p>ν_μ neutrino muon $Q = 0$</p>	<p>ν_τ neutrino tau $Q = 0$</p>
<p>u haut / up $Q = 2/3 Q_e$</p>	<p>c charme / charm $Q = 2/3 Q_e$</p>	<p>t top $Q = 2/3 Q_e$</p>
<p>d bas / down $Q = -1/3 Q_e$</p>	<p>s étrange/strange $Q = -1/3 Q_e$</p>	<p>b beau/beauty/bottom $Q = -1/3 Q_e$</p>

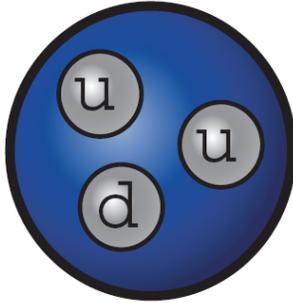
Particules et antiparticules

- à chaque particule est associée une anti-particule
- de même masse
- de charge électrique opposée
- électron e^- et positon e^+
- quarks et anti-quarks

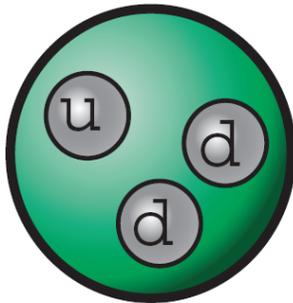
Les assemblages de quarks: hadrons

baryons: 3 quarks

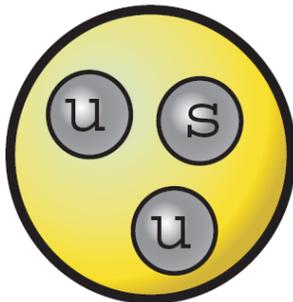
proton (+1)
p



neutron (0)
n



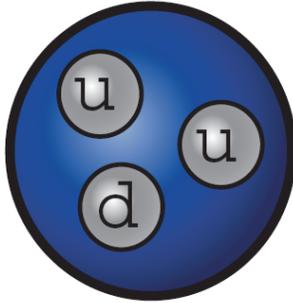
sigma (+1)
 Σ^+



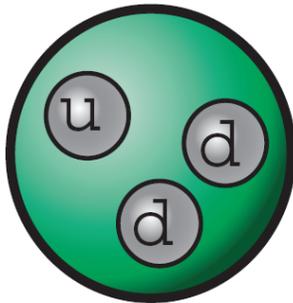
Les assemblages de quarks: hadrons

baryons: 3 quarks

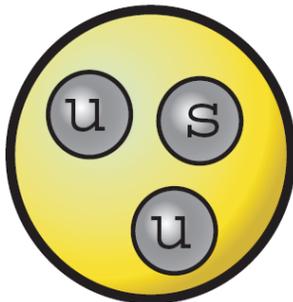
proton (+1)
p



neutron (0)
n



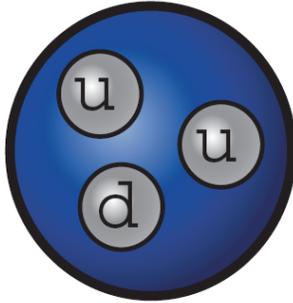
sigma (+1)
 Σ^+



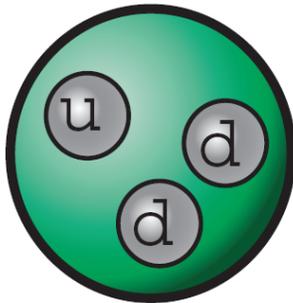
Les assemblages de quarks: hadrons

baryons: 3 quarks

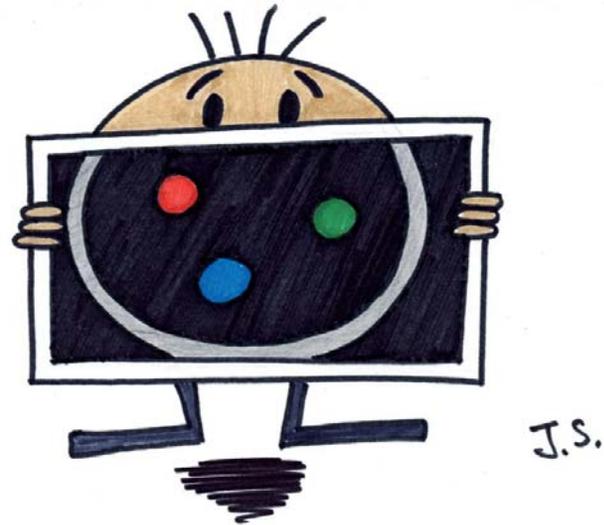
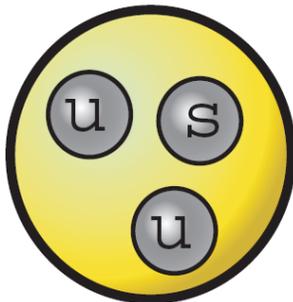
proton (+1)
p



neutron (0)
n



sigma (+1)
 Σ^+

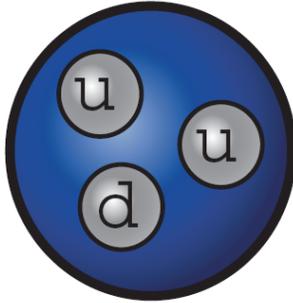


Les assemblages de quarks: hadrons

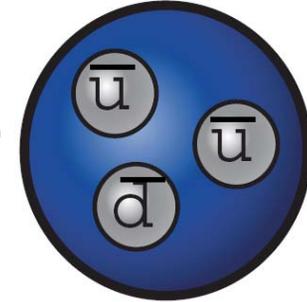
baryons: 3 quarks

anti-baryons: 3 anti-quarks

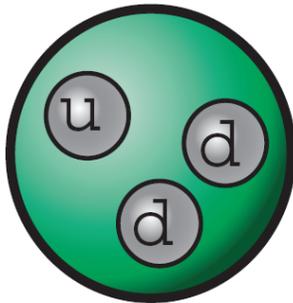
proton (+1)
 p



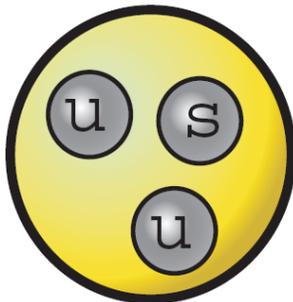
anti-proton (-1)
 \bar{p}



neutron (0)
 n

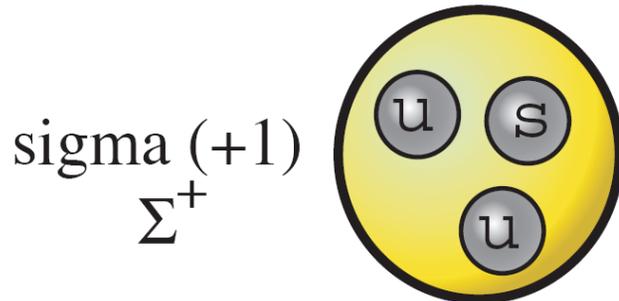
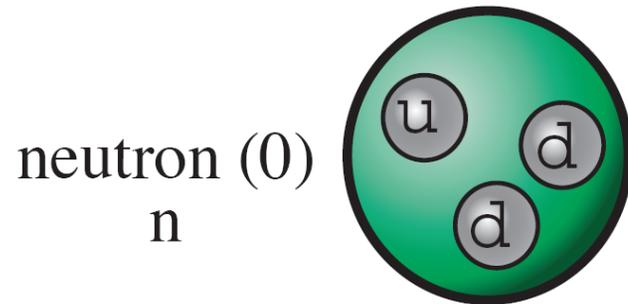
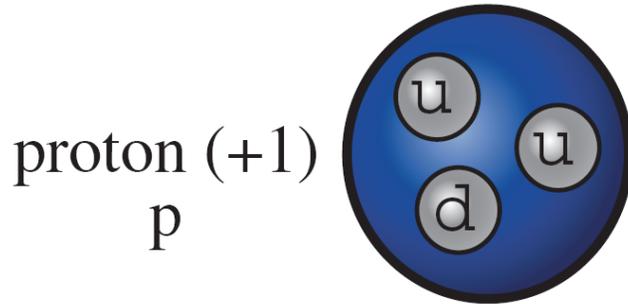


sigma (+1)
 Σ^+

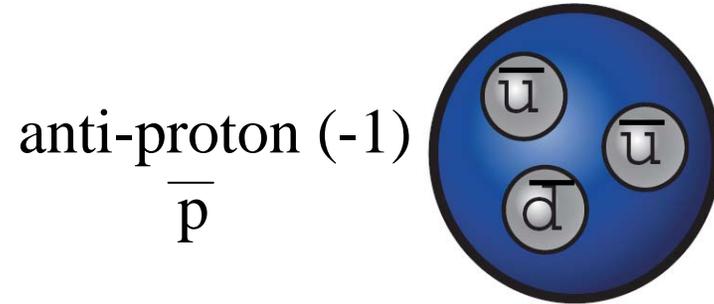


Les assemblages de quarks: hadrons

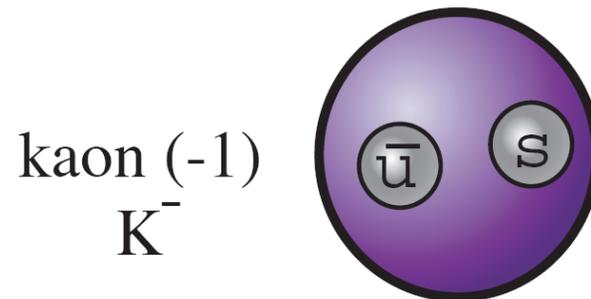
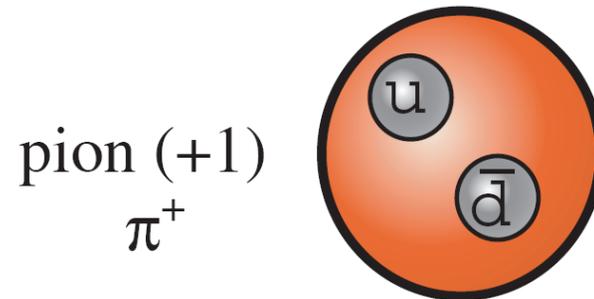
baryons: 3 quarks



anti-baryons: 3 anti-quarks



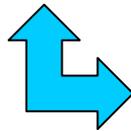
mésons: quark et anti-quark



Le Modèle Standard: un succès considérable

INTERACTIONS

électromagnétique }
faible } $SU(2) \times U(1)$
forte } $SU(3)$



THÉORIES DE JAUGE

mécanique quantique + relativité
+ principe de jauge
(mettant en jeu des opérations
par rapport à une **symétrie**)

⇒ origine “géométrique” des interactions

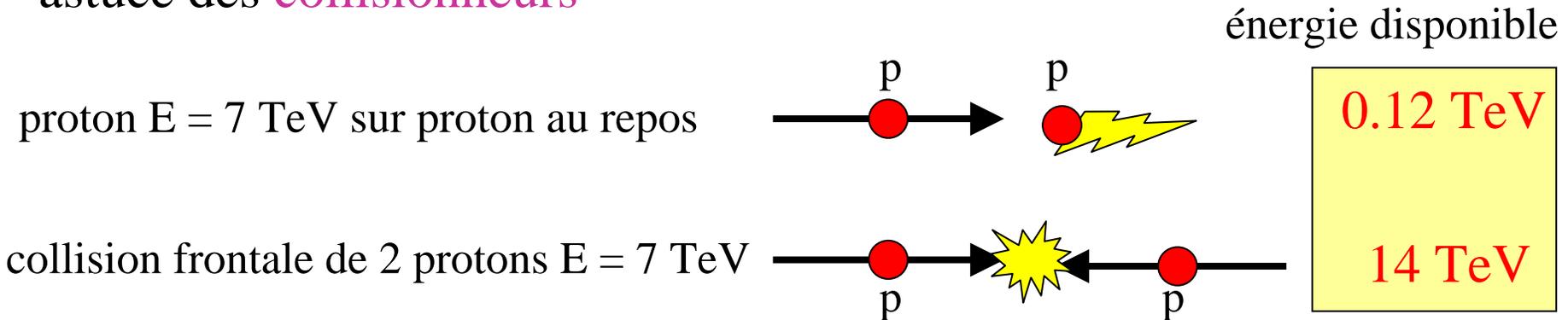
- tests expérimentaux de haute précision en accord avec le MS
- succès le plus spectaculaire: prédiction (mesures + MS) sur la masse du quark t (top), découvert après au Fermilab à la même masse
- un seul élément (crucial) n'a pas encore été vérifié: l'existence du boson de Higgs, signature du mécanisme de génération de la masse

Les accélérateurs de particules

- **pouvoir de résolution**
- **microscope optique**, limite = longueur d'onde de la lumière $\sim 0.5 \mu\text{m}$
- **microscope électronique**: électrons (particules-ondes)
longueur d'onde $\lambda \downarrow$ quand énergie $E \uparrow$
 \Rightarrow résolution 10^{-10} m (atomes) avec $E \sim 500$ keV
- **accélérateurs de très haute énergie** pour explorer les particules

$$1 \text{ Tera eV} = 1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

- astuce des **collisionneurs**



\Rightarrow dans la collision frontale toute l'énergie est disponible

Le collisionneur de plus haute énergie: LHC (Large Hadron Collider)

le plus grand et le plus complexe instrument scientifique au monde

collisionneur proton-proton

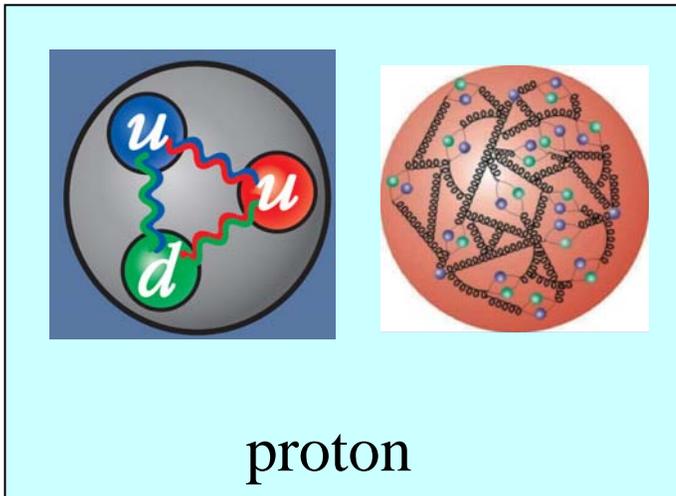
énergie 7 + 7 TeV (3.5 pour l'instant)

tunnel 27 km circonférence

100 m sous terre (LEP collisionneur $e^+ e^-$ 1989-2000)

la plus haute énergie explorée

⇒ potentiel de découverte élevé

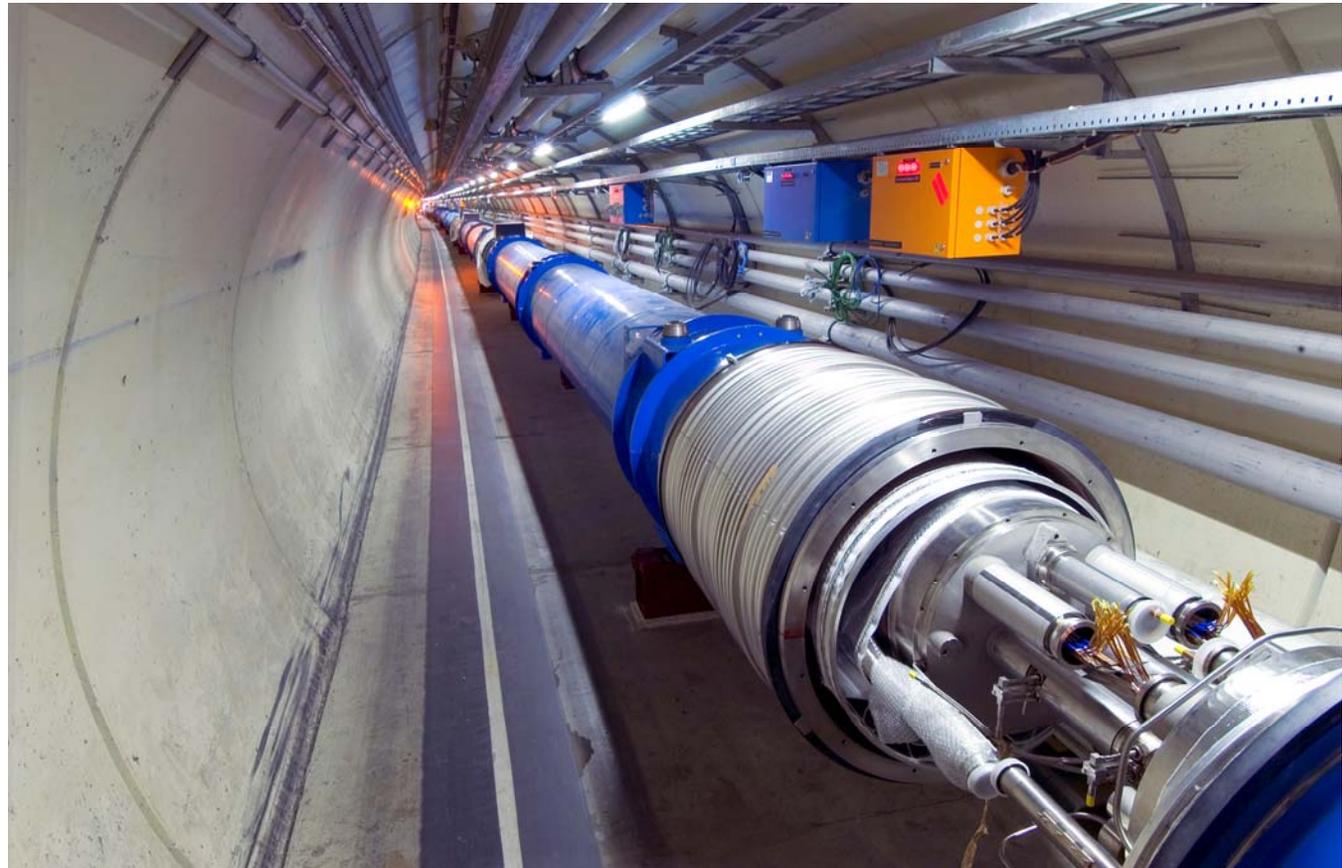
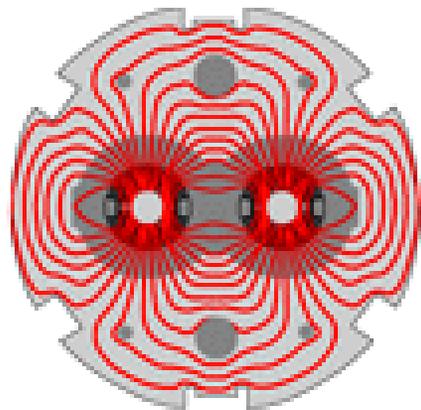
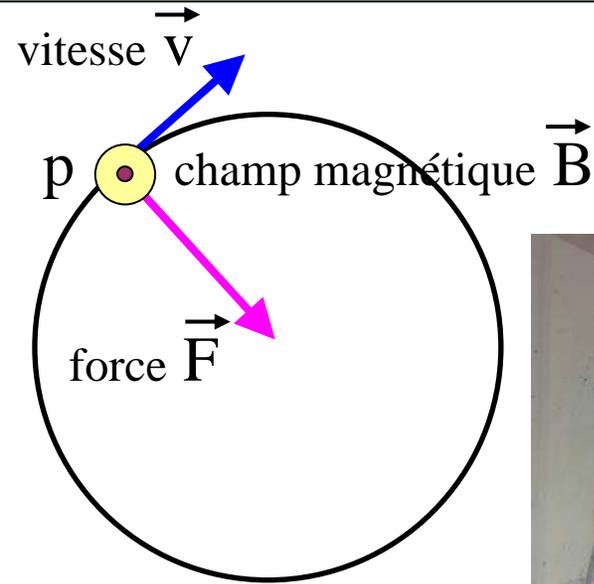


LHC = collisionneur quark-antiquark
gluon-gluon

Les aimants du LHC: un formidable défi technologique

accélérateur circulaire

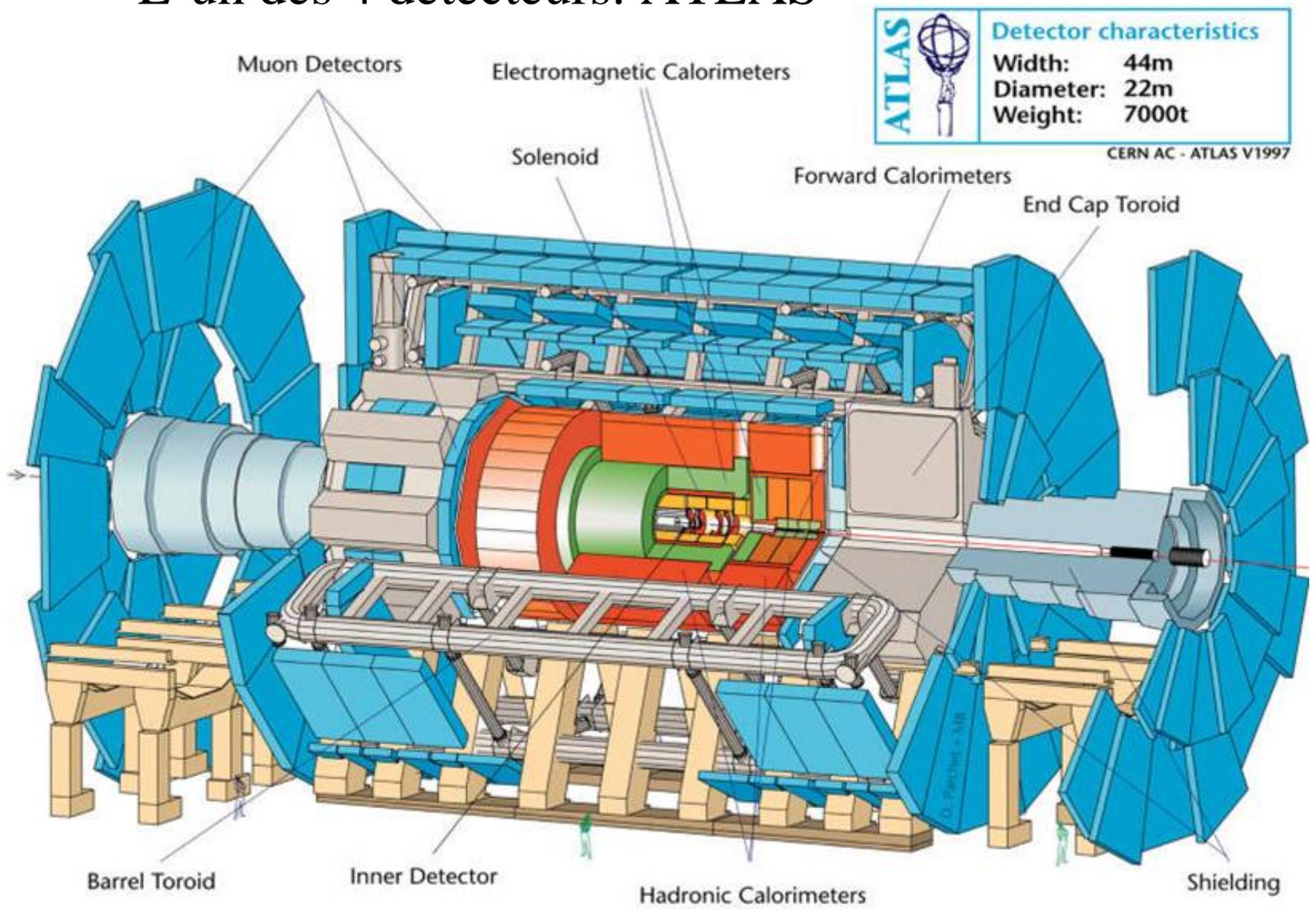
plus d'un millier d'aimants de courbure à 8.3 Tesla
2 canaux avec des champs magnétiques opposés
supraconductivité (hélium superfluide à -271°C)



Les faisceaux de protons et leurs collisions

- maximiser le nombre de collisions proton-proton
 - dans chaque faisceau: environ 3000 paquets
 - dans chaque paquet: 100 milliards de protons
- } ↑↑ "luminosité"
- énergie de chaque faisceau **300 MJ** (une rame TGV à 200 km/h!)
 - **1 milliard d'événements / s produits dans les détecteurs**
 - défis pour les détecteurs: résistance au rayonnement
énorme flux de données
ne garder que les événements d'intérêt

L'un des 4 détecteurs: ATLAS



Le complexe d'accélérateurs du CERN

CERN : Fabrique de ronds
(maison fondée en 1957)

CATALOGUE



CE QUI SE FAIT
DE MIEUX DEPUIS
L'INVENTION DE
LA ROUE !!

J.S.

*disponible seulement
à partir de l'été 2008

Le complexe d'accélérateurs du CERN

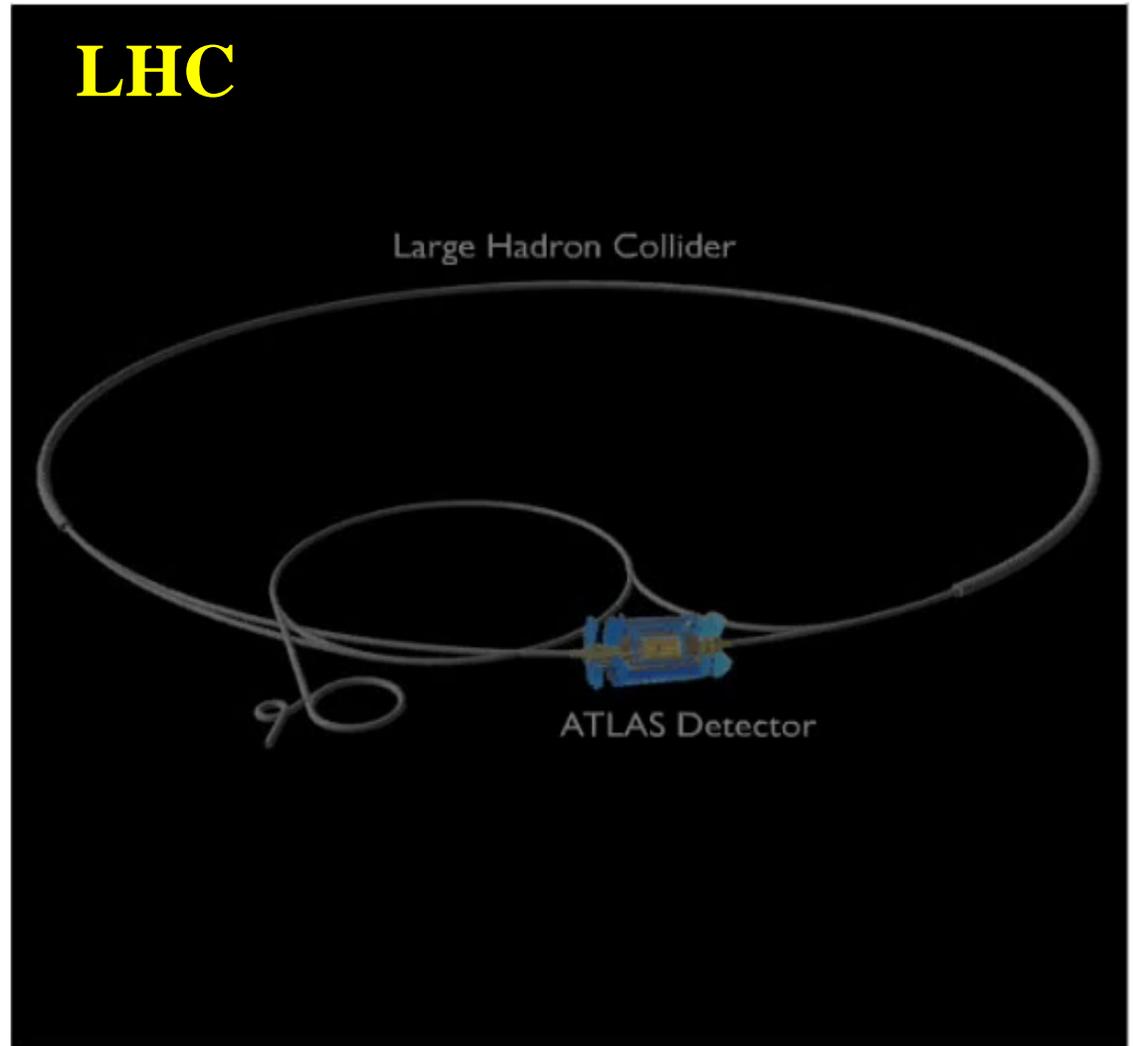
Linac
injection 0 → 50 MeV

Booster
→ 0.4 GeV

PS
→ 28 GeV

SPS
→ 300 GeV

LHC
→ 7 TeV



Les grandes questions ouvertes

Beaucoup de questions difficiles hantent les nuits des physiciens....

- certaines dans **le cadre du Modèle Standard**

Le boson de Higgs existe-t-il ? Quelle est l'origine de la masse ?

- presque toutes nécessitent des **extensions de la théorie**

Une grande unification des interactions est-elle possible ?

Quelle est la nature de la matière noire ?

Comment expliquer la mystérieuse énergie noire ?

Pourquoi trois familles de leptons et de quarks ?

Où est passée l'antimatière dans l'Univers ?

Que nous disent les neutrinos ?

- enfin, d'autres font appel à des **changements révolutionnaires**

L'espace a-t-il plus de trois dimensions ?

Que se passe-t-il à l'échelle d'énergie de Planck ?

Le LHC va fournir des réponses à certaines de ces questions cruciales, et certainement générer de nouvelles questions.

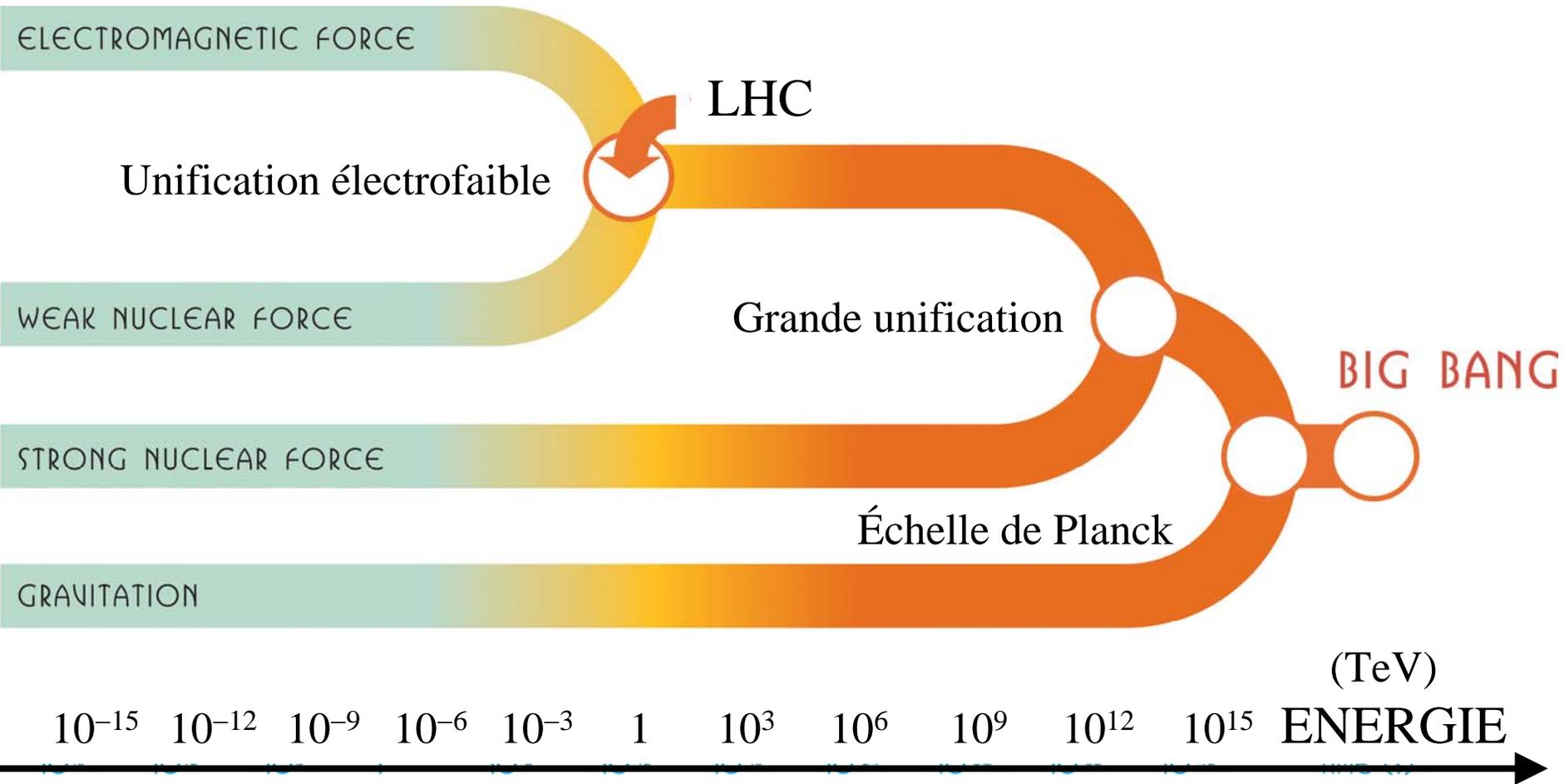
L'origine de la masse et le boson de Higgs

- problème: masses des bosons W et Z
- mécanisme de brisure de la symétrie de jauge: nouveau champ (Higgs)
- **maillon manquant du Modèle Standard (clef de voûte)**
- “transition de phase” dans l’histoire de l’Univers
- témoin de cette transition: le **boson de Higgs**

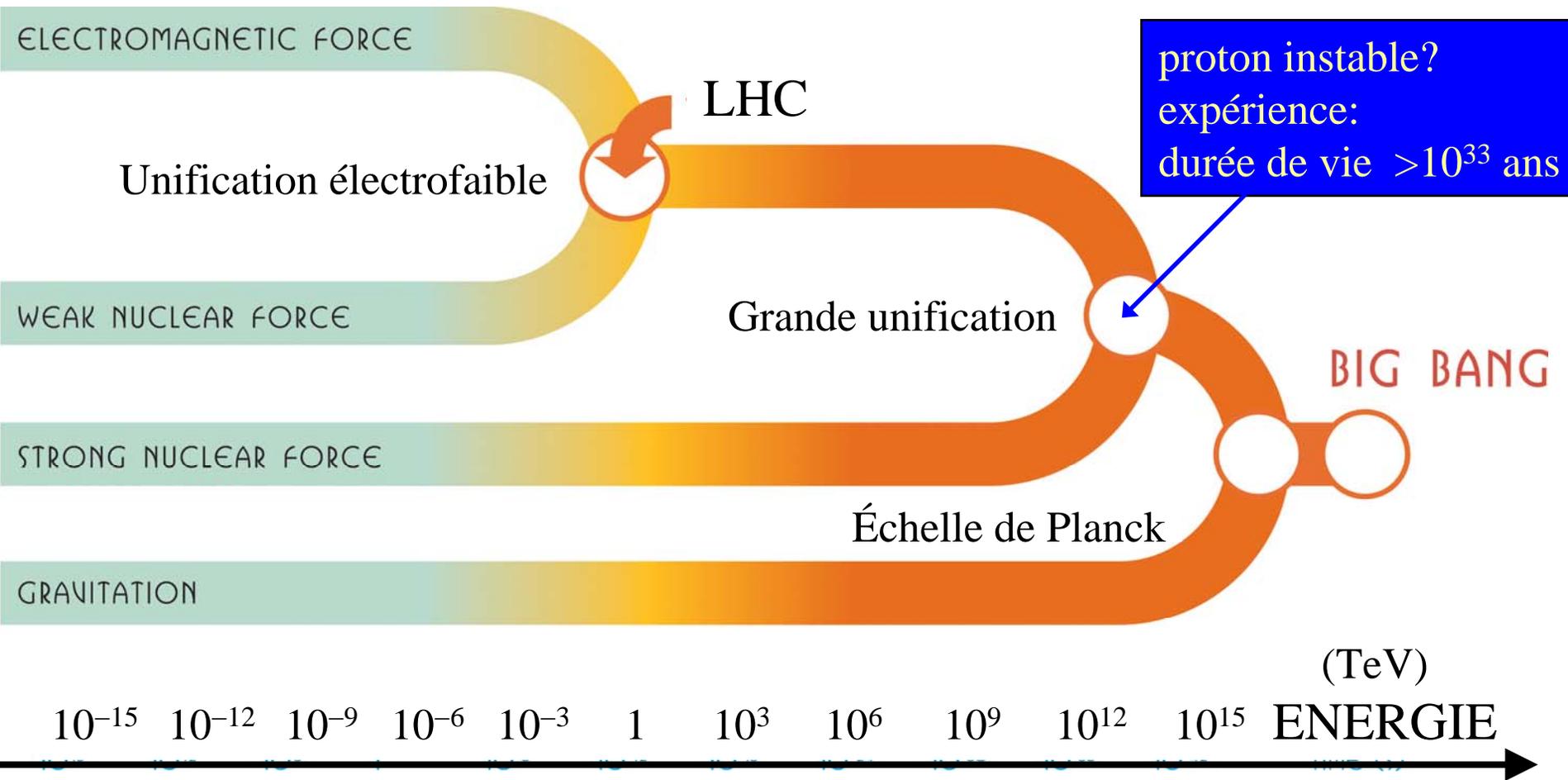
- recherche frénétique: masse M_H ???
 - indirecte: mesures de précision + MS \Rightarrow **$42 < M_H < 159 \text{ GeV}$**
LEP (CERN), SLC (Stanford), TeVatron (Chicago)

 - directe: LEP **$M_H > 114 \text{ GeV}$** + indication à 115 GeV ?
TeVatron actuellement le plus compétitif
LHC à terme la machine la plus performante
course poursuite, suspense!
- résultat crucial: **une découverte est assurée....**

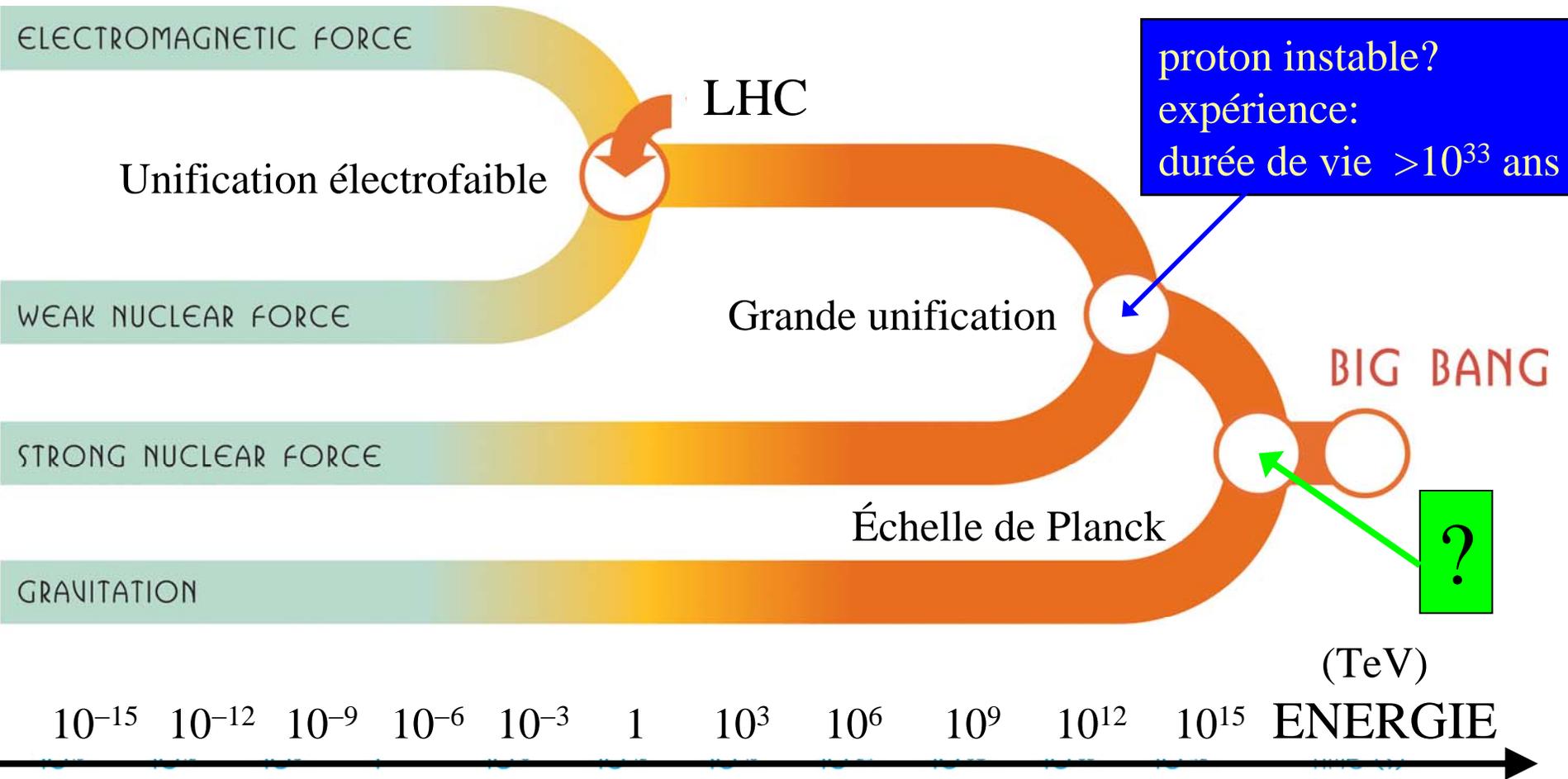
Vers l'unification des forces fondamentales?



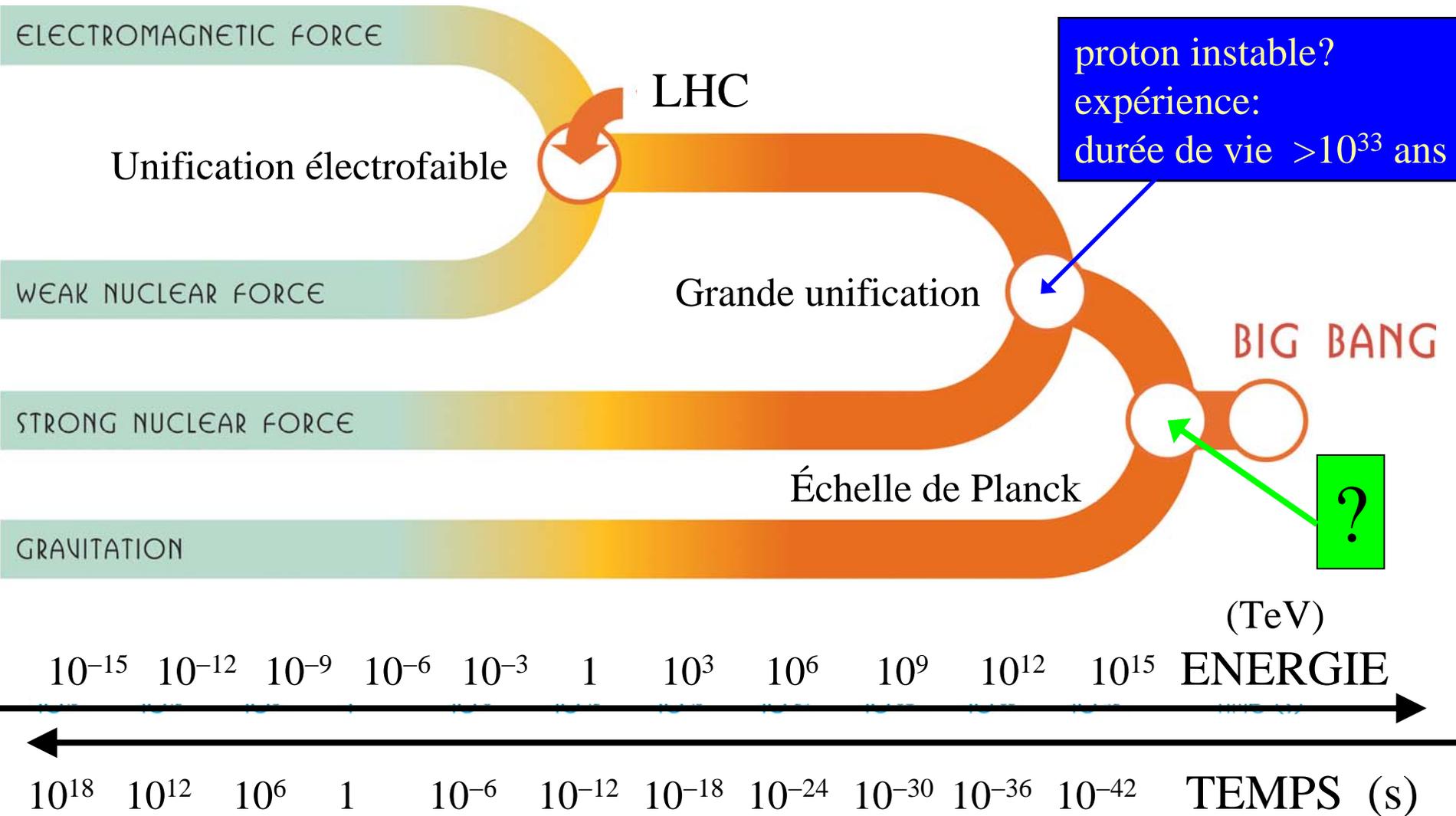
Vers l'unification des forces fondamentales?



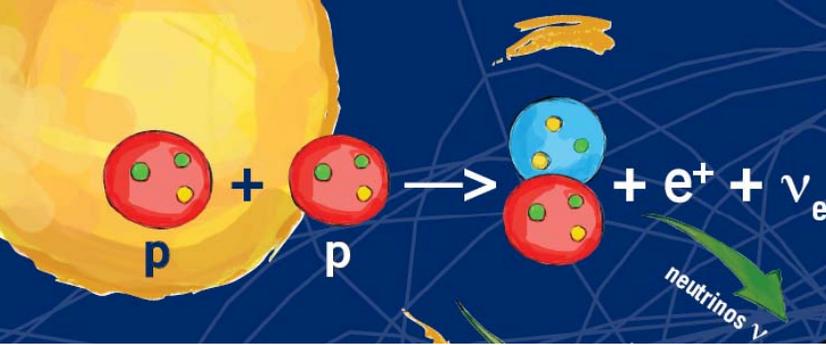
Vers l'unification des forces fondamentales?



Vers l'unification des forces fondamentales?



La physique des particules avec les accélérateurs nous fait remonter le temps cosmique vers les origines de l'Univers

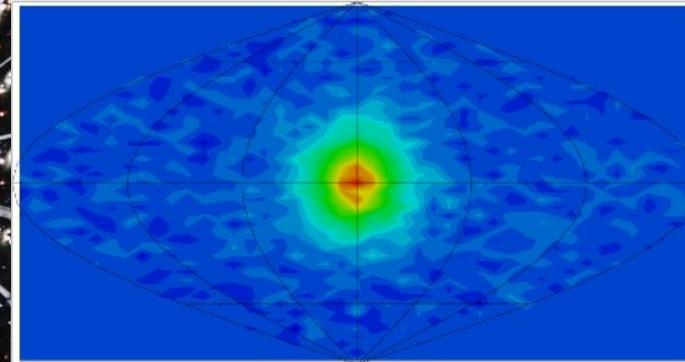
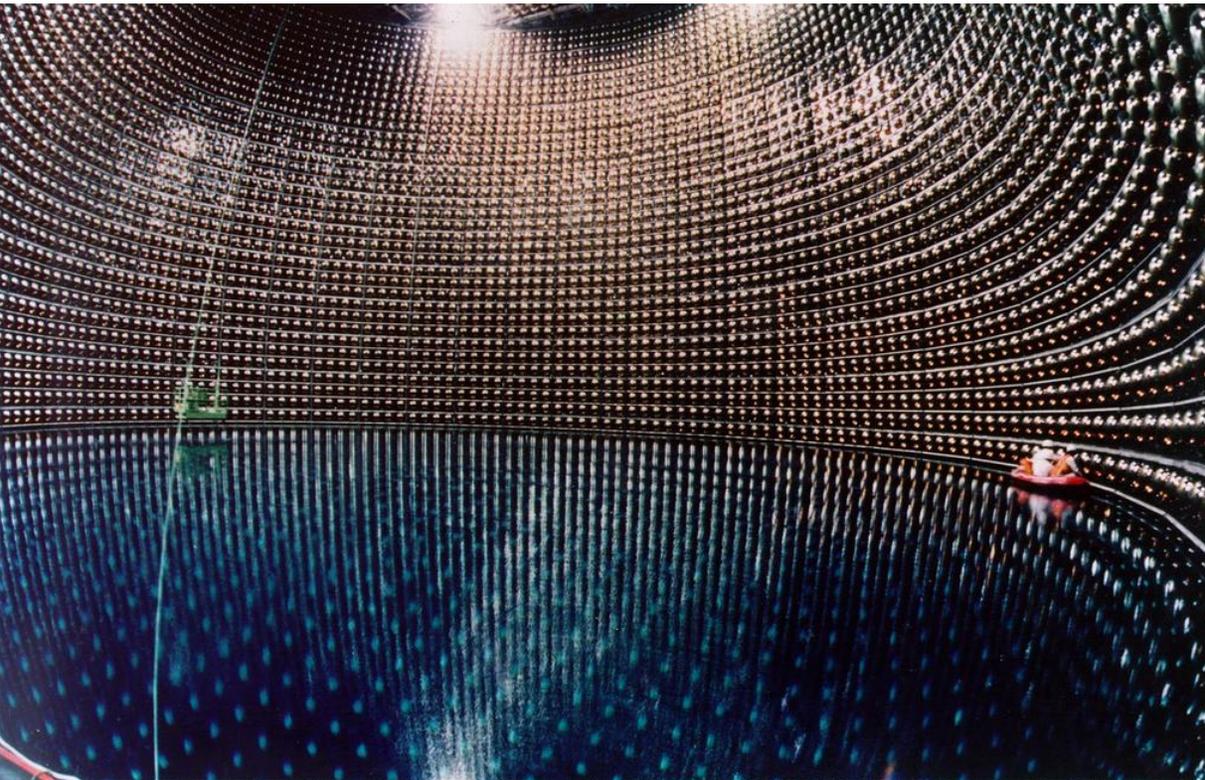


Que nous disent les neutrinos? (1)

- le Soleil émet un flux de neutrinos énorme: $6 \times 10^{10} \nu / \text{cm}^2 / \text{s}$ sur Terre
- mais ils interagissent très faiblement avec la matière:
le plus gros détecteur actuel (SuperKamiokande, 50 000 m³ eau)

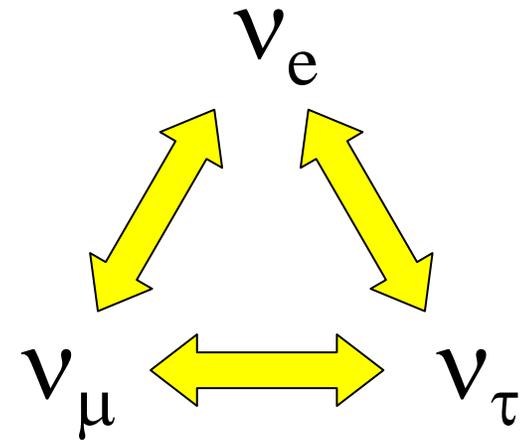
20ν détectés /jour

photo du soleil prise
1000 m sous terre



Que nous disent les neutrinos? (2)

- énigme des neutrinos solaires (déficit)
 - problème similaire avec les ν produits par les rayons cosmiques
 - explication: phénomène **d'oscillations entre les 3 types de ν**
 - **prouve que les ν ont des masses différentes, donc non nulles**
 - Soleil, rayons cosmiques, réacteurs nucléaires, accélérateurs
 - grandes structures de galaxies et fond diffus
 - superbe complémentarité particules – cosmos
-
- **masses extrêmement petites!**
au plus 10^{-6} la masse de l'électron
 - pourquoi?
 - paradoxalement, semble pointer vers une **grande échelle d'énergie** (grande unification?)

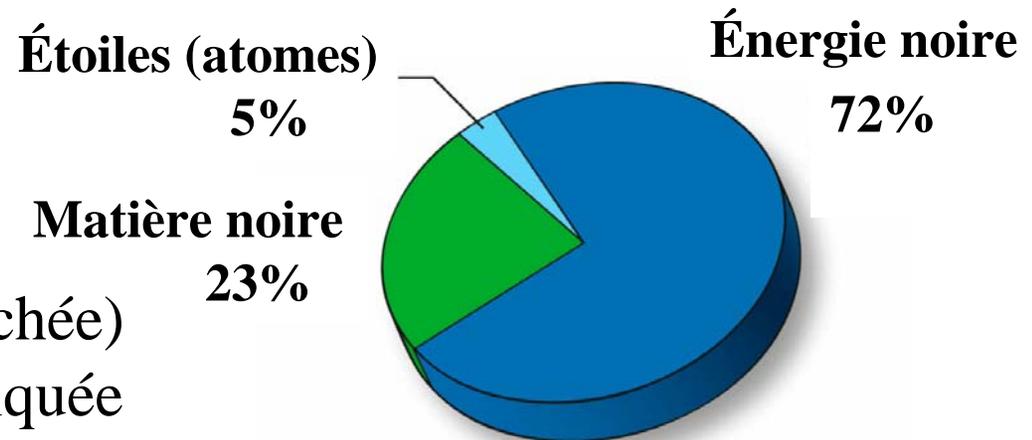


La masse et l'énergie cachées

- masse des objets visibles seulement 5% de l'énergie dans l'Univers
- origine possible: particules lourdes (halos)
- prédites par une extension du MS (supersymétrie)
- dans ce cas elles seront découvertes au LHC



- observation: accélération de l'expansion de l'Univers
- équivalent à une énergie (cachée)
- origine pour l'instant inexpliquée un grand défi!



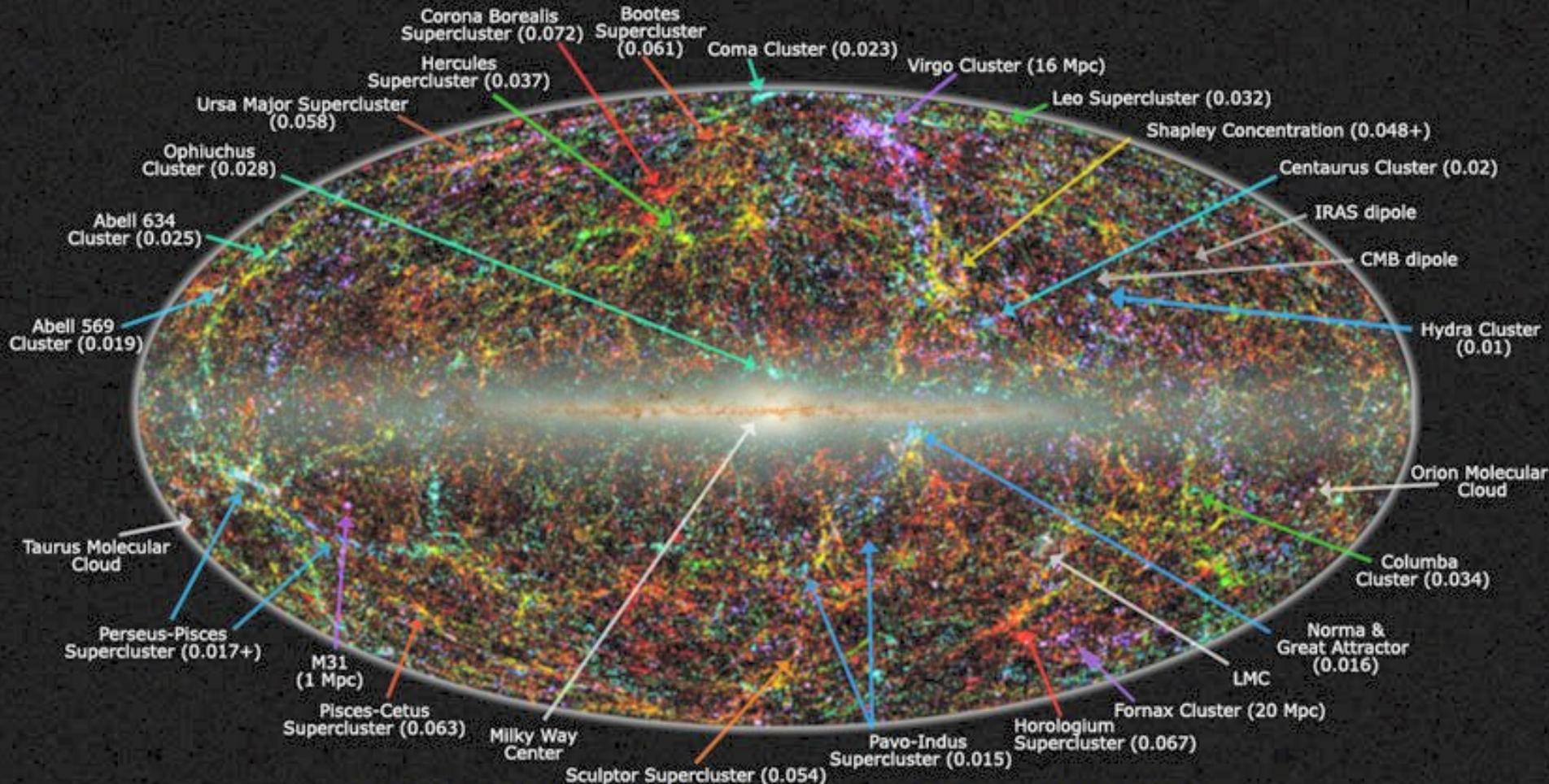
Perspectives

La physique des particules et du cosmos est une aventure passionnante et étourdissante.

La prochaine décennie promet d'être riche en découvertes!

Fin

Structure à grande échelle dans l'univers local

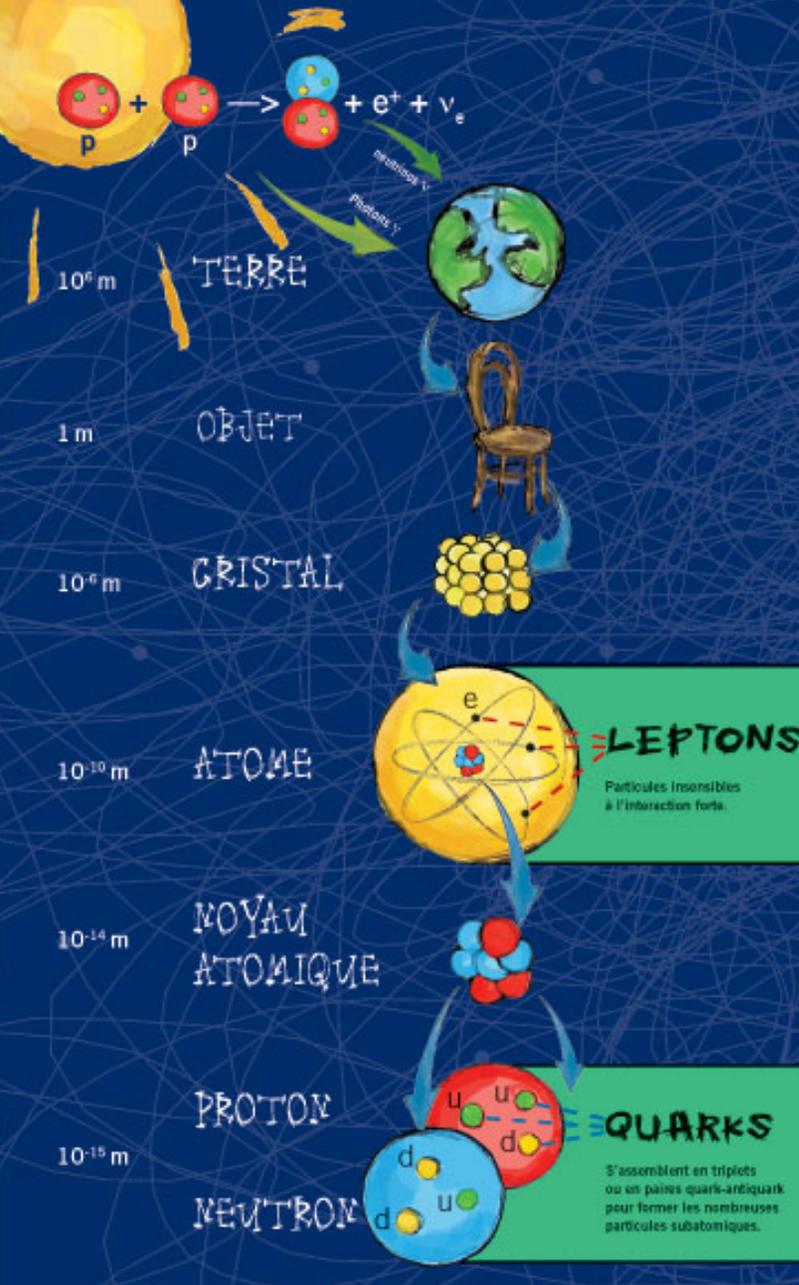


Legend: image shows 2MASS galaxies color coded by redshift (Jarrett 2004); familiar galaxy clusters/superclusters are labeled (numbers in parenthesis represent redshift).
Graphic created by T. Jarrett (IPAC/Caltech)

Composants élémentaires de la matière

Les interactions fondamentales

Il existe des PARTICULES ASSOCIÉES aux interactions fondamentales permettant leur propagation.



	1 ^{re} famille	2 ^e famille	3 ^e famille
LEPTONS Particules insensibles à l'interaction forte.	Les membres de la 1 ^{re} famille composent l'ensemble de la matière ordinaire (électrons, neutrons, atomes...). Plus qu'un proton, il est instable et se désintègre en 1 ^{re} famille. Le muon est ainsi 200 fois plus lourd qu'un électron.	Plus qu'un électron, il est instable et se désintègre en 1 ^{re} famille. Le tauon est ainsi 1800 fois plus lourd qu'un électron.	Plus qu'un neutrino, il est instable et se désintègre en 1 ^{re} famille. Le tauon est ainsi 1800 fois plus lourd qu'un électron.
	e électron $m_e = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ $q_e = -1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ $c = 0$	μ muon $m_\mu = 1.883 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$ $c = 0$	τ tau $m_\tau = 1.777 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $c = 0$
	ν_e neutrino e $m_{\nu_e} < 1 \text{ eV}/c^2$ $c = 0$	ν_μ neutrino muon $m_{\nu_\mu} < 0.1 \text{ MeV}/c^2$ $c = 0$	ν_τ neutrino tau $m_{\nu_\tau} < 1.8 \text{ MeV}/c^2$ $c = 0$
	QUARKS S'assemblent en triplets ou en paires quark-antiquark pour former les nombreuses particules subatomiques.	u haut / up $m_u = 2.3 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$ $q_u = +2/3 \cdot e$	c charme / charm $m_c = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $q_c = +2/3 \cdot e$
	d bas / down $m_d = 3.3 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$ $q_d = -1/3 \cdot e$	s étrange / strange $m_s = 9.3 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$ $q_s = -1/3 \cdot e$	t top $m_t = 1.73 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$ $q_t = +2/3 \cdot e$

Gravitation Attraction universelle, planètes, galaxies. GRAVITON ?
Interaction faible Désintégrations radioactives. Z^0, W^+, W^-
Interaction électromagnétique Électricité, magnétisme, cohésion de l'atome et du cristal, chimie. PHOTON
Interaction forte Cohésion des protons et des noyaux. GLUON

ANIMATION



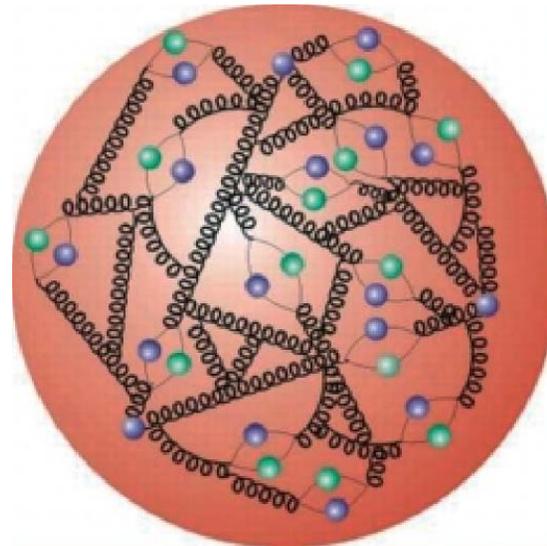
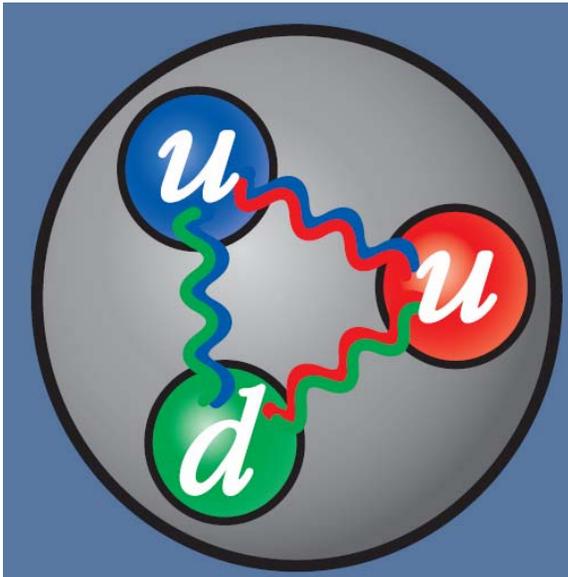
À chaque particule correspond une antiparticule aux propriétés quasi-identiques. La charge électrique d'une antiparticule est l'opposé de la particule correspondante.

- Les 4 forces fondamentales sont indispensables au fonctionnement du soleil (et des étoiles) :
- formation de l'étoile causée par la gravitation ;
 - réactions de fusion nucléaire avec l'interaction faible et forte ;
 - production de lumière-interaction électromagnétique.

Les 4 particules de la première famille sont présentes dans le soleil qui envoie sur la terre un flux intense de photons et de neutrinos.

Une vue encore plus réaliste du proton

- quarks porteurs d'une "charge" forte
- chaque quark sous 3 états de charge forte ("la couleur")
- gluons échangés entre quarks aussi "colorés"
- cette construction est la théorie fondamentale de l'interaction forte: chromodynamique quantique
- paires quark-antiquark $q\bar{q}$ produites par les gluons (fluctuations quantiques)
- image du proton: 3 quarks + une multitude de gluons et de paires $q\bar{q}$



L'origine de la masse et le boson de Higgs:

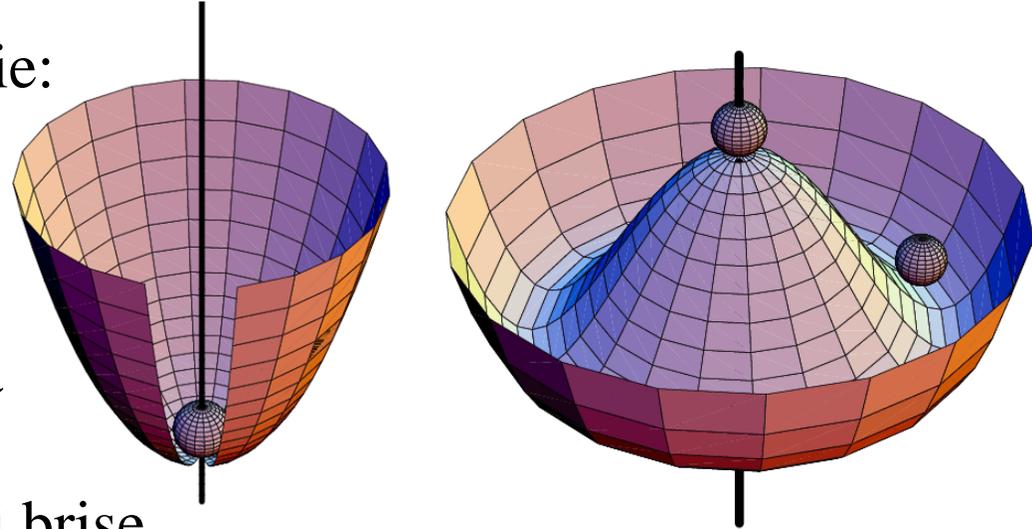
(1) le problème

- dans une théorie de jauge la masse des bosons de champ échangés doit être nulle
- c'est bien le cas pour le photon et les gluons
- par contre les bosons de l'interaction faible sont très lourds
 $M_W = 80 \text{ GeV}$ $M_Z = 91 \text{ GeV}$ $\sim 100 \times \text{masse du proton}$
- comment accommoder ces masses tout en respectant la symétrie de jauge?

L'origine de la masse et le boson de Higgs:

(2) la solution

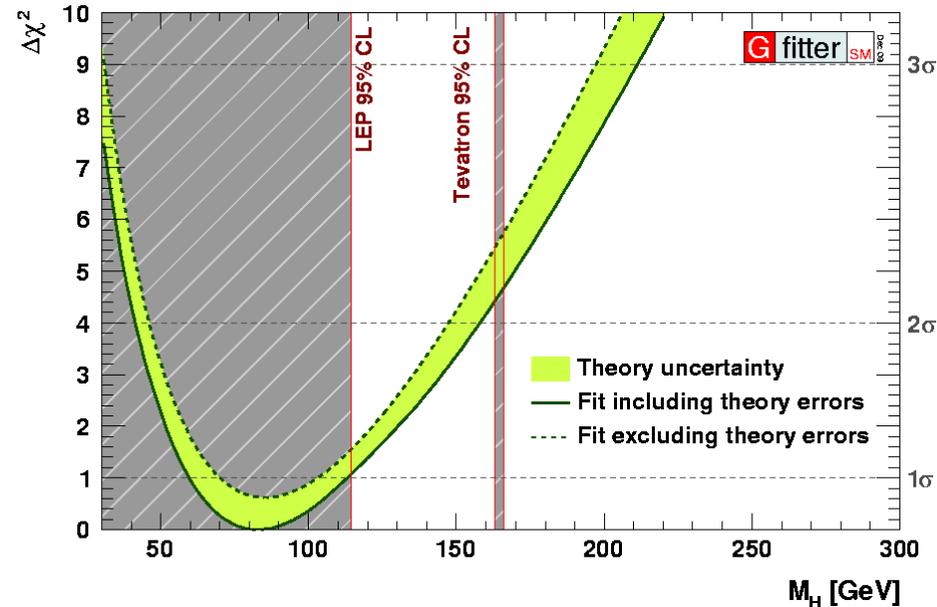
- brisure spontanée de symétrie:
ex. bille dans un “puits de potentiel” à symétrie axiale
- mécanisme de Higgs dans la théorie électrofaible:
nouveau champ introduit qui brise la symétrie de jauge pour la solution stable
- en fait le mécanisme génère des masses pour toutes les particules
- ceci implique une “transition de phase” dans l’histoire de l’Univers
avant: particules de masse nulle
après: particules massives (champ de Higgs~viscosité du vide)
- il reste un témoin de cette transition: une nouvelle particule, un boson de Higgs avec des propriétés bien particulières qu’il faut donc absolument découvrir



L'origine de la masse et le boson de Higgs:

(3) la traque du boson

- comment valider le mécanisme de Higgs de génération des masses?
- il reste un témoin de cette transition de phase: une nouvelle particule, le boson de Higgs avec des propriétés bien particulières, qu'il faut donc absolument découvrir
- recherche avec les collisionneurs
 - LEP e^+e^- : délimite une petite région de masse 114–155 GeV + indication à 115 GeV
 - Fermilab pp: atteint un niveau de sensibilité compétitif
 - LHC pp: doit le découvrir (s'il existe)
- le sujet le plus chaud au LHC
- résultat crucial



Où est passée l'antimatière de l'Univers?

- l'Univers observable est formé de matière
- on sait produire des paires particule-antiparticule (accélérateurs)
- l'annihilation matière-antimatière produit beaucoup d'énergie
- Big Bang: produit autant de particules que d'antiparticules (?)
- leur annihilation conduirait à un univers sans matière (photons)
- la matière restante est donc le résultat d'une asymétrie matière-antimatière

- une telle asymétrie a été mise en évidence expérimentalement avec des particules
- elle trouve son origine dans l'existence de 3 familles de quarks!
- merveilleux agencement...
- malheureusement l'asymétrie n'est pas assez forte pour expliquer celle dans l'Univers

L'espace a-t-il des dimensions supplémentaires?

- nous vivons dans un espace à 3 dimensions
- depuis Einstein espace et temps sont liés (espace-temps)
- théories récentes proposent des dimensions supplémentaires

- théorie des cordes: les particules ne sont pas des points, mais des cordes vibrant dans un espace à 10 dimensions
- théorie des “branes”: la gravitation et les autres interactions ne “vivent” pas dans les mêmes dimensions d'espace

- grand bouillonnement intellectuel
- le rêve d'Einstein
- pouvoir prédictif très limité pour l'instant
- cas particuliers: découvertes possibles au LHC