



# Des particules au cosmos: les mystères des deux infinis

Michel Davier

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



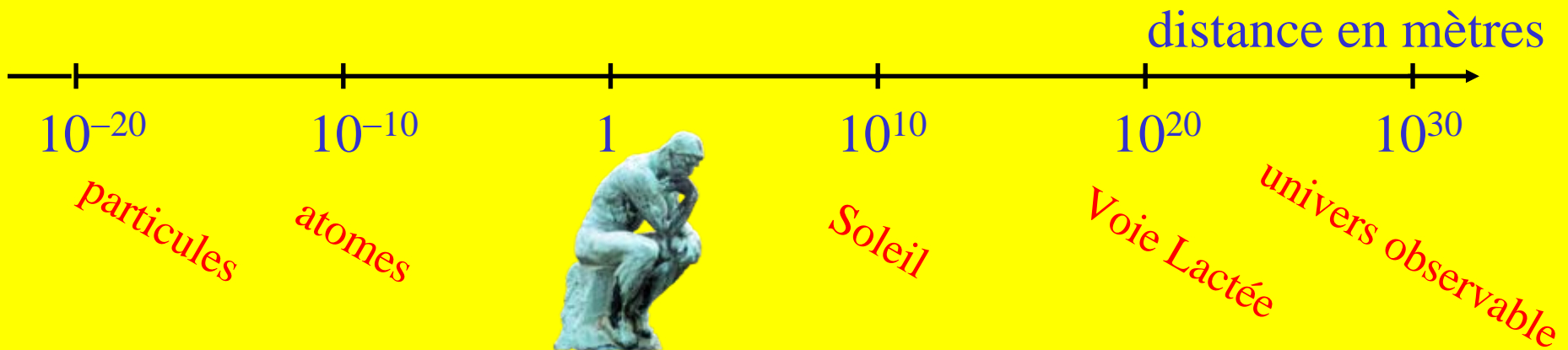
# Voyage aux deux infinis

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

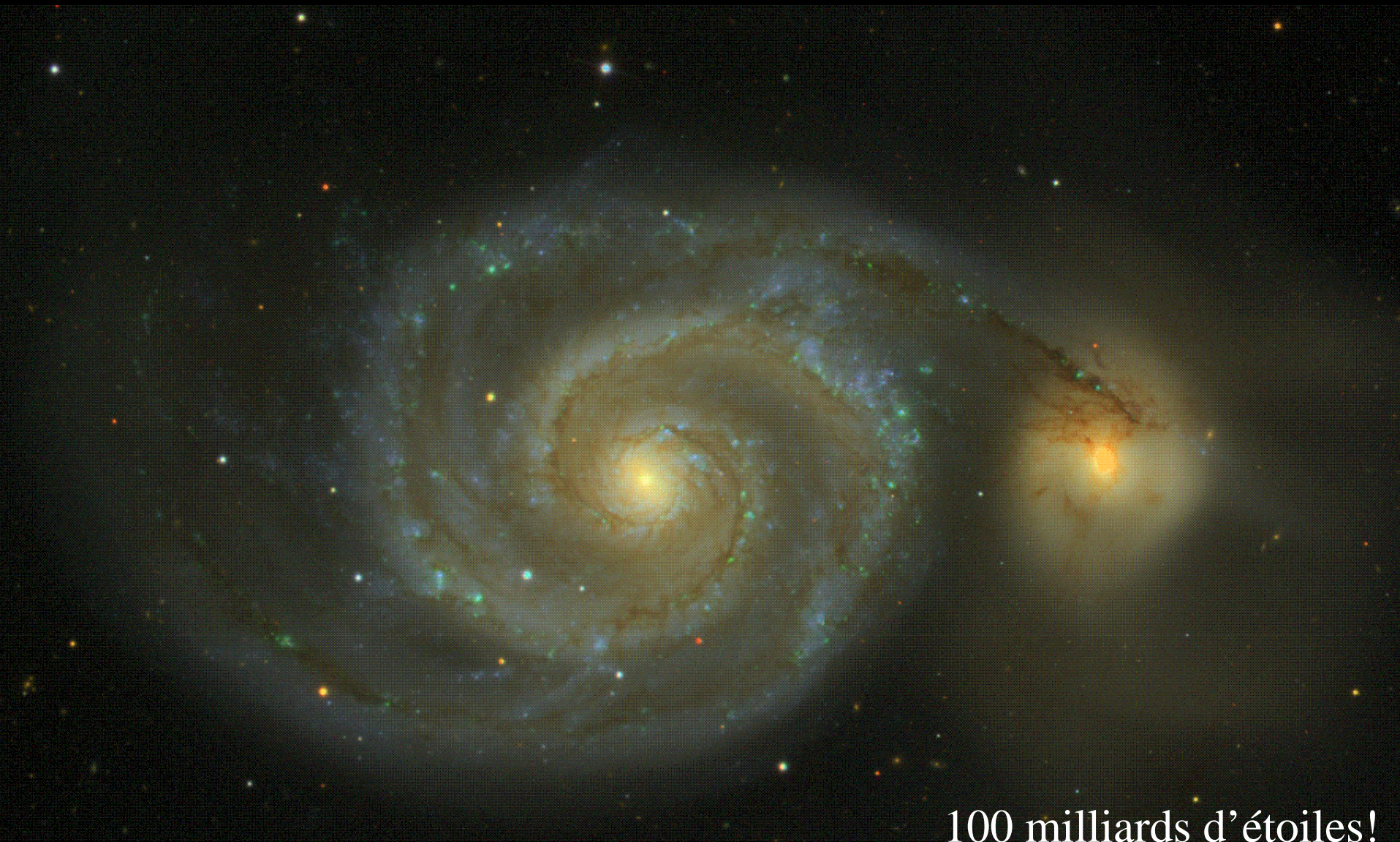
matière microscopique explorée jusqu'à  $10^{-18}$  m

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

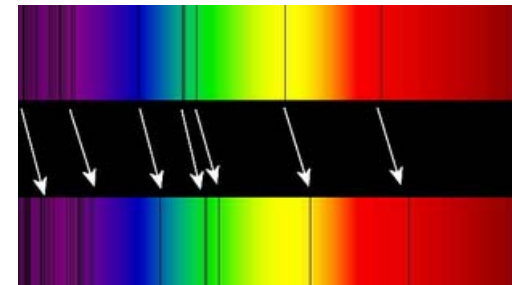
Une galaxie parmi 100 milliards...



100 milliards d'étoiles!

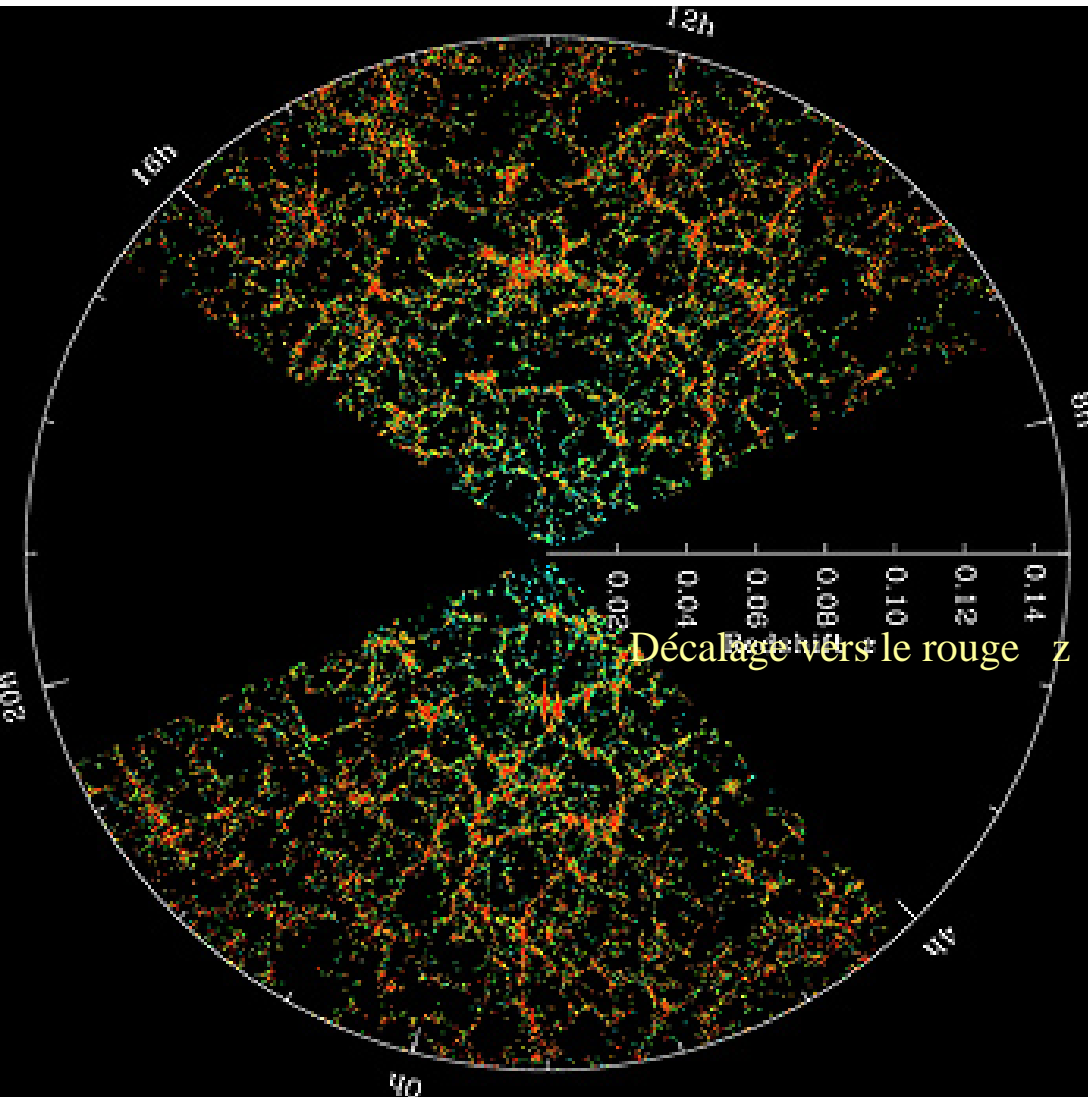
# Structure à grande échelle de l'Univers

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):

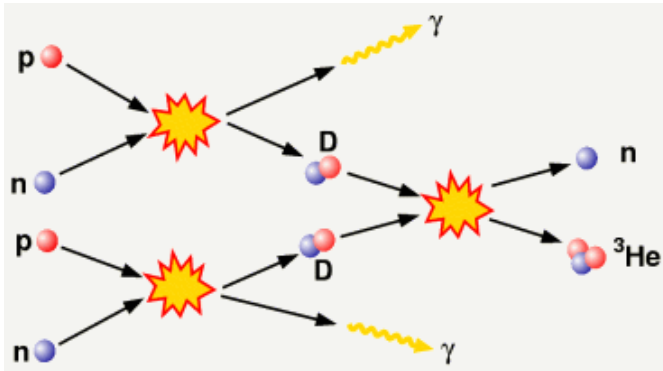
- fuite des galaxies lointaines
  - les galaxies lointaines s'éloignent de nous
  - plus elles sont loin, plus elles s'éloignent vite
  - l'espace est en **expansion**
- abondance primordiale des éléments légers
- rayonnement de fond

# 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

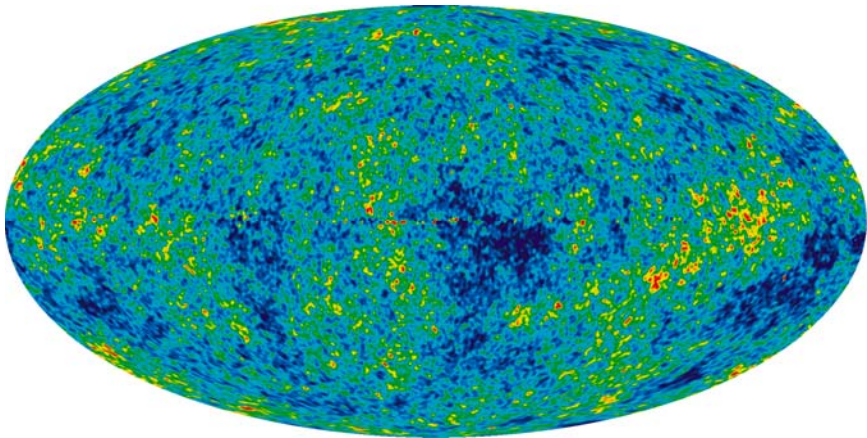


# Le modèle cosmologique standard

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

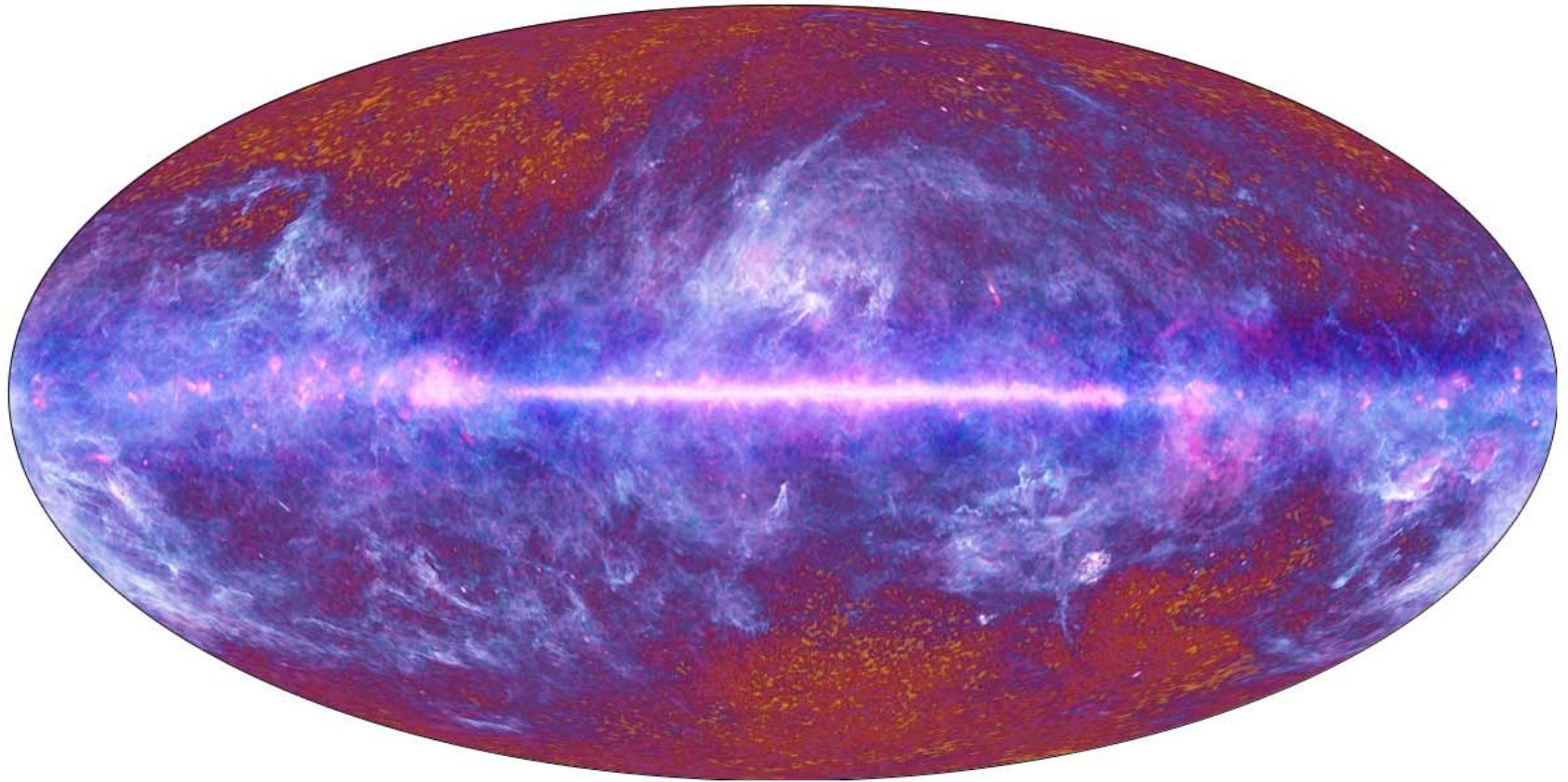
Cosmologie: étude de l'Univers considéré dans son ensemble

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



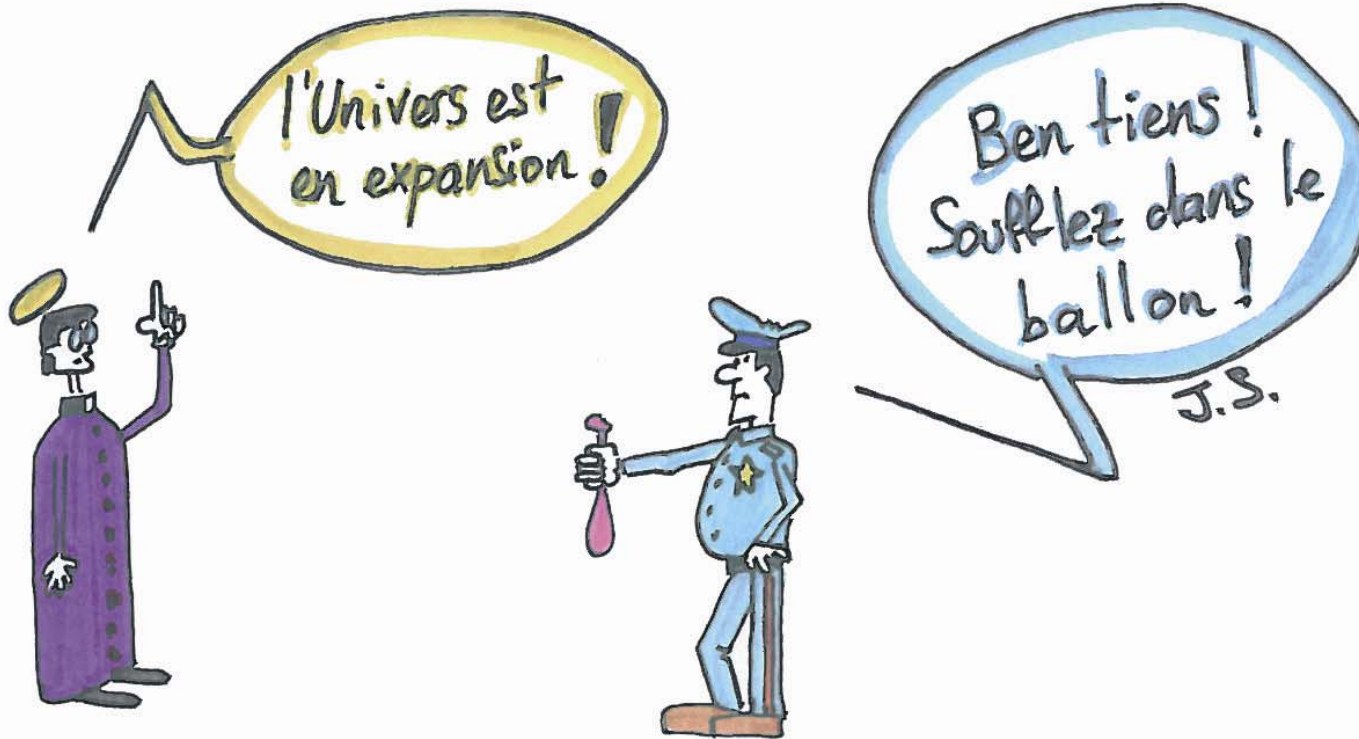
The Planck one-year all-sky survey



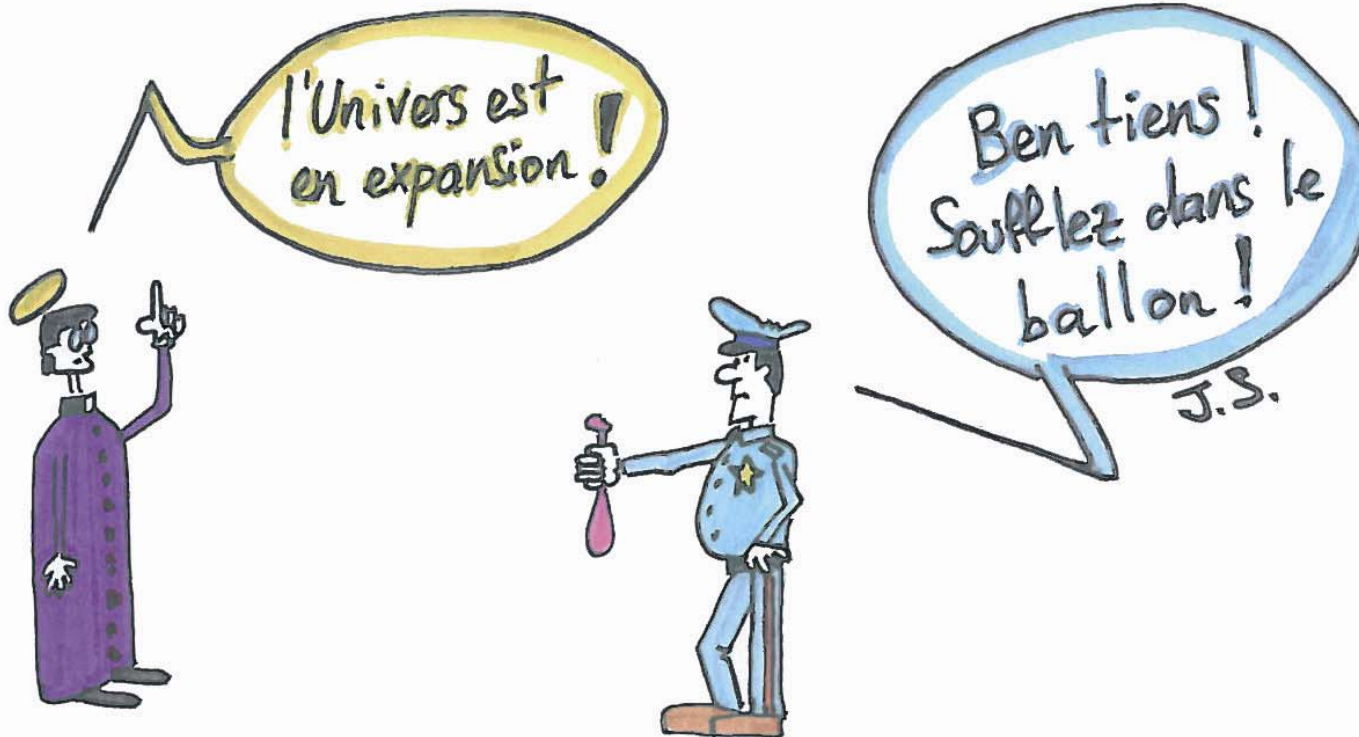
(c) ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

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

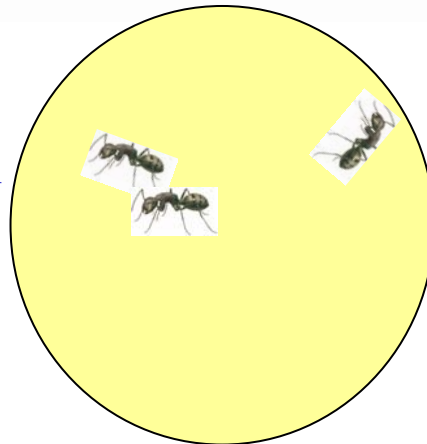
# L'expansion de l'Univers



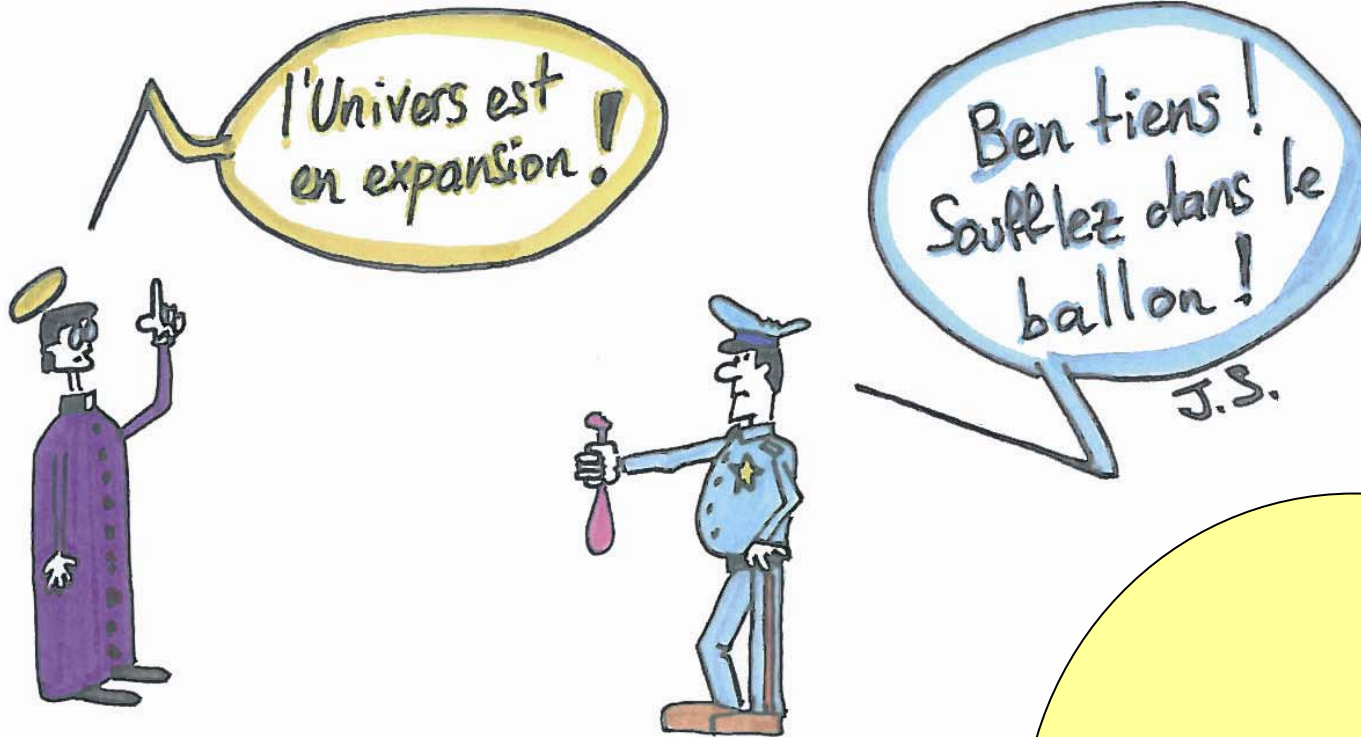
# L'expansion de l'Univers



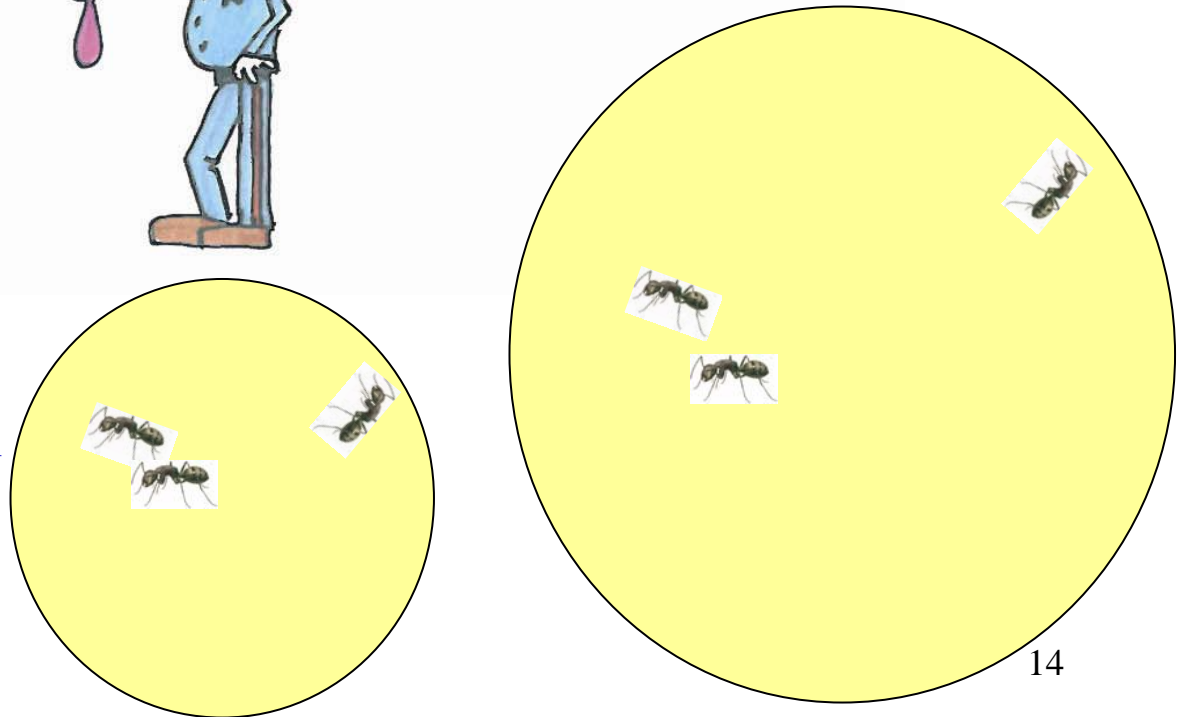
La surface d'un ballon est un univers à 2 dim. pour une fourmi



# L'expansion de l'Univers



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



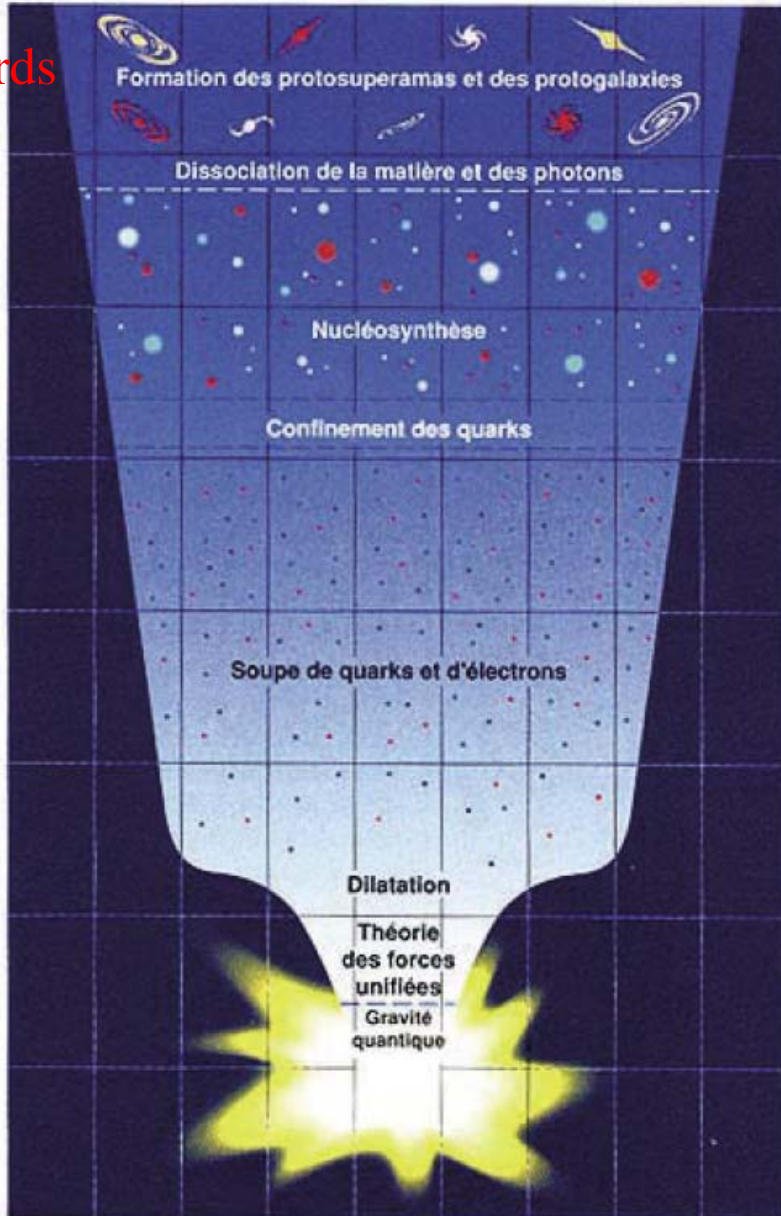
# Le film du cosmos

$4 \times 10^{17}$  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

Astrophysique

Physique des particules

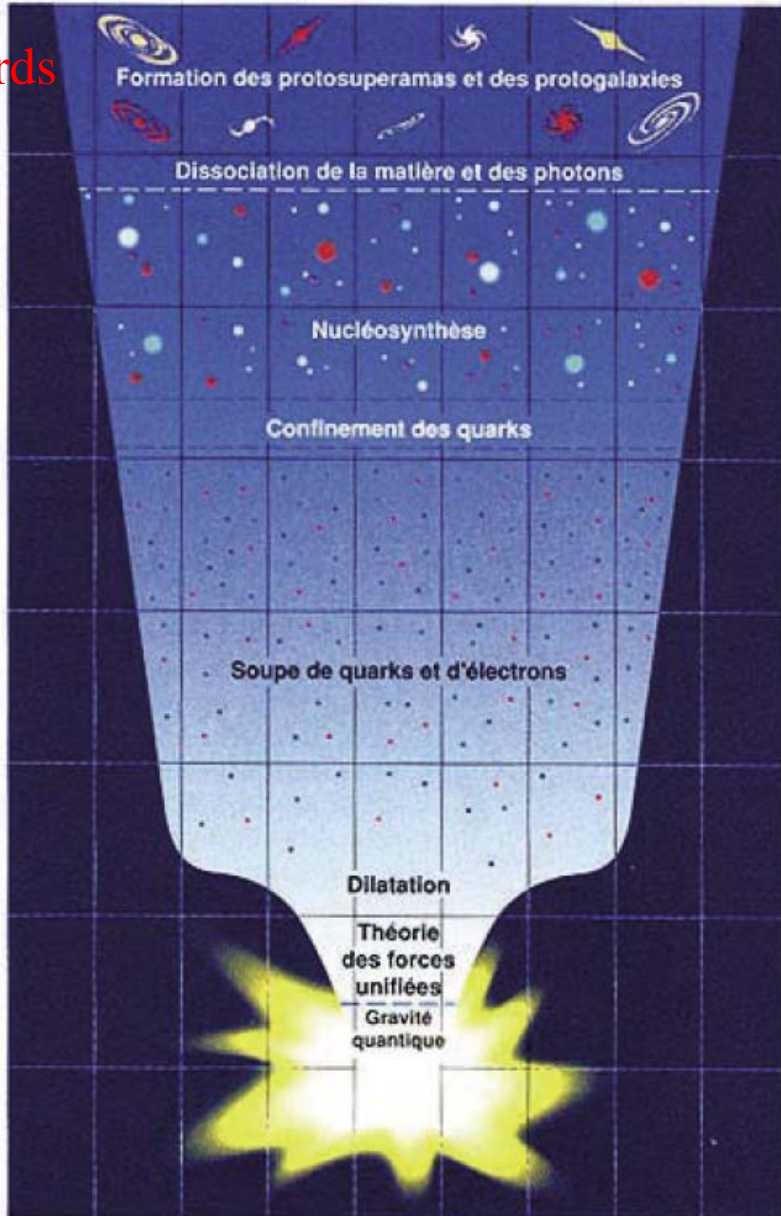
# Le film du cosmos

$4 \times 10^{17}$  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 (?)

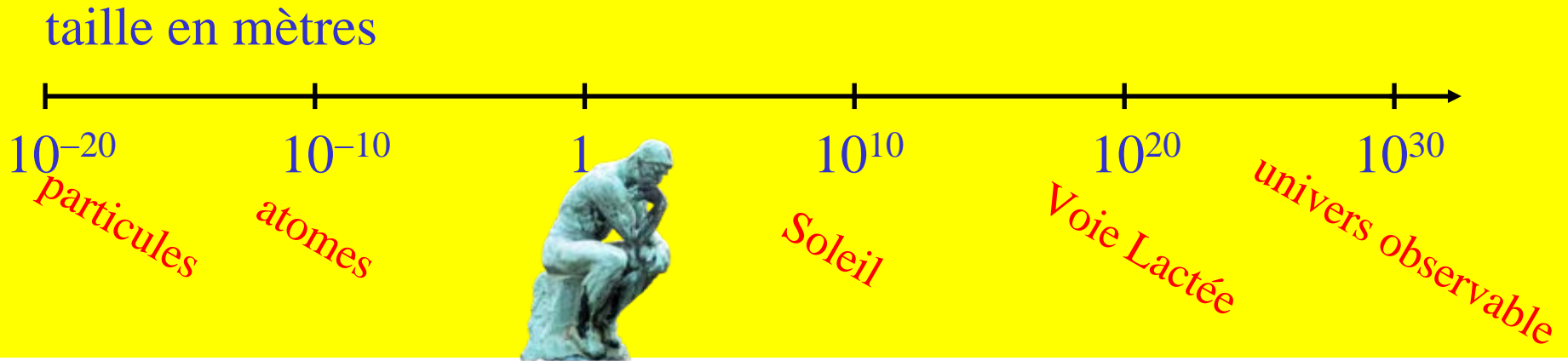
Astrophysique

Ph. nucléaire

Physique des particules

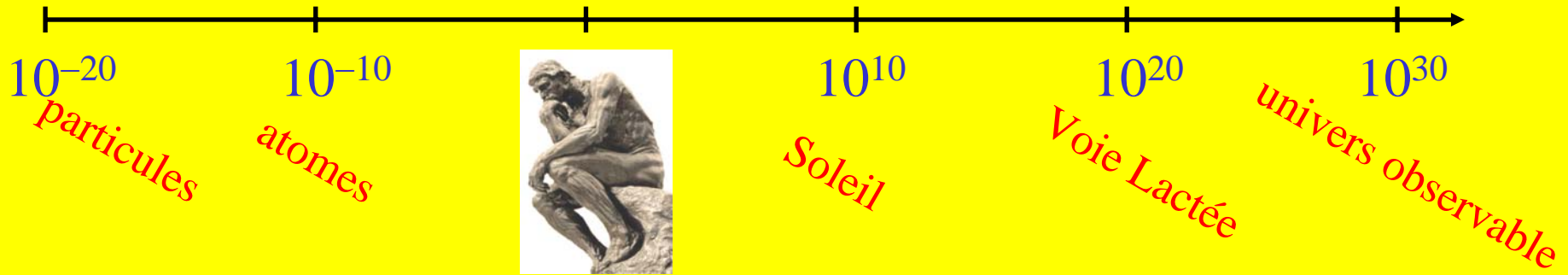


# Vers l'infiniment petit: la structure de la matière



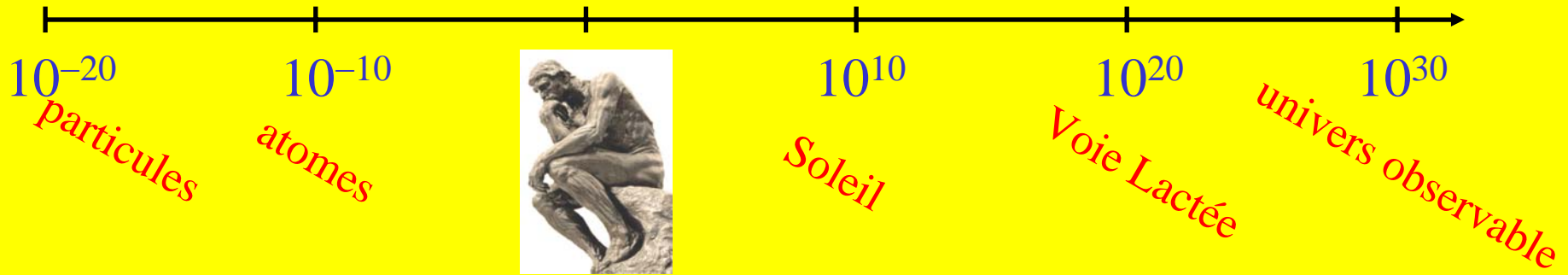
# Vers l'infiniment petit: la structure de la matière

taille en mètres



# Vers l'infiniment petit: la structure de la matière

taille en mètres



Avancées des  
connaissances



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

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

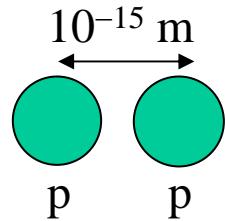
les **quarks** et les **leptons** sont les particules les plus élémentaires

# 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.

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



$10^{-40}$

← négligeable au niveau microscopique

$10^{-8}$

$10^{-2}$

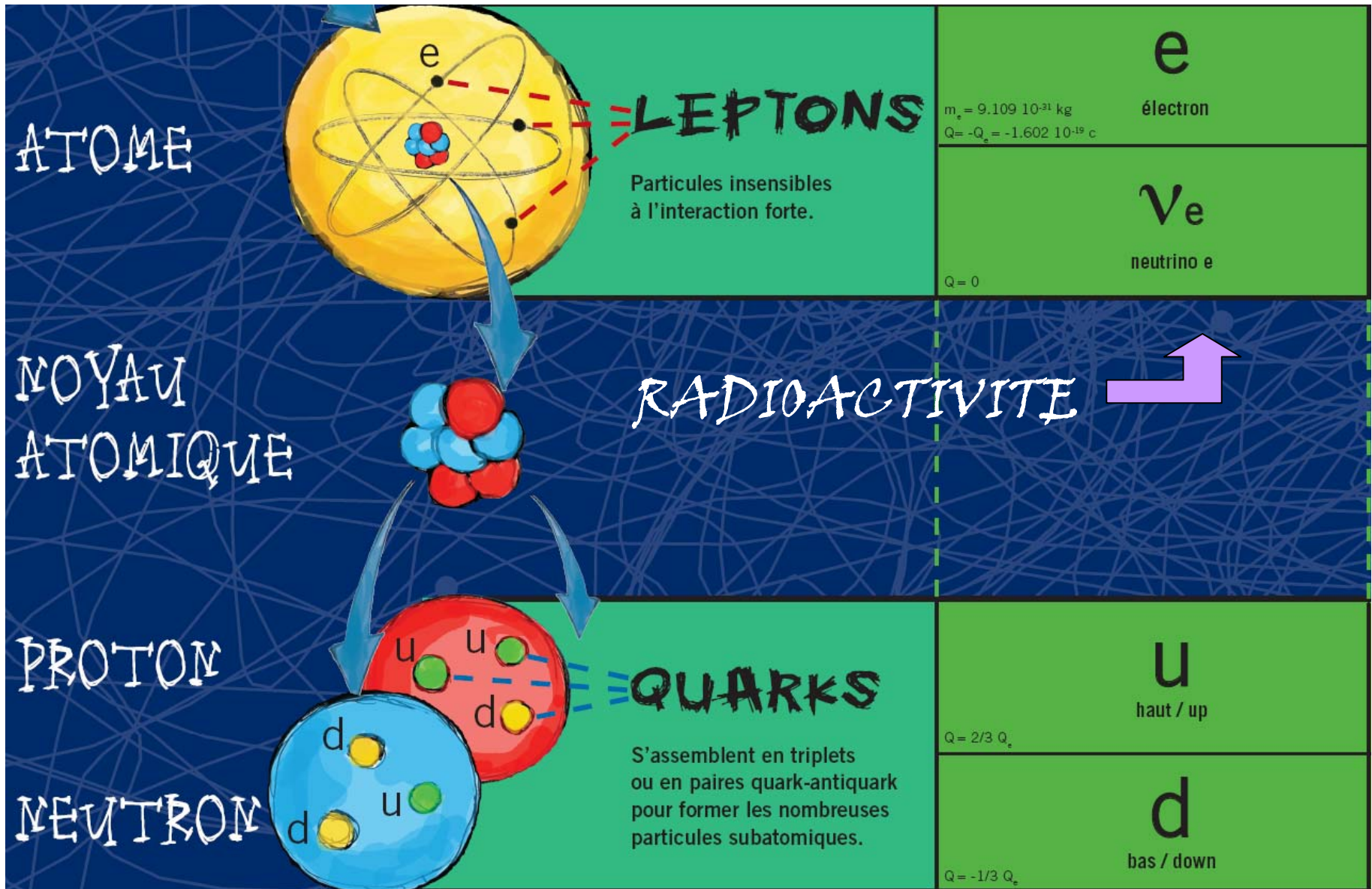
1

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

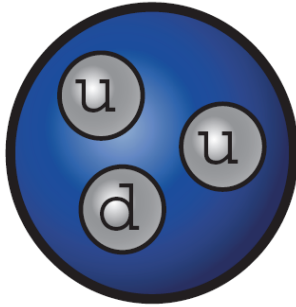
## Particules et antiparticules

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

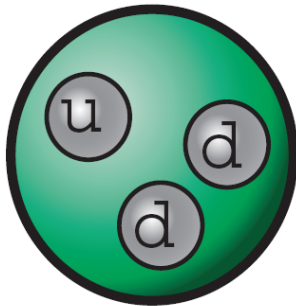
# Les assemblages de quarks: hadrons

baryons: 3 quarks

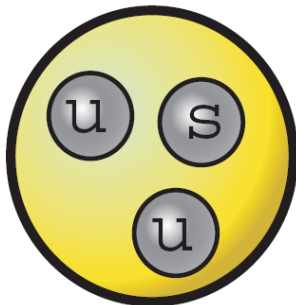
proton (+1)  
p



neutron (0)  
n



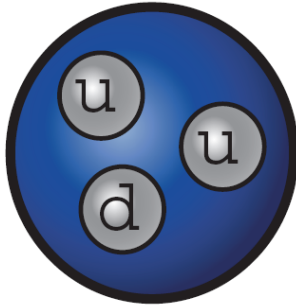
sigma (+1)  
 $\Sigma^+$



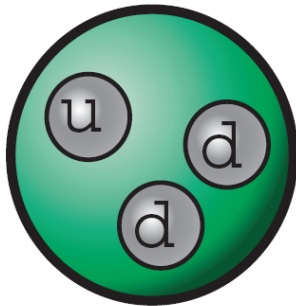
# Les assemblages de quarks: hadrons

baryons: 3 quarks

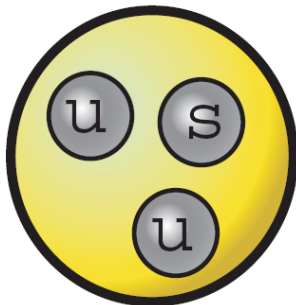
proton (+1)  
p



neutron (0)  
n



sigma (+1)  
 $\Sigma^+$

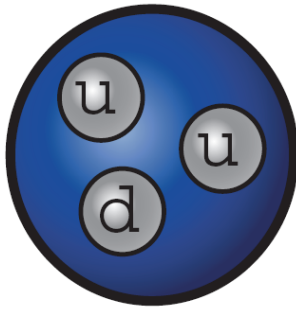




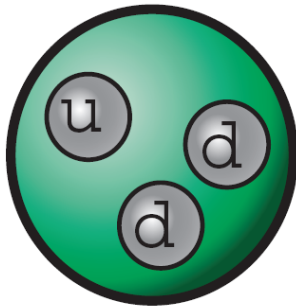
# Les assemblages de quarks: hadrons

baryons: 3 quarks

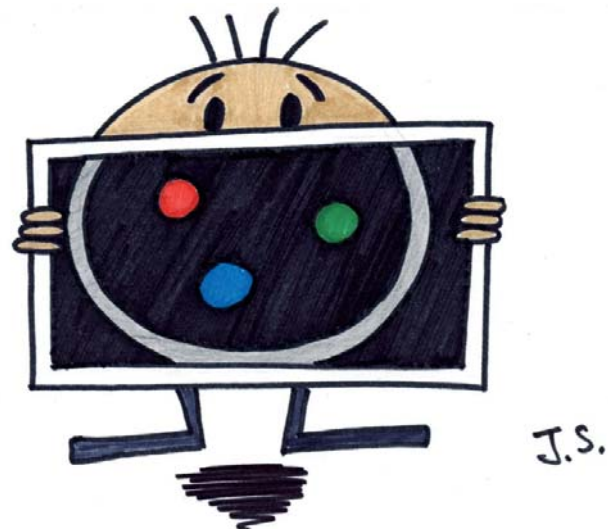
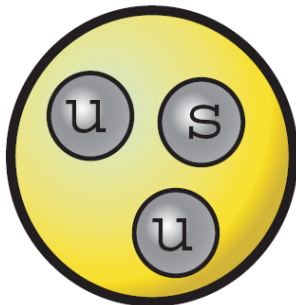
proton (+1)  
p



neutron (0)  
n



sigma (+1)  
 $\Sigma^+$

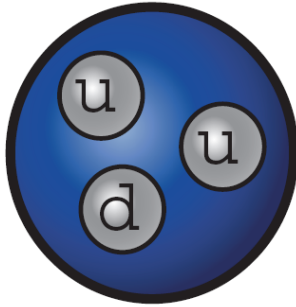


# Les assemblages de quarks: hadrons

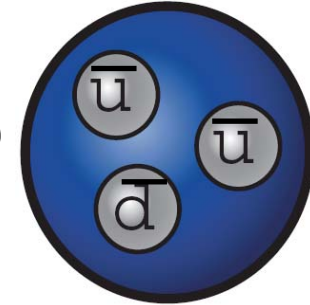
baryons: 3 quarks

anti-baryons: 3 anti-quarks

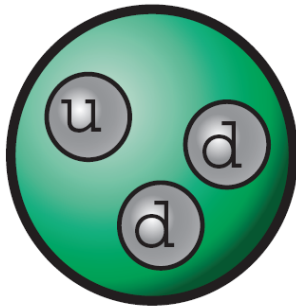
proton (+1)  
 $p$



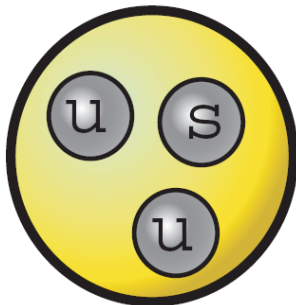
anti-proton (-1)  
 $\bar{p}$



neutron (0)  
 $n$

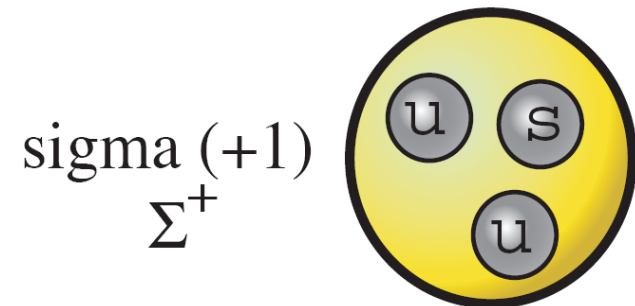
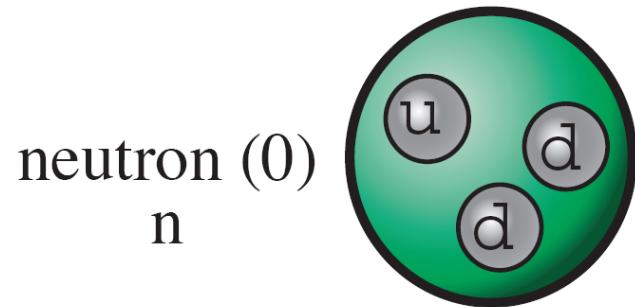
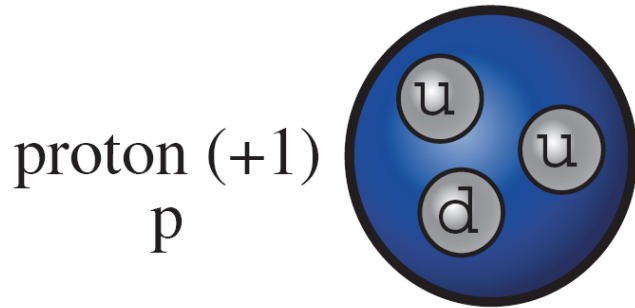


sigma (+1)  
 $\Sigma^+$



# Les assemblages de quarks: hadrons

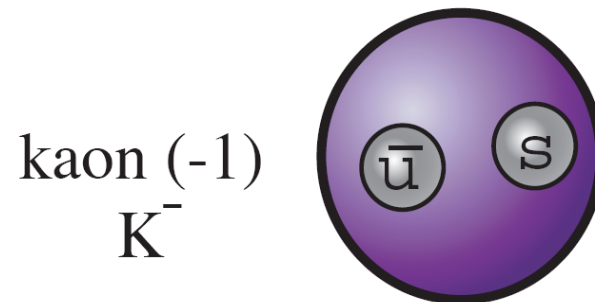
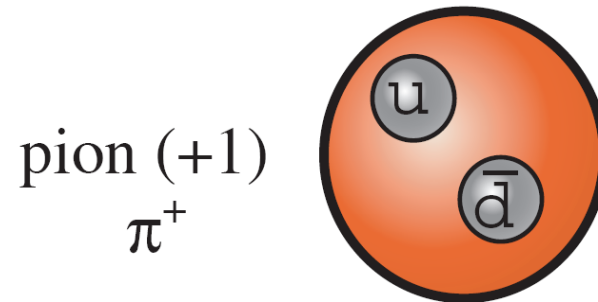
baryons: 3 quarks



anti-baryons: 3 anti-quarks



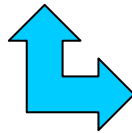
mésons: quark et anti-quark



# 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

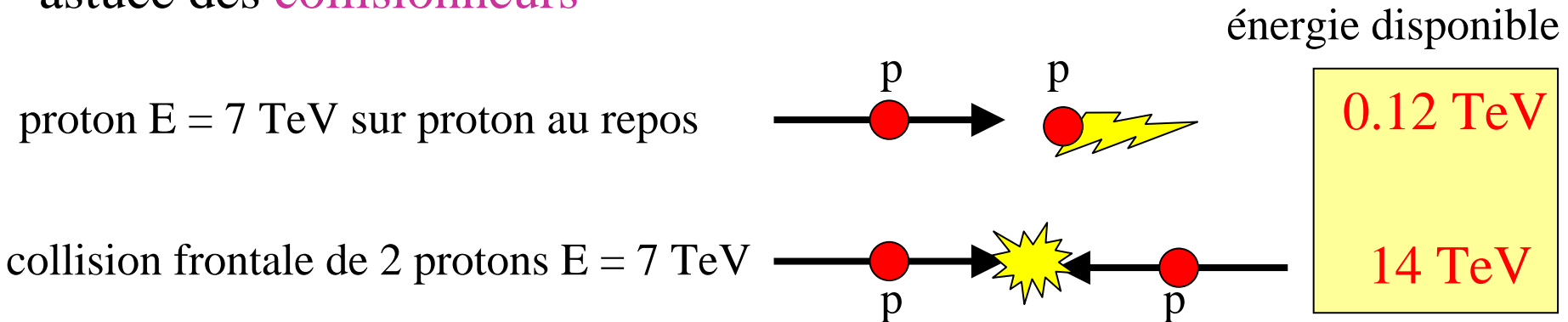
- tests expérimentaux de haute précision en accord avec le MS
- succès le plus spectaculaire: prédiction (mesures + MS) sur la masse du quark t (top), découvert après au Fermilab à la même masse
- un seul élément (crucial) n'a pas encore été vérifié: l'existence du boson de Higgs, signature du mécanisme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

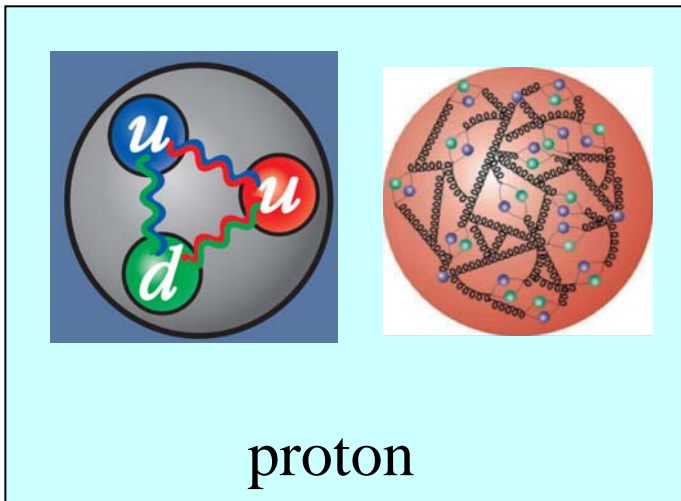
collisionneur proton-proton

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

tunnel 27 km circonférence

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

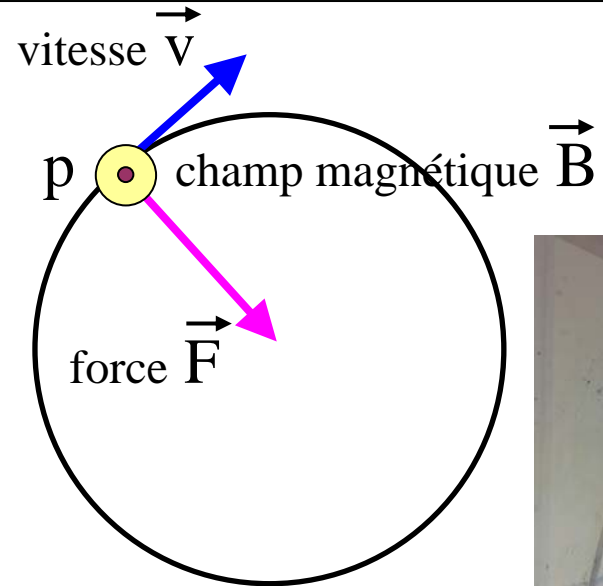
la plus haute énergie explorée  $\Rightarrow$  potentiel de découverte élevé



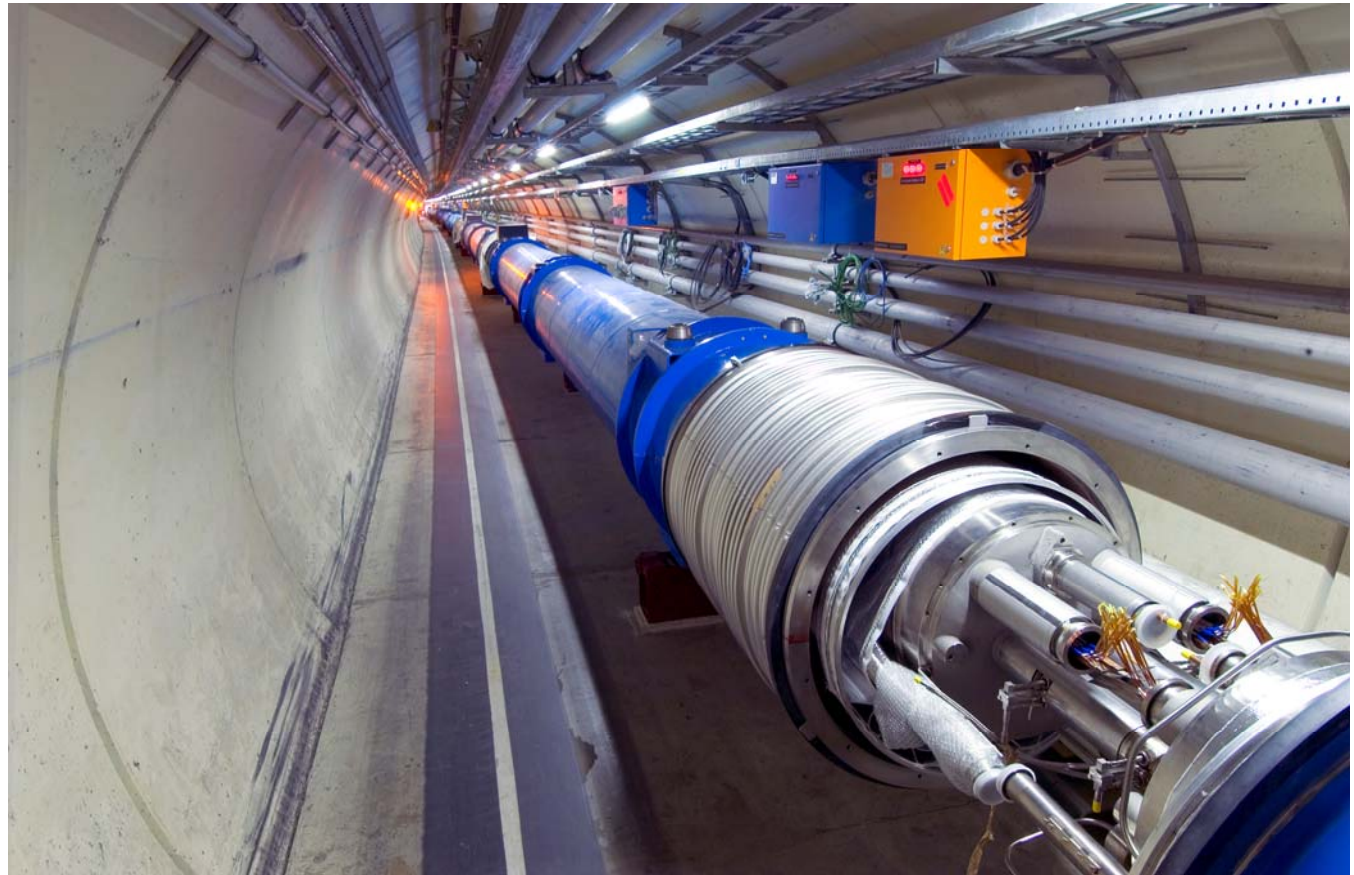
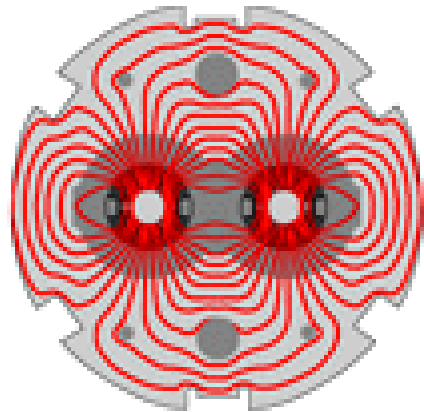
LHC = collisionneur quark-antiquark  
gluon-gluon

# 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  $-271^\circ\text{C}$ )

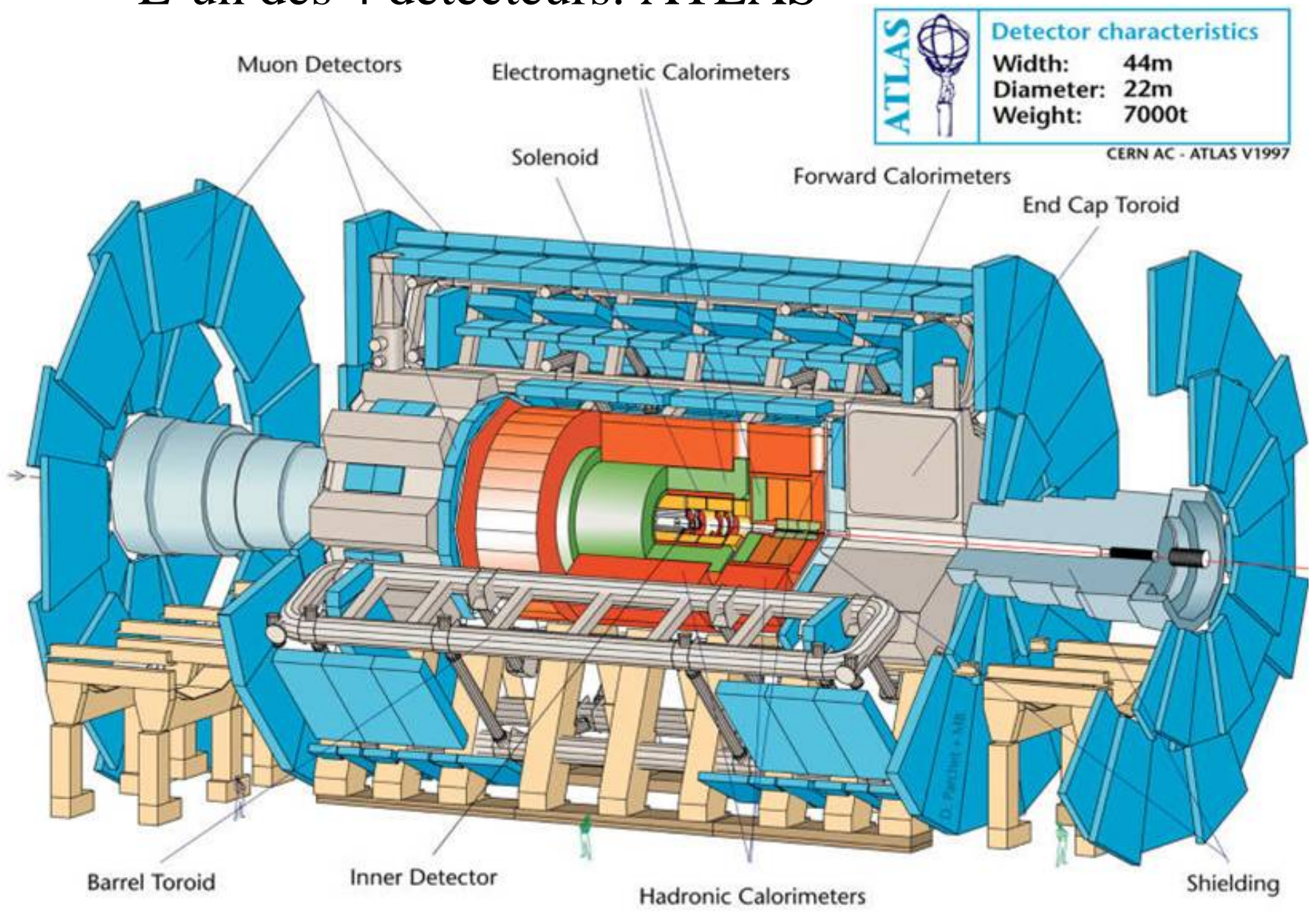


# Les faisceaux de protons et leurs collisions

- 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

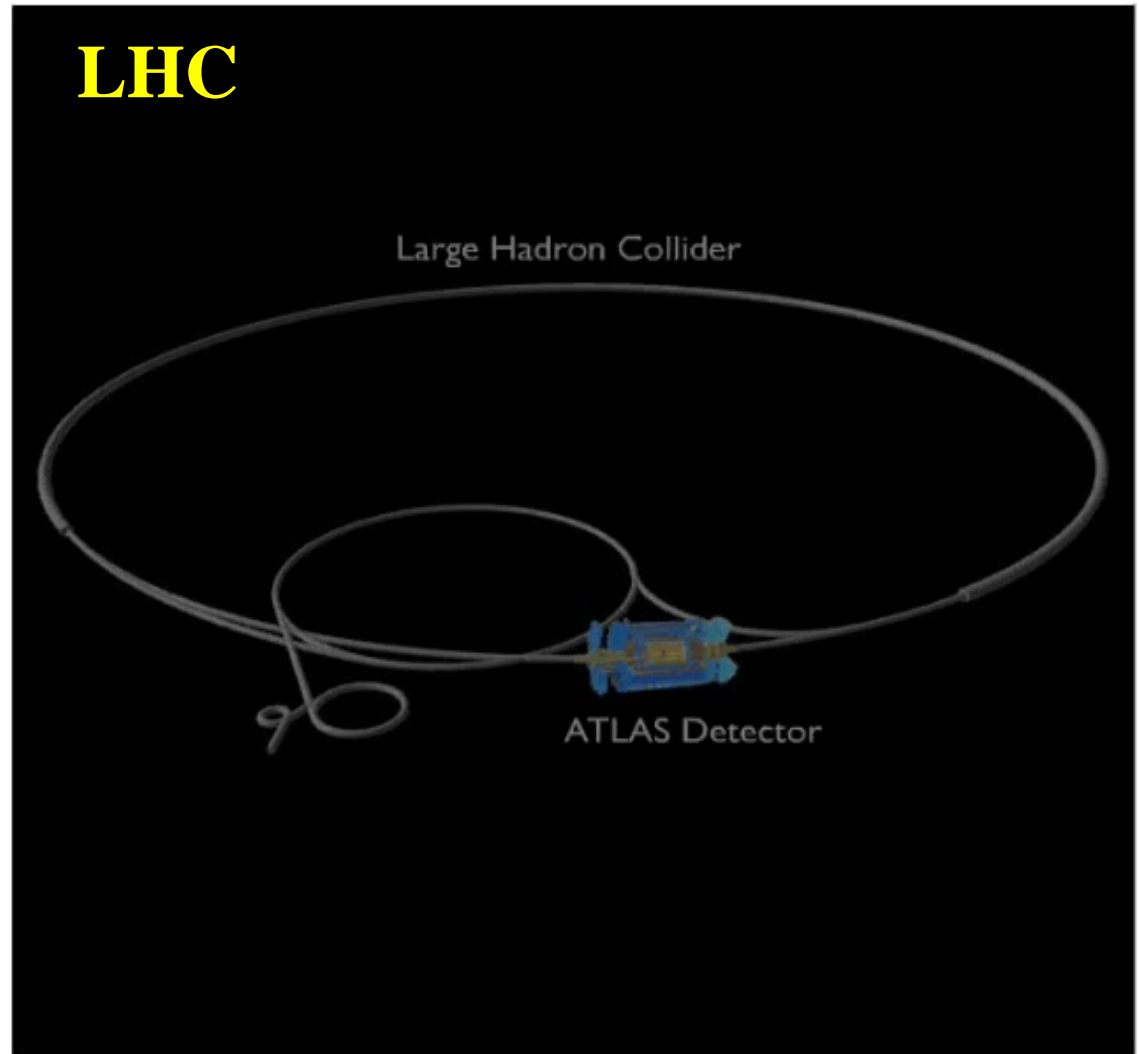
**Linac**  
injection 0 → 50 MeV

**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 ?

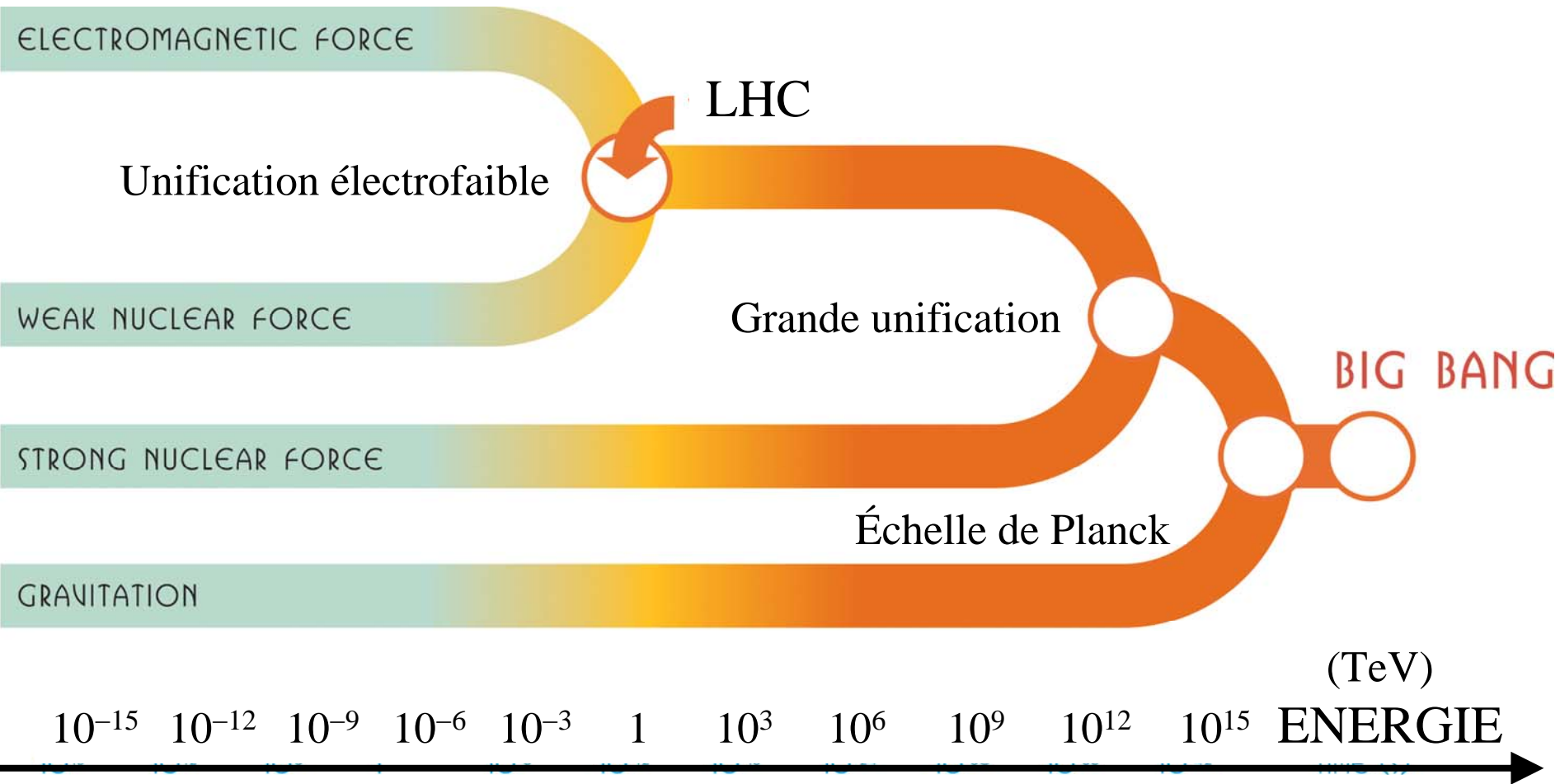
Que se passe-t-il à l'échelle d'énergie de Planck ?

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

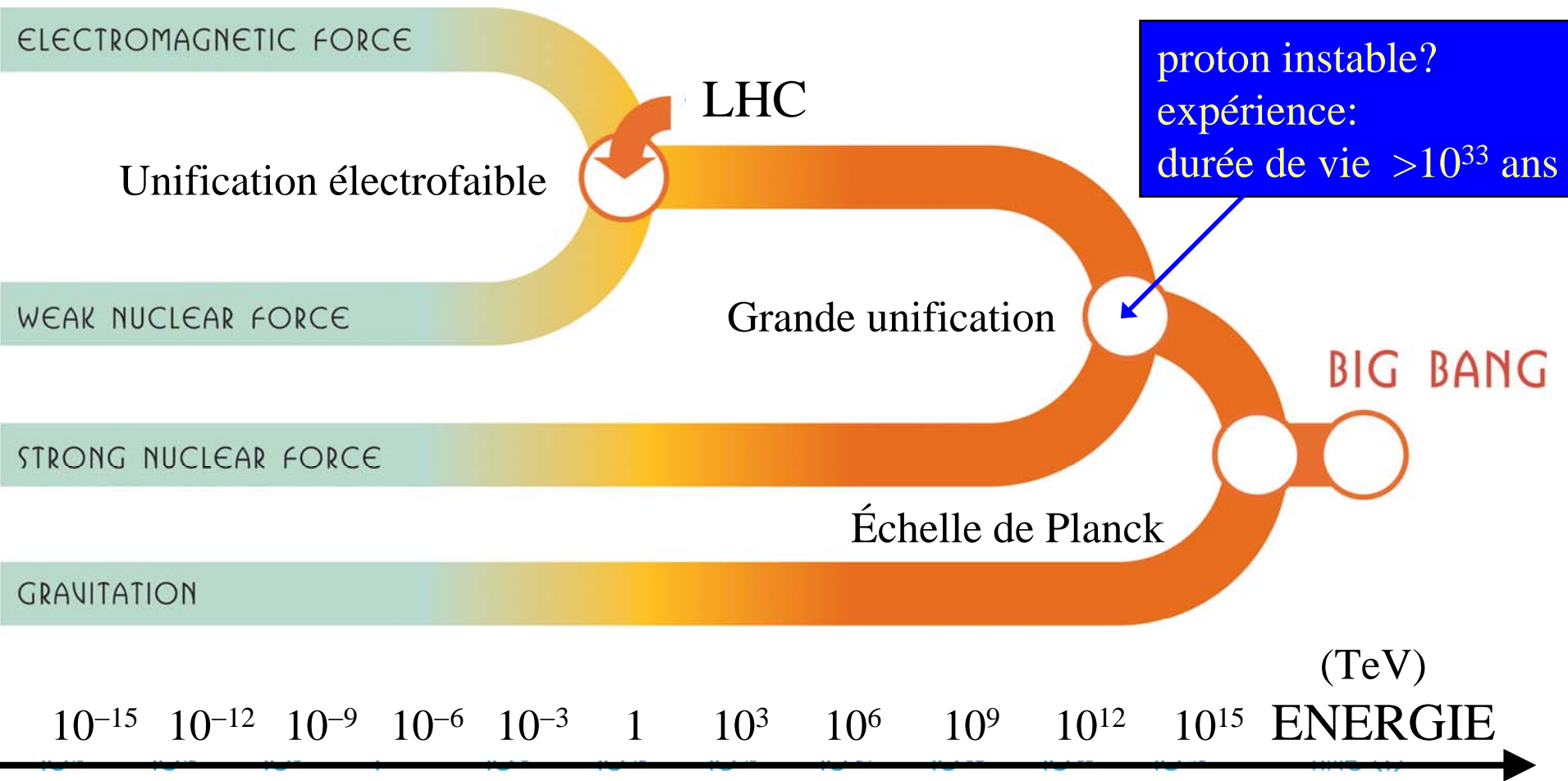
# L'origine de la masse et le boson de Higgs

- 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....

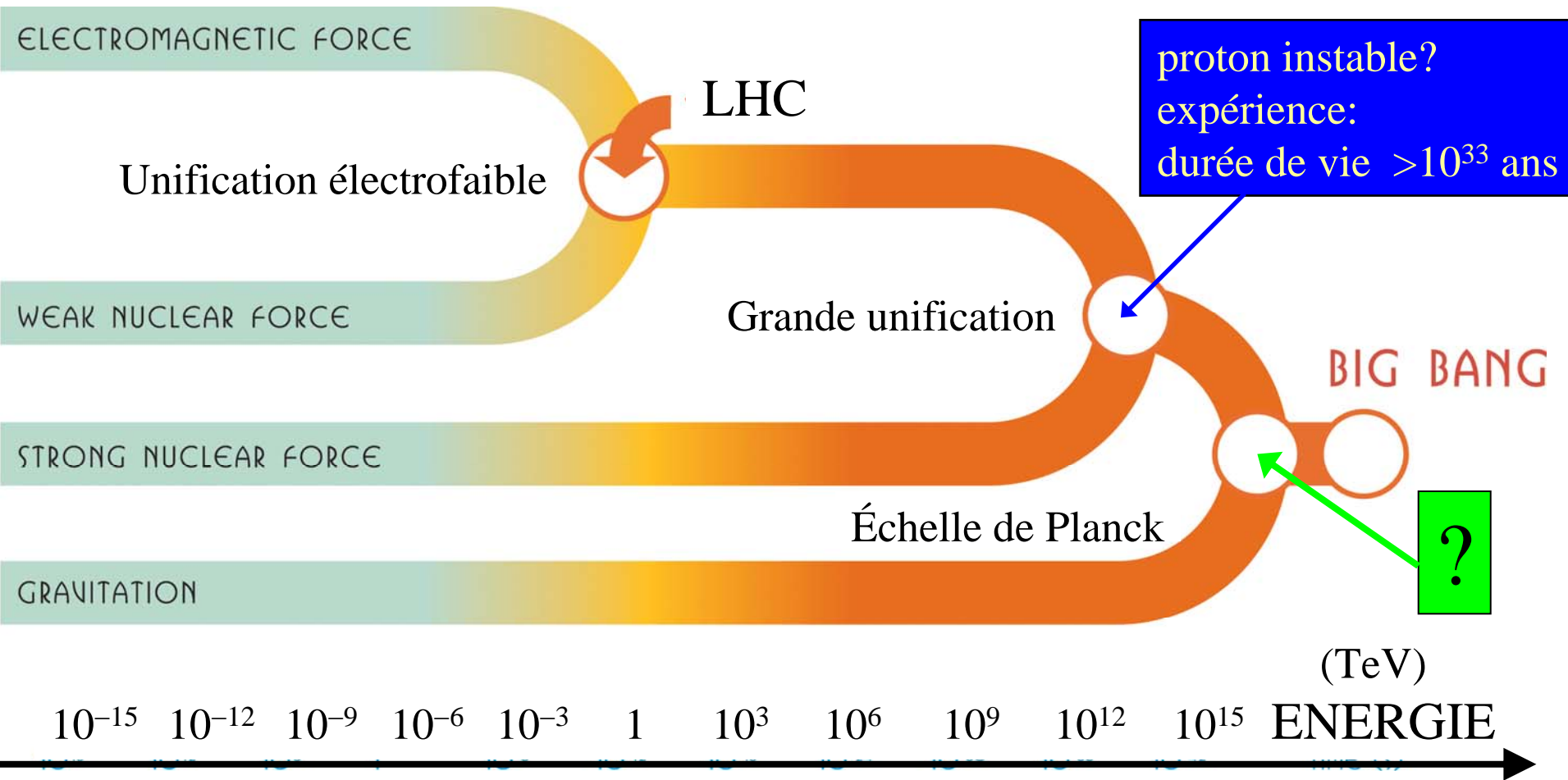
# Vers l'unification des forces fondamentales?



# Vers l'unification des forces fondamentales?

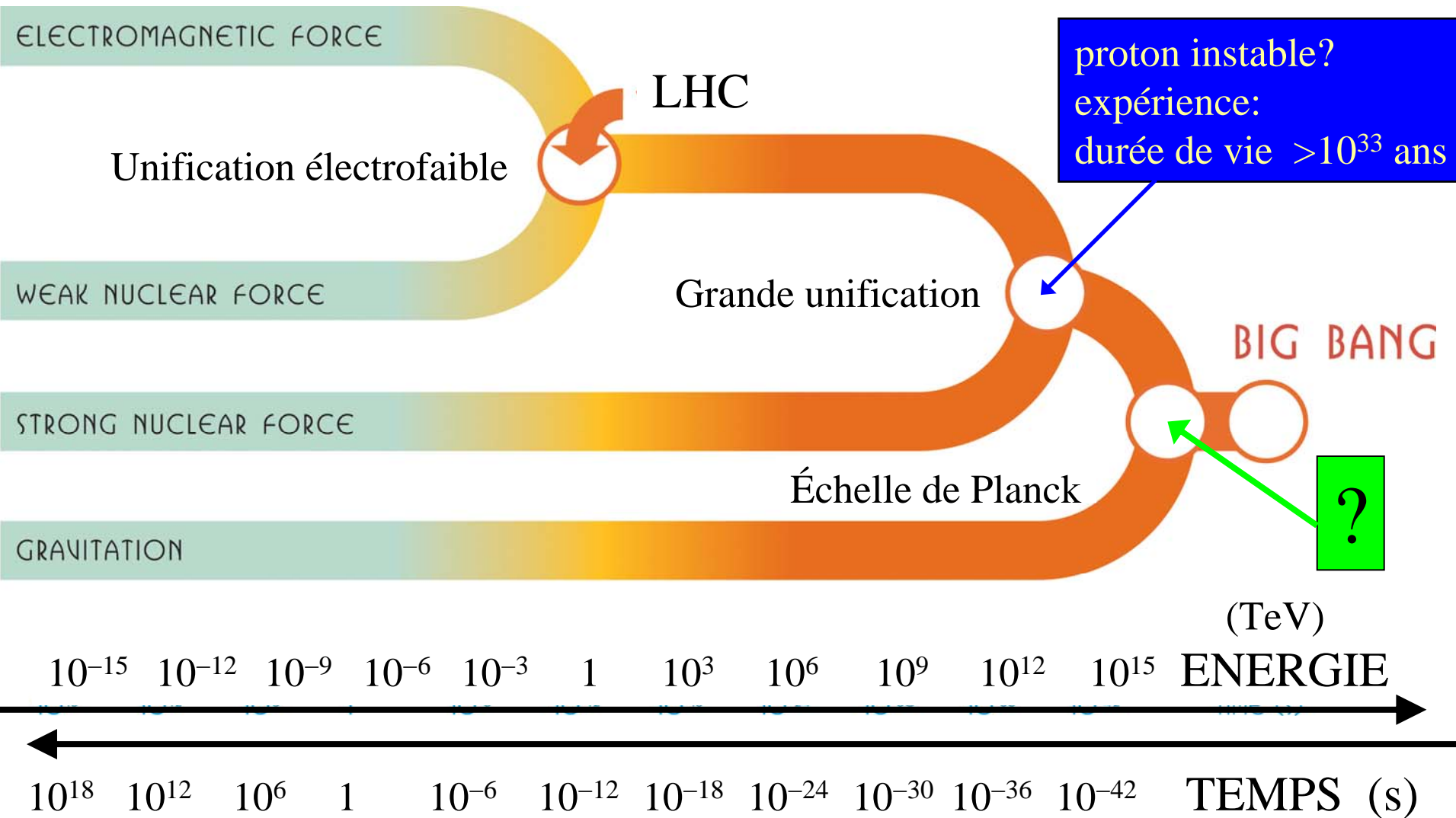


# Vers l'unification des forces fondamentales?

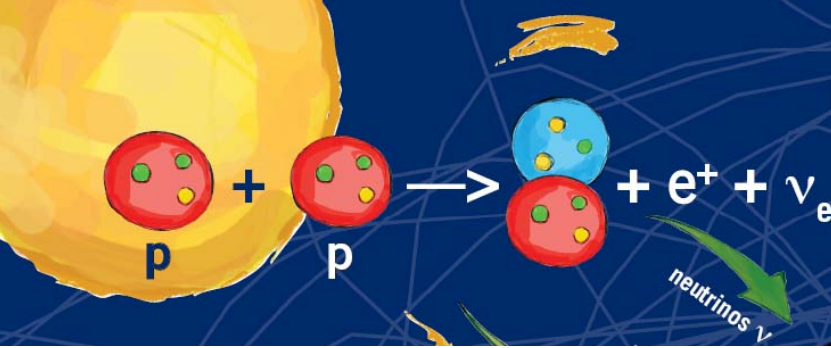




# Vers l'unification des forces fondamentales?



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

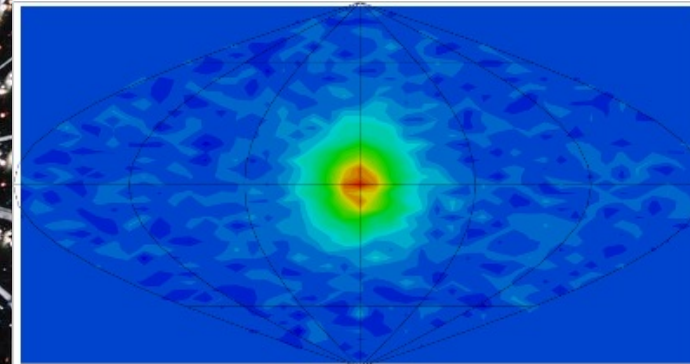
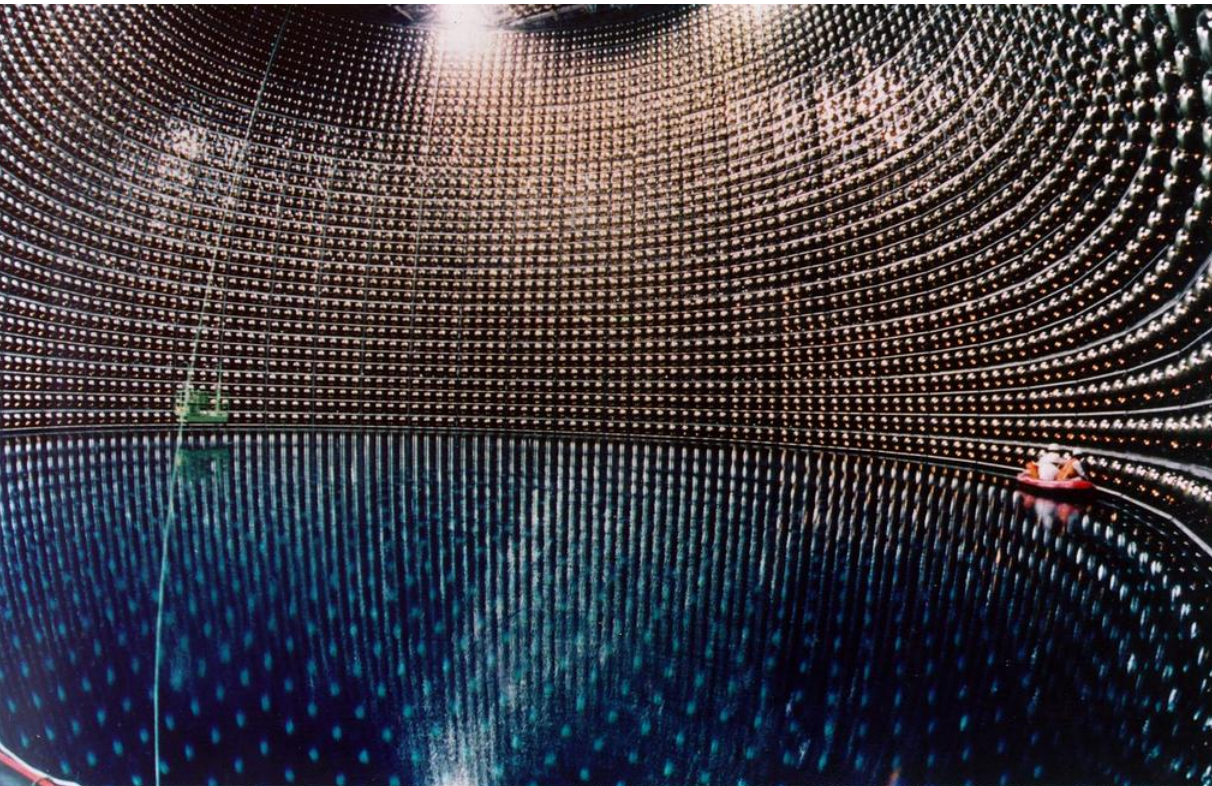


# Que nous disent les neutrinos? (1)

- 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 m<sup>3</sup> eau)

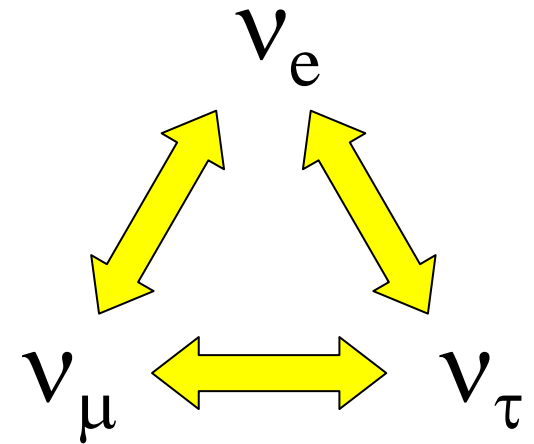
$20 \nu$  détectés /jour

photo du soleil prise  
1000 m sous terre



# Que nous disent les neutrinos? (2)

- énigme des neutrinos solaires (déficit)
  - problème similaire avec les  $\nu$  produits par les rayons cosmiques
  - explication: phénomène **d'oscillations entre les 3 types de  $\nu$**
  - **prouve que les  $\nu$  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?)

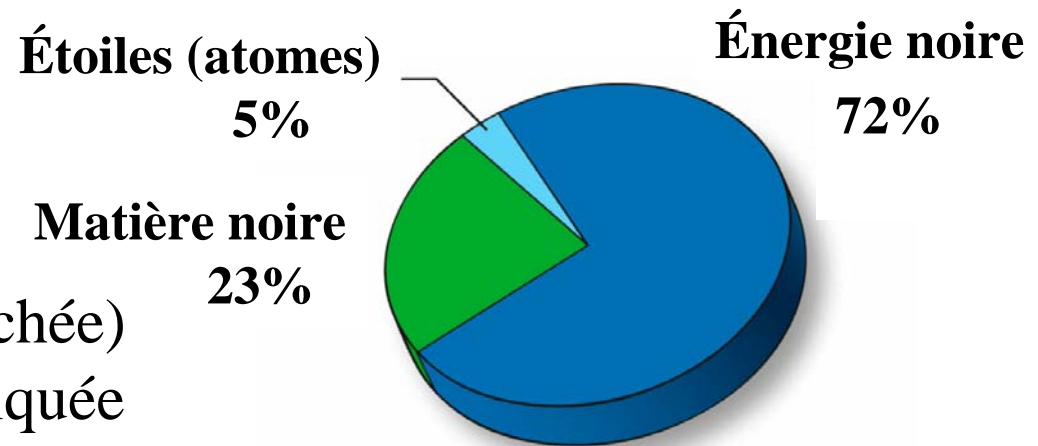


# La masse et l'énergie cachées

- 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

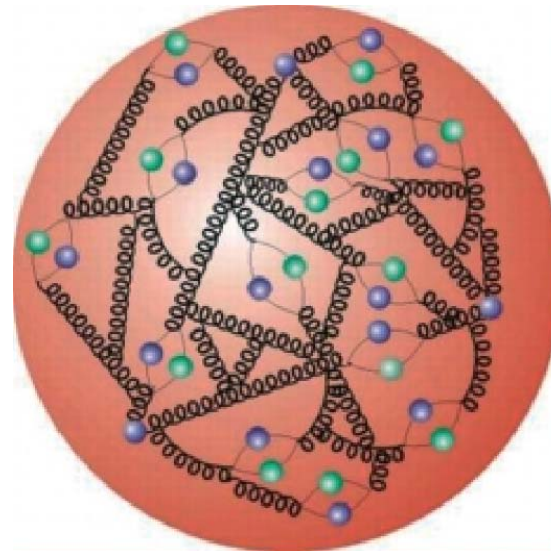
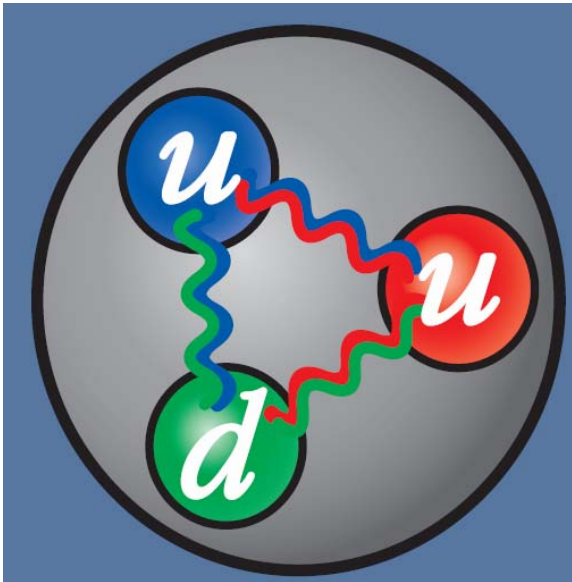






# Une vue encore plus réaliste du proton

- 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:

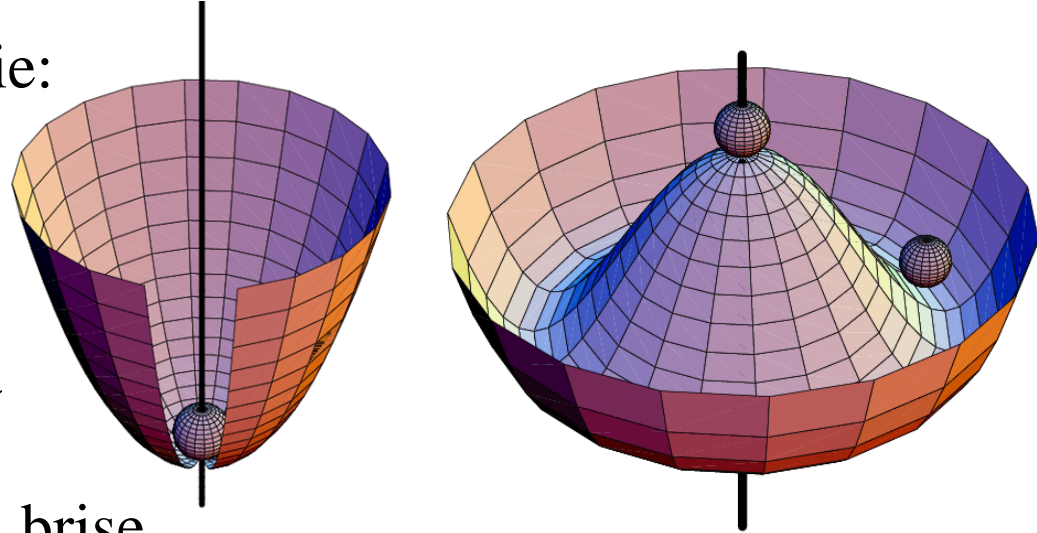
## (1) le problème

- 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  
 $M_W = 80 \text{ GeV}$      $M_Z = 91 \text{ GeV}$      $\sim 100 \times$ 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

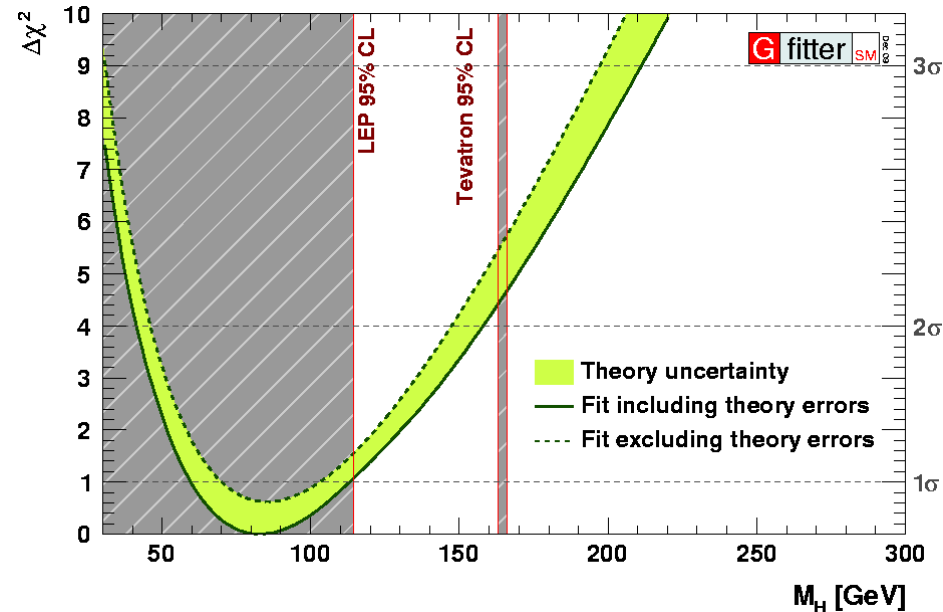
- brisure spontanée de symétrie:  
ex. bille dans un “puits de potentiel” à symétrie axiale
- mécanisme de Higgs dans la théorie électrofaible:  
nouveau champ introduit qui brise la symétrie de jauge pour la solution stable
- en fait le mécanisme génère des masses pour toutes les particules
- ceci implique 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