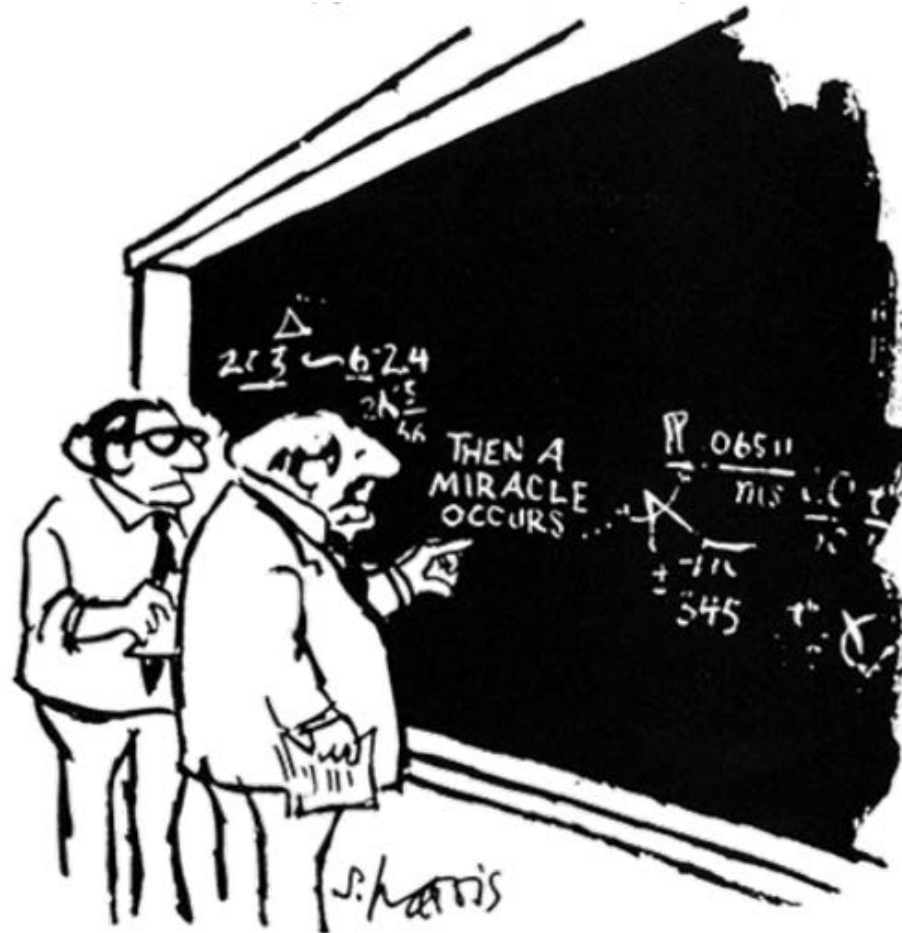


# Physique des particules

MASTER 1 de physique

Université Joseph Fourier – Grenoble I

<http://lpsc.in2p3.fr/atlas/bclement/M1Particules>



"I think you should be more explicit here in step two."

# Au-delà du Modèle Standard

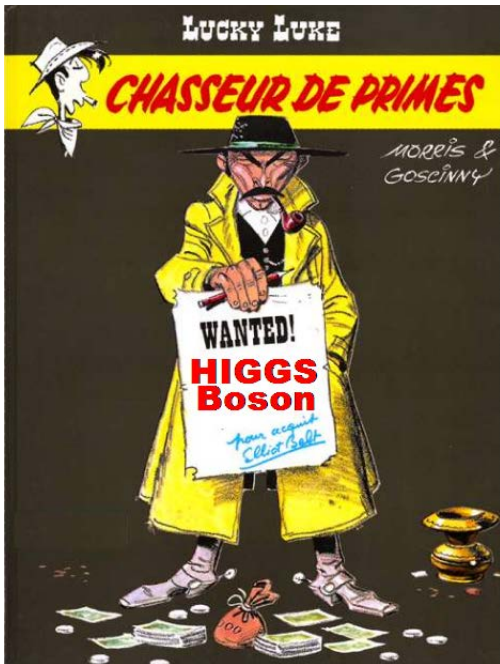
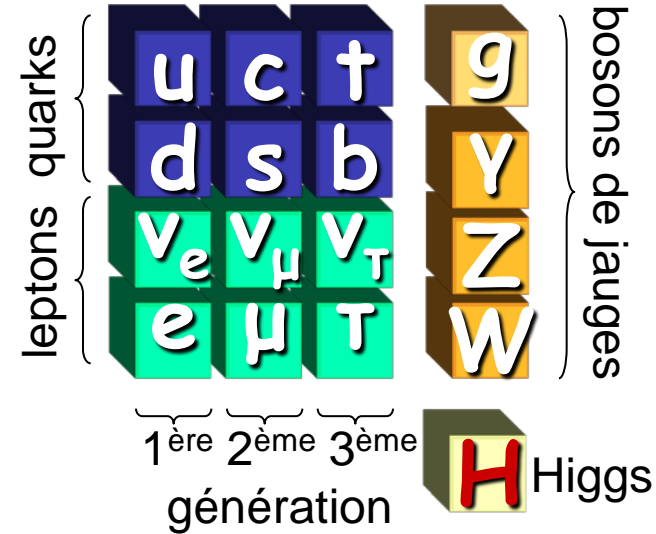


"I think you should be more explicit here in step two."

# Le Modèle Standard

- Théorie quantique des champs (relativistes)
- Invariance de jauge du lagrangien:  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$
- Bosons W, Z massifs : brisure spontanée de la symétrie  $SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{EM}$
- Couplage Higgs/fermions : fermions massifs

## Mécanisme de HIGGS



## Etat des lieux

Tout les fermions et les vecteurs ont été observés :  
**W/Z : 1983, top: 1995,  $\nu_\tau$  : 2001**

Tests de précision des secteurs électrofaible et fort: LEP, HERA, PEP (BaBar), KEK (Belle), TeVatron

En cours :  
**LHC**

- Etude du **boson de Higgs**
- Propriétés du **quark top**
- Améliorer les **mesures EW** :  $m_W$
- QCD** à haute et basse énergie
- Physique des **saveurs lourdes** (b,c)

# 19 (24) Paramètres libres

**Paramètre libre** : dont la valeur n'est pas prédite par le modèle  
uniquement accessible par la mesure !!!

## Théories de jauge:

Les couplages ne sont pas fixés par la théorie : 3 interactions

$\alpha_{\text{Strong}}$ ,  $\alpha_{\text{EM}}$ ,  $\alpha_{\text{Weak}}$

## Masses des fermions :

Couplages (de Yukawa) au champ de Higgs : 9(+3) fermions massifs

$m_u, m_d, m_s, m_c, m_b, m_t, m_e, m_\mu, m_\tau, (m_{\nu e}, m_{\nu \mu}, m_{\nu \tau})$

## Masses des bosons faible et des fermions :

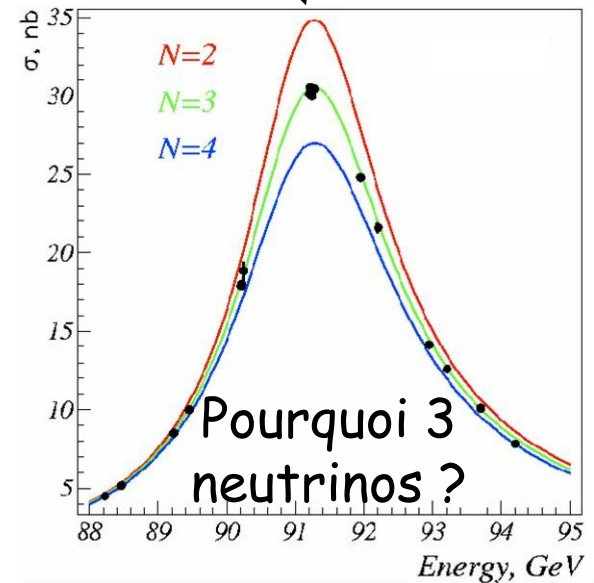
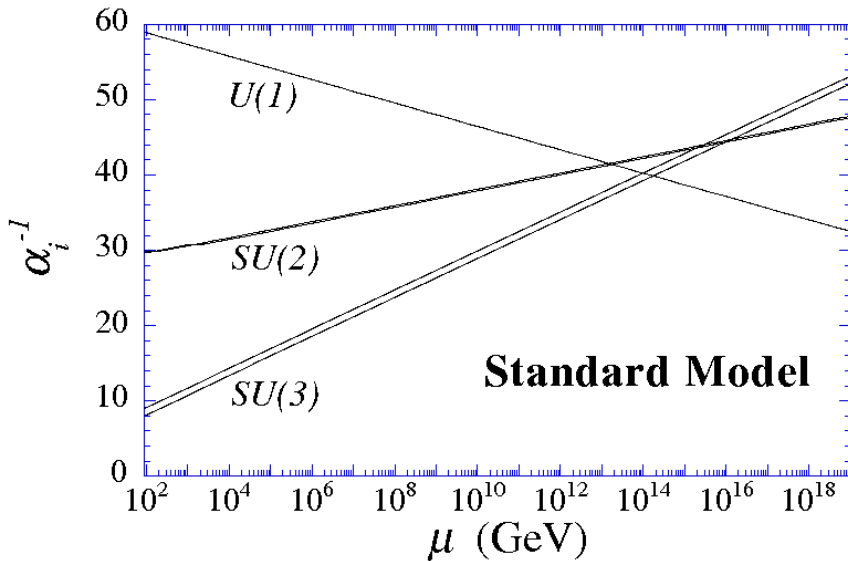
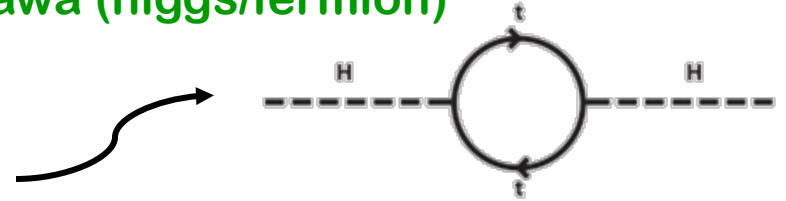
Mécanisme de Higgs : 2 paramètres libres dans le potentiel de Higgs  
la masse  $m_H$  et l'autocouplage  $\lambda$

**Mélanges de saveurs** : matrices CKM (3 angles +1 phase) et PMNS (3 angles +1 phase)

Violation de CP par l'interaction forte : 1 phase (=0 ?)

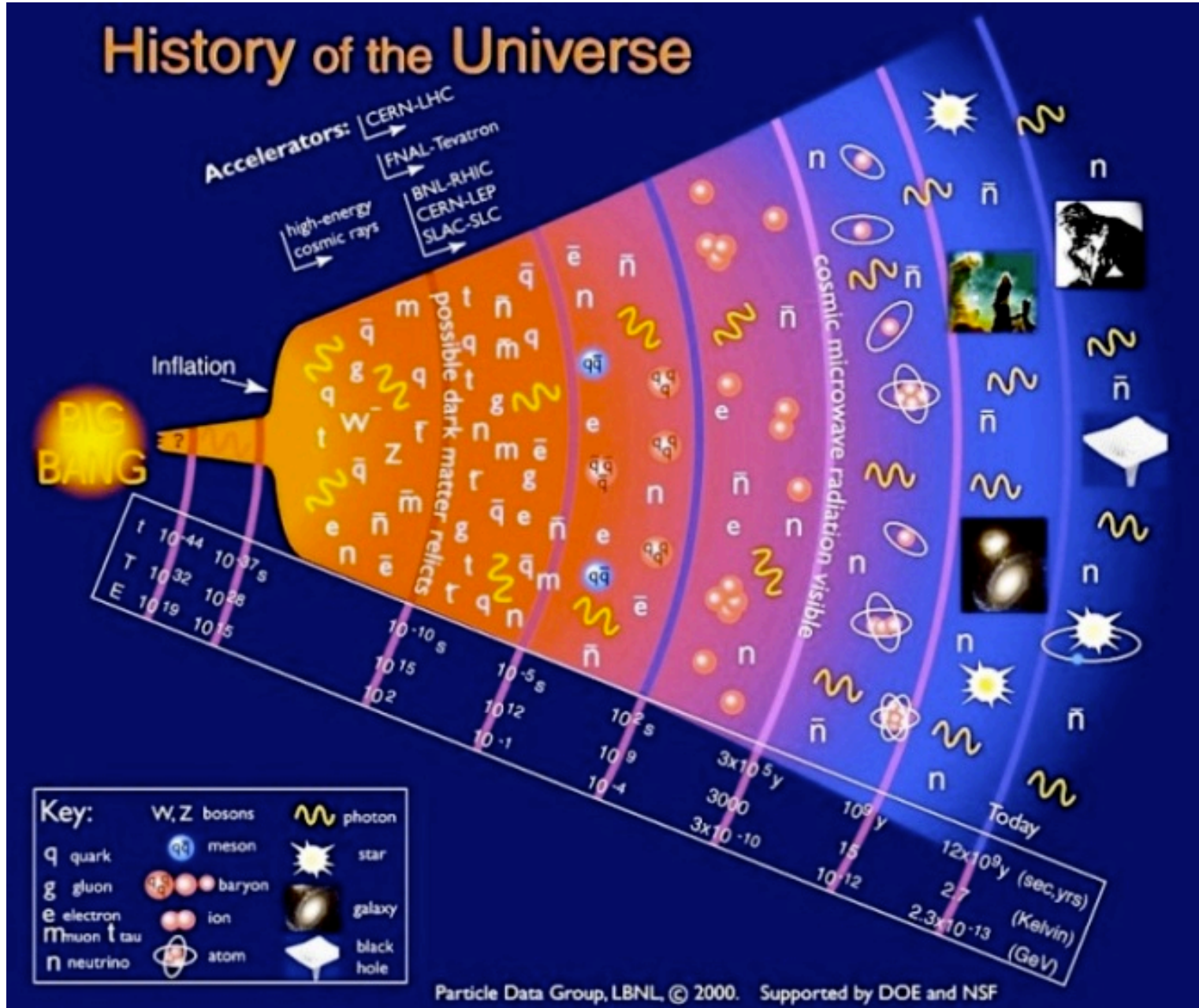
# Les limitations

- 19 paramètres libres (masses, couplages, mélanges) : TROP
  - > masses non prédites : couplages de Yukawa (higgs/fermion) arbitraires
- Pas de masses de neutrinos
  - > n'explique pas les oscillations
- Divergences quadratiques des corrections radiatives à la masse du boson de Higgs : problème de hiérarchie
  - > ajustement fin des paramètres pour l'éviter
- Pas d'explications du nombre de familles
- Pas d'unification des couplages à haute énergie
- N'inclut pas la gravitation



**Modèle effectif, valable jusqu'à l'échelle du TeV**

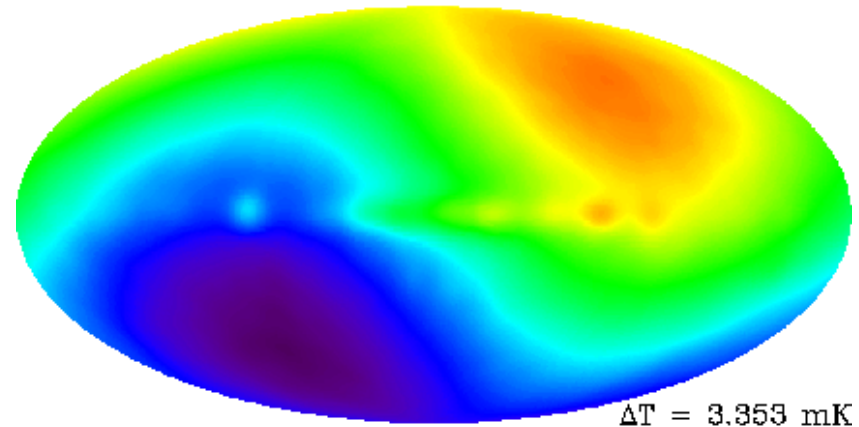
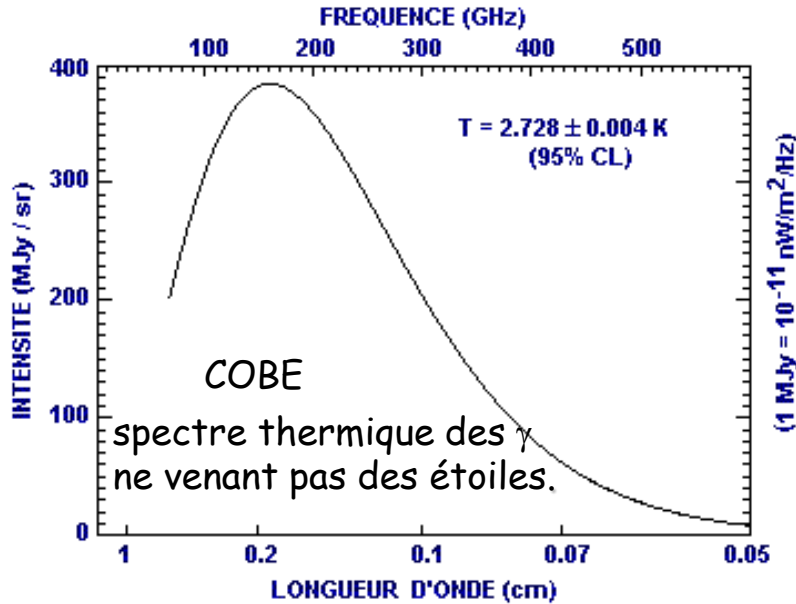
# Physique des particules et Cosmologie



# Fond diffus cosmologique

Photons libérés lors du découplage  
Plasma->Atomes

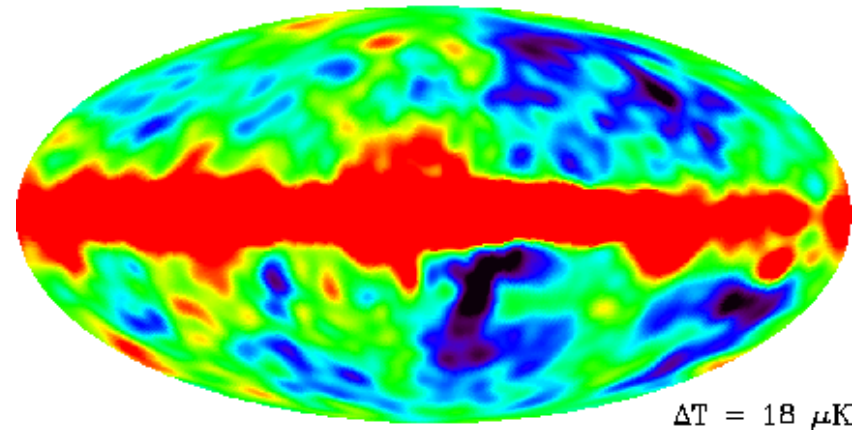
Photographie de l'univers primordial



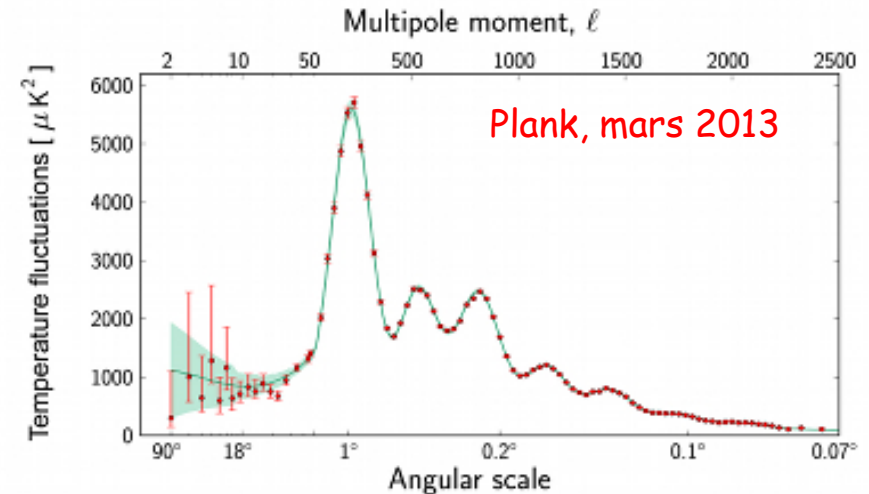
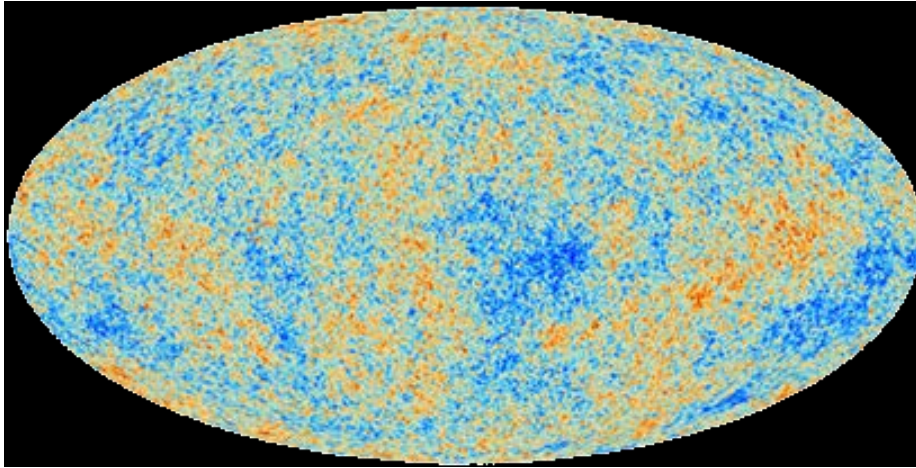
Aujourd'hui : Diminution d'énergie due à l'expansion de l'univers

Spectre de corps noir à 2.7K

Isotropie du rayonnement : équilibre thermique au moment du découplage...  
entre régions de l'univers non causales !!!



# Fond diffus cosmologique : Zoom



- il existe des **fluctuations de densité de l'ordre de  $10^{-5}$** , d'une taille de l'ordre de 100 Mpc (1 pc =  $3 \cdot 10^{16}$  m, distance typique entre deux galaxies  $\sim 6$  Mpc, amas de galaxie mesure  $\sim 50$  Mpc).
- Ces anisotropie sont les graine de la formations des structures de l'univers
- l'Univers primordial (379 000 ans) **n'est déjà plus homogène.**
- Etude des corrélation angulaires (spectre de puissance) permet de contraindre la plupart des paramètres cosmologiques.



# Géométrie de l'univers

## Métrie de Robertson et Walker :

$$ds^2 = dt^2 - R^2(t) \left( dr^2/(1 - k r^2) + r^2 (dq^2 + \sin^2 q df^2) \right) \quad (\text{avec } c=1)$$

La géométrie et l'évolution de l'Univers sont décrites par deux paramètres :

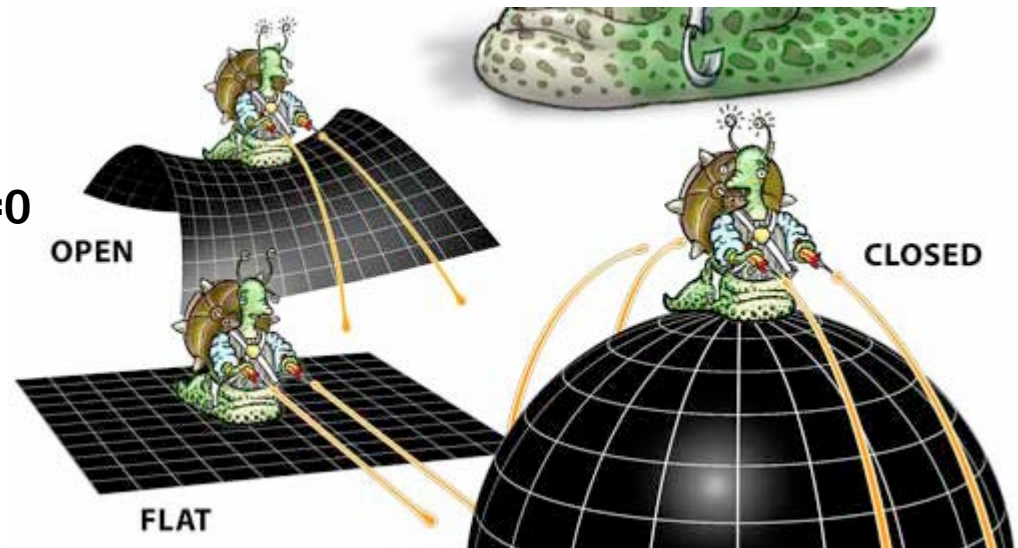
**la courbure  $k$  de l'espace-temps**, prend les valeurs discrètes 0 (géométrie plate), -1 (Univers ouvert) ou +1 (Univers fermé).

**le paramètre d'échelle  $a(t) = R(t) / R_0$**  paramétrise l'expansion de l'Univers, il est proportionnel aux distances intergalactiques ( $R_0 =$  maintenant).

On peut déterminer, en relativité générale une densité critique de matière dans l'univers telle que  $k=0$  (univers plat) :  $\rho_c$

La densité de matière dans l'univers est alors :

$$\Omega_{\text{tot}} = \rho / \rho_c$$



# CMB et paramètres cosmologiques

## WMAP Cosmological Parameters

Model:  $\Lambda$ CDM+SZ+lens

Data: wmap7

$10^2 \Omega_b h^2$	$2.258^{+0.057}_{-0.056}$	$1 - n_s$	$0.037 \pm 0.014$
$1 - n_s$	$0.0079 < 1 - n_s < 0.0642$ (95% CL)	$A_{\text{BAO}}(z = 0.35)$	$0.463^{+0.021}_{-0.020}$
$C_{220}$	$5763^{+38}_{-40}$	$d_A(z_{\text{eq}})$	$14281^{+158}_{-161}$ Mpc
$d_A(z_*)$	$14116^{+160}_{-163}$ Mpc	$\Delta_{\mathcal{R}}^2$	$(2.43 \pm 0.11) \times 10^{-9}$
$h$	$0.710 \pm 0.025$	$H_0$	$71.0 \pm 2.5$ km/s/Mpc
$k_{\text{eq}}$	$0.00974^{+0.00041}_{-0.00040}$	$\ell_{\text{eq}}$	$137.5 \pm 4.3$
$\ell_*$	$302.44 \pm 0.80$	$n_s$	$0.963 \pm 0.014$
$\Omega_b$	$0.0449 \pm 0.0028$	$\Omega_b h^2$	$0.02258^{+0.00057}_{-0.00056}$
$\Omega_c$	$0.222 \pm 0.026$	$\Omega_c h^2$	$0.1109 \pm 0.0056$
$\Omega_\Lambda$	$0.734 \pm 0.029$	$\Omega_{\text{m}}$	$0.266 \pm 0.029$
$\Omega_m h^2$	$0.1334^{+0.0056}_{-0.0055}$	$r_{\text{hor}}(z_{\text{dec}})$	$285.5 \pm 3.0$ Mpc
$r_s(z_d)$	$153.2 \pm 1.7$ Mpc	$r_s(z_d)/D_v(z = 0.2)$	$0.1922^{+0.0072}_{-0.0073}$
$r_s(z_d)/D_v(z = 0.35)$	$0.1153^{+0.0038}_{-0.0039}$	$r_s(z_*)$	$146.6^{+1.5}_{-1.6}$ Mpc
$R$	$1.719 \pm 0.019$	$\sigma_8$	$0.801 \pm 0.030$
$A_{\text{SZ}}$	$0.97^{+0.68}_{-0.97}$	$t_0$	$13.75 \pm 0.13$ Gyr
$\tau$	$0.088 \pm 0.015$	$\theta_*$	$0.010388 \pm 0.000027$
$\theta_*$	$0.5952 \pm 0.0016$ °	$t_*$	$379164^{+5187}_{-5243}$ yr
$z_{\text{dec}}$	$1088.2 \pm 1.2$	$z_d$	$1020.3 \pm 1.4$
$z_{\text{eq}}$	$3196^{+134}_{-133}$	$z_{\text{reion}}$	$10.5 \pm 1.2$
$z_*$	$1090.79^{+0.94}_{-0.92}$		

# La matière dans l'univers

$W_{\text{lumineuse}} = 0.003$  : Densité estimée des objets visibles (étoiles,...)

$W_{\text{matière}} = 0.27$  : Densité de la matière (=fermions)

$W_{\text{baryon}} = 0.05$  : Densité des baryons (neutrons, protons)

$W_{\text{total}} = 1$  : Densité totale

$\Rightarrow W_{\text{baryon}} \gg W_{\text{lumineux}}$

Donc il y a des **sources inconnues de baryons non lumineux** dans l'Univers.

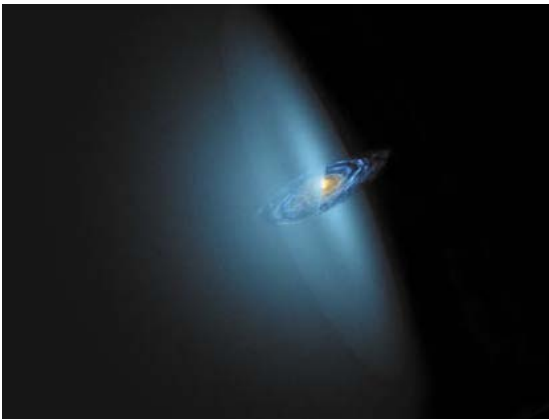
$\Rightarrow W_{\text{baryon}} \ll W_{\text{matière}}$

il y a une **source inconnue de matière non baryonique** dans l'Univers :  
99 % de la matière dans l'Univers est non visible, de nature inconnue.

$\Rightarrow W_{\text{total}} - W_{\text{matière}} = 0.68$

Les  $\frac{3}{4}$  de l'univers ne sont pas composé de matière : "Energie noire" (ie personne ne sait ce que c'est)

# La matière dans l'univers

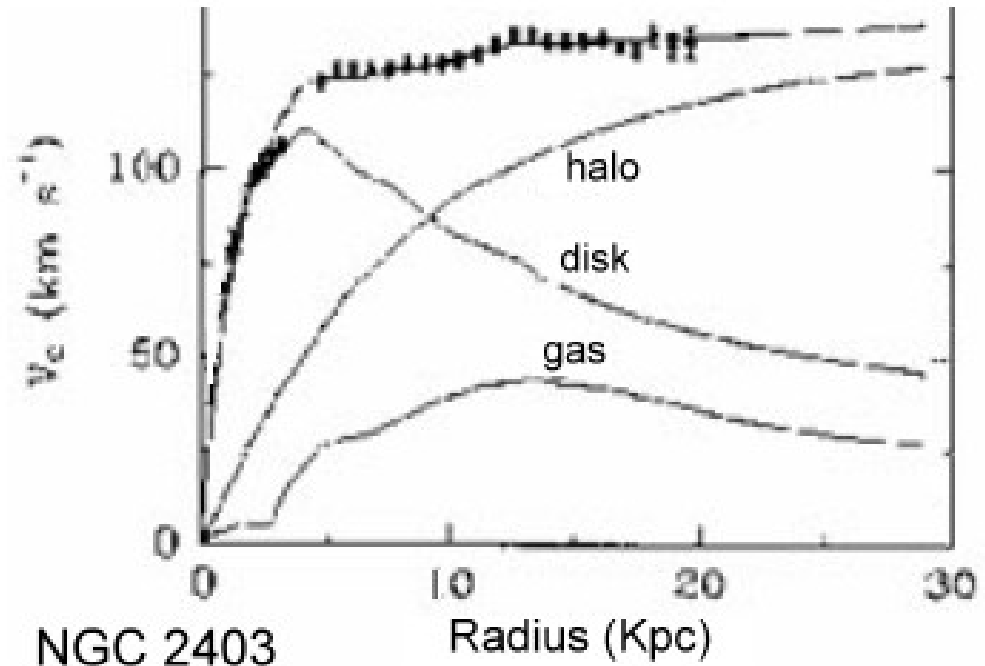
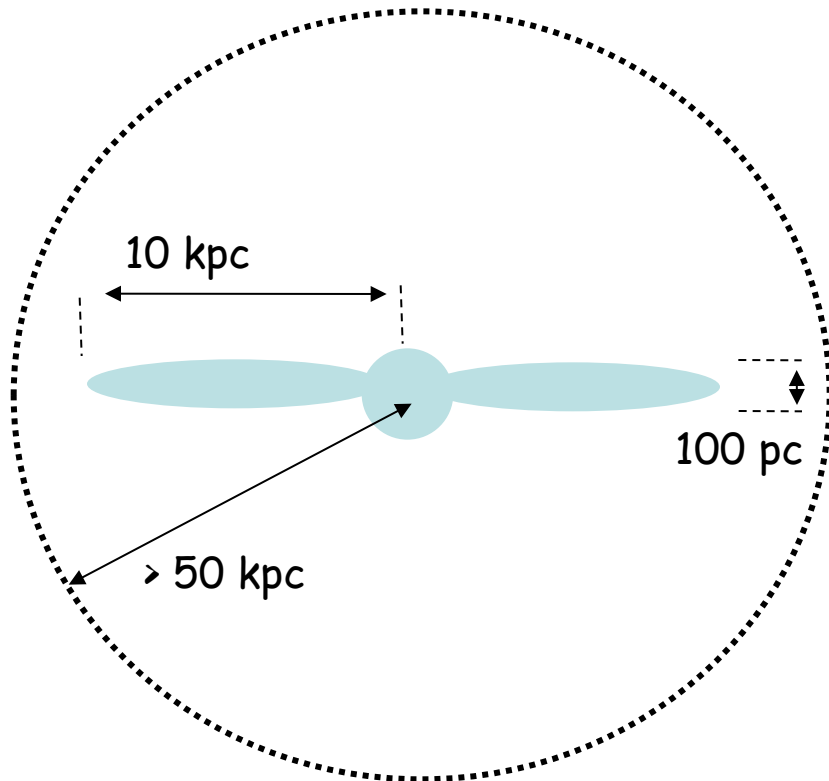


Courbes de rotation d'une galaxie spirale : vitesse de rotation des étoiles en fonction de la distance au centre

-> Halo de matière noire autour des galaxies

Composition : WIMP (Weakly interacting massive particles)

Tentative de détection directe et indirecte de ces particules



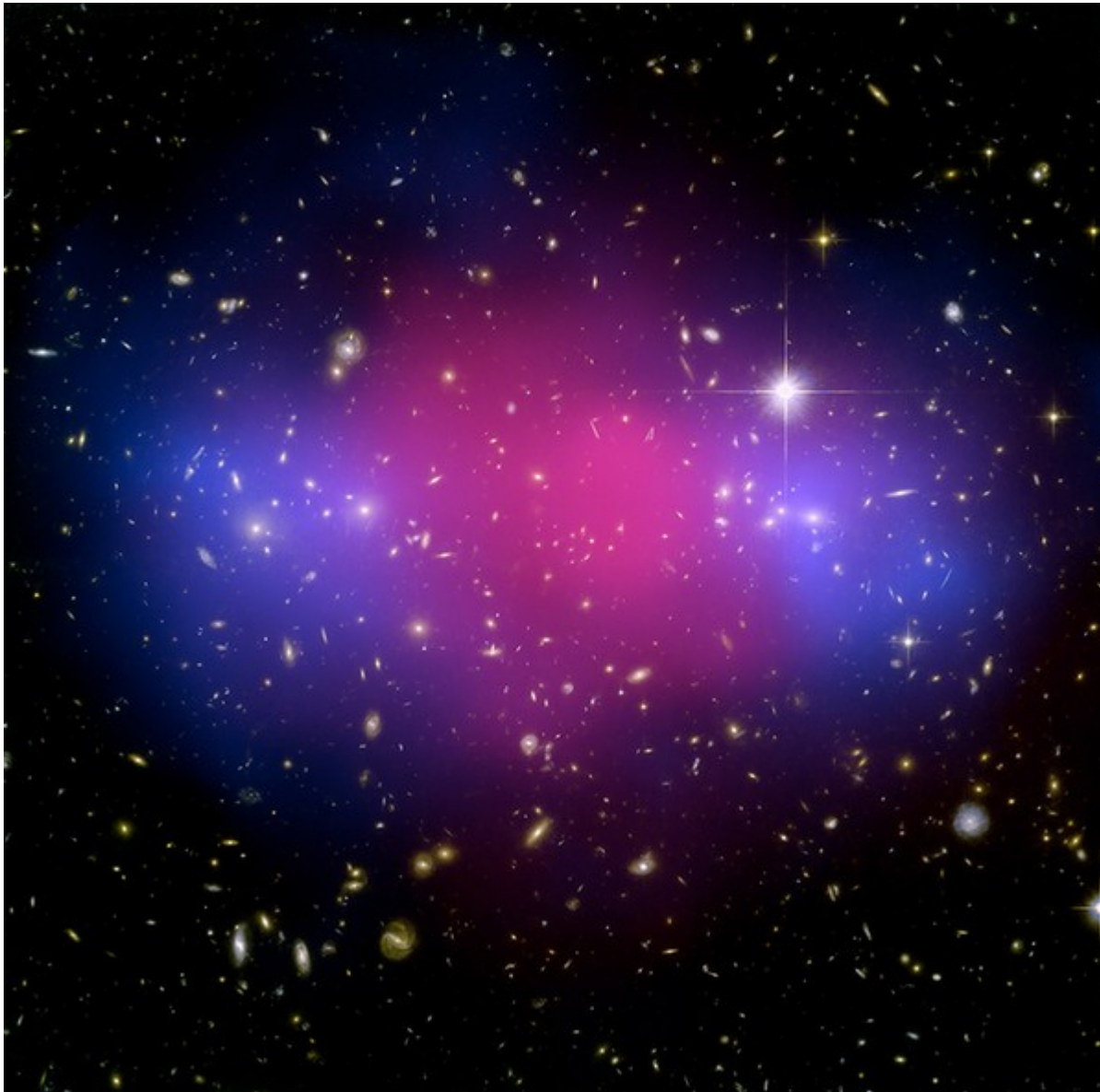
# La matière dans l'univers

**Collision d'amas de galaxies**

**Matière visible :**  
Galaxies (Hubble)

**Halo gazeux :** zones  
bleue (froid) et rose  
(chaud) (CHANDRA)

**Déformation  
gravitationnelle** des  
images de Hubble  
indique la présence de  
halo de matière sombre



# La supersymétrie

**Nouveau type de symétrie** ( $\neq$  symétries de jauge) :

**Symétrie Boson  $\leftrightarrow$  Fermion**

**Chaque particule du MS a un partenaire supersymétrique :**

**Quarks, leptons : fermions ( $s=1/2$ )  $\rightarrow$  Squarks, Slepton : boson ( $s=0$ )**

**Bosons de Jauges : bosons ( $s=1$ )  $\rightarrow$  Jauginos : fermions ( $s=1/2$ )**

**Bosons de Higgs : bosons ( $s=0$ )  $\rightarrow$  Higgsinos : fermions ( $s=1/2$ )**

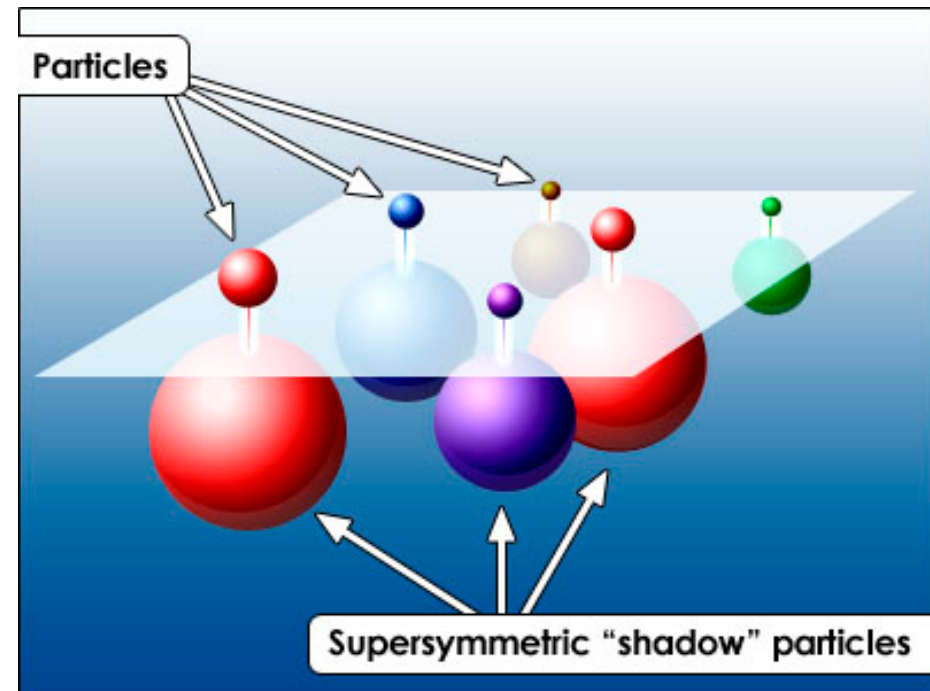
**Secteur de Higgs :**

5 états physiques au lieu de 1  
 $h^0, H^0, A^0, H^+, H^-$

Mélanges Higgsinos Jauginos  
EW (Photino, Wino, Zino)

$\rightarrow$  4 charginos  $\tilde{\chi}_{1,2}^{\pm}$

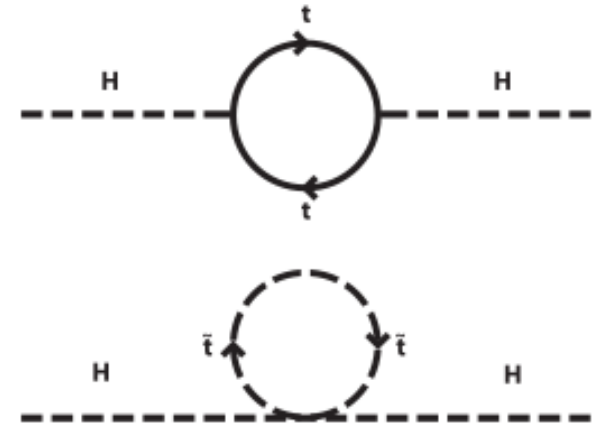
$\rightarrow$  4 neutralinos :  $\tilde{\chi}_{1,2,3,4}^0$



# La supersymétrie

## Suppression de divergence quadratique

Les boucle de bosons compensent les boucles de fermions



## Unification des couplages à haute énergie

Origine commune des couplages

## Symétrie brisée

Aucune particules SUSY observées :

$$m_{\text{SUSY}} \neq m_{\text{MS}}$$

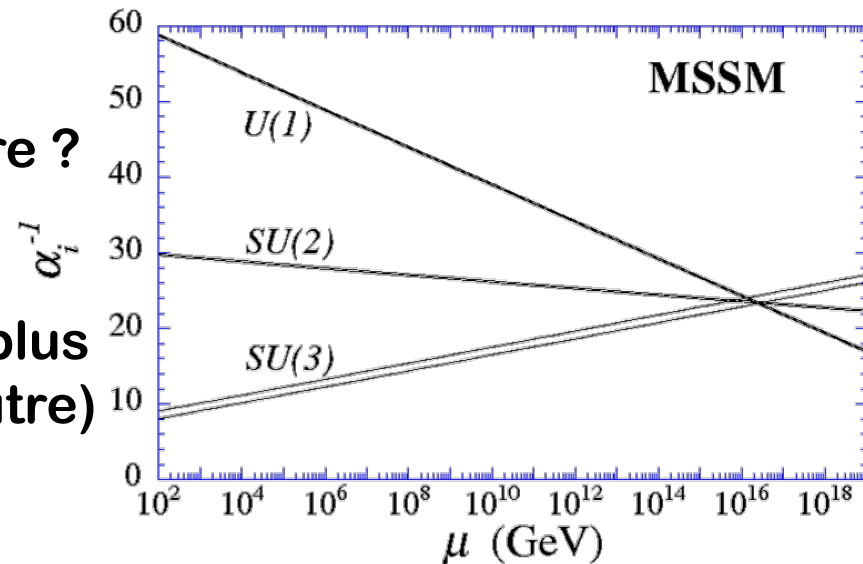
Symétrie brisée  $\rightarrow$  Mécanisme de brisure ?

## Candidat matière noire

Selon les modèles la particule SUSY la plus légère est stable (et électriquement neutre)

## +de 120 paramètres

réduits à 5 ou 6 selon le mécanisme de brisure.



# Grande unification

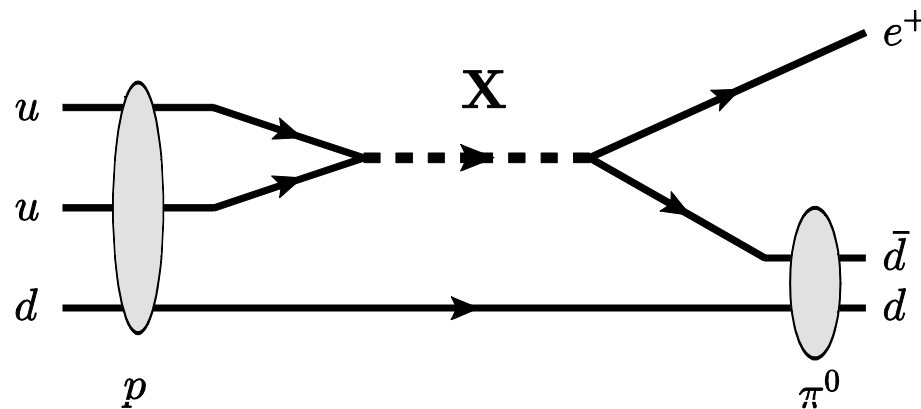
## Ajout de symétries de jauge plus large, contenant le MS

$$U(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y \subset G_{\text{GUT}}$$

- 1 seule constante de couplage
- couplages quarks/fermions : proton instable  $\rightarrow$  bosons très massif pour rendre la désintégration du proton très rare

## Symétries brisée

- bosons de type « Higgs » supplémentaires
- bosons de jauge massifs :  $Z'$ ,  $W'$
- bosons de jauge d'un nouveau type : LeptoQuark : couplent les quarks aux leptons.

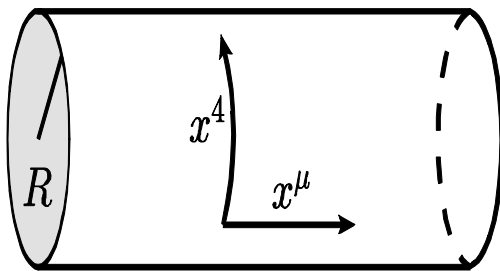
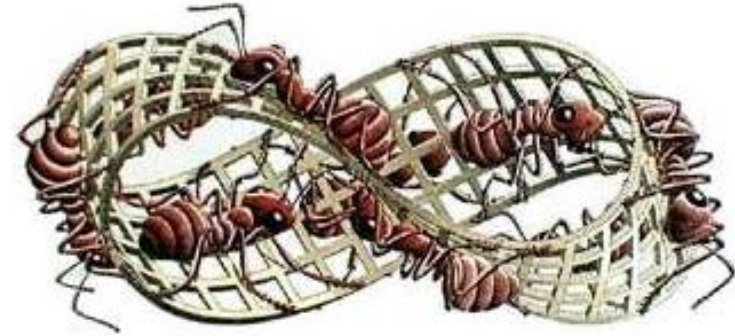




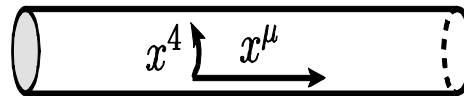
# Dimensions supplémentaires

## Ajout de dimensions d'espaces

- dimensions « compactifiés » : pas d'effets macroscopiques
- seules certaines particules se propagent dans ces dimensions (par exemple seul le graviton : « dilue » la constante de gravitation)



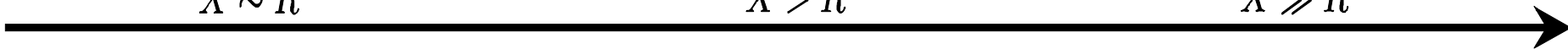
$$X \sim R$$



$$X > R$$



$$X \gg R$$



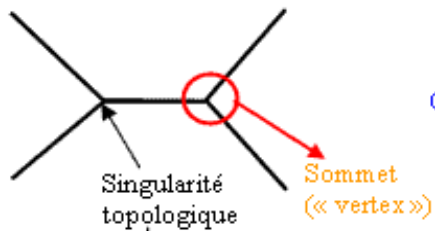
# Encore au-delà...

**Beaucoup de modèles théoriques combinent ces différentes solutions:**

- Supersymétrie
- Grande unification
- Dimensions supplémentaires

**Un exemple particulier : Théorie des supercordes**

- particule ponctuelle  $\rightarrow$  corde (ouverte ou fermée)
- 10 dimensions d'espace + 1 de temps :
  - $\rightarrow$  comment compactifier  $10 \rightarrow 4$  ?  $\rightarrow$  Variétés de Calabi-Yau
  - $\rightarrow$  aucune prédiction phénoménologique : joujou mathématique



Ordre 0



Ordre 1



Ordre 2

