



Une introduction a la physique des particules en dimensions supplementaires



Charles BOUCHART

Laboratoire de Physique Théorique, Orsay

JJC 2008 – Saint Flour - 01/12/2008



JOURNÉES JEUNES CHERCHEURS 2008
Société Française de Physique et Société Belge de Physique
SAINTE FLORENTINE

- **Une histoire du nombre de dimensions**
- **Que sont ces dimensions supplémentaires ?**
- **Le « grand » problème du modèle standard**
- **Le modèle de Randall & Sundrum**
- **Quelles conséquences en physique des particules**



Une Histoire du Nombre de Dimensions



Une Histoire du Nombre de Dimensions

→ 1600's - J. Kepler : identifie les 3 dimensions d'espace a la Trinité Chrétienne (pere, fils et saint esprit)



Johannes Kepler
1571 - 1630

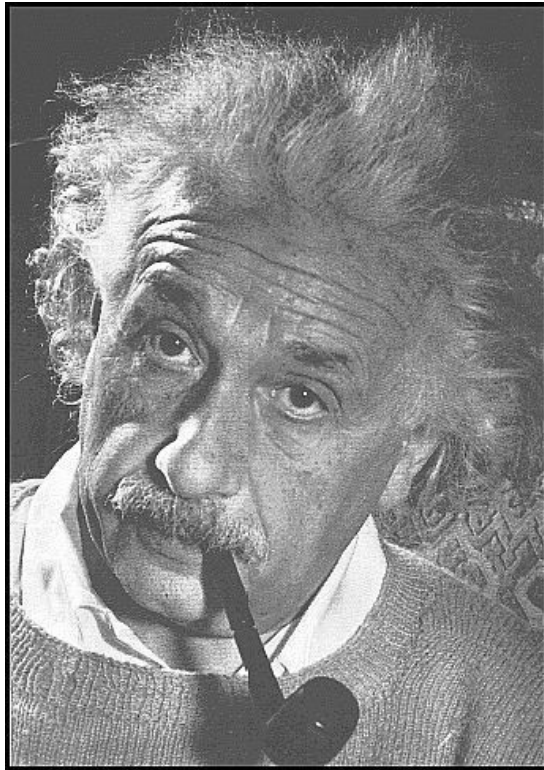


El Greco (1541 – 1614)
La Trinite (1577)



Une Histoire du Nombre de Dimensions

- 1905 - A. Einstein : relativite du temps
- 1911 - H. Minkowski : espace-temps de Minkowski a 4 dimensions



Albert Einstein
1879 - 1955

Hermann Minkowski
1864 - 1909



4D metrique

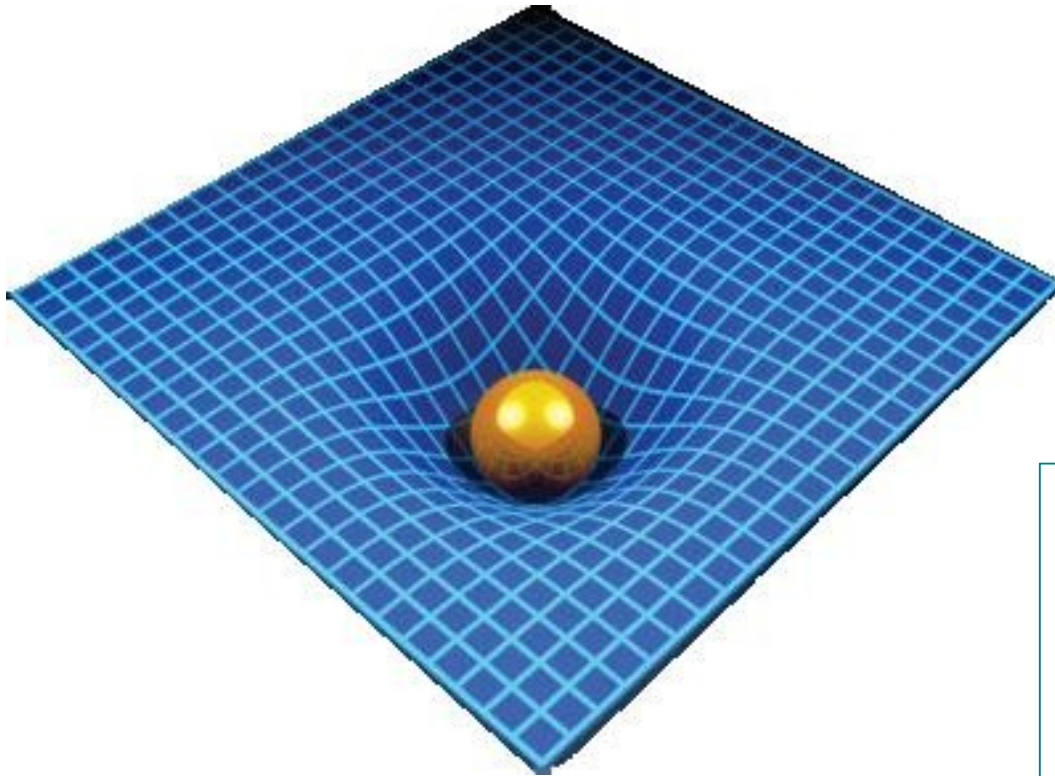
$$\eta_{\mu\nu} \equiv \begin{pmatrix} +1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$



Une Histoire du Nombre de Dimensions

→ 1915 - A. Einstein : espace-temps dynamique en Relativité Générale



Action d'Einstein-Hilbert

$$n_{\mu\nu} \Rightarrow g_{\mu\nu}$$

$$S_{grav.} = \int d^4x \sqrt{|g|} R$$



Une Histoire du Nombre de Dimensions

→ 1920's - G. Nordström; T. Kaluza et O. Klein :
tente d'unifier la *RG* et l'*EM* dans 5 dimensions



métrie 4D

$$G^{AB} \equiv \begin{pmatrix} g^{\mu\nu} & A^\mu \\ A^\nu & \phi^2 \end{pmatrix}$$

Potentiel vecteur de
l'electromagnetisme ?

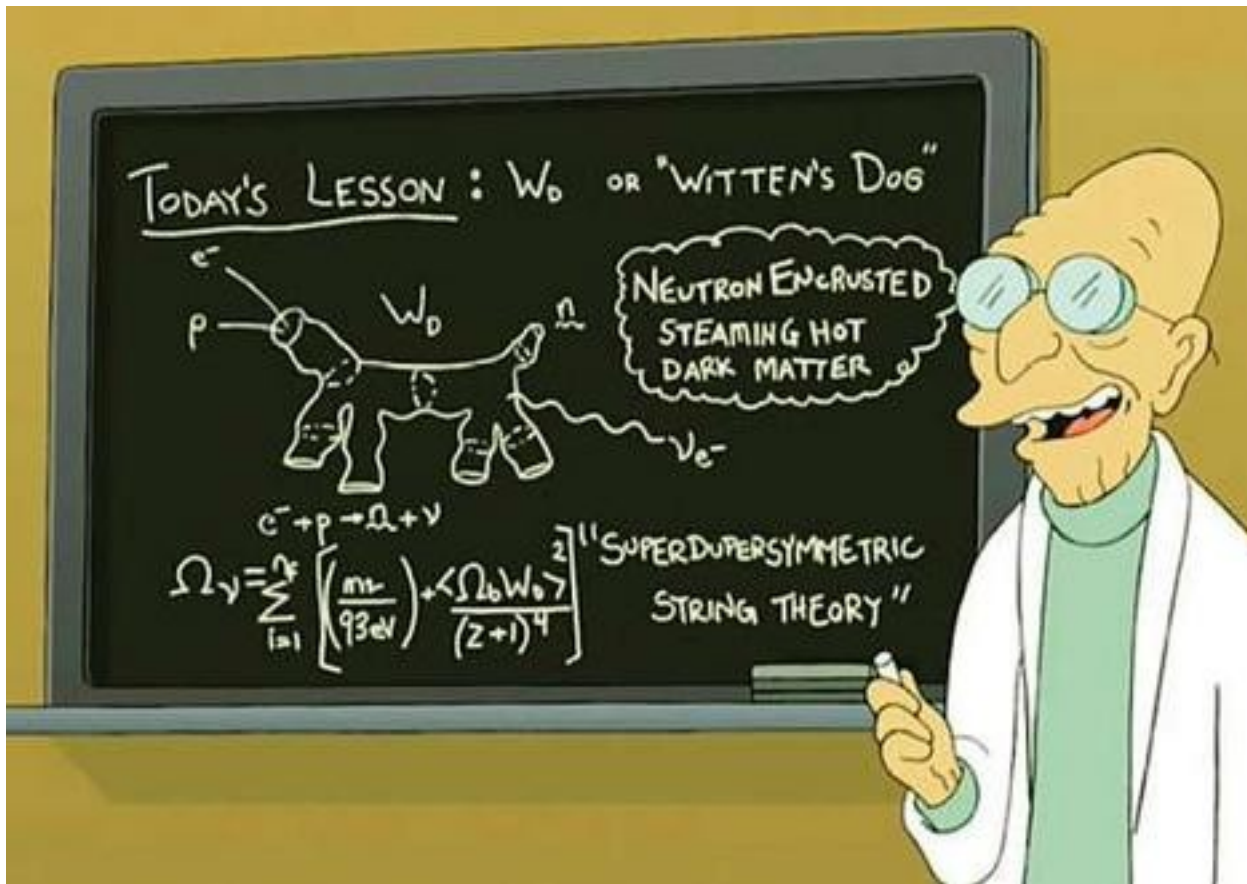
Introduction d'un
nouveau scalaire

→ 5Dim. Gravite ~ 4Dim. (Gravite + Electromagnetisme + ϕ) !!!



Une Histoire du Nombre de Dimensions

- 1980's (Super)Cordes : *prédit* le nbr. de dim. supplémentaires
 - 4 + 22 pour les cordes dites *bosoniques*
 - 4 + 6 pour les modèles de *supercordes*



Prof. Hubert J. Farnsworth
(2841 – xxxx)

Futurama
saison 1,
episode 11,
« Mars University »

Le "chat de Schroedinger"
en theory des cordes



Une Histoire du Nombre de Dimensions

→ 1995's Construction de nombreux modeles a dimensions supplementaires

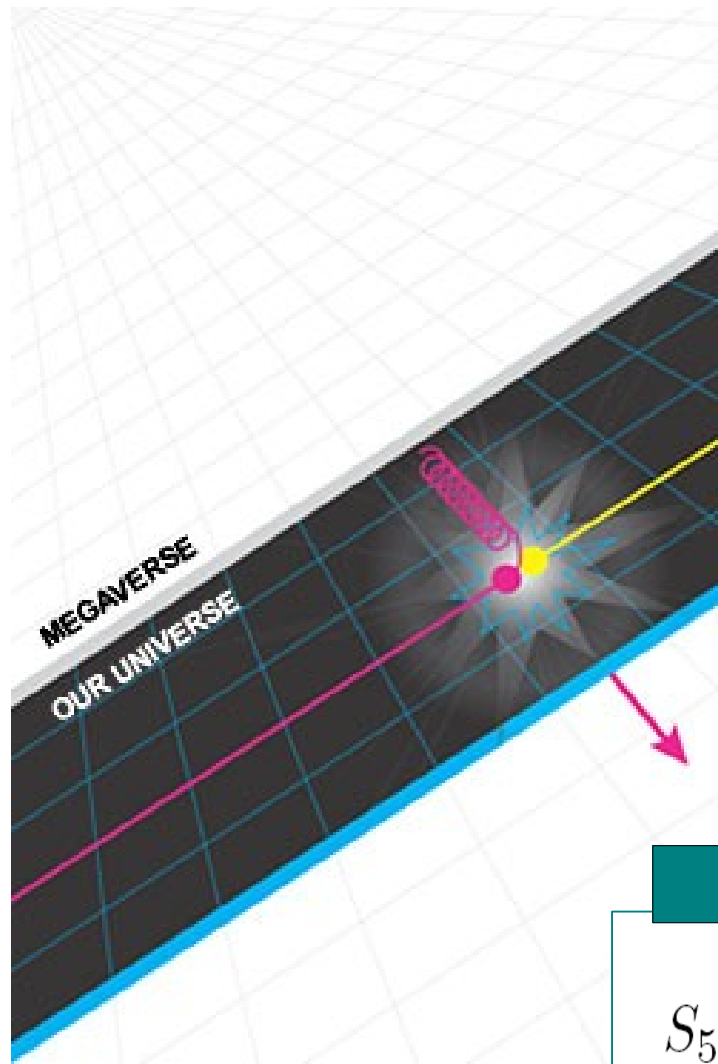
- ADD
- UED
- DGP
- RS
- Warped XD
- Dim sup plate
- Dim sup courbe
- +1D
- +2D
- Localized fields
- Bulk fields
- Orbifold fixed point compact
- Scherk-Schwartz Compact
- Large XD
- Small XD
- ...



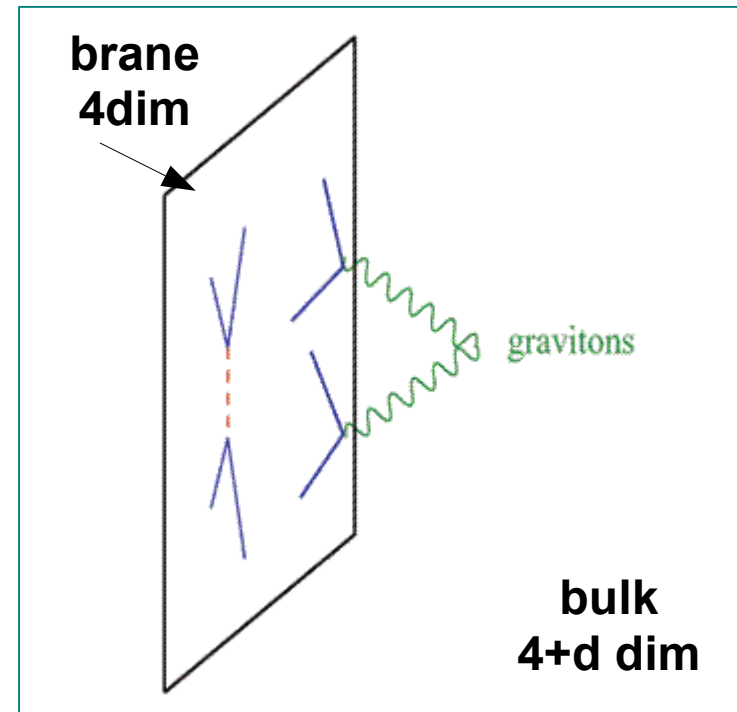
Que sont ces dimensions
supplémentaires ?



Que sont ces dimensions supplémentaires ?



Les Univers branaires



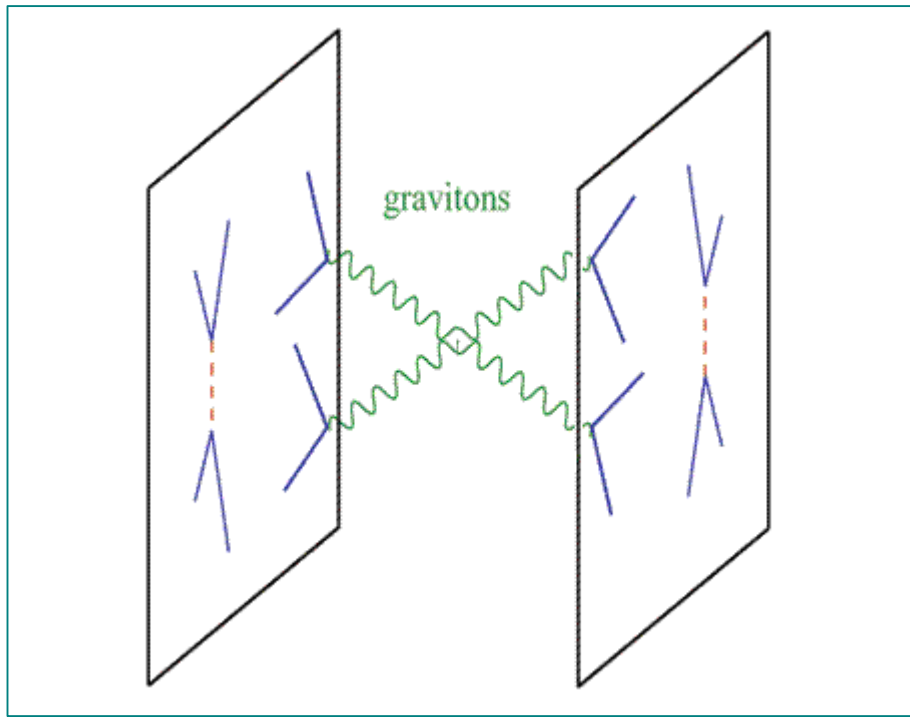
5D action

$$S_{5d} = \underbrace{\int d^5x \sqrt{|G|} R_{5d}}_{5d \text{ gravity}} + \underbrace{\int d^5x \sqrt{|G|} \mathcal{L}_{mat.} \delta(y - y_0)}_{\text{brane localized SM field}}$$



Que sont ces dimensions supplémentaires ?

Plusieurs Univers branaires



Constantes cosmologiques

Tension de la brane

$$\Lambda_{bulk}$$
$$\delta(y - y_1) \Lambda_{brane 1}$$
$$\delta(y - y_2) \Lambda_{brane 2}$$



Que sont ces dimensions supplémentaires ?

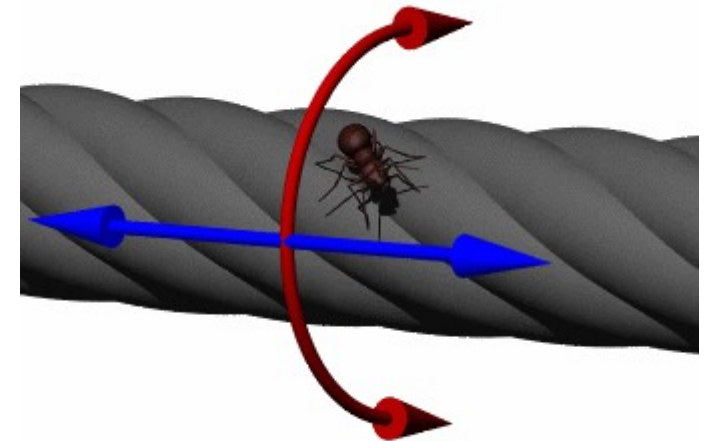
Le Funambule et la Fourmi : des dimensions compactifiées



$$ds^2 = \underbrace{\eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu}_{4d \text{ metric}} + \underbrace{R^2 d\phi^2}_{\text{extra space coordinate}}, \quad \phi \in [0, 2\pi]$$

5D metrique

Long distance : 1D



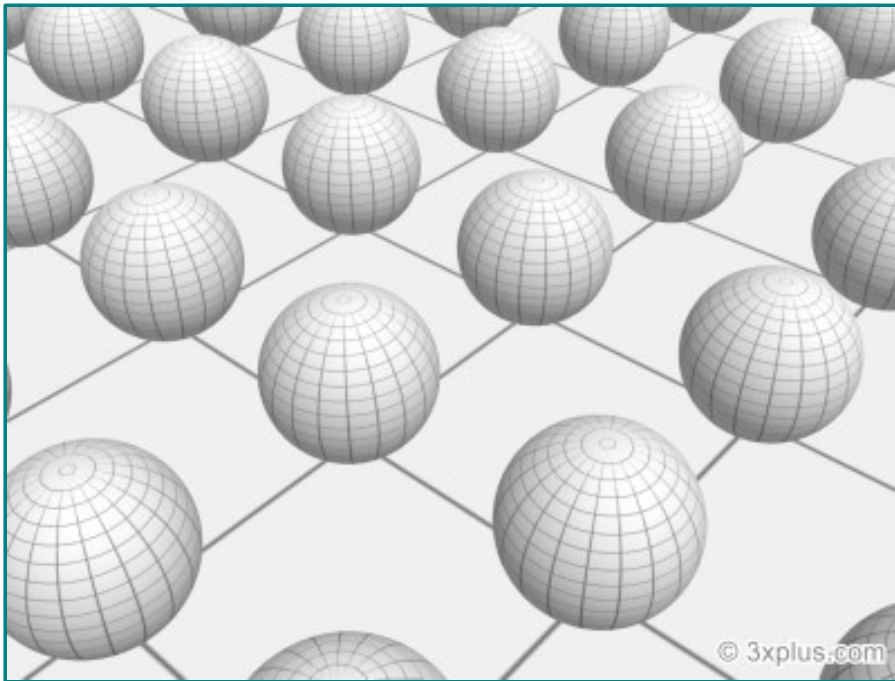
Short distance : 2D



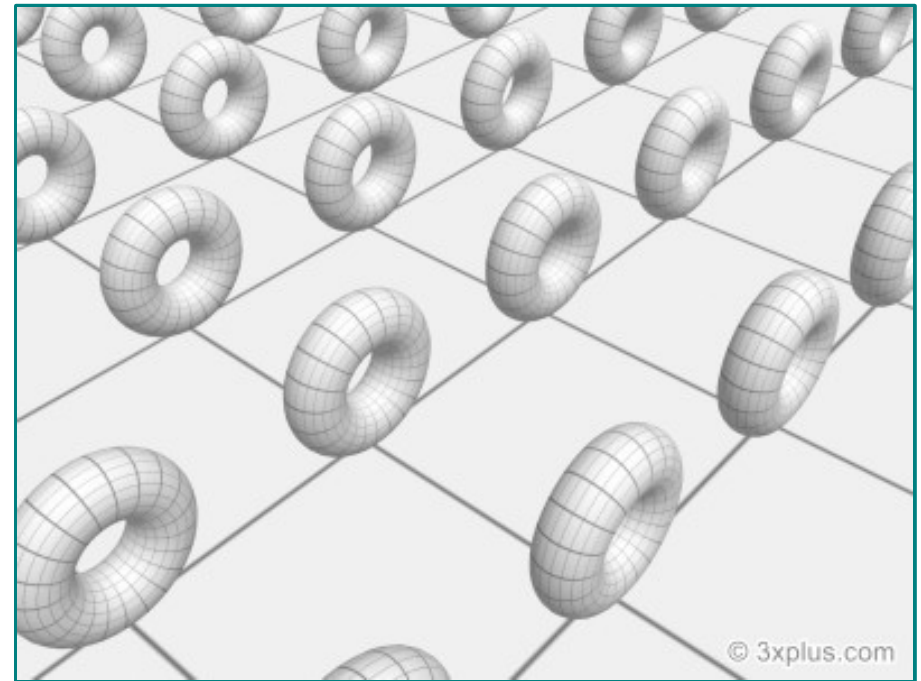
Que sont ces dimensions supplémentaires ?

Encore plus de dimensions !

2D sphere



2D torus



$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + R_1 R_2 d\Omega^2 \quad , \quad d\Omega^2 \equiv \text{compact-space metric}$$



Que sont ces dimensions supplémentaires ?

**A quoi ressemble une théorie de
champ dans un tel espace ?!**

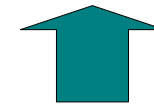


Que sont ces dimensions supplémentaires ?

$$S_{5d} = \int d^4x \int dy \bar{\Psi}(x^\mu, y) \left(i\Gamma^\mu \partial_\mu + i\Gamma^5 \partial_5 - m \right) \Psi(x^\mu, y)$$

$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + R^2 d\phi^2$$

$$\Psi(x, y) = \sum_n \psi^{(n)}(x) \cdot e^{in \frac{y}{R}}$$



Decomposition de Kaluza-Klein



Que sont ces dimensions supplémentaires ?

$$S_{5d} = \int d^4x \int dy \bar{\Psi}(x^\mu, y) \left(i\Gamma^\mu \partial_\mu + i\Gamma^5 \partial_5 - m \right) \Psi(x^\mu, y)$$

$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + R^2 d\phi^2$$

$$\Psi(x, y) = \sum_n \psi^{(n)}(x) \cdot e^{in\frac{y}{R}}$$

$$\begin{aligned} S_{5d} &= \sum_{n;m} \int d^4x \bar{\psi}^{(n)} \left(i\Gamma^\mu \partial_\mu - m \right) \psi^{(m)} \cdot \underbrace{\int dy e^{i(m-n)\frac{y}{R}}}_{\delta(m-n)} \\ &+ \sum_{n;m} \int d^4x \bar{\psi}^{(n)} (i\Gamma^5) \psi^{(m)} \cdot \underbrace{\int dy e^{-in\frac{y}{R}} \partial_5 e^{im\frac{y}{R}}}_{i\frac{m}{R} \delta(m-n)} \end{aligned}$$



Que sont ces dimensions supplémentaires ?

Action effective 4D

$$S_{4d}^{eff} = \sum_n \int d^4x \bar{\psi}^{(n)} \left(i\Gamma^\mu \partial_\mu - m - \frac{n}{R} \Gamma^5 \right) \psi^{(n)}$$

$$m_{phys}^2 \equiv m^2 + \frac{n^2}{R^2}$$

→ 1 champ a 5D → « Tour de Kaluza-Klein » a 4D

→ Nouveau couplage entre particules du MS et leurs KK



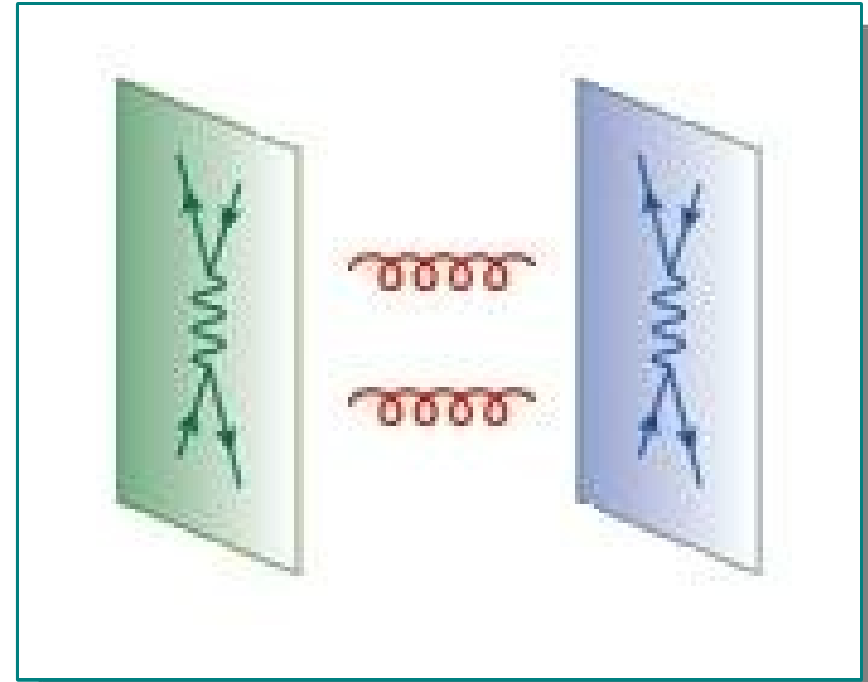
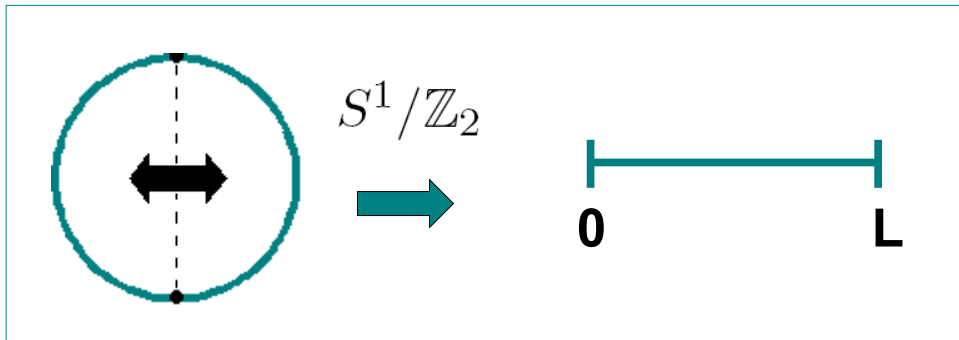
Que sont ces dimensions supplémentaires ?

**Retournons a nos dimensions
supplémentaires . . .**



Que sont ces dimensions supplémentaires ?

L'Univers « membrane » : compactification sur un interval



$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu - dy^2 \quad , \quad y \in [0, L]$$

- C'est la compactification la plus générale
- Permet de jouer sur les conditions aux bords de nos champs
- On appelle cette compactification un « orbifold »



Boson de Higgs, Hierarchie et Physique Theorique



Boson de Higgs, Hierarchie et Physique Theorique

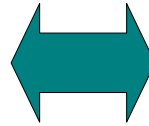
$$M_W \sim M_Z \sim g \langle \mathcal{H} \rangle$$

$$M_{fermions} \sim \lambda_f \langle \mathcal{H} \rangle$$

$$M_{Higgs} \sim \sqrt{\lambda} \langle \mathcal{H} \rangle$$

Corrections radiatives

- Masse des **bosons**
- Masse des **fermions**
- Masse des **scalaires**



symétrie de **jauge**
symétrie **chirale**
absence de symétrie

Instabilité quantique du secteur de Higgs

Renormalisation du secteur du **Higgs**



Corrections radiatives en Λ^2

$$\langle \mathcal{H} \rangle \sim 246 \text{ GeV}$$

$$\Lambda_{Planck} \sim 10^{19} \text{ GeV}$$

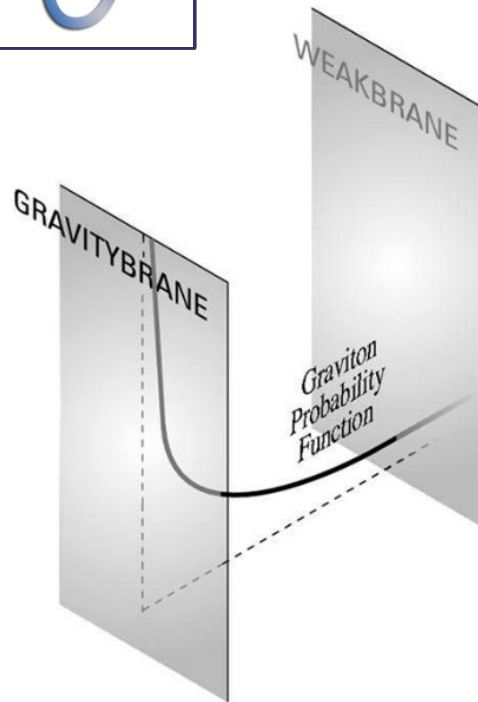
$$\Lambda_{GUT} \sim 10^{16} \text{ GeV}$$

Supersymetrie  Relie les scalaires aux fermions et les « protègent »



Le modele de Randall & Sundrum

(Une alternative a la SuSy ?)



Metrique AdS 5D :

$$ds^2 = e^{-2ky} (\eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu) - dy^2$$

$$M_{Planck} \equiv M_{4D} \sim M_{5D} \sim k \sim L^{-1}$$

Echelle effective le long de la dimension « y »

$$M_{eff}(y) \sim M_{5D} e^{-ky}$$

$$M_{eff}(0) \sim M_{5D} \sim M_{Planck}$$

$$M_{eff}(L) \sim M_{5D} e^{-kL} \sim M_{EW}$$

→ Similaire a l'inflation en cosmologie (de Sitter)



Decomposition de K.K. :

$$\Psi(x^\mu, y) = \sum_n \psi_n(x_\mu) \cdot f_n(y)$$

→ Mode zero ↔ Particule MS

→ Modes $n \geq 1$ ↔ KK-Tower

Dans RS, les modes zero sont « localises » le long de la dim. sup.

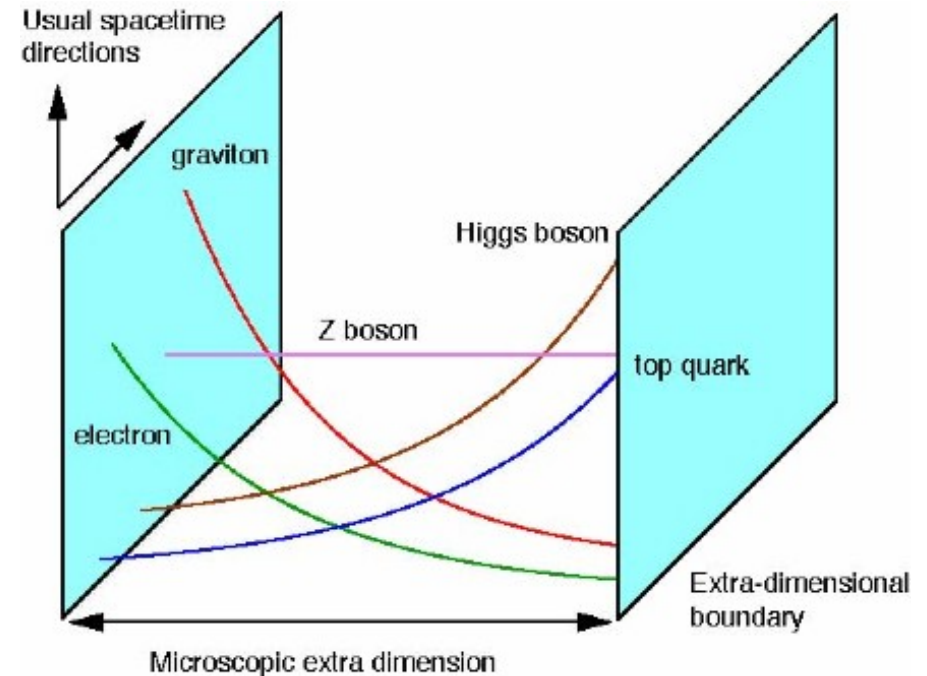
$$m_{5D} \equiv ck \quad \text{avec } c \sim \mathcal{O}(1) \quad \longrightarrow \quad f_0(y) \propto e^{(\frac{1}{2}-c)ky}$$

Hierarchie de masse des fermions :

$$m_f \equiv vev. \int dy \left(f_L^0(y) \cdot f_R^0(y) \cdot f_{Higgs}^0(y) \right) = \lambda_f \cdot v$$



Localisation des particules dans RS



- Higgs → TeV-brane (Pour résoudre le problème de hiérarchie de jauge)
- Graviton → Planck-brane (Natural mass scale of gravity ; AdS_5 structure)
- Light Fermions → Planck-brane (Weak « overlap » with the Higgs ; $c_{light} > 0.5$)
- Heavy Fermions → TeV-brane (Strong « overlap » with the Higgs ; $c_{heavy} < 0.5$)
- Gauge Bosons → Delocalises (Mode zero « plat »)
- KK Modes → TeV-brane (Fonctions de Bessel ; AdS_5 structure)



Quelles consequences en physique des particules



Quelles consequences en physique des particules

Point de vue theorique :

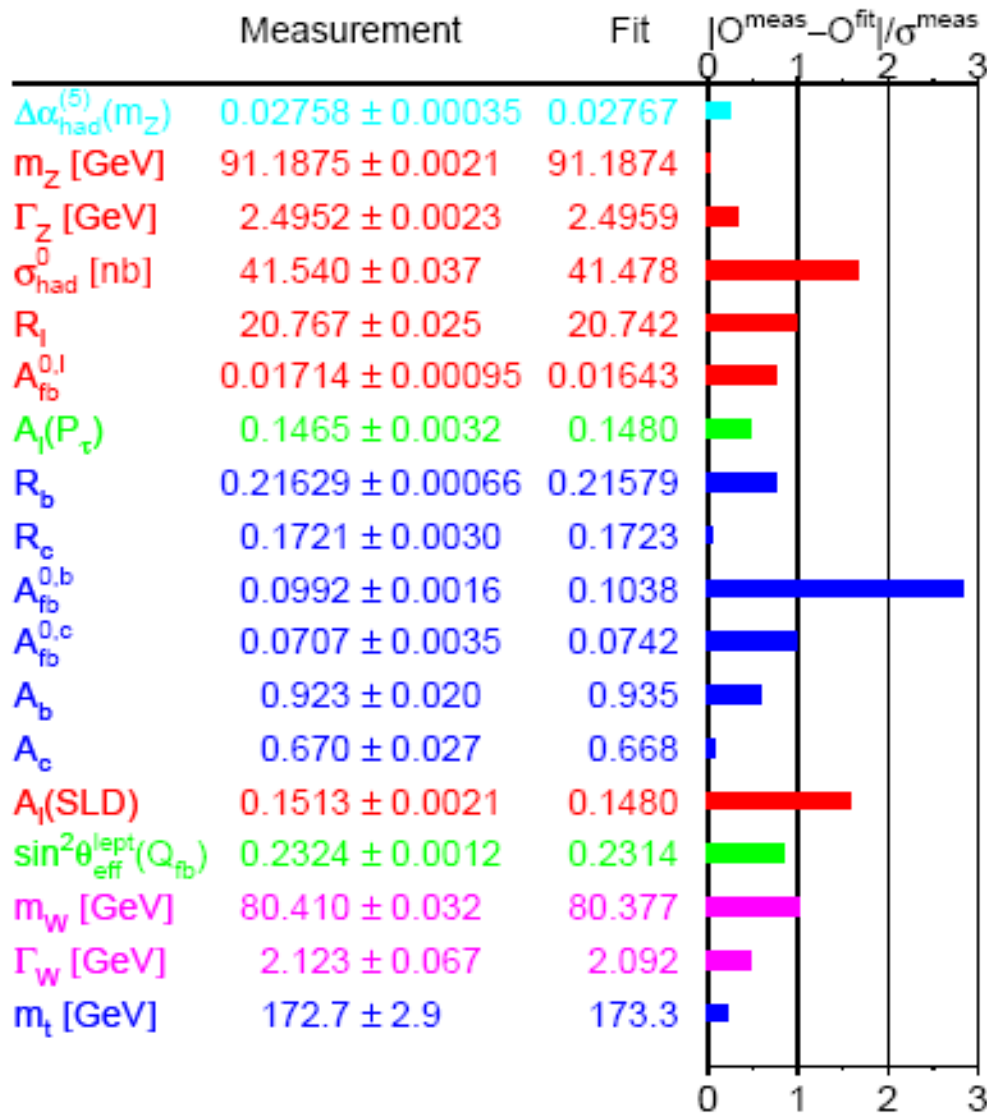
- Interprete « geometriquement » le probleme de hierarchie
- Offre une alternative a la supersymetrie
- Explique l'origine de la hierarchie des masses des fermions

Attentes experimentales

- Modifie le secteur de Higgs
- Fortes deviations dans le domaine des fermions lourds (bottom, top)
- Phenomenologie des KK « legers » (~ 1 a 3 TeV)



Quelles consequences en physique des particules



Donnees de precision ElectroFaible

Dans R.S. :
gauge bosons & fermions
miment avec leurs modes KK

**Nouvelles contributions a
« l'ordre des arbres »**

Les challenges pour la
phenomenologie sont donc:

[1] respecter les contraintes
de precision EW

[2] chercher (trouver ?) des
signaux de nouvelles physiques
propres (detectable)