

Grandes dimensions supplémentaires (univers branes) et cosmologie

Univers branes (ou "branaire"):

Cédric Deffayet (CNRS)
APC &
Institut d'Astrophysique de Paris



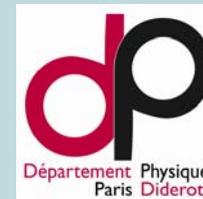
Espace-temps usuel (quadrimensionnel): une "brane"

4D

Degrés de liberté (matière et interactions) localisés sur la brane: typiquement ceux du modèle standard de la physique des particules

n dimensions supplémentaires +
champs (gravitationnel) non localisés

L'espace-temps entier (le « bulk ») a $4+n$ dimensions



1. Des Univers « branes » :
pourquoi et comment ?

2. Physique des dimensions
supplémentaires

3. Phénoménologie des univers branes

1. Des Univers « branes »: pourquoi et comment

Quelques mots de physique
des hautes énergies

Préliminaires: « énergie = masse = longueur⁻¹ »

Dans cet exposé on utilisera les unités « $\hbar = c = 1$ »

- « énergie = masse »

$E = mc^2$ de la Relativité restreinte....



Pour créer une particule de masse m dans un accélérateur il faut disposer, au moins, de l'énergie E

- « longueur⁻¹ = énergie »

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

pour un photon

- « longueur⁻¹ = masse »

$$\lambda_C = \hbar / m c$$

Longueur d'onde de Compton

Échelles d'énergies en cosmologie et astrophysique

Cosmologie "observable"

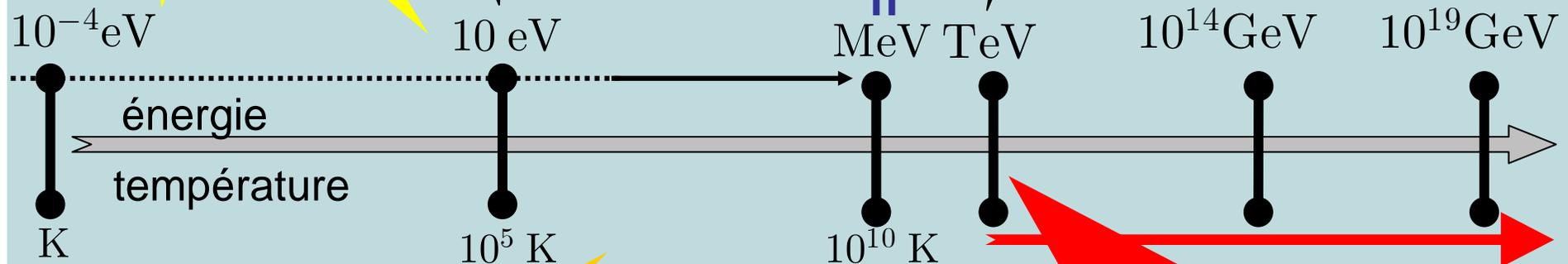
Échelle de brisure électrofaible

Début de l'ère dominée par la matière

Inflation ?

Rayonnement cosmique de fond

Nucléosynthèse primordiale



Centre du soleil

Supernova

~ Énergie maximum obtenue dans les accélérateurs. Physique inconnue au delà

~ Énergie maximum
testée dans les
accélérateurs

Deux mots sur la physique connue jusqu'au TeV (« physique des hautes énergies »)

Décrit 3 des 4 interactions fondamentales de la nature dans
le cadre d'une « théorie quantique des champs »

→ modèle standard de la physique des particules

$$\underbrace{U(1) \times SU(2)}_{\text{Interaction « électro-faible »}} \times \underbrace{SU(3)}_{\text{Interaction forte}}$$

Interaction « électro-faible »
(force électromagnétique et
force faible à basse énergie)

Interaction forte

Masse de Planck
définie par



$$M_P = (\hbar c / G_N)^{1/2}$$

(ou $M_P^2 = G_N^{-1}$ dans les
unités $\hbar = c = 1$)

Obtenu par exemple par

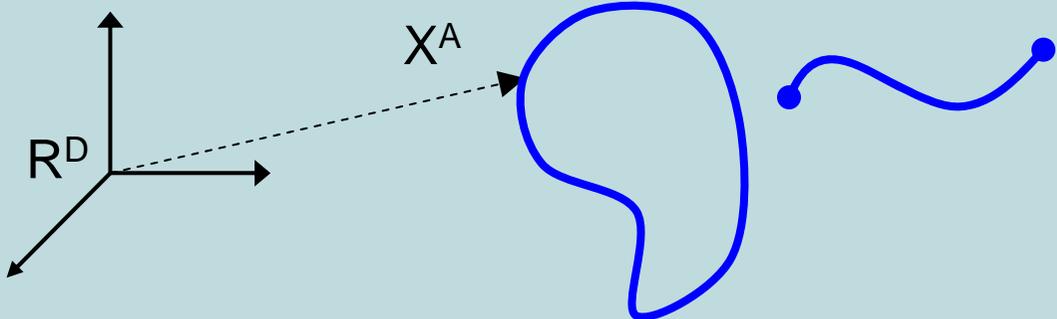
$$r_s = 2 G_N m / c^2 \sim \lambda_C = \hbar c^{-1} / m$$

Rayon du trou noir
entourant une particule
de masse m

Longueur d'onde de
Compton associée à la
particule de masse m

Théorie des cordes

approches phénoménologiques traditionnelles



$$S_P = -\frac{T}{2} \int d^2 \xi \sqrt{-g} g^{\alpha\beta} \partial_\alpha X^A \partial_\beta X^B \eta_{AB}$$

$\left\{ \begin{array}{l} T: \text{ tension de la corde} \\ T \propto M_{\text{string}}^2 / \text{cordes} \end{array} \right.$

Dimensions d'espace-temps supplémentaires compactes de taille $R_{(n=6)}$ (D=10:supercordes)

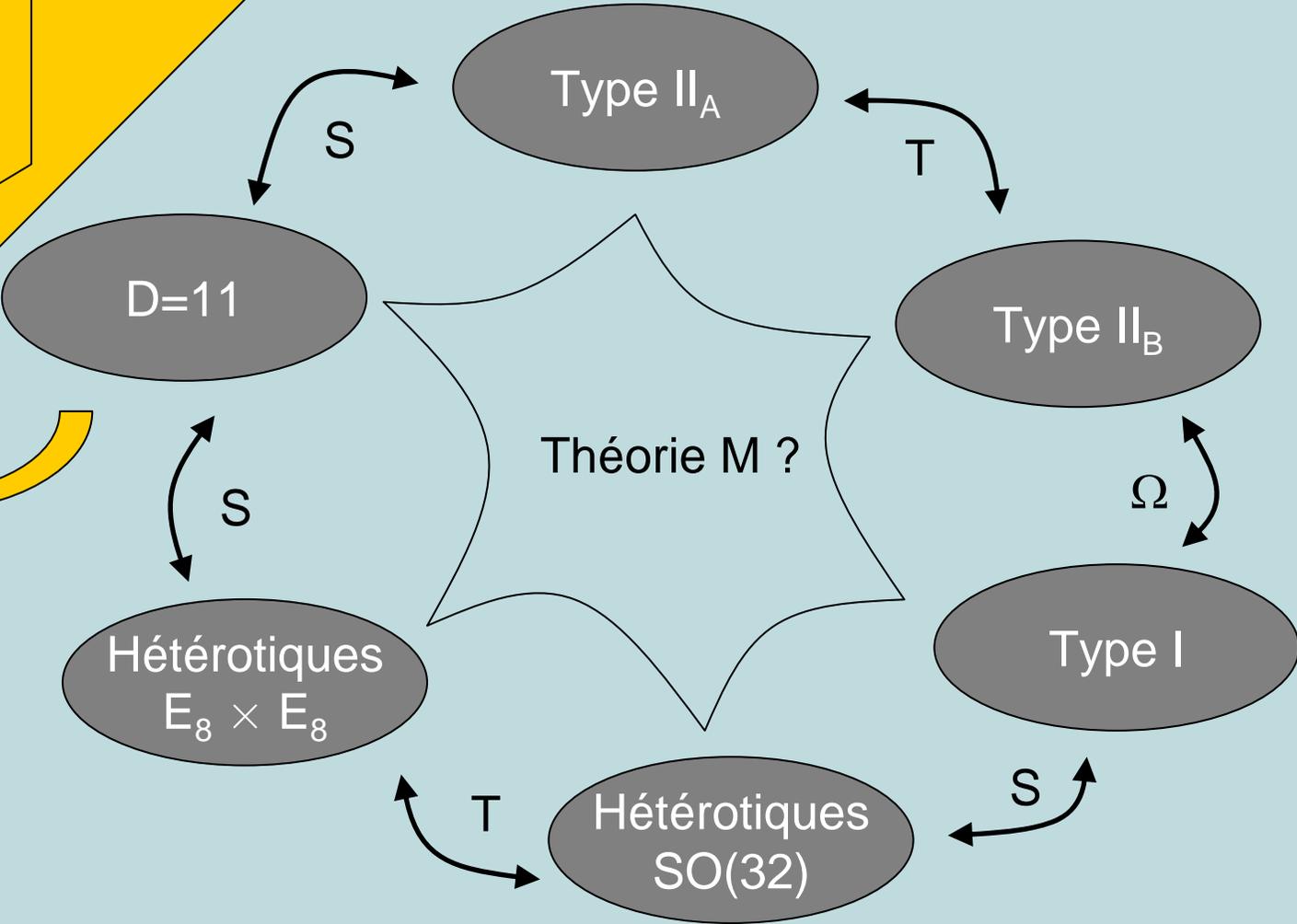
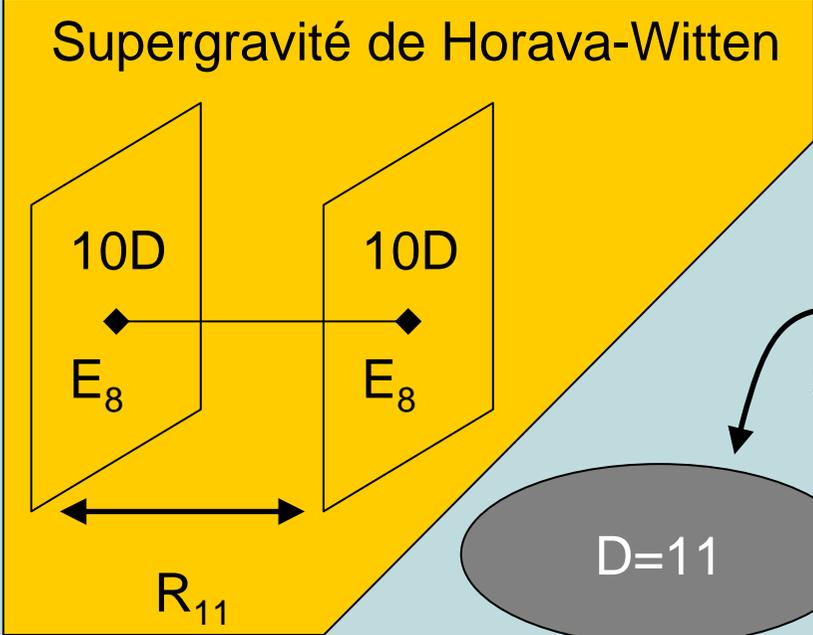


$M_{\text{GUT}} \sim 10^{16} \text{ GeV}$

A basse énergie devant $R_{(n=6)}$ et M_{string} : la théorie effective est une théorie des champs supersymétrique (avec GUT, ex E_6 pour $E_8 \times E_8$)

A plus basse énergie encore, la théorie effective doit être le modèle standard de la physique des particules !

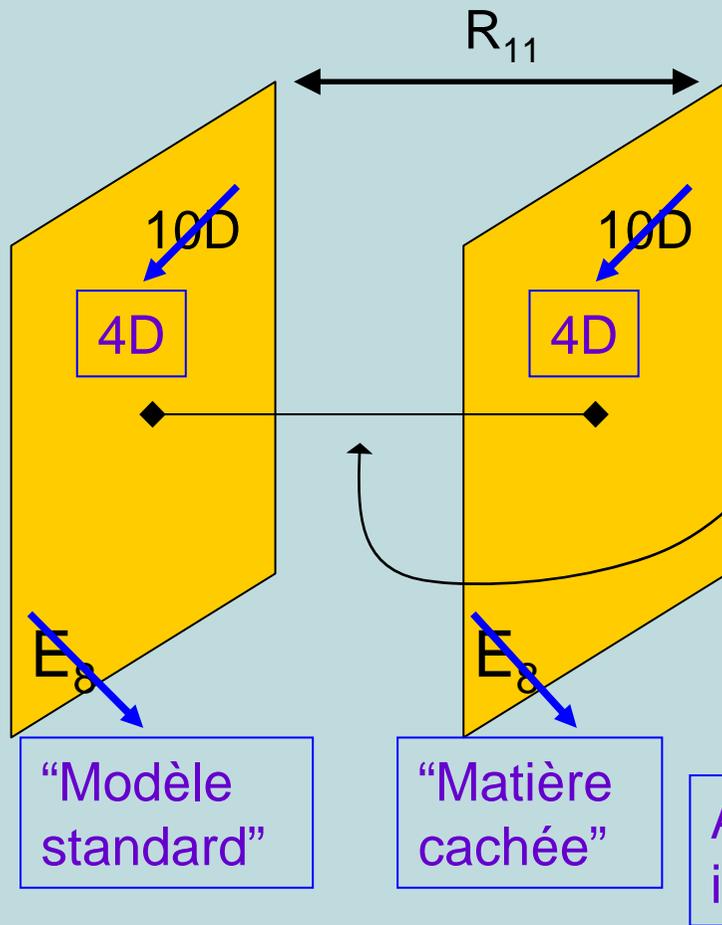
Approches bouleversées par
La « révolution » des dualités



Supergravité de Horava-Witten

Théorie de supergravité à 11 dimensions

La onzième dimension est un intervalle aux extrémités duquel sont localisés des champs de "matière" E_8



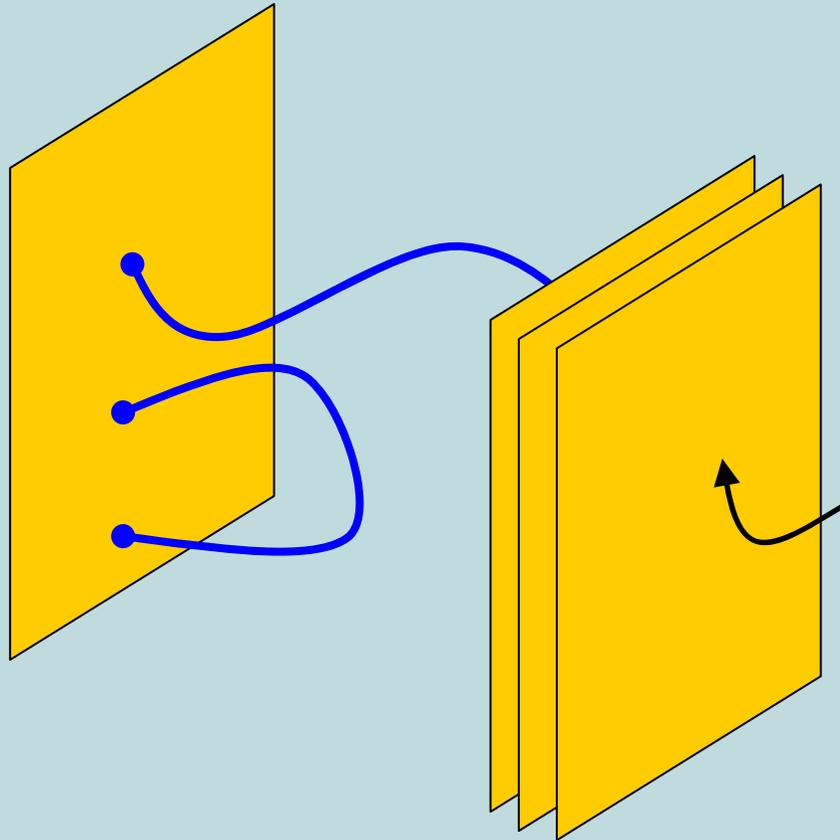
Théorie effective 5D: deux "branes" 4D "habitées" par de la matière, plongées dans un "bulk" 5D.

R_6^{-1} ← Rayon des six dimensions compactes parallèles aux hyperplans de matière 10D

R_{11}^{-1} ← Rayon de la onzième dimension

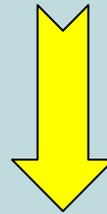
Plus généralement: rôle des "D-branes"

Dirichlet



Présence de champs de "matière"
localisés sur la brane

Théorie des cordes

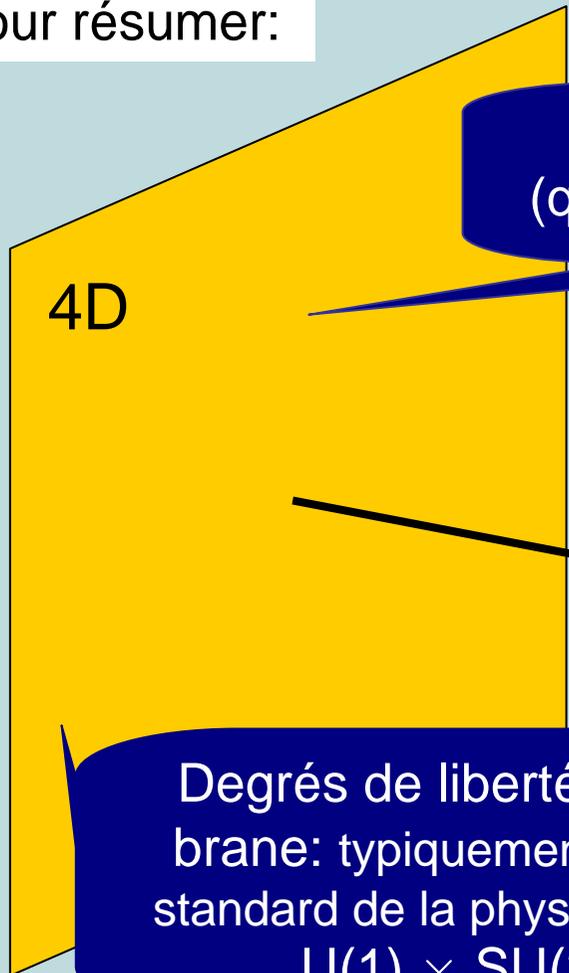


Plusieurs réponses possibles !
Plusieurs modèles du monde !

En particulier la « tension » des cordes
est un paramètre peu contraint: M_{cordes}

Les univers "branes" constituent l'un de ces possibles

Pour résumer:



Espace-temps usuel
(quadridimensionnel): une "brane"

n dimensions supplémentaires +
champs (gravitationnel) non localisés.
Une échelle d'énergie associée à la
théorie sous-jacente:

$$M_{(4+n)} \text{ ou } M_{\text{cordes}}$$

Degrés de liberté localisés sur la
brane: typiquement ceux du modèle
standard de la physique des particules
 $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$

L'espace-temps entier
(le « bulk ») a $4+n$
dimensions

2. Physique des dimensions supplémentaires

2.1 Physique usuelle et dimensionalité de l'espace-temps

2.2. Physique des dimensions **compactes** et mécanisme de Kaluza-Klein

2.3. Quelle est la taille des dimensions compactes ?

2.4. Petite zoologie des univers branes

La physique à 3+1 dimensions, l'exemple de l'électromagnétisme

Des équations de Maxwell, on peut tirer **l'équation de Poisson**
Pour le potentiel électrostatique Φ_E

$$\Rightarrow \Delta \Phi_E = - \rho / \epsilon_0$$

Équation à laquelle obéit également
le potentiel gravitationnel Φ_N

$$\Rightarrow \Delta \Phi_N = 4 \pi G_N \rho_m$$

Équation qui permet de calculer la force F_{12} s'exerçant entre
deux charges (masses) ponctuelles par le théorème de Gauss

charge q_1

distance r

charge q_2



force F_{12}

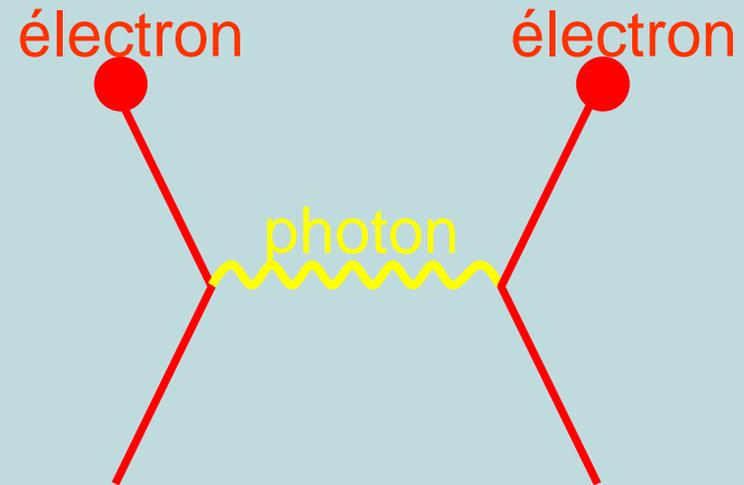
Le nombre de dimensions de l'espace-temps est codé dans la façon dont F_{12} varie avec r

$$F_{12}(r) \propto 1/(\text{surface } S(r) \text{ de la sphère})$$

$$\propto 1/r^{D-2} \text{ dans un espace de dimension } D \text{ (} D-1 \text{ dimensions spatiales)}$$

Force de portée infinie !

Au niveau quantique, la force électromagnétique est décrite par un échange de photon:



Le photon a une **masse nulle**, ce qui est relié à la portée infinie de la force électromagnétique

Idem pour la gravitation transportée par un **graviton de masse nulle**

Une force transportée par une particule massive (de masse $m \neq 0$) est décrite par une équation de « Helmholtz modifiée » :

$$\Delta \Phi - \Phi / \lambda_C^2 \propto \text{source}$$

Longueur de Compton
 $\lambda_C = \hbar / m c$

Le potentiel créé par une source ponctuelle est donné par le potentiel de Yukawa (pour 3+1 dimensions):

$$\Phi(r) \propto \exp(-r/\lambda_C) / r$$

Force de portée finie !

A retenir pour la suite :

Le nombre de dimensions de l'espace-temps est codé dans la façon dont la force varie avec r

L'équation de Poisson (particule de masse nulle),

$$\Delta \Phi \propto \rho$$



Force en $1 / (\text{Distance})^{D-2}$

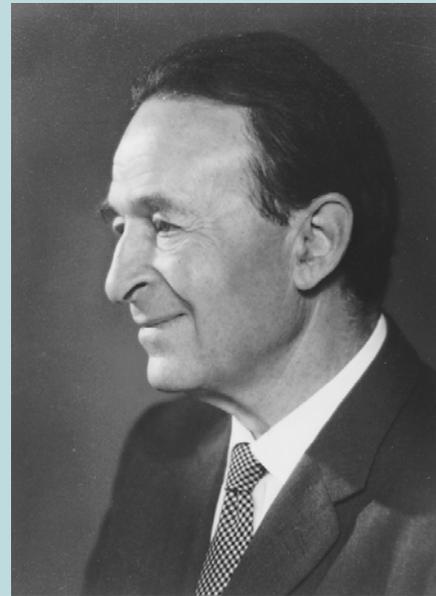
L'équation de Helmholtz modifiée (particule de masse non nulle),

$$\Delta \Phi - \Phi / \lambda_C^2 \propto \rho$$



Force de portée inférieure à λ_C

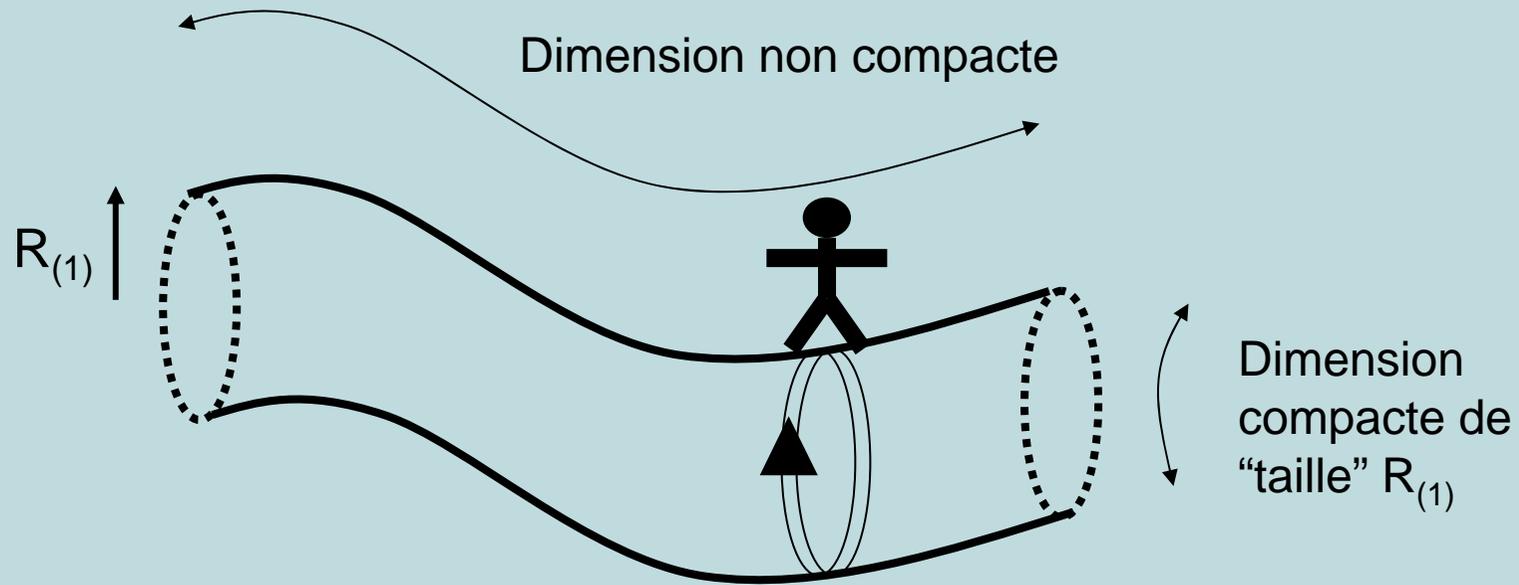
2.2. La physique des dimensions compactes,
ou comment 6 (ou 7) dimensions
pourraient nous avoir échappé



Le mécanisme de Kaluza-Klein (1920)

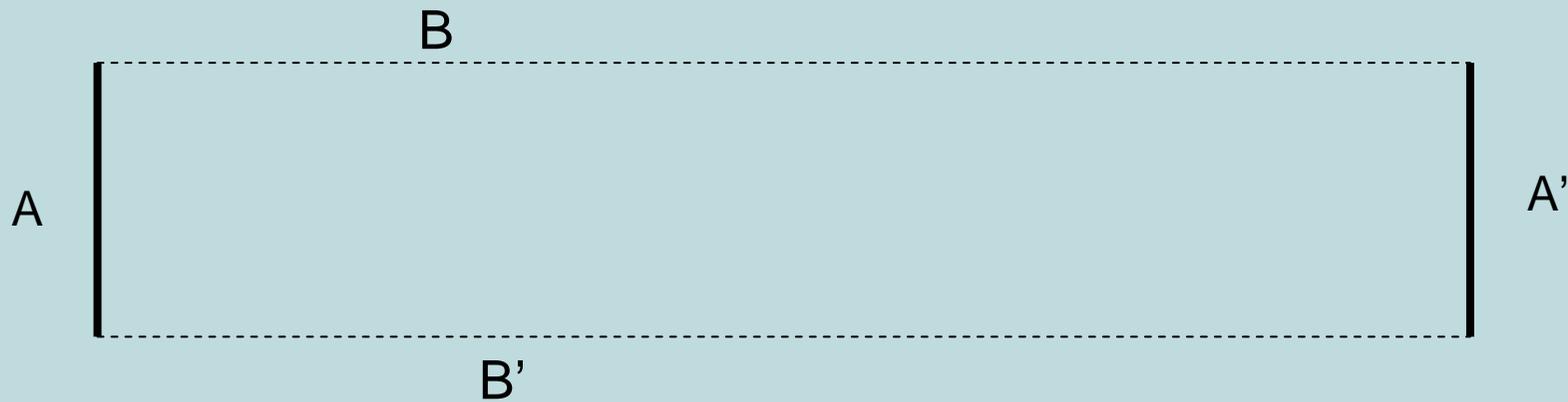
Qu'est-ce qu'une dimension compacte ?

Exemple: la surface d'un cylindre à deux dimensions



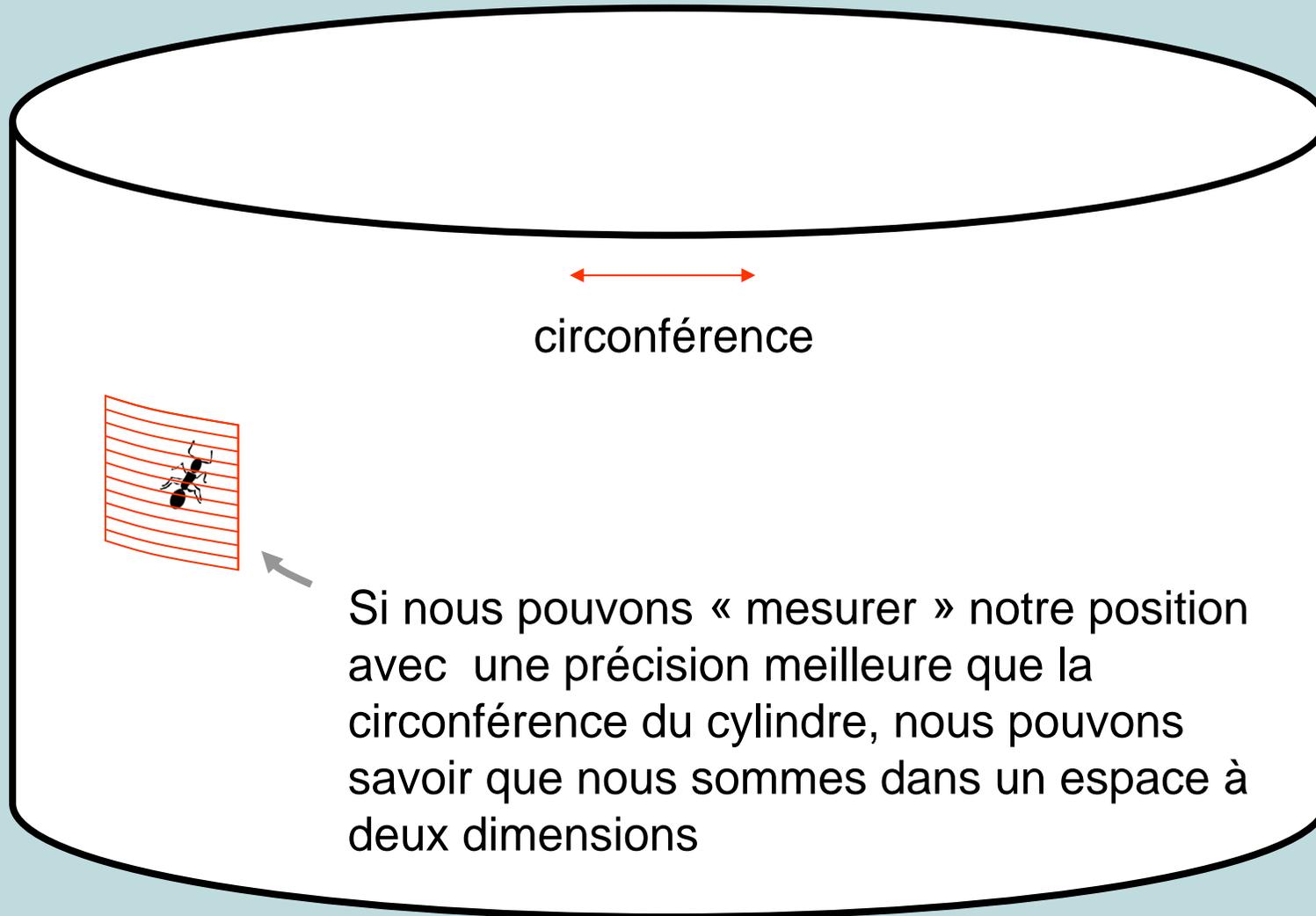
On peut en faire le tour ...

Une façon bien connue de fabriquer des dimensions compactes: faire des identifications dans des dimensions non compactes



Le mécanisme de Kaluza-Klein

Si nous vivions à la surface d'un cylindre (à deux dimensions):

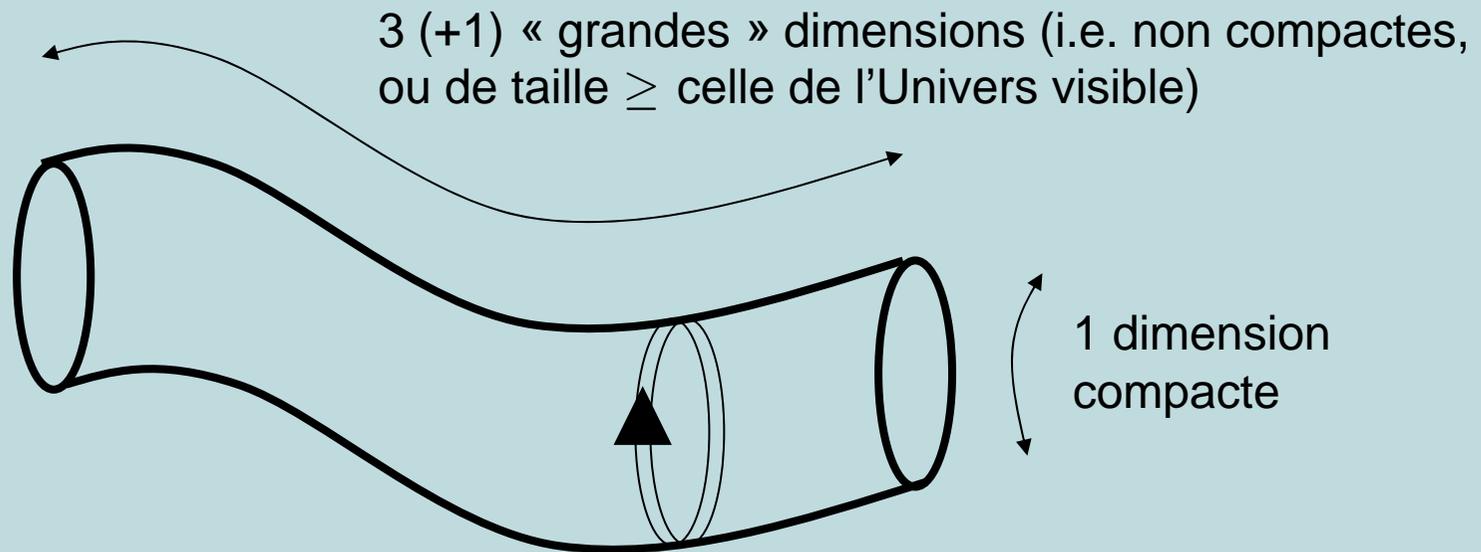


Sinon, nous avons l'impression de vivre dans un espace à une dimension



Plus précisément

Considérons un champ Φ vivant dans un espace à 4 dimensions spatiales (4+1 dimensions), telle que la quatrième dimension soit « compacte »



\Rightarrow Φ obéit à une équation de Poisson quadridimensionnelle (4+1 dimensions)

On s'intéresse donc à l'équation de Poisson suivante

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial w^2} = 4\pi G_{(5)} \rho$$

Chacun des $\Phi^{(k)}$ peut être considéré comme un champ vivant dans un espace à 3+1 dimensions

Constante de Newton de la théorie 5-dimensionnelle

suivante

$$\nabla^2 \Phi(x, y, z, w + 2\pi R) = \Phi(x, y, z, w)$$

et on peut décomposer en série de Fourier en écrivant

$$\Phi(x, y, z, w) = \sum_{k \text{ entier}} \Phi^{(k)}(x, y, z) e^{ikw/R}$$

En mettant cette décomposition dans l'équation de Poisson ci-dessus, on s'aperçoit que chaque mode de Fourier $\Phi^{(k)}$ vérifie l'équation

$$\frac{\partial^2 \Phi^{(k)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi^{(k)}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi^{(k)}}{\partial z^2} - \frac{k^2 \Phi^{(k)}}{R^2} = 4\pi G_{(5)} \rho^{(k)}$$

qui est l'équation de Helmholtz modifiée pour un champ massif de longueur de Compton $\lambda_C^{(k)} = R/k = \hbar c^{-1}/m_k$ (avec k entier)

Conclusion :

Un champ dans un espace à 4+1 dimensions est vu comme une collection infinie de champs massifs vivant dans un espace à 3+1 dimensions (on parle de tour de modes de Kaluza-Klein):

Des expériences faites à des énergies très inférieures à m_1 ne “voient” que le mode de masse nulle:

Soit un seul champ vivant dans un espace à 3+1 dimensions: la dimension supplémentaire compacte est invisible à basse énergie!

masse,
énergie

⋮

$$\underline{m_4 = 4 \hbar c^{-1} / R}$$
$$\underline{m_3 = 3 \hbar c^{-1} / R}$$
$$\underline{m_2 = 2 \hbar c^{-1} / R}$$
$$\underline{m_1 = \hbar c^{-1} / R}$$
$$\underline{m_0 = 0}$$

Cela vaut aussi pour la gravitation

Deux masses tests séparées d'une distance $r \ll R$
Interagissent suivant la loi de Newton 4 + 1 dimensionnelle:

La dimension supplémentaire apparaît à petite distance sous forme d'une modification de la force gravitationnelle.

$$V(r) \propto \frac{G_{(5)} M_{\bullet} M_{\bullet}}{r^2}$$

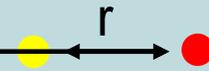
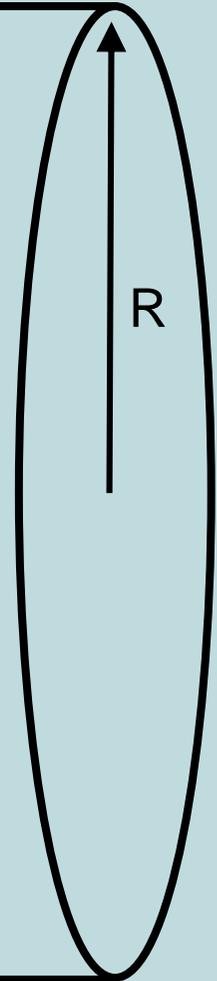
Les mêmes masses séparées d'une distance $r \gg R$
interagissent suivant la loi de Newton usuelle:

La dimension supplémentaire est invisible à grande distance

$$V(r) \propto \frac{G_{(5)} M_{\bullet} M_{\bullet}}{R} \frac{1}{r}$$

Constante de Newton usuelle:

$$G_N = G_{(5)}/R$$



Ou en termes de modes de Kaluza-Klein du graviton

Le même raisonnement vaut pour le graviton:



Petite perturbation au voisinage du cylindre de référence: "graviton"

avec

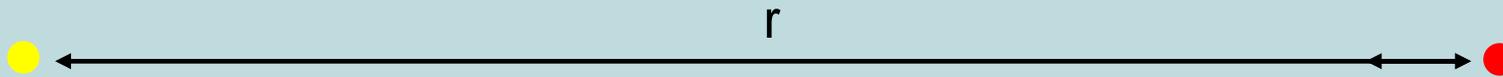
$$g_{\mu\nu}(x^\mu, y) = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}(x^\mu, y)$$

Métrie décrivant l'espace-temps à 4+1 dimensions

Métrie plate décrivant le cylindre de référence

Décomposé en série de Fourier:

- un graviton de masse nulle
- une tour de gravitons massifs de "Kaluza-Klein"



Qui permet de calculer le potentiel entre deux masses ponctuelles

Contribution de chaque mode de Kaluza-Klein de masse $m_k \propto k/R$

$$V(r) \propto \sum_{k=0}^{k=+\infty} G_N \frac{M_{\bullet} M_{\bullet}}{r} e^{-m_k r}$$

- Si $r \gg R$: seul le mode de masse nulle contribue

$$V(r) \propto G_N \frac{M_{\bullet} M_{\bullet}}{r}$$

- Si $r \ll R$: les modes qui contribuent à cette somme sont ceux tels que $m_k r \ll 1$ soit $k \ll R / r$

Potentiel en $1/r^2$

$$V(r) \propto \frac{R}{r} G_N \frac{M_{\bullet} M_{\bullet}}{r}$$

$G_{(5)} = R G_N$

Se généralise à n dimensions supplémentaires

$$G_{(4+n)} \propto R_{(n)}^n G_N$$

Constante de Newton de la théorie à 4+n dimensions

Rayon des n dimensions supplémentaires

Qui se réécrit

$$M_P^2 \propto R_{(n)}^n M_{(4+n)}^{2+n}$$

Masse de Planck de la théorie à 4+n dimensions

Définie comme $M_{(4+n)}^{-2-n} \propto G_{(4+n)}$

Donc le mécanisme de Kaluza-Klein permet l'existence de dimensions d'espace-temps supplémentaires invisibles accessibles à un champ Φ si:

1/ Ces dimensions sont "compactes"

2/ Leur taille est \lll à l'échelle de distance la plus on a testé expérimentalement la théorie du champ Φ

Différence ("hiérarchie") expérimentale très importante



Pour le modèle standard de la physique des particules:

$$R < (\text{TeV})^{-1} \sim 10^{-18} \text{m}$$

Autre "hiérarchie" très importante ("hiérarchie de jauge") :



Pour la gravitation:

visible dans les accélérateurs de particules



Échelle caractéristique de la gravité quantique

$$R < 10^{-34} \text{m}$$
$$M_{Planck} \sim 10^{19} \text{GeV}$$

Distance minimum à laquelle on a testé la force gravitationnelle



Échelle de brisure électrofaible

$$M_{EW} \sim 10^3 \text{ GeV}$$

Echelles d'énergies en physique des hautes énergies

Modèle standard de la physique des particules

Echelle de brisure électrofaible

Grande unification?

Energie de Planck:
gravité quantique?



Plus de
« Hiérarchie de jauge »

Taille des dimensions supplémentaires ?

Tension des cordes élémentaires?
Gravité quantique?

supplémentaires?

Dans les modèles d'univers branes

Echelles d'énergies en cosmologie

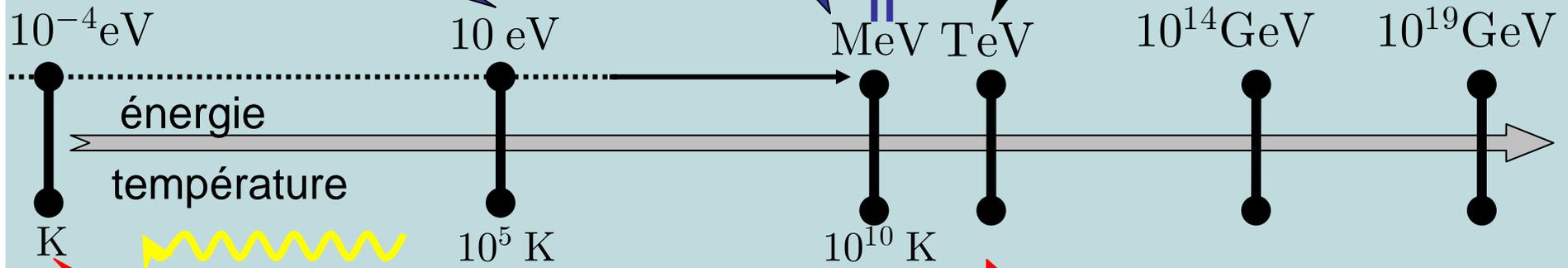
Cosmologie "observable"

Début de l'ère dominée par la matière

Nucléosynthèse primordiale

Echelle de brisure électrofaible

Inflation ?



Taille des dimensions supplémentaires ?

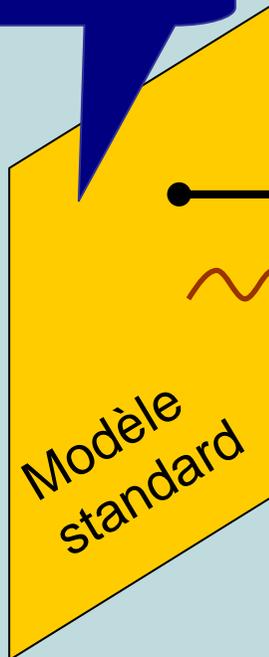
Tension des cordes élémentaires?
Gravité quantique?

Dans les modèles d'univers branes

Quelques valeurs numériques

Modèles de Arkani-Hamed, Dimopoulos, Dvali (1998)

Brane 4D



n dimensions compactes
de taille $R(n)$

$$M_{\text{Planck}}^2 = M_{(4+n)}^{2+n} R_{(n)}^n$$

Etats de Kaluza-Klein
du graviton

si $M_{(4+n)} \sim \text{TeV}$

- $R_{(1)} \sim 10^{13} \text{cm}$

- $R_{(2)} \sim 10^{-2} \text{cm} \Rightarrow m_{KK} \sim 10^{-12} \text{GeV}$

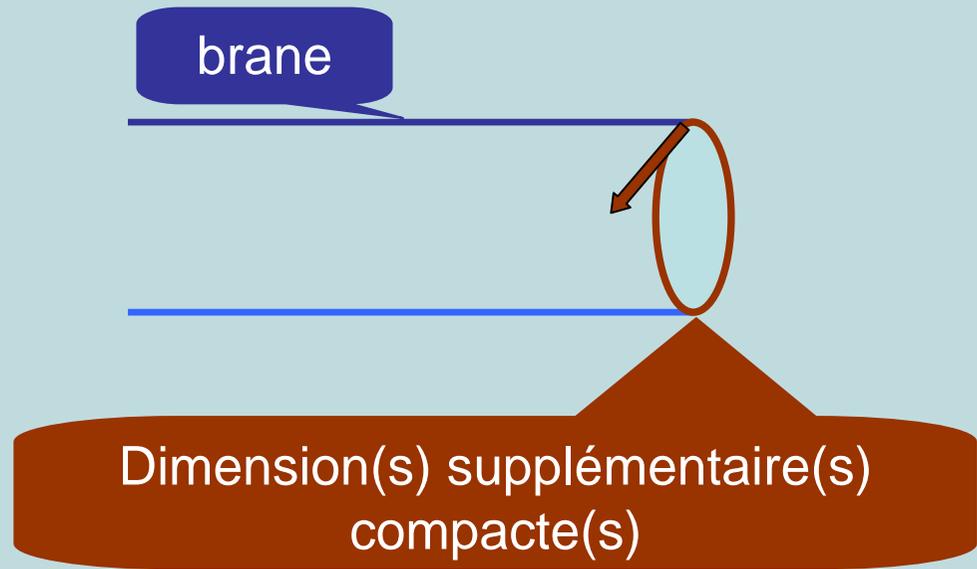
- $R_{(3)} \sim 10^{-7} \text{cm} \Rightarrow m_{KK} \sim 10^{-7} \text{GeV}$

Modification de la gravitation à
des distances macroscopiques?

Accessible dans les
processus énergétiques?

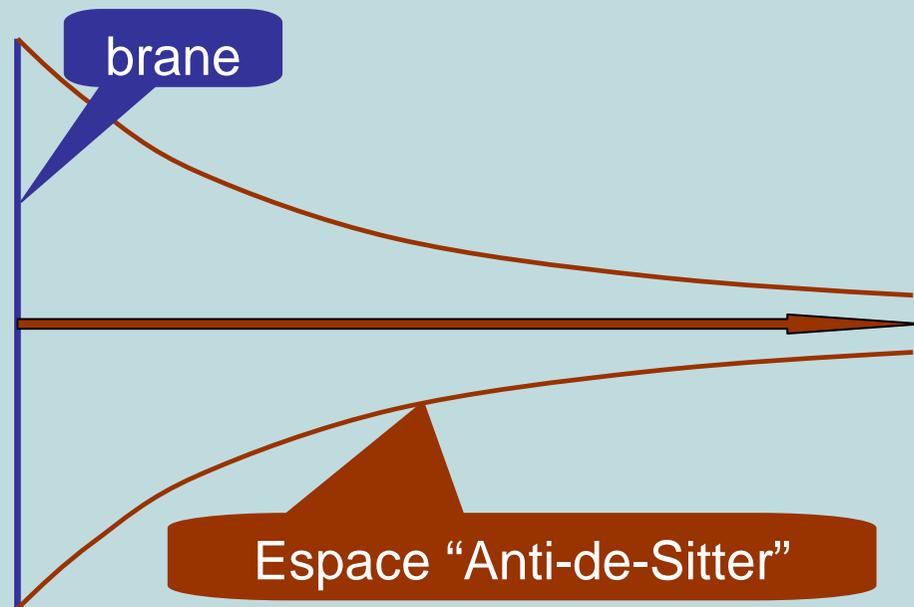
Dimensions supplémentaires compactes

Arkani-Hamed & Dimopoulos & Dvali (1998)



Dimension supplémentaire "voilée"

Randall & Sundrum (1999)



Théorie des cordes, théorie M

Théories effective basse énergie de certaines théories de cordes.

(ADD & Antoniadis)

Cordes avec basse "échelle fondamentale": nouvelle phénoménologie des théorie de cordes

ed & Dvali

Dimension supplémentaire voilée

Relié à la "correspondance AdS-CFT"

Sundrum

Approches non "cordistes": physique au-delà du modèle standard: une nouvelle façon d'aborder certains problèmes ("hiérarchie de jauge")

Une alternative à la compactification

Modèle jouet pour étudier certaines caractéristiques "branaire"

brane

Dimensions

Dans les deux cas: gravité standard

si $r \gg R_{(n)}$ ou R_{AdS}

en raison de la géométrie du "bulk"

Dimension(s) supplémentaire(s)
compacte(s) de rayon $R_{(n)}$

Gravité
branaire induite
Dvali, Gabadaze,
Porrati



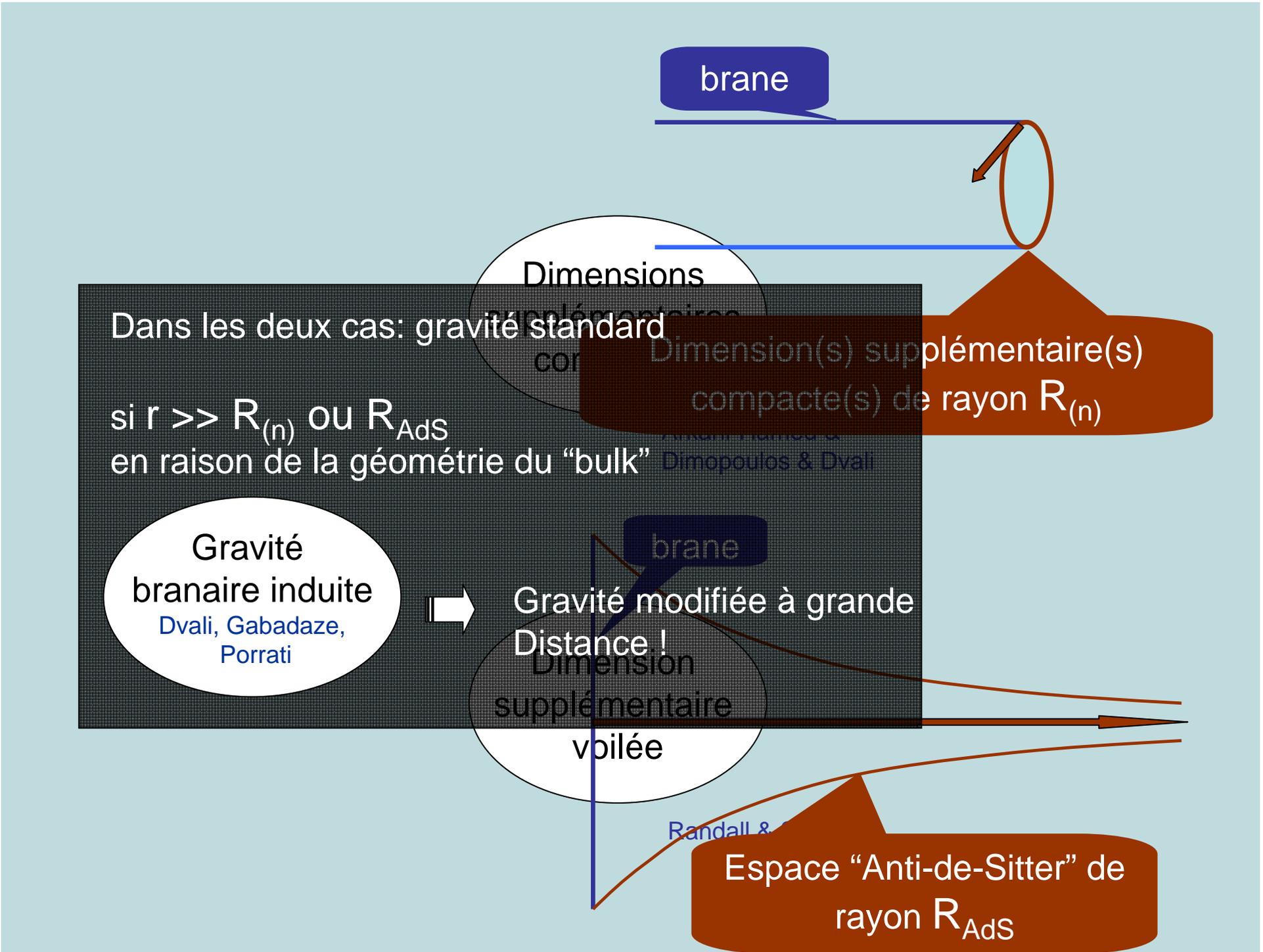
Gravité modifiée à grande
Distance!

Dimension
supplémentaire
voilée

brane

Randall &

Espace "Anti-de-Sitter" de
rayon R_{AdS}



3. Phénoménologie des univers branes

3.1 Physique des particules

3.2. Astrophysique

3.3. Cosmologie

(3.4. Tests de la gravitation à petite distance)

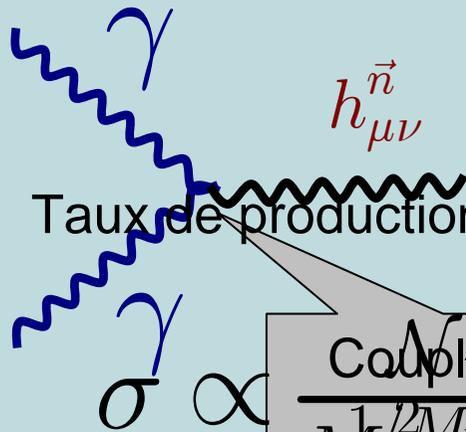
Quelques exemples... Pris dans le cadre du modèle "canonique" ADD (n dimensions supplémentaires compactes) et le modèle Randall-Sundrum (une dimension supplémentaire voilée)

3.1/ Physique des particules

- Dans les modèles dont nous parlons le graviton usuel est remplacé par un nombre infini de gravitons de Kaluza-Klein.
- Chacun de ces gravitons interagit avec la matière comme un graviton ordinaire (la seule différence est qu'il peut avoir une masse non nulle).



Couplage universel à tout ce qui transporte de l'énergie-impulsion



$$\sigma \propto \frac{M_{\text{Planck}}^2}{M^2}$$

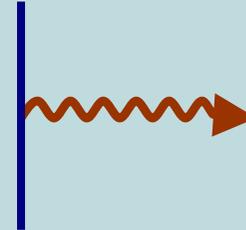
Nombre de modes de Kaluza-Klein accessibles:

$$\mathcal{N} \propto (\text{Energie})^n$$

Différents processus ont été envisagés :

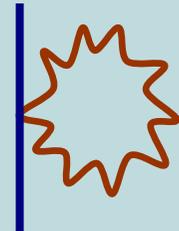
- Emission de gravitons réels:

$$\begin{aligned} \text{ex: } e^+ e^- &\rightarrow \gamma / Z \quad G_{KK} \\ p \quad \bar{p} &\rightarrow g \quad G_{KK} \quad \dots \end{aligned}$$



- Echange de gravitons virtuels:

- Observables de précision
- Déviations par rapport au modèle standard
- Nouvelles interactions effectives



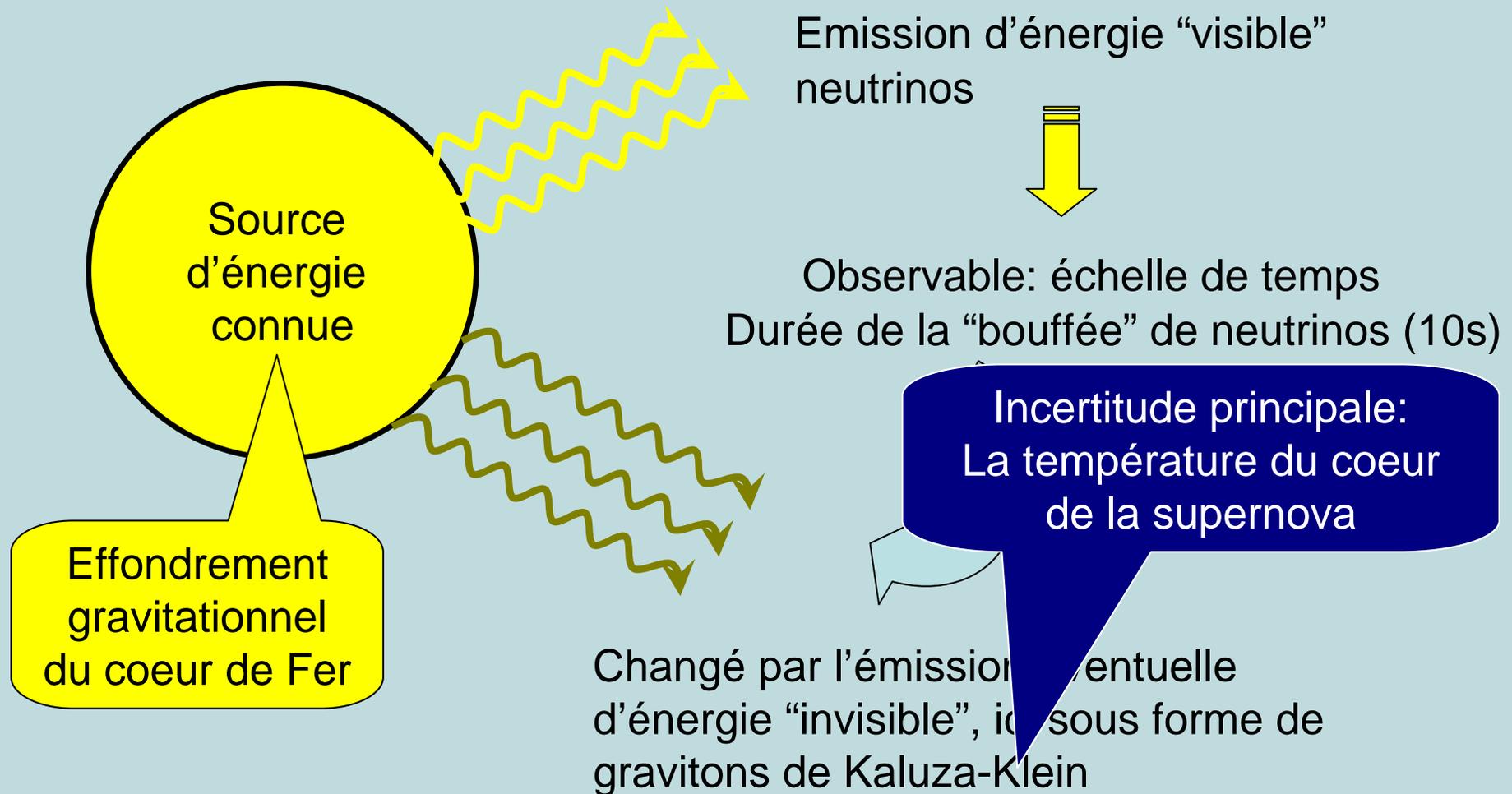
- Autres processus “exotiques”:

- Emission d'états de cordes (spins élevés)?
- Productions de trous noirs?

(La plupart des calculs sont faits dans le cadre d'une théorie des champs effective)

3.2. Contraintes astrophysiques

SN 1987A : émis à la durée d'une phase de vie stellaire



$$\rightarrow M_{(6)} \geq 30 \text{ TeV}, M_{(7)} \geq qq \text{ TeV} \dots$$

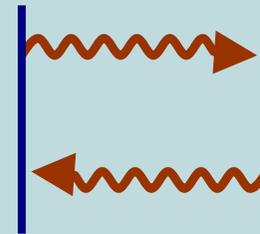
3.2.2. Autres contraintes astrophysiques:

- Désintégration de gravitons de Kaluza-Klein par émission de photons gamma.



Gravitons émis dans l'univers primordial

Gravitons émis lors de la formation d'une étoile à neutrons



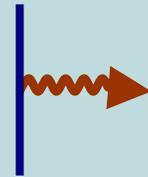
- Réchauffement anormal d'une étoile à neutrons par désintégration de gravitons de Kaluza-Klein, et émission γ non observée [Hannestad & Raffelt 2002](#)

➔ $M_{(6)} \geq 280\text{TeV}, M_{(7)} \geq 10\text{TeV}...$

3.3 Cosmologie

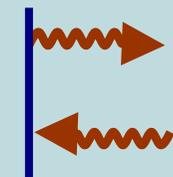
3.3.1. Contraintes cosmologiques « perturbatives »

- Dans l'univers primordial, au-dessus d'une certaine température T^* , l'Univers se refroidit plus vite par émission de gravitons de Kaluza-Klein que par l'expansion



$T^* > T(\text{Nucléosynthèse})$ pour $M(4+n) \sim \text{TeV}$. Peut changer la baryogenèse, le “réchauffement” après l'inflation.

- “Fermeture de l'Univers” par production de gravitons de Kaluza-Klein dans l'univers primordial
- Désintégration des gravitons de Kaluza-Klein sous forme de photons gamma



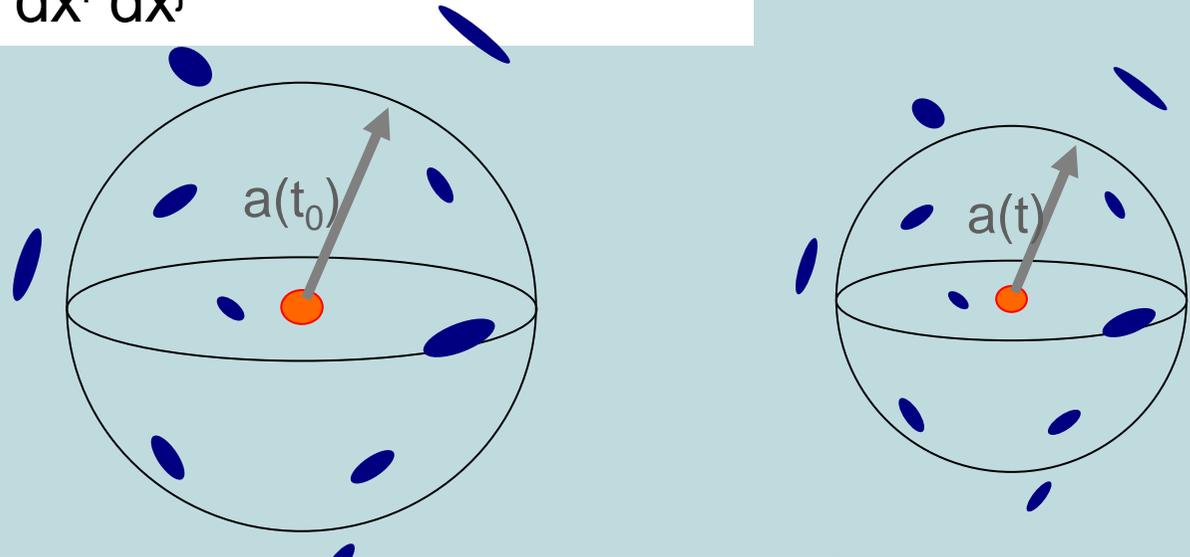
3.3.2. Un exemple de cosmologie « non perturbative » :

En cosmologie standard (4D) ...

- L'Univers est décrit par une métrique FLRW:

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \gamma_{ij} dx^i dx^j$$

facteur d'échelle
de l'Univers



- Les équations d'Einstein donnent la dynamique:

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G_N T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$

Equations
de Friedmann

Tenseur
d'Einstein
 $\sim \partial^2 g_{\mu\nu}$

Tenseur énergie-
impulsion de la
matière

Constante
cosmologique: "tension
de l'espace-temps"

Les équations de Friedmann standard (relient le taux d'expansion de l'Univers à son contenu matériel):

deviennent: $H^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G_N}{3} \rho$

avec une dimension supplémentaire

Densité d'énergie de la matière dans l'Univers

Binétruy, C.D., Langlois; Ellwanger, 99

H^2 : paramètre de Hubble, mesure le taux d'expansion cosmique

$\frac{k}{a^2}$

$\frac{\rho_B}{6M^3}$

(5)

Paramétrise la courbure spatiale de l'Univers

$\frac{c}{a^4}$

(5)

Terme de radiation "sombre"

Derivée par rapport au temps

La densité d'énergie de la matière apparaît quadratiquement !

ρ_B : constante cosmologique du "bulk"

Densité de la matière dans l'Univers

$$\dot{\rho} = -3H(P + \rho)$$

Implications phénoménologiques d'une phase "branaire" pure

"branaire"

vs.

standard

$$H^2 = \frac{\rho^2}{36M_{(5)}^6}$$
$$0 = \dot{\rho} + 3H(P + \rho)$$

$$H^2 = \frac{8\pi G_N}{3} \rho$$
$$0 = \dot{\rho} + 3H(P + \rho)$$

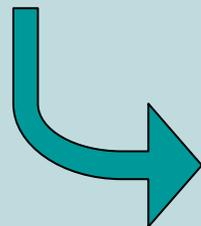


Avec $P = w \rho$



$$a(t) \propto t^{\frac{1}{3(1+w)}}$$
$$H \propto T^4(\text{RD})$$

$$a(t) \propto t^{\frac{2}{3(1+w)}}$$
$$H \propto T^2(\text{RD})$$



Exclu, par ex. par la nucléosynthèse

Peut-on retrouver la cosmologie standard?

$$H^2 = \frac{\rho^2}{36M_{(5)}^6} + \frac{\rho_B}{6M_{(5)}^3} + \frac{c}{a^4} - \frac{k}{a^2}$$

$$H^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G_N}{3} \rho$$

Si on considère une brane de tension λ , l'équation de Friedmann branaire devient, avec $\rho \rightarrow \rho + \lambda$

$$H^2 = \frac{\lambda^2}{36M_{(5)}^6} + \frac{\rho_B}{6M_{(5)}^3} + \frac{\lambda\rho}{18M_{(5)}^6} + \frac{\rho^2}{36M_{(5)}^6} + \frac{c}{a^4} - \frac{k}{a^2}$$

$$\rho_B = -\frac{\lambda^2}{6M_{(5)}^3} (< 0 \text{ AdS})$$

Cette situation correspond très exactement au modèle de dimension supplémentaire "voilée" de **Randall-Sundrum**: brane dans AdS_5 , modèle d'univers brane le plus simple

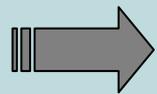
Terme standard
si $\frac{\lambda}{18M_{(5)}^6} = \frac{8\pi G_N}{3}$

Dans un cas plus général on doit faire appel à d'autres mécanismes

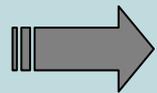
Bilan: équations de Friedmann pour le modèle avec dimension supplémentaire voilée:

$$H^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G_N}{3} \rho + \frac{\rho^2}{36M_{(5)}^6} + \frac{C}{a^4}$$

$$\dot{\rho} = -3H(P + \rho)$$



Cosmologie "tardive" standard



Cosmologie primordiale non standard

En accord avec les résultats "observés":

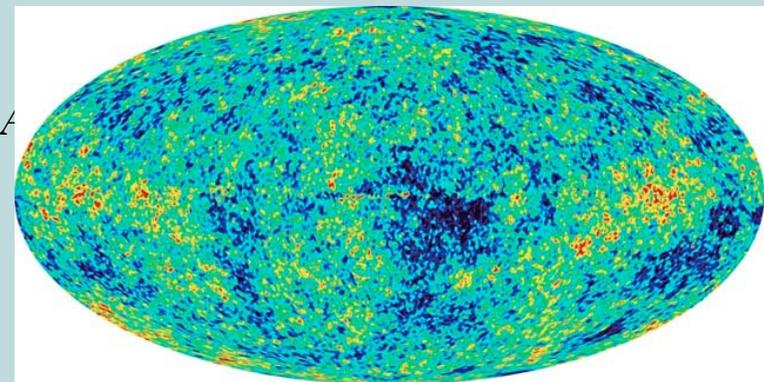
rayonnement cosmique de fond?

Cosmologie tardive = $H^{-1} \gg R_H$

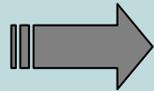
=> gravité ordinaire

Cosmologie primordiale = $H^{-1} \ll R_H$

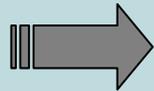
=> gravité modifiée



Une autre direction phénoménologique intéressante pour la cosmologie: modèle de gravité branaire induite



Cosmologie “tardive” **non** standard



Cosmologie primordiale standard

Possibilité d’obtenir une accélération cosmique sans constante cosmologique en modifiant la gravitation à ultra large distance

C.D., C.D.& Dvali & Gabadadze, 2002

Dans ce modèle le potentiel Newtonien se comporte comme

$$V(r) \propto \frac{1}{r} \quad \leftarrow \quad \text{Comportement 4D à petites distances}$$
$$V(r) \propto \frac{1}{r^2} \quad \leftarrow \quad \text{Comportement 5D à grandes distances}$$

La transition entre les deux régimes se produit pour une distance caractéristique

$$r_c = \frac{M_P^2}{2M_{(5)}^3}$$

Pour que le modèle soit viable, on doit demander que r_c soit suffisamment grand

NB: l'interaction gravitationnelle est mal connue sur des distances cosmologiques ...

Cosmologie du modèle de gravité branaire induite

Les techniques standard utilisées pour dériver la cosmologie branaire peuvent être employées

$$H^2 \propto (\rho + \lambda) - \frac{3}{8\pi G_N} H^2 + \dots$$

Brane de tension λ
(joue le rôle d'une constante cosmologique)

Equation quadratique pour H^2 conduisant aux équations de Friedmann (pour $\lambda = 0$):

$$\sqrt{H^2 + \frac{k}{a^2}} = \frac{\pm 1}{2r_c} + \sqrt{\frac{8\pi G_N}{3} \rho + \frac{1}{4r_c^2}}$$
$$0 = \dot{\rho} + 3H(\rho + P)$$

$$H^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G_N}{3} \rho$$

Analogues aux équations de Friedmann usuelles pour $H^{-1} \ll r_c$ i.e. dans l'univers primordial

Quid de la cosmologie tardive ?

$$\sqrt{H^2 + \frac{k}{a^2}} = \frac{1}{2r_c} + \underbrace{\sqrt{\frac{1}{4r_c^2} + \frac{8\pi G_N \rho}{3}}}$$

Tend vers une constante (r_c^{-1}) si ρ tend vers zéro

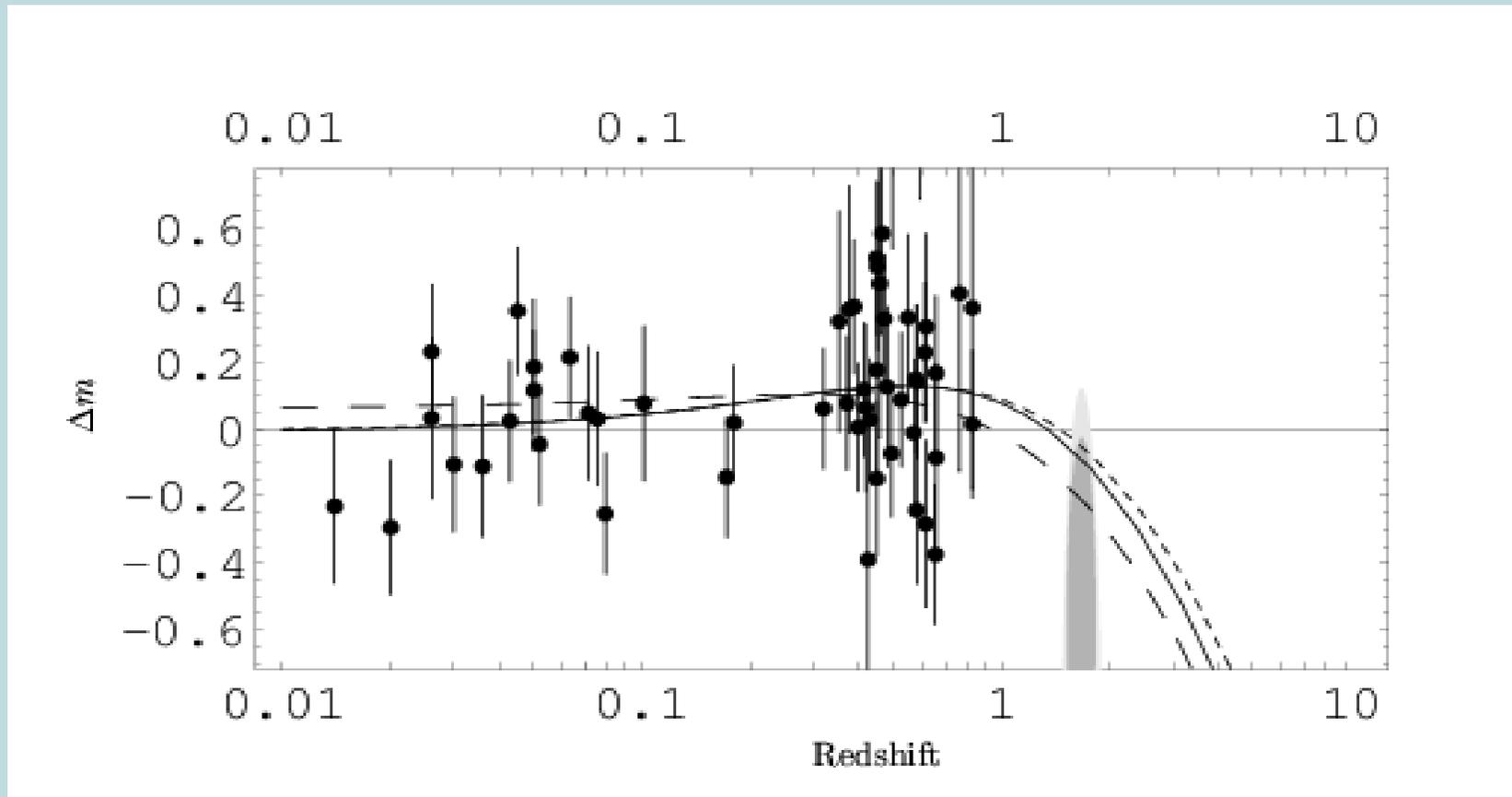
Donc asymptotiquement, dans l'univers "tardif"

$$H^2 + \frac{k}{a^2} = r_c^2$$

Analogue à l'effet d'une constante cosmologique sans constante cosmologique ($\lambda = 0$)!

$$H^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{\Lambda}{3}$$

Univers plats vs SNIa:



- univers plat, cosmologie standard $\Omega_M = 0.28$
- - - univers plat, gravité branaire induite $\Omega_M = 0.18$
- · - · gravité branaire induite, avec $\Omega_M = 0.3$

Sur un plan théorique: plusieurs questions débattues pour rendre le modèle viable

$$1/ \quad r_c \sim H_0^{-1} \Rightarrow M_{(5)} \sim 10 - 100 \text{ MeV}$$


Très basse échelle de gravité quantique?
Quelle est la théorie aux énergies élevées?

2/ Auto couplage fort et instabilités...

Luty, Porrati, Rattazzi;
Rubakov; Koyama et al.



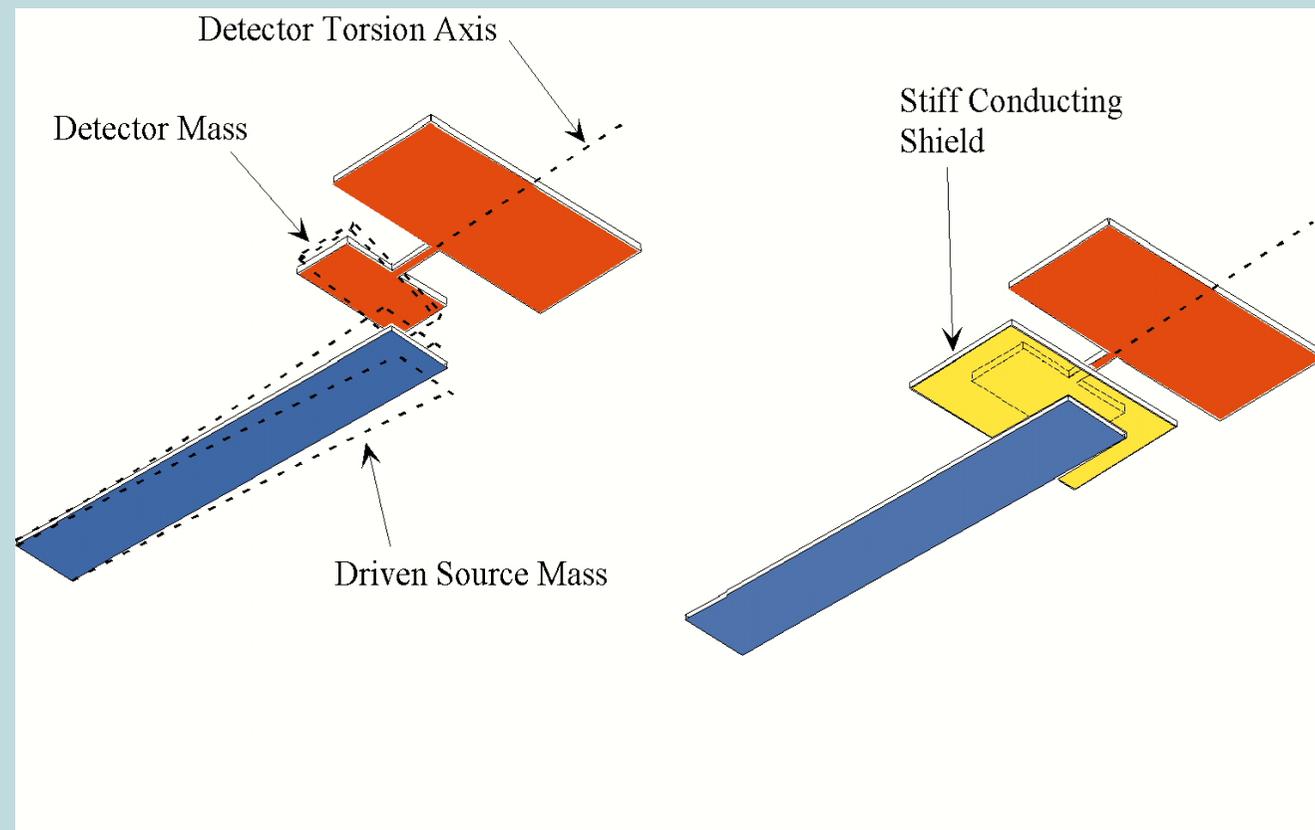
Est-ce réalisable en théorie des cordes?

Dvali, Gabadadze, Kolanovic, Nitti;
Antoniadis, Minasian, Vanhove...

3/ Questions pas complètement comprises reliées à la "discontinuité de vDVZ" ("gravité massive")...

2.4/ Tests de la gravitation à petite distance

Les modèles dont nous avons parlé fournissent également de nouvelles motivations pour certaines expériences de test de la gravité à petite distance



Conclusions:

- Modèles d'univers brane: domaine très riche; avec beaucoup d'idées nouvelles...

Nouvelle "phénoménologie" des théories de cordes (cordes avec basse "échelle fondamentale").

Nouvelles idées théoriques abstraites et phénoménologiques, en particulier en cosmologie.

- Possibilité de contraindre fortement certains modèles.



Travaux encore nécessaires
notamment en cosmologie