

La cosmologie : un laboratoire pour la théorie des cordes

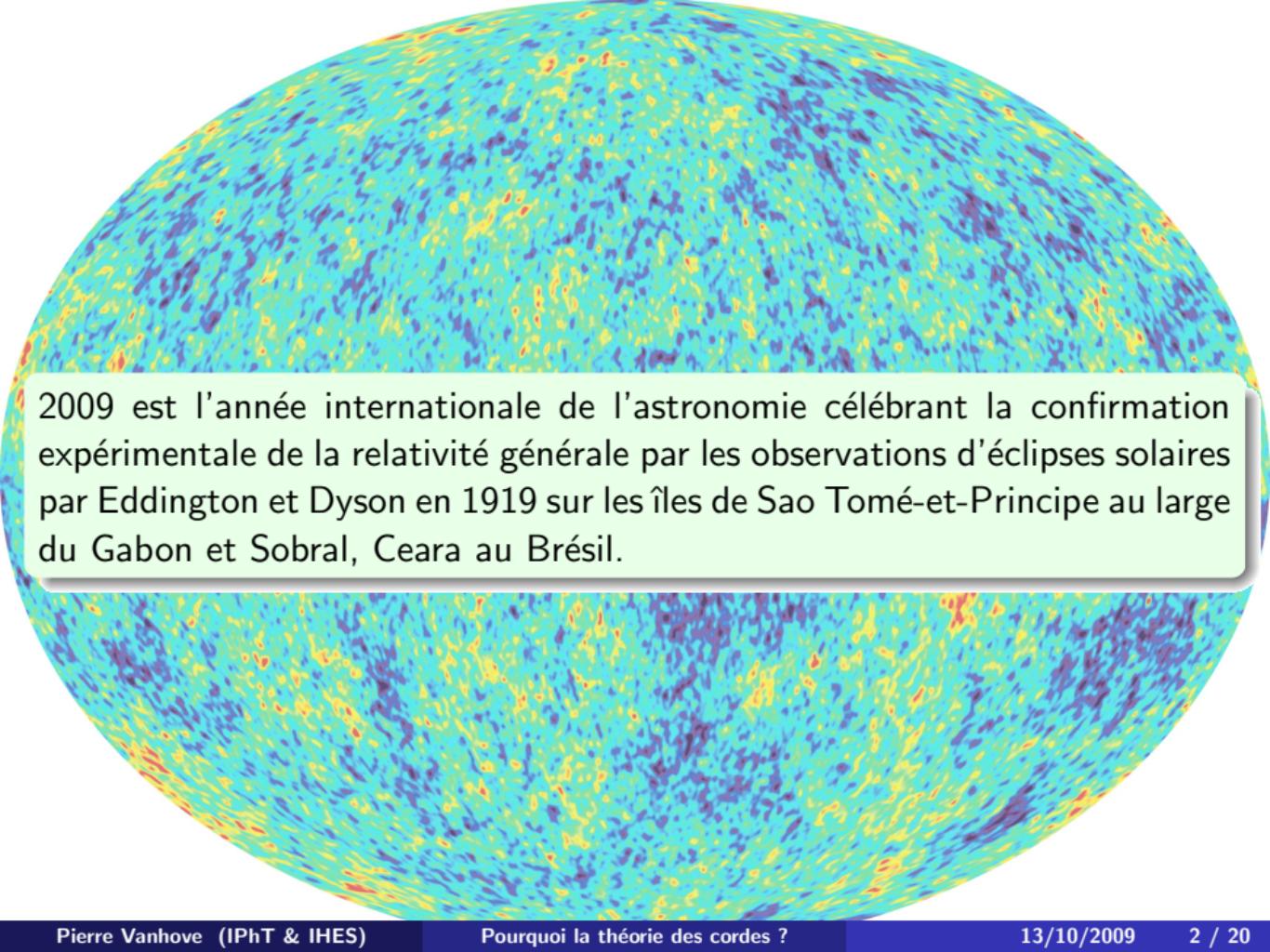
Pierre Vanhove



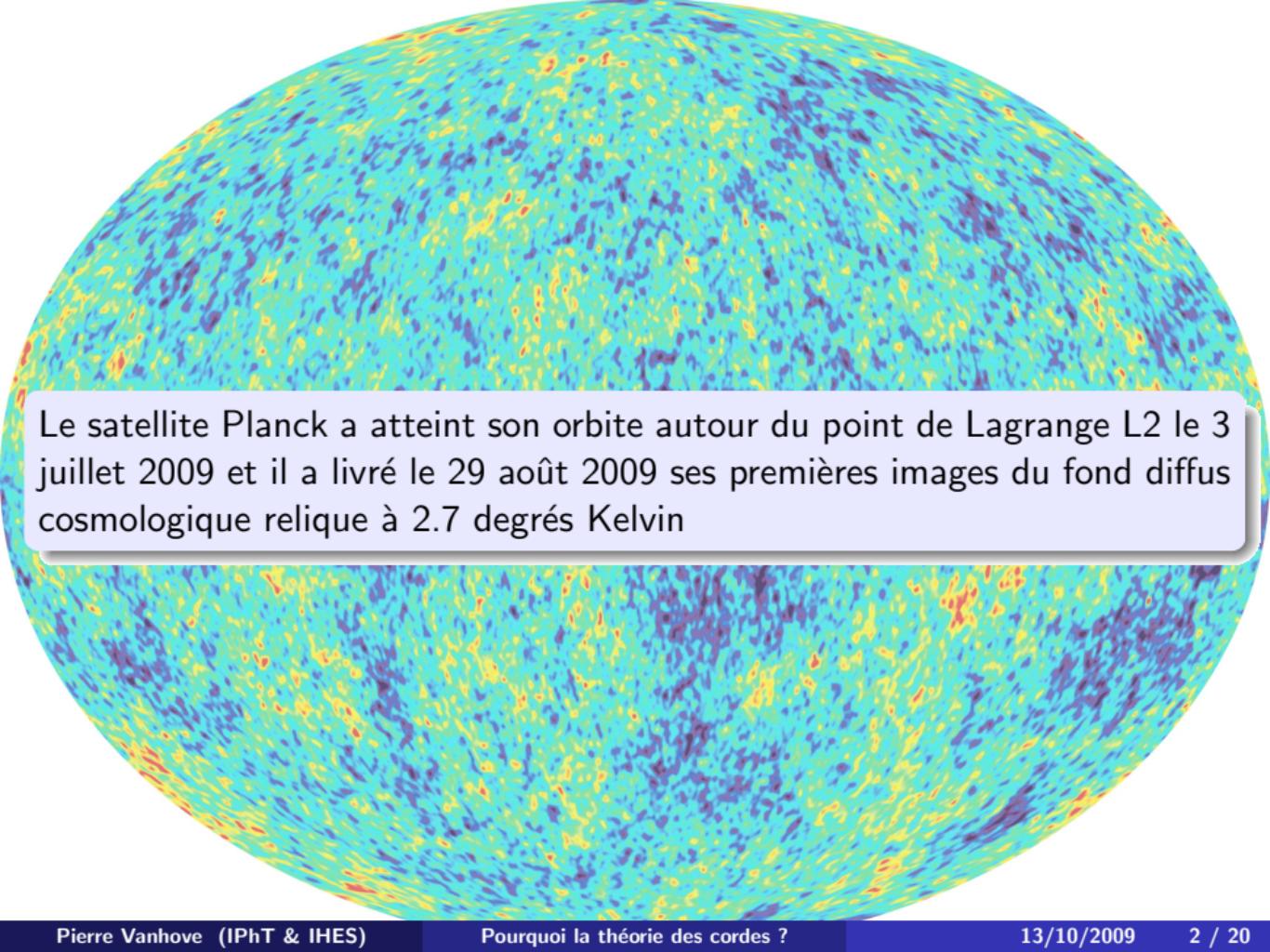
Colloque « Forme et origine de l'univers » le 13 Octobre, 2009



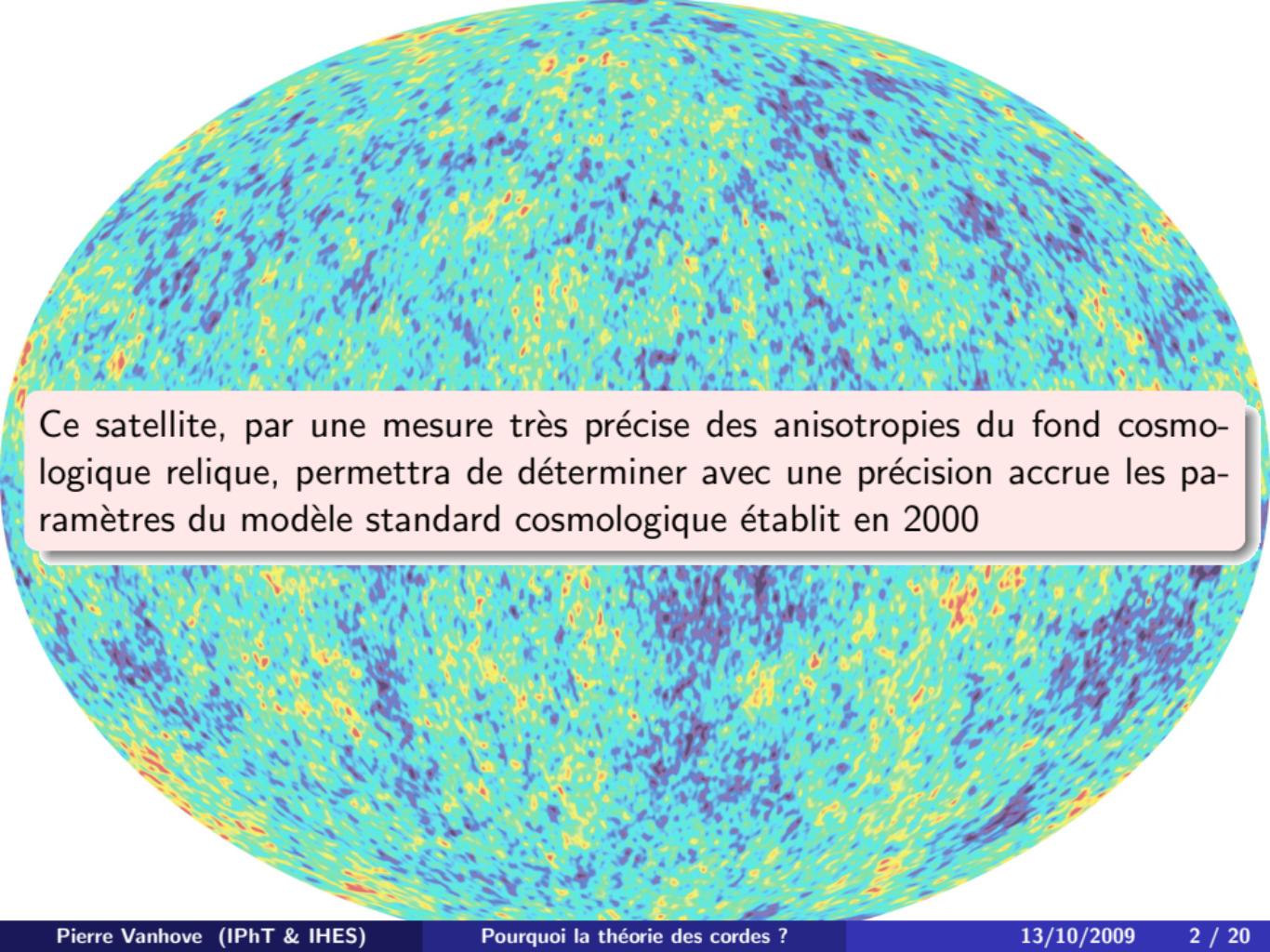
Пустыня – это бездарно! Но она существует.



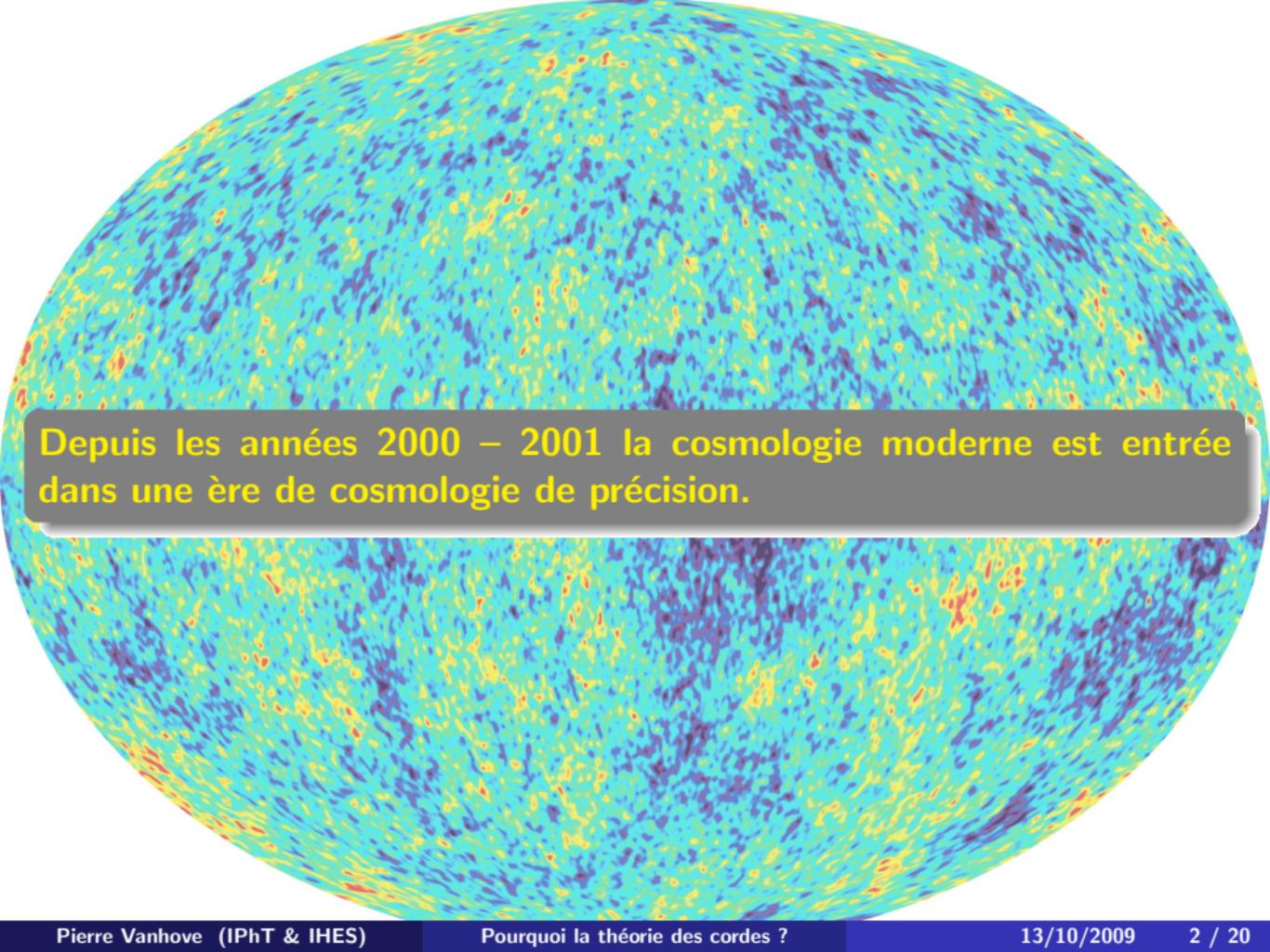
2009 est l'année internationale de l'astronomie célébrant la confirmation expérimentale de la relativité générale par les observations d'éclipses solaires par Eddington et Dyson en 1919 sur les îles de Sao Tomé-et-Principe au large du Gabon et Sobral, Ceará au Brésil.



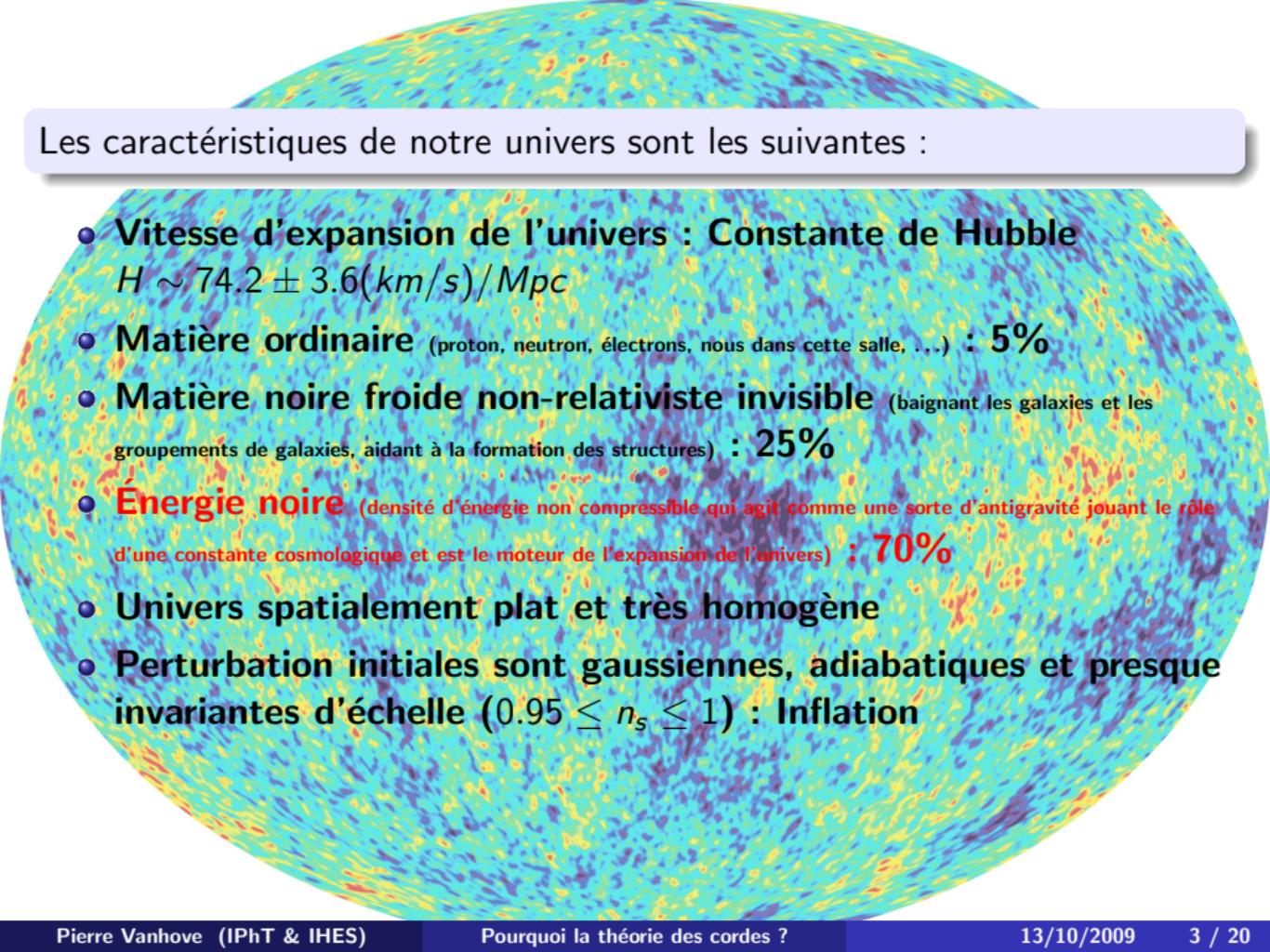
Le satellite Planck a atteint son orbite autour du point de Lagrange L2 le 3 juillet 2009 et il a livré le 29 août 2009 ses premières images du fond diffus cosmologique relique à 2.7 degrés Kelvin



Ce satellite, par une mesure très précise des anisotropies du fond cosmologique relique, permettra de déterminer avec une précision accrue les paramètres du modèle standard cosmologique établit en 2000



Depuis les années 2000 – 2001 la cosmologie moderne est entrée dans une ère de cosmologie de précision.



Les caractéristiques de notre univers sont les suivantes :

- **Vitesse d'expansion de l'univers : Constante de Hubble**
 $H \sim 74.2 \pm 3.6 \text{ (km/s)}/\text{Mpc}$
- **Matière ordinaire** (proton, neutron, électrons, nous dans cette salle, ...) : **5%**
- **Matière noire froide non-relativiste invisible** (baignant les galaxies et les groupements de galaxies, aidant à la formation des structures) : **25%**
- **Énergie noire** (densité d'énergie non compressible qui agit comme une sorte d'antigravité jouant le rôle d'une constante cosmologique et est le moteur de l'expansion de l'univers) : **70%**
- **Univers spatialement plat et très homogène**
- **Perturbation initiales sont gaussiennes, adiabatiques et presque invariantes d'échelle ($0.95 \leq n_s \leq 1$) : Inflation**

Plan

- 1 Pourquoi quantifier la gravitation ?
- 2 Quelle théorie de la gravité quantique ?
- 3 Application : Accélération de l'expansion de l'univers
- 4 Conclusion & Perspectives

Première partie I

Pourquoi quantifier la gravitation ?

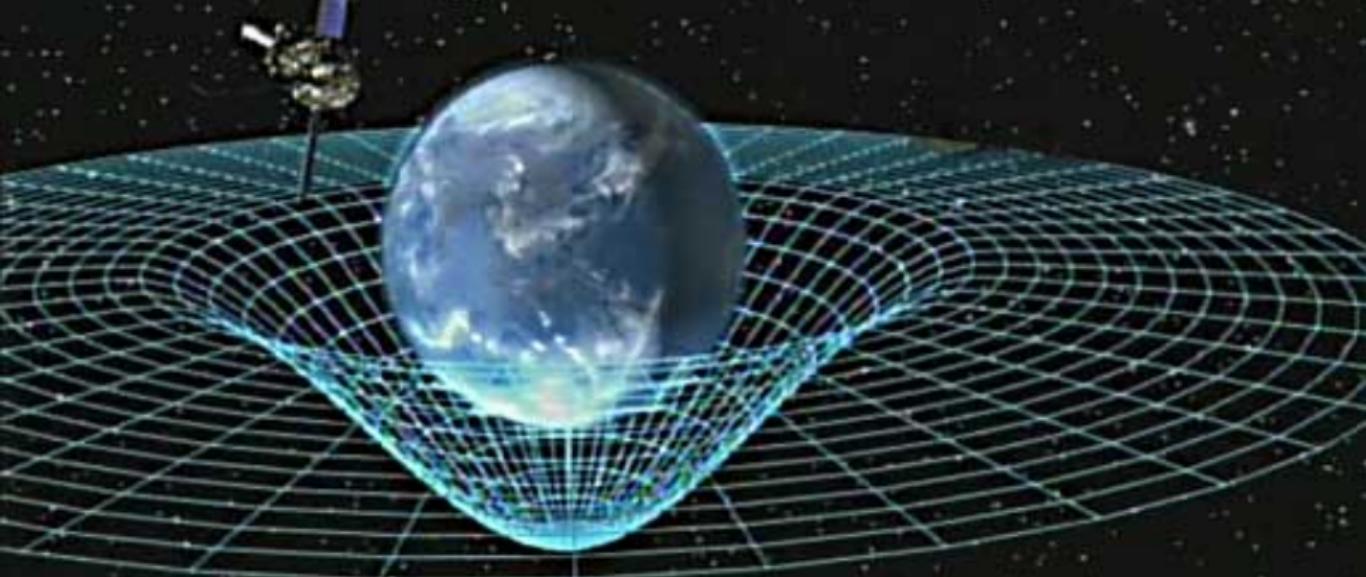
There is a theory which states that if ever anyone discovers exactly what the universe is for and why it is here, it will instantly disappear and be replaced by something even more bizarre and inexplicable.

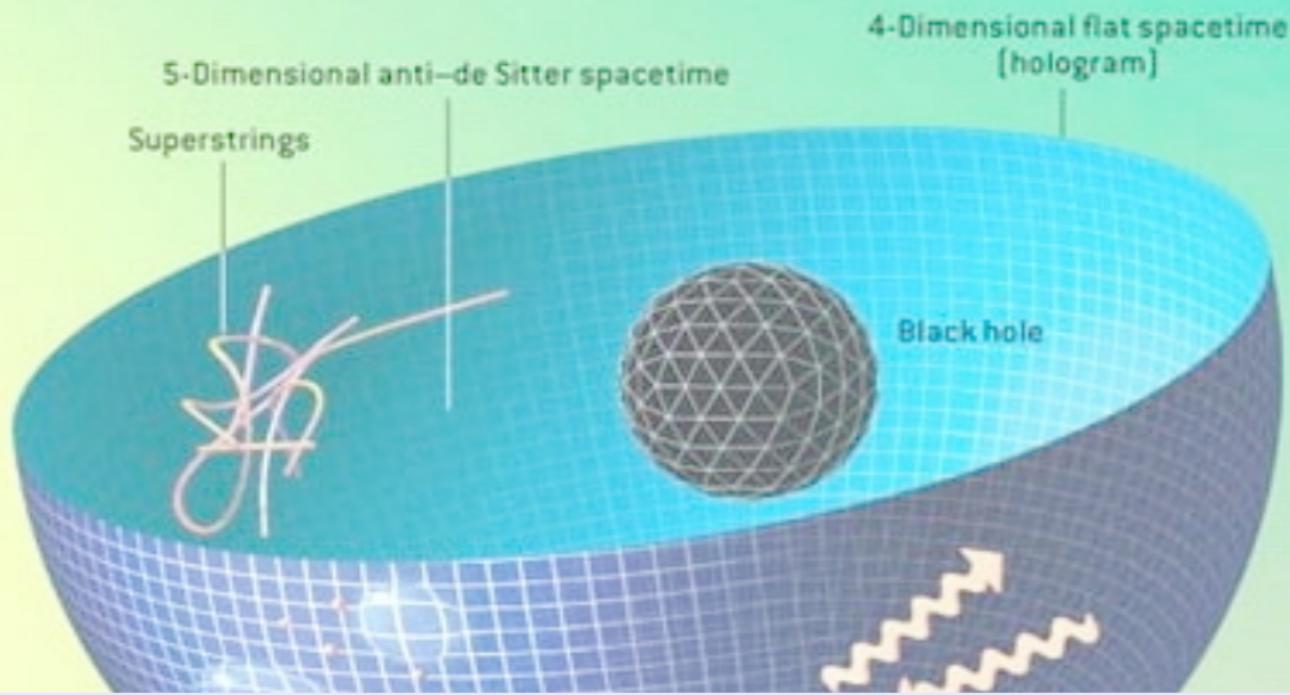
There is another which states that this has already happened.

(Douglas Adams « The restaurant at the end of the Universe »)

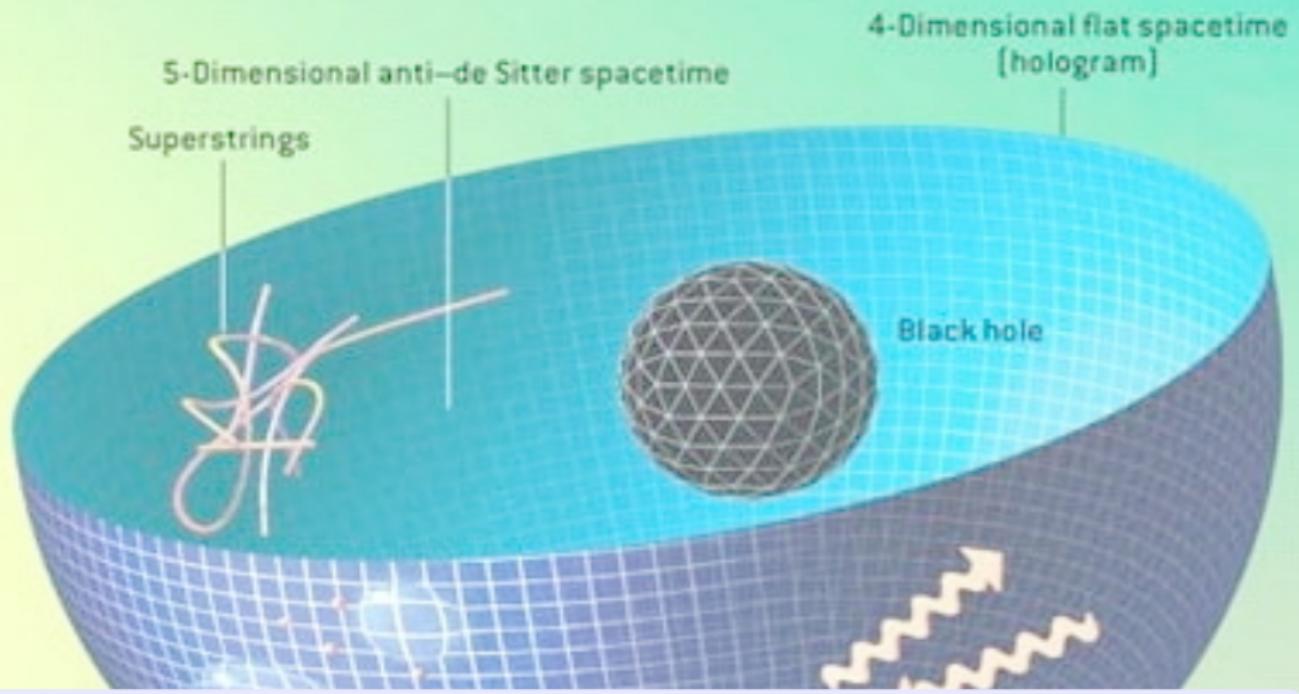
- ▷ Toutes les interactions fondamentales sont quantifiées et la gravité couple à toute la matière à toutes les échelles microscopiques et macroscopiques

$$\mathcal{R}_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}\mathcal{R} = \frac{8\pi G_{\text{Newton}}}{c^4} T_{\mu\nu}(\gamma, e^-, \dots)$$





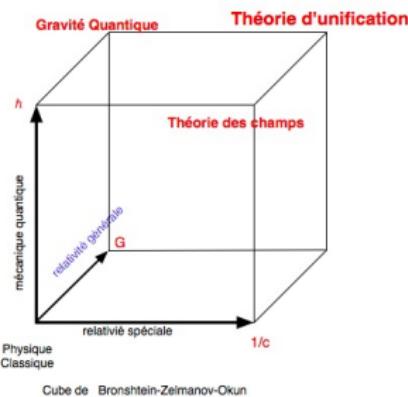
Un autre argument en faveur de la gravité quantique est la correspondance AdS/CFT entre théorie de jauge et gravité quantique [Maldacena (1997)]



Selon cette correspondance la gravité quantique dans un espace courbe et une théorie de jauge, comme la QCD, définie sur la bord de cet espace sont deux facettes de la **même** théorie quantique

Selon le raisonnement de Max Planck [[Über irreversible Strahlungsvorgänge](#) >> Annalen der Physik 1 (1900)

p.p. 69-122] on attend des effets de gravité quantique importants à des distances de l'ordre de la longueur de Planck

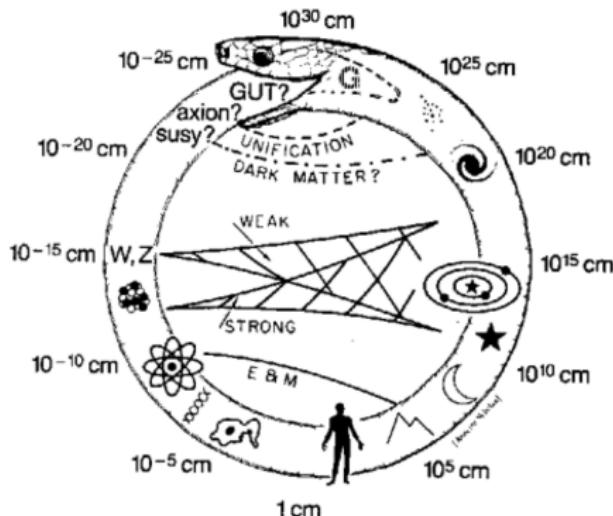


$$\ell_4 = \sqrt{\frac{\hbar G_{\text{Newton}}}{c}} = 1.6 \cdot 10^{-33} \text{ cm}$$

ou à des énergies de l'ordre

$$E_{\text{Planck}} = \frac{\hbar c^3}{G_{\text{Newton}}} = 1.22 \cdot 10^{19} \text{ GeV}$$

Ces grandeurs semblent désespérément inaccessibles à l'expérience



- L'échelle d'énergie naturelle des théories d'inflation est de l'ordre de l'échelle de grande unification 10^{16} GeV qui est $0.001 \times E_{\text{Planck}}$.
- Les non-linéarités du spectre du fond diffus relique générées à cette énergie contiennent certainement des informations sur la physique à l'échelle de Planck.
- Les effets à très grandes distances infra-rouge

Des questions pour la gravité quantique :

▷ Sélection du vide

(le paysage se dégagera avec une meilleure compréhension de la quantification de la gravité)

▷ Fluctuations primordiales

▷ Accélération de l'expansion de l'univers :

Vue soit comme un effet ultra-violet : constante cosmologique, soit comme un effet infra-rouge à très grande distance de << dilution >> de la force gravitationnelle

▷ Pourquoi trois dimensions d'espace visibles ?

La cosmologie est un domaine naturel pour tester les concepts de la gravité quantique

Deuxième partie II

Quelle théorie de la gravité quantique ?

Nous recherchons une théorie qui soit

- Renormalisable : une théorie contenant un nombre fini de paramètres corrigés par des corrections quantiques
- Unitaire : qui permet de déterminer la transformation des états quantiques de la théorie sans perte d'informations.
- Invariante de Lorentz : invariante sous les transformations de la relativité restreinte

Nous recherchons une théorie qui soit

- Renormalisable : une théorie contenant un nombre fini de paramètres corrigés par des corrections quantiques
- Unitaire : qui permet de déterminer la transformation des états quantiques de la théorie sans perte d'informations.
- Invariante de Lorentz : invariante sous les transformations de la relativité restreinte

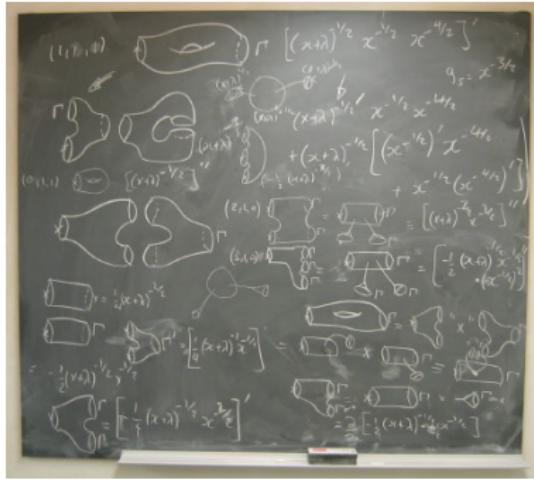
Nous recherchons une théorie qui soit

- Renormalisable : une théorie contenant un nombre fini de paramètres corrigés par des corrections quantiques
- Unitaire : qui permet de déterminer la transformation des états quantiques de la théorie sans perte d'informations.
- Invariante de Lorentz : invariante sous les transformations de la relativité restreinte

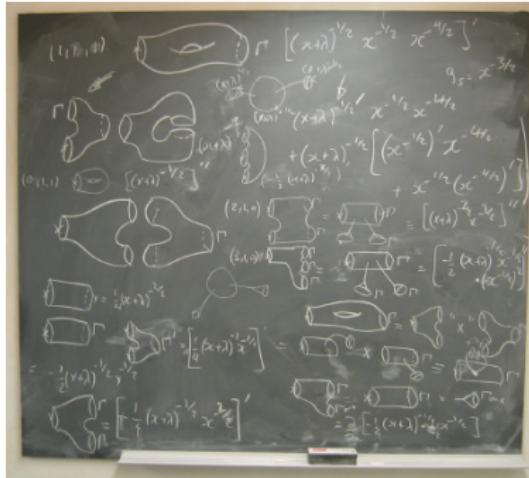
Nous recherchons une théorie qui soit

- Renormalisable : une théorie contenant un nombre fini de paramètres corrigés par des corrections quantiques
- Unitaire : qui permet de déterminer la transformation des états quantiques de la théorie sans perte d'informations.
- Invariante de Lorentz : invariante sous les transformations de la relativité restreinte

La théorie des cordes satisfait tous ces critères

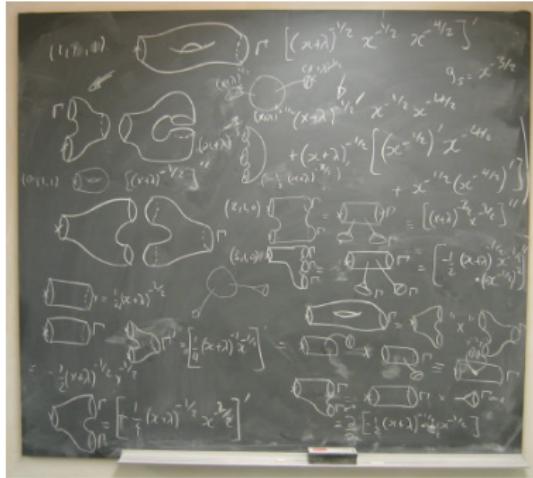


La théorie des cordes fournit à la fois la distance minimale nécessaire pour rendre la théorie de gravité finie à courtes distances, et apporte de nouveaux degrés de libertés.



Si on n'impose que deux de ces trois conditions il est possible de construire de nombreuses « théories » de la gravité quantique

Certaines approches sacrifient l'invariance de Lorentz sous le prétexte que c'est une propriété intrinsèque de la gravité quantique (i.e. existence d'une longueur minimale). Mais même une perte d'invariance de Lorentz aux très courtes échelles aura des conséquences à tous les échelles par l'existence de différentes vitesses de la lumière pour différentes particules fondamentales



Il est intéressant de remarquer que la théorie des cordes utilise une théorie de gravité quantique en deux dimensions pour définir la gravité quantique en dix dimensions.

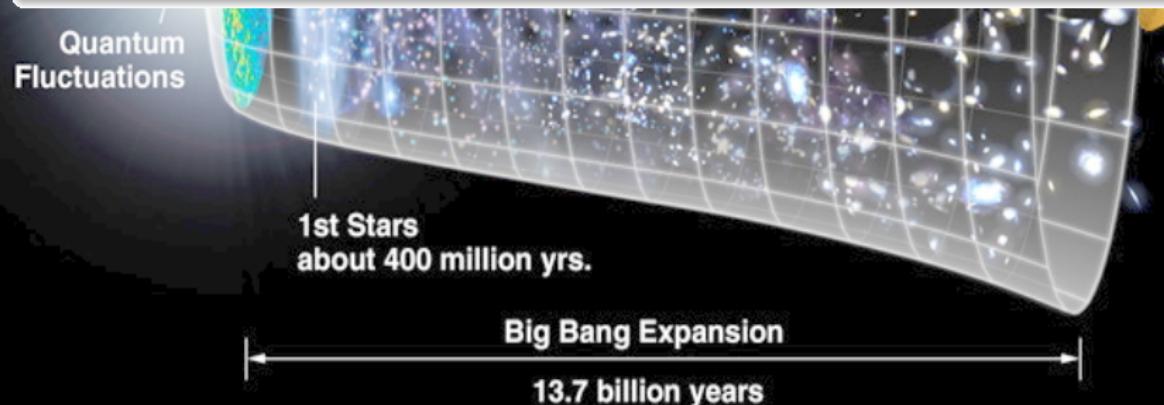
Troisième partie III

Application : l'accélération de l'univers

*Comme ultraïste et kantien, je crois à la 4ème dimension
(Jorge Luis Borges in « Lettres à Maurice Abramowicz »)*



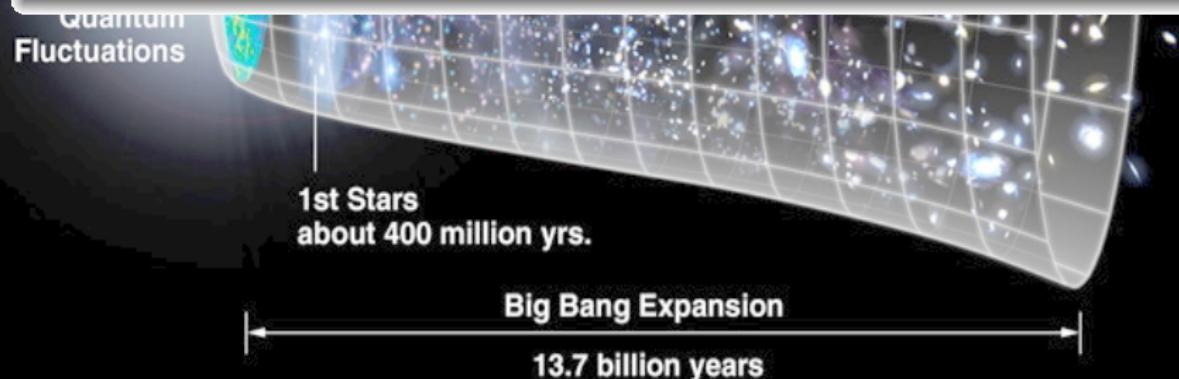
En 1998 les équipes du *Supernova Cosmology Project* et du *High-Z supernovae search* ont mis en évidence l'accélération de l'expansion de notre Univers





Cela peut s'expliquer si la force de gravité devient plus faible aux échelles de l'ordre de la taille de Hubble de notre univers visible

$$H_0^{-1} \sim 1 \text{ Gpc} \sim 10^{25} \text{ m} .$$



Dark Energy Accelerated Expansion

Afterglow Light
Pattern
400,000 yrs.

Dark Ages

Development of
Galaxies, Planets, etc.

En 2000 [Dvali, Gabadadze, Porrati] ont proposé un mécanisme qui modifie la gravitation aux grandes distances

$$(1 + \mathcal{F}(R_c^2 \square)) \left(\mathcal{R}_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} \mathcal{R}_{(4)} \right) = \frac{8\pi G_{\text{Newton}}}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$1 \text{ mm} \quad \underbrace{\ll r \ll}_{\text{Gravite Einsteinne}} \quad R_c \simeq 10^{25} \text{ m}$$

1st Stars
about 400 million yrs.

Big Bang Expansion

13.7 billion years

Malheureusement il est difficile de modifier la gravitation à grande distance sans changer la gravité aux distances plus faibles sur terre !

Problèmes du mécanisme réalisé en théorie des champs :

- ▷ Ordres de grandeurs corrects difficiles à obtenir
- ▷ Le modèle est instable : propagation de fantôme
- ▷ Mécanisme de génération de la gravité induite ?
- ▷ Dépendance de l'échelle à grandes distances R_c en la physique à courtes distances en quatre dimensions : mélanges des échelles !

Malheureusement il est difficile de modifier la gravitation à grande distance sans changer la gravité aux distances plus faibles sur terre !

Problèmes du mécanisme réalisé en théorie des champs :

- ▷ Ordres de grandeurs corrects difficiles à obtenir
- ▷ Le modèle est instable : propagation de fantôme
- ▷ Mécanisme de génération de la gravité induite ?
- ▷ Dépendance de l'échelle à grandes distances R_c en la physique à courtes distances en quatre dimensions : mélanges des échelles !

Malheureusement il est difficile de modifier la gravitation à grande distance sans changer la gravité aux distances plus faibles sur terre !

Problèmes du mécanisme réalisé en théorie des champs :

- ▷ Ordres de grandeurs corrects difficiles à obtenir
- ▷ Le modèle est instable : propagation de fantôme
- ▷ Mécanisme de génération de la gravité induite ?
- ▷ Dépendance de l'échelle à grandes distances R_c en la physique à courtes distances en quatre dimensions : mélanges des échelles !

Malheureusement il est difficile de modifier la gravitation à grande distance sans changer la gravité aux distances plus faibles sur terre !

Problèmes du mécanisme réalisé en théorie des champs :

- ▷ Ordres de grandeurs corrects difficiles à obtenir
- ▷ Le modèle est instable : propagation de fantôme
- ▷ Mécanisme de génération de la gravité induite ?
- ▷ Dépendance de l'échelle à grandes distances R_c en la physique à courtes distances en quatre dimensions : mélanges des échelles !

Malheureusement il est difficile de modifier la gravitation à grande distance sans changer la gravité aux distances plus faibles sur terre !

Problèmes du mécanisme réalisé en théorie des champs :

- ▷ Ordres de grandeurs corrects difficiles à obtenir
- ▷ Le modèle est instable : propagation de fantôme
- ▷ Mécanisme de génération de la gravité induite ?
- ▷ Dépendance de l'échelle à grandes distances R_c en la physique à courtes distances en quatre dimensions : mélanges des échelles !

Ce mécanisme n'est pas justifiable sans connaître la théorie de gravité quantique fondamentale sous-jacente

Malheureusement il est difficile de modifier la gravitation à grande distance sans changer la gravité aux distances plus faibles sur terre !

Problèmes du mécanisme réalisé en théorie des champs :

- ▷ Ordres de grandeurs corrects difficiles à obtenir
- ▷ Le modèle est instable : propagation de fantôme
- ▷ Mécanisme de génération de la gravité induite ?
- ▷ Dépendance de l'échelle à grandes distances R_c en la physique à courtes distances en quatre dimensions : mélanges des échelles !

Ce mécanisme n'est pas justifiable sans connaître la théorie de gravité quantique fondamentale sous-jacente

Il est néanmoins possible de réaliser ce modèle en théorie des cordes et s'assurer de la viabilité de cette idée

[Antoniadis, Minasian, Vanhove (2002)]



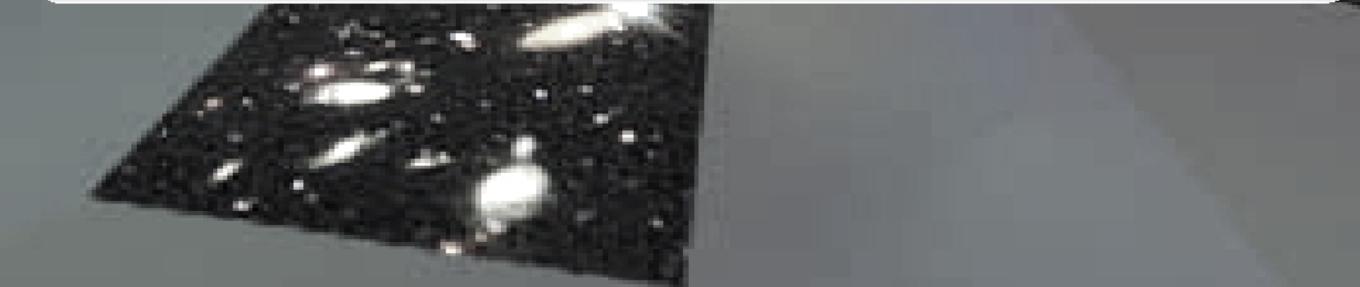
Pour cela imaginons que nous vivons sur un plan tri-dimensionnel $\mathcal{M}_{3,1}$ plongé dans un univers dix-dimensionnel $\mathcal{M}_{9,1}$ avec six dimensions supplémentaires infinies.





Même sans gravitation sur $\mathcal{M}_{3,1}$ les fluctuations quantiques des cordes baignant l'espace ambiant génèrent une gravité induite

$$\frac{1}{\ell_{10}^8} \int_{\mathcal{M}_{9,1}} d^{10}x \sqrt{-G} \mathcal{R}_{(10)} + \frac{1}{\ell_4^2} \int_{\mathcal{M}_{3,1}} d^4x \sqrt{-g} \mathcal{R}_{(4)}$$





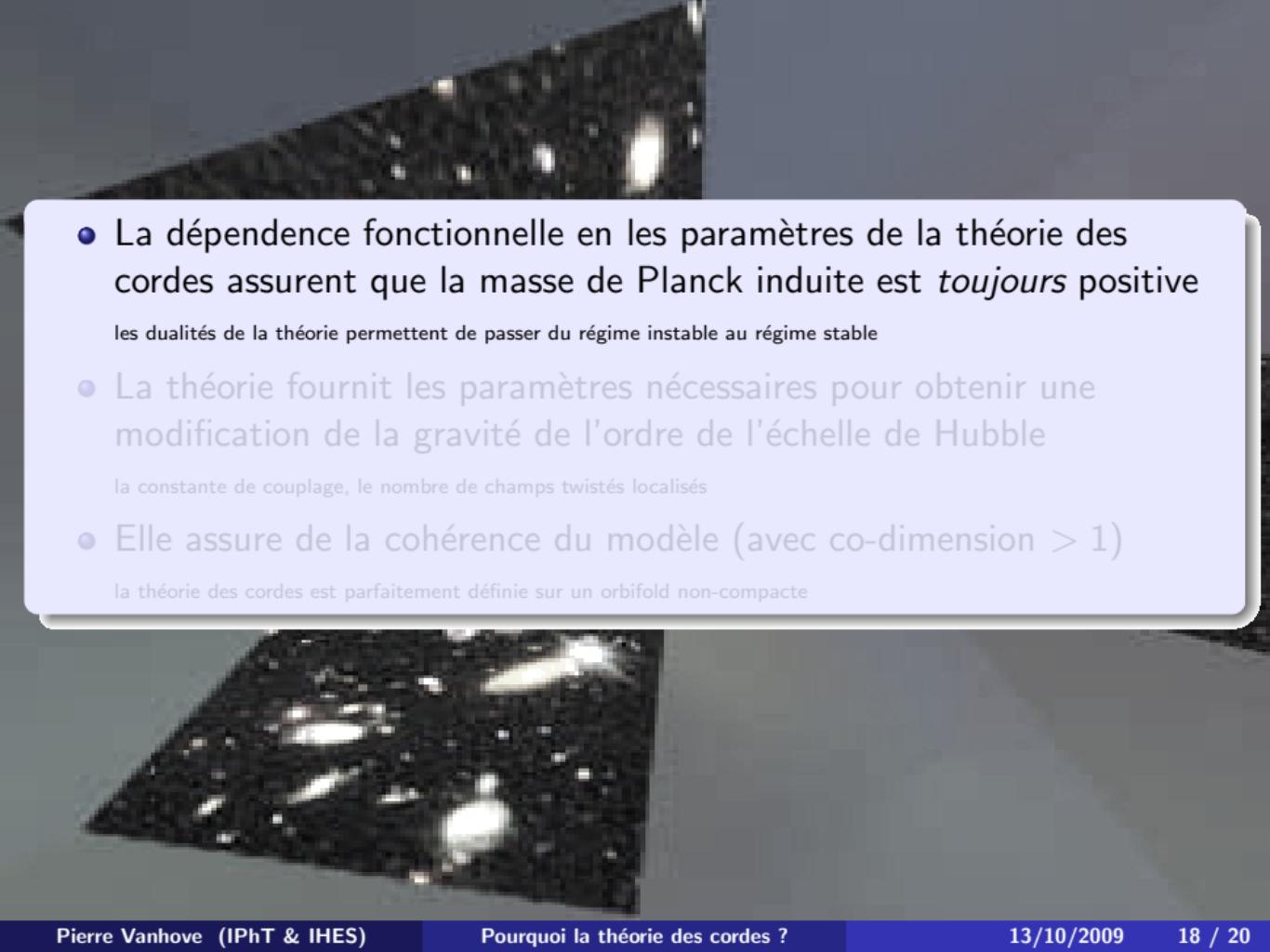
C'est la première correction quantique induite par la théorie des cordes, les termes en R^4 , qui permet le mécanisme

$$\frac{1}{\ell_4^2} = \frac{f(g_s)}{\ell_{(10)}^2} \int_{\mathcal{M}_6} R \wedge R \wedge R \sim 10^{19} \text{ GeV}/(\hbar c)^2$$

Il est intéressant de remarquer que ces termes ont exactement la bonne dimension pour induire de la gravité en dimension quatre !
La théorie favorise un espace-temps quadri-dimensionnel

[Antoniadis, Minasian, Vanhove (2002)]



- 
- La dépendance fonctionnelle en les paramètres de la théorie des cordes assurent que la masse de Planck induite est *toujours* positive
les dualités de la théorie permettent de passer du régime instable au régime stable
 - La théorie fournit les paramètres nécessaires pour obtenir une modification de la gravité de l'ordre de l'échelle de Hubble
la constante de couplage, le nombre de champs twistés localisés
 - Elle assure de la cohérence du modèle (avec co-dimension > 1)
la théorie des cordes est parfaitement définie sur un orbifold non-compacte

- 
- La dépendance fonctionnelle en les paramètres de la théorie des cordes assurent que la masse de Planck induite est *toujours* positive
les dualités de la théorie permettent de passer du régime instable au régime stable
 - La théorie fournit les paramètres nécessaires pour obtenir une modification de la gravité de l'ordre de l'échelle de Hubble
la constante de couplage, le nombre de champs twistés localisés
 - Elle assure de la cohérence du modèle (avec co-dimension > 1)
la théorie des cordes est parfaitement définie sur un orbifold non-compacte



- 
- La dépendance fonctionnelle en les paramètres de la théorie des cordes assurent que la masse de Planck induite est *toujours* positive
les dualités de la théorie permettent de passer du régime instable au régime stable
 - La théorie fournit les paramètres nécessaires pour obtenir une modification de la gravité de l'ordre de l'échelle de Hubble
la constante de couplage, le nombre de champs twistés localisés
 - Elle assure de la cohérence du modèle (avec co-dimension > 1)
la théorie des cordes est parfaitement définie sur un orbifold non-compacte

Quatrième partie IV

Conclusion & Perspectives

[...] on ne peut pas.

- C'est qu'on ne sait pas s'y prendre.

- On le démontre.

- Mais c'est scandaleux.

- Comme vous le dites. C'est scandaleux parce qu'il y a là une réalité rebelle au langage algébriko-logique, parce qu'il y a là une réalité qui nous dépasse [...]

(R. Queneau, in « Odile »)



- Les effets de la gravité quantique se manifestent à toutes les échelles : courtes comme cosmologiques
- Selon le principe d'holographie la gravitation n'est qu'une autre facette des théories des champs des interactions fondamentales
- Seule une théorie cohérente de la gravité quantique permettra de résoudre les problèmes théoriques posés la cosmologie de notre univers
- La théorie des cordes fournit un cadre théorique concret où ces idées peuvent être testées