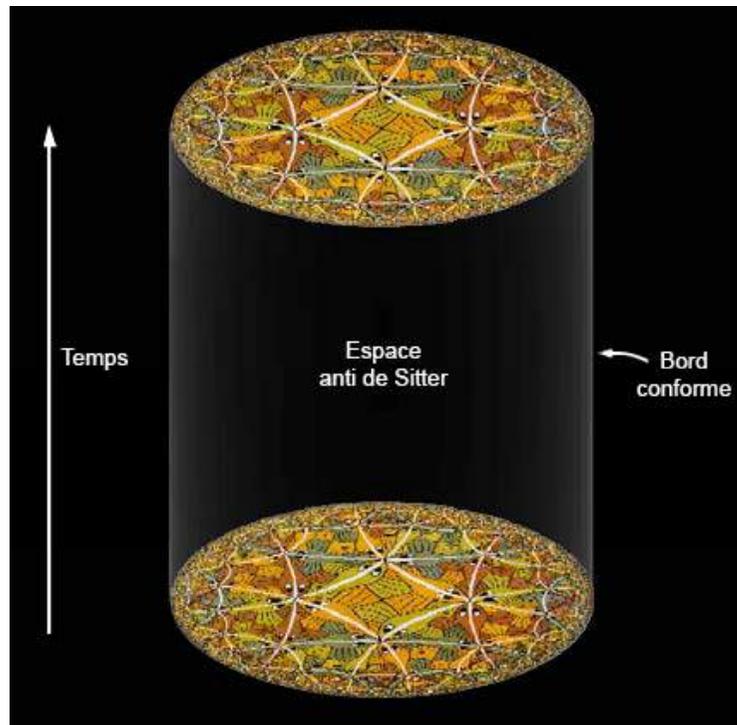




COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

Energie noire et nouvelle physique



Françoise Combes



Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

Les grandes lignes

- Gravité modifiée: **pourquoi?** (Quantique + secteur noir)
- $F(R)$, Tensor-scalaire-vectorel TeVeS, MOND
- Théorie holographique de la gravité, supercordes
Correspondance AdS/CFT, dualité jauge/gravité
- Gravité émergente, théorie entropique de la gravité
- Théorie de gravité quantique à boucle

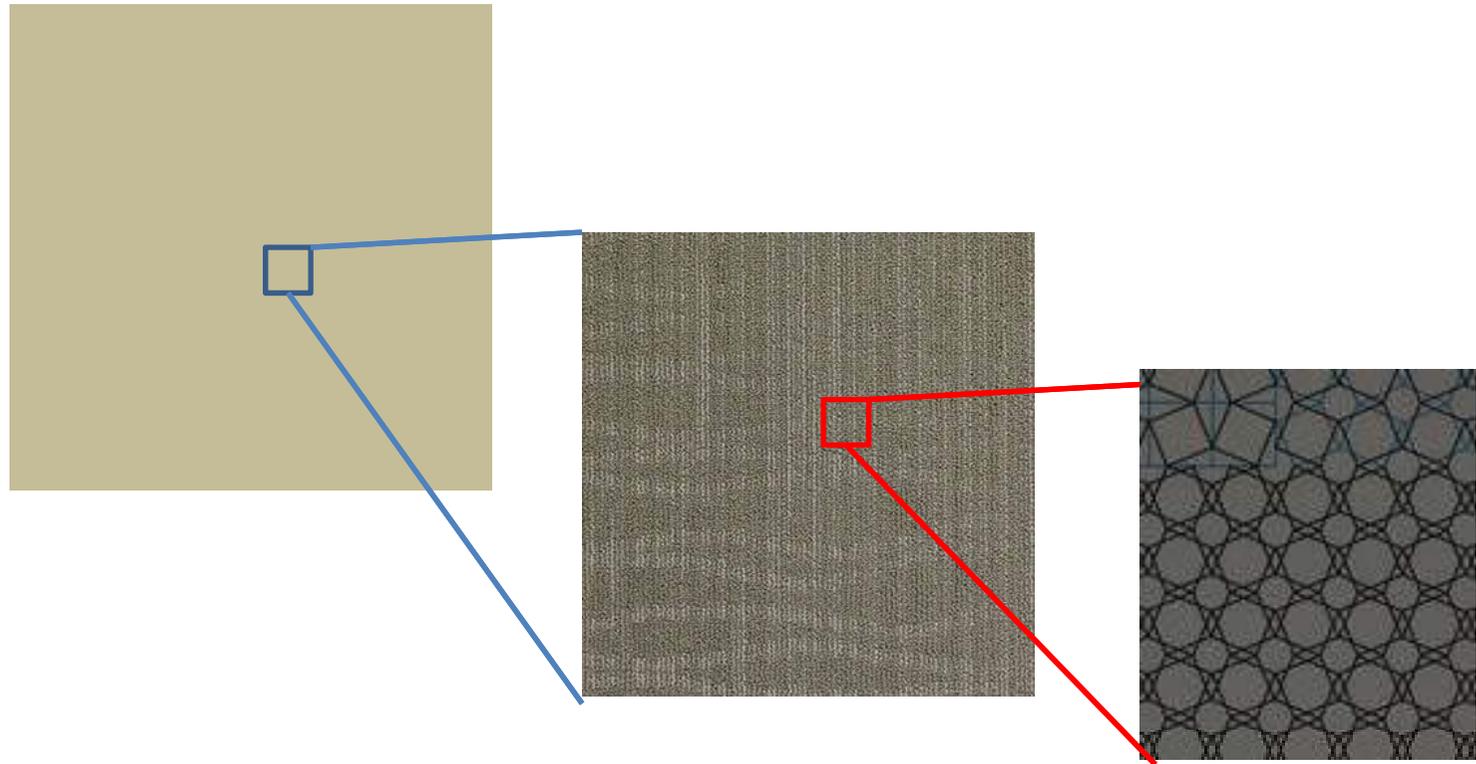
Limites à l'échelle de Planck

- Relations d'incertitude d'Heisenberg
- $\Delta x \Delta p > \hbar$ Pour préciser la position d'une particule $\Delta x < L$, il faut disposer de bcp d'énergie $p^2 > \Delta p^2 > (\hbar/L)^2$ si grande que $E \sim pc$
- Mais cette énergie est équivalente à une masse $Mc^2 = E$, et cette masse distord les rayons lumineux par lentille gravitationnelle
- On arrive à un trou noir, lorsque la lumière ne peut plus sortir
 $R \sim GM/c^2$
- Lorsque $R = L$, on obtient la longueur de Planck
- $L = GM/c^2 = EG/c^4 = pG/c^3 = \hbar G/Lc^3$

$$L_{\text{Planck}} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}}$$

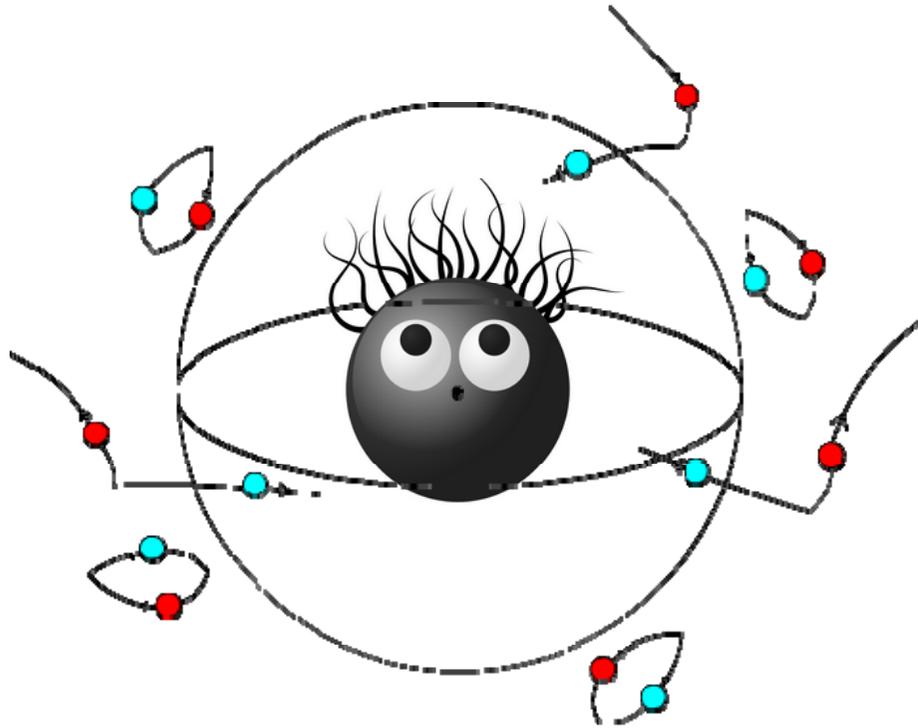
Espace quantique

A l'échelle de Planck, l'idée d'espace lisse s'effondre
Mini-trou noir, caché à l'intérieur de son horizon



Liens avec les trous noirs

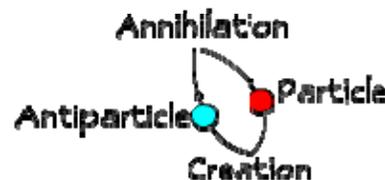
- Les trous noirs, singularité de l'espace-temps, considérés comme les solitons de la théorie d'Einstein
- Horizon à $R = 2GM/c^2$ (3 km pour $1 M_{\odot}$)
- Thermodynamique: Température $\sim 1/M$, Entropie \sim Aire $A \sim M^2$
- (Bekenstein, 1973, Hawking, 1974) $S/k = A/(4L_p^2)$



Les trous noirs s'évaporent

Durée de vie d'un trou noir de $M < 10^{-19} M_{\odot}$, inférieure à l'âge de l'Univers

$T = 10^{-7} \text{K}$ pour $1 M_{\odot}$
 $S \sim 10^{76}$ bytes



Trous noirs et entropie

Entropie liée au nombre de degrés de liberté

$S = k \log \Omega(E)$ Nombre d'états quantiques pour une énergie E donnée

Comment les calculer pour un trou noir?

Il est possible de représenter un trou noir avec un assemblage de cordes et de D-branes (Strominger & Vafa 1996), et de compter les différents micro-états

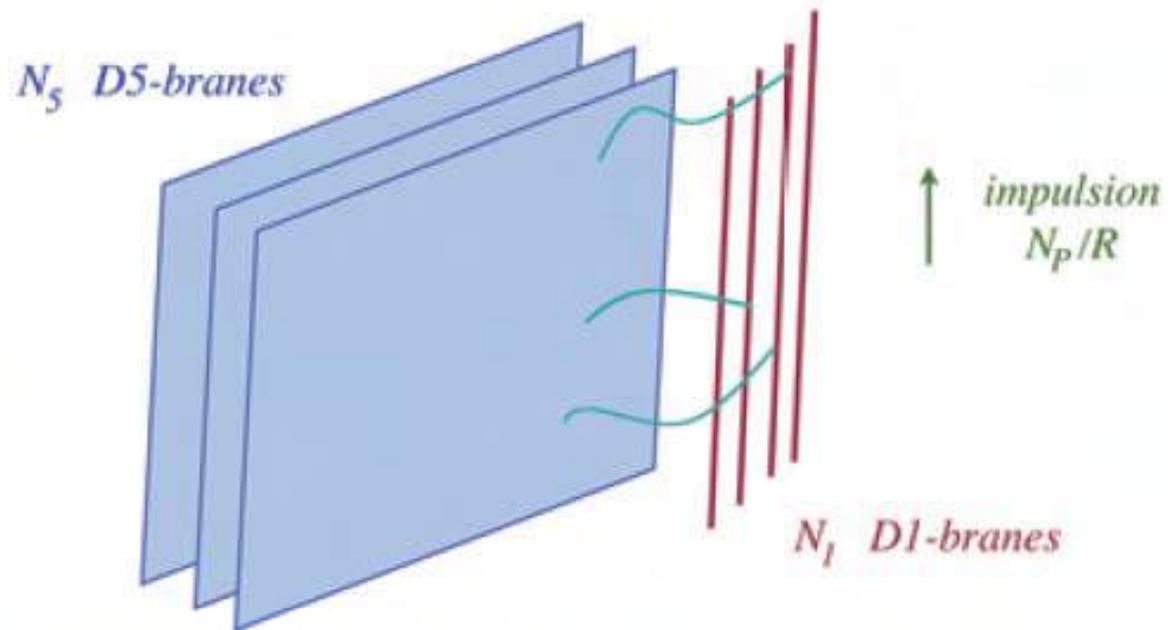
→ La théorie des cordes peut donner une représentation de gravité quantique, et justifier l'origine microscopique de l'entropie de Bekenstein-Hawking

Une des plus simples descriptions

- L'entropie s'écrit $S = k 2\pi \sqrt{(N_1 N_5 N_p)}$
- Avec des 1-branes (cordes) de charge Q_1 , et des 5-branes de Q_5
- Impulsion quantifiée dans des dimensions compactes, N_p entier

Hypothèse de
supergravité :
Supersymétrie

Les états sont
moitié bosons et
fermions

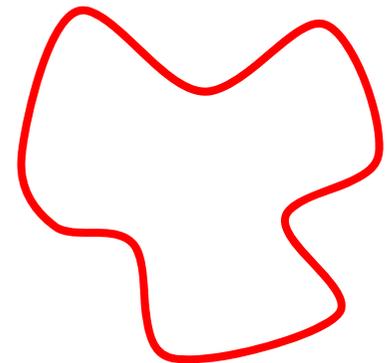
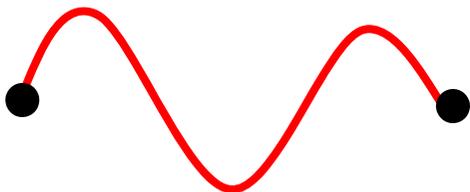


Le trou noir de Strominger-Vafa

Trous noirs et supercordes

- Toutefois, il faut supposer une charge Q électrique + Q_M axion (si $Q=Q_M=0$, solution dégénérée, avec surface nulle)
- Une théorie à **5 dimensions non compactes**, + **4 dimensions**
- **Supersymétrie non brisée** (permet de simplifier le calcul! Pas de corrections quantiques) en unités naturelles, il faut $Q=M$
- Superposition de solitons D-branes, et d'états supersymétriques

→ Solution trouvée, mais avec des conditions très éloignées de la réalité des trous noirs



Théories de gravité modifiée

Le problème de l'énergie noire peut être résolu:

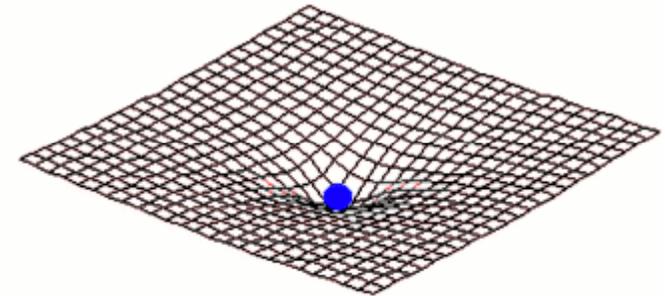
- Soit en modifiant le terme de droite $T_{\mu\nu}$, la quintessence

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

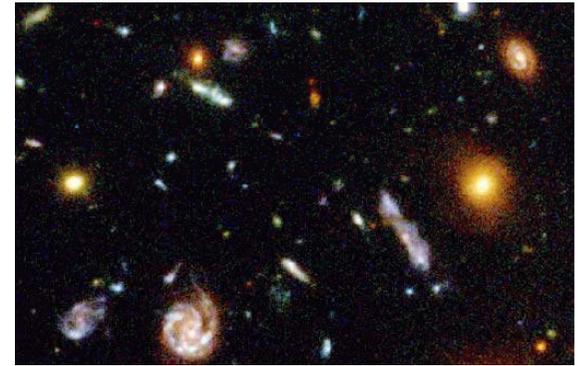
- Soit en modifiant le terme de gauche, la gravité/géométrie $f(R)$ modèles de gravité, modèles Tenseur-scalaire, monde des branes, inhomogeneities, etc.

$R_{\mu\nu}$ tenseur de Ricci

R courbure scalaire



Qu'est-ce qui peut changer



***La gravité est universelle, portée infinie, sans écrantage**
→ Pourrait avoir un médiateur massif, non-universelle à Ndim

***Est responsable de la structure de l'espace-temps**

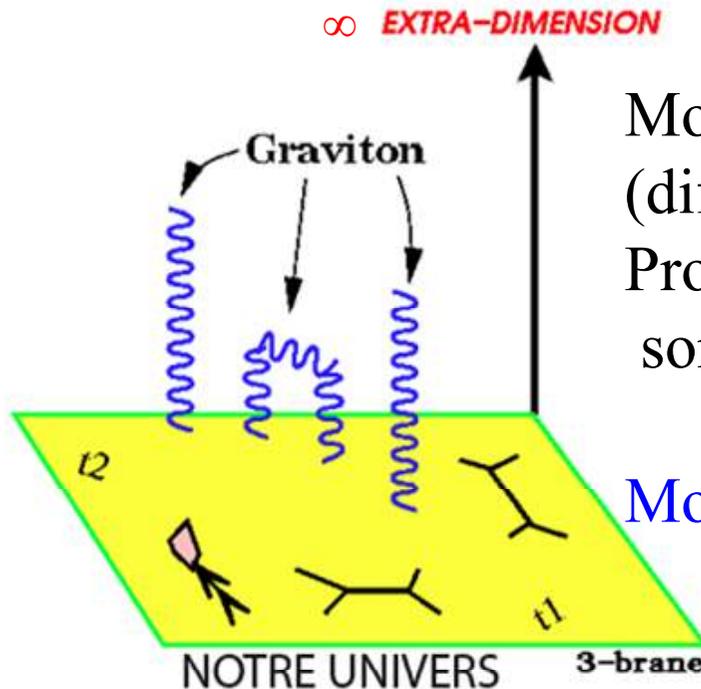
*Solution de l'équation d'Einstein, remarquablement testée dans le système solaire $R \rightarrow f(R)$

*Interaction avec particule médiateur: le graviton, boson sans masse et de spin 2 (tenseur) → champs tenseur+scalaire, +vectoriel

***Couplée de façon universelle à tous les autres champs**
→ Couplée à la masse

Extra-Dimensions, DGP

Dvali, Gabadadze, Porrati (2000)



Modèle à 5 dimensions, une seule supplémentaire (différent des supercordes)
 Proposé pour accélérer l'expansion, sans énergie sombre

Modèle déjà éliminé par les observations (d'autre part, a des problèmes de cohérence interne, fantôme)

$$S = \int d^5x \sqrt{-g^{(5)}} R^{(5)} + L \int d^4x \sqrt{-g} R$$

$$H^2 - H/L = 8\pi G\rho / 3$$

$$r \ll L \rightarrow V \propto 1/r$$

$$r \gg L \rightarrow V \propto 1/r^2$$

L = échelle de transition

- 5D gravité domine à basse énergie/temps long/grandes échelles
- 4D gravité à haute énergie/univers primordial/petites échelles

Changer la gravité

L'énergie noire pourrait n'être qu'une manifestation d'un changement de la gravité d'Einstein:

Gravité $f(R)$, modèles scalaire-tenseur,
Modèle des branes

Le modèle le plus simple

gravité $f(R)$

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[f(R) / 2 + L_m \right] \quad R: \text{scalaire de Ricci}$$

Modèle Λ CDM: $f(R) = R - \Lambda$

Modèle **d'inflation** de Starobinsky: $f(R) = R + \alpha R^2$
Utilisé dans l'Univers primordial

Comment les modèles $f(R)$ peuvent-ils représenter l'énergie noire ?

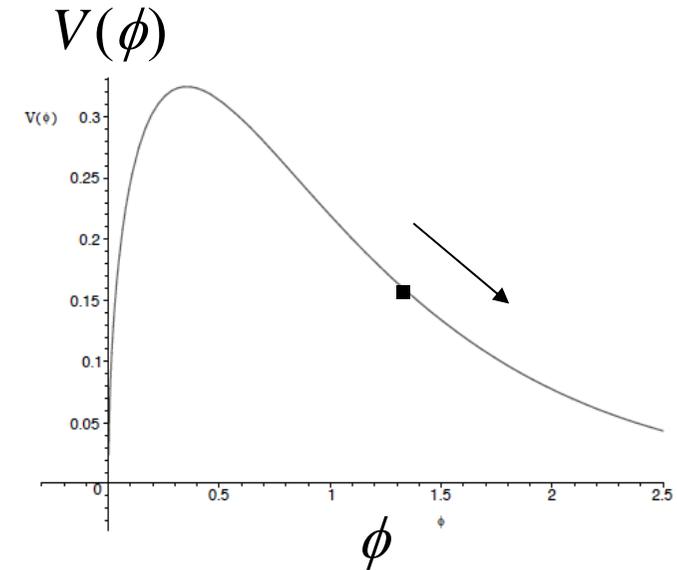
Exemple de modèle

Carroll et al 2003

$$f(R) = R - \frac{\mu^{2(n+1)}}{R^n} \quad (n > 0)$$

Le potentiel est

$$V(\phi) = A e^{-2\sqrt{6}\phi/3} (e^{\sqrt{6}\phi/3} - 1)^{n/(n+1)}$$



Pour des grandes valeurs du champ

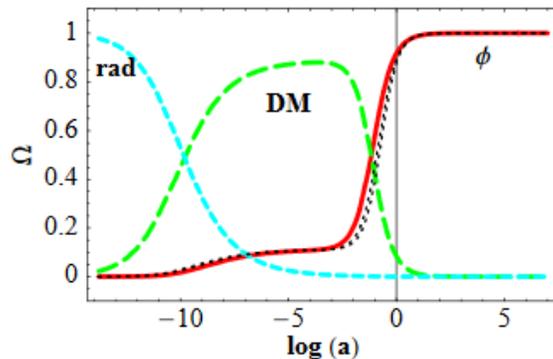
$$V(\phi) \propto e^{-\lambda\phi}$$

$$\lambda = \frac{\sqrt{6} n + 2}{3 n + 1}$$

→ Quintessence couplée avec un potentiel exponentiel

L'époque dominée par la matière devient alors matière + ϕ avec

$$w_{DE} = -2/3, \quad a \propto t^{1/2}$$



→ Incompatible avec les observations $a \propto t^{2/3}$

Amendola et al (2007)

Conditions pour un modèle $f(R)$ viable

Amendola et al 2008

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[f(R) / 2\kappa^2 + L_m + L_{rad} \right] \quad \kappa^2 = 8\pi G$$

Pour une métrique FRW avec un facteur d'échelle "a"

$$\begin{aligned} 3FH^2 &= \kappa^2 (\rho_m + \rho_{rad}) + \frac{1}{2}(FR - f) - 3H\dot{F}, \\ -2F\dot{H} &= \kappa^2 \left(\rho_m + \frac{4}{3}\rho_{rad} \right) + \ddot{F} - H\dot{F}, \end{aligned} \quad F \equiv \frac{df}{dR}.$$

Matière, sans pression $\dot{\rho}_m + 3H\rho_m = 0,$

Rayonnement $\dot{\rho}_{rad} + 4H\rho_{rad} = 0.$

→ Une étude **générale**, sans spécifier la forme de $f(R)$

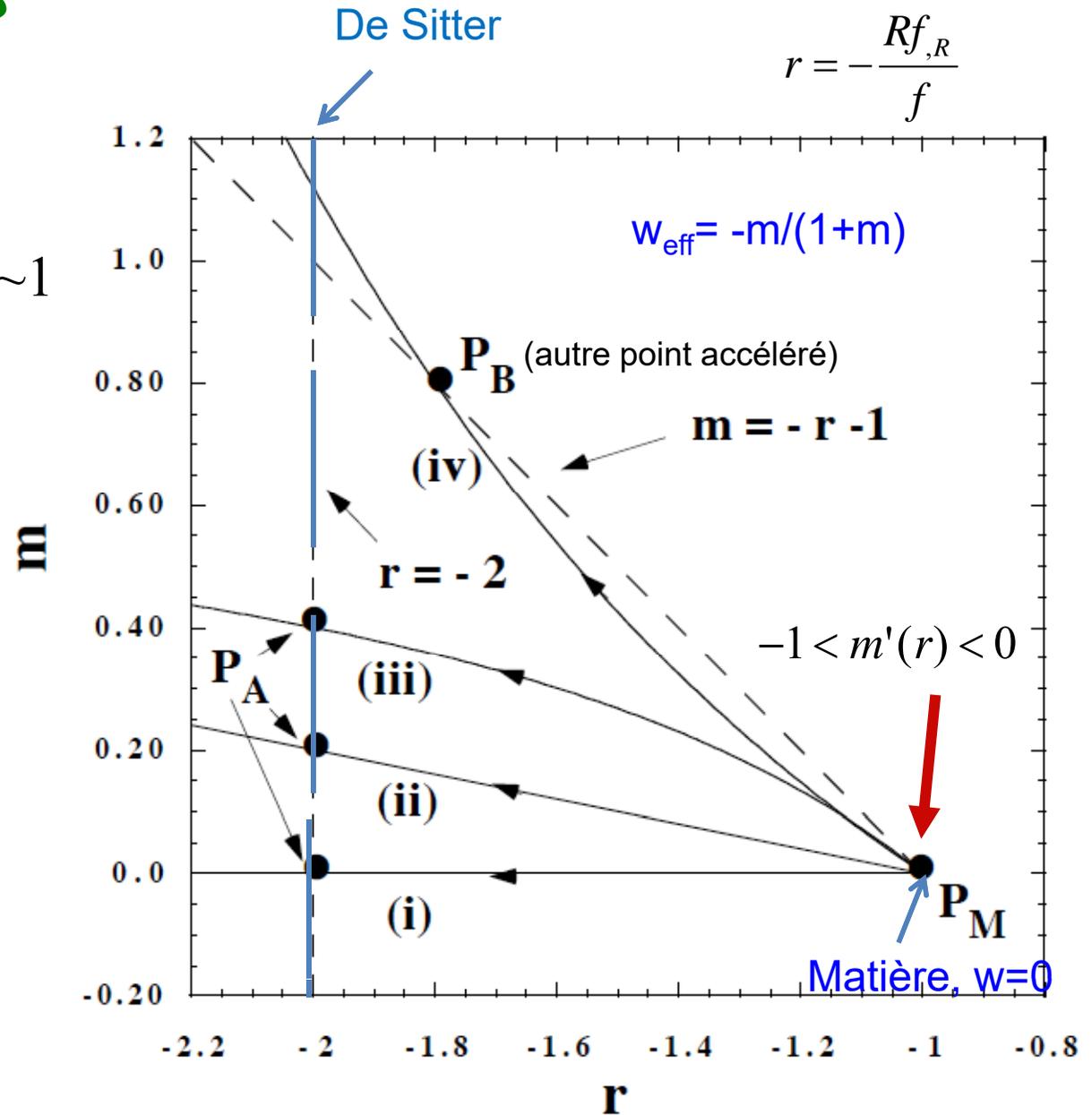
Le paramètre $m(r) = \frac{Rf_{,RR}}{f_{,R}}$ caractérise la déviation à partir du modèle standard Λ CDM

→ Les cas où m est négatif sont exclus, comme le montre le diagramme

Modèles Viables

- 1) Λ CDM $m=0$
- 2) $f(R) = (R^b - \Lambda)^c$ $bc \sim 1$
- 3) $f(R) = R - \alpha R^n$
avec $\alpha > 0$, $0 < n < 1$
- 4) $m(r) = -C(r+1)(r^2 + ar + b)$

Modèle à m constant
 $f(R) = R^{1+m} - \Lambda$



Généralisation aux modèles tenseur-scalaires

Plus générique: Horndeski

Action
$$\int dx^4 \sqrt{-g} \left[\sum_i L_i + L_{matter} \right]$$

Théorie de champs scalaire 4D la plus générale
mais équations complexes

Horndeski (1975), Deffayet et al. (2011)

Gravité modifiée sans fantôme, ni instabilité

Peut inclure $f(R)$, Brans-Dicke, k-essence, Galiléons, etc

Invariant par transformation conforme

MOND et TeVeS

MOND inventé en 1983 par M. Milgrom pour rendre compte de la matière noire: **modification en champ faible** $a < a_0 = 10^{-11} \text{g}$

A faible accélération

$a \ll a_0$ régime MOND $a = (a_0 a_N)^{1/2}$

$a \gg a_0$ Newtonien $a = a_N$

Asymptotiquement

$a_N \sim 1/r^2 \rightarrow a \sim 1/r$

$\rightarrow V^2 = \text{cste}$

\rightarrow Théorie covariante de Lorentz, **TeV**S (Bekenstein 2004)

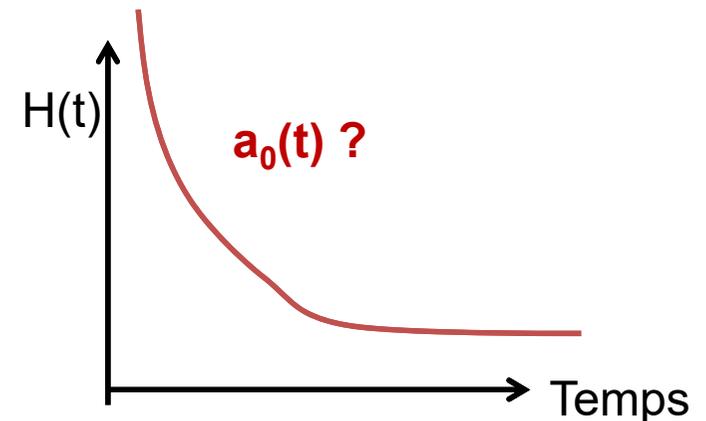
Comprend deux champs scalaires et un champ vectoriel + métrique

Selon les paramètres libres, peut contenir l'énergie noire

Est-ce que l'accélération critique varie?

$a_0 \sim c H_0$, ou aussi $a_0 \sim c (\Lambda/3)^{1/2}$

(Extensions GEA, BSTV, Bimond..)



Gravité massive

Action quadratique de Pauli-Fierz (1939):
la seule sans fantôme, au niveau linéaire,
avec un graviton massif de spin 2



Mais cette théorie a **des problèmes**:

(1) Son extension non-linéaire contient des fantômes

(2) La limite lorsque $m \rightarrow 0$ ne redonne pas le modèle standard
(discontinuité de vDVZ)

En effet, le graviton massif propage 3 degrés de liberté supplémentaires (vecteur, scalaire), et à l'intérieur d'un rayon de **Vainshtein**, il a fallu renormaliser pour retrouver la gravité ordinaire. Cette renormalisation réduit la valeur de la force à la limite $m \rightarrow 0$

$Rv \sim 800 \text{kpc!}$

Rayon de Vainshtein



Les effets de la gravité massive autour des sources est non-linéaire en-dessous du rayon de Vainshtein (1972)

$$R_V = \left(\frac{M_{source}}{m^4 M_P^2} \right)^{1/5}$$

m graviton
 M_P Planck

La discontinuité vDVZ n'est pas forcément un problème
En effet, elle provient du fait que l'on extrapole la théorie linéaire, ce qui est faux.

Pour le Soleil, le rayon de Vainshtein inclut tout le système solaire!
Ce phénomène, appelé **écranage de Vainshtein**, joue aussi pour un certain nombre de théories modifiées, qui doivent se conformer au modèle standard dans le système solaire

Gravité massive et Bi-gravité

Le fantôme qui empêchait de produire une théorie non-linéaire de gravité massive a été résolu par de Rham, Gabadadze, Tolley (2010), en sommant tous les termes d'ordre supérieur

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left(-\frac{M_{\text{Pl}}^2}{2} R + m^2 M_{\text{Pl}}^2 \sum_{n=0}^4 \alpha_n e_n(\mathbb{K}) + \mathcal{L}_m(g, \Phi_i) \right)$$

Le terme nouveau est en m^2 , où m est la masse du graviton (unités naturelles)

Si $mc^2 \sim \hbar H_0$ (10^{-68} kg) l'**accélération actuelle** de l'expansion est expliquée
Mais il n'y a pas de métrique pour un univers plat, dans ce formalisme

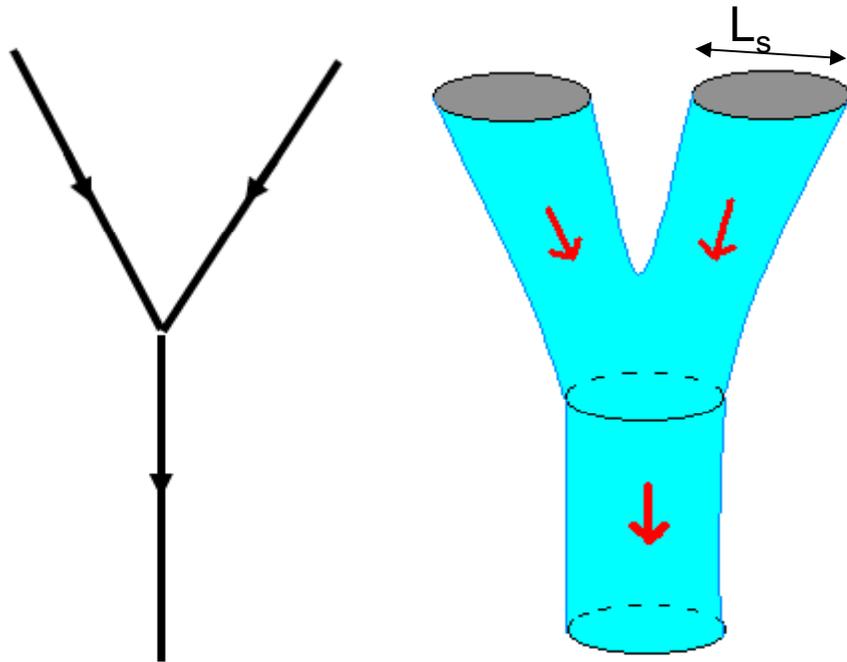
→ Il faut alors recourir à un modèle de bi-gravité, avec deux métriques l'une concernant les hautes énergies (Hassan & Rosen 2012)

→ Instabilité repoussée plus tôt!!



Gravité et théorie des cordes

Au niveau de l'infiniment petit → cordes de taille finie



Taille de la corde L_s
T tension de la corde

$$L_s = \sqrt{\frac{h c}{T}}$$

Buts: Théorie unifiée de la gravité et des autres interactions,
Basée sur la mécanique quantique, et la supersymétrie

→ Nécessité d'avoir au moins 10 dimensions

Limite à basse énergie en **Supergravité à 11 dimensions**

Existence d'un champ de masse nulle et de spin 2, le graviton

Des dimensions de toutes tailles

- Soit une taille **microscopique** ($\sim L_s$) → avec $L_s \sim 10L_P$
dimensions compactes, impulsions quantifiées
- Soit une taille **intermédiaire** (\sim micron?)
- Ou même taille **macroscopique** (et même infinie)

Seule la force gravitationnelle «voit» les dimensions supplémentaires, et elle est modifiée à courte distance

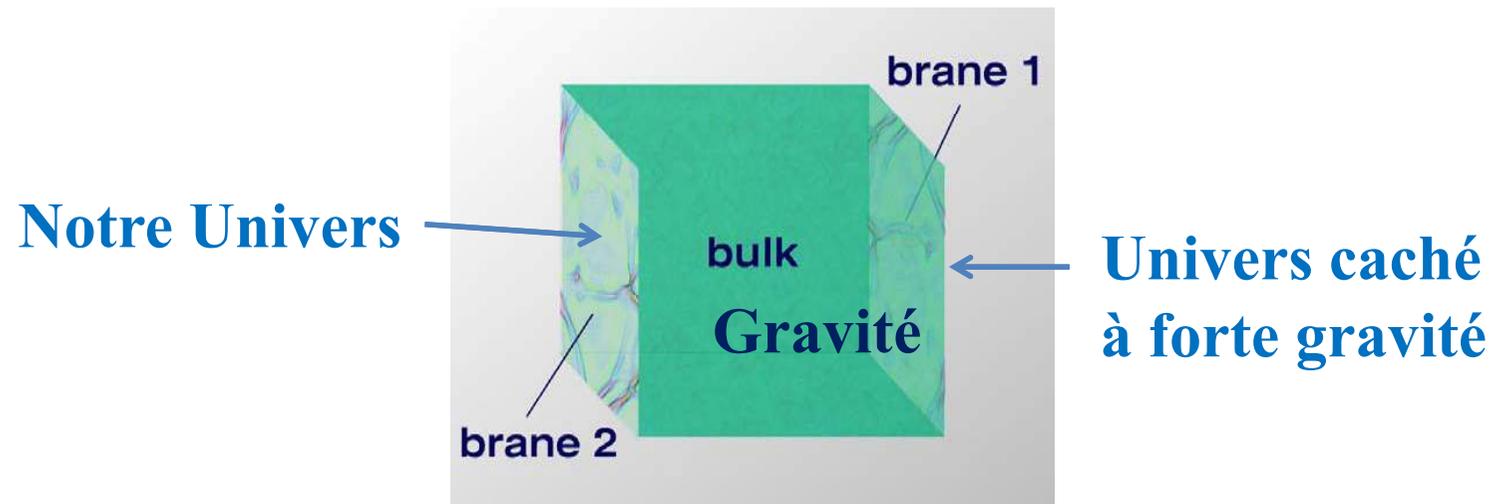


Dimensions infinies, à 2 branes

- La gravité étant une propriété de l'espace, c'est la seule qui soit présente dans toutes les dimensions

La matière est confinée dans les (3+1) dimensions visibles

Les autres dimensions peuvent être infinies (Randall & Sundrum 1999)



- La 5^{ème} dimension n'est pas factorisable dans la métrique, mais interagit par un facteur exponentiel
- → prédit des résonances TeV au LHC

Implications

- Pour préserver l'invariance de Poincaré, la courbure de l'espace entre les deux 3-branes doit être négative. En fait ce sont des tranches **d'univers Anti-de-Sitter AdS5**

$$ds^2 = e^{-2kr_c\phi} \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + r_c^2 d\phi^2$$

- En supposant une autre 3-brane, à distance r_c , alors les états liés du graviton **sont quantifiés** (continu si la dimension est infinie)

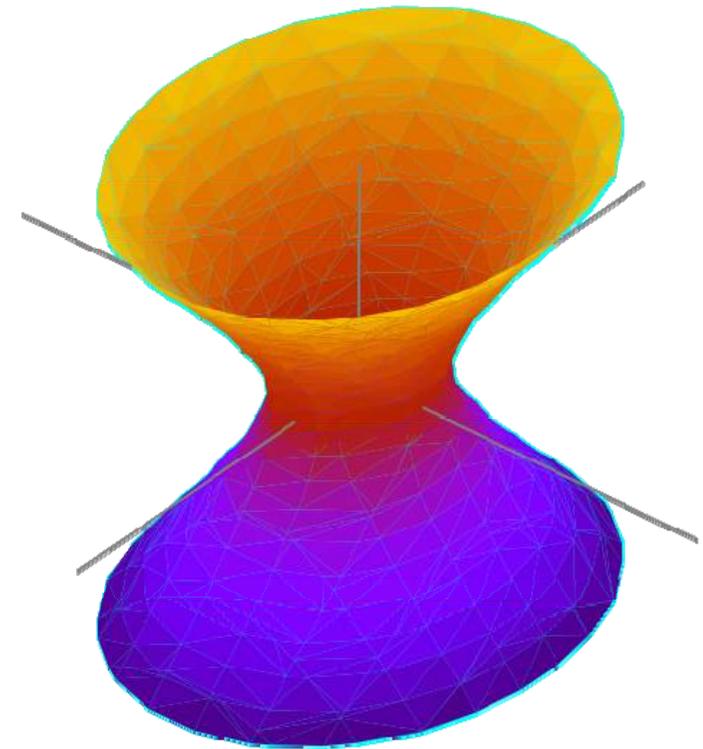
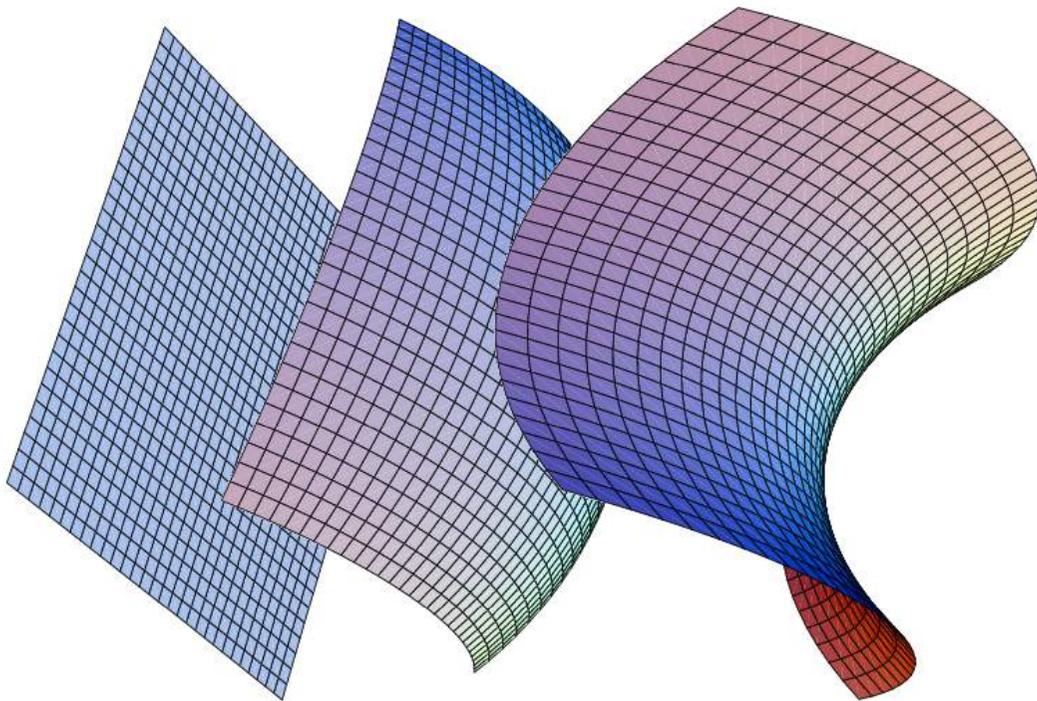
$$V(r) = G_N \frac{m_1 m_2}{r} \left(1 + \frac{1}{r^2 k^2} \right)$$

- Le potentiel gravitationnel correspondant, fait intervenir un terme supplémentaire faible ($k \sim 1/L_p$)

(Randall & Sundrum 1999)

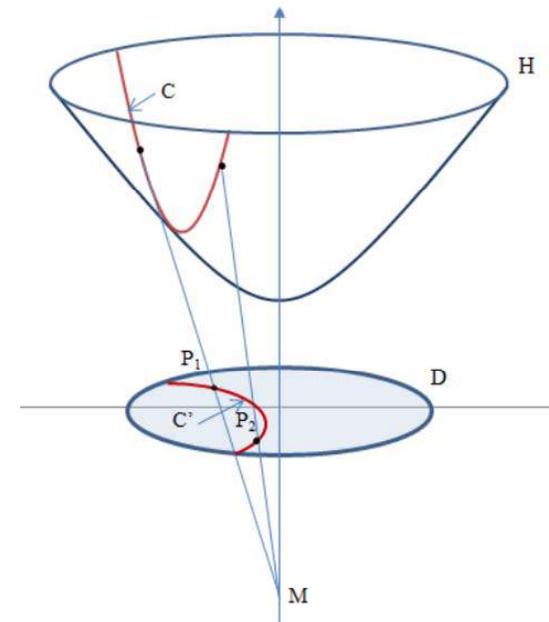
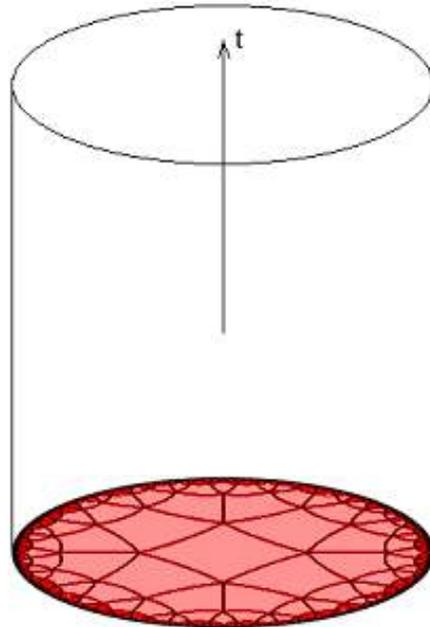
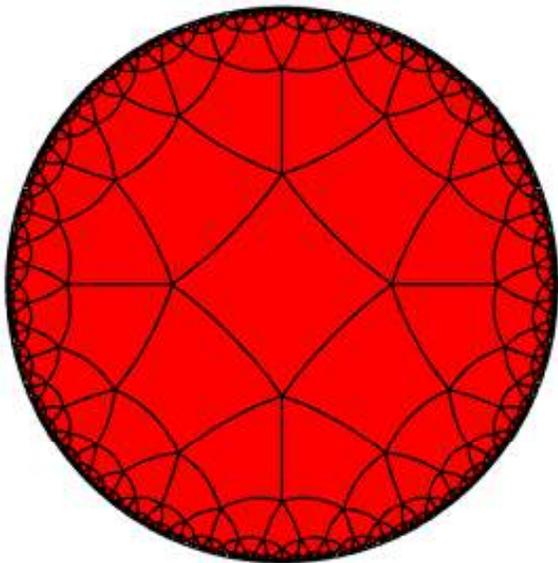
Espace Anti-de-Sitter (AdS)

- C'est un univers quasi-statique, sans masse, avec une constante **cosmologique négative**
- **Courbure négative** (espace hyperbolique, forme de selle de cheval)
- avec n dimensions \rightarrow AdS $_n$



Représentation de la surface

- Le disque de Poincaré est une représentation conforme d'une nappe hyperbolique (une 2-surface de courbure négative constante). En empilant des disques de Poincaré, on obtient la représentation conforme d'un espace Anti-de-Sitter de dimension 3 (X, Y, t)
- AdS de dimension 4 est un hyper-cylindre de ce type. La frontière a les mêmes propriétés que l'espace-temps de Minkowski de dimension $n-1$.



Dualité avec AdS_5

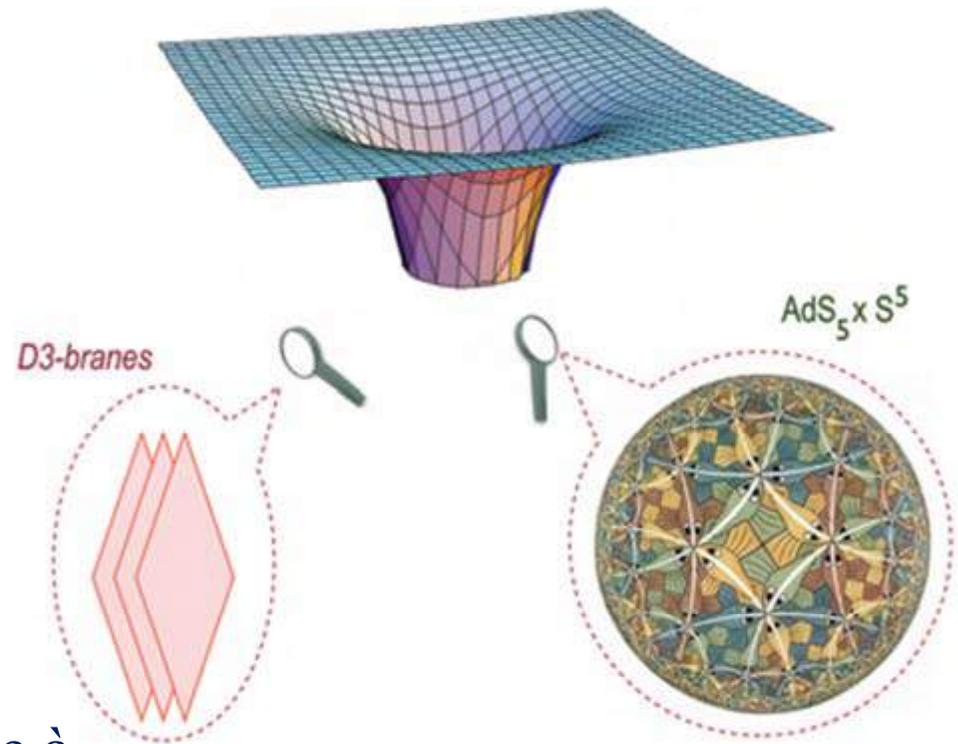
- Un ensemble de N D3-branes est équivalent à $AdS_5 \times S^5$

Un espace Anti-de-Sitter courbe
(Λ négatif)

La gravité peut alors être équivalente à
une théorie de champ

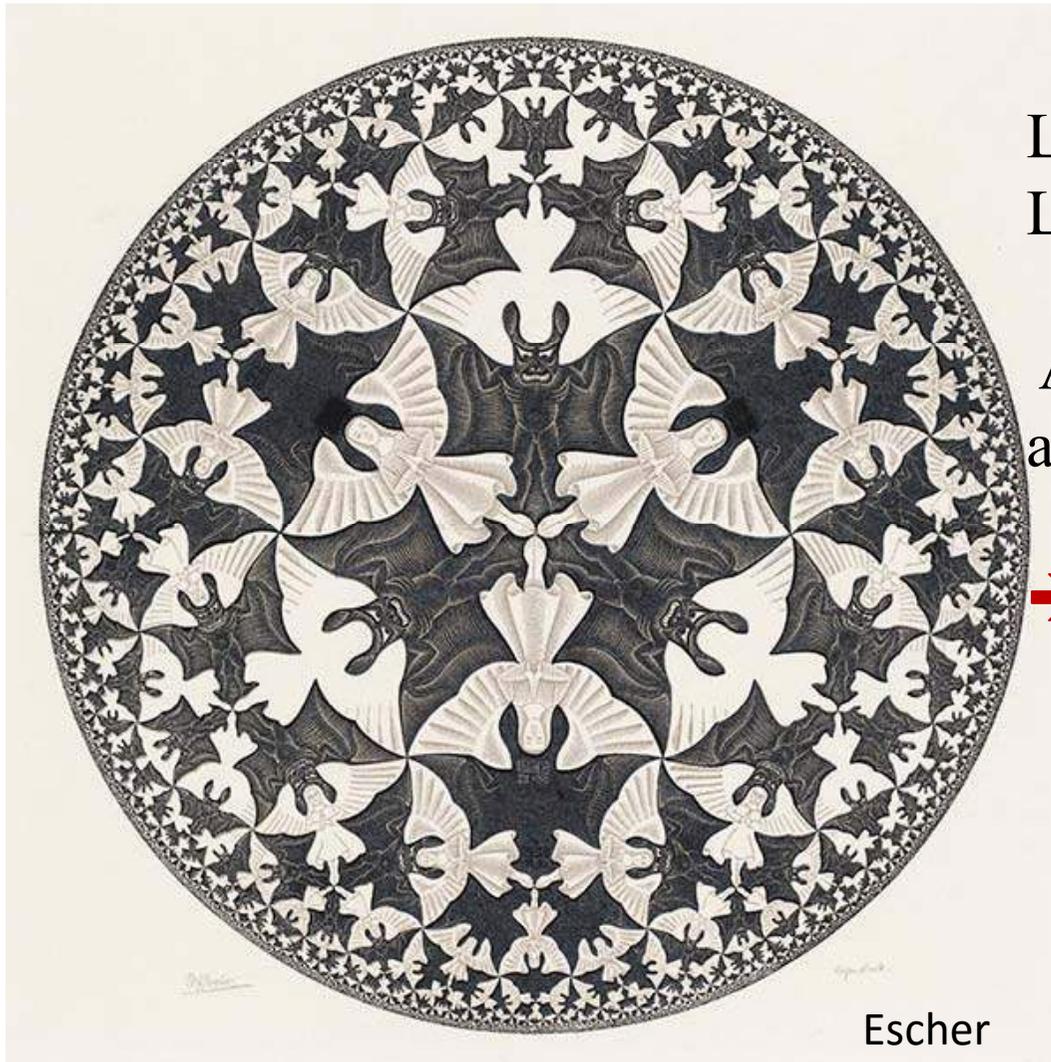
Conjecture d'équivalence **AdS/CFT** (théorie conforme des champs)

Correspondance entre théorie quantique des champs et théorie AdS des cordes, dualité holographique (Maldacena 1997)



Théorie holographique

- Exemple d'une tessellation, où les objets sont de plus en plus petits en allant vers le bord: invariance d'échelle illustrant un espace AdS



Les espaces AdS ont Λ négatif
Leur géométrie est hyperbolique

A l'opposé, notre univers est dS
avec Λ positif, et un horizon

→ **Plus difficile à calculer**

Espace hyperbolique

Représentation de l'espace AdS (3D)

Disque d'Escher

Pour la Science, 2006



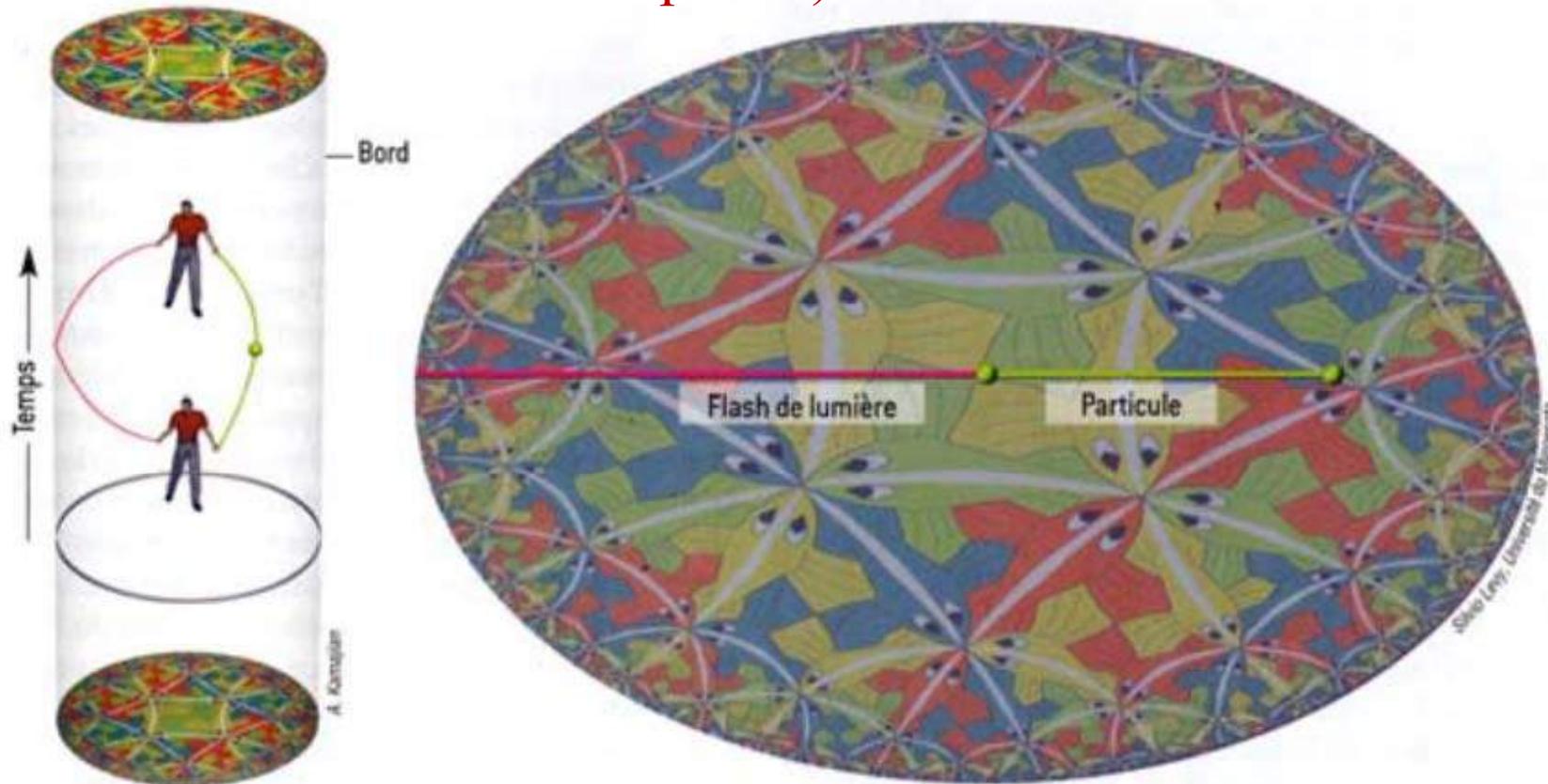
Particularités de l'espace AdS (4D)

Courbure négative ($k=-1$, espace hyperbolique), mais Λ négatif

$$a(t) = a_0 \cos(At) \quad A = (-\Lambda/3)^{1/2}$$

Représentation du cylindre: une dim d'espace qui fait le tour du cylindre, l'autre de temps, verticale

Un objet lancé revient à son point de départ (un flash de lumière part vers $l'∞$ et revient en un temps fini)



Gravité émergente



Non pas une force fondamentale, mais une
maximisation d'entropie

Entropie et thermodynamique de l'horizon (Bekenstein-Hawking)

Paradigme thermodynamique et nature de la gravité (Padmanabhan)

Théorie holographique (Gérard 't Hooft)

Accélération et température (Unruh)

Verlinde E.: 2010, Sur l'origine de la gravité et les lois de Newton

Verlinde E., Verlinde H: 2013, Intrication des trous noirs et corrections quantiques

Verlinde E.: 2016, Gravité émergente et l'Univers sombre

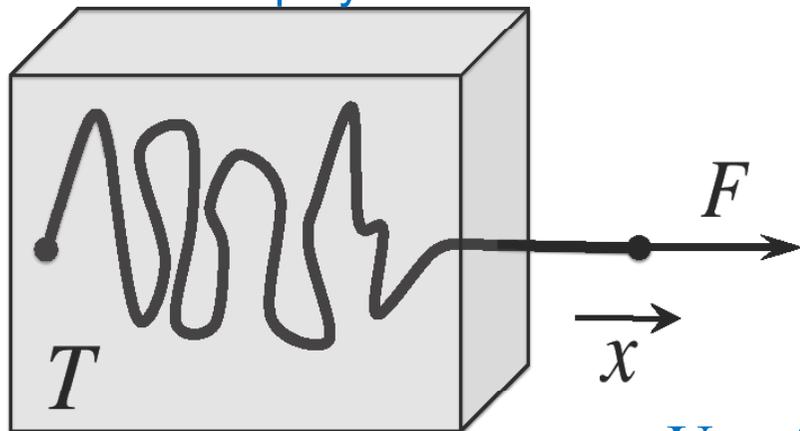
Gravité comme une force entropique

Au niveau microscopique: un grand nombre de degrés de liberté invisibles, mais pertinents pour la physique macroscopique

La gravité viendrait automatiquement du fait que l'espace occupé par cette information, ces degrés de liberté microscopiques, dépend de variables macroscopiques, comme la position des objets massifs

→ gravité émergente

Molécule de polymère



$$F \Delta x = T \Delta S$$

Une force survient car le système a tendance à augmenter son entropie (Verlinde 2011)

La température de Unruh



Température et accélération sont reliées

Unruh (1976) montre qu'un observateur accéléré avec a voit une température de corps noir T

$$k_B T = \frac{1}{2\pi} \frac{\hbar a}{c}$$

Le phénomène vient de l'énergie du vide et se rapproche de la thermodynamique des trous noirs

Dans la théorie d'Hawking, les trous noirs ont une température

$$T = \frac{1}{8\pi k_B} \frac{\hbar c^3}{GM}$$

qui coïncide avec la température d'Unruh, si on considère l'accélération de surface GM/R^2 , à l'horizon $R = 2 GM/c^2$

Pour l'accélération terrestre $g \sim 10 \text{m/s}^2$, T serait de $4 \cdot 10^{-20} \text{K}$

Force émergente

On approche une masse m de l'horizon du trou noir, $R = 2GM/c^2$
 L'entropie $S/k = A/(4L_p^2)$ augmente, $A = 4\pi R^2$

$$T = \frac{\hbar a}{2\pi c k}$$

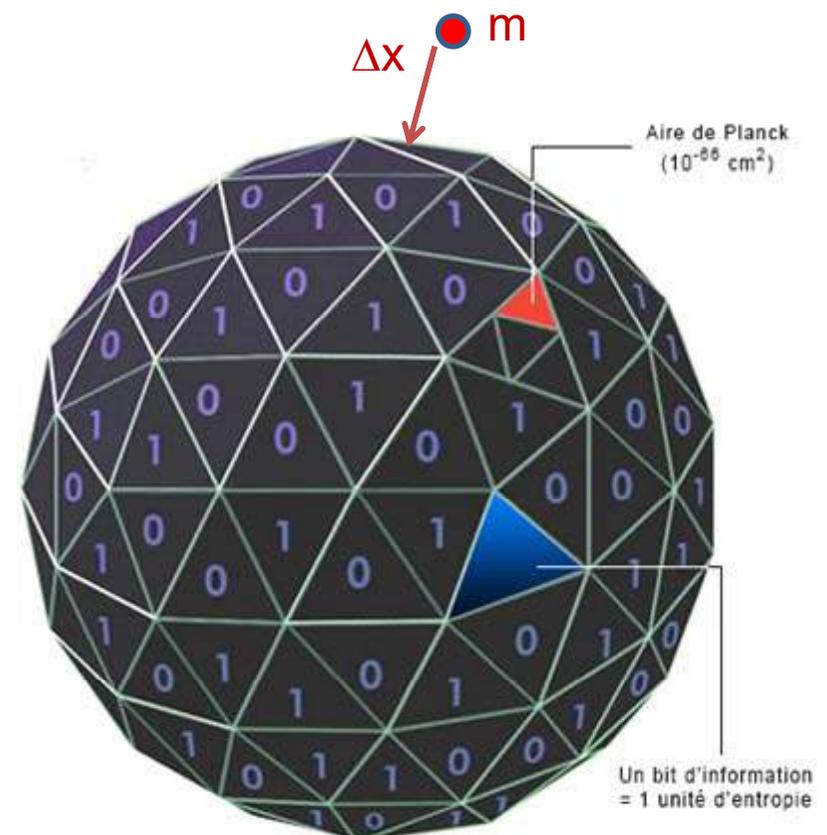
$$\Delta S = 2\pi k \frac{mc}{\hbar} \Delta x \quad F\Delta x = T\Delta S = ma$$

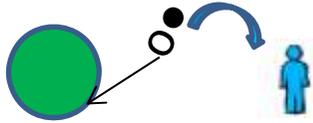
Equipartition de l'énergie

$$Mc^2 = E = \frac{1}{2} kT N$$

$$S/k = N = A/(4L_p^2) = Ac^3 / G\hbar$$

$$T = \frac{2Mc^2}{kN} = \frac{GM}{R^2} \frac{\hbar}{2\pi kc}$$





L'intrication quantique

Entropie intriquée du vide quantique

$$S_{BH} = \frac{kc^3}{4\hbar G} A.$$

A l'horizon des trous noirs: entropie de Bekenstein-Hawking

Intrication pour deux systèmes A, B, lorsque leur fonction d'onde est mélangée: une mesure sur un système va automatiquement réduire l'autre, quelle que soit la distance des particules (paradoxe EPR)

On peut définir l'entropie d'intrication: maximale lorsque les systèmes sont complètement mélangés (ex p-antip au voisinage du trou noir, mais aussi à l'horizon de l'Univers?)

Les variations de l'entropie d'intrication, dues à la présence de matière peut expliquer l'émergence de la gravité (Verlinde 2016)

La géométrie de l'espace-temps représente la structure de l'intrication au niveau microscopique (Maldacena and Susskind, 2013 Van Raamsdonk 2010)

Espace de Sitter, dominé par Λ

Approximation, H_0 est constante, l'horizon est $L=ct_0 = c/H_0$
La température T proportionnelle à l'accélération à la surface

$$a_0 = c H_0 = c^2/L \rightarrow T = \frac{\hbar a_0}{2\pi c k}$$



*Deux possibles schémas
d'intrication quantique*

Gauche: particule-horizon:

Droite particules entre elles

Le cas particule/horizon s'applique à dS, l'entropie d'intrication produit des états d'excitation thermique responsables de l'énergie noire.

L'énergie noire et l'accélération de l'expansion sont dues à la lente thermalisation de l'émergence de l'espace-temps

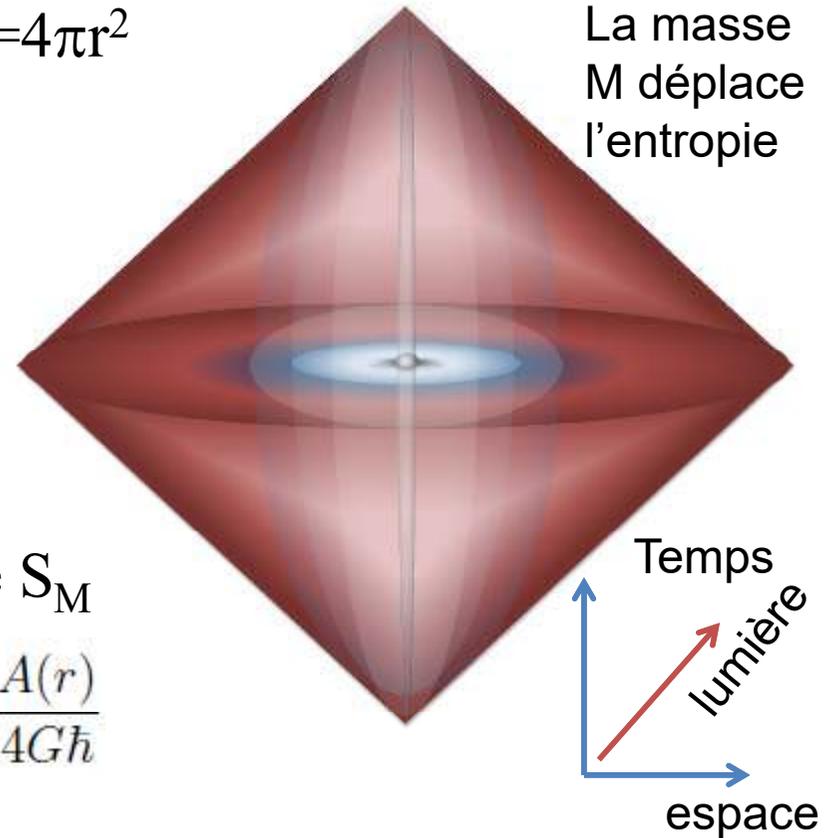
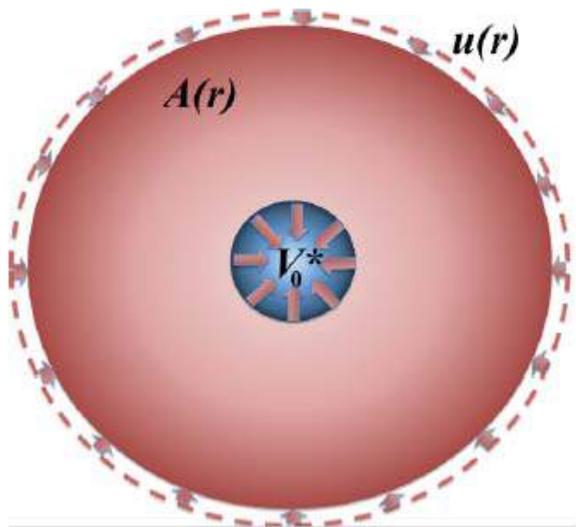
Implication pour la matière noire

Masse M incluse dans une sphère, $A(r) = 4\pi r^2$
 Densité de surface $\Sigma = M/4\pi r^2$

Les observations montrent que lorsque $\Sigma < a_0/8\pi G$, il existe de la matière noire
 a_0 est l'accélération critique de MOND

On peut écrire le changement d'entropie S_M
 apporté par la masse M

$$S_M = \frac{2\pi M}{\hbar a_0} < \frac{A(r)}{4G\hbar}$$



La masse
 M déplace
 l'entropie

Suppression de V_0^* du milieu élastique
 incompressible

→ Déplacement $u(r) = -V_0^*/A(r)$

Une masse M réduit l'entropie d'intrication

Elasticité de l'espace-temps

L'entropie diffusée dans l'univers sous forme d'énergie noire, rend l'espace plus élastique, et crée un supplément de gravité émergente: **une matière noire**, lorsque $\Sigma < a_0/8\pi G$, la masse sombre apparente est

$$\frac{2\pi}{\hbar a_0} M_D^2 = \frac{A(r)}{4G\hbar} \frac{M_B}{d-1} \quad \text{ou} \quad \Sigma_D^2(r) = \frac{a_0}{8\pi G} \frac{\Sigma_B(r)}{d-1}, \quad d=4$$

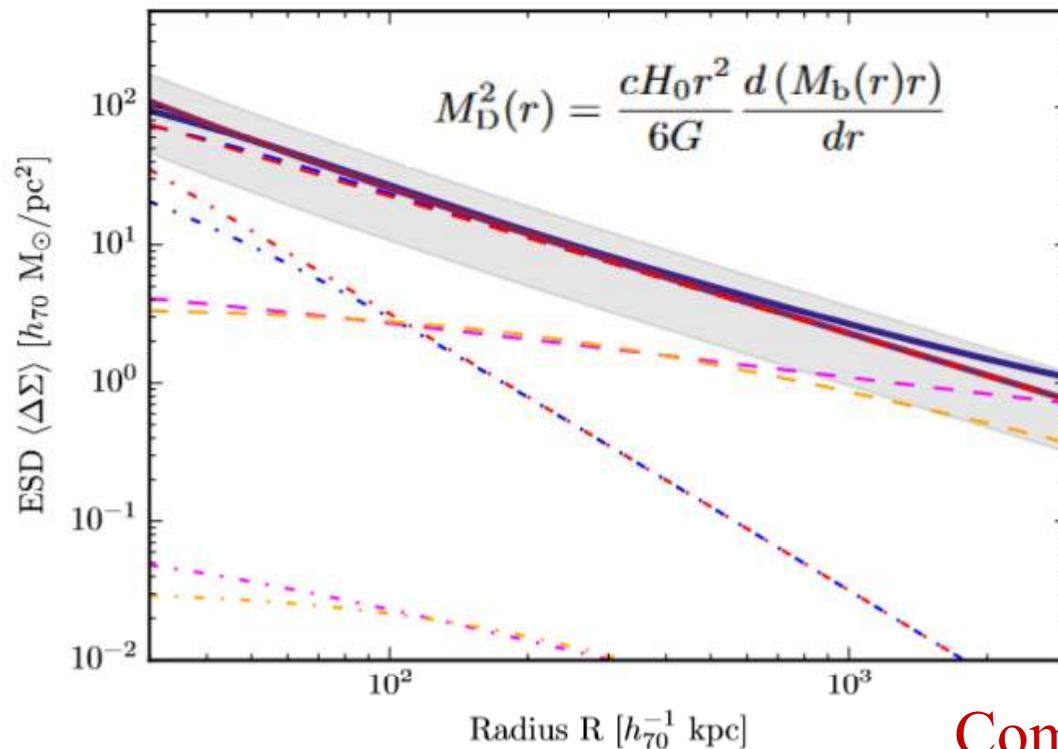
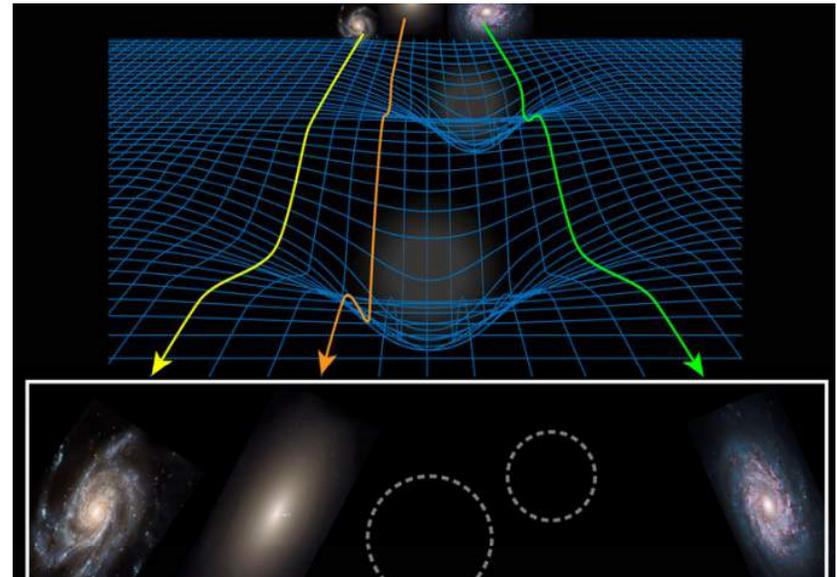
Soit encore $g_D^2 = g_N a_0/6$, qui est la relation de MOND (*Milgrom 1983*)

La réponse élastique est due à l'intrication de la matière avec l'entropie DE contenue dans le volume r^3 . L'entropie d'intrication croît avec r .
Cet accroissement de la gravité (matière noire) intervient quand l'entropie d'intrication de la matière tombe en-dessous de l'entropie de l'énergie noire

Test des lentilles gravitationnelles

KIDS: VST-ESO KiloDegree Survey
 + GAMA spectro survey
 33 000 galaxies

ESD=Excess surface density (R)

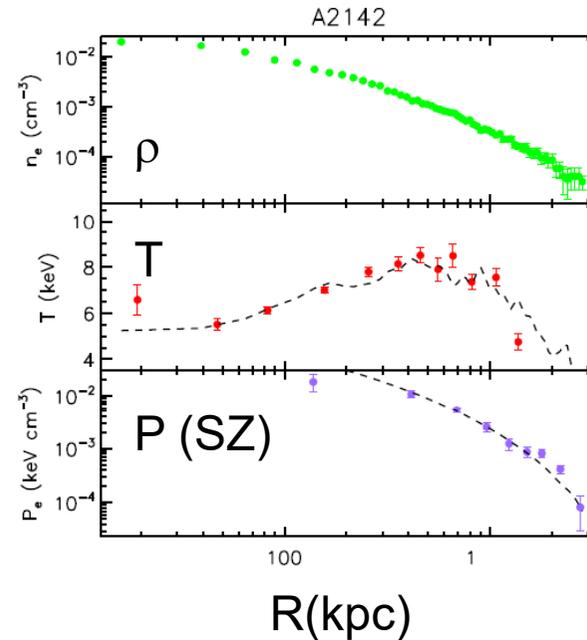
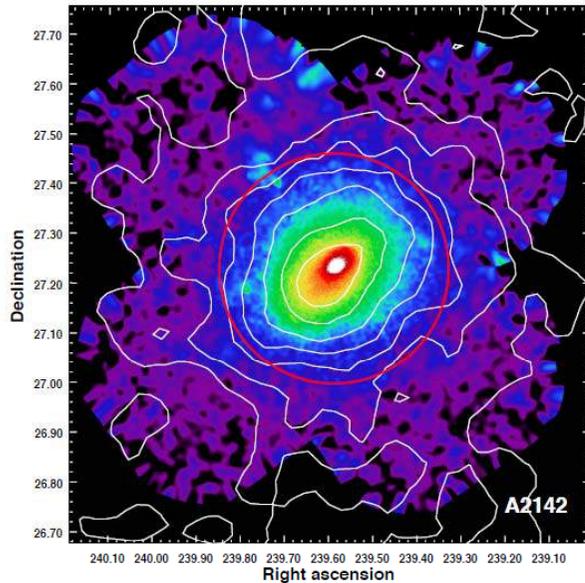


- Extended model (total)
- - - Stars+Cold gas (Sérsic profile)
- - - Stars+Cold gas (apparent DM)
- - - Hot gas (β -profile)
- - - Hot gas (apparent DM)
- - - Satellites (double power law)
- - - Satellites (apparent DM)
- Point mass (total)
- - - Point mass
- - - Point mass (apparent DM)

Brouwer et al 2016

Compatible avec DM apparente
 due à la gravité émergente

Gravité émergente: test sur des amas

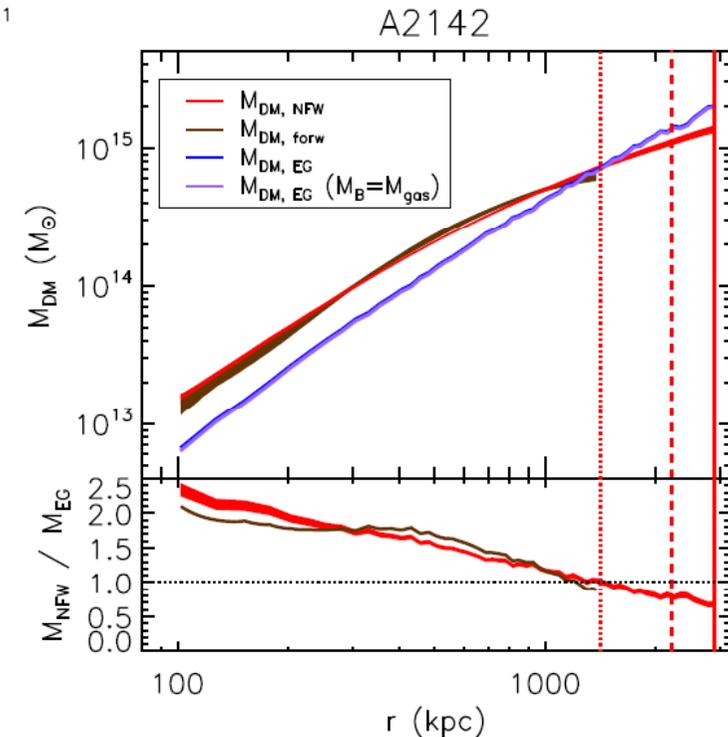


Distribution radiale
de la masse dans
A2142 et A2319
Rayons-X et effet SZ

Ettori et al 2016

Dans la théorie de la gravité émergente (Verlinde 2016), la matière noire est une manifestation de la force élastique due au déplacement d'entropie

$$\int_0^r \frac{G M_{\text{DM,EG}}^2(r')}{r'^2} dr' = \frac{M_{\text{B}}(r) c H_0 r}{6}$$



Autres problèmes?

A l'avantage de proposer une interprétation microscopique de l'hypothèse MOND

→ Problèmes dans les amas?

Formule plus exacte en cas de masse étendue

$$\bar{\rho}_D^2(r) = \left(4 - \bar{\beta}_B(r)\right) \frac{a_0}{8\pi G} \frac{\bar{\rho}_B(r)}{r}$$

Collision du boulet, séparation des deux masses? Pas de problème dans cette hypothèse

L'effet DE est différent des baryons

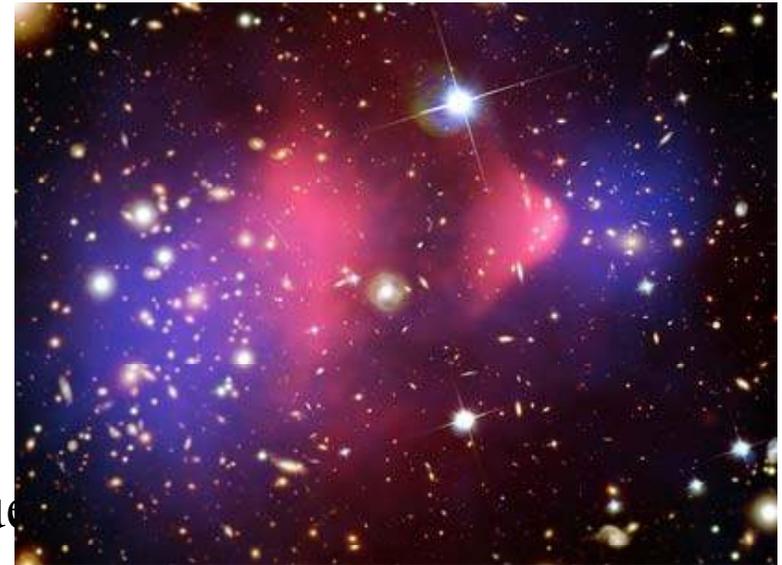
$$\rho_{crit} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} = \frac{3a_0}{8\pi G L}$$

→ Problème du fonds cosmologique

Anisotropies: 2^{ème} pic

Pas encore connu: quel rôle le terme DE joue tôt dans l'Univers?

Mais pas impossible



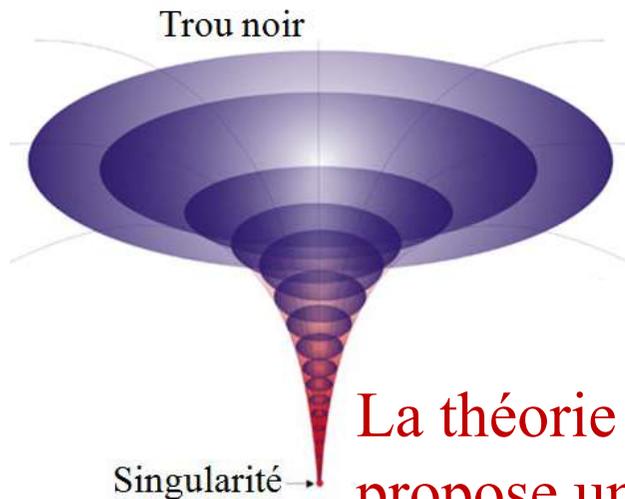
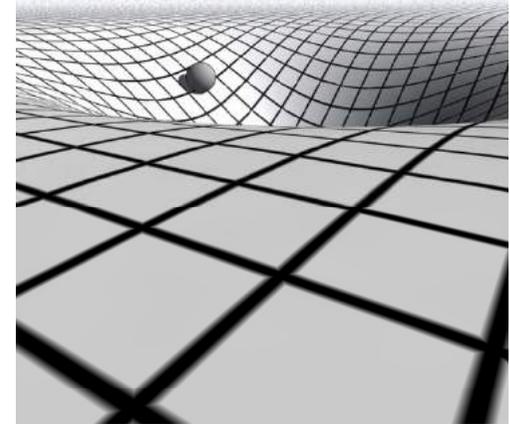
$$\Omega_D^2 = 4/3 \Omega_b$$

Espace-temps dépendant de la masse



L'espace-temps est créé lors du Big-Bang

Les trous noirs déchirent l'espace-temps en une singularité



A l'échelle de Planck $\ell_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \sim 10^{-35} \text{m}$
 $M_p = 5 \mu\text{g}$, $\rho \sim 10^{94} \text{g/cm}^3$
L'espace n'est plus continu

La théorie de gravité quantique à boucle

propose un schéma pour s'affranchir de l'espace de fond

Basé sur des transformations ou « connections » de spins où des champs analogues à (\mathbf{E}, \mathbf{A}) définissent la structure orthonormale (\mathbf{E} distances, \mathbf{A} courbure)

→ Équations covariantes

Gravité quantique à boucle

Opérateurs d'holonomie, quantifient l'espace de Riemann

Des opérateurs représentent longueurs, surfaces, volumes,
et ont tous des valeurs propres discrètes

Opérateurs création/annihilation (analogues \hat{a} , \hat{a}^+ pour oscillateur)
pour gérer l'excitation de la géométrie (*L. Smolin, C. Rovelli*)

La géométrie quantique introduit une pression négative à petite échelle

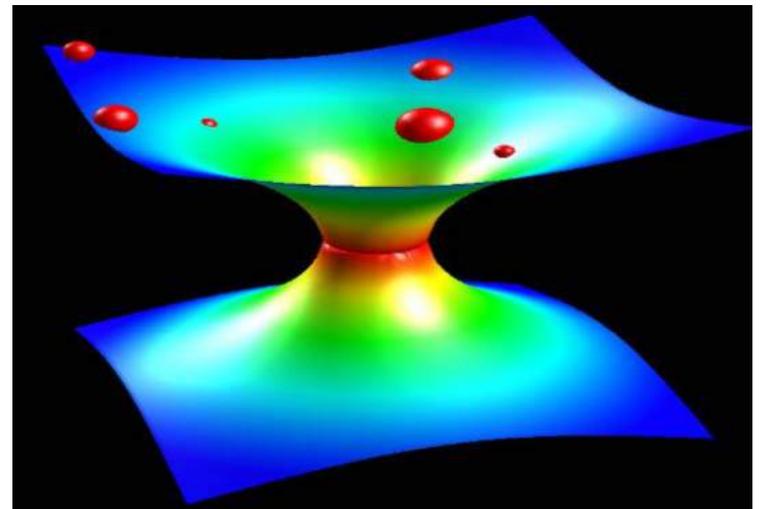
→ La gravité devient une force répulsive à l'échelle de Planck

La singularité du Big-Bang se transforme en rebond

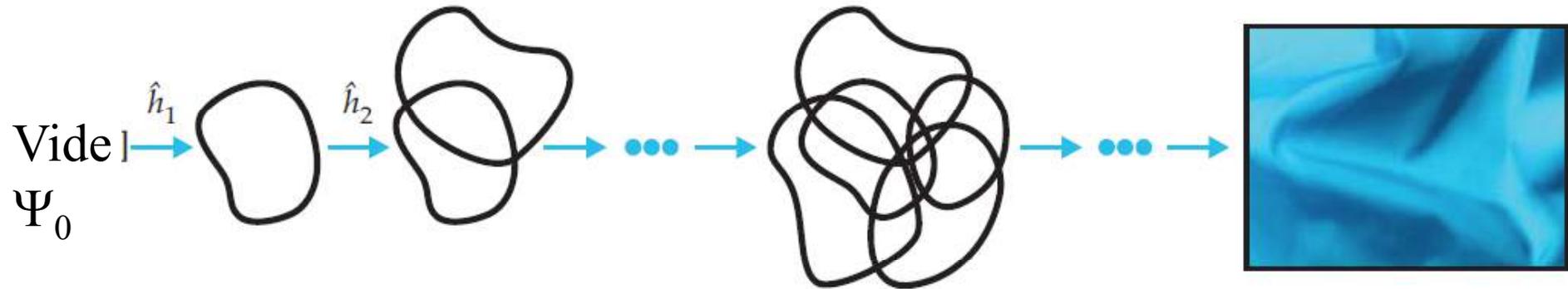
Modèle différent des modèles cycliques

Le temps n'existe plus au Big-Bang

Problème de croissance d'entropie?



Création de l'espace



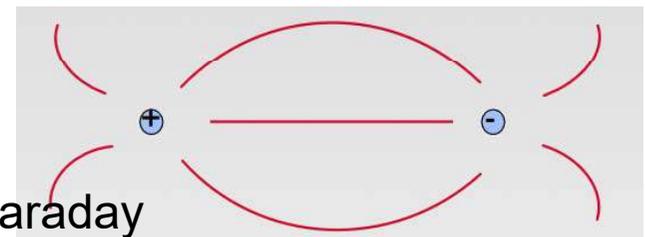
Réseau de spins, différents degrés d'excitation sont en différentes couleurs

L'opérateur \hat{h} crée un quantum de géométrie, qui est assemblée au hasard comme un polymère

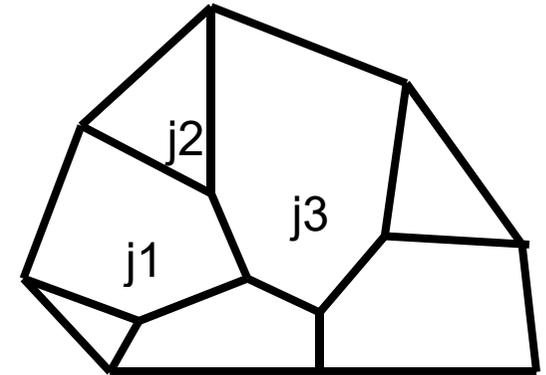
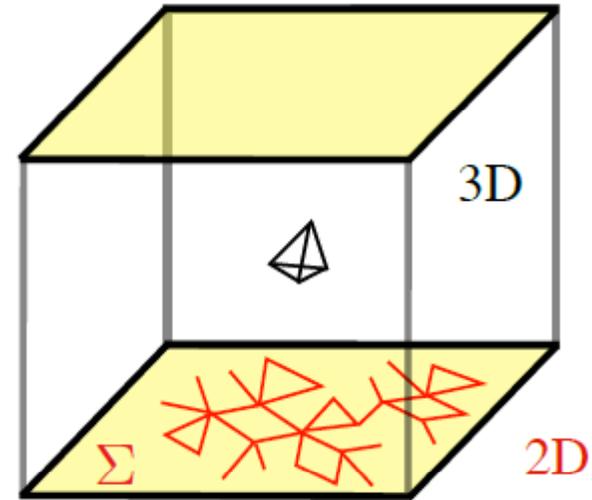
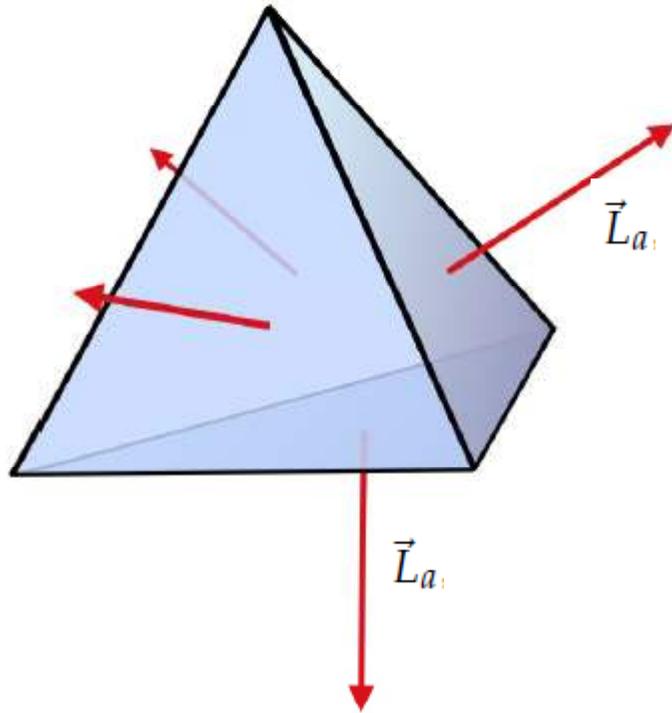
Aux grandes échelles \rightarrow aspect continu de l'espace

Analogie (\mathbf{E} , \mathbf{A}), une surface possède une aire proportionnelle au flux qui traverse.

Lignes de Faraday



Théorie basée sur les spins



Quantification de l'espace par des tétraèdres

Divergences supprimées à petite échelle par le cut-off à L_p
A grande échelle, l'introduction d'une faible constante cosmologique Λ résoud le problème

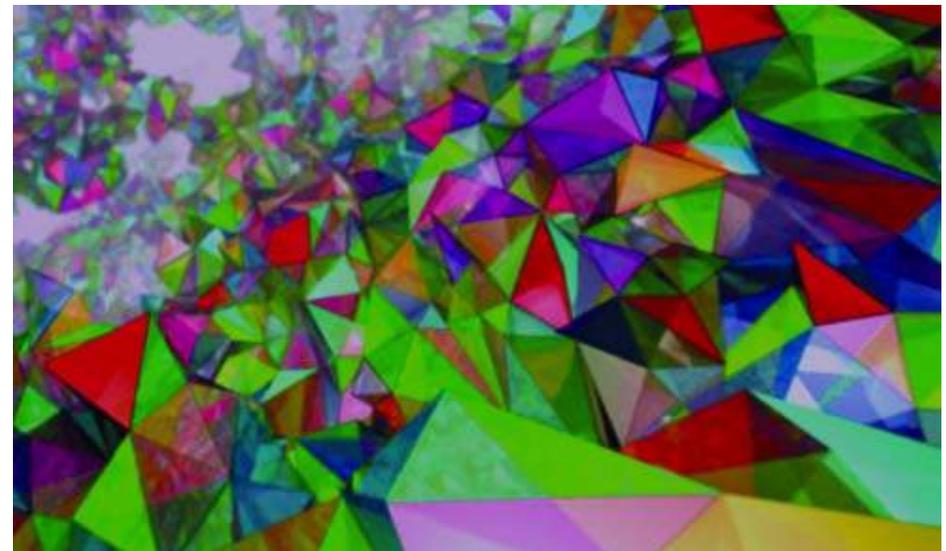
Gravité quantique à boucle

Etat initial Ψ_0 Température infinie, entropie maximum,
Mais pas d'espace-temps

Comment vérifier cette structure à petite échelle?
Par ses implications uniquement. L'Univers amplifie
par l'inflation ces structures → laboratoire idéal

Les effets sont prédits de l'ordre de ρ/ρ_P ,
donc extrêmement faibles!

Aussi des effets aux échelles L ,
de l'ordre de (L/L_p)



Singularité du trou noir

Pas de perte d'information: pas de singularité non plus

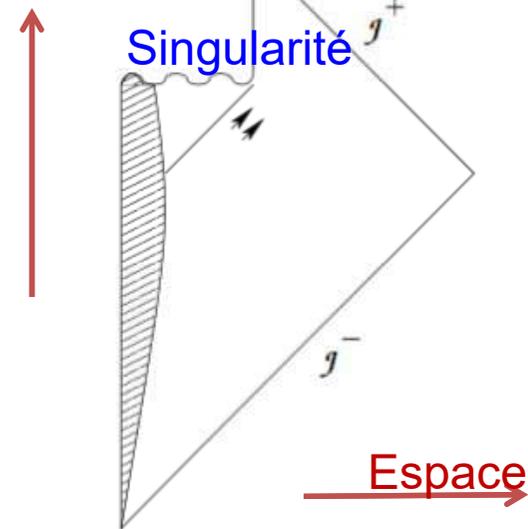
La gravité quantique agit dans la région de densité de Planck, et produit un rebond

En gravité quantique à boucle
Région I: classique

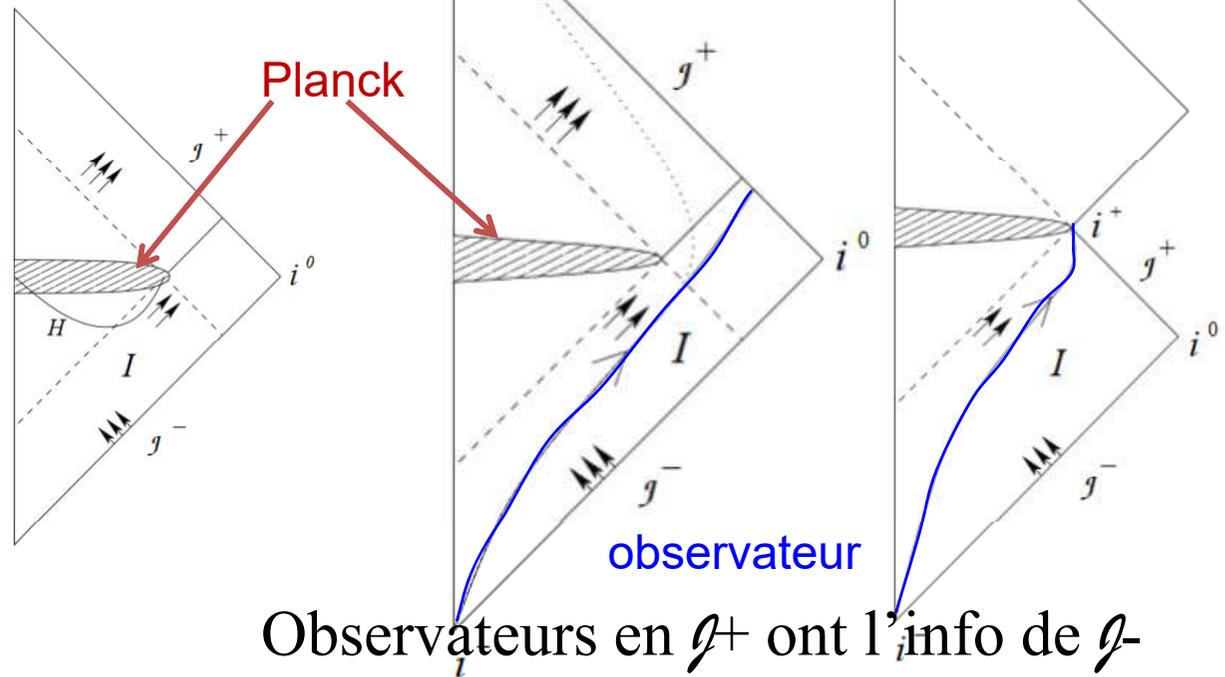
Temps d'évaporation
infini

Trou noir classique
+ évaporation

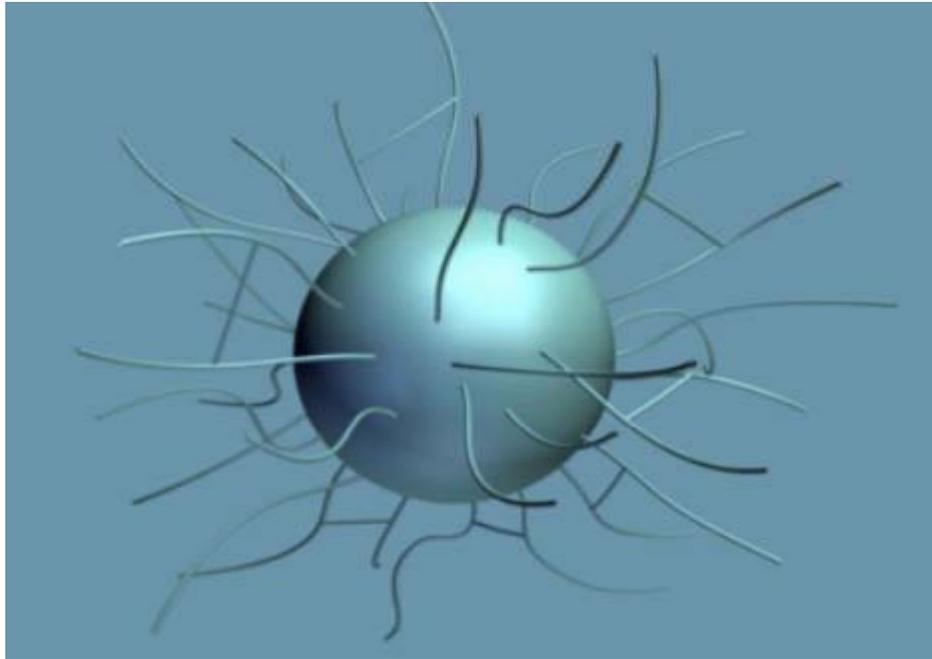
Temps



Ashtekar & Bojowald 2006



Entropie du trou noir



Horizon du trou noir
et son réseau de spins
(Rovelli 2014)

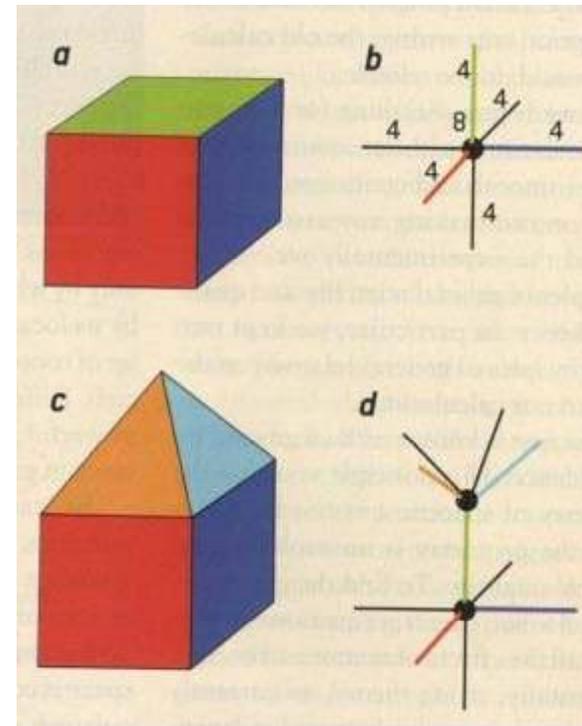
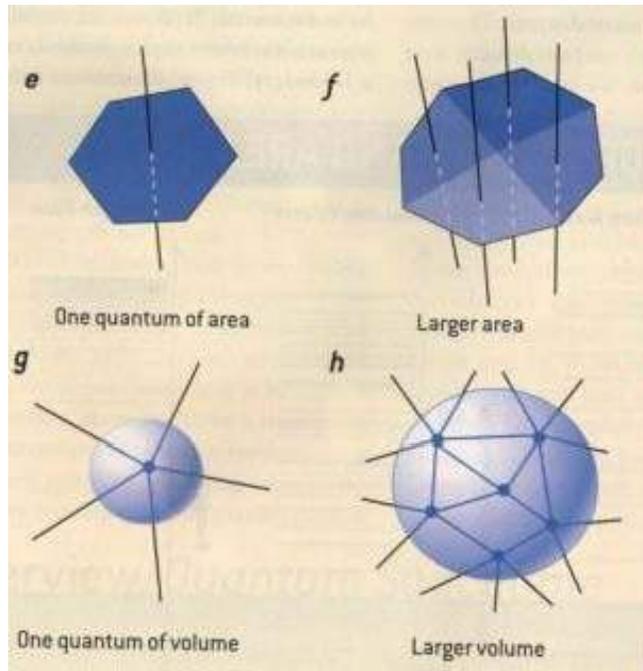
→ L'entropie converge vers
celle de Bekenstein-Hawking

$$S_{BH} = \frac{kc^3}{4\hbar G} A.$$

→ Le trou noir a une représentation physique
(contrairement aux cordes)

→ Pas de singularité en $r=0$

Réseau de spin, mousse de spin



Surface= une ligne

Volume= un noeud

3D: réseau de spin (polyèdres)

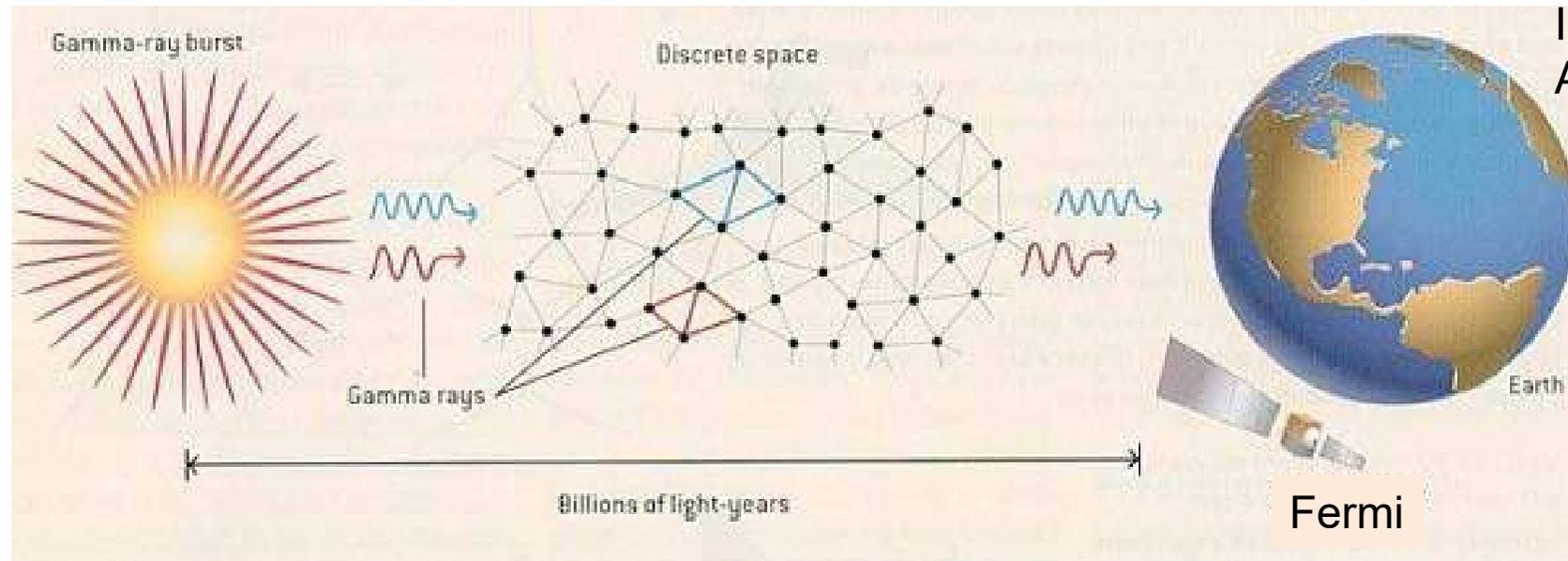
+ 1D le temps: mousse de spins (spin foam)

Une version covariante de la mousse de spin a été démontrée (2008-11)

Engle, Perini, Rovelli, Livine, Freidel, Krasnov

Test par les sursauts gamma

Swift
Suzaku
Integral
Agile



Détection d'une émission très haute énergie d'un GRB court GRB090510
2 composantes distinctes, émission synchrotron, + self-Compton
31 GeV dans la première seconde ($z=0.9$)

Facteur de Lorentz $\gamma > 1200 \rightarrow$ contraintes sur une possible dépendance linéaire en énergie de la vitesse des photons (violation de l'invariance de Lorentz)

Requiert une échelle de masse pour la gravité quantique $\gg M_p$

Fermi collaboration 2009

GRB090510

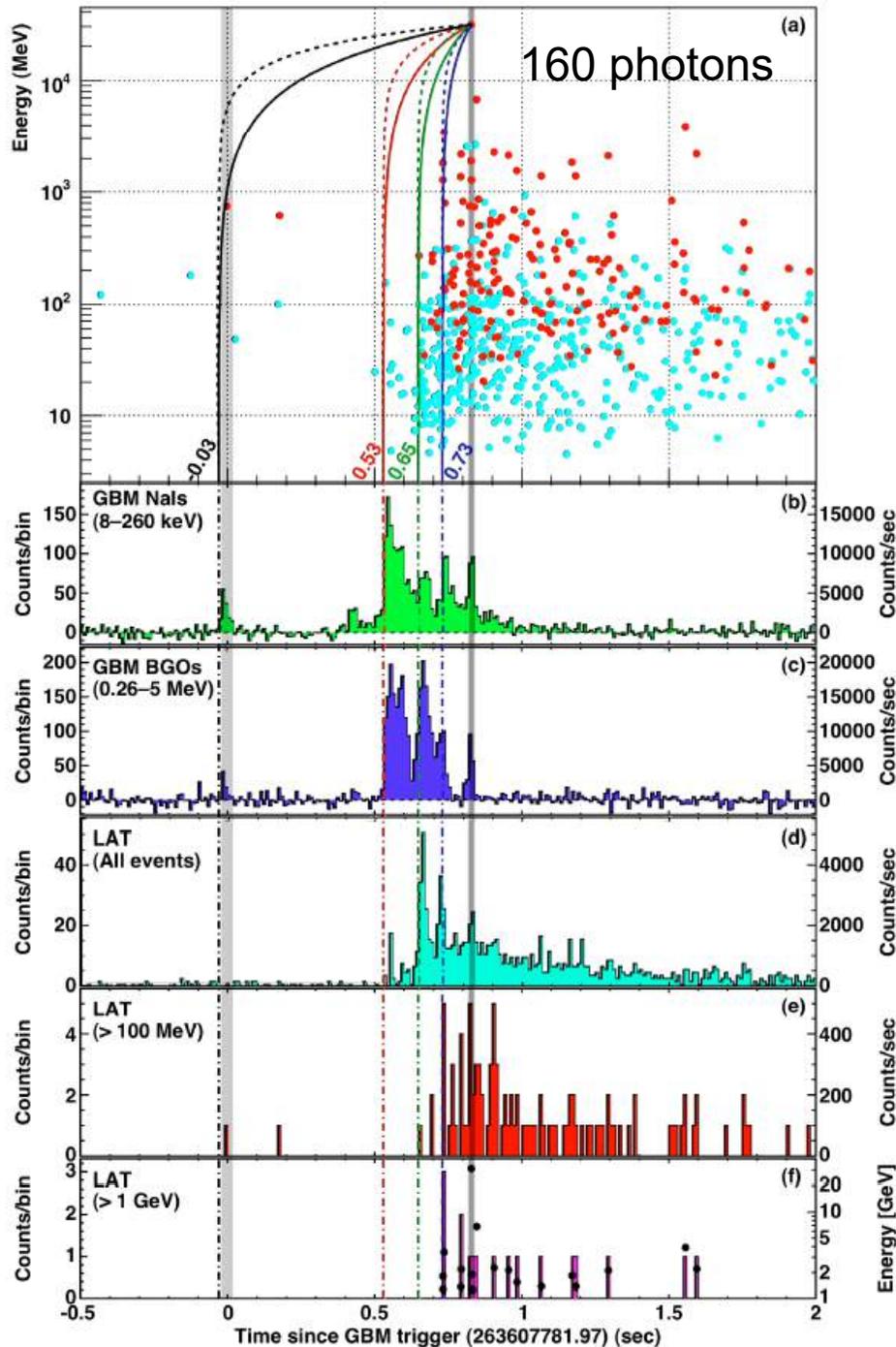
Dépendance entre E-photons
et leur temps d'arrivée

— Ligne pleine n=1 linéaire
---- Pointillée n=2 quadratique

Couleurs: instant du départ
Noir -30ms Rouge 530ms Vert 648
Bleu 730ms

Première composante soft
10keV-10MeV: synchrotron
2eme self-Compton, 01-0.2 s délai

➔ Le temps de départ est contraint



Le test de GRB090510

Les théories de gravité quantique prévoient que la vitesse des photons pourrait dépendre de leur énergie E_{ph} , à l'échelle de Planck $E_{\text{ph}} \sim M_{\text{p}} c^2$

La différence est très faible, et il faut des sources très lointaines, et de différence en énergie très grande (keV – 31 GeV) à $z=0.9$ dans la première moitié de l'Univers

$$(v/c - 1) \sim (E_{\text{ph}}/M_{\text{QG}}c^2)^n \sim (M_{\text{p}}/M_{\text{QG}})^n$$

$n=1$ linéaire

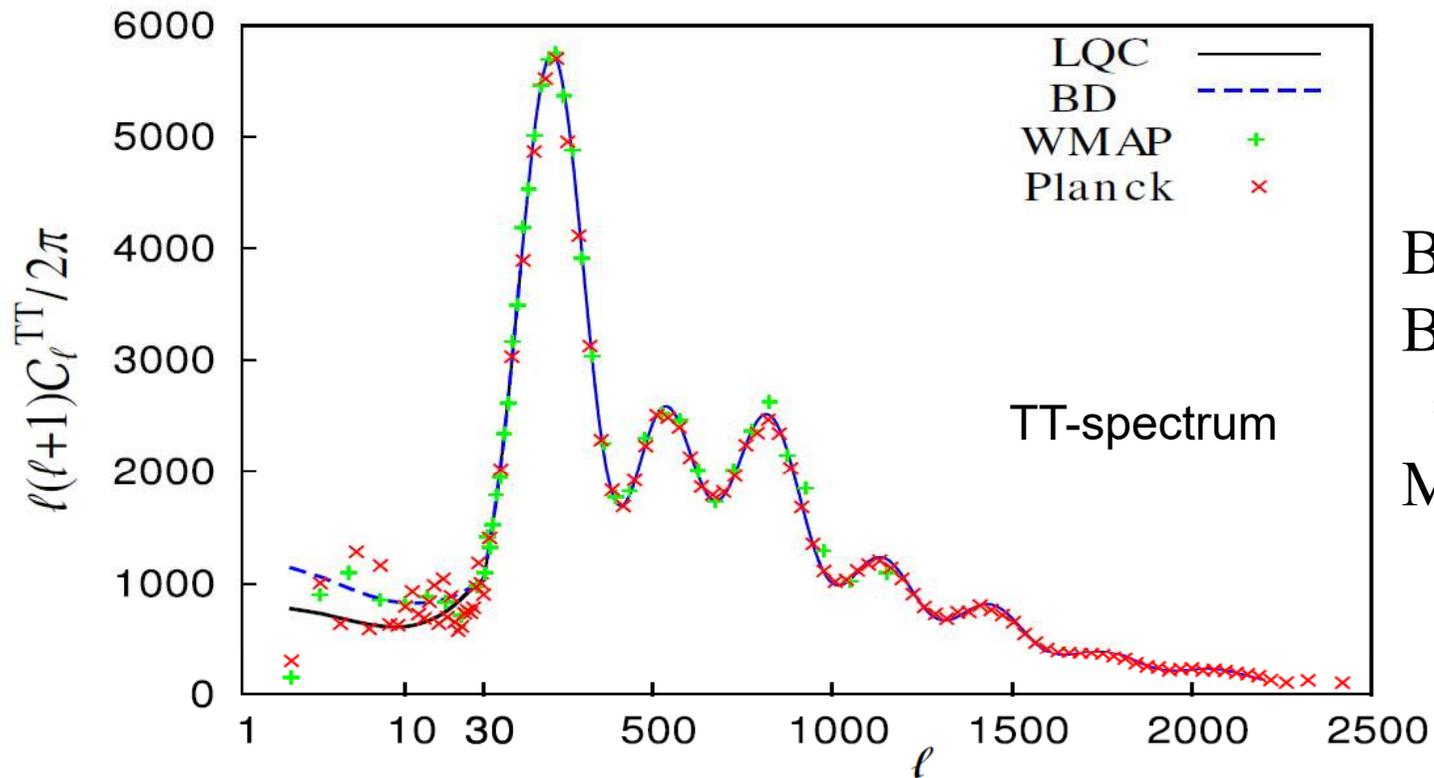
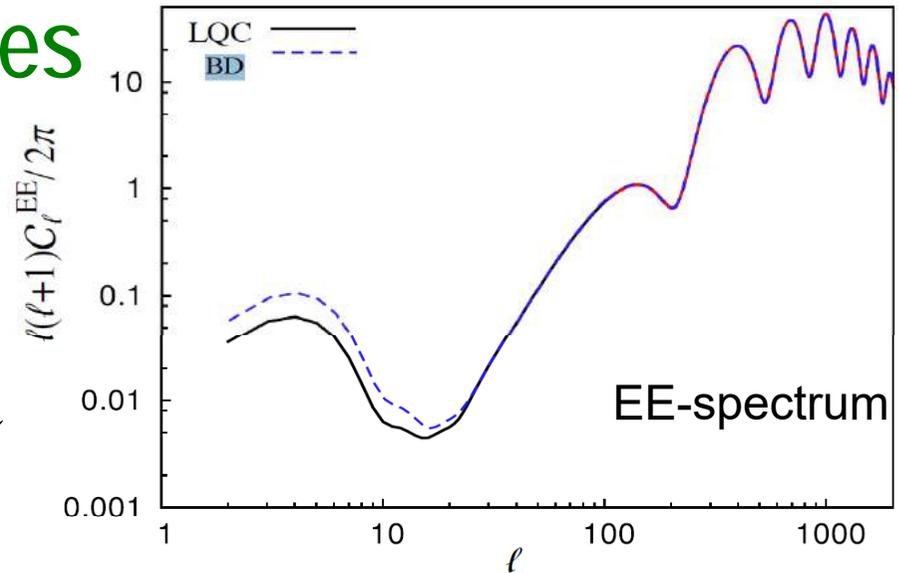
Aucune violation de Lorentz n'a été détectée, $v=c$, et $M_{\text{QG}} \gg M_{\text{p}}$
Autrement dit, l'échelle quantique $<$ échelle de Planck
Ou alors $n \neq 1$

Prédictions cosmologiques

Anisotropies du CMB: puissance
supprimée à $\ell < 30$

(Ashtekar & Gupt 2017)

Ces échelles sont la conséquence de la
physique pré-inflation différente



BD vide de
Bunch-Davies
=
Modèle standard

Effets non-locaux

Visibles à l'échelle cosmologique : puissance supprimée à $\ell < 30$

Effets caractérisés par l'échelle de la constante cosmologique

$$L = \Lambda^{-1/2}$$

Les masses des neutrinos sont à l'échelle L: $m \sim \rho^{1/4} \sim \ell_p^{-1/2} \Lambda^{1/4} \sim 0.1 \text{ eV}$

On s'attend à des anomalies pour des accélérations d'échelle

$$a_0 = c^2/L = 10^{-10} \text{ m/s}^2$$

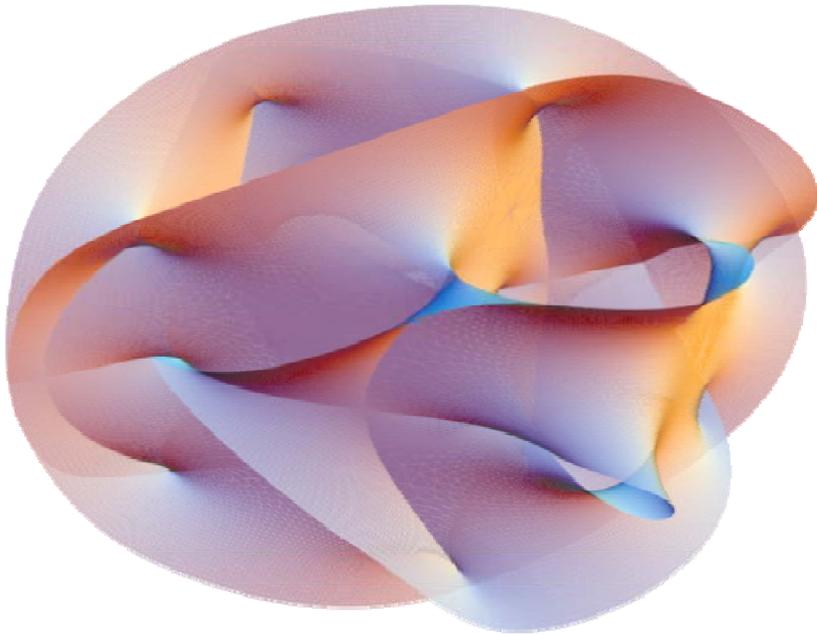
C'est l'accélération de MOND, qui reproduit remarquablement les courbes de rotation des galaxies

Et satisfait pleinement la relation de Tully-Fisher $V_{\text{rot}}^4 \sim M_b$

Comme la force de gravité varie en $1/r$ et non $1/r^2$ lorsque $a < a_0$, il y a **non-localité**

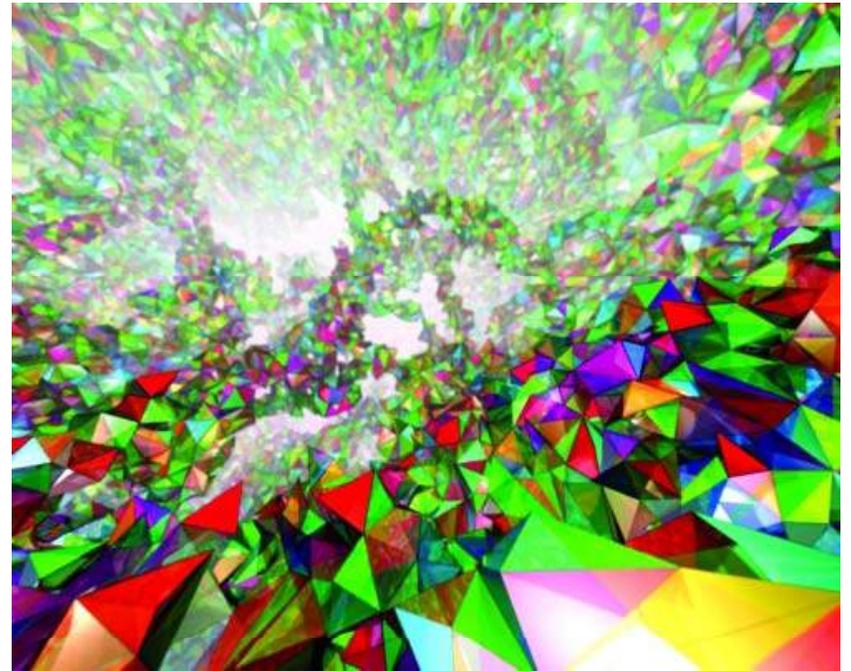
Gravité quantique: Deux théories

→ Théorie des supercordes



→ Espace lisse et plat à grande distance

→ Gravité quantique à boucles



→ Structure fractale, en grumeau

(1) Théorie des cordes

- Gravité traitée comme les autres champs quantiques: Graviton comme boson d'échange
- Toutes les particules élémentaires sont des excitations de cordes
- Demande 26 dimensions, ou 10 en super-symétrie (supercordes)
- Suppriment les infinis dans les calculs (pas de particules ponctuelles, infiniment petites)
- Supersymétrie- un monde parallèle, où chaque fermion a un correspondant boson et réciproquement
- Nombre réduit de degrés de liberté: la théorie des cordes vérifie le **principe holographique**, l'entropie dans un volume est limitée par le nbre de bits de Planck sur la surface

(2) Gravité quantique à boucle

- Réussit à quantifier la gravité

L'espace-temps est troué, constitué de morceaux connectés ensemble

Il existe un “vrai vide”, sans espace-temps (pas de fond)

- Nombre de degrés de liberté limité (cut-off L_p), l'entropie croît comme le volume toutefois

- La théorie viole la symétrie locale de Lorentz (alors que la théorie des cordes la préserve)

Le test de Fermi élimine toutes les théories violant cette symétrie – Mais il n'est pas sur que LQG la viole fortement..

- Question des autres forces, des champs quantiques, des particules

Représentation des particules

Les connections forment des
boucles tressées

Ce sont des particules élémentaires

Les twists déterminent la charge

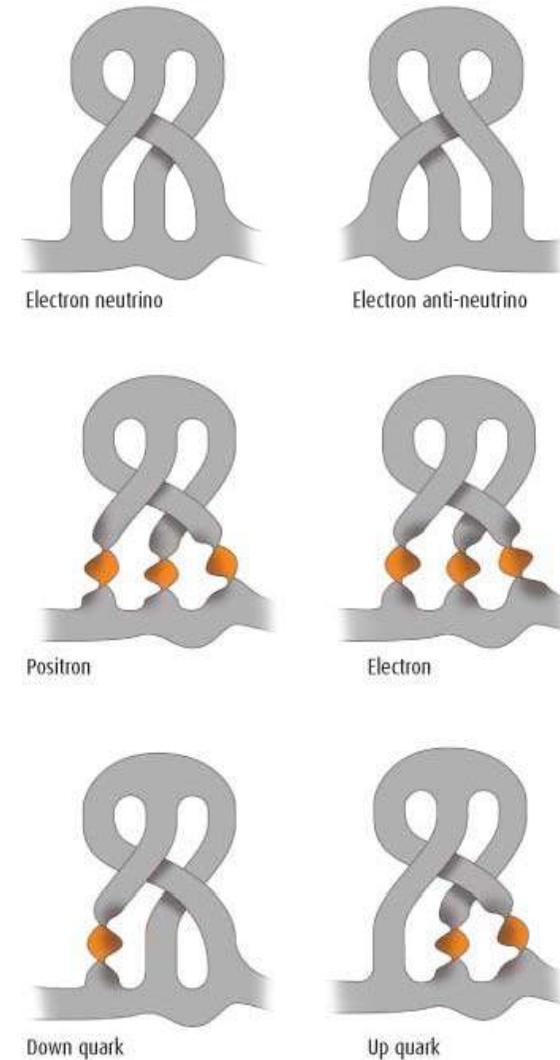
Chaque twist $1/3$ de charge électornique

Négative dans le sens rétrograde

Positive dans le sens direct

Electron: 3 twists rétrogrades

Positron: 3 twists directs



Difficultés de la théorie des cordes

- Supersymétrie: toujours pas découverte au LHC
 - Le grand nombre de dimensions supplémentaires, même compactifiées, n'ont jamais été détectées
 - Le nombre de degrés de liberté est d'autant plus grand avec N dimensions
 - N'est pas encore capable de faire des prédictions précises
- S'adapte sans cesse aux nouvelles découvertes (comme la DE)
- La théorie n'est pas indépendante du substrat de fonds: suppose un espace-temps pré-existant --à la différence de la gravité quantique à boucle, qui crée l'espace. Alors que l'espace-temps est émergent en relativité générale

Conclusions

Les théories de gravité modifiée, pour rendre compte de l'énergie noire sont multiples!

$f(R)$, Tenseur-scalaire Tenseur-vectoriel (même TeVeS..)

Formalisme de Horndeski pour généraliser

→ Théorie des supercordes, avec supersymétrie?

Incluant la théorie holographique, issue du problème de l'information autour des trous noirs

Correspondance AdS/CFT, dualité jauge/gravité

→ Gravité émergente, théorie entropique de la gravité, phénomènes microscopiques d'intrication d'entropie -- pourrait expliquer aussi la matière noire (MOND)

→ Théorie quantique à boucle, qui crée son espace-temps