

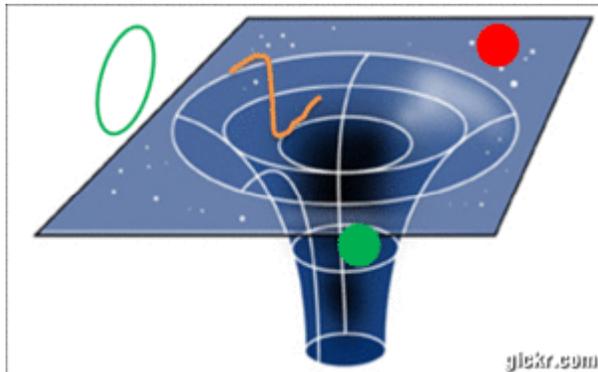


COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

Energie noire et gravité quantique Inflation et contraintes du CMB

Françoise Combes



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

Le problème de l'énergie noire

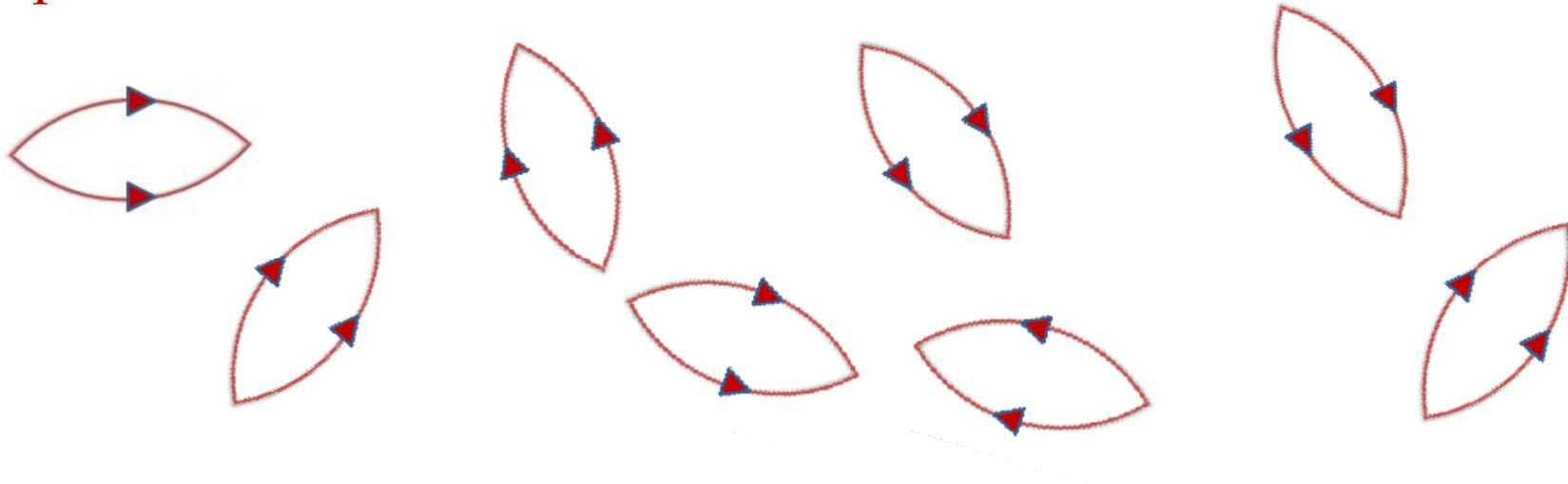
- SNIa: une constante à 5% près – Apport du fonds micro-onde
- Recherche d'une cinquième force, à petite échelle
Universalité de la chute libre « UFF » et principe d'équivalence « EP »
- Gravité quantique -- Problème de l'entropie en gravité
Cordes et supercordes
- Indices et contraintes du fonds micro-onde (CMB)

Rappel Energie noire

→ Serait-ce juste une **constante cosmologique** Λ : une erreur pour Einstein, mais comment expliquer l'ajustement fin??

→ **Accélération de l'expansion**: effet sensible depuis 5 Gyr, mais deviendra très vite dominante— **Lien avec l'inflation?**

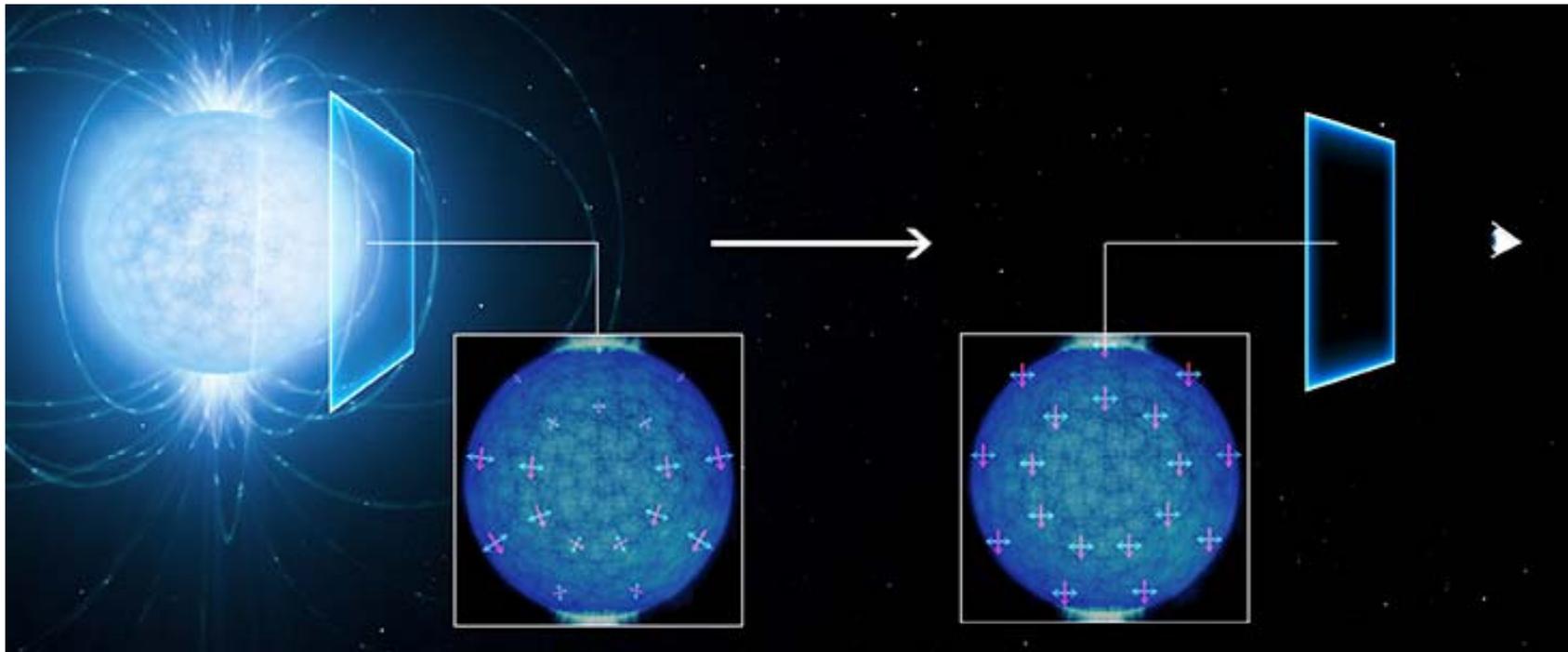
→ **Energie du vide quantique**: comprendre la prédiction de 10^{120} supérieure à la réalité



Le mystère vient sans doute de la gravité quantique

Les étoiles à neutron permettent de vérifier les propriétés du vide quantique

Biréfringence prédite, en présence de forts champs magnétiques



Prédiction jamais vérifiée en laboratoire. Ici $B = 10^{13}$ G

Particules virtuelles → milieu bi-réfringent

Polarisation 16%

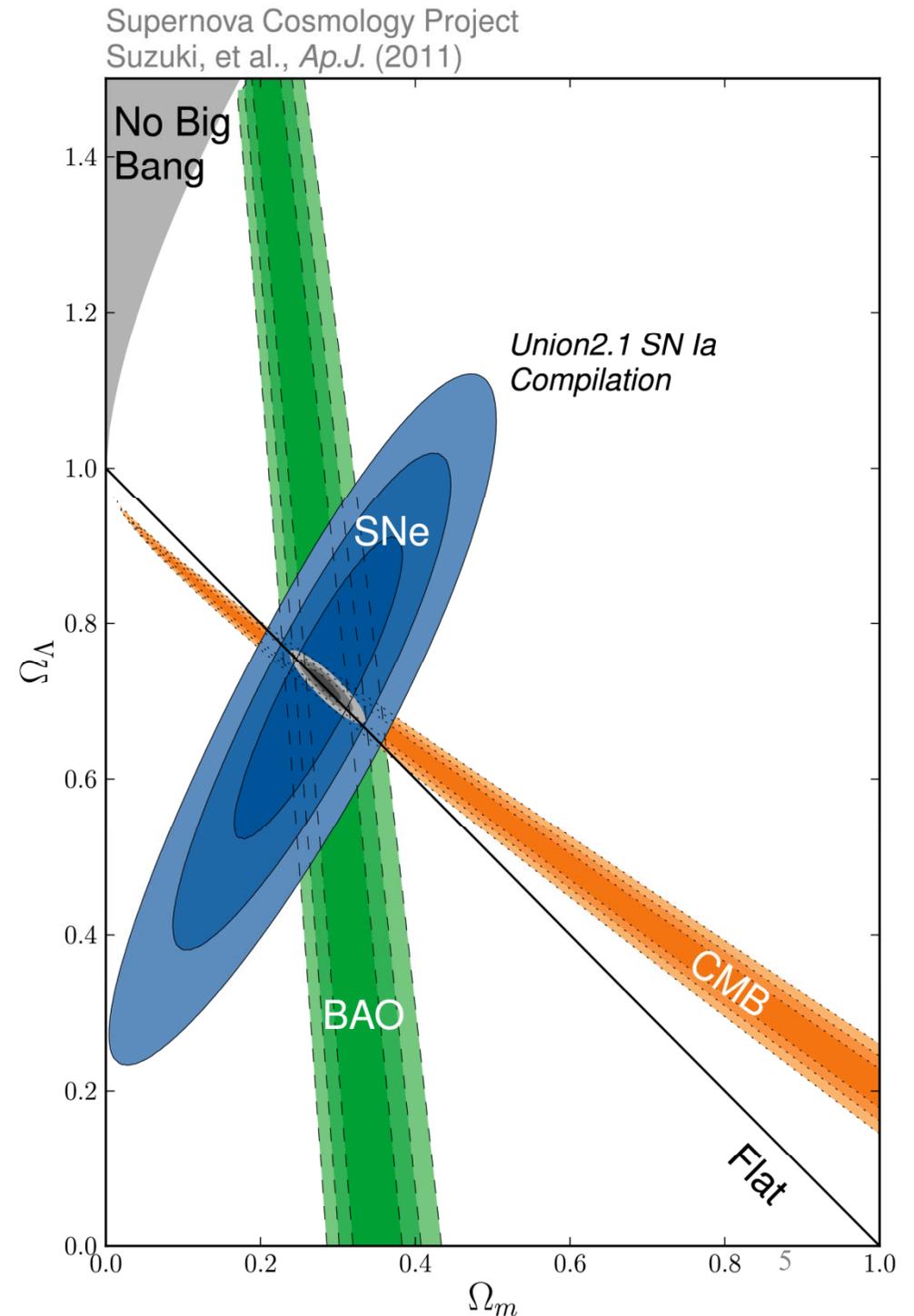
Mignani et al 2016 au VLT

Energie noire avec le seul fond micro-onde?

L'énergie noire est négligeable
à $t=380\,000$ ans

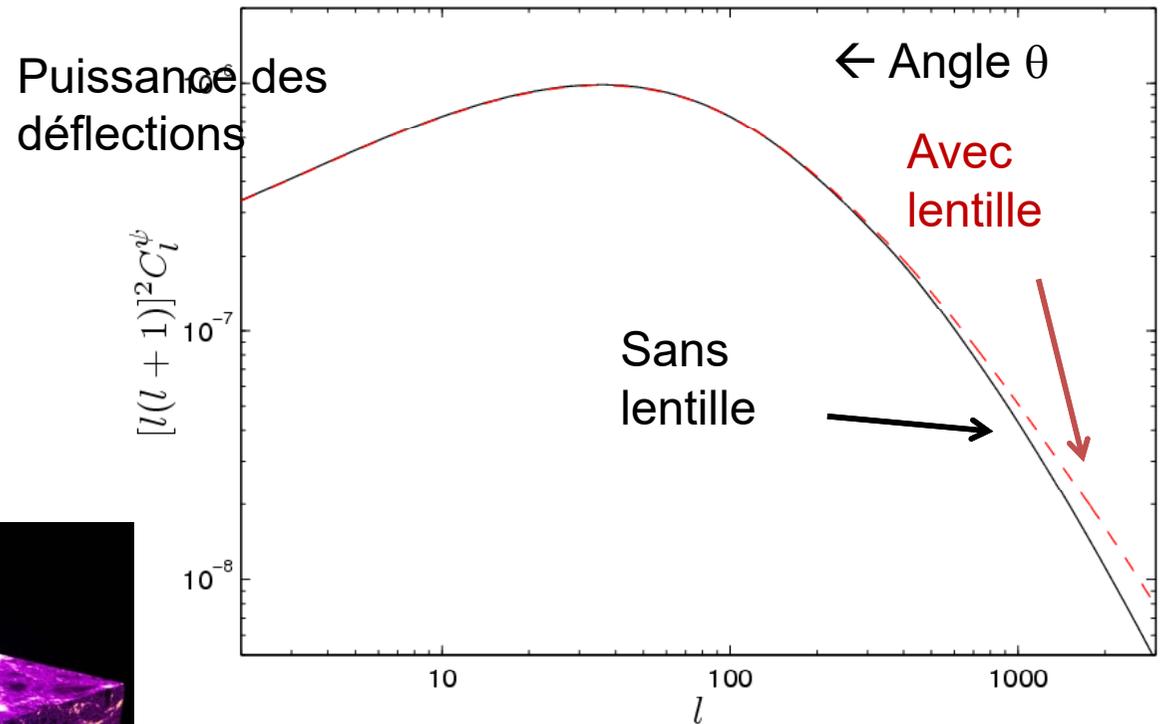
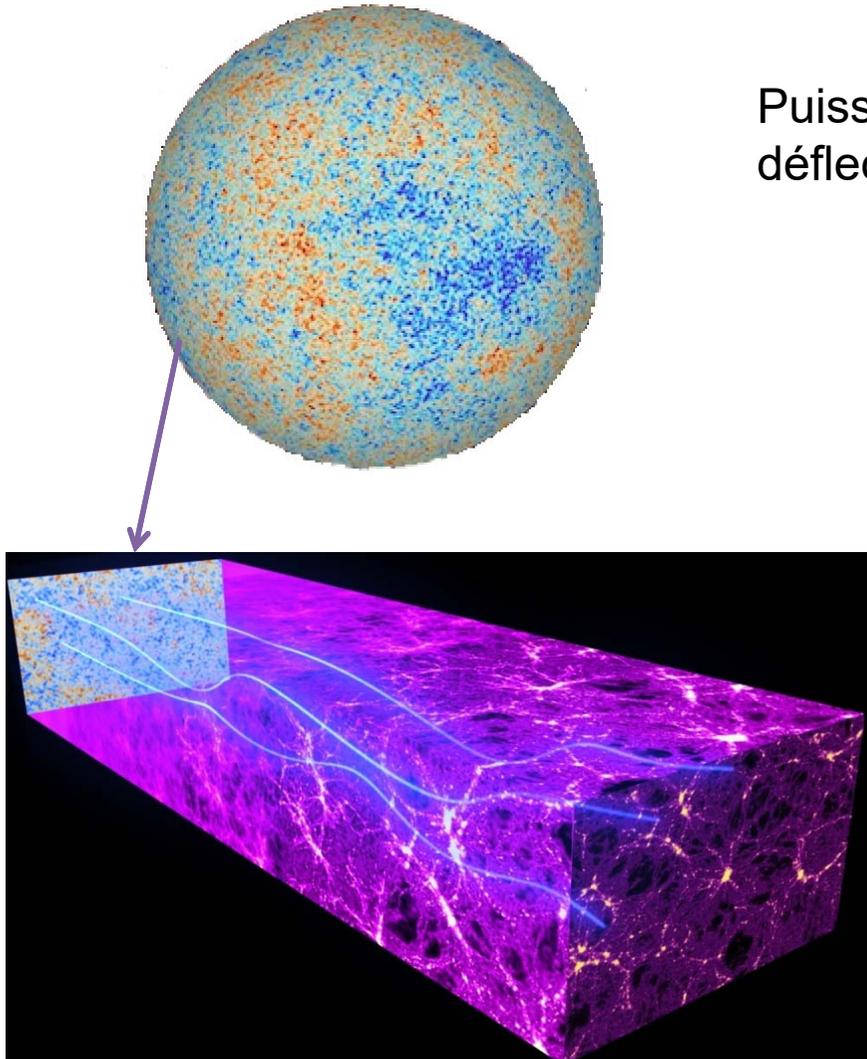
Mais on peut utiliser les effets
de lentille gravitationnelle
par les structures de l'univers

Entre $z=1000$ et $z=0$



Fonds micro-onde et lentilles

Affecte surtout les petites échelles $l > 3000$ ($2'$), effet de 10%
→ ACT avec plus de résolution ($1'$, Planck $5'$)



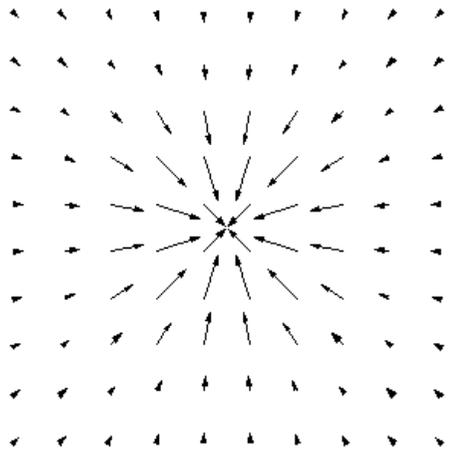
ACT: Atacama Cosmology Telescope
au Chili

Deflection des photons micro-onde

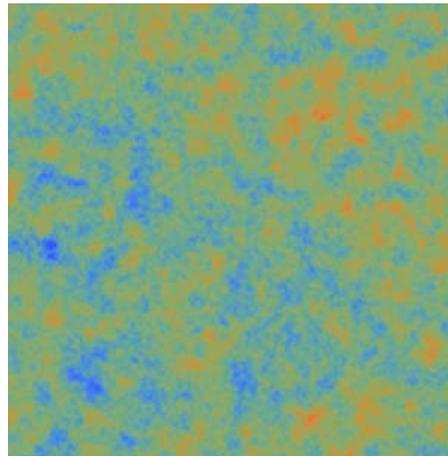
La lentille conserve la brillance de surface, déflexion $\mathbf{d}(\hat{\mathbf{n}})$

$$\Delta T(\hat{\mathbf{n}}) \rightarrow \Delta T(\hat{\mathbf{n}} + \mathbf{d}(\hat{\mathbf{n}}))$$

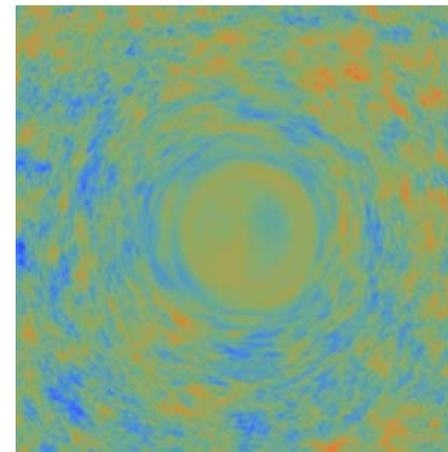
Deflections dues au potentiel gravitationnel entre $z \sim 100$ et 0
(surtout à grand z)



Angles de déflexion



T Initial

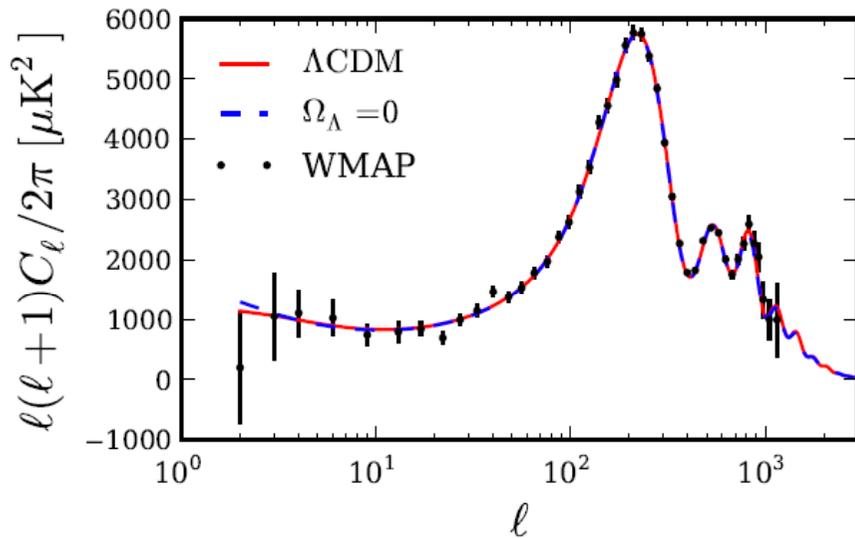


Après lentille

Introduit
une
Polarisation !

Au premier ordre, la déflexion est le gradient $\mathbf{d}_a(\hat{\mathbf{n}}) = \nabla_a \phi(\hat{\mathbf{n}})$
 Φ intégré sur la ligne de visée

Détection de l'énergie noire uniquement avec le fonds micro-onde

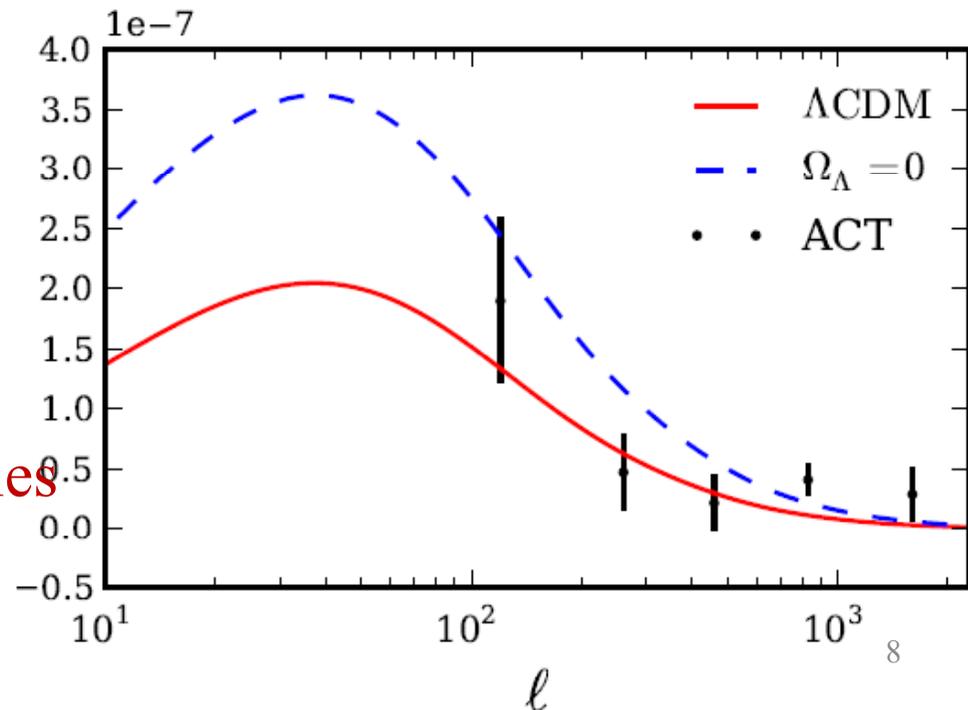


Spectre de puissance, en 2011
avec (rouge) ou sans (bleu) Λ
Sherwin et al 2011 (ACT)

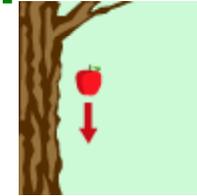
L'énergie noire au temps
 $T=380\,000$ ans est négligeable

Mais les anisotropies du fond
passent ensuite à travers des lentilles
à grand redshift

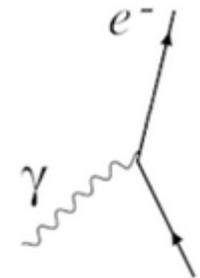
$\ell^2 C_\ell^{dd} / 4$



Unification gravité, physique quantique



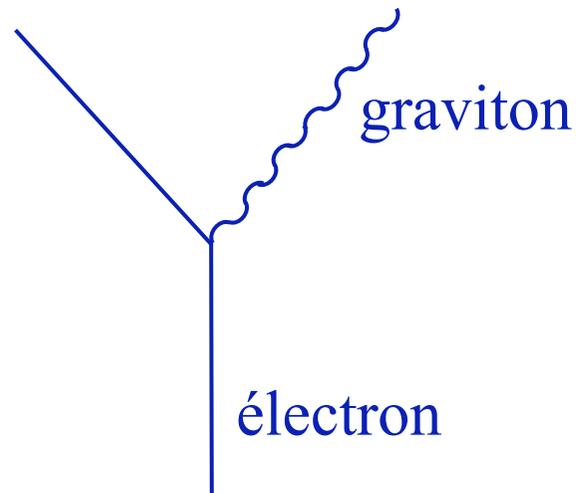
- Les deux piliers de la physique du XXe siècle
- Depuis Isaac Newton: gravitation universelle
- 1917, révolution d'Einstein (inv. De Lorentz)
- **Théorie quantique des champs: dualité onde-particule**
les forces forte, faible ou EM sont des échanges virtuels de bosons
- **Basées sur des symétries de jauge U(1) SU(2) SU(3)**
- **Théorie quantique de la gravité: Renormalisable??**
- Cela pourrait être la théorie des cordes: depuis 40ans, remplace la singularité des particules par des éléments 1D (10^{-35}m)
- **Mais dimensions supplémentaires (10), une super-symétrie**



Théorie quantique de la gravité

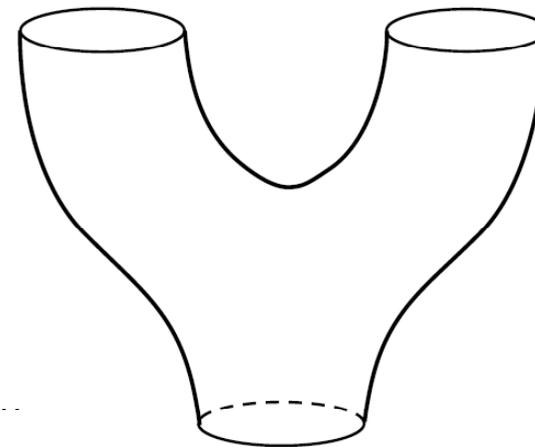
Problèmes de flou spatial + invariance de Lorentz

→ flou dans le temps, problème de causalité



Un instant donné

▪
point



○
boucle

~
corde

Des problèmes subsistent: autre chose
à petite ou grande échelle?

La gravitation est-elle bien connue?

- Aux petites échelles, pas en dessous de 1mm
- Aux grandes échelles, pas directement au-delà du système solaire
- EM: loi connue à 10^{-18}m !

- **La déviation aux petites échelles** pourrait avoir la forme

$$V(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r} \left[1 + \alpha e^{-r/\lambda} \right]$$

- Avec l'addition d'un potentiel de Yukawa, qui correspond à l'échange de bosons virtuels de masse $m_b = \hbar/(\lambda c)$
- Si le graviton existe (avec une masse ultra-faible) on pourrait aussi avoir $V(r) = -G m_1 m_2 e^{-r/\lambda}/r$

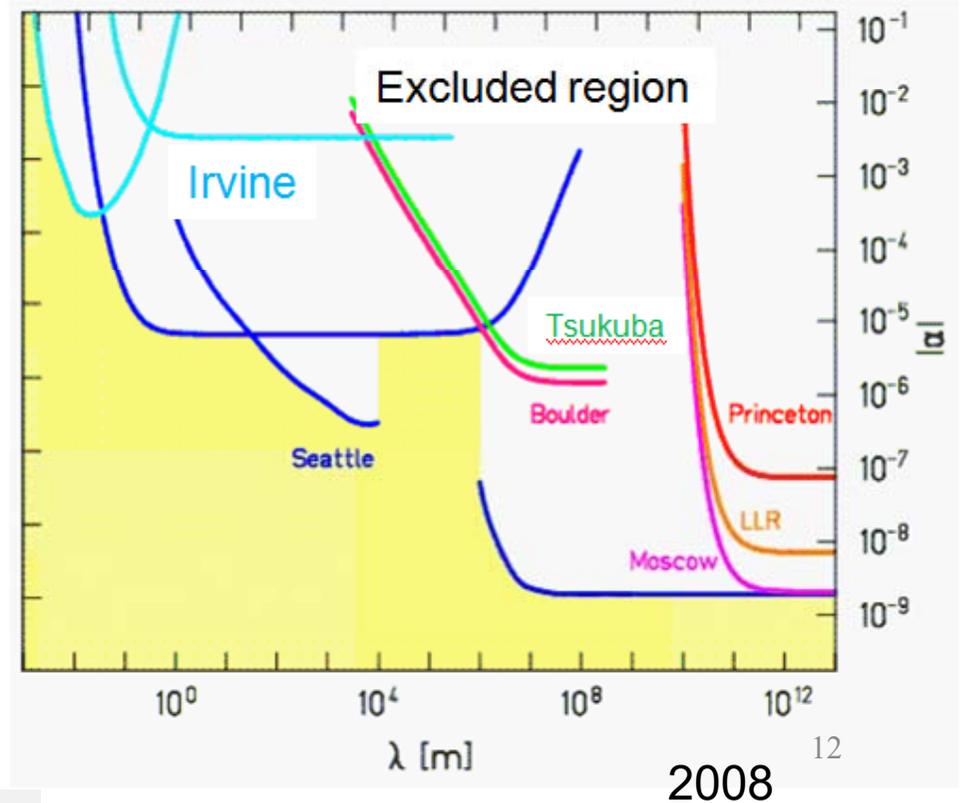
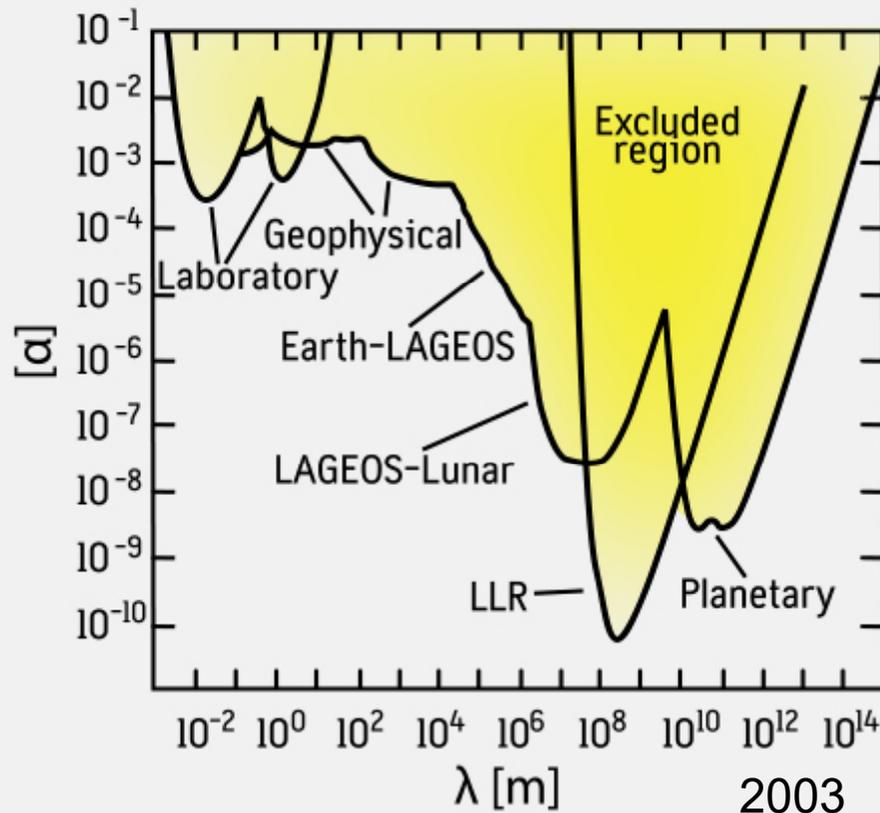
→ Force de portée finie à très grande échelle ($\sim 10^{14}\text{m}$ ou 1000 AU)

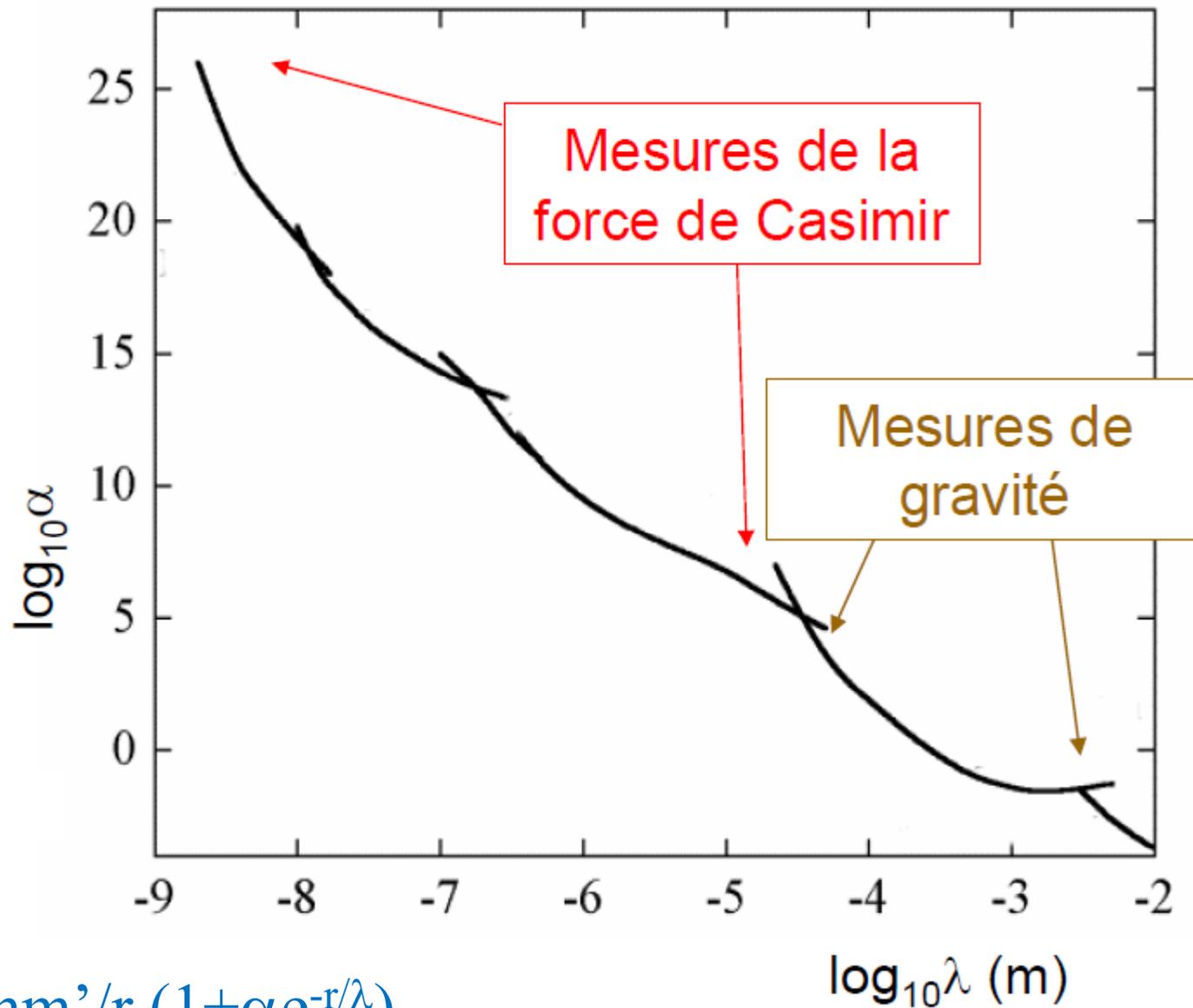
M(graviton) < 2 10^{-56} kg

Modifications de la gravité

- Ou encore, si l'échange se fait avec des particules virtuelles de masse nulle (axions ou neutrinos), $N=2$ ou 3 , avec r_0 très faible

$$V(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r} \left[1 + \alpha_N \left(\frac{r_0}{r} \right)^{N-1} \right]$$





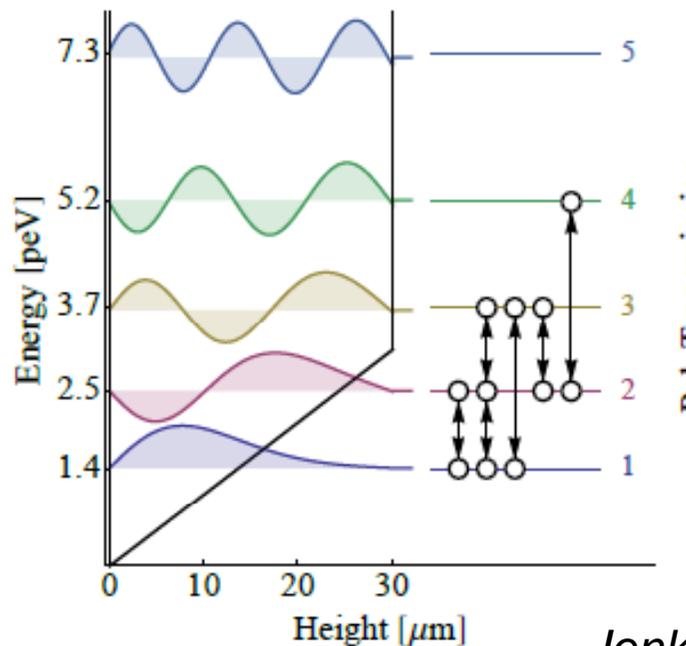
$$V = Gmm'/r (1 + \alpha e^{-r/\lambda})$$

Adelberger 2003, Lambrecht 2004

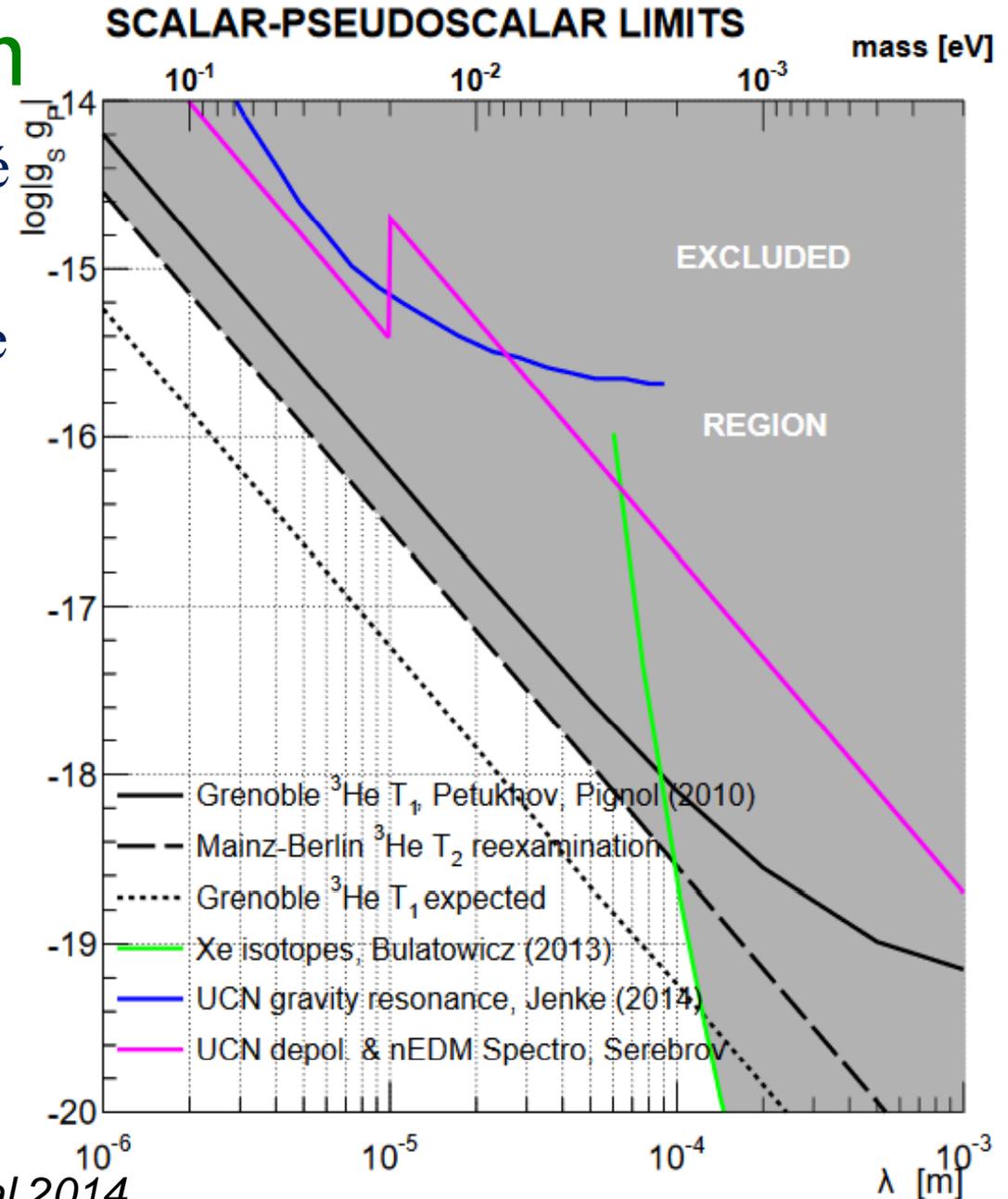
Limites pour des forces dependant du spin

- Experiences sur ^3He polarisé

+Mesure des états quantifiés de neutrons froids sur un miroir dans la gravité terrestre



Jenke et al 2014



Spectroscopie en résonance de la gravité

Existence possible d'axions

Contraintes sur

Axions $0.2 \mu\text{m} < \lambda < 2 \text{ cm}$,

Masses $10^{-5} \text{ eV} < m < 1 \text{ eV}$

Contrainte sur une théorie de
quintessence

Champs de chameleon

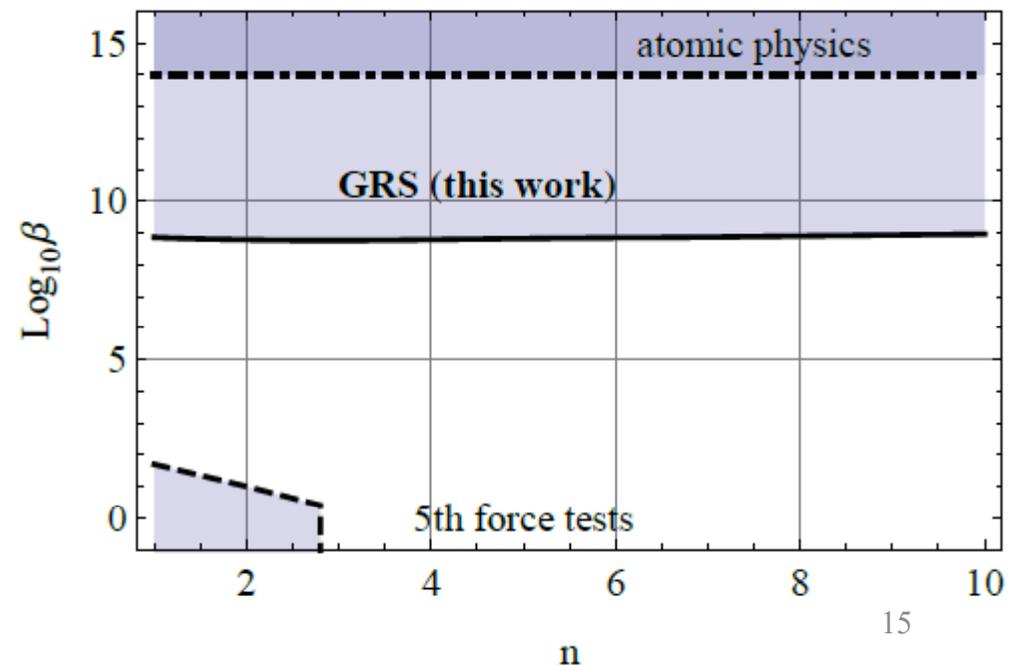
Champ scalaire Φ

Couplage β

Densité ambiante ρ

Neutrons en résonance de gravité

$$V_{\text{eff}} = V(\Phi, n) + e^{\beta\Phi/M'_{Pl}} \rho.$$



Déviations à l'universalité de la chute libre (UFF)

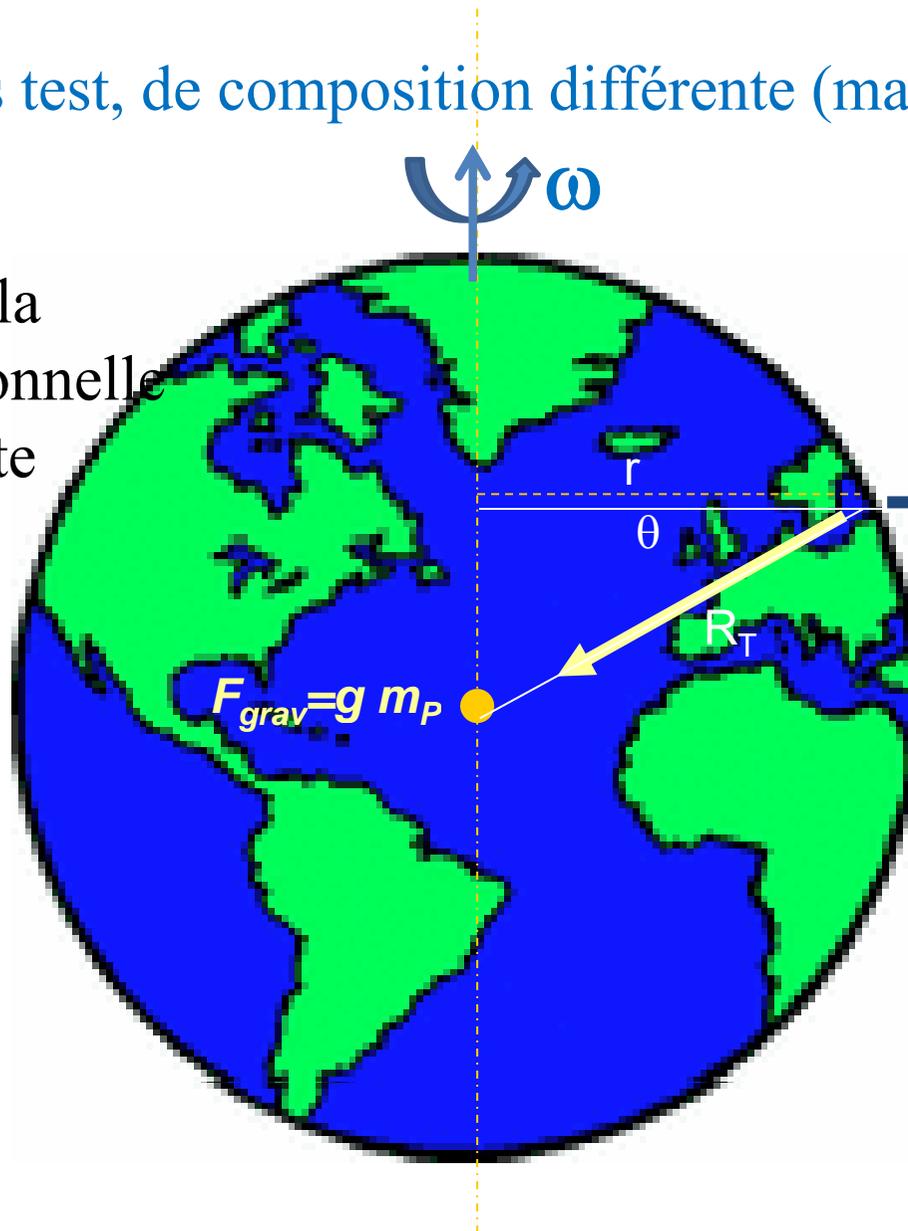
- La solution du problème de l'énergie noire, et de la gravité quantique
→ champs scalaires ou vectoriels
- Ceux-ci font intervenir des « charges » indépendantes de la masse
→ La chute libre est affectée, et le principe d'équivalence (EP)
- La densité d'énergie noire introduit une longueur caractéristique
- $\rho_d = 3.8 \text{ keV /cm}^3$

$$\lambda_d = \sqrt[4]{\hbar c / \rho_d} \approx 85 \mu\text{m}$$

Vérification de l'UFF et EP: expérience d'Eötvös

Deux masses test, de composition différente (masses égales)

Supposons que la masse gravitationnelle m_p soit différente de la masse inertielle m_I

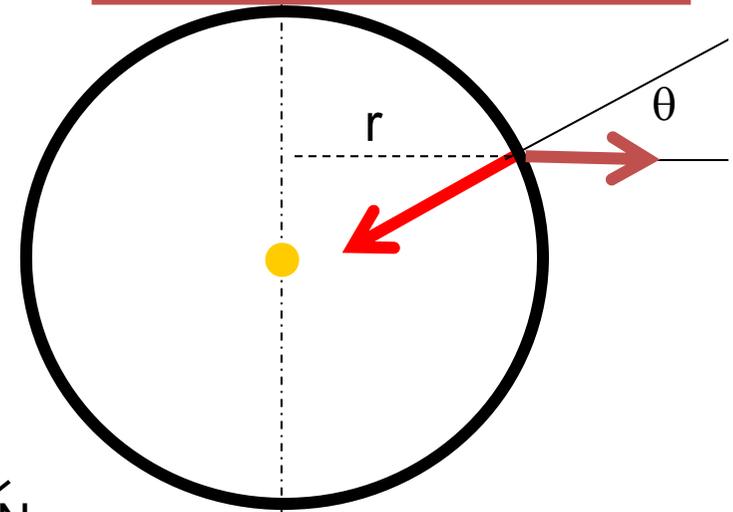


$$F_{centrifuge} = m_I \omega^2 r = m_I \omega^2 R_T \cos \theta$$

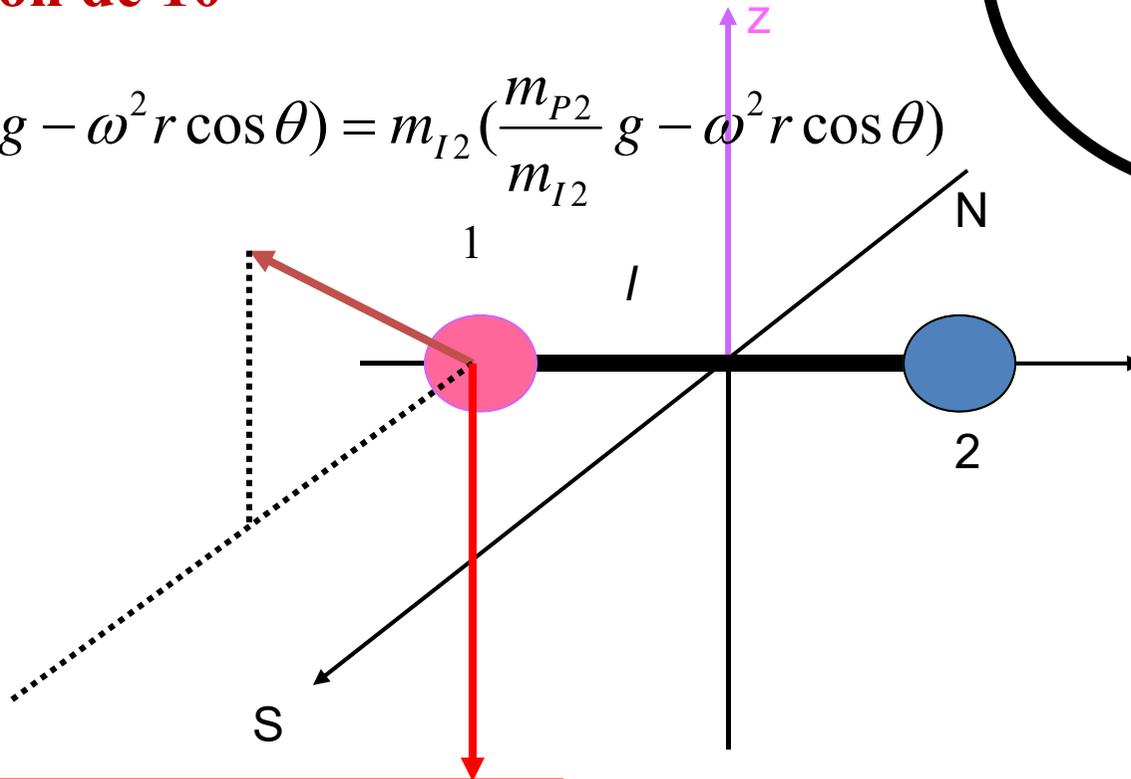
Vérification de l'UFF: Eötvös

Couple M_z = moment des forces
 En tournant le système de 180°
 Cela devrait inverser le signe du couple
Précision de 10^{-9}

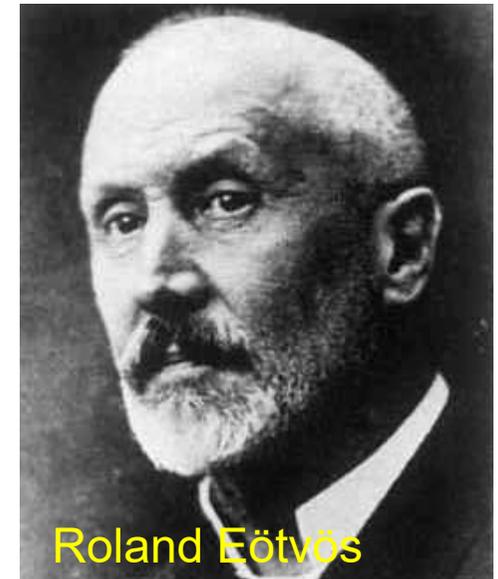
$$|\vec{F}_{Centrifuge}| = m_I \omega^2 r$$



$$m_{I1} \left(\frac{m_{P1}}{m_{I1}} g - \omega^2 r \cos \theta \right) = m_{I2} \left(\frac{m_{P2}}{m_{I2}} g - \omega^2 r \cos \theta \right)$$

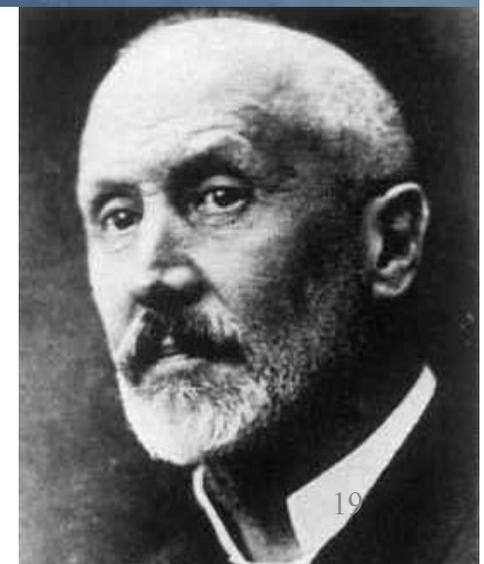
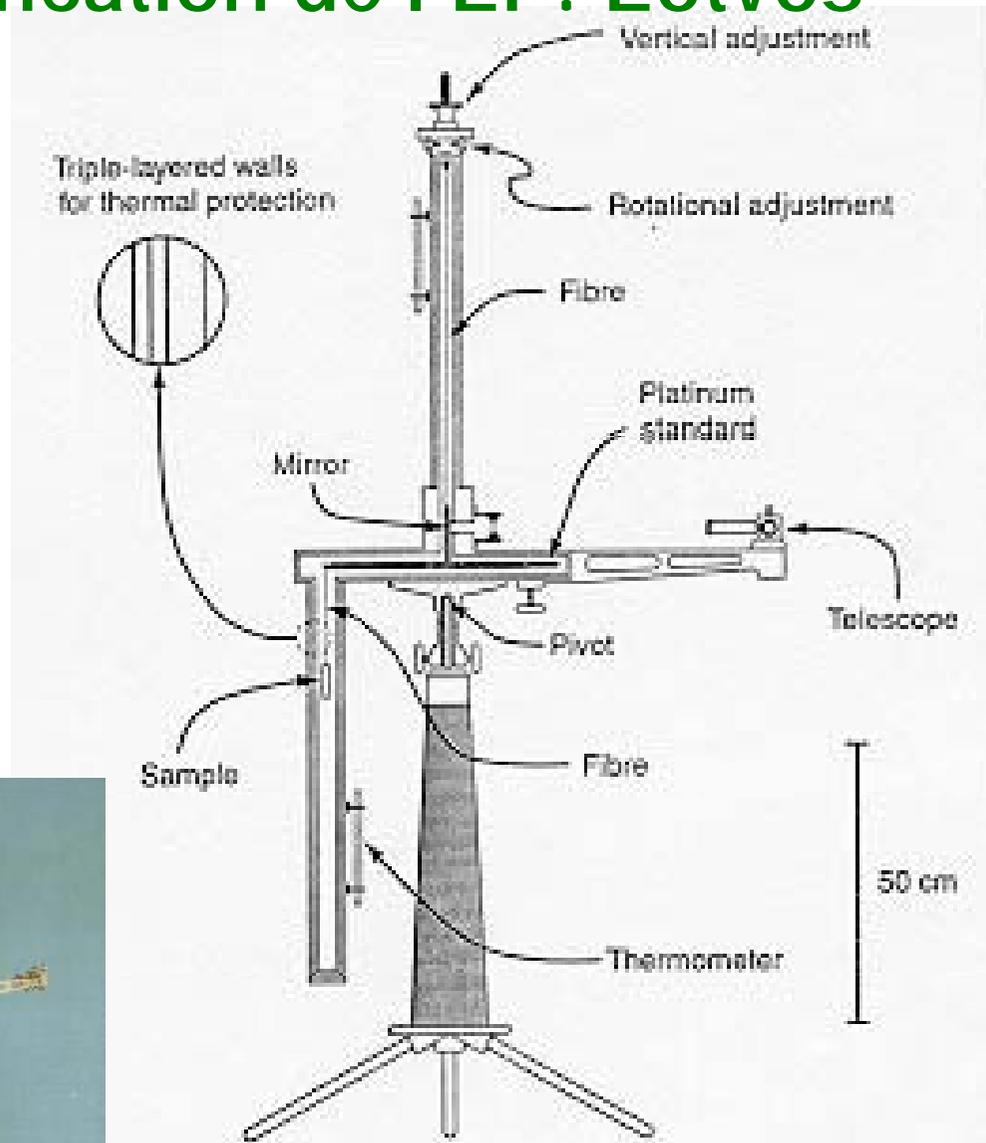


$$M_z = (m_{I1} - m_{I2}) \frac{l}{2} \omega^2 r \sin \theta$$



Roland Eötvös

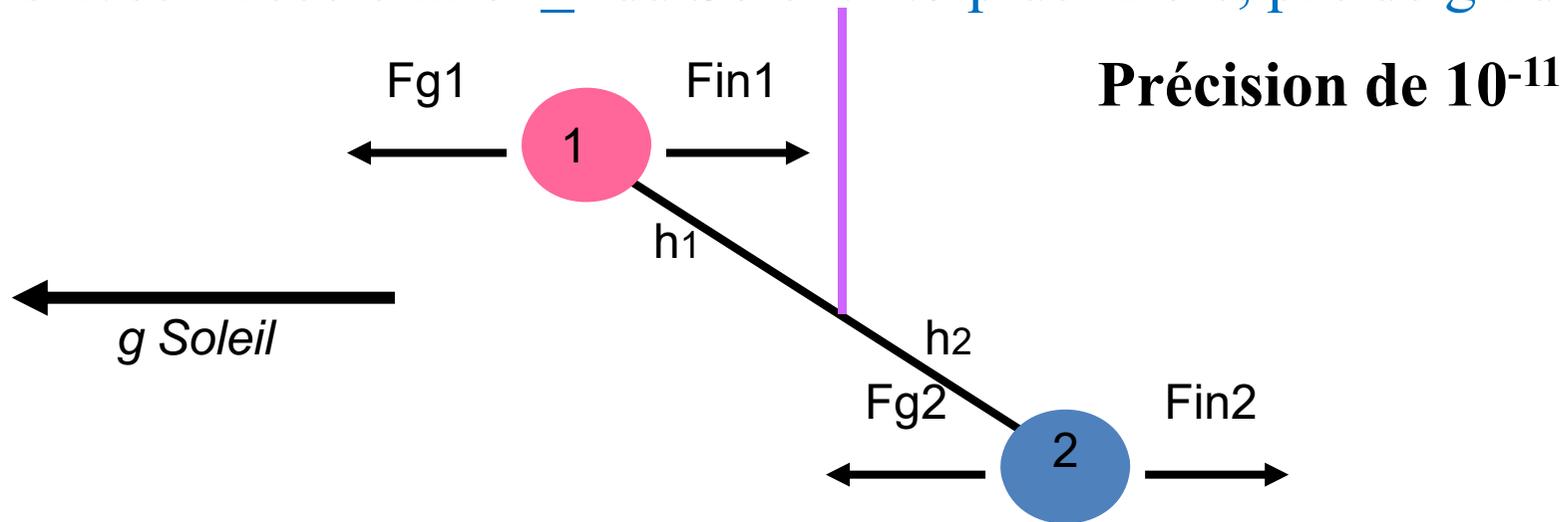
Vérification de l'EP: Eötvös



1896, Budapest

Vérification de l'UFF: Dicke

Cette fois avec l'accélération a du Soleil: 2.7 plus faible, pas de gradient



Robert Henry Dicke



$$M = (m_{1P}g - m_{1I}a)h_1 + (m_{2I}a - m_{2P}g)h_2$$

Centre de masse: $m_{1I}h_1 = m_{2I}h_2$

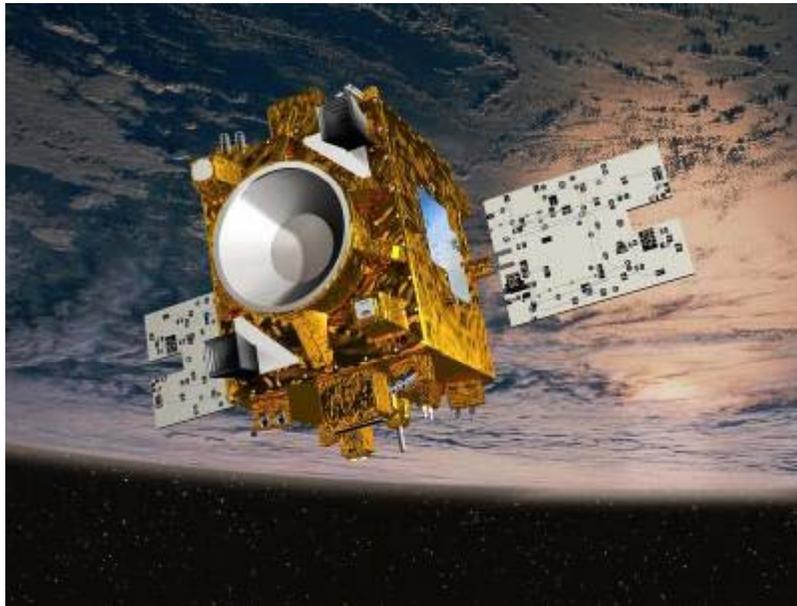
$$M = (m_{1P}g - m_{1I}a)h_1 + (m_{2I}a - m_{2P}g)\frac{m_{1I}h_1}{m_{2I}}$$

Réalisation à l'Université de Princeton (1964)²⁰

Micro-SCOPE: UFF et EP

MICRO-Satellite a traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Equivalence (MICROSCOPE)

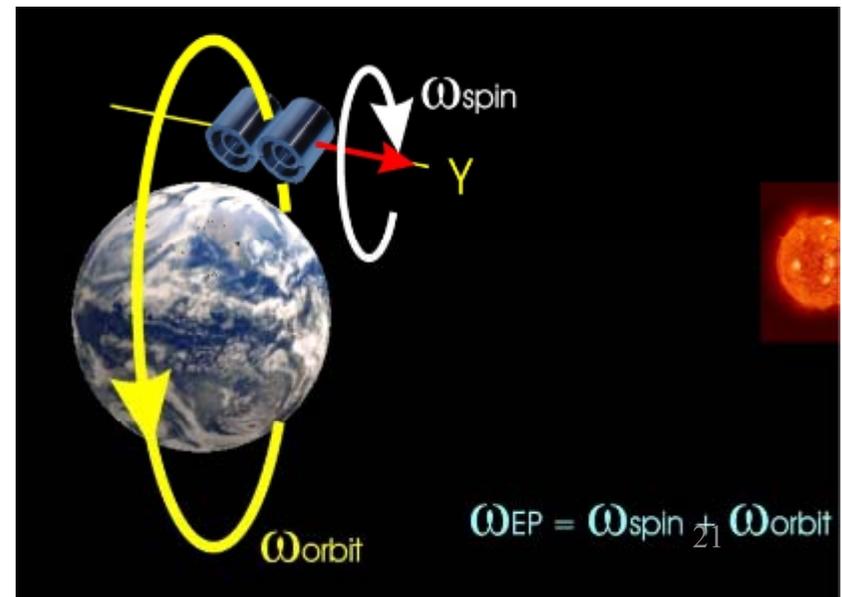
Micro satellite du CNES



Lancé le 26 Avril 2016

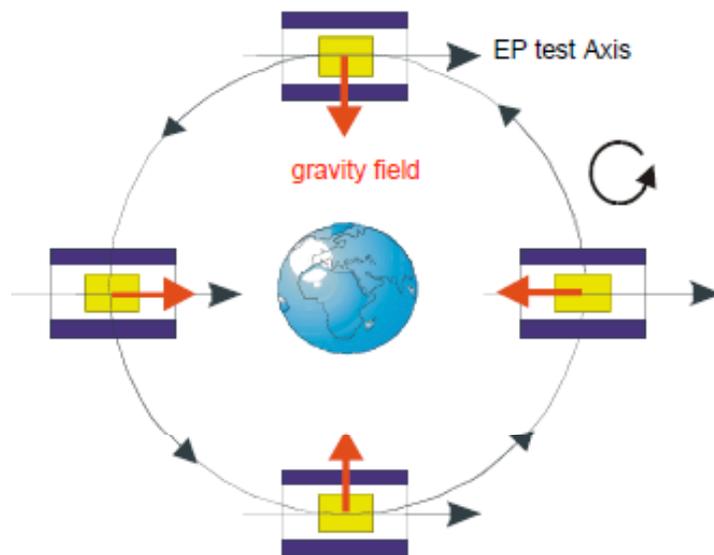
Précision: 10^{-15}
100 fois mieux que sur Terre

700 km d'altitude
2 ans de durée de vie
300kg
Stabilité thermique 1mK

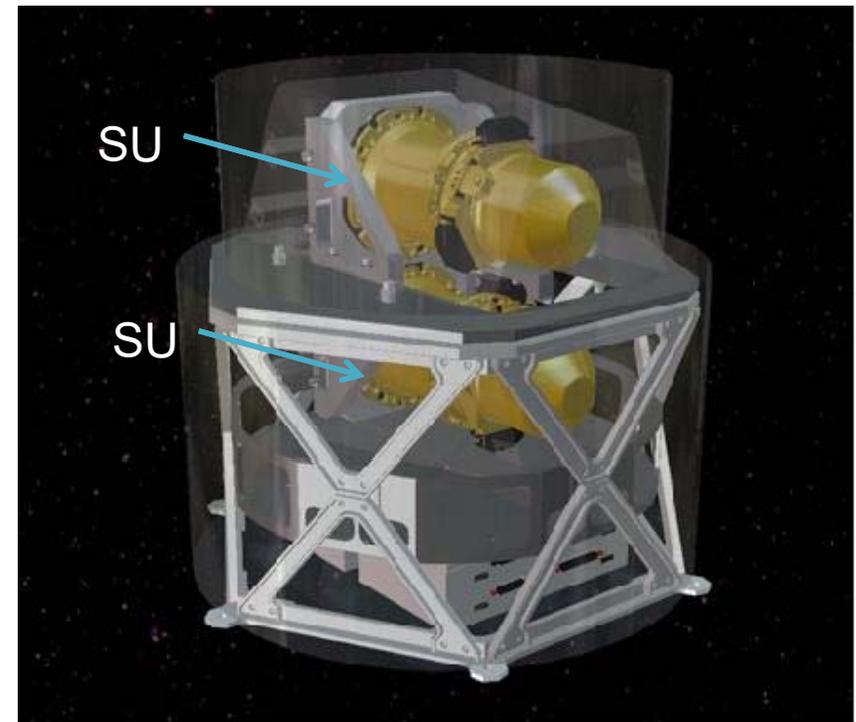


Micro-Scope (succès 26/04/2016)

- Forces électrostatiques pour compenser l'asymétrie de l'orbite
- 2 unités SU « Sensor Units », pour les 4 masses test
- Accéléromètres différentiels, entre les deux cylindres concentriques



■ Platine
■ Titane

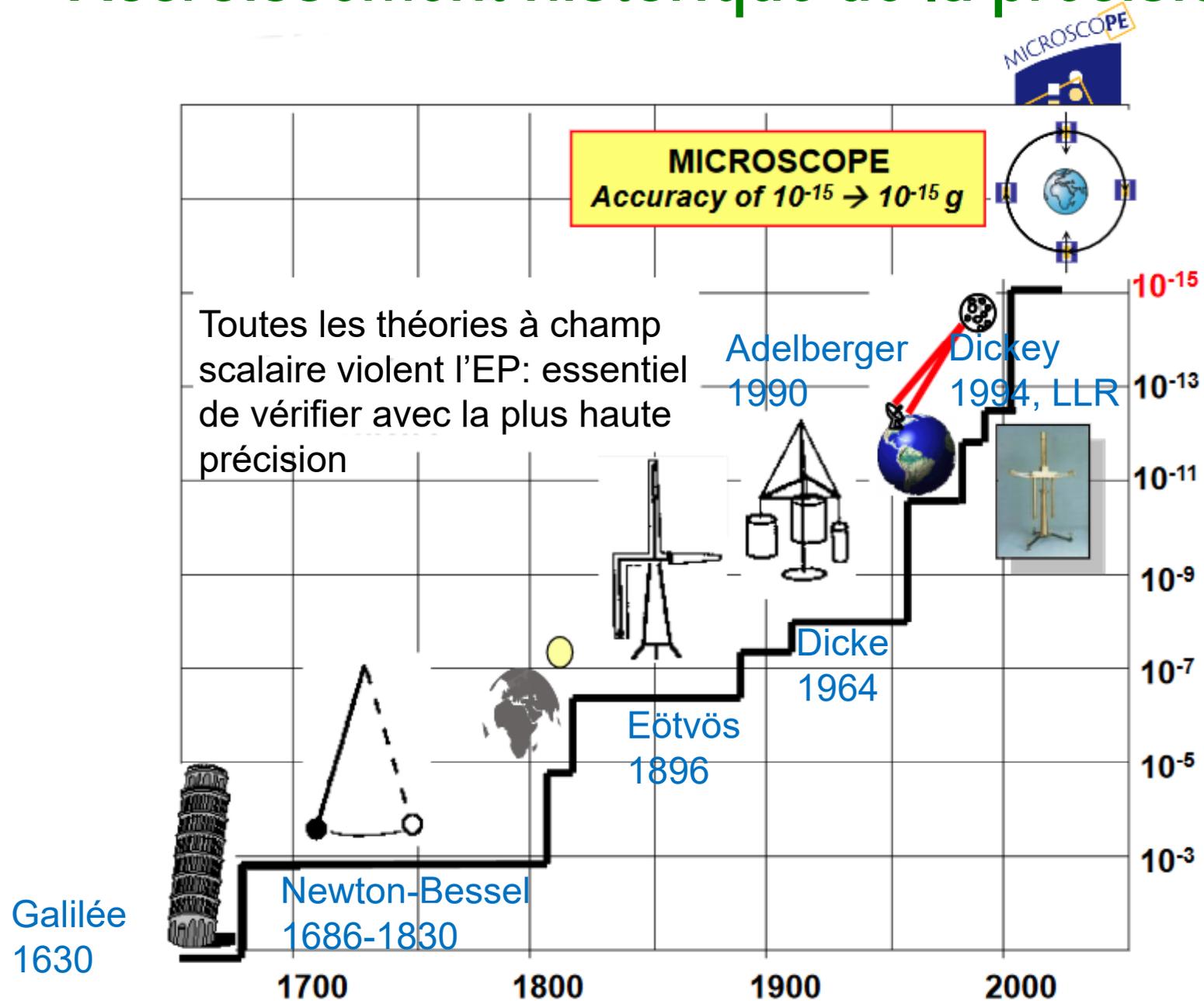


La version de la NASA: STEP

Cryogénie à l'hélium (éviter les gradients de température et les forces de pression)

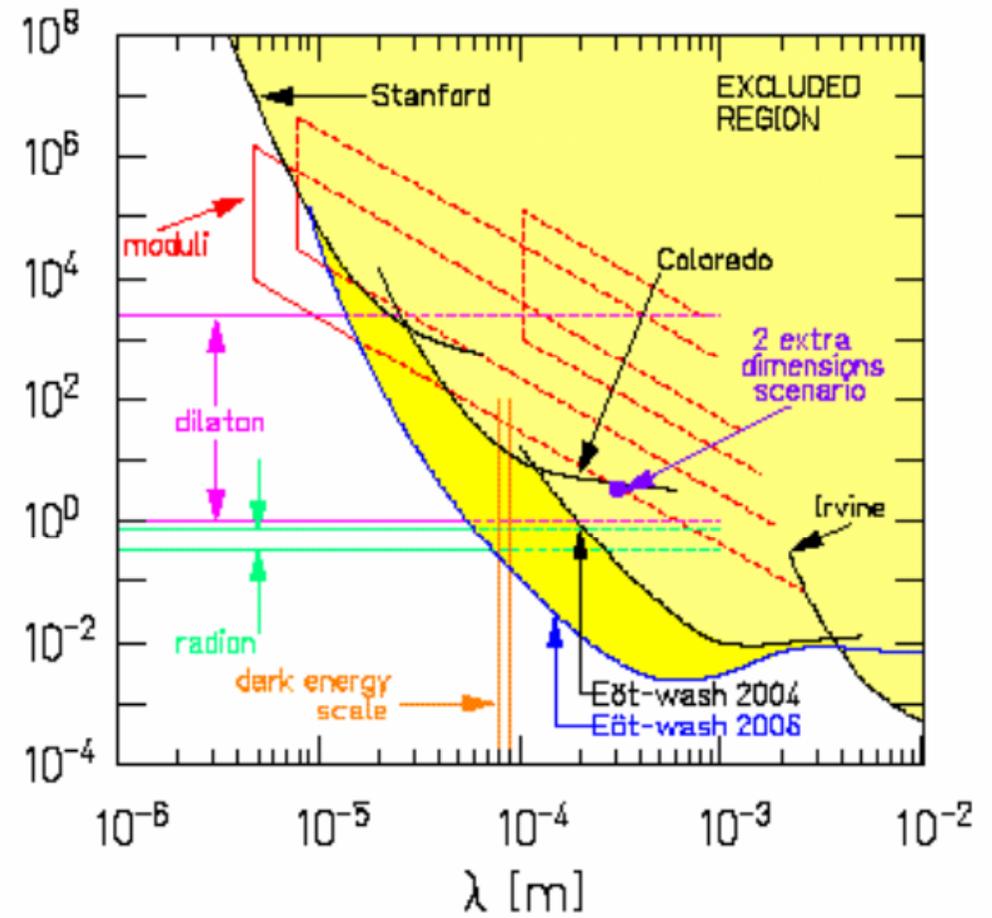
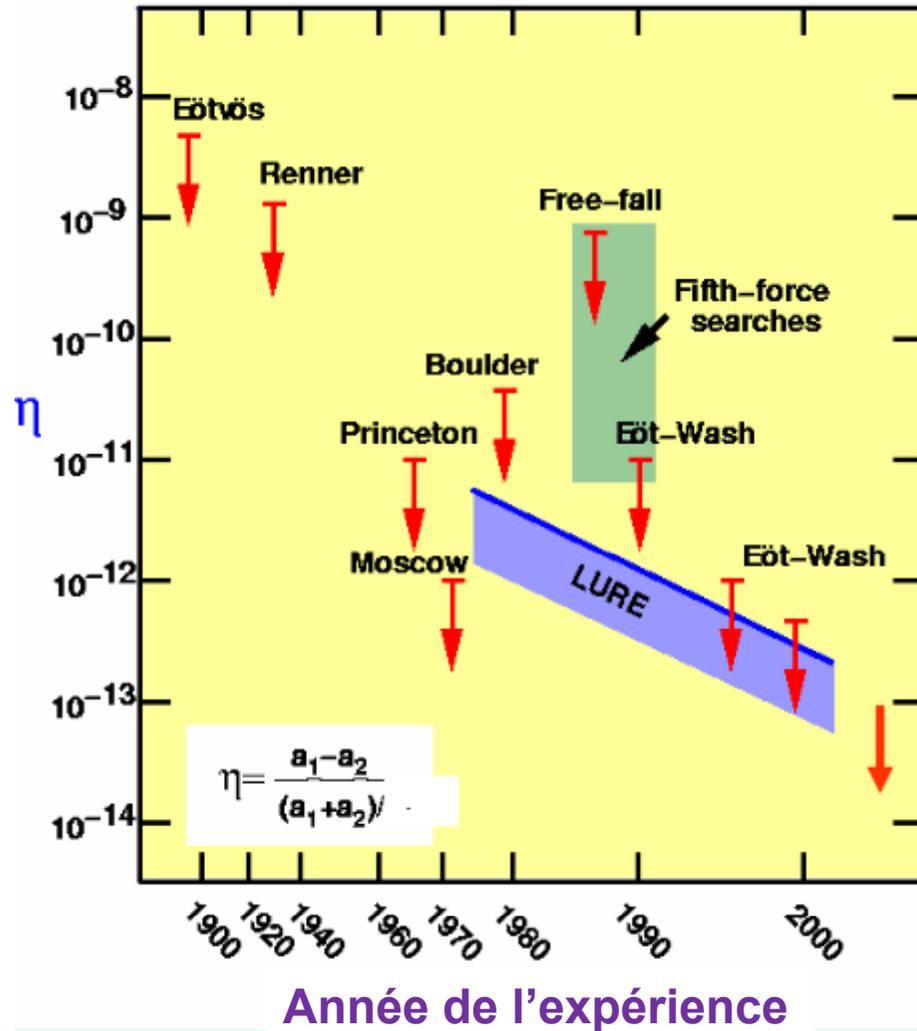
Trop chère -- Arrêtée

Accroissement historique de la précision



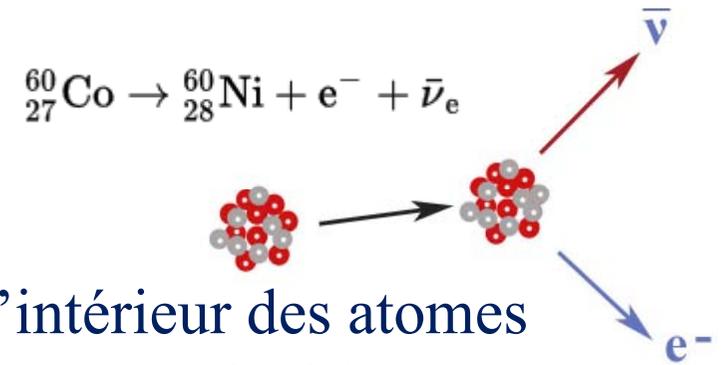
Mettre en évidence une 5ème force

Tests du principe d'équivalence



Force de la gravité à petite distance

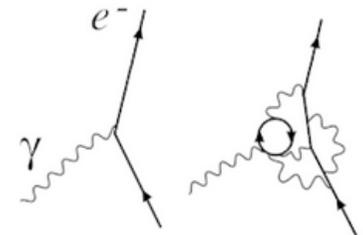
Unification electro-faible



- La force faible, force nucléaire confinée à l'intérieur des atomes révélée lors de la radioactivité β (début du XXème siècle)
- En 1930 W. Pauli pense qu'une particule invisible, le neutrino emporte l'énergie manquante
- **1961-67 Théorie électrofaible (Glashow, Weinberg, Salam, 1979)**
- Particules médiatrices de l'interaction: bosons W^{\pm} chargés, et Z^0
- Ex $e^{-} + u (2/3) \leftrightarrow \nu + d (-1/3)$
- **Interactions par courant neutre (Z) découvertes en 1973 au CERN**
- En fait, il n'existe pas de théorie de la force faible, en dehors de la force électro-faible
- **Symétrie atteinte au-delà de l'échelle EW de 100Gev**
- **$SU(2)_{ew} \times U(1)_{\gamma}$**

Grande unification GUT

- Au-delà d'une énergie encore plus haute, 10^{16} Gev, toutes les forces devraient être unifiées
- **Forte 1 EM 10^{-2} faible 10^{-5} gravitation 10^{-40}**
- Avec la supersymétrie (SUSY), on pourrait expliquer la différence de forces entre électro et faible
- **L'échelle de Planck, 10^{19} Gev est encore loin!**
- Faiblesse de la Gravité viendrait du rapport des masses des particules élémentaires à celle de Planck ($M_P \sim 10^{19}$ Gev)
- La masse du Higgs (100 Gev) qui explique la masse des particules, est très petite devant M_P : problème de la hiérarchie de jauge
- **Renormalisation:** les couplages varient avec l'échelle



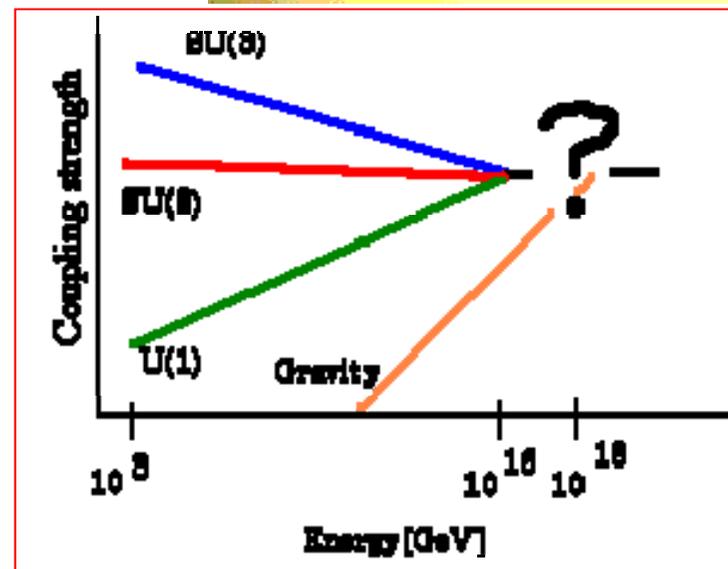
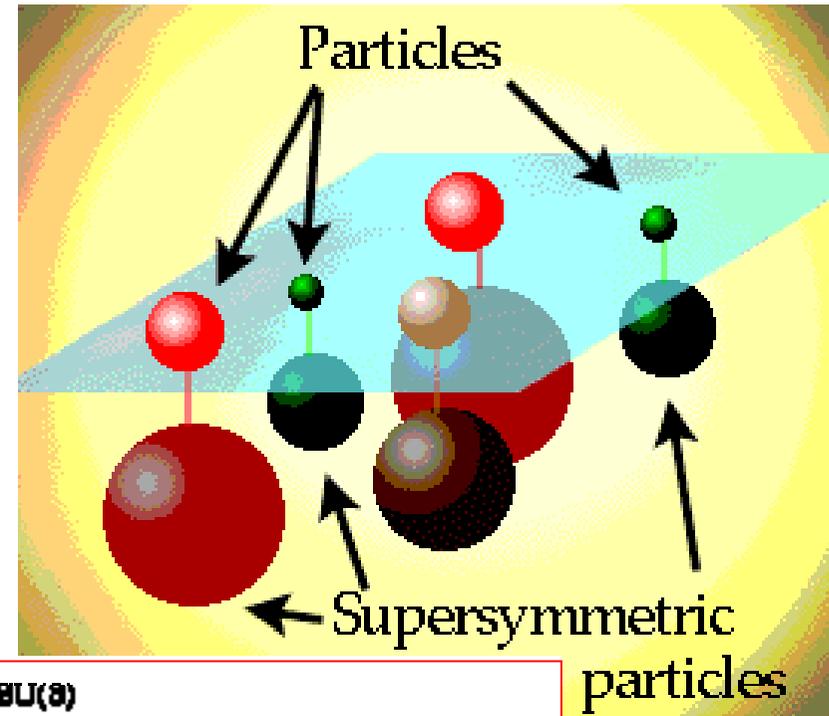
Unification à très haute énergie?

Super-symétrie (SUSY)
Meilleure extension du SM

Unification des forces

En MSSM (minimal)
 α couplage entre les diverses
forces (electro-faible, 10^2 GeV
Forte, 10^{16} GeV (GUT)
Gravitationnelle ?

$M_{\text{Planck}} \sim 10^{19}$ GeV
Cstes de couplage
se rejoignent



Tentatives d'unification gravité quantique

- Nombreuses hypothèses, mais toujours aucune théorie convaincante pour traiter les effets **gravito-quantiques** comme près du Big-Bang, ou au cœur des trous noirs
- Théorie de champ quantique de la gravité: non **renormalisable** non prédictive, et contenant une infinité de degrés de liberté

→ Concept d'entropie à revoir

En gravité, il n'y a pas de limite de maximum d'entropie, l'entropie n'est pas une fonction extensive, proportionnelle au nbre de particules, ou au volume

Pourtant, tout semble à penser qu'il y aurait une limite de l'entropie, qui serait toute l'information contenue dans la surface entourant le volume

→ Principe holographique

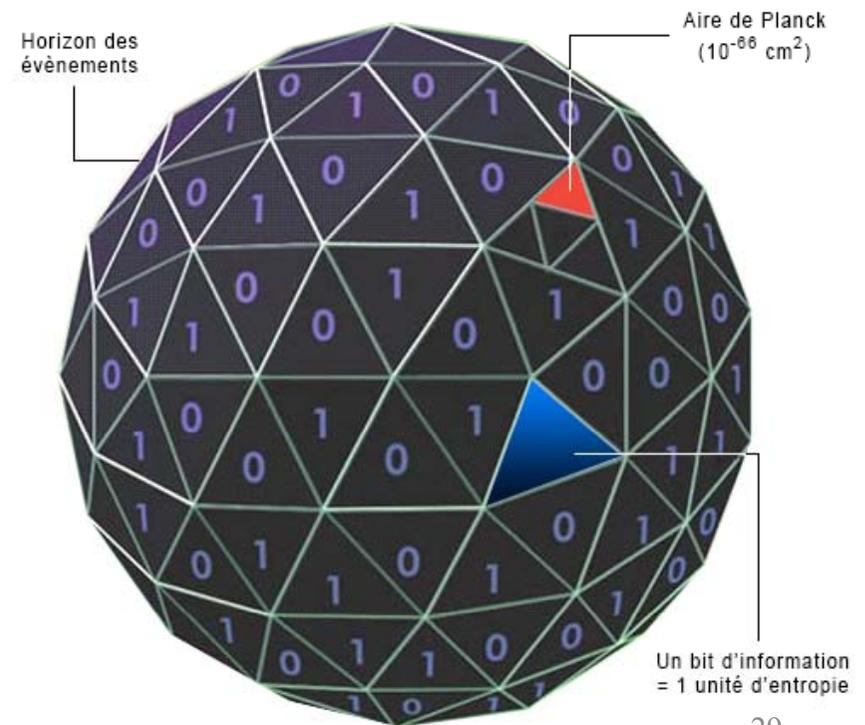


Pourquoi une holographie?

- Toute l'information contenue dans un certain volume doit être limitée, il doit y avoir un cut-off à petite échelle dû à la physique quantique, à l'échelle de Planck: on peut imaginer un réseau à 3D, avec une maille de cette échelle. Il faut alors compter le nombre de degrés de liberté sur le réseau

La gravité se décrit dans un espace de moindre dimension

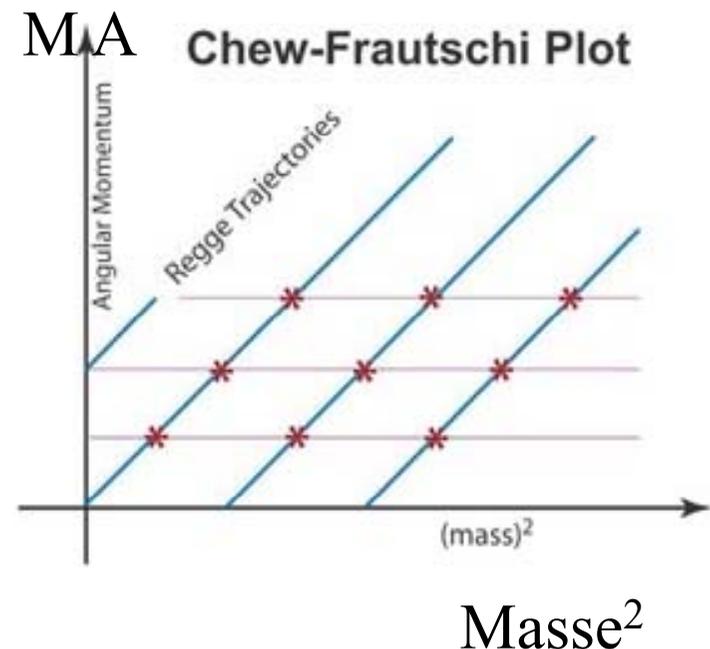
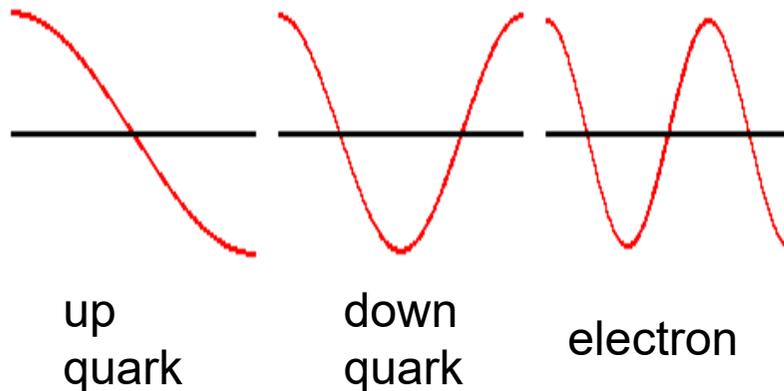
L'entropie des trous noirs est proportionnelle à leur **surface**
Il s'agit de toute l'information contenue dans le volume



La théorie des cordes recyclée

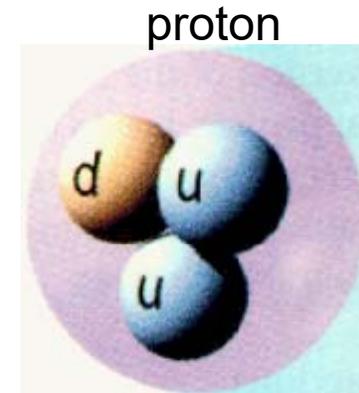
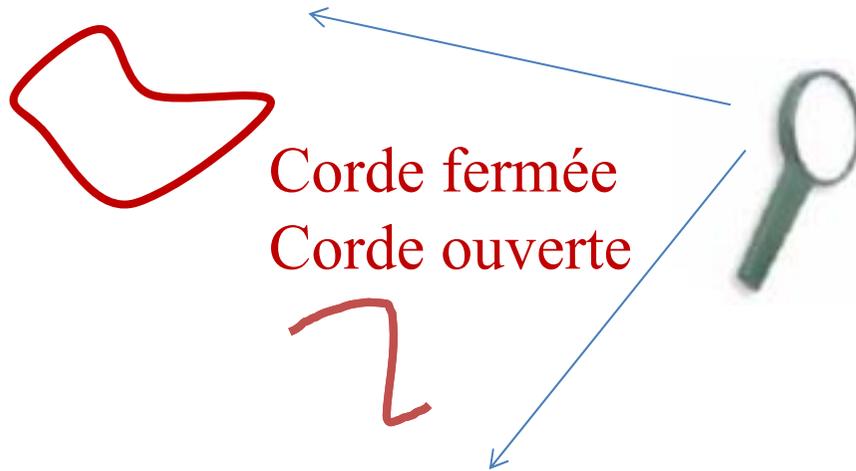
- Au départ (1960-70) la théorie des cordes a été inventée pour rendre compte de la floraison de nouvelles particules découvertes, hadrons, mésons
- Il semblait que leur masse croissait comme le moment angulaire, résonances
- → particules comme des oscillations de la corde

Différentes Vibrations →
Différentes Particules



Les cordes: à quelle échelle ?

- Echelle de Planck: 10^{-35}m



• Particule 10^{-18}m
Échelle nucléaire

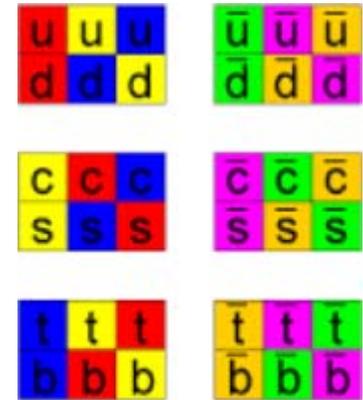
- Masse m
- Spin J
- Charge q

- Energie de vibration
- Moment angulaire intrinsèque
- Moment dans la 5^{ème} dimension

Résoud le problème des divergences à petite échelle,
exemple du rayon classique de l'électron $e^2/r \sim m_e c^2$ $r_e \sim 3 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
Théorie de **renormalisation** (termes infinis compensant les infinis)₃₁

Les quarks du modèle standard

- Trois quarks pour les **hadrons**, deux quarks pour les **mésons** qui sont des combinaisons d'un nombre pair de quarks (q, anti-q), donc des bosons
- Les charges électriques $-1/3e$, $2/3e$
- Un autre nbre quantique: 3 couleurs, **Bleu**, **Rouge**, **Vert**
- Chromodynamique Quantique **QCD**, basée sur la symétrie SU(3)
- Représente parfaitement toutes les possibilités!
- U(1) le photon comme boson de jauge
- SU(2) 3 bosons, W° , Z^\pm SU(3) 8 gluons



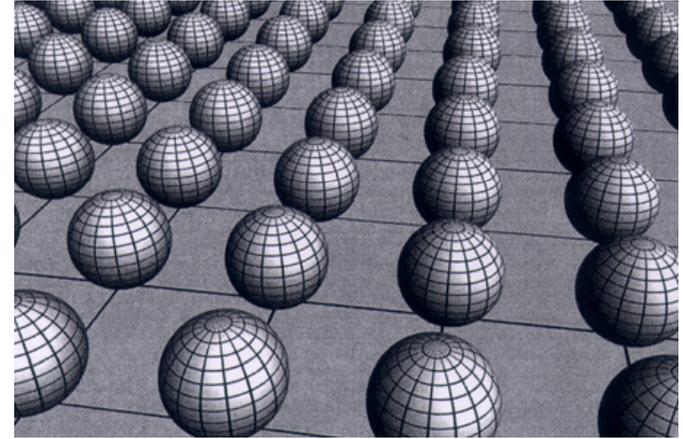
- → principale utilité des cordes: **gravité quantique**

$m=0$, spin 2 fait toujours partie du spectre d'une corde fermée

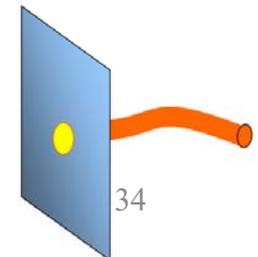
(de même qu'il existe toujours des photons, et donc l'électromagnétisme est inclus)

		Particules de matière (fermions)			Particules d'interactions	boson de masse
		I	II	III		
QUARKS	2.4 MeV +2/3 1/2 u up	1.27 GeV +2/3 1/2 c charm	171.2 GeV +2/3 1/2 t top	0 0 1 γ photon	125 GeV 0 0 H boson de Higgs	
	4.8 MeV -1/3 1/2 d down	104 GeV -1/3 1/2 s strange	4.2 GeV -1/3 1/2 b bottom	0 0 1 g gluon		
LEPTONS	<2.2 eV 0 1/2 ν_e neutrino électronique	<0.17 MeV 0 1/2 ν_μ neutrino muonique	<15.5 MeV 0 1/2 ν_τ neutrino tauique	91.2 GeV 0 1 Z⁰ boson Z	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg); font-weight: bold; margin-right: 10px;">BOSONS DE JAUGE</div> <div style="text-align: center;"> <p>nom</p> <p>spin</p> <p>charge électrique</p> <p>masse</p> <p>symbole</p> </div> </div>	
	511 KeV -1 1/2 e électron	105.7 MeV -1 1/2 μ muon	1.777 GeV -1 1/2 τ tau	80.4 GeV ±1 1 W[±] bosons W		125 GeV 0 0 H boson H

Théories des cordes

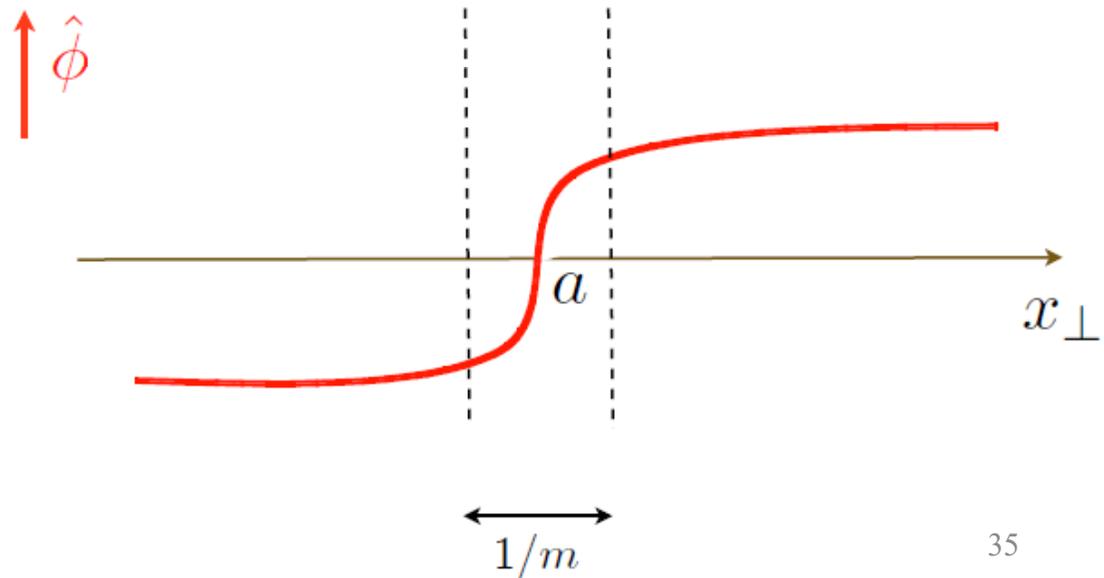
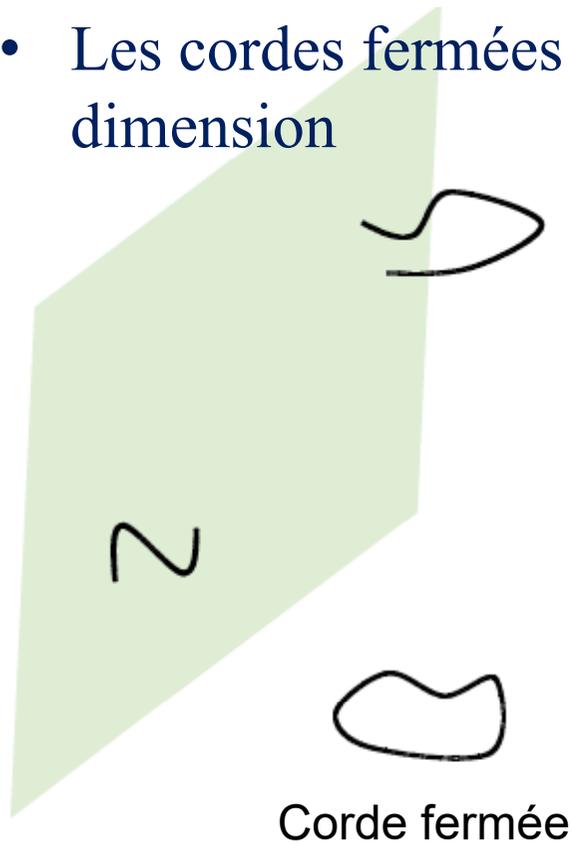


- 1^{er} essai de quantification des cordes:
Lagrangien, après renormalisation, $D=26$
- *Existe encore des tachions (instabilités)*, traite seulement **les bosons**
- Pour inclure **les fermions**, il faut supposer la **supersymétrie**
- → **supercordes** (années 1980), $D=10$ (tachyons supprimés)
- **1995: M-théorie**: Unifie les 5 théories des cordes, avec 10 dim
- 6 de ces dimensions étant compactifiées et inaccessibles
- aussi « p-branes » ou membranes à p dimensions spatiales,
 p pouvant exister entre 0 et 9



Les D-branes comme des solitons

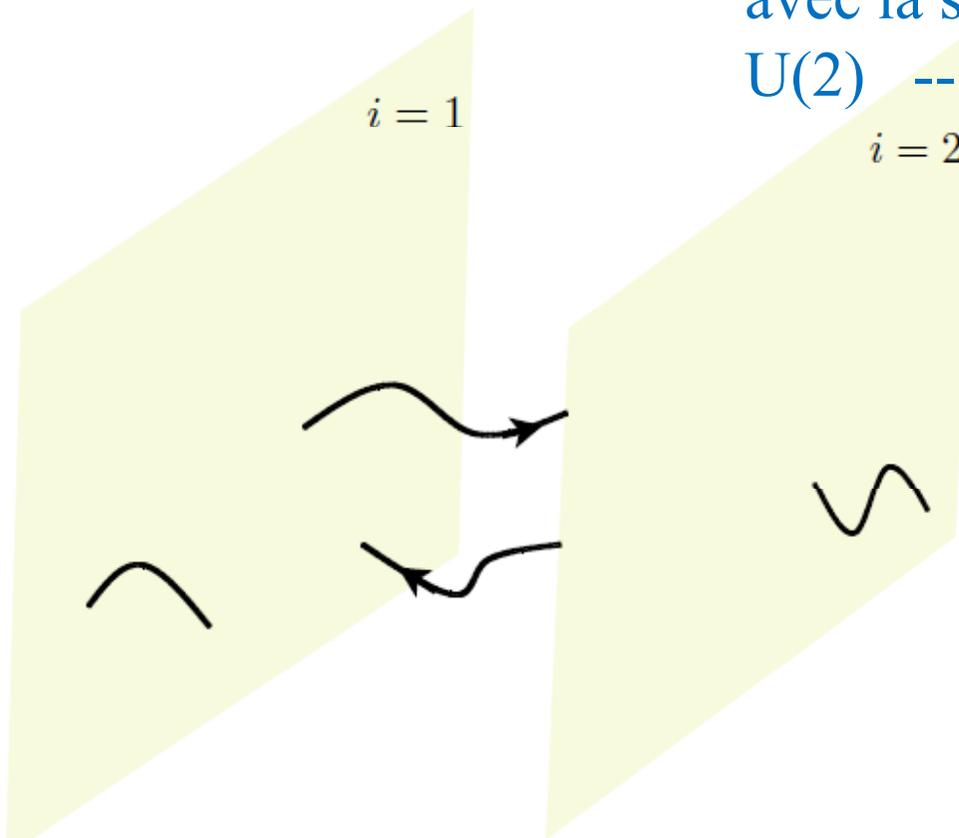
- Les branes de dimension $sd-1$, dans un espace à d dimensions sont représentées par des solitons (D comme Dirichlet: conditions aux bords imposées à la corde)
- Ce sont des surfaces où peuvent prendre appui les cordes ouvertes
- Les cordes fermées sont dans le « bulk » l'ensemble de plus grande dimension



4 types de cordes, 2 D-branes

- Les cordes ont une direction: de D1 à D2 ou l'inverse
- Soit les cordes sont entièrement sur la brane, repérées par des matrices (4 coordonnées sur chaque brane)

Ces cordes à basse énergie interagissent avec la symétrie d'un champ de Yang-Mills $U(2) \dots U(N)$ avec N branes \rightarrow dualité



Seule extension possible
Supergravité à 11 dimensions

Toutes les théories de cordes
ont une particule \sim graviton
($m=0$, $spin=2$)

Cordes: bon candidat pour la gravité quantique

- On ne peut pas utiliser la théorie des champs, à cause de la **non-renormalisabilité**
- Mais les cordes ont une taille minimale $l_s^2 = h c / T_s$, où T_s est la tension de la corde
- Cette taille minimale est compatible avec l'invariance de Lorentz
- Les calculs d'interaction entre cordes doivent se faire dans l'espace ordinaire augmenté de la variété à 6D, que ce soit l'espace D=10 des supercordes ou **D=11 de la supergravité**
- Il y a équivalence ou dualité entre la théorie-M et la théorie dans l'espace plat D=11 de la supergravité (*Cremmer, Julia, Scherk, 1978*)

Gravitino (spin 3/2) = Supersymétrie du graviton

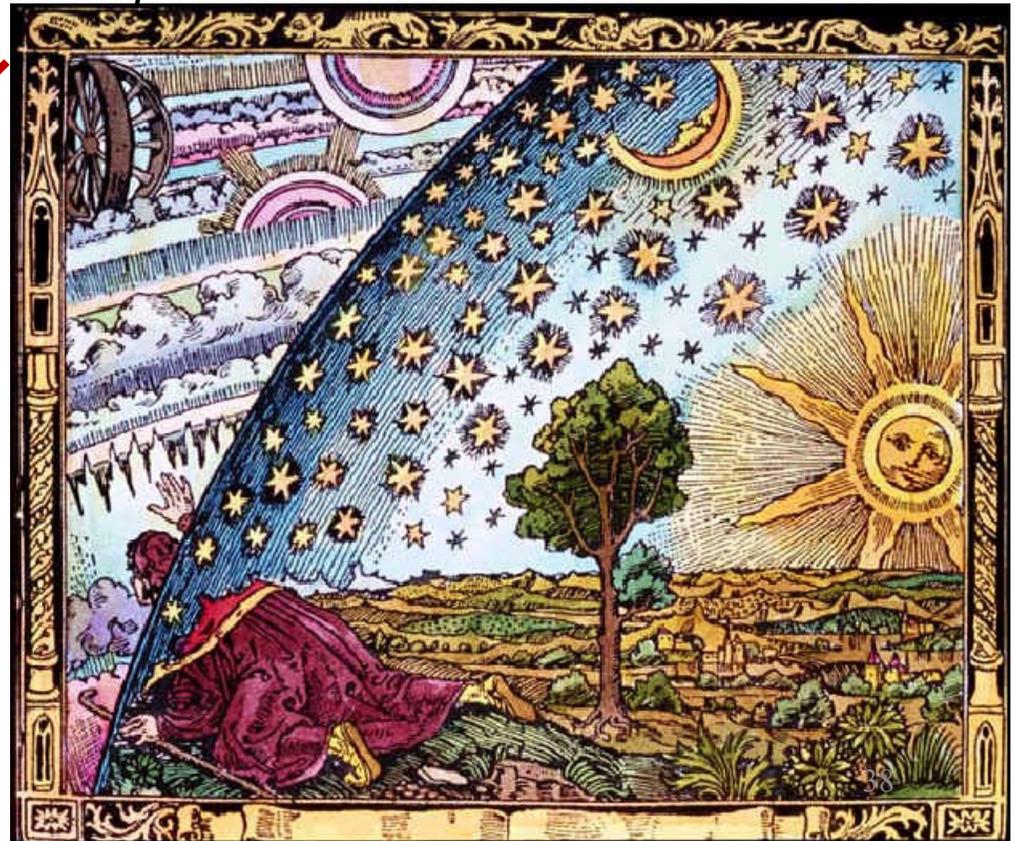
Gravité et cordes fermées

- Les particules sont composées de cordes ouvertes, dont les extrémités sont **fixées** à une D3-brane
- Les **gravitons**, médiateurs de la force de gravitation, sont des vibrations de cordes fermées, qui peuvent sortir de cet espace

Impossible de sortir
perpendiculairement à la réalité

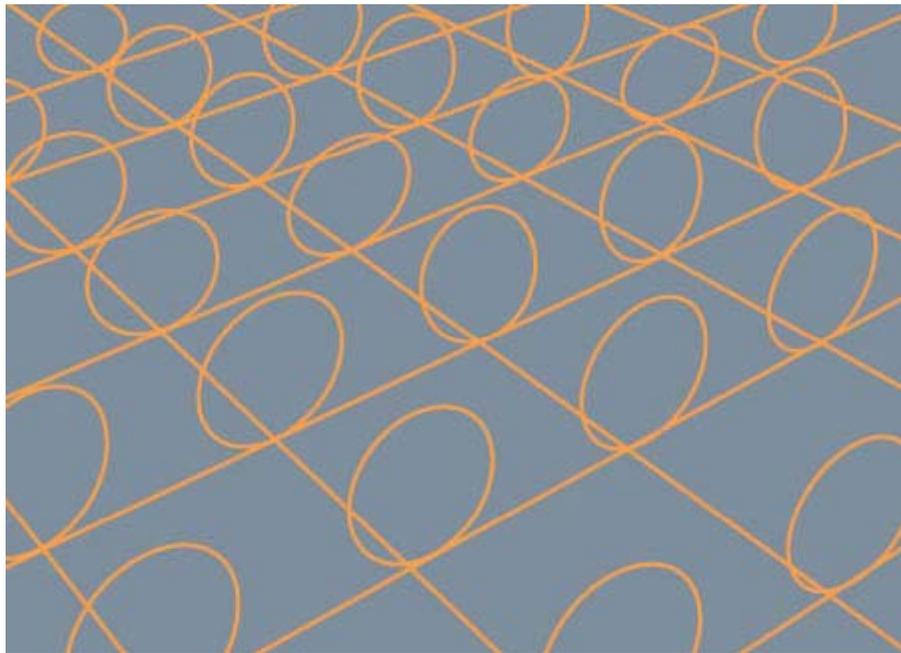
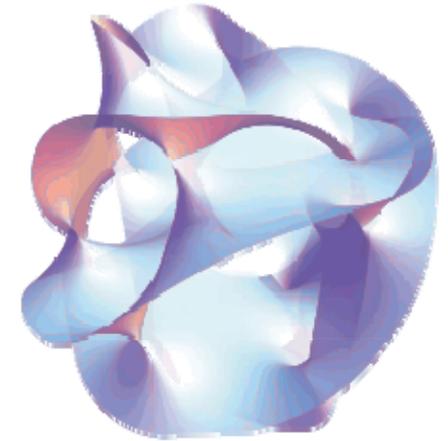


Sphère des fixes- Camille Flammarion

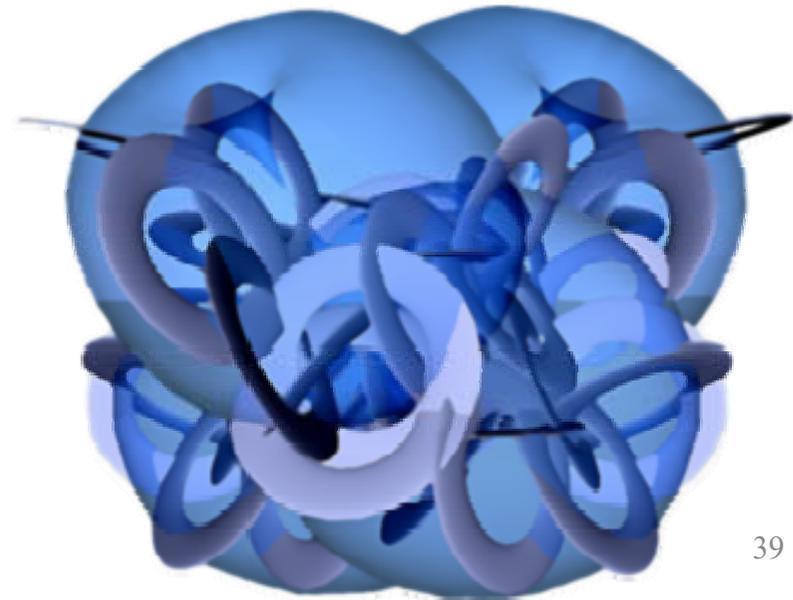


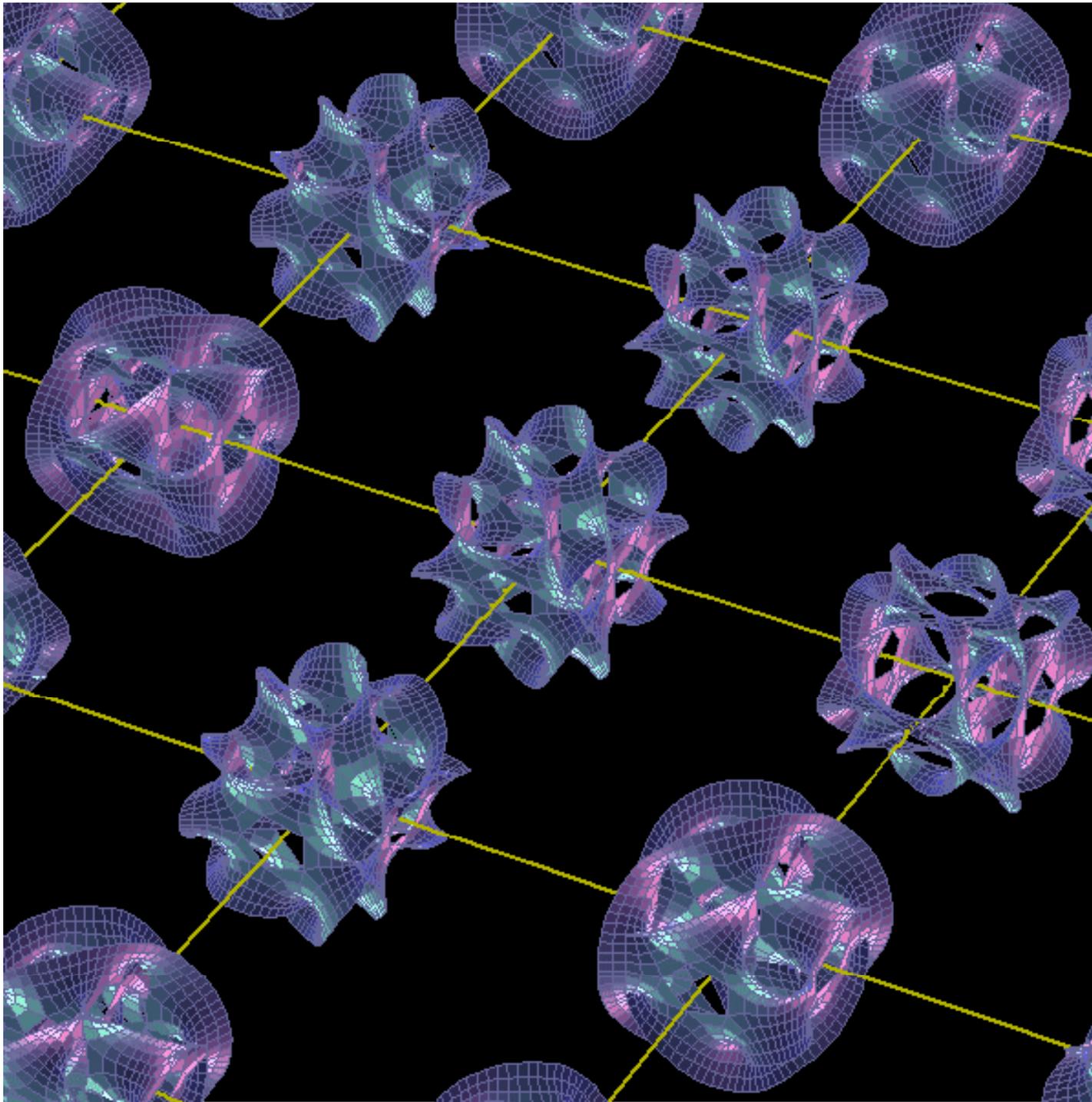
Où sont les autres dimensions?

- Pour les modèles simples, à 5D (Kaluza-Klein) 1 dimension supplémentaire, la 5ème dimension est compacte, enroulée sur une échelle de Planck



Pour les espaces à $D=10$ (M-théorie, supercordes), les 6 dim supplémentaires sont enroulées dans un espace de **Calabi-Yau**

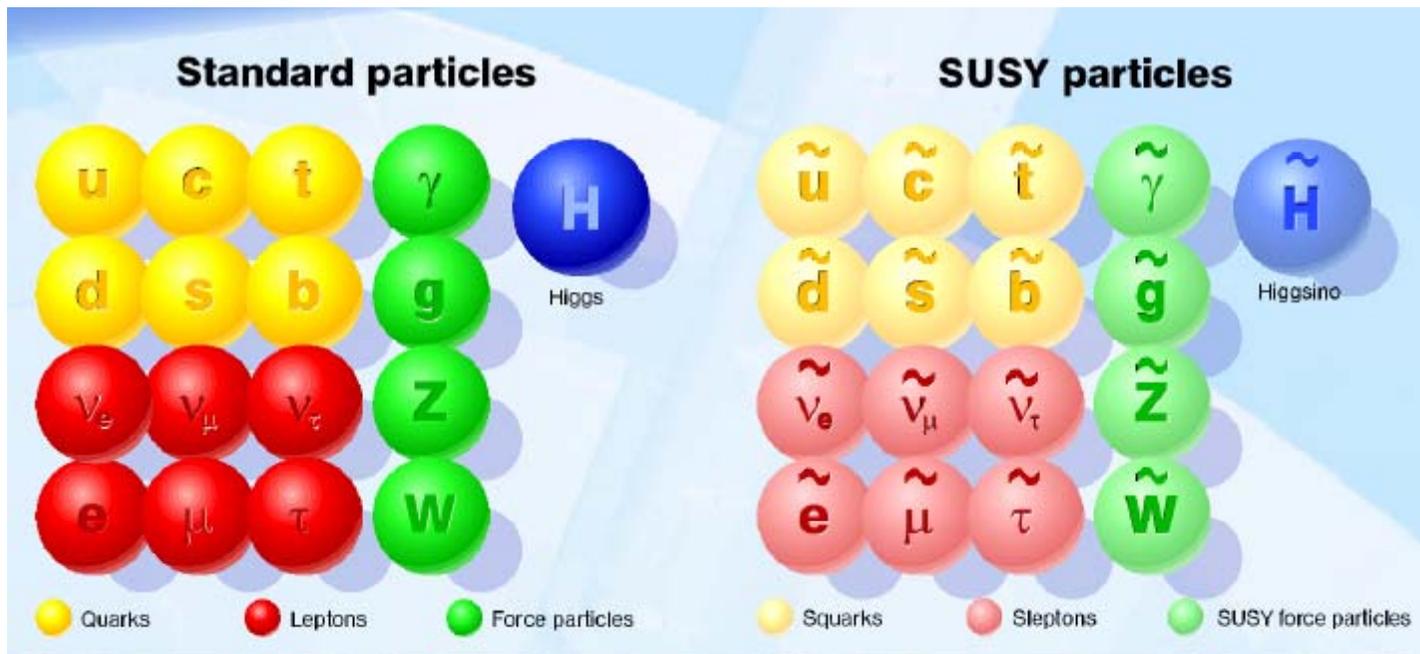




Calabi-Yau

Supergravité (SUGRA)

- **Super-symétrie + gravité = Supergravité**
- Equivalent des supercordes à basse énergie
- Le graviton ($m=0$, $spin=2$) a un super-symétrique le gravitino ($m=0$, $spin= 3/2$)



A ce jour, aucune particule élémentaire de spin élevé n'a été observée
Développements récents (Vasiliev, 2000-03)

Recherches au LHC

- **SUSY est brisée par la gravité**

Origine de la
Super-symétrie
brisée
Secteur caché

Interaction unifiée

Modèle MSSM
Secteur visible

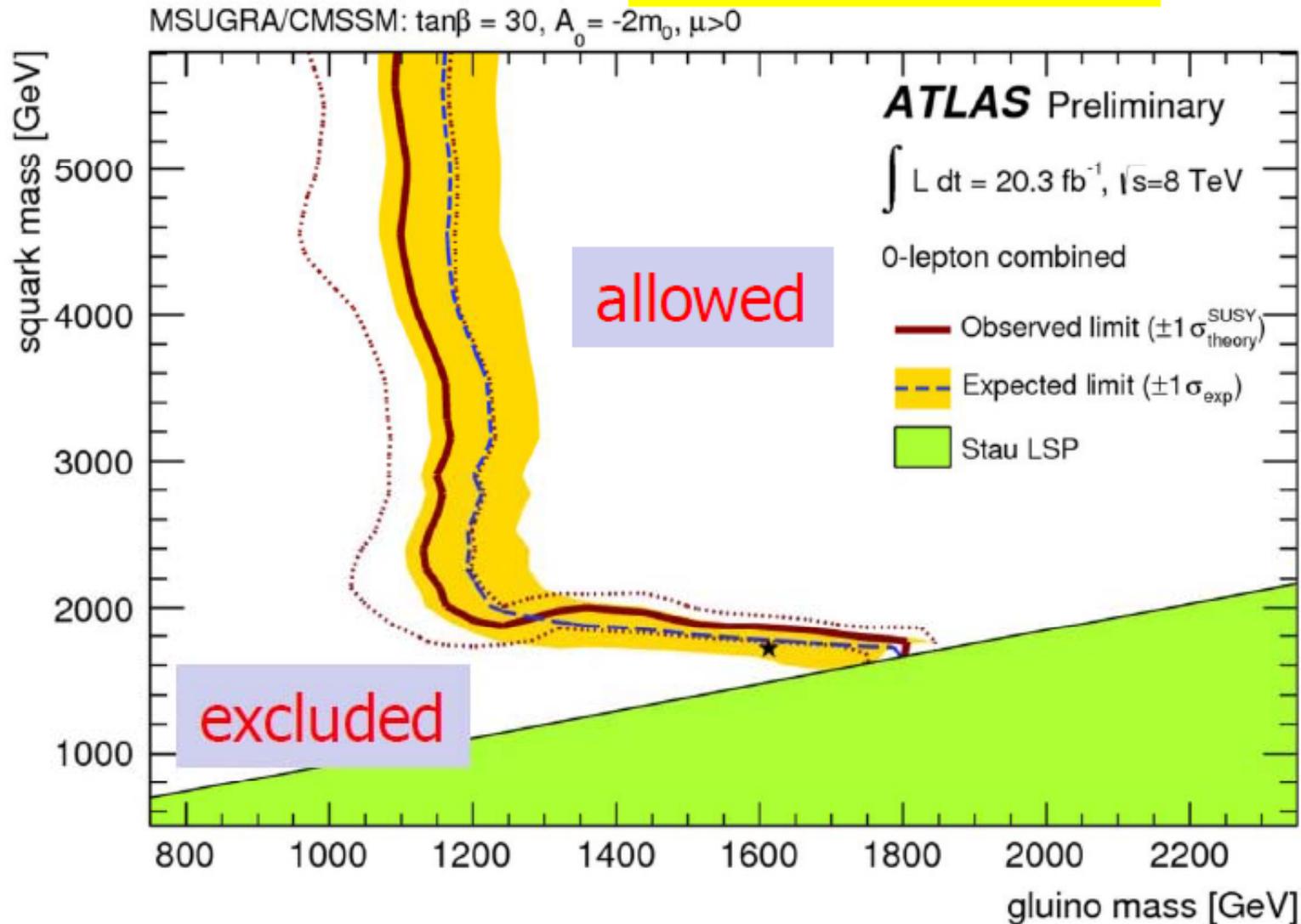
En 2015, LHC opérationnel à 14 TeV

Proton → ← Proton



Super-symétrie: contraintes du LHC

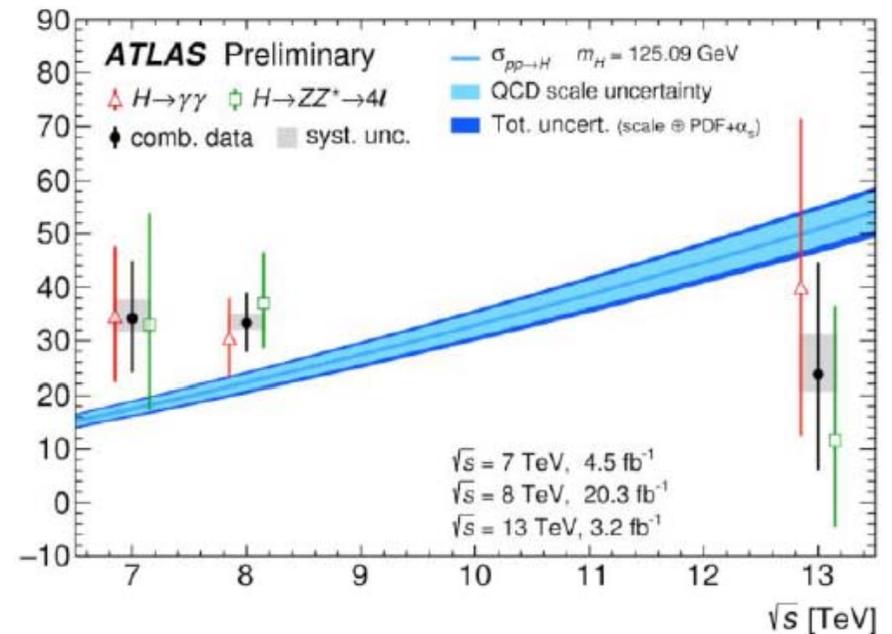
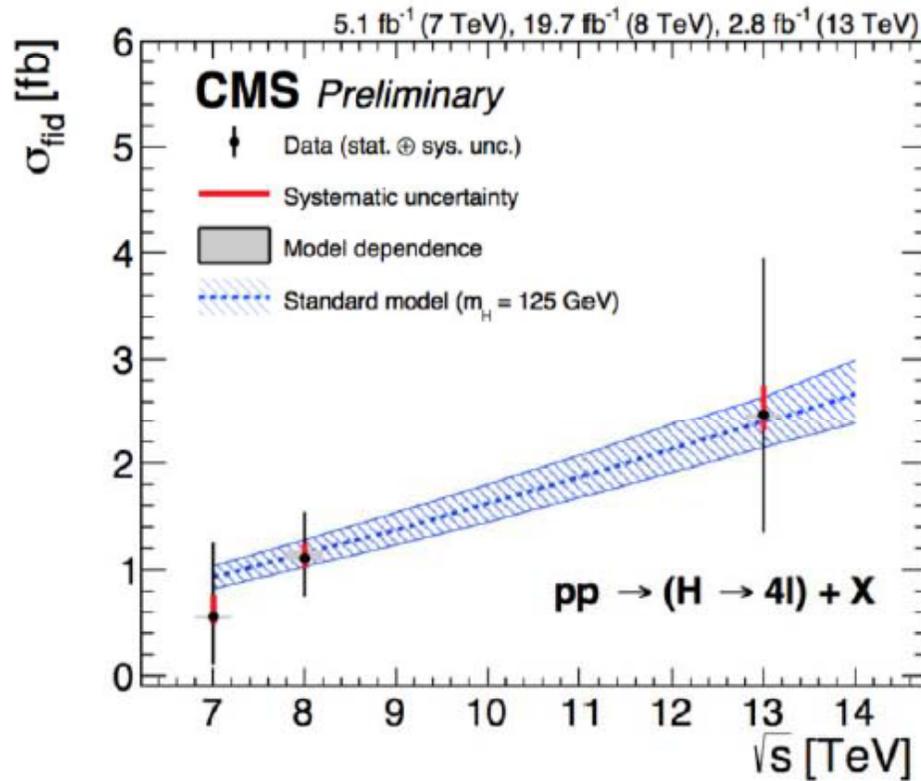
Aucune nouvelle particule jusqu'à 8 TeV à 3σ



Run I

Résultats compatibles avec le SM

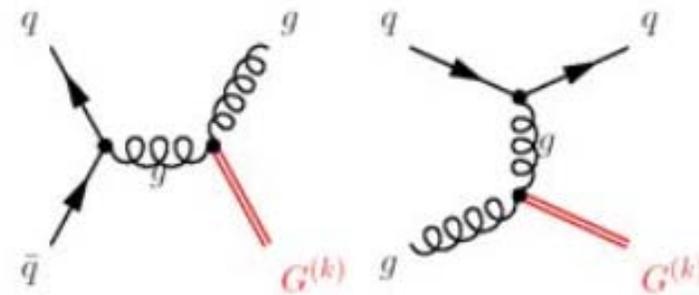
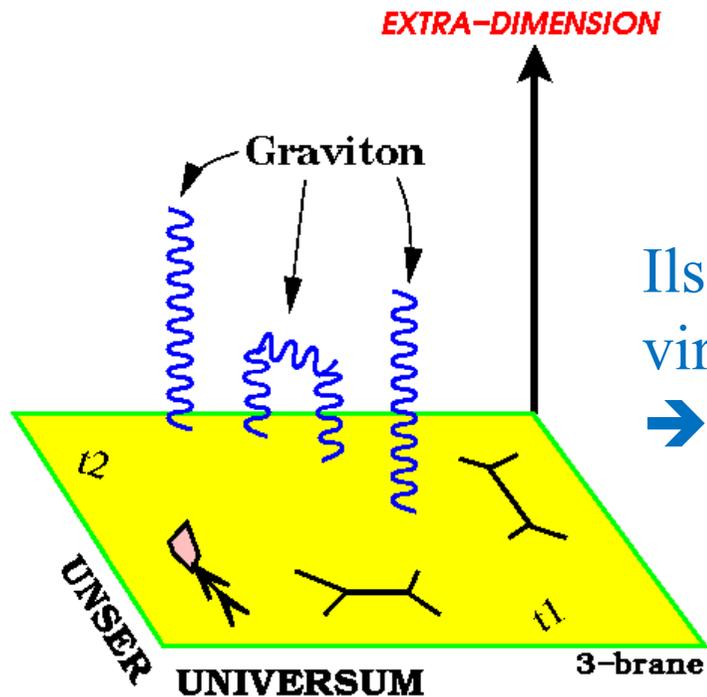
- Aucun signe de particule super-symétrique
- Gluino et stop sur Atlas



Dimensions supplémentaires

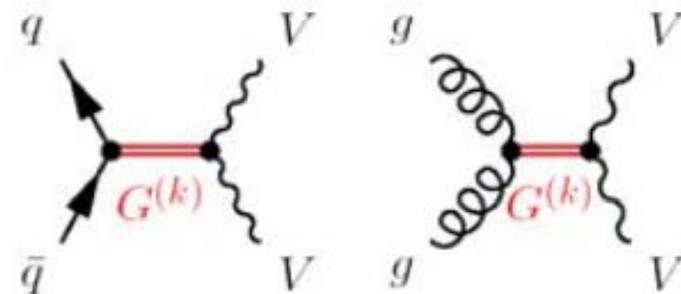
Les gravitons s'échappent dans une autre dimension

Au LHC, on devrait s'en apercevoir par une **énergie manquante**



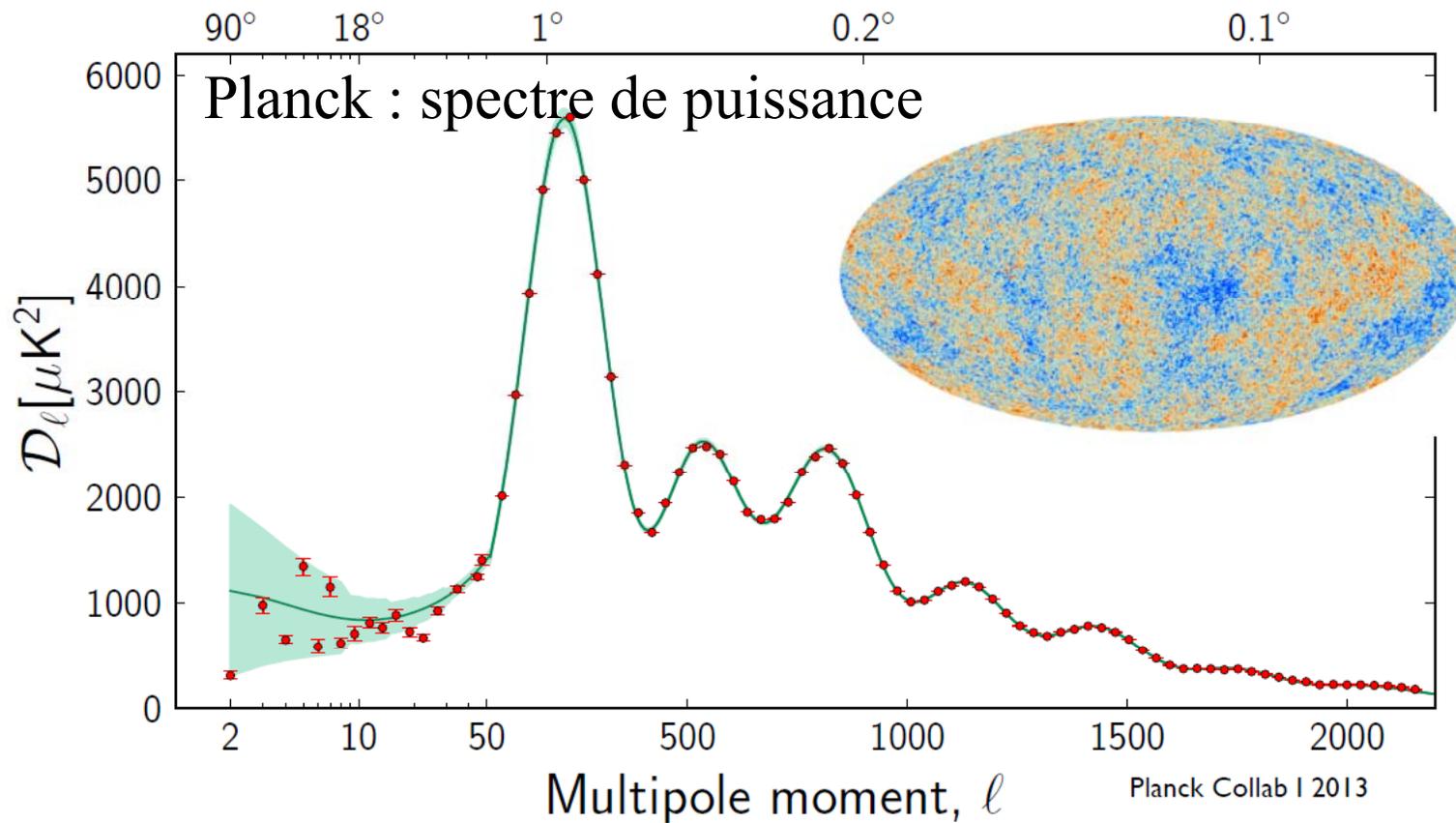
Ils pourraient aussi rester à l'état de particules virtuelles

→ Être observés comme des **résonances**



Information dans le fonds micro-onde

Ω_b	0.02230 ± 0.00014
Ω_m	0.3089 ± 0.0062
Ω_Λ	0.6911 ± 0.0062
σ_8	0.8159 ± 0.0086
n_s	0.9667 ± 0.004
H_0	67.74 ± 0.46
τ	0.056 ± 0.01



$T=13,8$ Gyr

Ω_b , Ω_m , position du pic \rightarrow platitude - Amplitude σ_8 (à $8\text{Mpc}/h$)

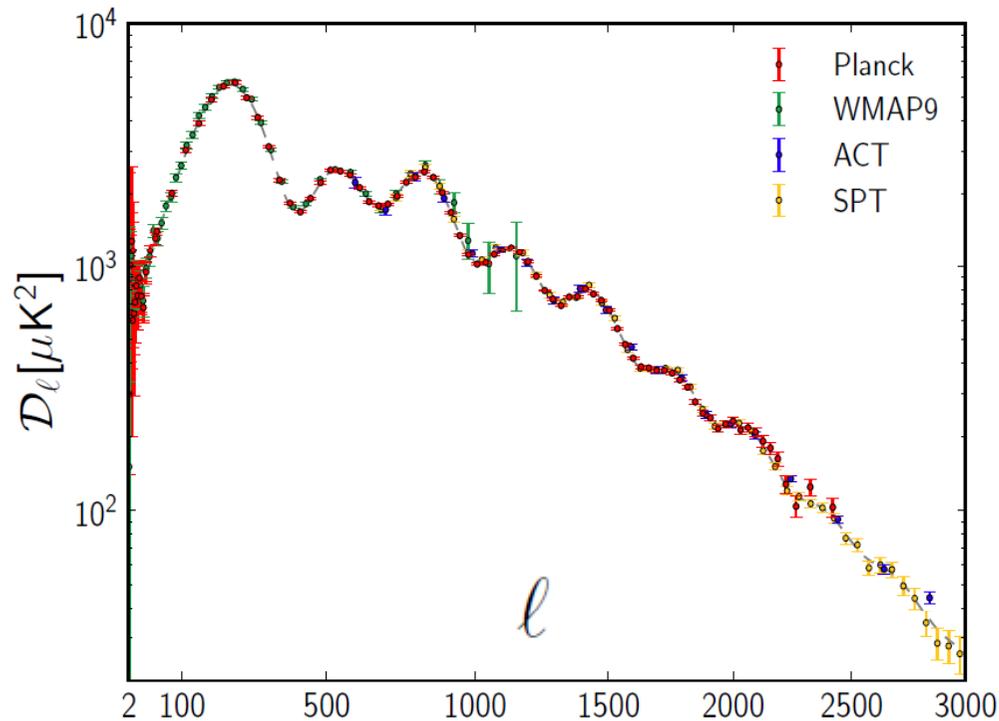
Radiation sombre

- S'il existe des **champs scalaires ou vectoriels** supplémentaires, ils pourraient se manifester au début de l'Univers (axions, quintessence)
- Le nombre de degrés de liberté en particules relativistes au début de l'Univers est quantifiée par N_{eff}
- Ce nombre est contraint par le fond micro-onde $N_{\text{eff}} \sim 3.06$
Neff défini par la densité d'énergie $\rho = \rho_\gamma [1 + N_{\text{eff}} \frac{7}{8} (\frac{4}{11})^{4/3}]$

- Il comptabilise les neutrinos actifs, très légers, la série de neutrinos connue est chirale-gauche (+ asymétrie leptonique?)

Il pourrait exister une série parallèle chirale-droite des neutrinos dits « stériles », inertes par l'interaction faible plus massifs

Anisotropies aux petites échelles



Petites échelles avec ACT
Atacama Cosmology Tel
(*Das et al 13, Sherwin et al 16*)

et Telescope du Pole Sud
SPT (*Story et al 2012*)

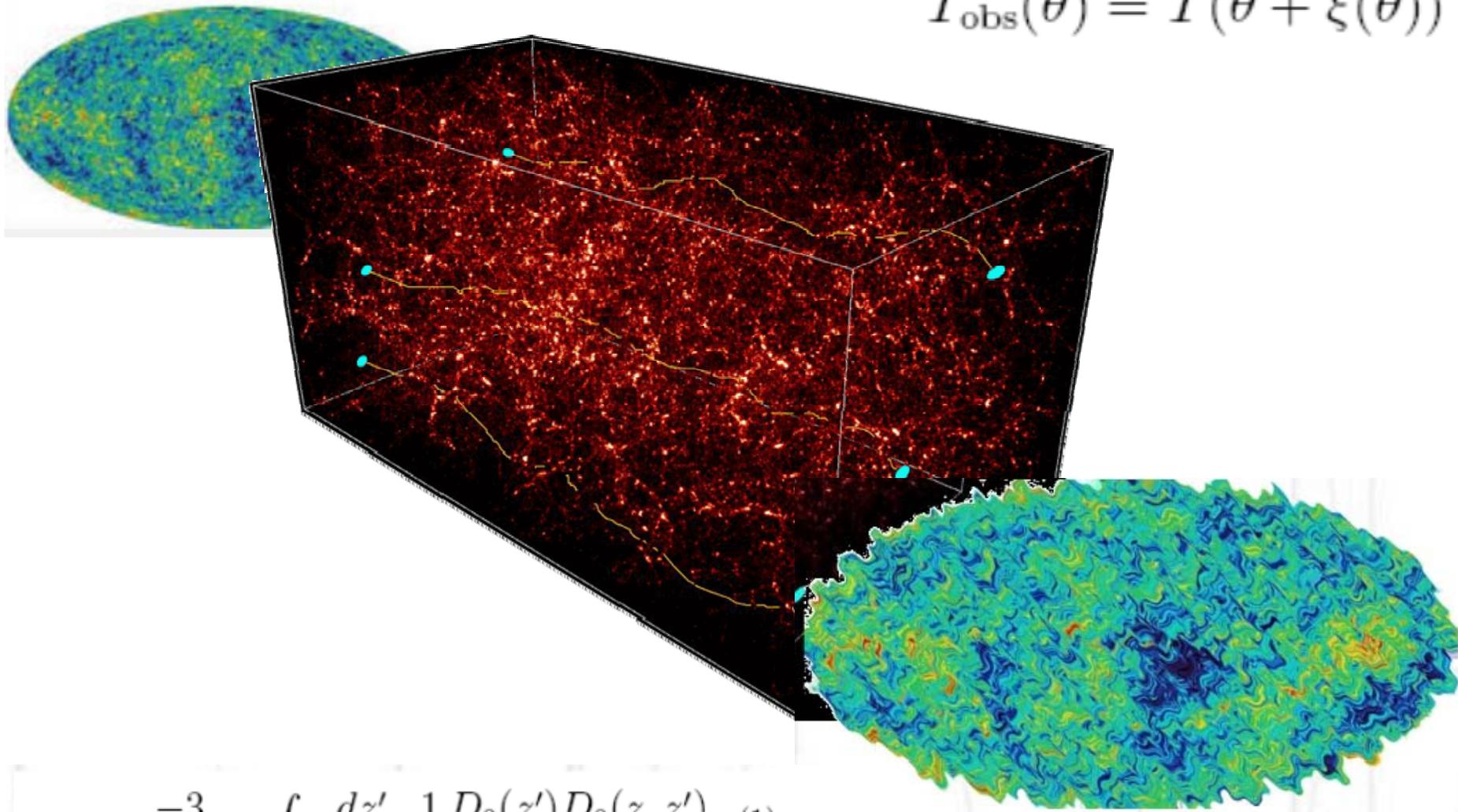
Pas de détection f_{nl} (non
Gaussianité)

Pente du spectre, ns, pas tout à fait invariant d'échelle
 $ns = 0.960 \pm 0.0070 \rightarrow$ inflation

$z(\text{reion}) = 11-7$ épaisseur optique $\tau = 0.058$

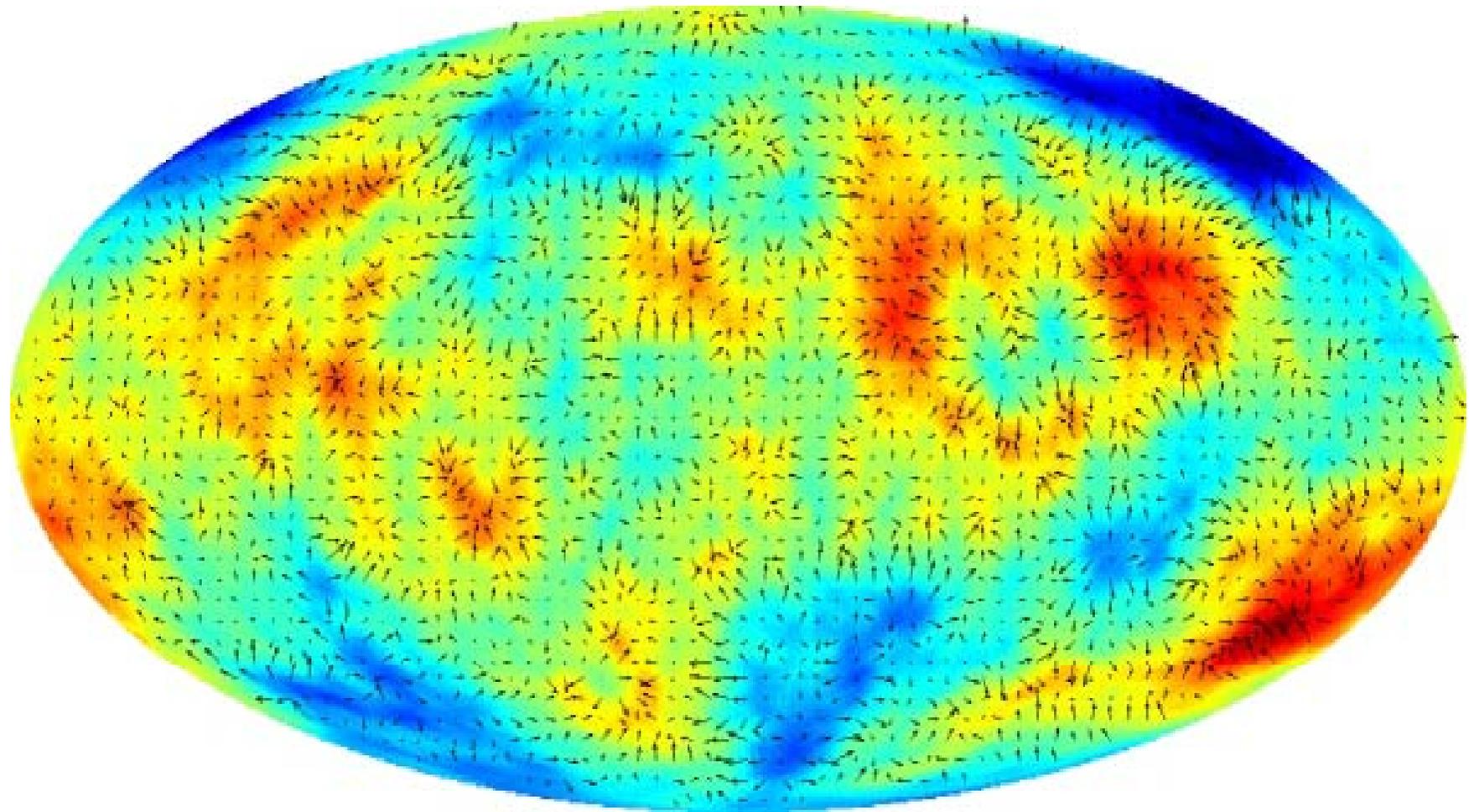
Fonds microonde dévié par les lentilles

$$T_{\text{obs}}(\theta) = T(\theta + \xi(\theta))$$



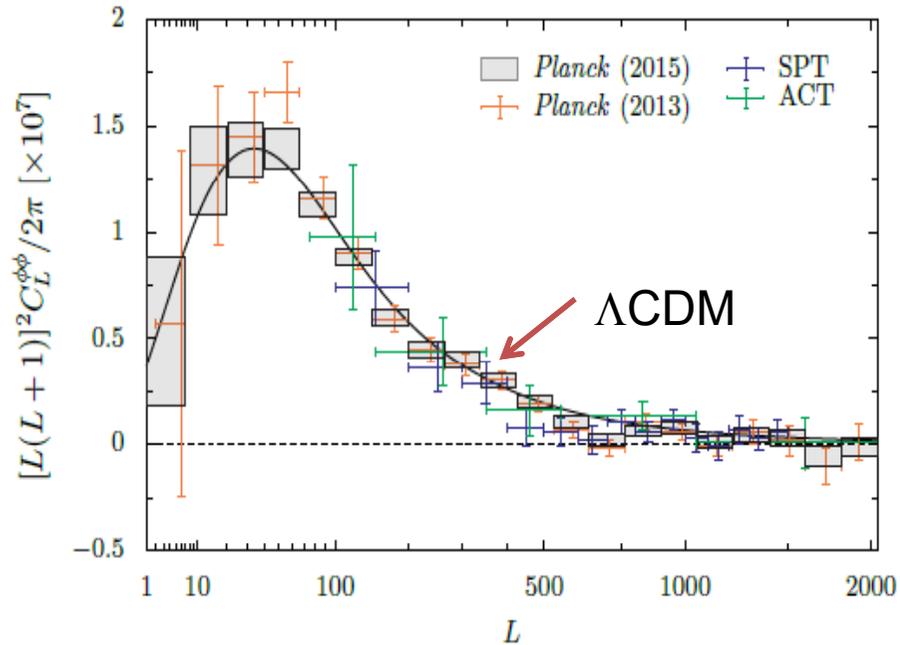
$$\xi_i(\theta) = \frac{-3}{2} \Omega_0 \int \frac{dz'}{H(z')} \frac{1}{a} \frac{D_0(z') D_0(z, z')}{D_0(z)} \varphi_{,i}^{(1)}(\theta, z)$$

Calcul des déflexions, corrélation avec les cartes du ciel



LensPix sky simulation code:
Lewis 2005

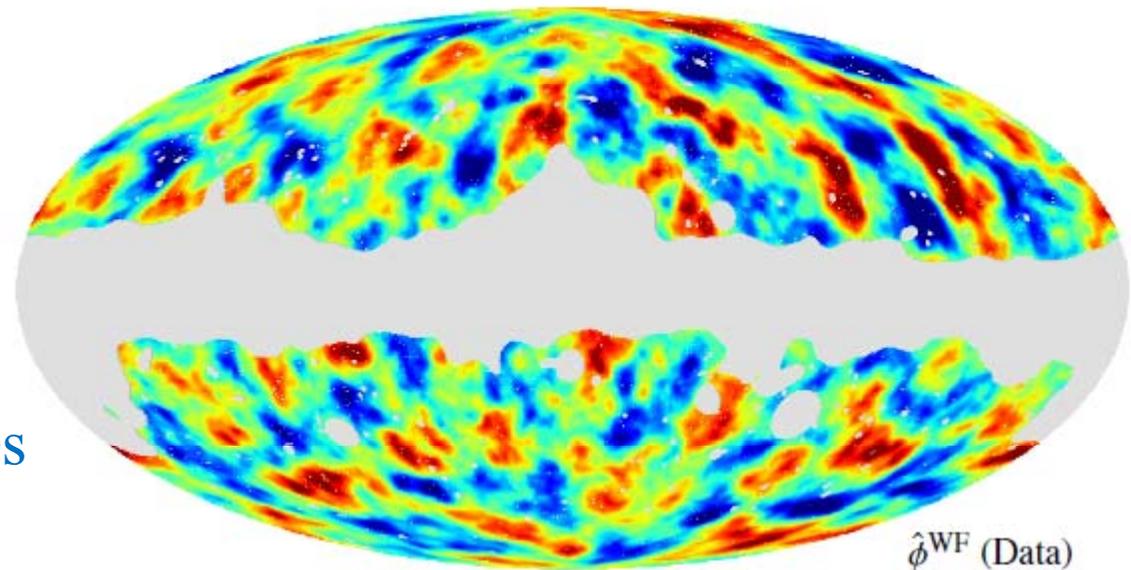
Lentilles et CMB

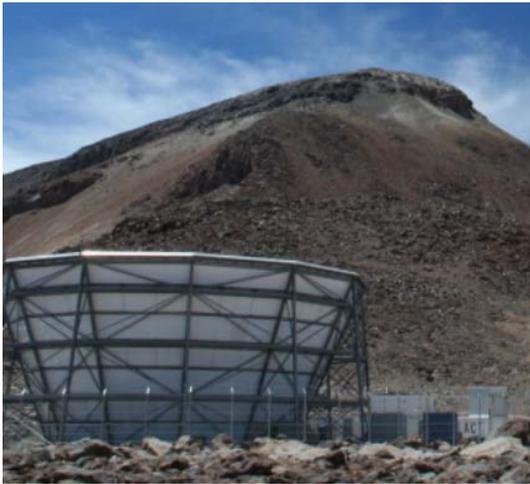


Spectre de puissance du potentiel des lentilles, et carte sur le ciel (*MV minimum variance*)

Mesure de la courbure
Contrainte Amplitude σ_8

Corrélation avec les structures
à grande échelle
le long de la ligne de visée

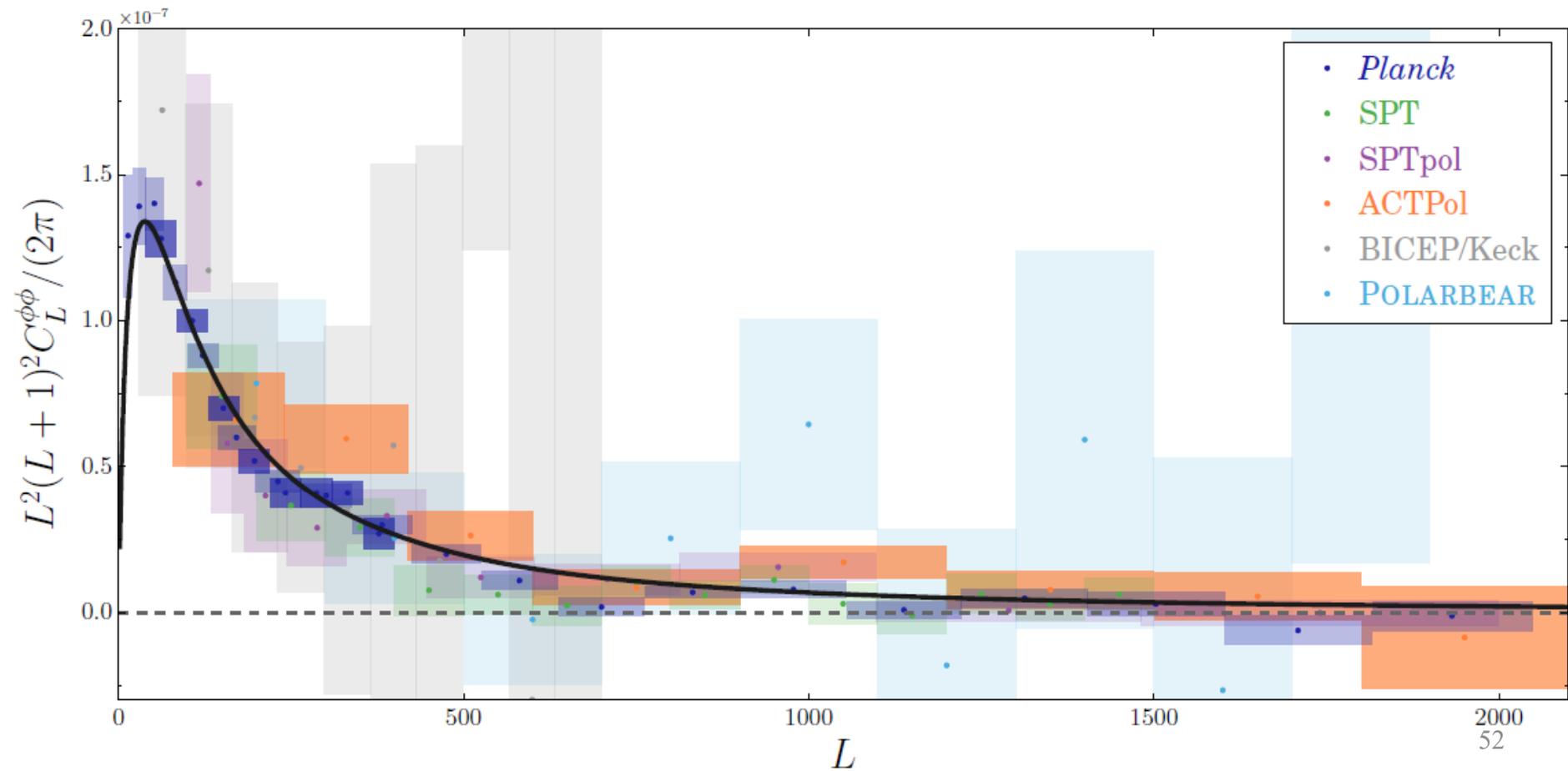




Lentilles et CMB

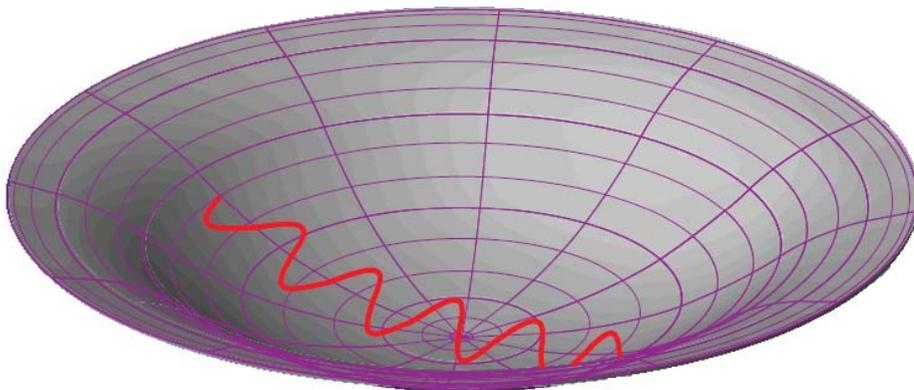
Sherwin et al 2016

ACT Atacama Cosmology Telescope
6m Résolution 1 arcmin



Effet Sachs-Wolfe intégré

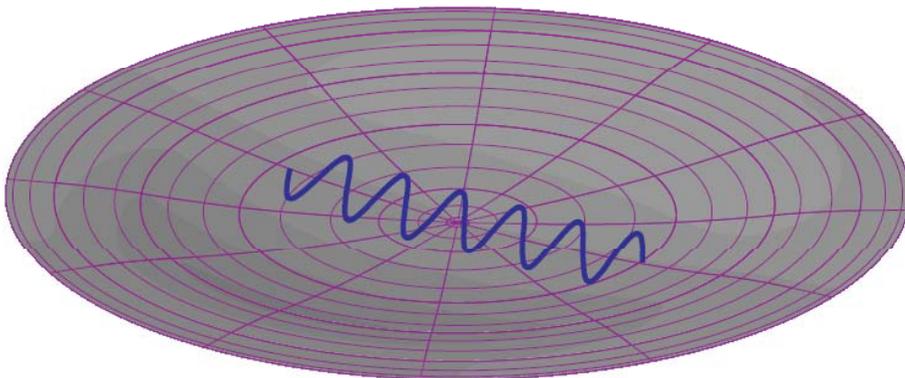
- Les photons gagnent de l'énergie en tombant → λ vers le bleu
- Puis reperdent de l'énergie en remontant → λ vers le rouge



Si le potentiel réduit sa profondeur pendant le temps de parcours des photons

→ Ils ressortent plus bleus

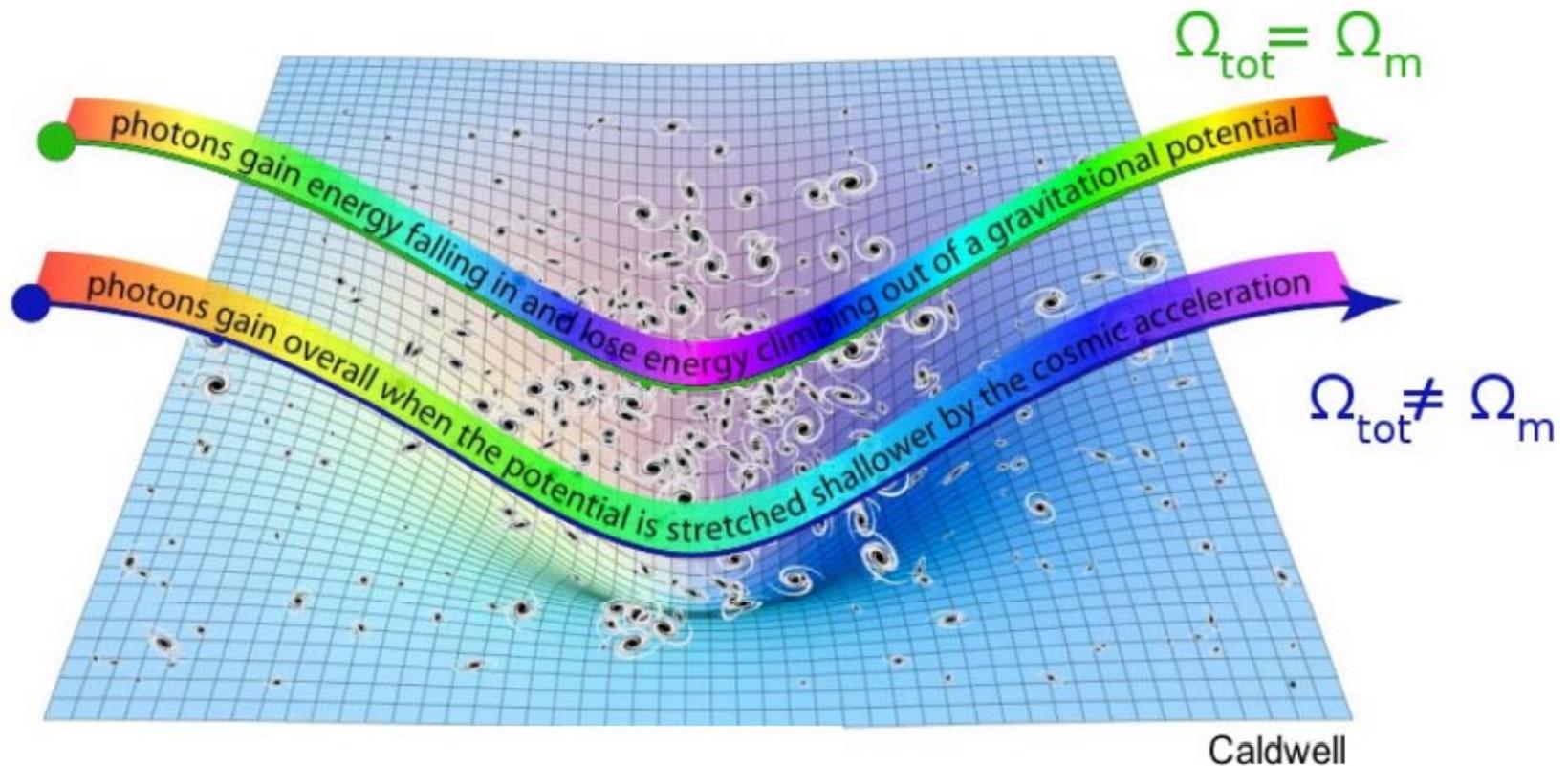
→ Si $\Lambda=0$, ils ressortent identiques



Pour un univers plat dominé par la matière, les effets se compensent exactement

Effet Sachs-Wolfe intégré

Perte ou gain d'énergie des photons du CMB en traversant les structures



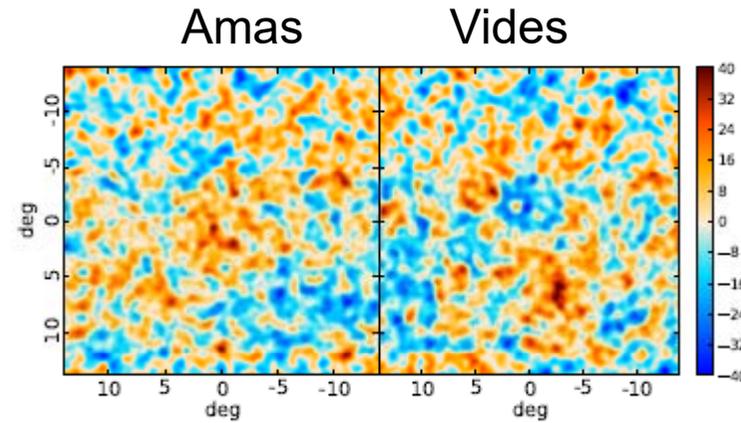
L'amplitude de l'effet: information sur la quantité d'énergie noire à cette époque

Aussi information sur la croissance des structures, et modification de la gravité

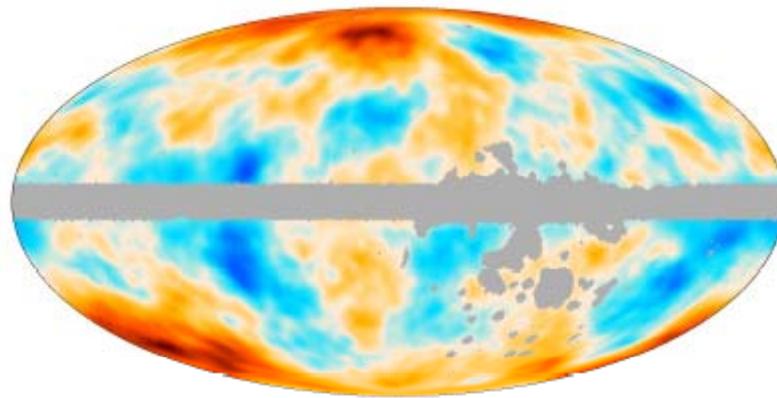
Corrélation Fonds micro-onde -> Structures

Détection à 3σ avec Planck
Empilant super-amas et vides

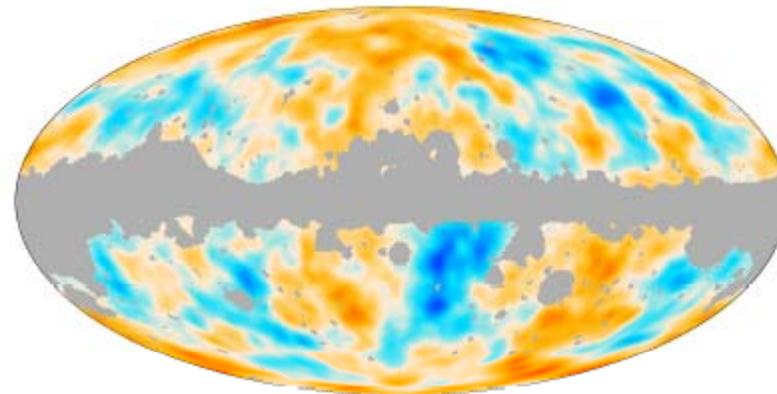
Aussi Granett et al (2008)



NVSS radio sources+CMB



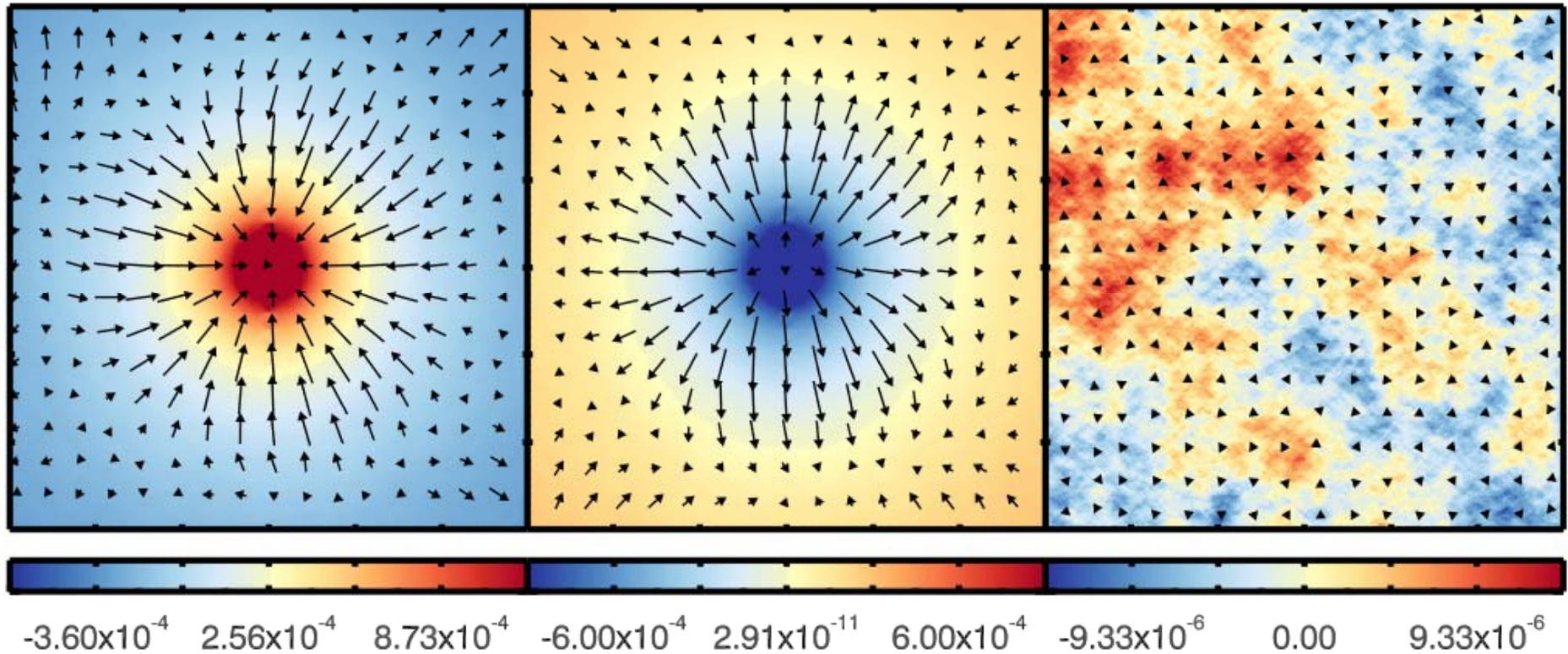
lentilles +CMB



Cartes ISW: Bleu= sous-densités
Rouge= sur-densités

Corrélation avec le fond infrarouge

Le fond infrarouge, dû à la formation d'étoiles dans les galaxies



Sur-densités

Vides

Au hasard

Flèches: déflexions des lentilles gravitationnelles

Résumé

Unification des forces

Particularités pour la gravitation

Existence d'une cinquième force à petite échelle?

Tests du principe de l'équivalence (EP) et de l'universalité de chute libre (UFF)

Essai de théorie quantique

Théorie des cordes recyclée

Description des états quantiques avec D-branes

Théorie holographique

Contraintes du fonds micro-onde

Lentilles, polarisation, corrélation avec les structures