

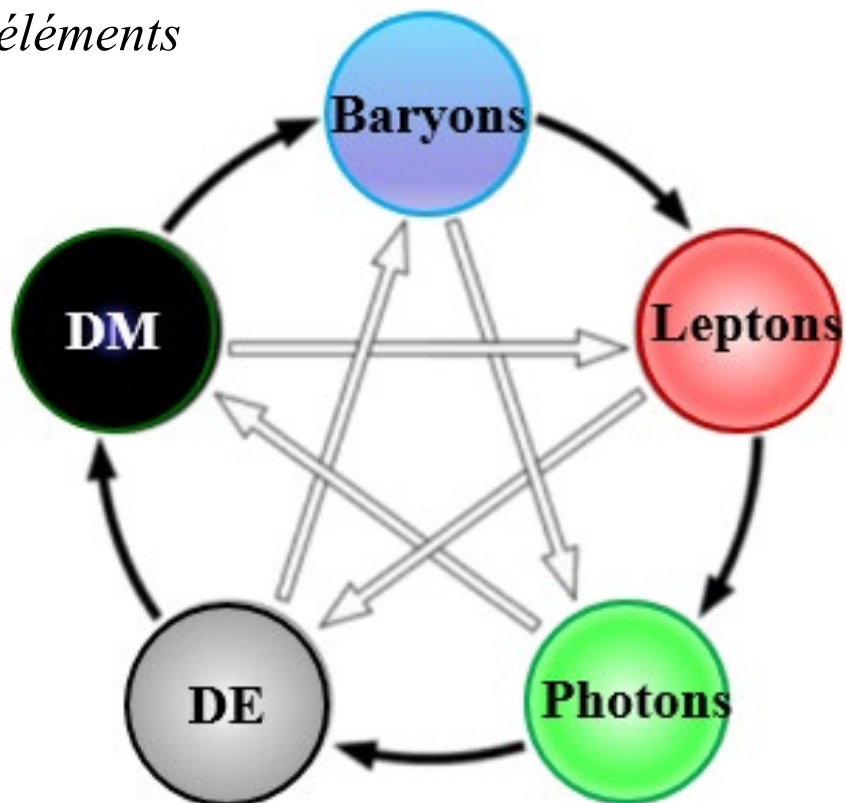


COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

Constante cosmologique ou champs scalaires

Les 5 éléments



Françoise Combes



Observatoire
de Paris

| PSL

Qu'est-ce que l'énergie sombre ?

Elément qui permet d'expliquer l'accélération de l'expansion découverte en 1998, grâce aux SNIa

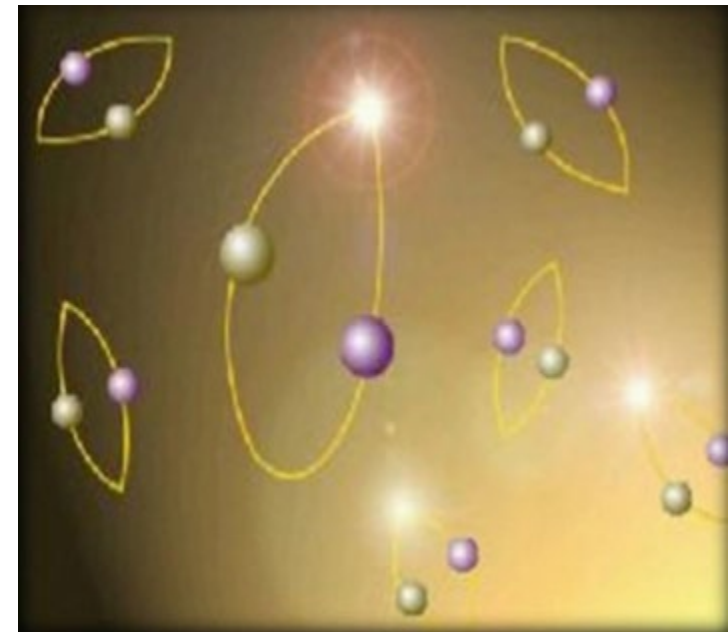
Force répulsive, et non attractive (gravitation)

- n'interagit pas avec le rayonnement
- Une grande pression, négative (\neq matière noire, $P=0$)
- Distribution homogène, ne condense pas avec les structures

- Une constante cosmologique Λ
- Une cinquième force (quintessence)
- Modification de la gravité (GR)

Extrapolation du vide quantique?

→ 10^{120} ρ_{Λ} observé



Les principales solutions

Champ scalaire (cosmon/quintessence)

Analogie avec inflaton, symétries

avec Equation d'état $P = w \rho$ $w < -1/3$

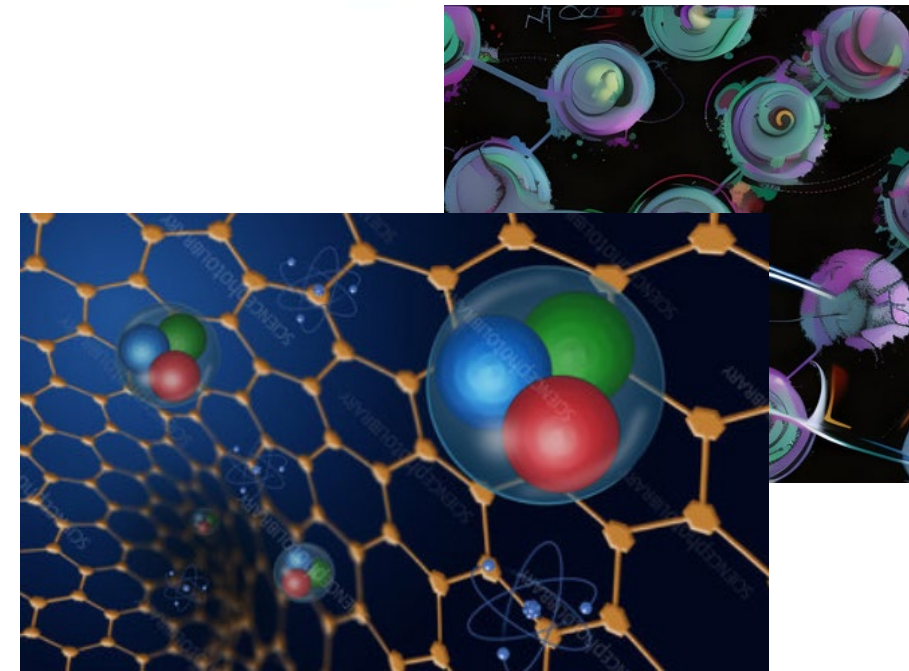
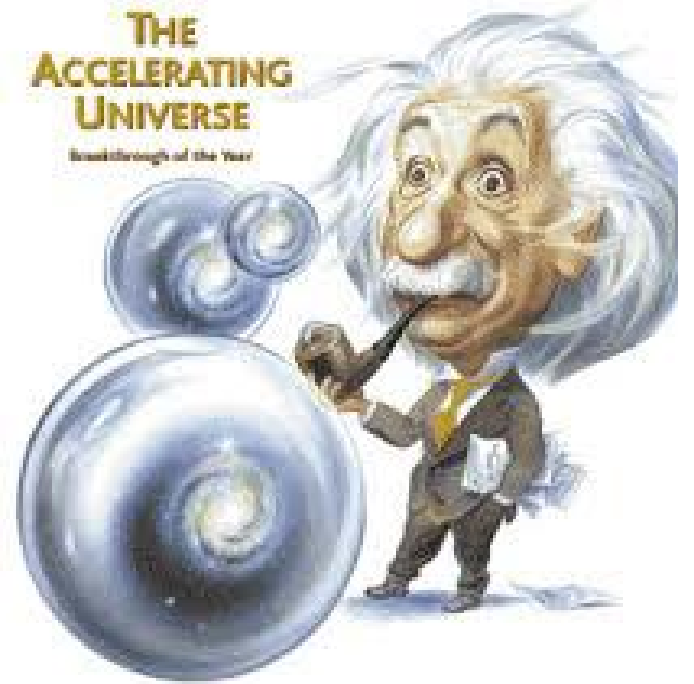
Divers modèles de quintessence, Cosmon,
K-essence, caméléons, les Galiléons

Autres modèles, fluides, couplant avec matière noire

Gaz de Chaplygin (avec Tachyons)

Gravité modifiée

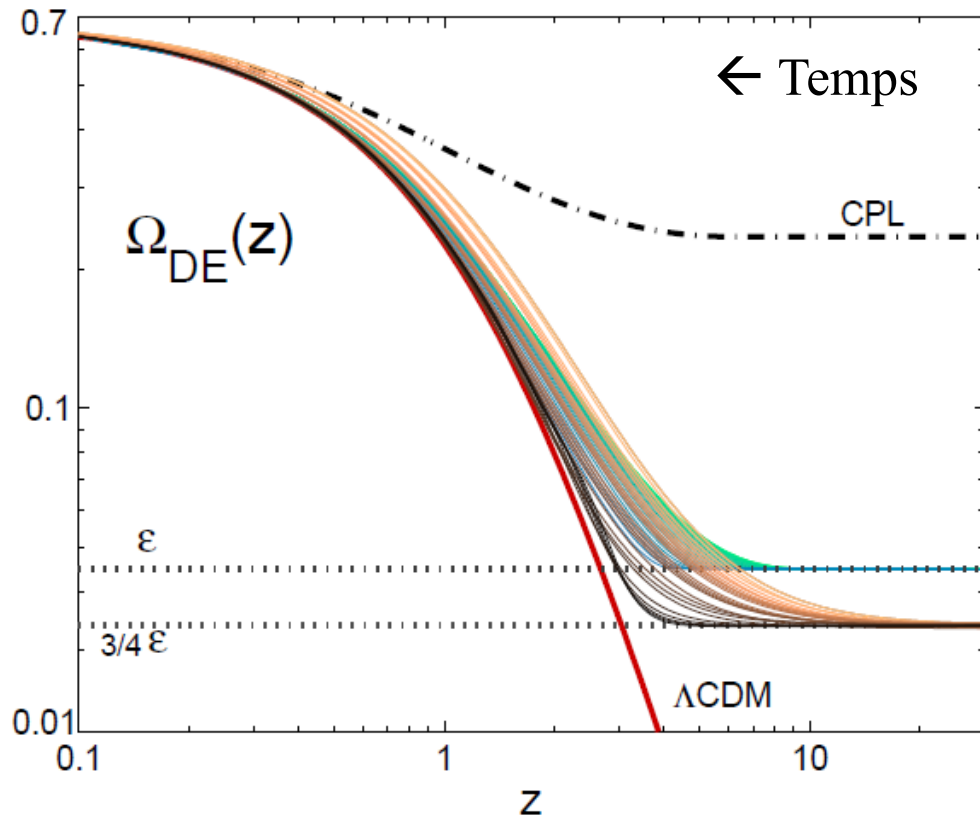
$f(R)$, DGP, Gravité quantique à boucles, Théorie des cordes



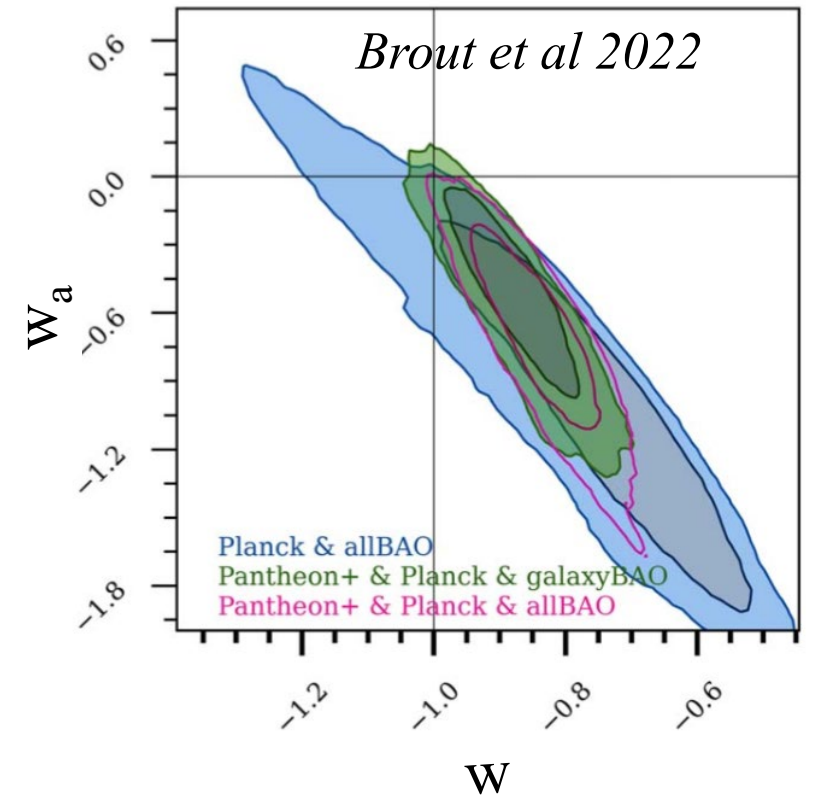
Nucléosynthèse primordiale

Formulation CPL *Chevallier, Polarski, Linder 2001, 2003*

$P = w \rho$ $w(z) = w_0 + w_a z/(1+z)$ éliminé pour $w_a > 0.4$
 ou bien $w = w_0 + w_a (1-a)$



Bassett et al 2008



BBN temperature de $T \sim 1\text{MeV}$,
 $\rightarrow \Omega_{\text{DE}}(T \sim 1\text{MeV}) < \varepsilon = 0.045$ à 2σ
Bean et al 2002

Trop d'expansion \rightarrow rapport n/p changé
 et He, D, Li incompatibles

Les SNIa, $w_0 = -0.9 \pm 0.14$ $w_a < -0.1$

Formulation générale, champ scalaire

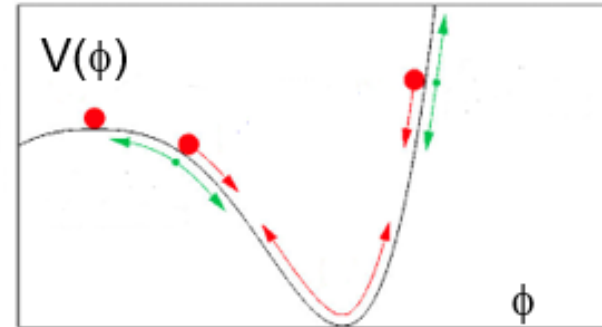
Le modèle le plus simple: Une constante cosmologique, avec $w = -1 \rightarrow \Lambda$ CDM

Tout autre modèle peut se décrire par un fluide, ou champ ϕ , avec pression $p = w\rho$, et $w < -1/3$

Le champ scalaire ϕ , avec potentiel $V(\phi)$, pression et énergie données par

$$p = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi), \quad \rho = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi)$$

Le terme cinétique doit être faible, $\Rightarrow \phi$ lentement variable



L'équation de conservation est $\dot{\rho} + 3H(\rho + p) = 0$

qui donne l'équation de Klein-Gordon
(eq de Schrödinger relativiste)

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V' = 0$$

Energie noire: équation d'état

L'équation d'état $\mathbf{P=wp}$, s'écrit ($w < -1/3$)

$$w = \frac{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi)}{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi)} = \frac{1 - V/Tkin}{1 + V/Tkin}$$

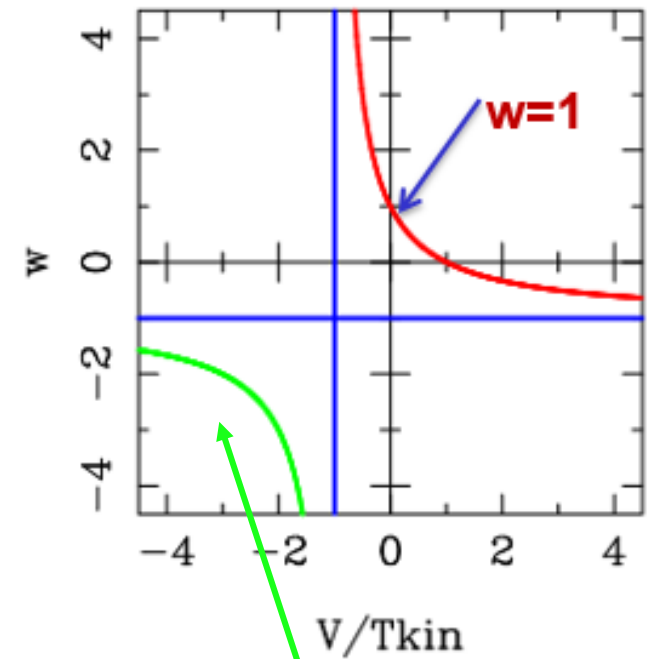
Selon les cas extrêmes:

Energie cinétique domine	$w \rightarrow 1$	fluide rigide
Equipartition	$w \rightarrow 0$	matière froide, baryons
Energie potentielle domine	$w \rightarrow -1$	constante cosmologique
Energie cinétique négative	$w < -1$	fantôme

→ L'équation d'état varie dans le temps

→ On peut écrire, à l'approx linéaire ($a(t)$ est le rayon de l'Univers)

$$w = w_0 + w_a (1 - a)$$



Instabilité $w < -1$

$w < -1$ correspond à une **énergie négative**

Mais peut-il en être le cas de façon temporaire?

Le temps d'instabilité peut-être rendu $>$ âge de l'Univers

Si on coupe les énergies à 100MeV

Equation de conservation

$$\rightarrow d \log \rho / d \log a = -3(1+w) \quad \dot{\rho} + 3H(\rho + p) = 0$$

\rightarrow Si $w < -1$, la densité d'énergie s'accroît avec l'expansion de l'Univers \rightarrow **non –physique!**

Plusieurs conditions ont été considérées

NDEC « Null Dominant Energy Condition »: pour prévenir la désintégration, ou propagation $> c$

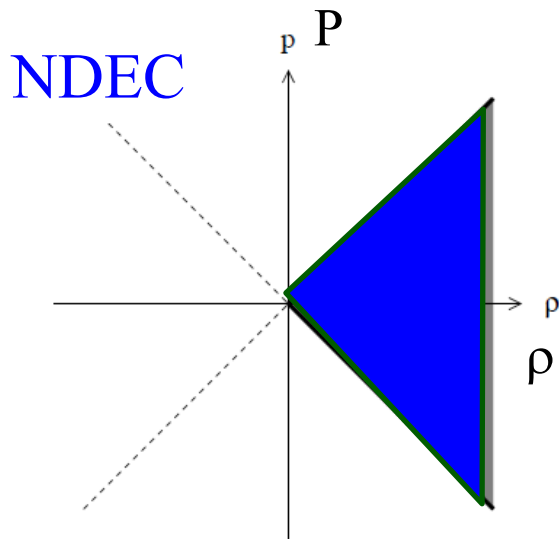
D'autre part l'énergie doit être positive pour attendre la courbure nulle $\Omega_m + \Omega_{DE} = 1$



Big Rip
Grand déchirement

Conditions sur l'énergie

- « Weak Energy Condition » WEC $\rho \geq 0$ $\rho + p \geq 0$
- « Null Energy Condition » NEC $\rho + p \geq 0$
- « Strong Energy Condition » SEC $\rho + p \geq 0$ $\rho + 3p \geq 0$



Les systèmes vérifiant NDEC
 « Null Dominant Energy Condition »
 Ont une énergie du vide stable
 qui ne se désintègre pas
 $\rho \geq 0$ $\rho + p \geq 0$ $\rho - p \geq 0$

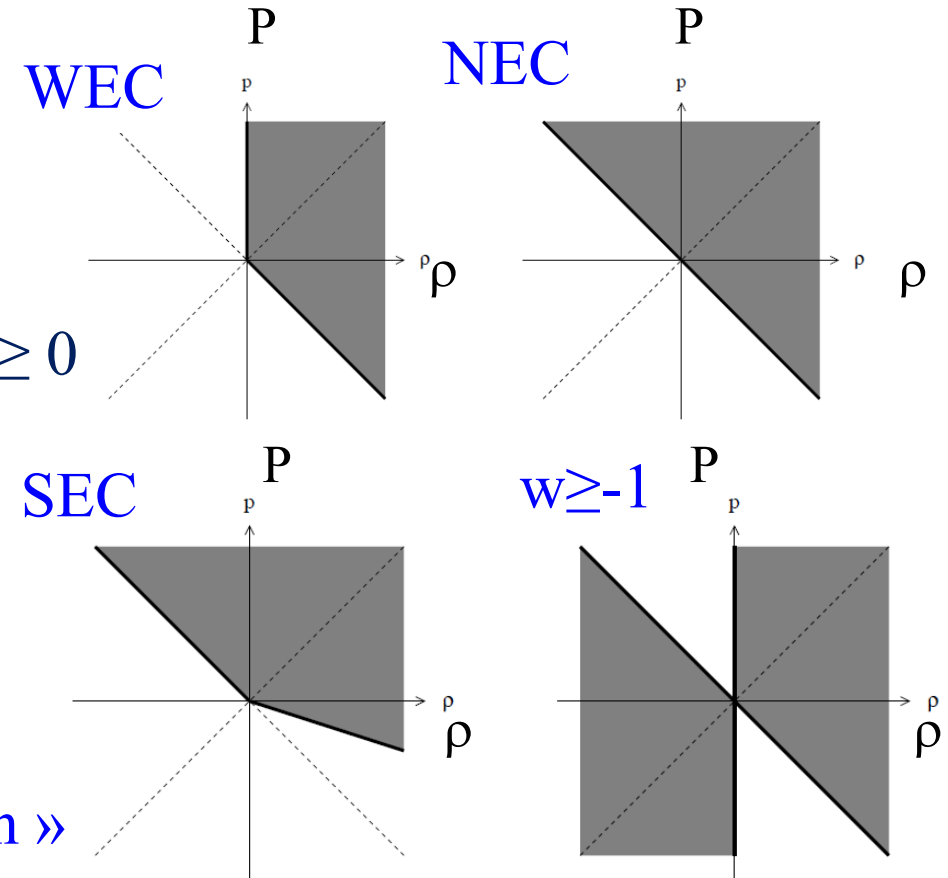
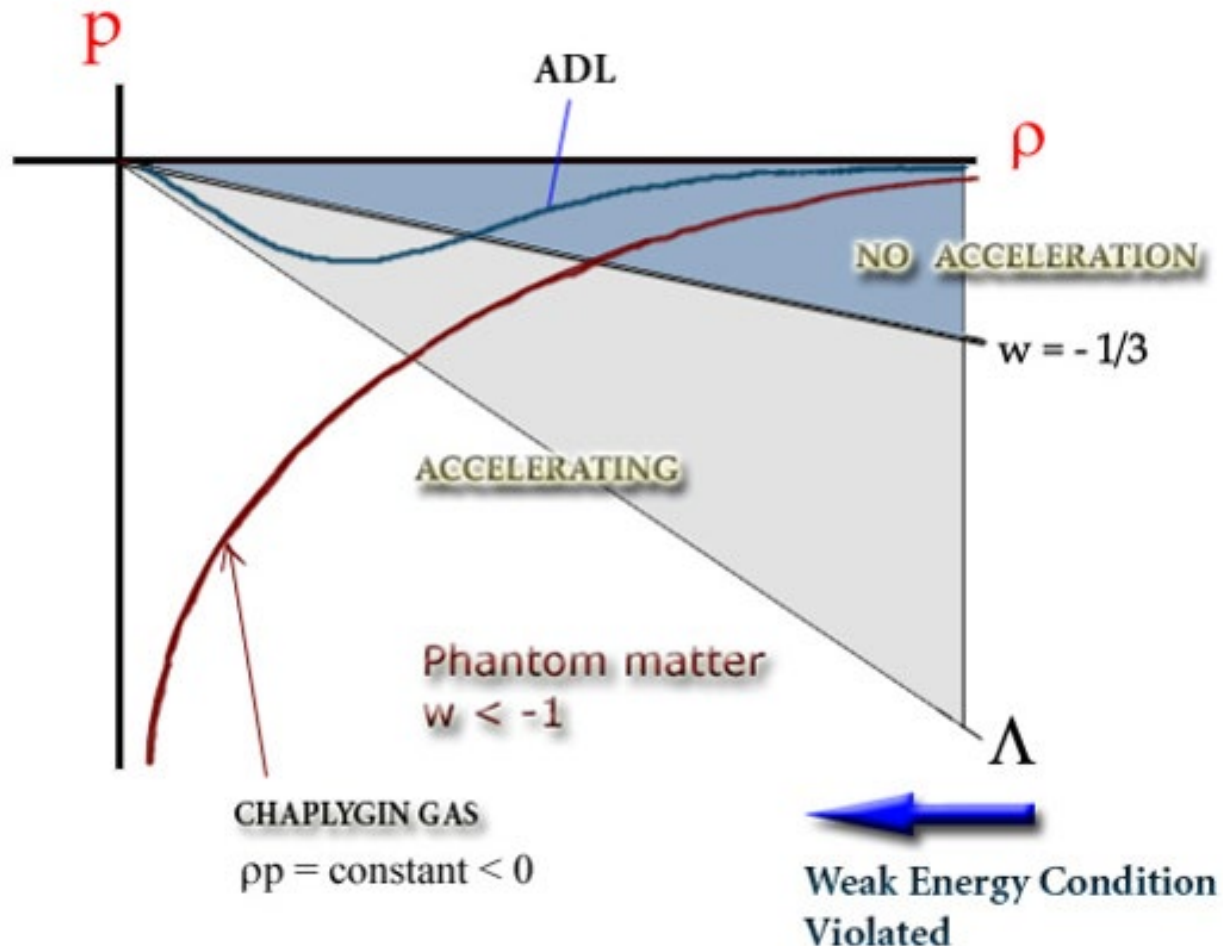


Diagramme Pression-densité

Est-ce que l'énergie noire pourrait se déduire de la matière noire ?

$$p = -\frac{w\rho}{1+\rho^2}$$



Faible densité: énergie noire

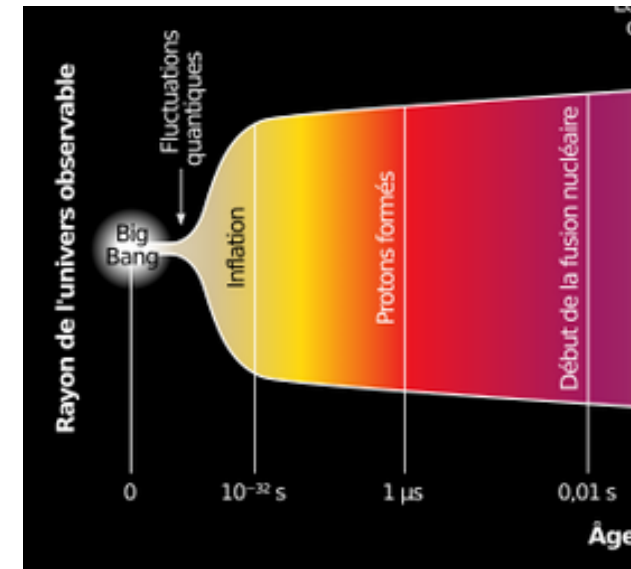
Forte densité, comportement $1/\rho$
La pression devient nulle,
Gaz de Chaplygin
→ Matière noire

Expliquerait les halos de matière
noire dans les parties denses de
l'Univers

Lien avec le champ de l'inflaton

- Une des explications initiales pour l'inflation était aussi une **constante cosmologique Λ**
- Une constante équivaut à un champ scalaire $\phi = \Lambda$ qui garde la même valeur en tout point de l'espace et du temps
- Donne une pression $p = -\Lambda$
- Y-aurait-il un lien entre les deux constantes, une même origine?
- La valeur initiale serait ensuite grandement diminuée par les processus de transitions de phase, ce qui permettrait à la matière de dominer, puis Λ reprendrait le dessus

Expansion d'un facteur 10^{26} en $t < 10^{-33}$ s
Phase de Sitter exponentielle

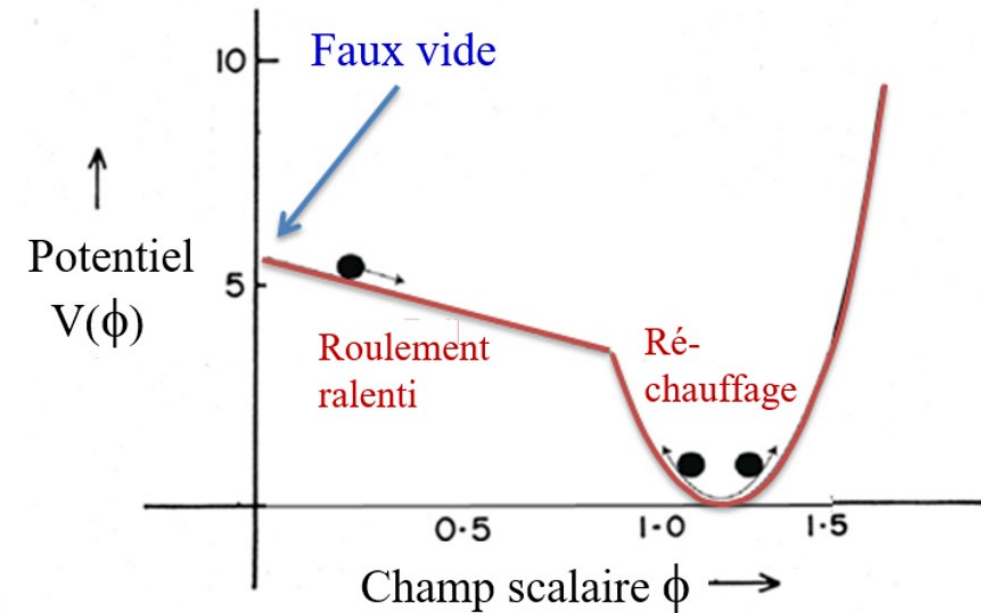
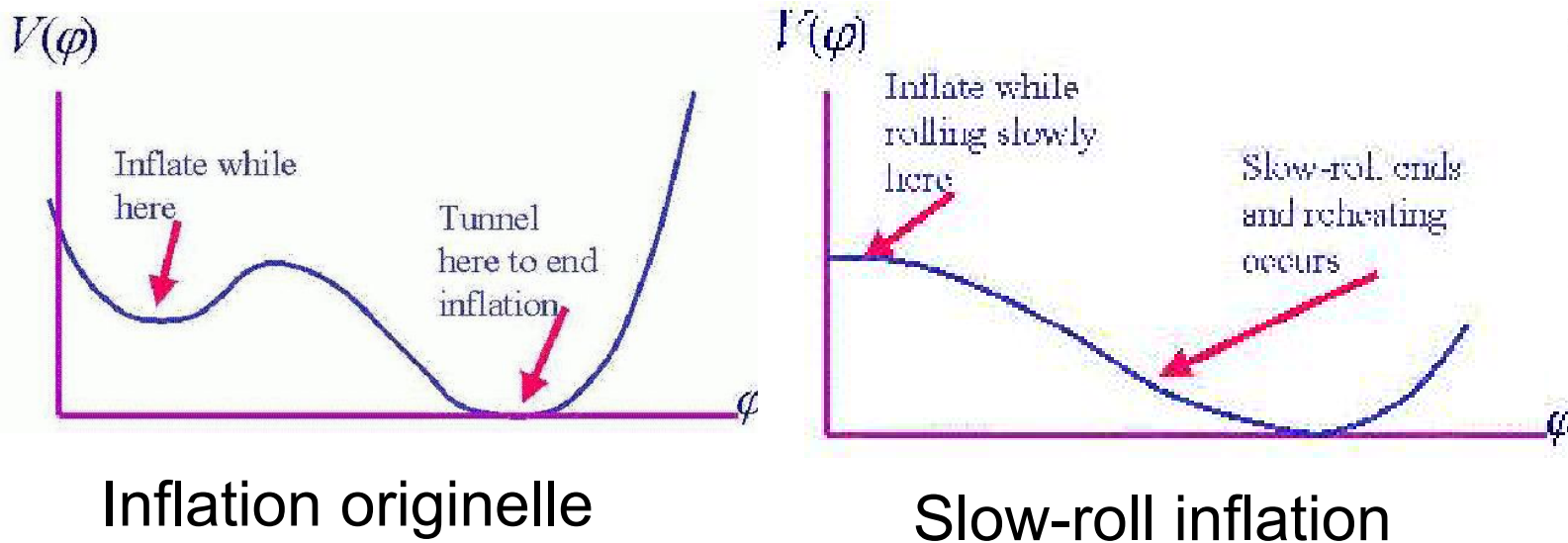


“Slow roll”, ou roulement lent vers l’équilibre

- $V(\phi)$ a un minimum à $\phi = 0$ avant la transition
- $V(\phi)$ a un minimum à $\phi > 0$ après la brisure de symétrie
- ϕ se déplace par tunnel quantique de 0 vers le nouveau minimum

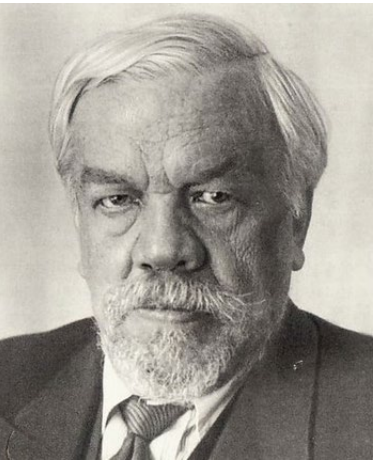
Friction engendrée par l’expansion qui ralentit

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V' = 0$$



Au fond du potentiel, oscillations, **création de particules et réchauffement**

Modèle du gaz de Chaplygin



Sergey Chaplygin
1869-1942

Gaz de Chaplygin (1904)

$$(A > 0) \quad P = -A/\rho$$

Aérodynamique des avions

Gaz de Chaplygin généralisé

$$P = -A/\rho^\alpha \quad (\alpha > 0)$$

Correspond à un modèle unifié où l'énergie noire et la matière noire sont un même composant: appelé aussi **UDM quartessence**

{
 Passé: ρ très grand $\rightarrow P \approx 0$ (matière noire)
 Aujourd'hui: ρ petit $\rightarrow P < 0$ (énergie noire)

Equation de Continuité: $\dot{\rho} + 3H(\rho + P) = 0$

$$\rightarrow \rho(t) = \left[A + \frac{B}{a^{3(1+\alpha)}} \right]^{1/(1+\alpha)}$$

Paramétrisation de Chaplygin

Le gaz de Chaplygin avec son équation initiale $P = A/\rho$ a des profonds problèmes sur la formation des amas, sur les GRB, etc..

→ Modifications et généralisation $P = A/\rho^\alpha$

Aussi, avec un terme de **viscosité**, γ , lui permettant de passer la barrière de $w = -1$

$$w(z) = - \left[1 + \frac{\Omega_m^*}{1 - \Omega_m^*} (1+z)^{3(1+\alpha)} \right]^{-1} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{passé: } w \approx 0 \\ \text{Futur: } w \approx -1 \end{array} \right.$$

La valeur aujourd'hui est $w(0) = - (1 - \Omega_m)$

On peut obtenir le gaz de Chaplygin avec une action de d-branes évoluant dans un espace-temps $(d + 2)$

Gaz de Chaplygin généralisé

Plusieurs variantes

GCG Generalised

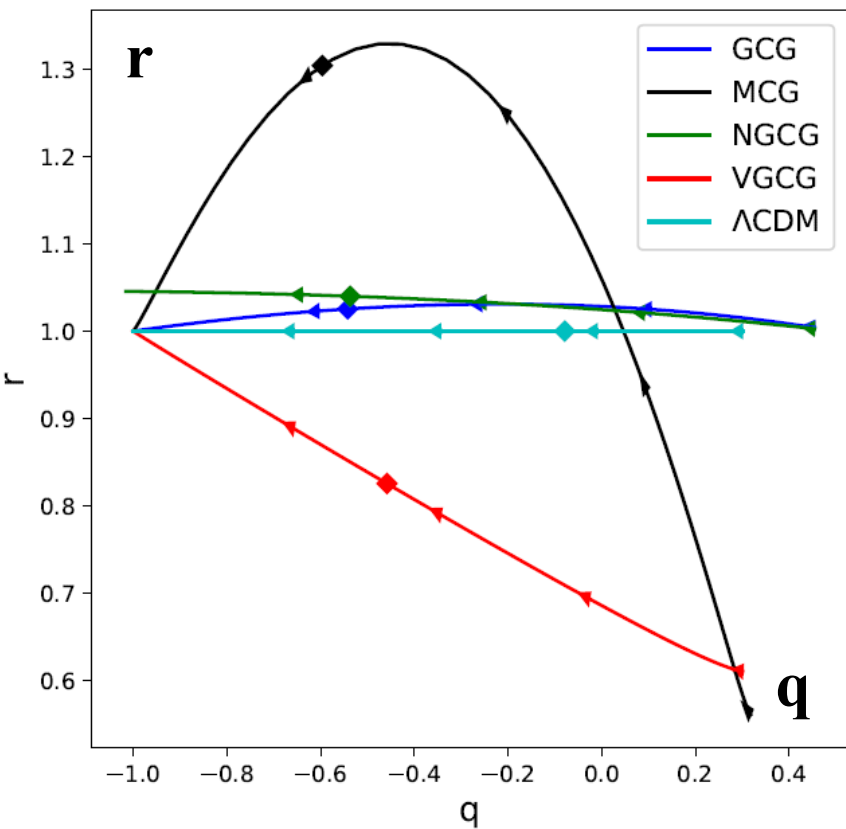
MCG Modified

NGCG New

VGCG Viscous

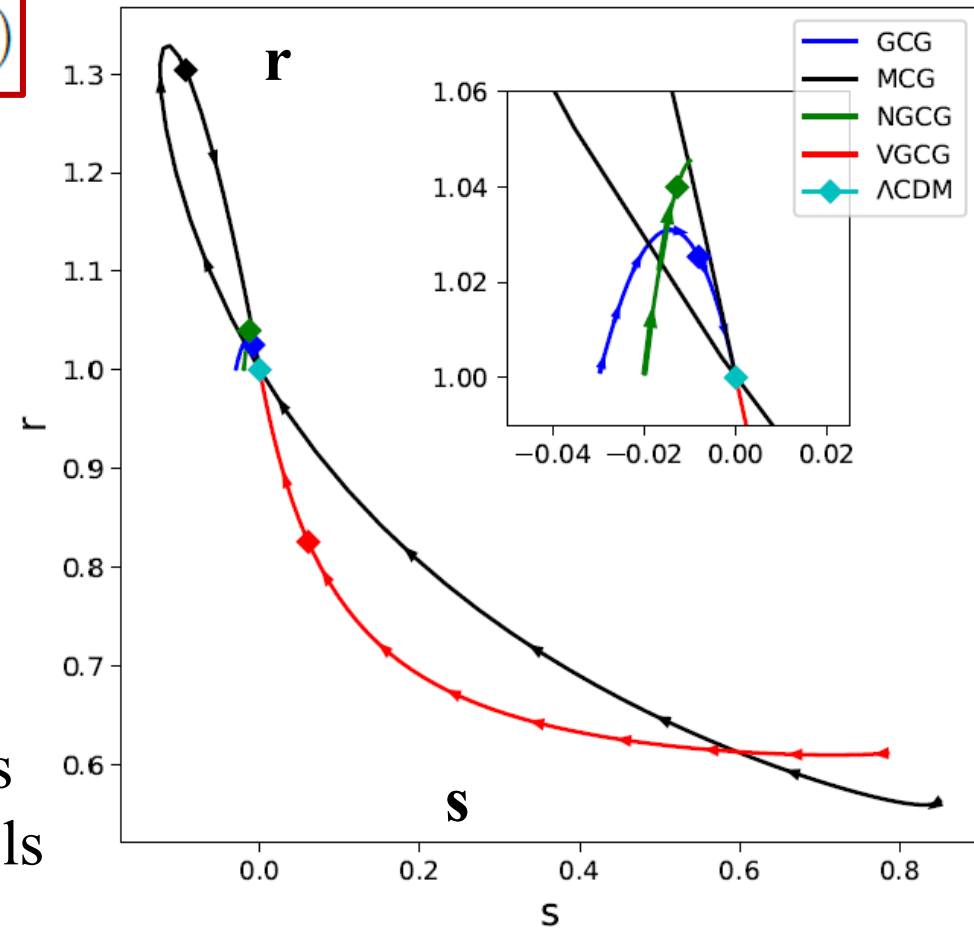
$$r = \frac{\dot{a}}{aH^3}, \quad s = \frac{r-1}{3(q-1/2)}$$

$$H = \frac{\dot{a}}{a}, \quad q = -\frac{\ddot{a}}{aH^2}$$



Les modèles GCG et NGCG sont indistinguables de Λ CDM

MCG et VGCG ont des supports observationnels



Chaplygin et les observations

$$P = -A/\rho^\alpha \quad (\alpha > 0)$$

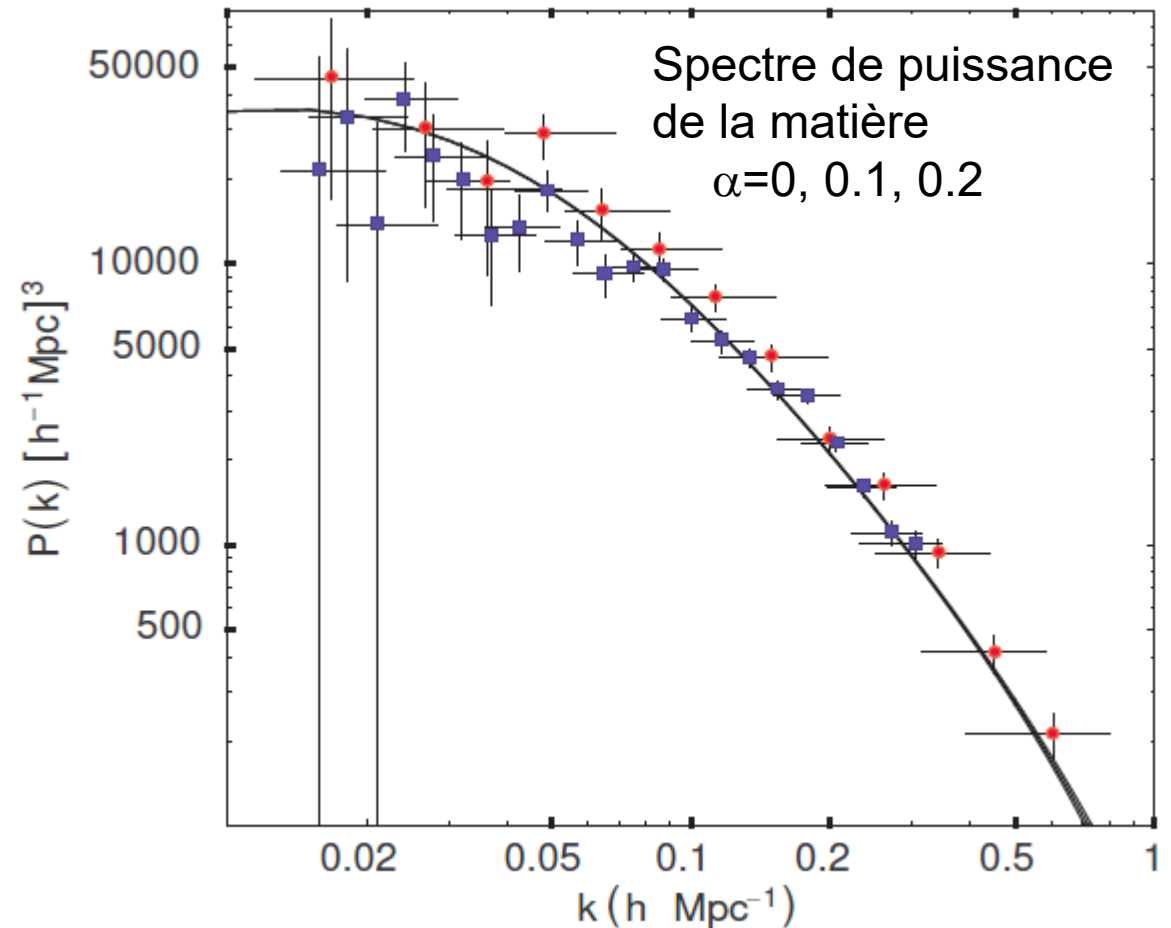
$$w_{ch}(a) = -\frac{Aa^{3(\alpha+1)}}{(1-A) + Aa^{3(\alpha+1)}}$$

$$c_{sch}^2 = -\alpha w_{ch}(a).$$

α doit être assez petit, sinon la vitesse du son empêche les structures de se former

Il ne transfère pas l'énergie, mais le moment
Comme les particules de DM sont froides
L'échange de moment ne leur fait pas perdre
bcp d'énergie

→ Explique aussi la coincidence de l'énergie dominant lorsque la DM décline



Modèles à champ tachyonique

$v/c = pc / (p^2c^2 + m^2c^4)^{1/2}$ Tachyons \rightarrow masse m imaginaire ($m^2 < 0$)

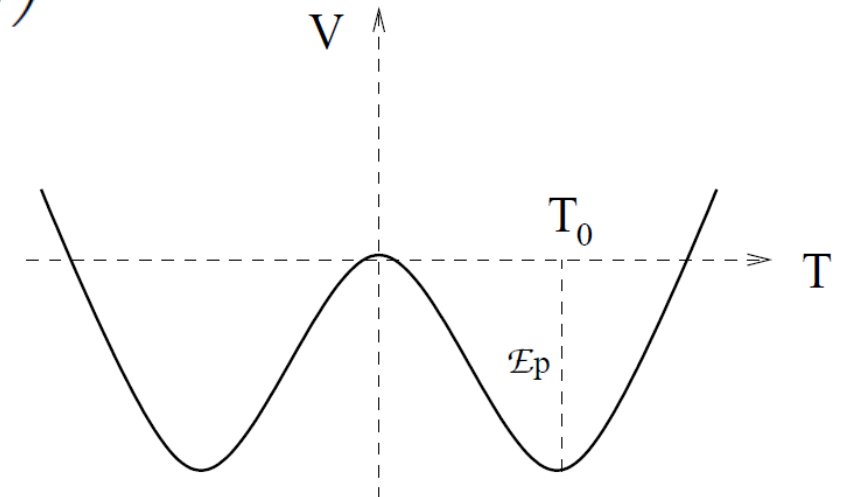
Pour un champ scalaire $M^2 = V''(\phi=0) \rightarrow$ instable ?

Construction d'un champ scalaire, avec la même évolution que le gaz de Chaplygin

$$L(\phi) = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi)$$

$$V(\phi) = \frac{1}{2} \sqrt{A} \left(\cosh 3\phi + \frac{1}{\cosh 3\phi} \right)$$

Certain modèles (*Gorini et al 2004*) élaborés de champ tachyonique permettent d'expliquer l'expansion accélérée, et finissent par un « **Big Brake** »
 \rightarrow Grande décélération



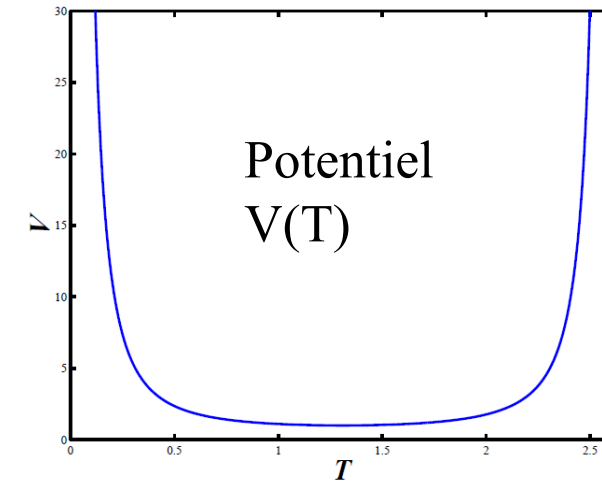
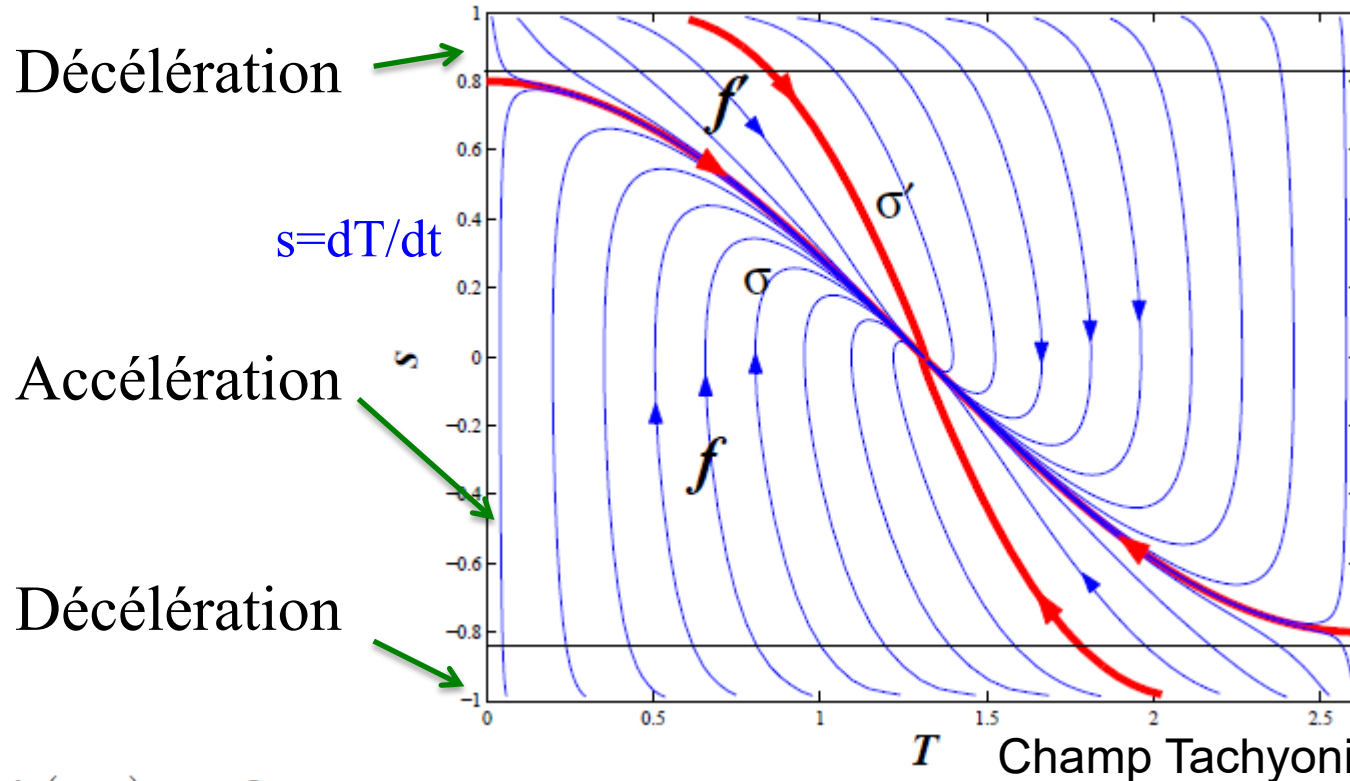
Grande variété de comportements

Trajectoires $s(T)$ dans le diagramme de phase

Pour $w < 0$, le système passe par des phases d'accélération, puis de décélération. T le champ de tachyon, $V(T)$ son potentiel

Gorini et al 2004

Modèle
 $w = -0.36$



Séparatrice σ

$$\ddot{a}(t_B) = -\infty, \dot{a}(t_B) = 0,$$

$$0 < a(t_B) < \infty$$

→ « Big Brake » Freinage brusque

« EDE »: Essai de résoudre les tensions de Λ CDM

- Tensions sur H_0 , sur S_8
- Est-ce que l'énergie noire pourrait dériver de la matière noire?

Λ CDM est un modèle qui a beaucoup de succès, surtout dans l'Univers jeune

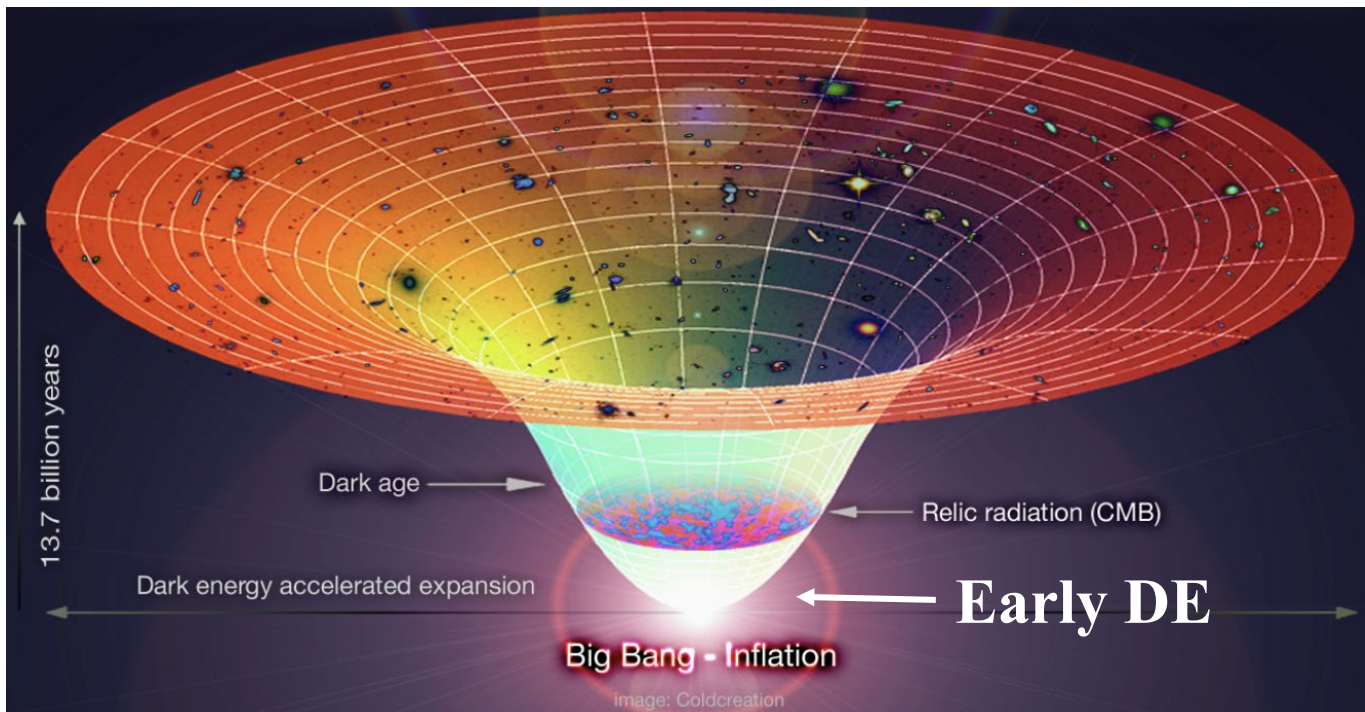
Mais il est empirique, paramétrique, ajoute des variables (DM, DE) dès que possible

Certaines tensions résistent, et la physique non-linéaire des galaxies a des problèmes

→ Proposition d'un épisode d'énergie noire, au début de l'Univers, avant la Recombinaison: **EDE**

→ Expansion accélérée, à $z > 3000$ implique un H_0 plus grand aujourd'hui qu'autrefois

EDE avec $w = -1$, se dilue ensuite



Expansion accélérée: réduction de r_s

$$H_0 = 73.04 \pm 1.04 \text{ km/s/Mpc}$$



SH0ES

Supernova for
 H_0 and Equation
of state of DE

Si l'expansion est accélérée, la température décroît plus vite

→ recombinaison, avant 380 000 ans, l'horizon sonore r_s

est plus petit pour le même $z_{s \sim 1000}$

Le CMB mesure $\theta_s = r_s/D(z_s)$, et les BAO, $\theta_d = r_d/D(z_d)$

$r_d = 1.018 r_s$ (au découplage baryons)

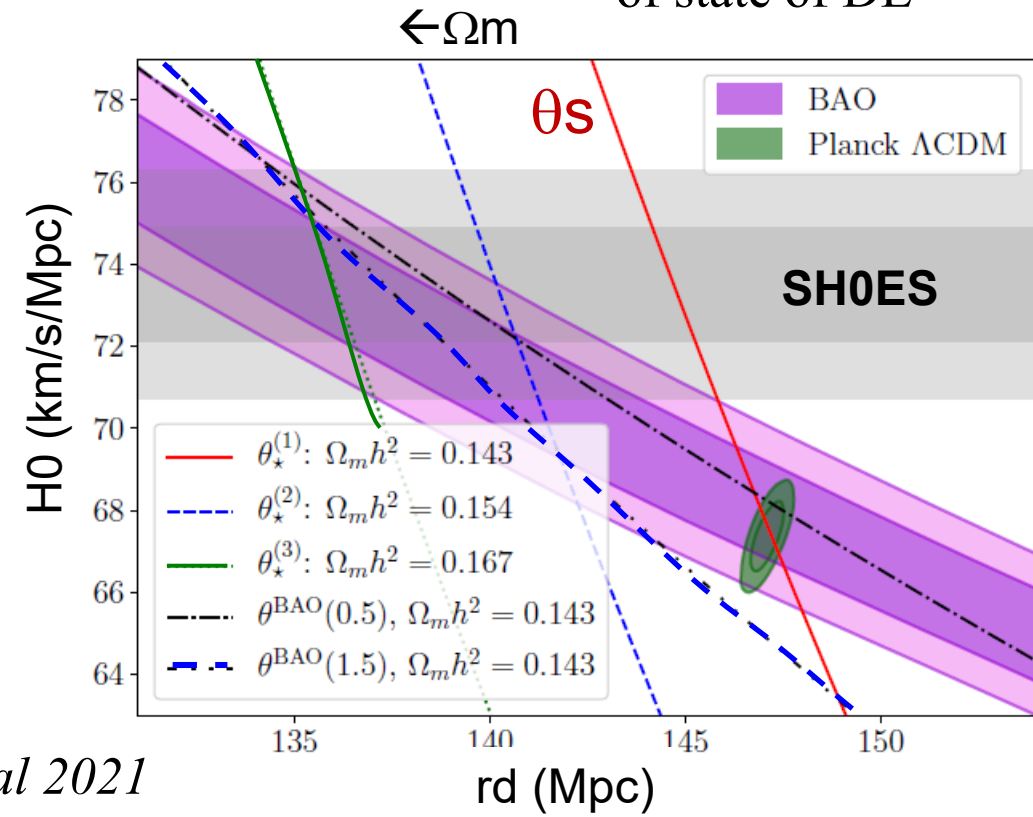
Distance comobile $D(z) = \int_0^z c dz / H(z)$

$$(H(z)/H_0)^2 = \Omega_r (1+z)^4 + \Omega_m (1+z)^3 + \Omega_\Lambda$$

→ $\theta \propto r_s H(z)$, si r_s est réduit, H est augmenté

BAO mesurées à $z < 2$ (pentes plus faibles)

$H_0 = 73$, mais alors Ω_m trop grand



L'Univers jeune, $z < 1000$

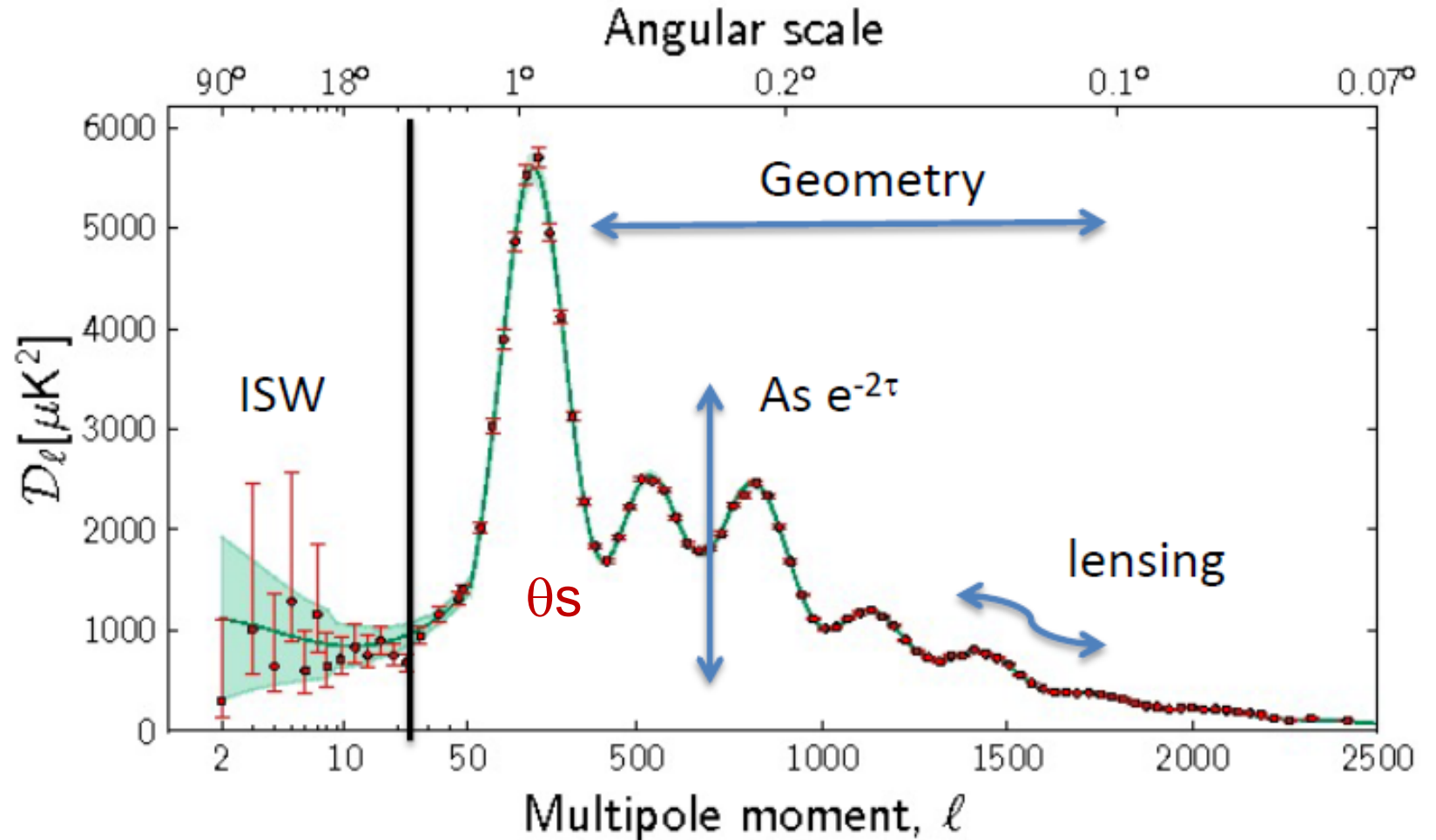
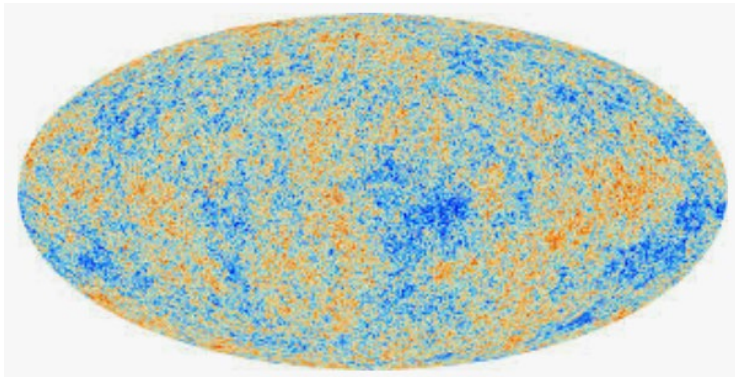
$$H_0 = 67.62 \pm 0.47 \text{ km/s/Mpc}$$

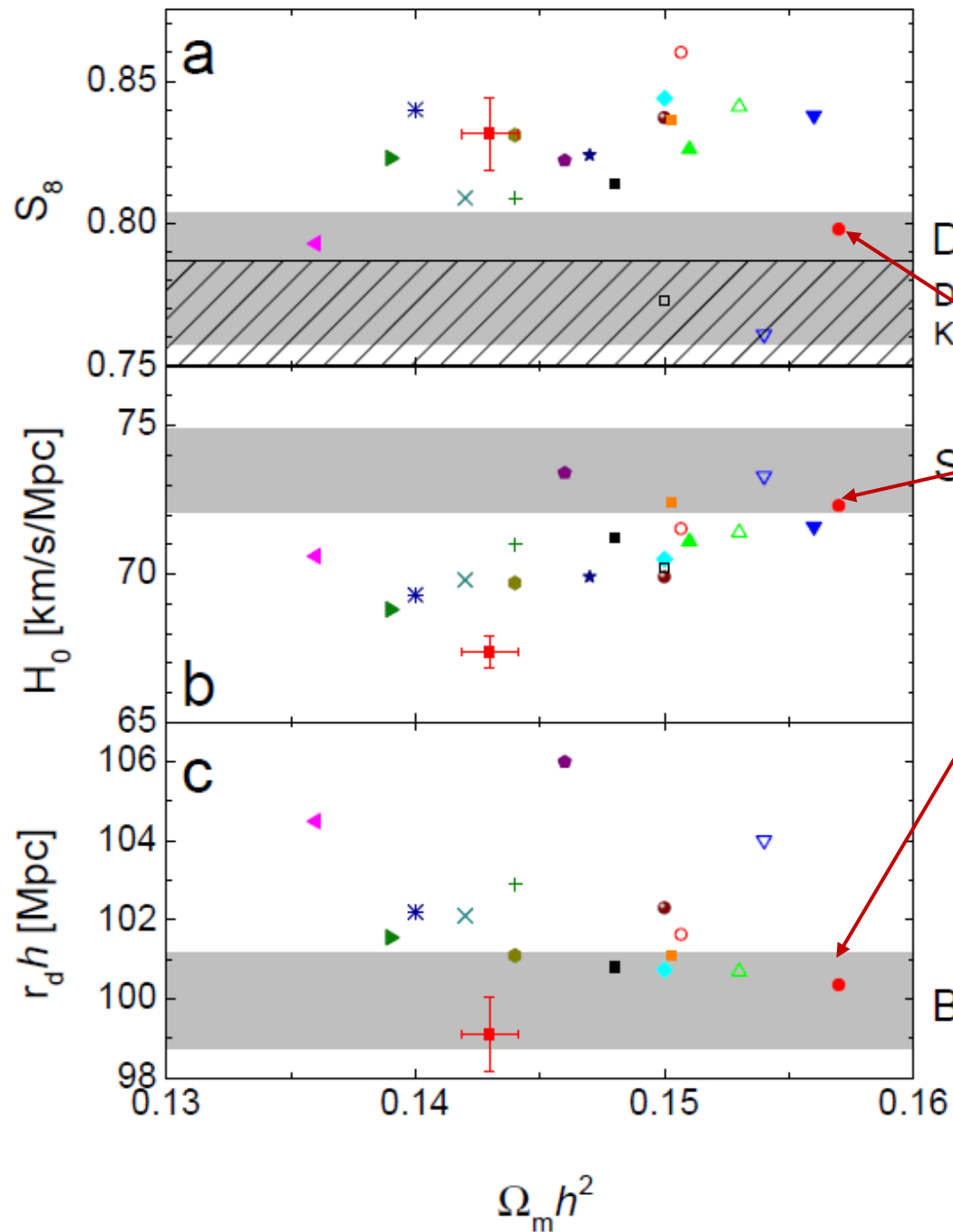
Fonds cosmique micro-onde

CMB en parfait accord avec Λ CDM

Horizon sonore r_s , θ_s

Aussi, ISW, lentilles





- Λ CDM
- ▲ Early Dark Energy (EDE) model I [14]
- ▼ EDE model II [14]
- ◆ evolving scalar fields I [15]
- evolving scalar fields II [15]
- △ a new EDE model [18]
- interacting neutrino cosmology I [19]
- interacting neutrino cosmology II [19]
- neutrino sector radiation [22]
- ★ ultralight scalar decay [24]
- ◀ decaying dark matter (DM) I [25]
- ▶ decaying DM II [25]
- DM - dark radiation interaction [26]
- * swampland & fading DM [29]
- ◊ primordial magnetic fields I [30]
- × primordial magnetic fields II [30]
- non-standard recombination I [31]
- non-standard recombination II [31]
- early recombination [33]

Sakstein 2020

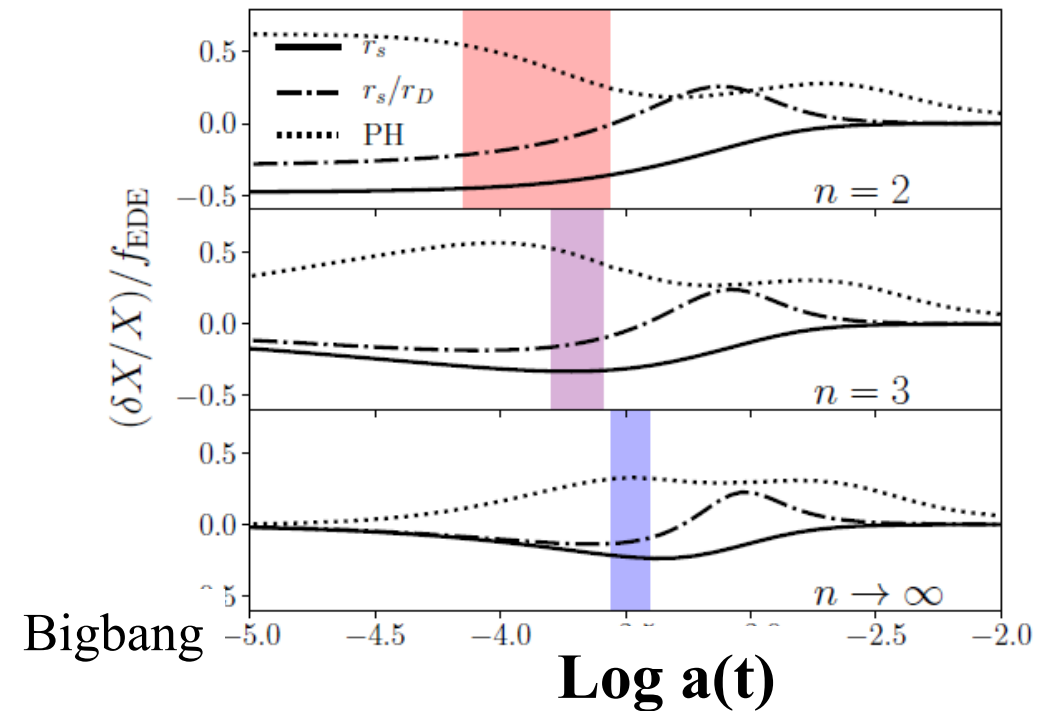
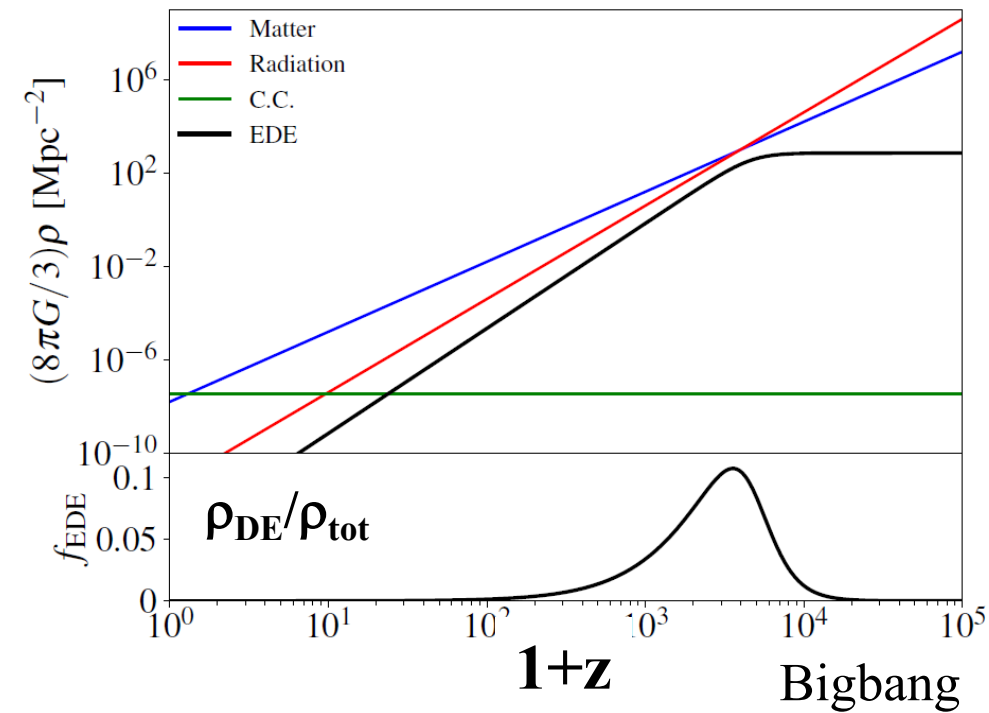
**S8 aussi:
Impossible
à résoudre
uniquement
avec une
nouvelle
physique au
début de
l'Univers**

Energie noire à $z < 3000$

- Au moins une trentaine de solution à la tension de H_0
 Soit dans l'univers **proche**, \rightarrow éliminés par les obs
 Soit **lointain** (gravité modifiée, transition de phase, réduction de l'horizon sonore, énergie fantôme..)
- Ou alors (1) une phase énergie noire ($w=-1$) puis le champ scalaire oscille, $w_n = (n-1)/(n+1)$
- soit (2) il roule lentement (slow roll), contribuant à 5% de l'énergie à $z=5000$

PH hauteur du 1^{er} pic $\propto \Omega_m^{-0.5}$

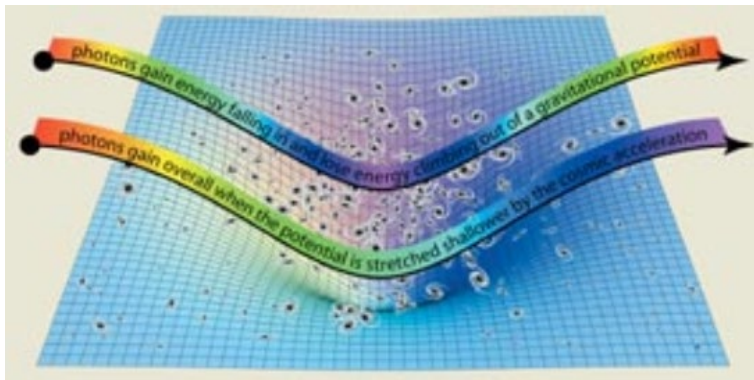
Poulin et al 2019, 2023



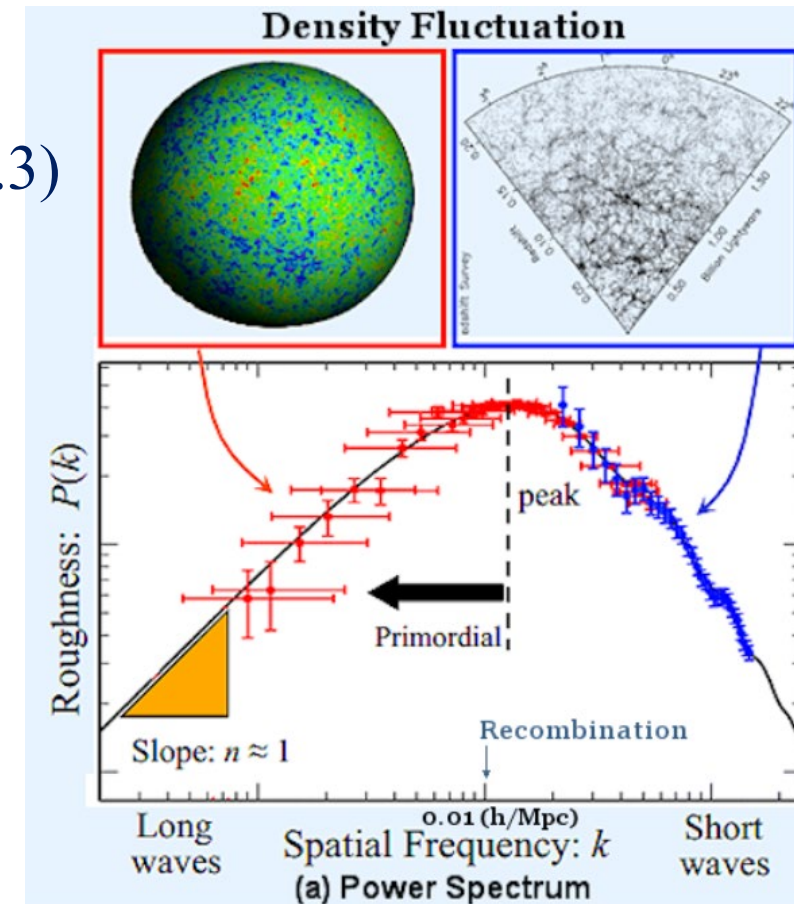
La physique $z > 1000$ est insuffisante

- 1) Age des plus vieilles galaxies à grand z
- 2) BAO: dégénérescence entre taille de l'horizon sonore et H_0
- 3) Chronomètres cosmiques
- 4) Descente de H_0 dans les données locales
- 5) Early- ISW: Univers jeune, consistant avec Λ CDM
- 6) F tension entre H_0 de l'univers intermédiaire et local ($\Omega_m=0.3$)
- 7) Galaxies: spectre de puissance, dont le $P(k)$ tourne aux échelles qui rentrent dans l'horizon à z_{eq}

Effet ISW



Vagnozzy 2023

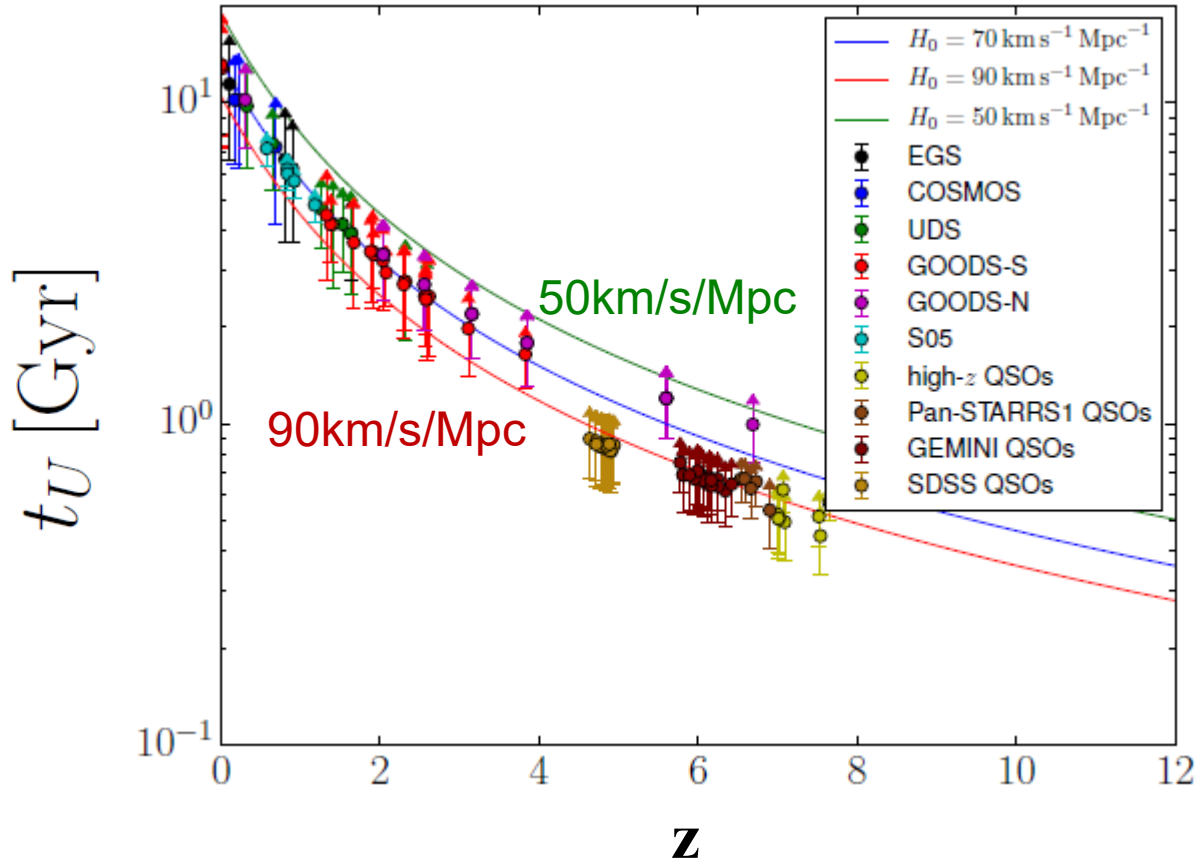


Age des galaxies primordiales

Début: H_0 faible t_U grand
 Fin, H_0 grand t_U faible

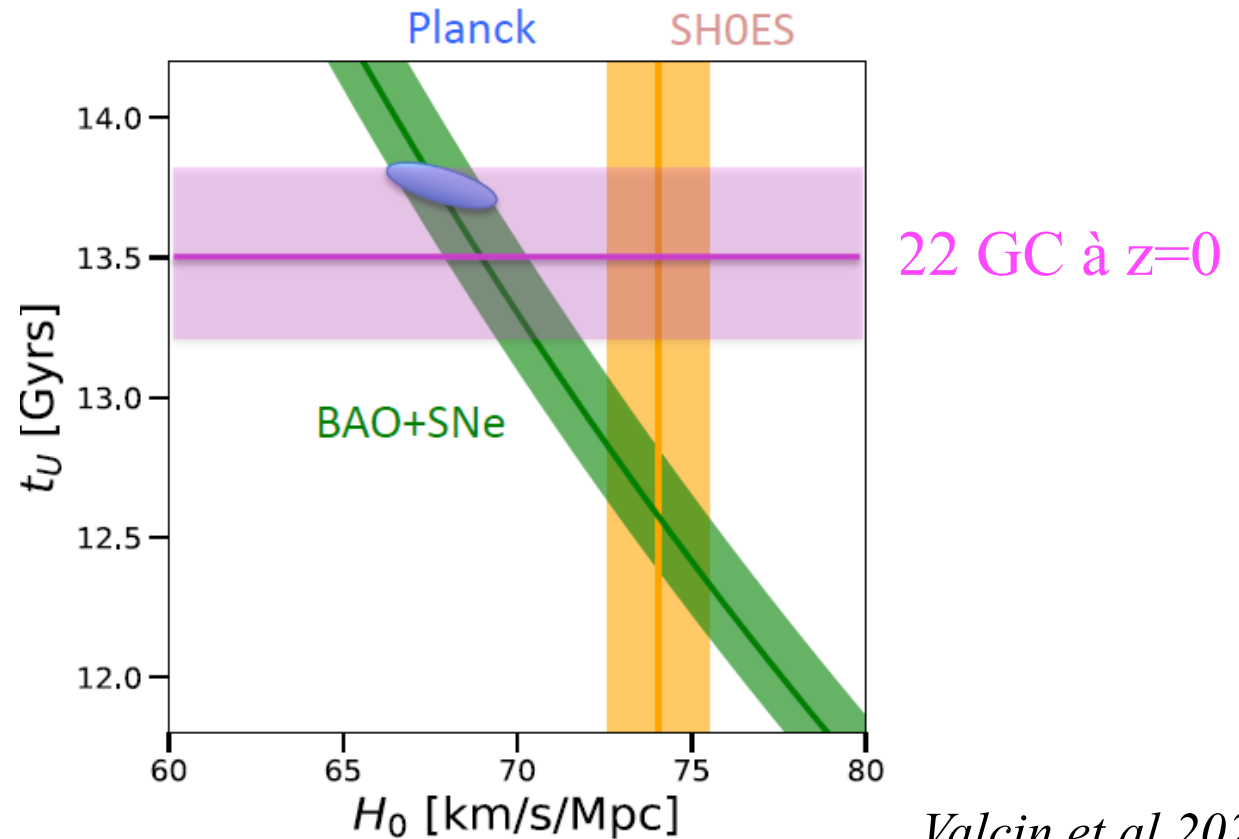
La plupart des galaxies sont plus jeunes que $t_U \propto 1/H_0$

Quelques-unes contraignent $H_0 < 1/\text{age}$



Aucune histoire de $H(z)$ autrefois ne peut porter H_0 au-delà de 71 km/s/Mpc

→ Influence de phénomènes plus locaux



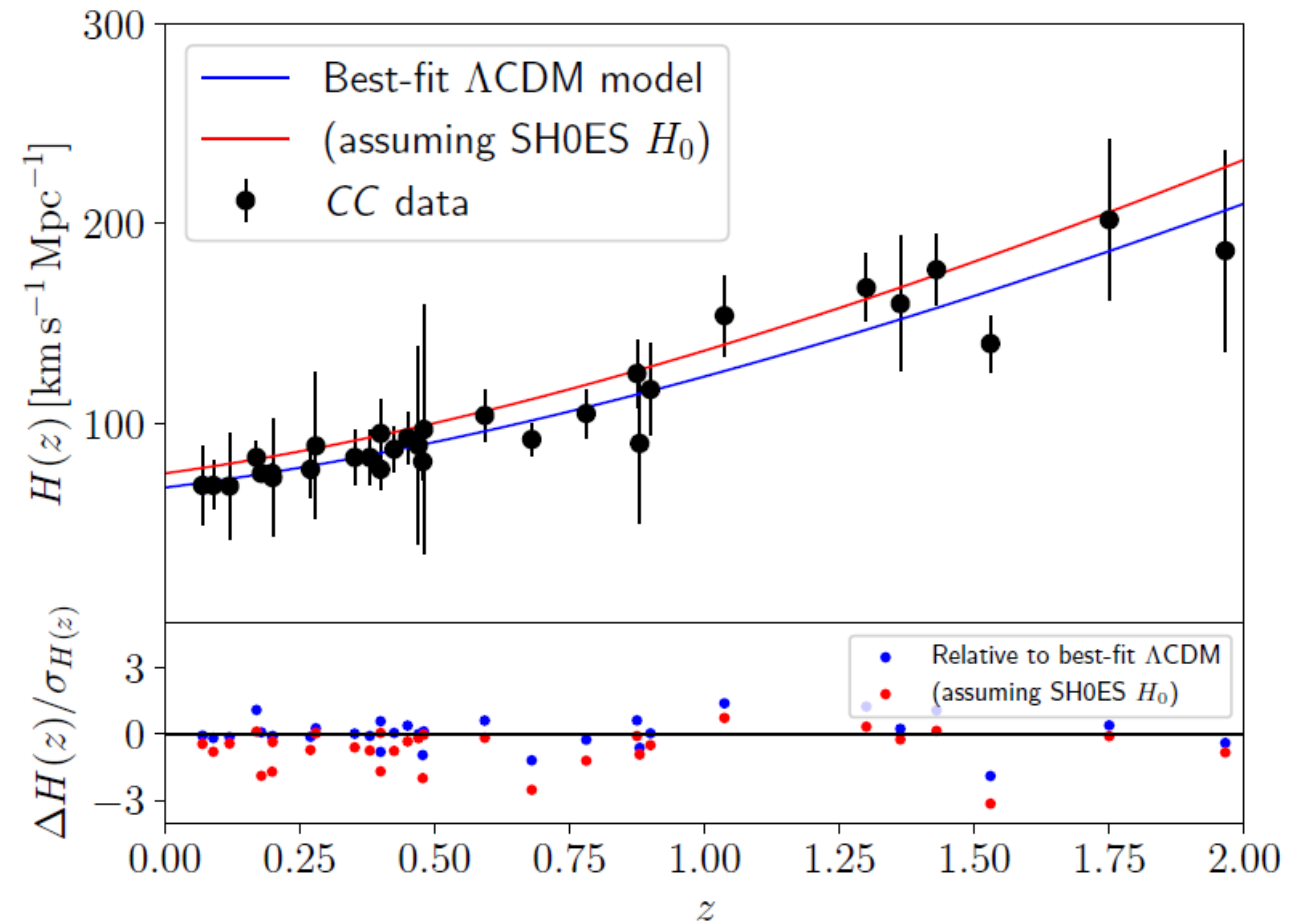
Au début, $H(z)/H_0$ croît plus vite que $(1+z)^{3/2}$
 Ou $(1+z)^2$?

Chronomètres cosmiques

Age de certaines galaxies massives, dont la formation d'étoiles est stoppée

Comparant des systèmes formés à des z différents et leurs âges, on obtient $dz/dt \sim \Delta z/\Delta t$, puis

$$H(z) = -\frac{1}{1+z} \frac{dz}{dt}$$

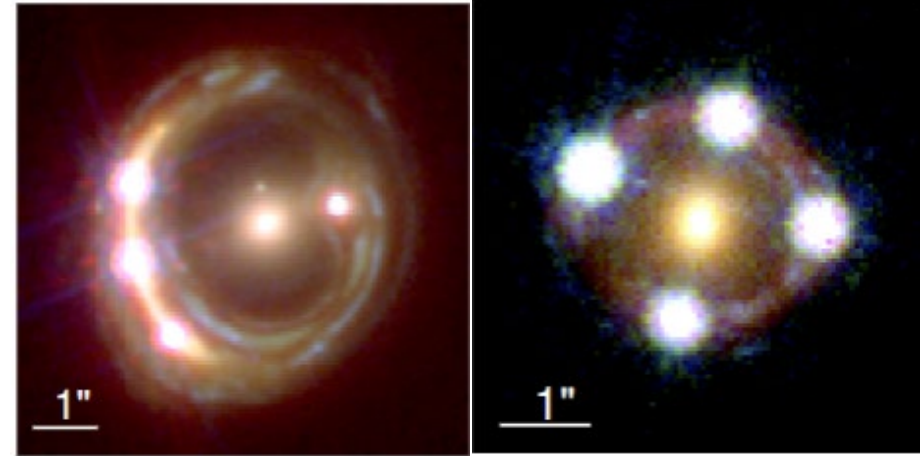


H0LiCOW: H0 avec des lentilles

$H_0 = 73.3 \pm 1.7$ km/s/Mpc, déduite à 2-4% de précision

Elle varie avec z ! De même avec TDCOSMO

+ SNIa de Pantheon (2021) \rightarrow pas seulement $z > 3000$

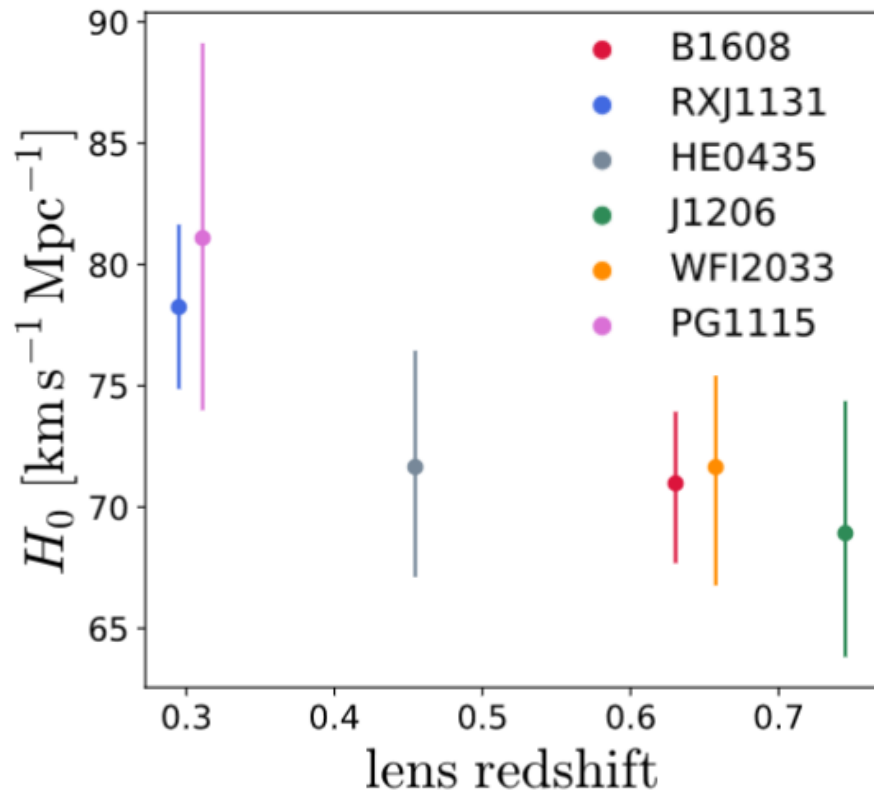


(b) RXJ1131-1231

(c) HE 0435-1223

H0 Lenses in Cosmograil's Wellspring coll

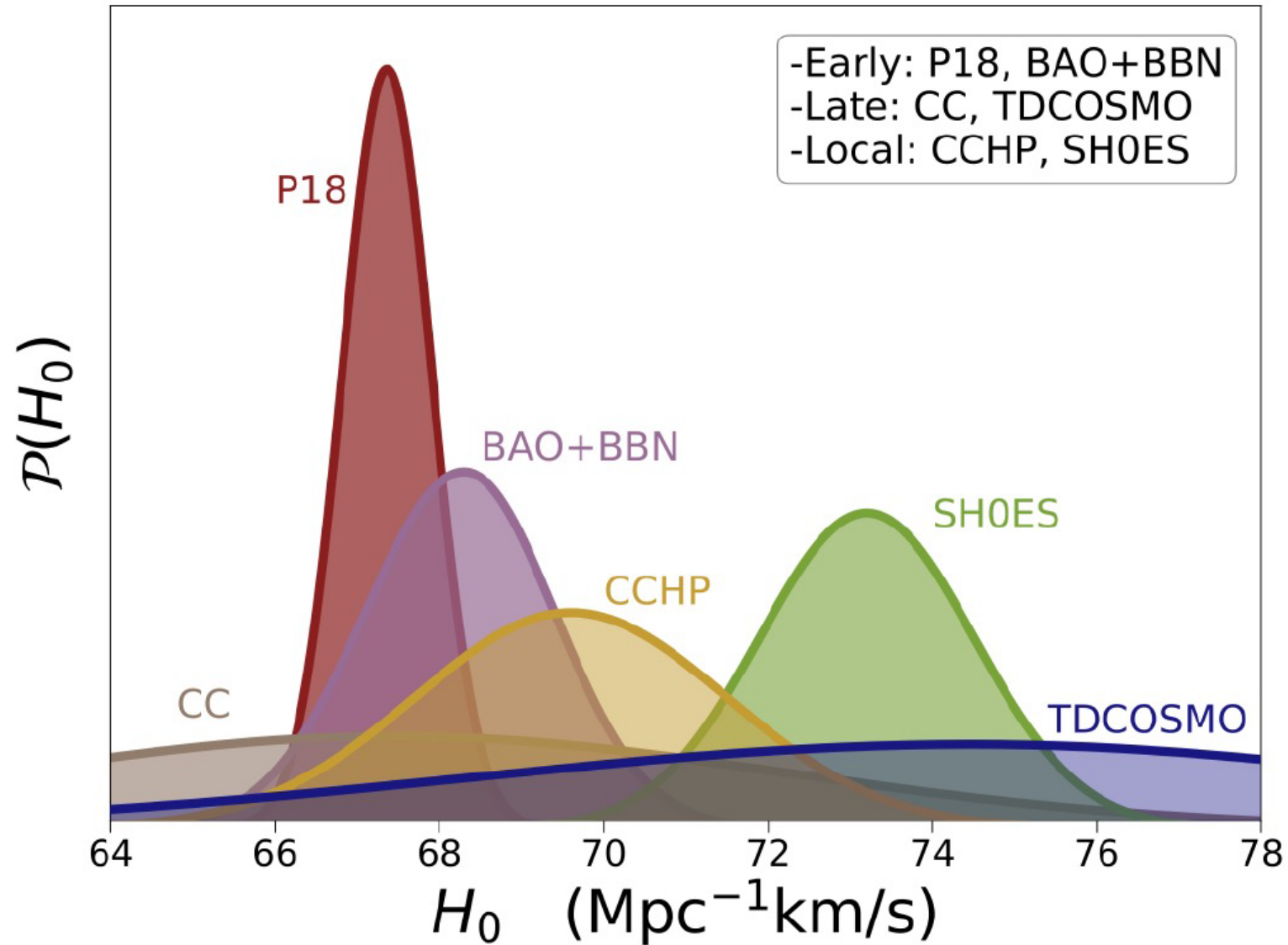
Wong, K et al 2020

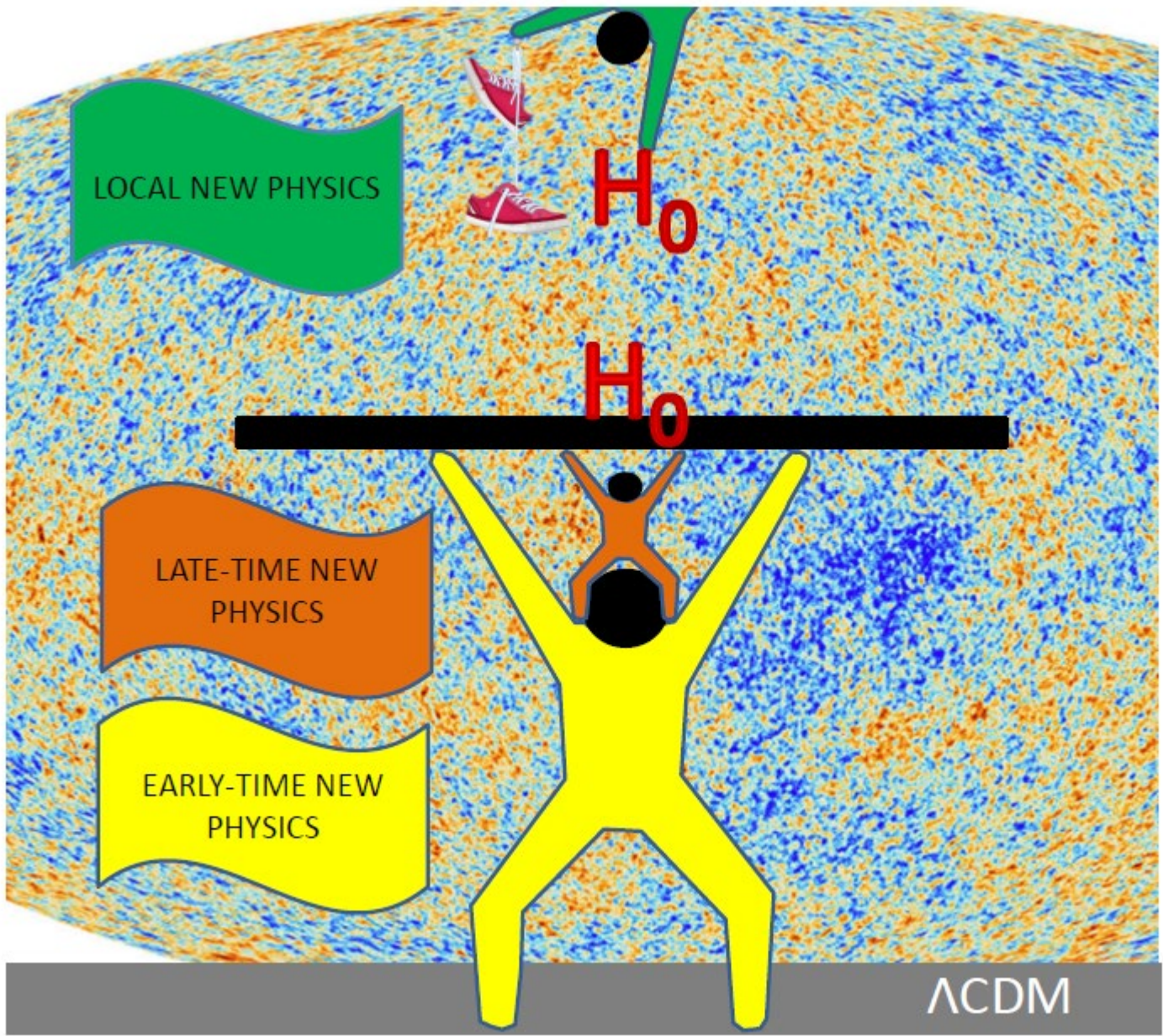


Méthode complètement différente du CMB et SNIa
Mesure du temps du retard à l'arrivée entre les divers images gravitationnelles



Evolution de H_0 : continuité?





SH0ES (Supernova, H_0 ,
for the Equation of State of
Dark Energy)

$$H_0 = 73.04 \pm 1.04 \text{ km/s/Mpc}$$

**La tension nécessite
la contribution de tous!**

CMB + BAO

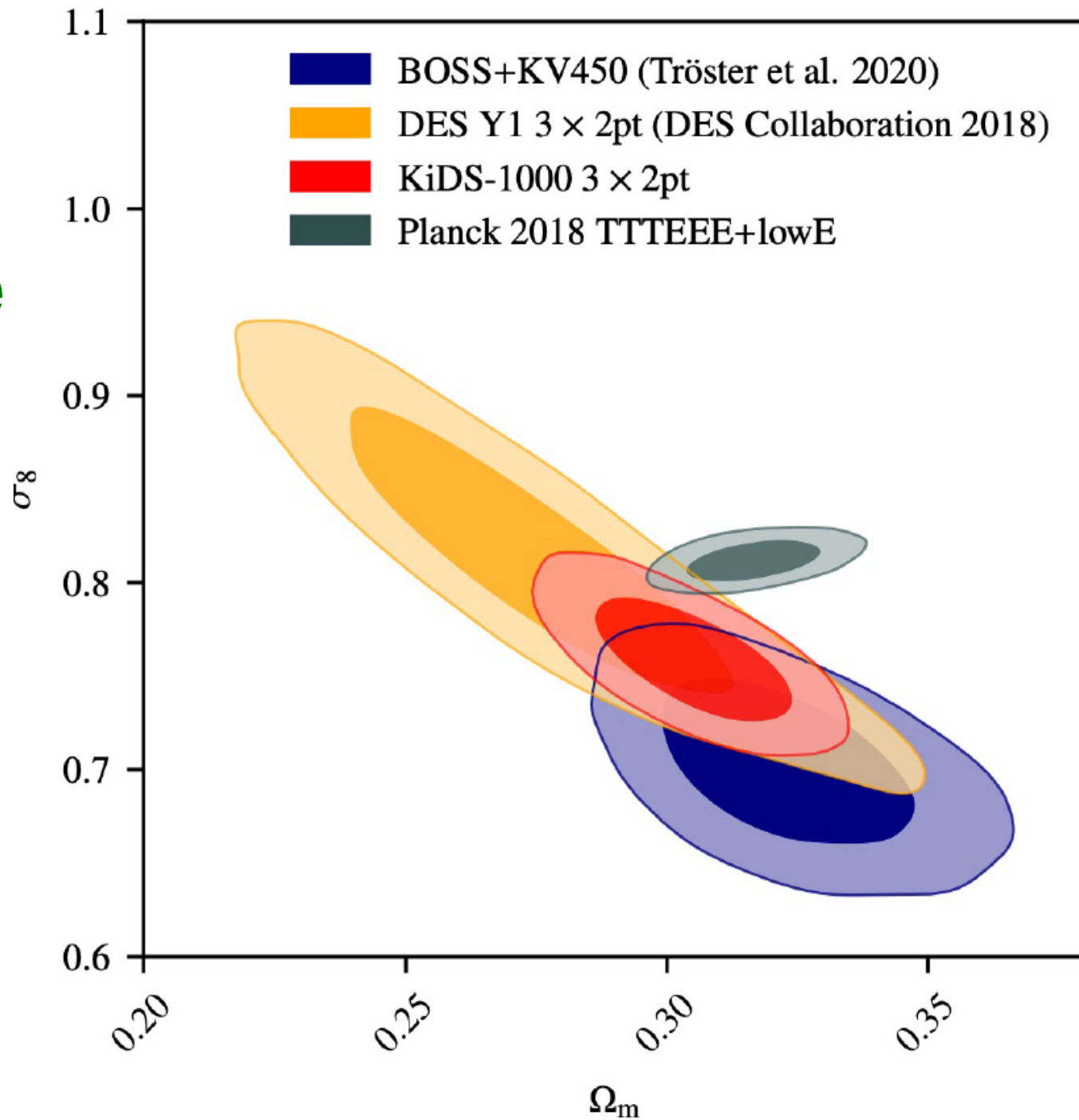
$$H_0 = 67.62 \pm 0.47 \text{ km/s/Mpc}$$

Christina Ghirardini

Tension du S_8 , σ_8

Structuration de la matière

Haute dans l'Univers jeune
Plus faible ensuite

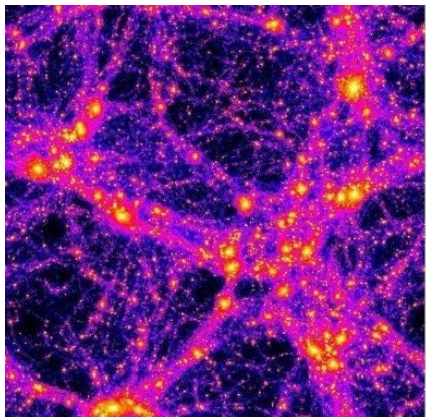


Solution pour le S_8

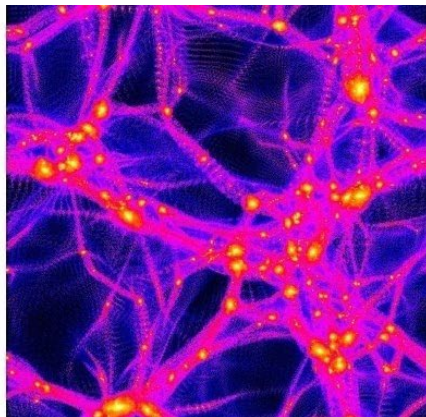
- L'Univers local est plus homogène et plus lisse que ce qui est prédit par Λ CDM -- obs par les amas de galaxies, cisaillement cosmique
- Pourtant à grand z , les structures sont compatibles avec Λ CDM
- Une des solutions proposées est de considérer que **la matière noire se désintègre** dans les structures, et acquiert une vitesse qui la fait sortir des puits de potentiel
- Une autre est de dire que le « Free streaming » des particules légères (WDM) aurait empêché les petites structures de se former au départ

Poulin et al 2023

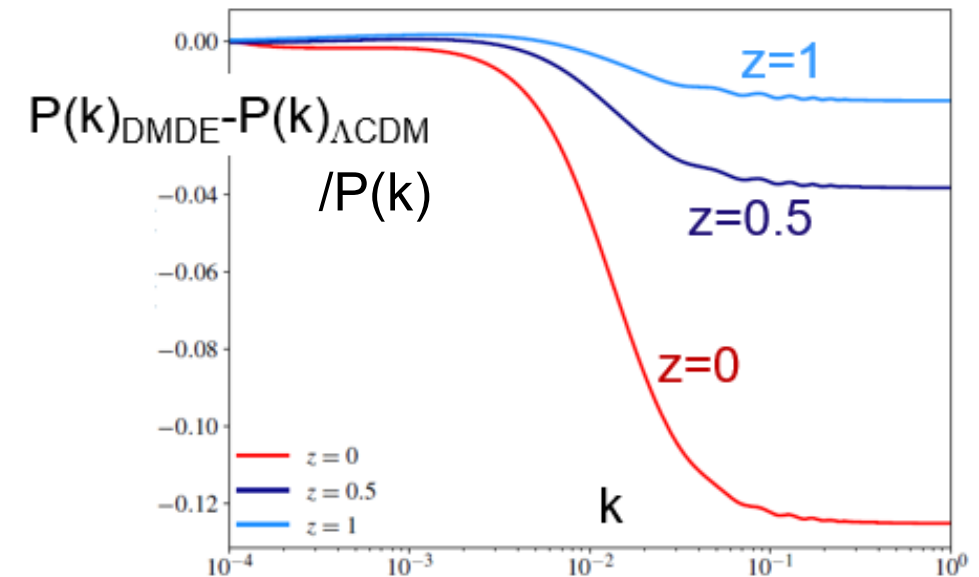
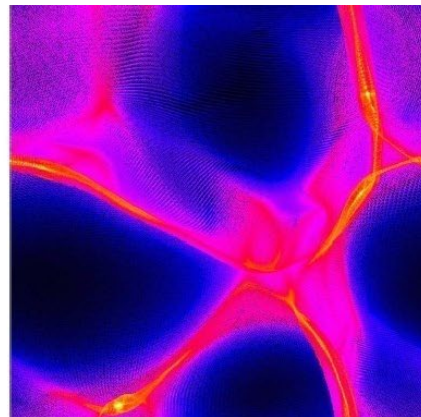
Froid (CDM)



Tiède (WDM)



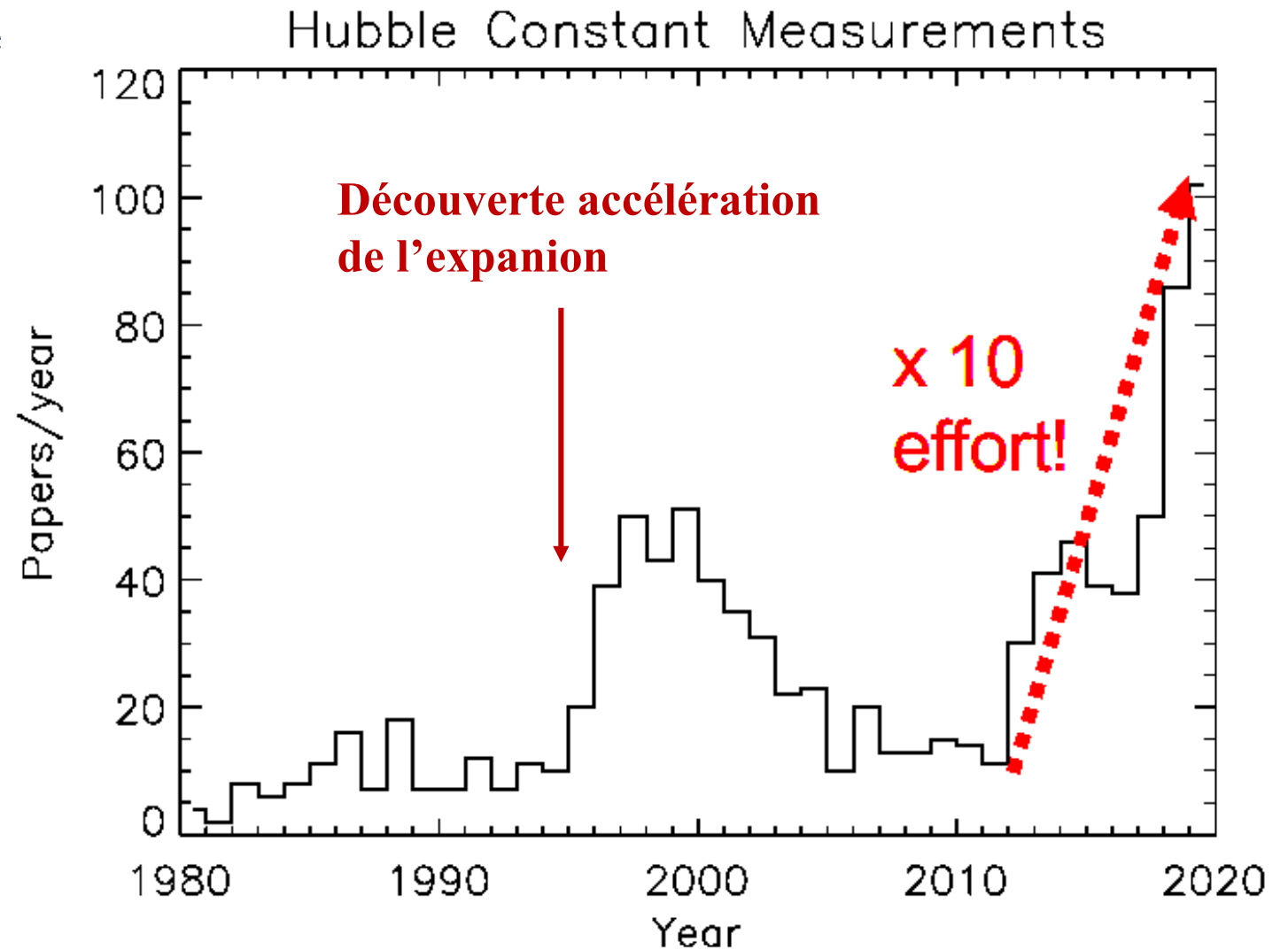
Chaud (HDM)



L'évolution de la constante de Hubble

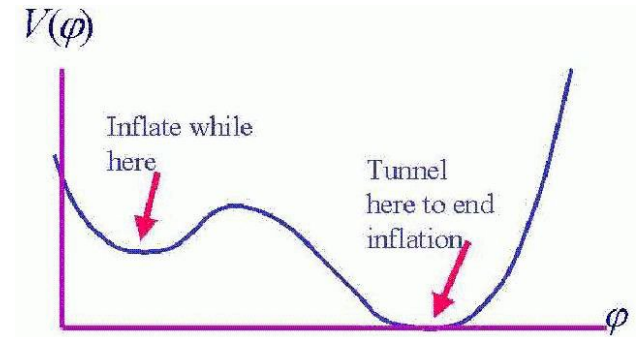
Le désaccord entre les valeurs de H_0 à diverses époques n'est pas une « crise », mais une opportunité d'apprendre la nouvelle physique, contrôlant notre univers

Notamment 95% de secteur sombre



Sources possibles pour l'énergie noire

- Brisure spontanée de symétrie et transition de phase (comme pour l'inflation primordiale)?
- Théorie des cordes: beaucoup prédisent l'existence d'un champ scalaire (**le dilaton**) dans la limite des basses énergies, semblable à un inflaton
- **Quintessence** (ϕ) serait un pseudo-boson de Nambu-Goldstone, avec un potentiel sinusoidal et par nature une faible masse et de faibles interactions
- Champ de **Kinetic-essence**: essai de concilier matière noire et énergie sombre. Champ effectif de tachyons (provenant de l'inflation), et Gaz de Chaplygin
- **Caméléons avec écrantage, Galiléons et mécanisme de Vainshtein**



Caméléons comme énergie noire

Champ scalaire avec **écranage**

Si la particule est sans masse, et que le couplage est fort avec la gravité

→ Violation du principe d'équivalence

Particules dont la masse varie en fonction **de l'environnement**.

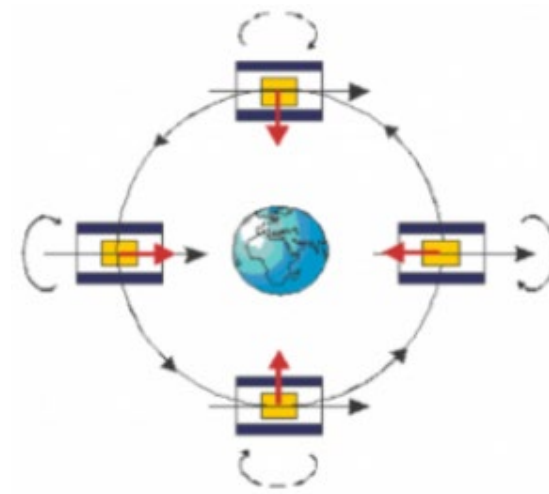
Ils acquièrent **Masse_{eff}** avec la densité: grande sur Terre (portée 1mm)
moindre dans le système solaire, avec une plus grande portée (10 000 AU).

A grande échelle, quasi nulle, portée bien plus grande (> kpc)

→ Échappent à la détection sous forme de 5ème force

Mécanisme semblable à celui de Damour-Polyakov (1994)

pour le **dilaton**, qui se découple de la matière à haute densité



Microscope
déviaton $< 10^{-15}$

Détection par l'Effet Casimir Dynamique (DCE)

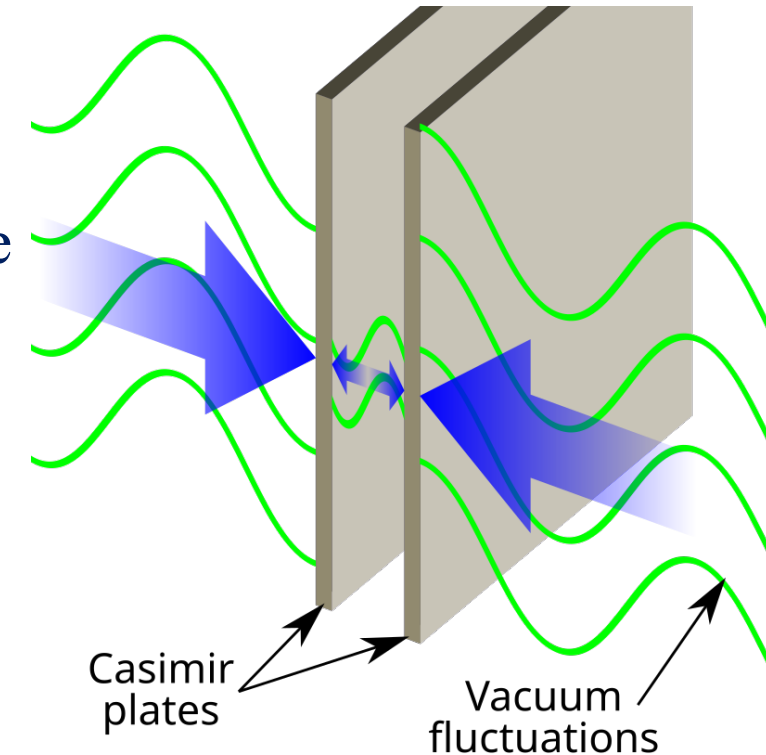
Dans une cavité résonante, vide, les photons peuvent se réfléchir

Paroi mobile → création de particules, Champ scalaire quantique

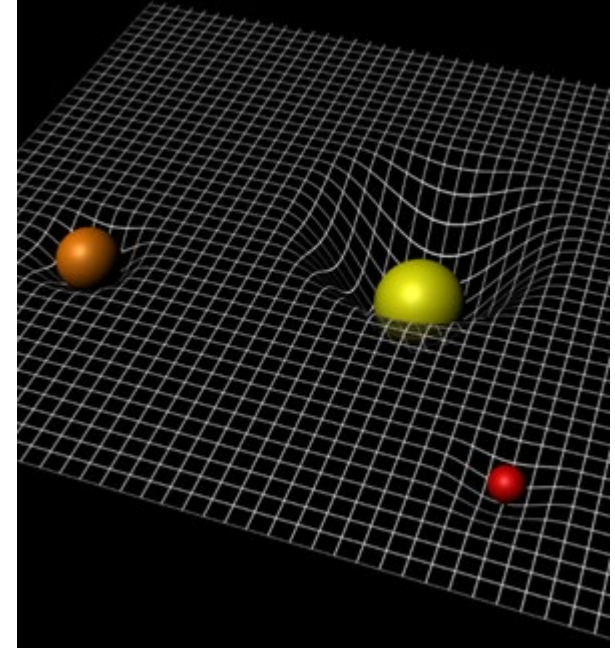
Possibilité de créer des photons, et aussi des fermions

La présence de caméléons empêchent ces particules d'être créées

Applicable à tout autre champ scalaire, avec effet d'écrantage



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 $f(\mathbf{R})$ modèles de gravité, modèles Tenseur-scalaire, monde des branes, inhomogeneities, etc.

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

R courbure scalaire

Ce qu'il est possible de changer

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

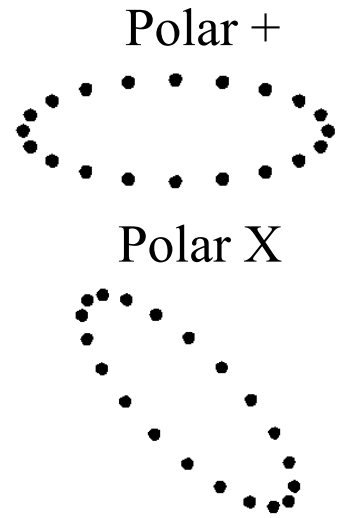
Au lieu d'une gravité de portée infinie, sans écrantage

→ **Graviton médiateur massif**

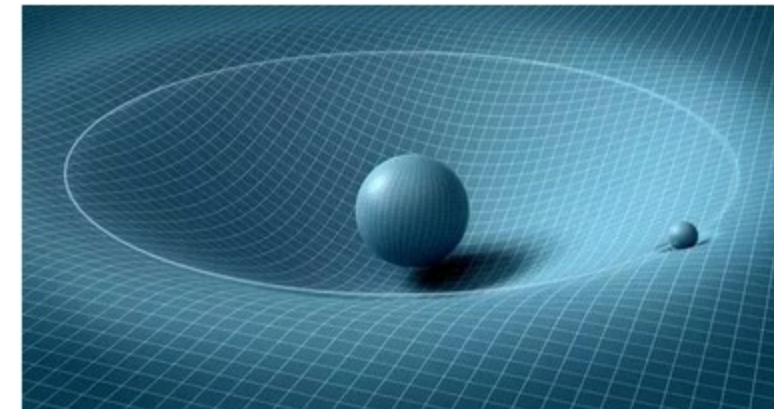
Interaction avec le graviton, boson sans masse et de spin 2 (tenseur) → **champs tenseur+scalaire, +vectoriel**

Gravité couplée de façon universelle à tous les autres champs

→ **Couplée seulement à la masse**



Ondes gravit: variation d'un quadrupole (pas de masse négative) Spin 2



Gravité massive: graviton

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

GMG: la masse du graviton provoquerait l'accélération de l'expansion, à $z \sim 0.5$

Mais **problème:** son extension non-linéaire contient des fantômes
→ de Rham, Gabadadze and Tolley (dRGT) en 2010-14

La limite lorsque $m \rightarrow 0$ ne redonne pas le modèle standard
(discontinuité de van Dam, Veltman, Zakharov: vDVZ, 1972)

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 $m \rightarrow 0$

De même Galiléons, scalaires ou vectoriels, peu favorisés par les tests observationnels



Claudia
de Rham

Rayon de Vainshtein

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

M31

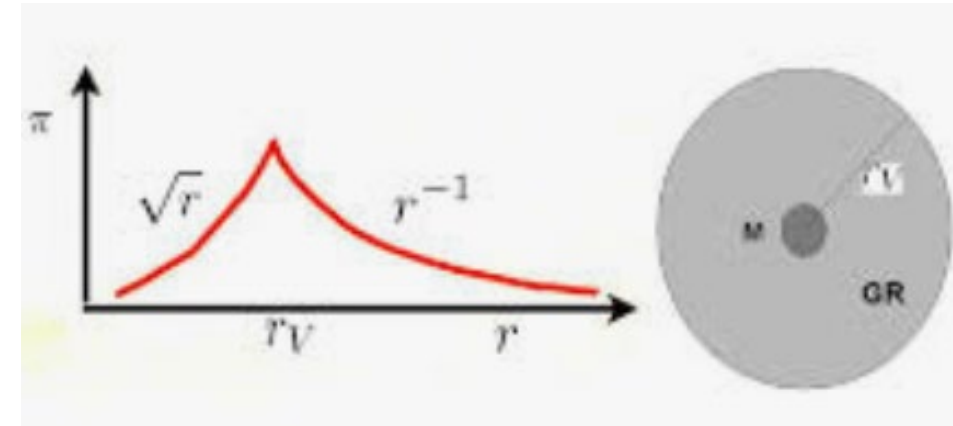


Les effets de la gravité massive autour des sources est non-linéaire en-dessous du rayon de Vainshtein (1972)

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

m graviton $< 10^{-33} \text{ eV}$ (longueur Compton = Rayon de l'Univers)
 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.

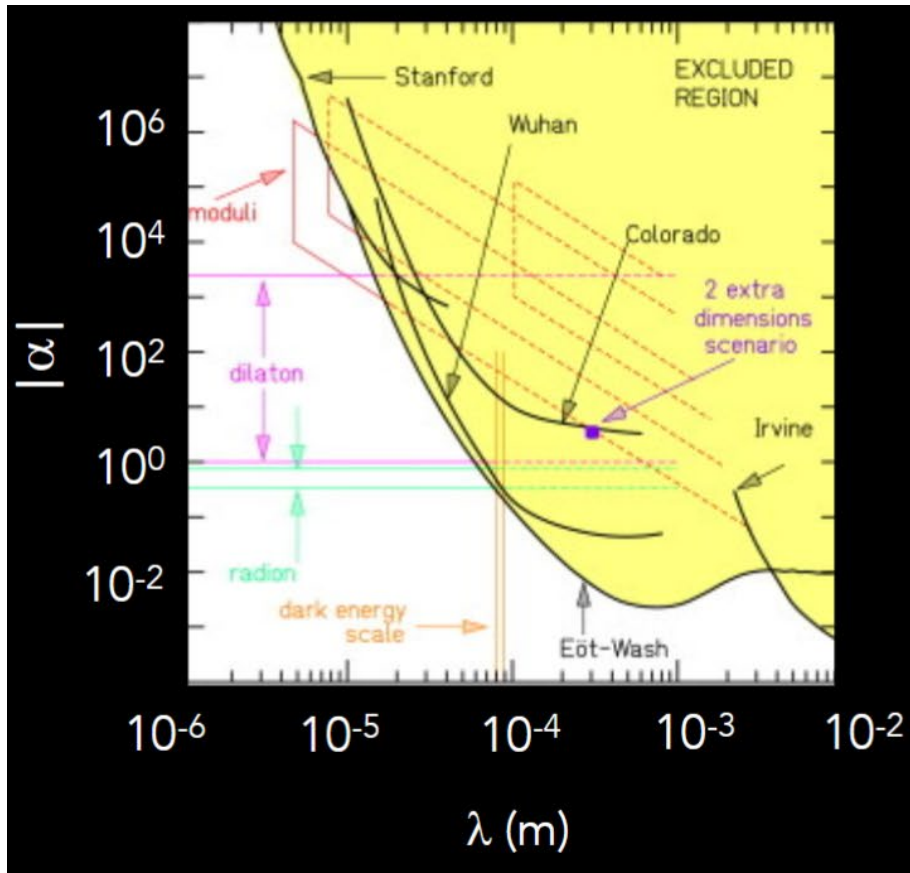


Pour le Soleil, le rayon de Vainshtein inclut tout le système solaire!
Ce phénomène, appelé **écranage de Vainshtein**, joue aussi pour un certain nombre de théories modifiées, qui doivent se conformer au modèle standard dans le système solaire

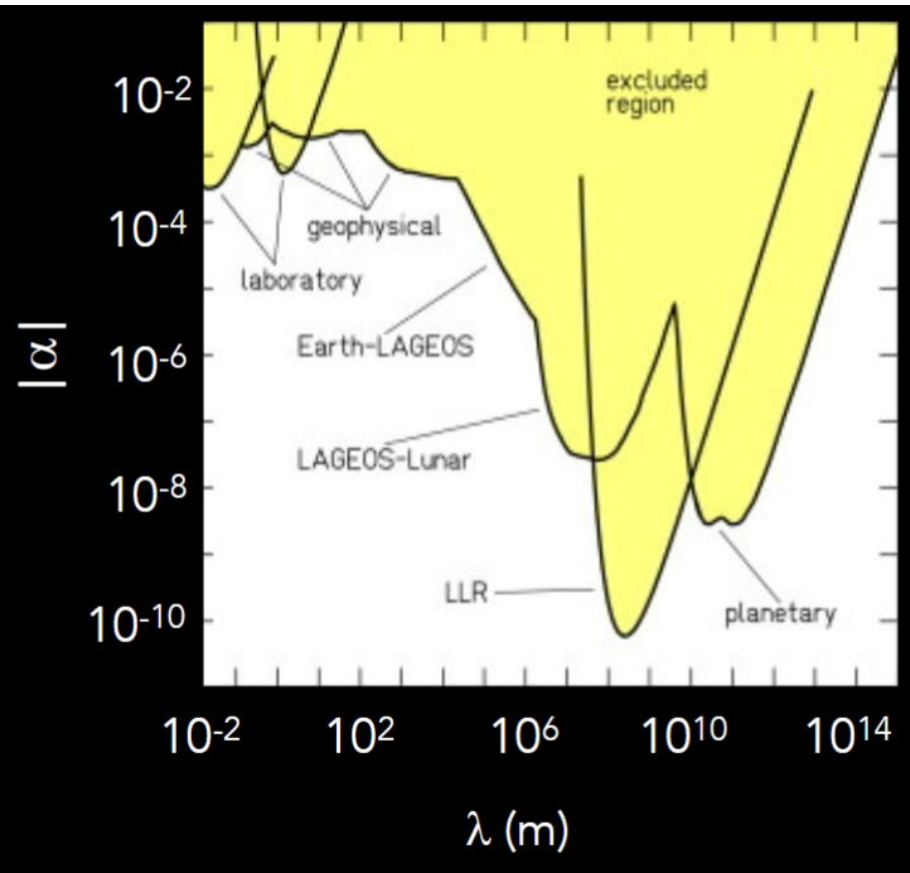
Tests de modifications de la gravité

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

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



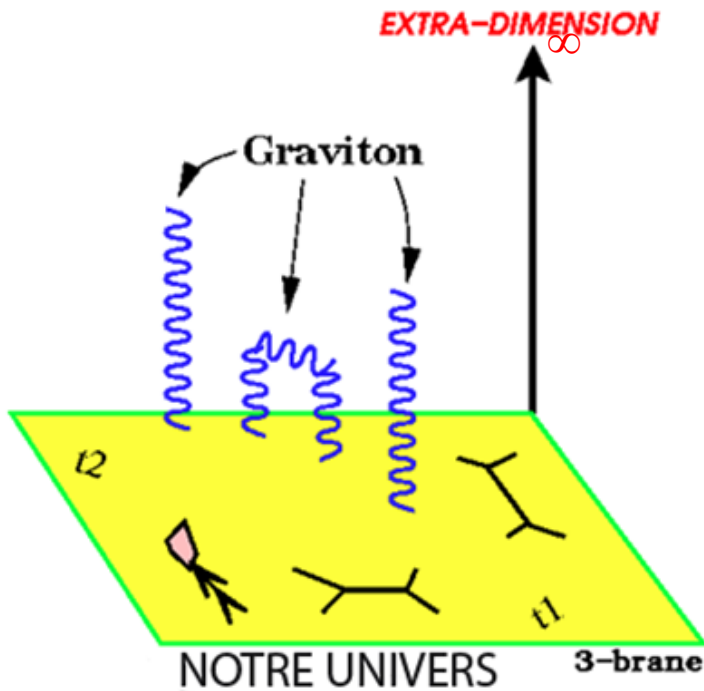
Adelberger et al 2009



Will et al 2006

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)

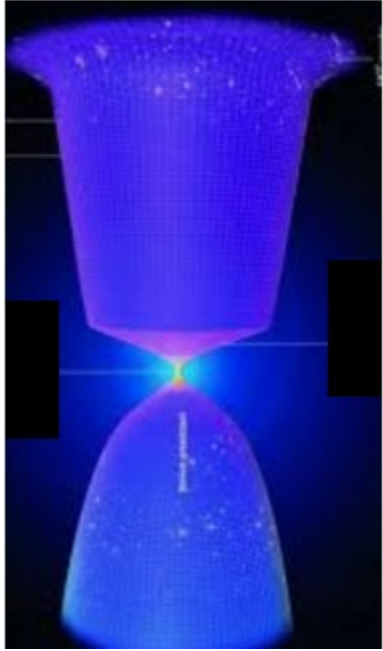
$$S = \int d^5x \sqrt{-g^{(5)}} R^{(5)} + L \int d^4x \sqrt{-g} R$$
$$H^2 - H/L = 8\pi G\rho / 3$$

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

L = échelle de transition

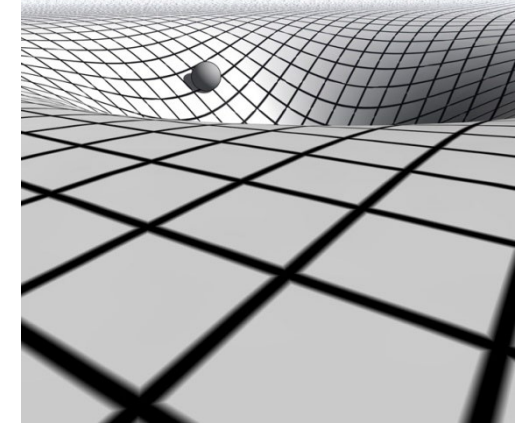
- 5D gravité domine à basse énergie/temps long/grandes échelles
- 4D gravité à haute énergie/univers primordial/petites échelles

Big-Bang

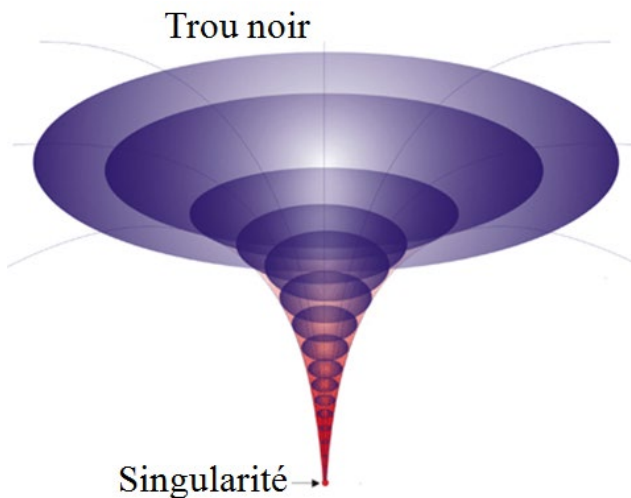


Espace-temps dépendant de la masse

L'espace-temps est créé lors du Big-Bang
Les trous noirs déchirent l'espace-temps
en une singularité
→ Théorie non-perturbative



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

Comment quantifier l'espace?

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

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

La géométrie quantique introduit une pression négative à petite échelle

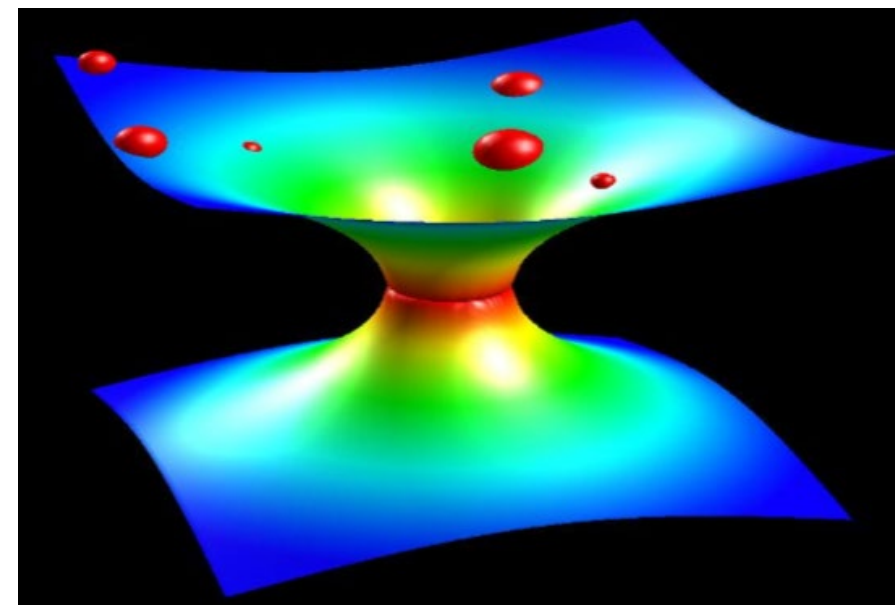
→ La gravité devient une force répulsive à l'échelle de Planck

La singularité du Big-Bang se transforme en rebond

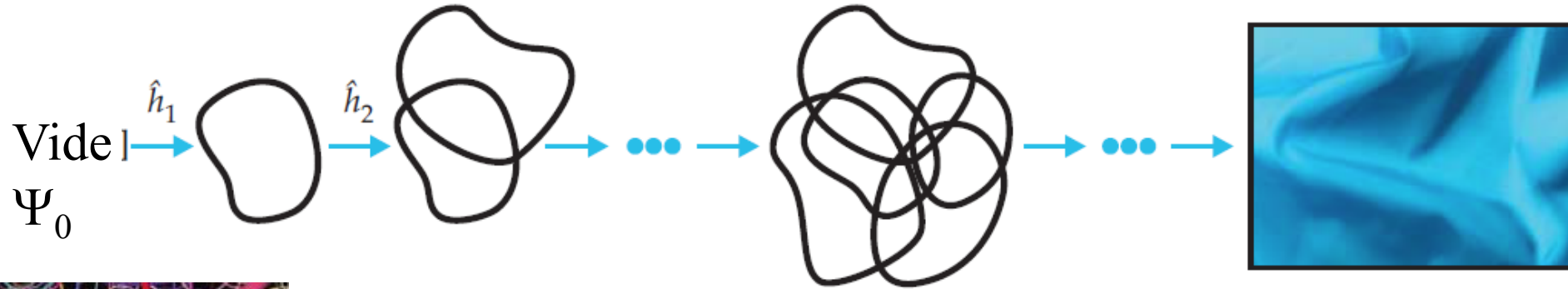
Modèle différent des modèles cycliques

Le temps n'existe plus au Big-Bang

L'espace-temps est troué,
constitué de morceaux connectés
Il existe un "vrai vide", sans
espace-temps (pas de fond)



Création de l'espace, par boucles entrecroisées



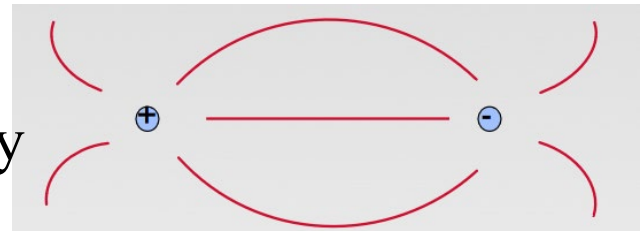
Réseau de spins, différents degrés d'excitation sont en différentes couleurs

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 la traverse.

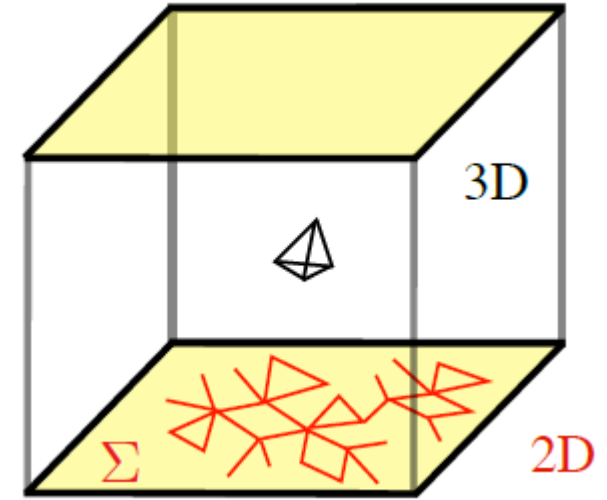
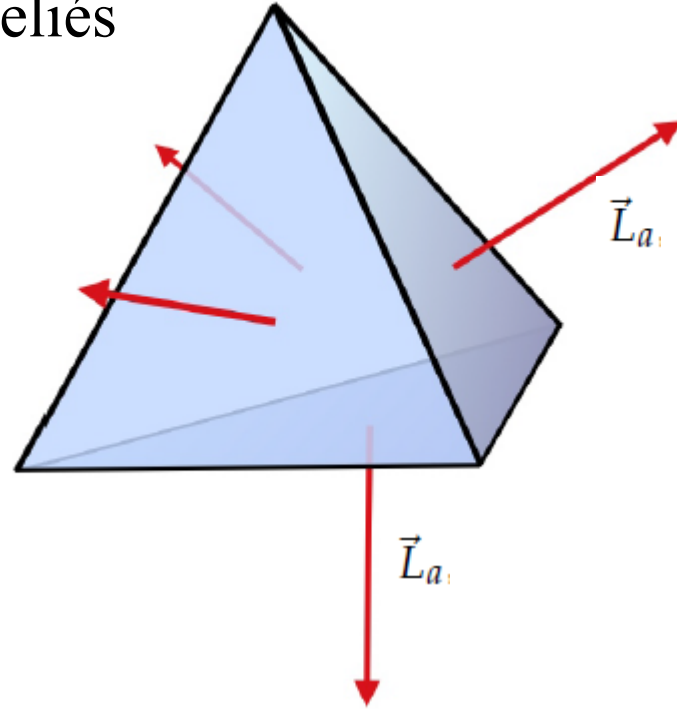
Lignes de Faraday



Théorie basée sur les spins

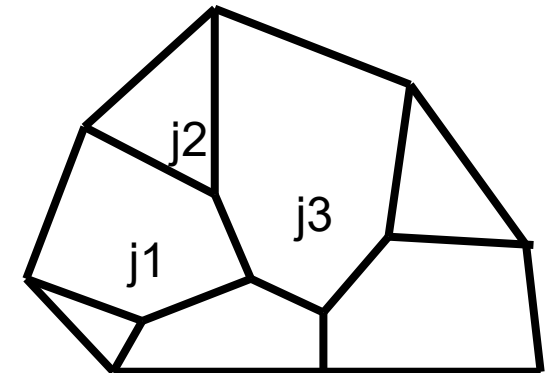
Les grains d'espace sont reliés par des liens: les spins

Ceux-ci servent aussi à représenter la courbure



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

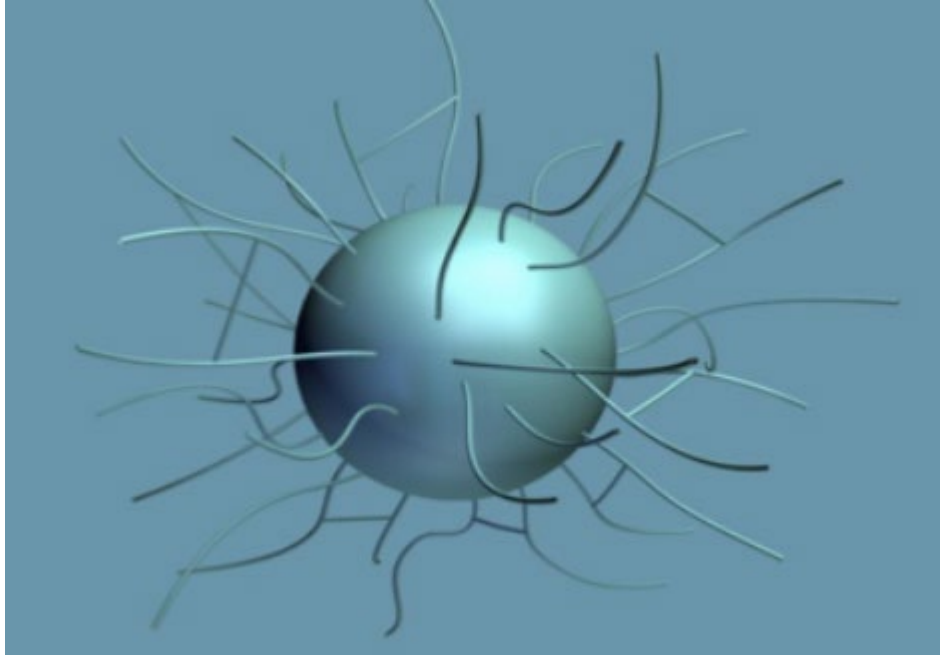
Comment vérifier cette structure à petite échelle?
Par ses implications uniquement. L'Univers amplifie
par l'inflation ces structures → laboratoire idéal

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)



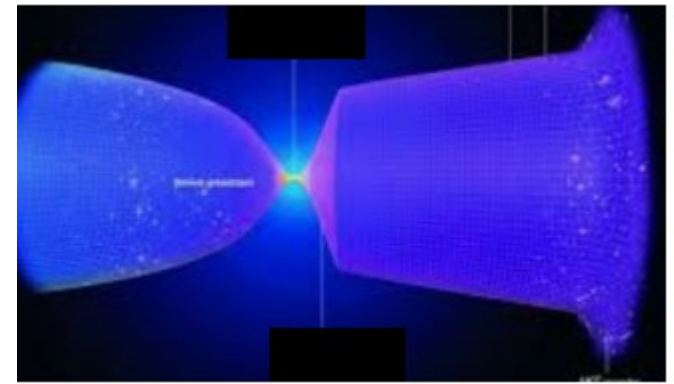
Entropie du trou noir



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

→ Pas de singularité en $r=0$

Big-Bang



De même que pour le Big-bang, le trou noir pourrait rebondir??

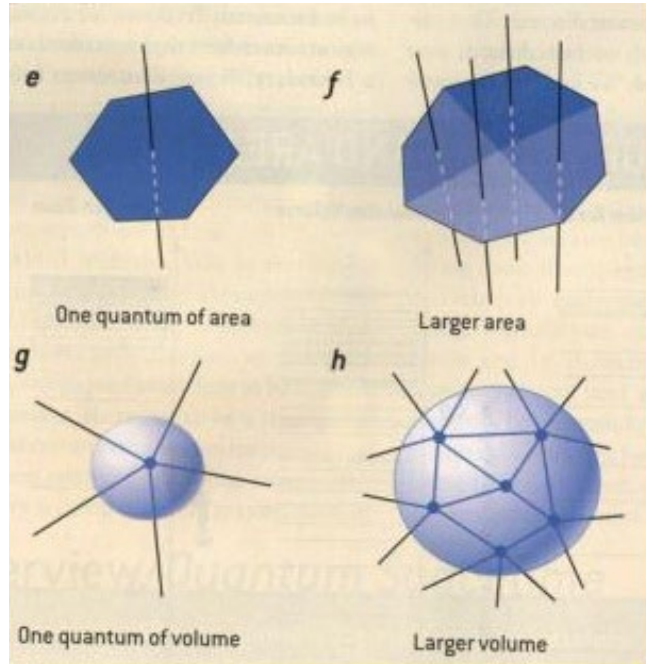
Horizon du trou noir et son réseau de spins (*Rovelli 2014*)

→ L'entropie converge vers celle de Bekenstein-Hawking

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

Réseau de spin, mousse de spin

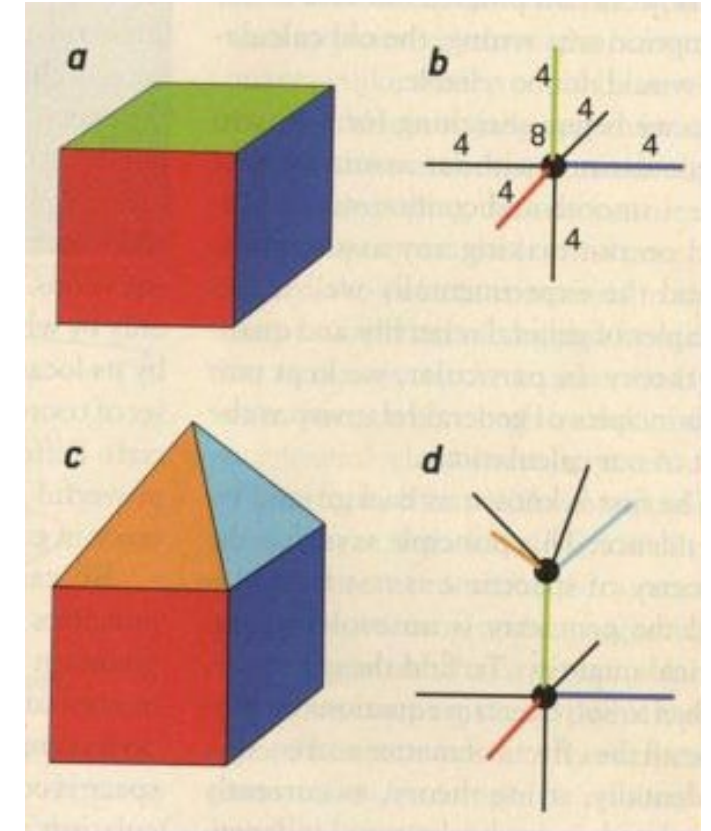
Le réseau de spin est la façon la plus claire de représenter la quantification de l'espace



Surface= une ligne
Volume= un noeud

un nuage de probabilités
de réseaux de spin
= mousse de spin

3D: réseau de spin (polyèdres)
+ 1D le temps: mousse de spins
(spin foam)

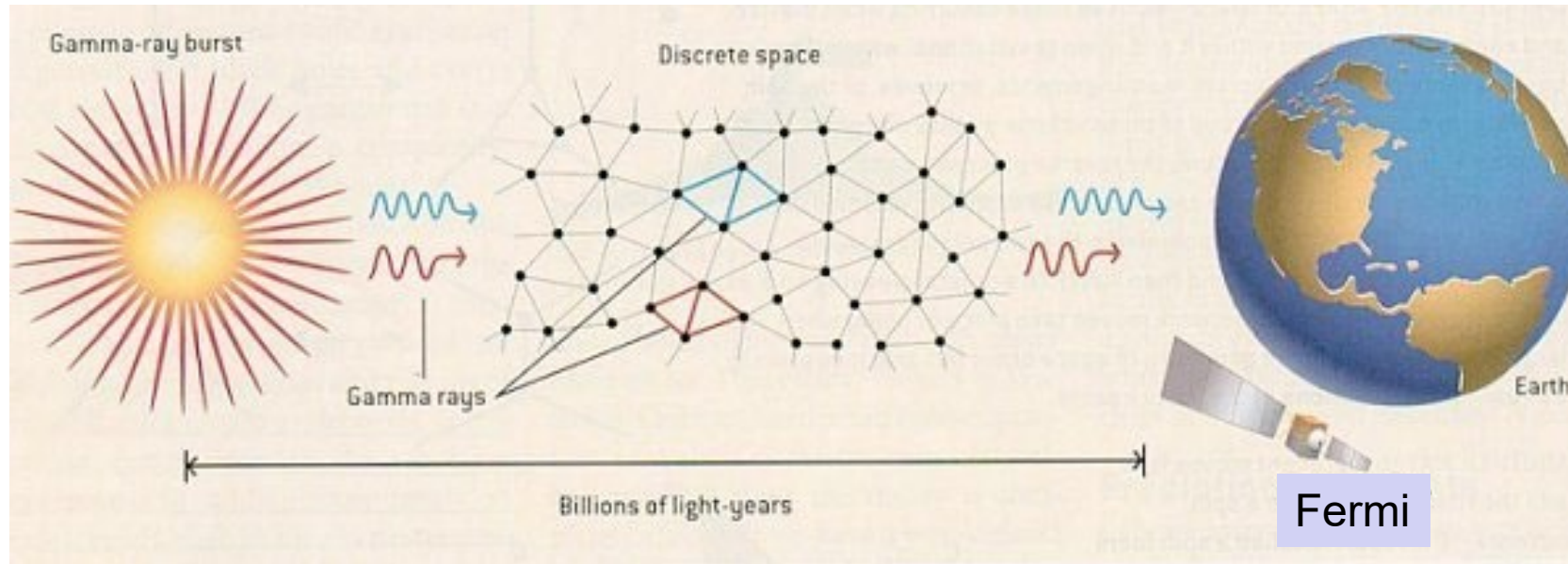


Une version covariante de la mousse de spin a été étudiée et démontrée (2008-11)

Engle, Perini, Rovelli, Livine, Freidel, Krasnov → pression négative, DE
→ existence de gravitons

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 ($z=0.9$)

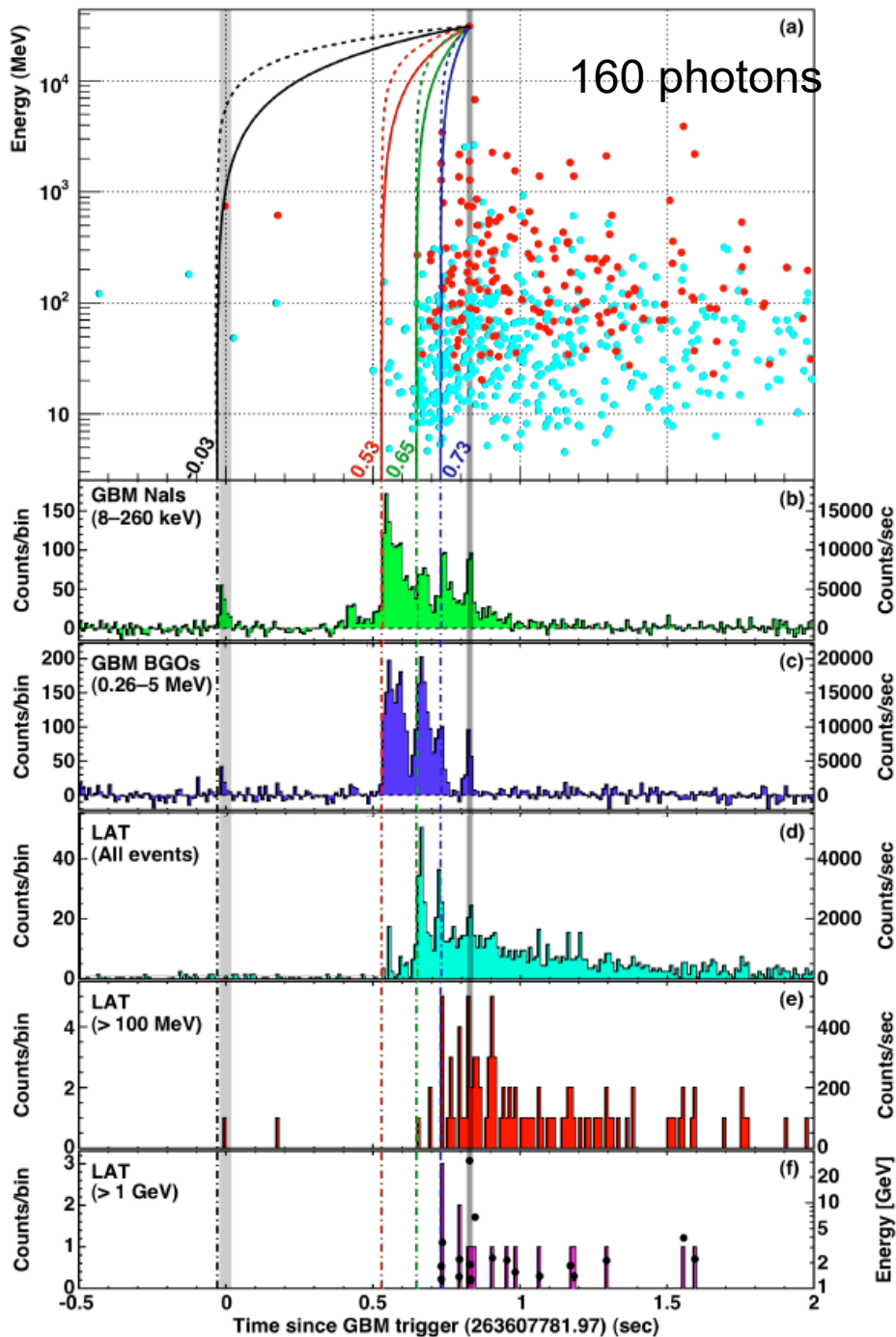
Facteur de Lorentz $\gamma > 1200 \rightarrow$ contraintes sur une possible dépendance linéaire en énergie de la vitesse des photons (violation de l'invariance de Lorentz)

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

Fermi collaboration 2009

GRB090510

Dépendance entre Energie des photons
et leur temps d'arrivée,
Photons de 30.5 GeV reçus



→ 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 une 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

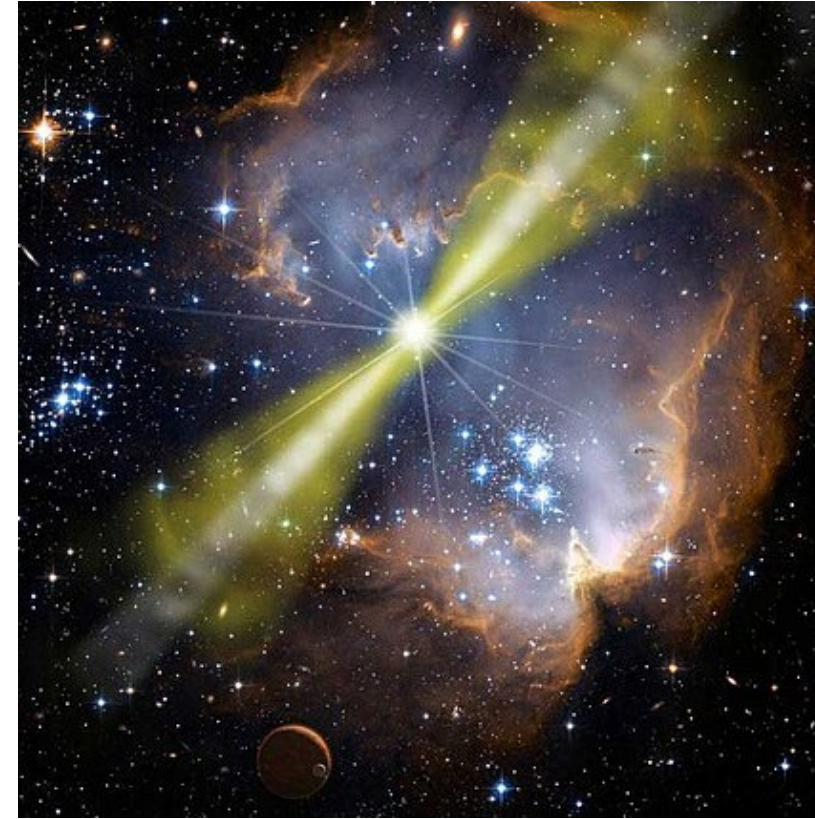
Aucune violation de Lorentz n'a été détectée, $v=c$, et

$$M_{\text{QG}} \gg M_{\text{p}}$$

Autrement dit, l'échelle quantique $<$ échelle de Planck

Ou alors $n \neq 1$

Vasileiou et al 2013



GRB221009A: le plus brillant des GRB

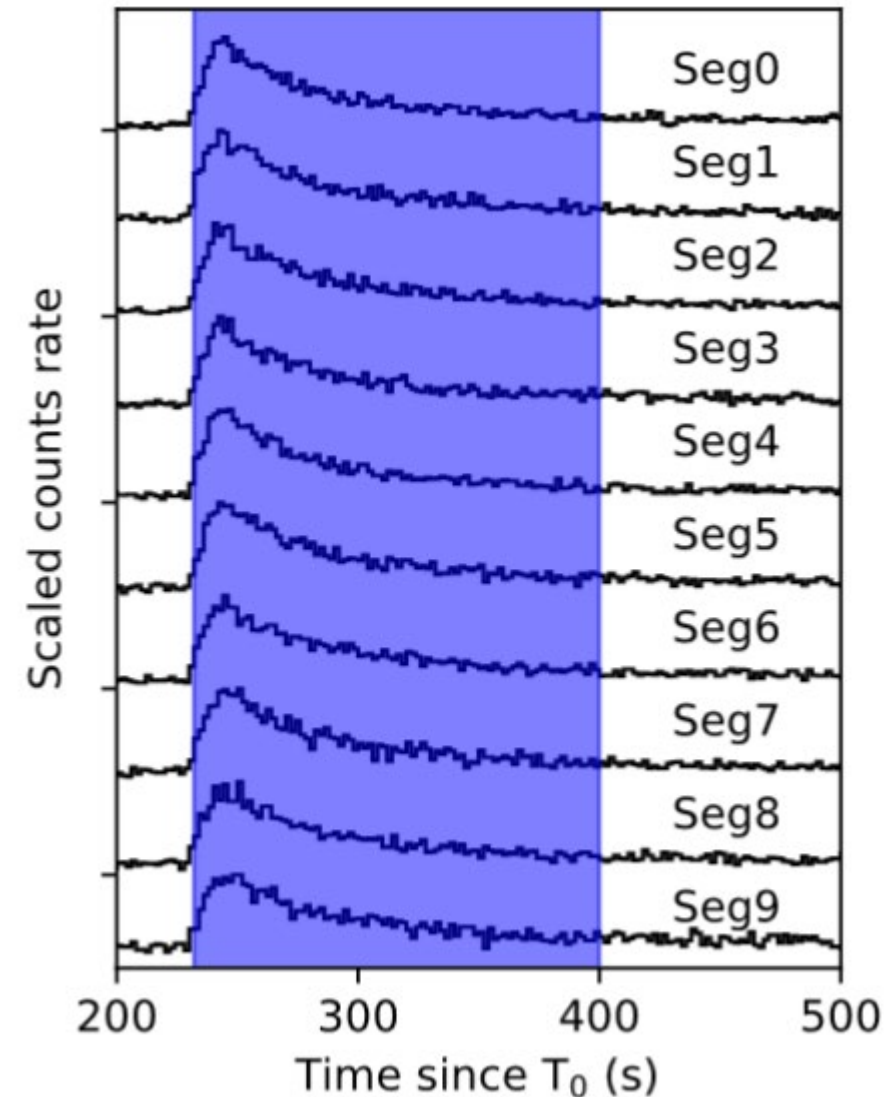
Meilleure contrainte, obtenue par *Cao et al 2024*

Pas de dépendance (E_{phot}) de la vitesse de la lumière dans le vide— Photons de 13-18 TeV

→ Pas de violation de l'invariance de Lorentz (LIV) prédite par la théorie de la gravité quantique à boucle

Ils améliorent les meilleures limites précédentes par des facteurs de 5 à 7

Echelle de Planck $E_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c^5/G} \simeq 1.22 \times 10^{19}$ GeV

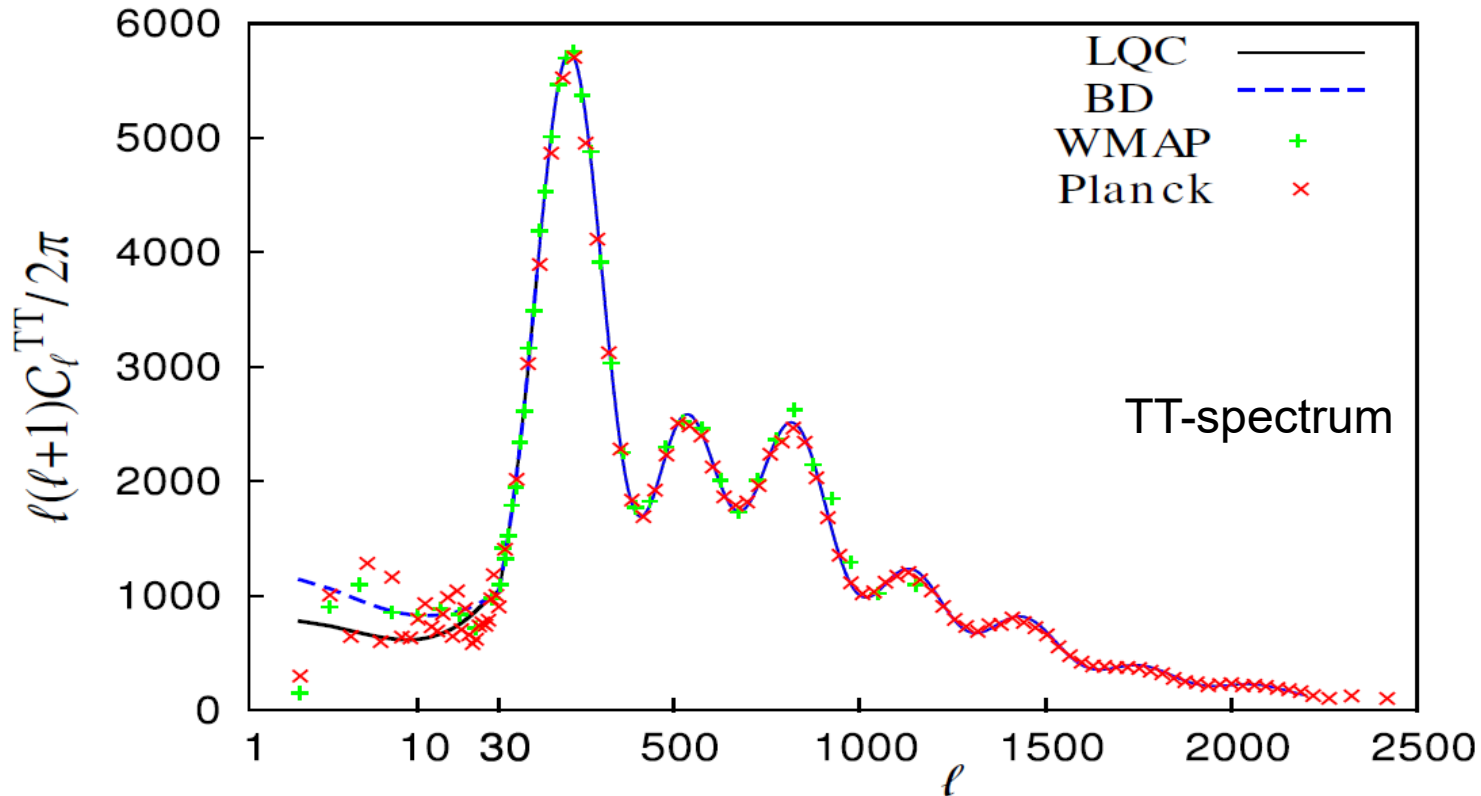
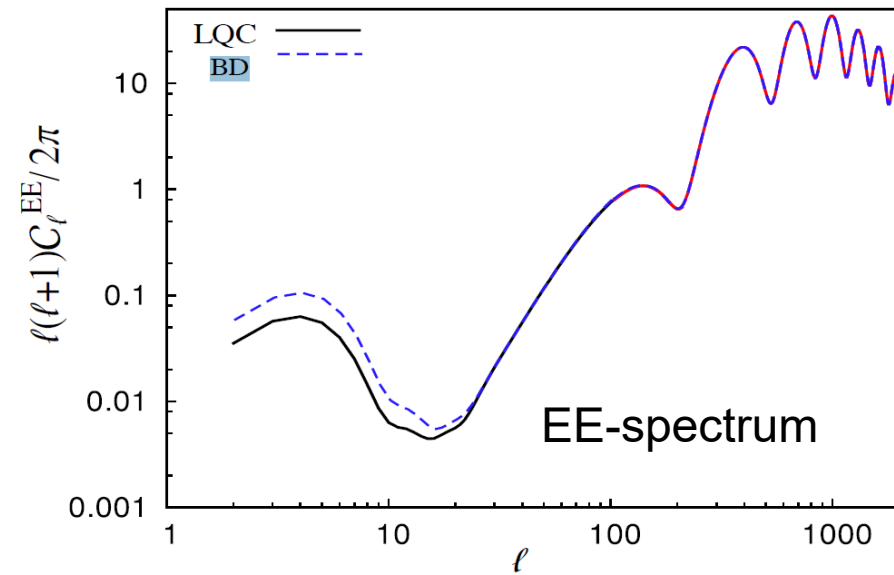


Prédictions cosmologiques

Anisotropies du CMB: puissance
supprimée à $\ell < 30$ (*Ashtekar & Gupt 2017*)

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

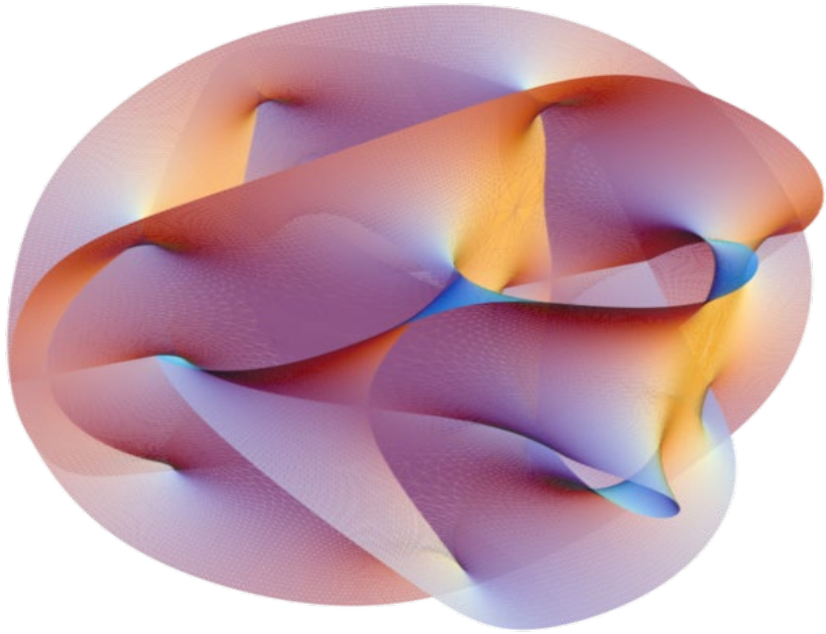
Mais: variance cosmique!



BD vide de
Bunch-Davies (1978)
=
Modèle standard

Gravité quantique: Deux théories

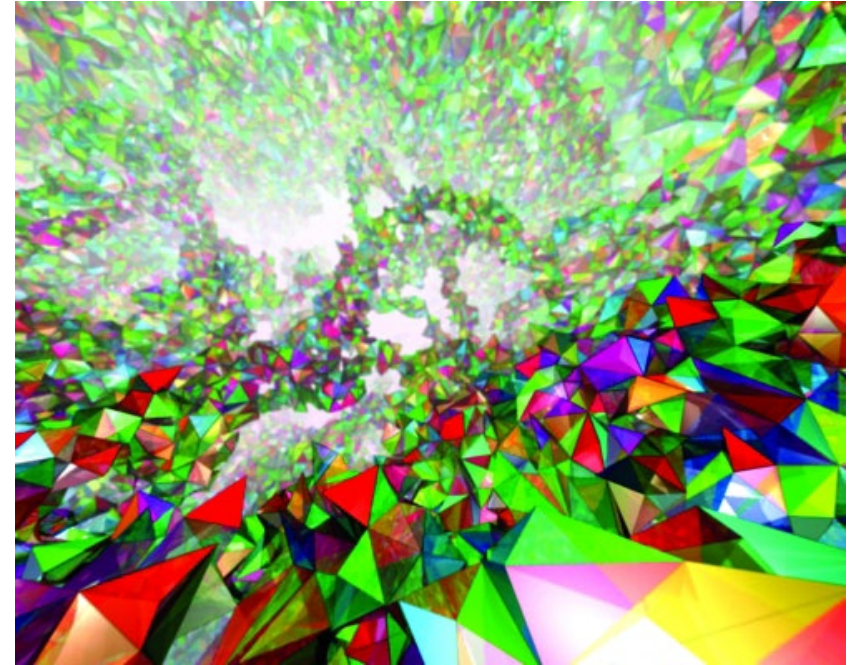
→ Théorie des supercordes



espace de Calabi-Yau, où les dimensions supplémentaires sont repliées (échelle de Planck)

→ Espace lisse et plat à grande distance
Multiples dimensions

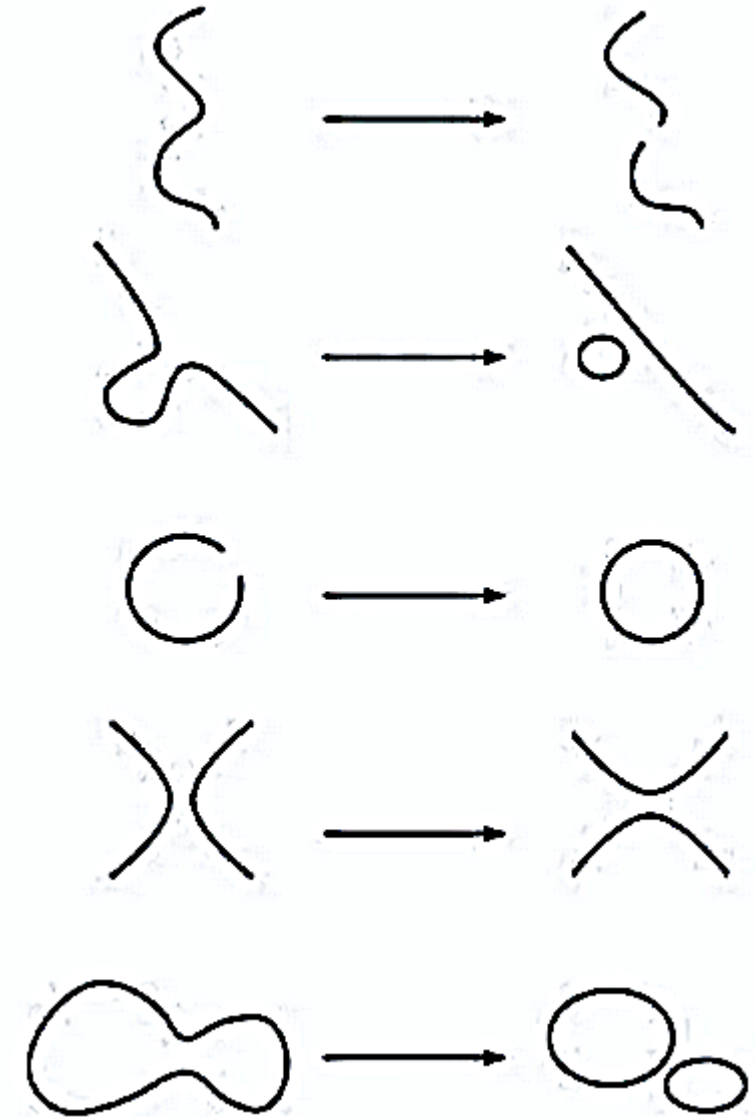
→ Gravité quantique à boucles



→ Structure fractale, en grumeaux

Théorie des cordes

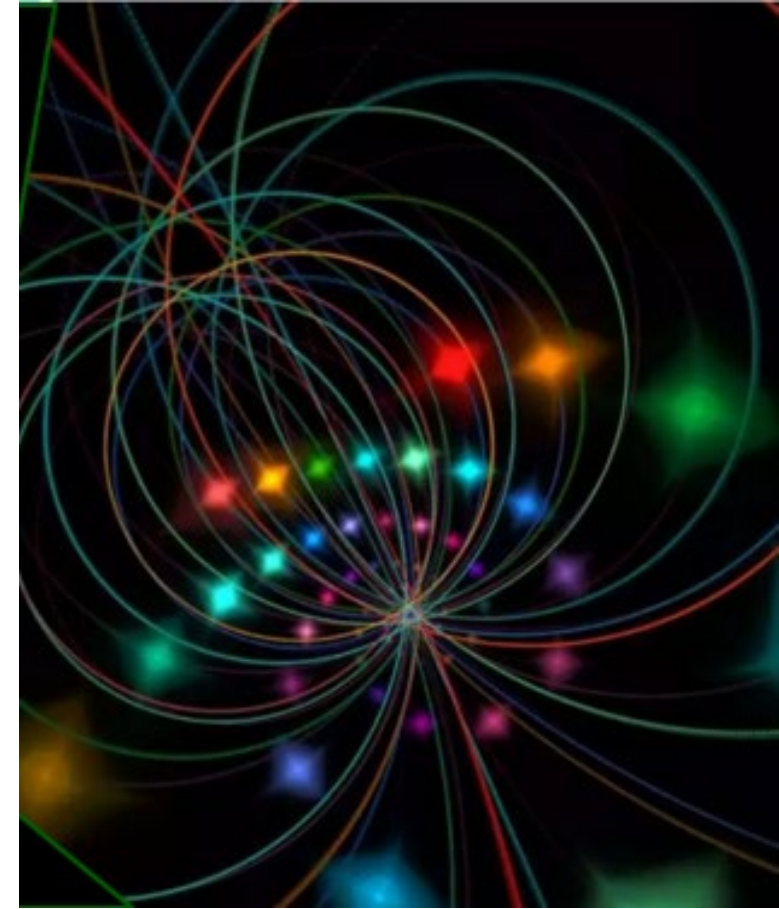
- Gravité traitée comme les autres champs quantiques: Graviton comme boson d'échange
- Toutes les particules élémentaires (quarks, ν , μ ..) sont des excitations de cordes
- Demande 26 dimensions, ou 10 en super-symétrie (supercordes)
- Suppriment les infinis dans les calculs (pas de particules ponctuelles, 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



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:

Théorie perturbative, 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

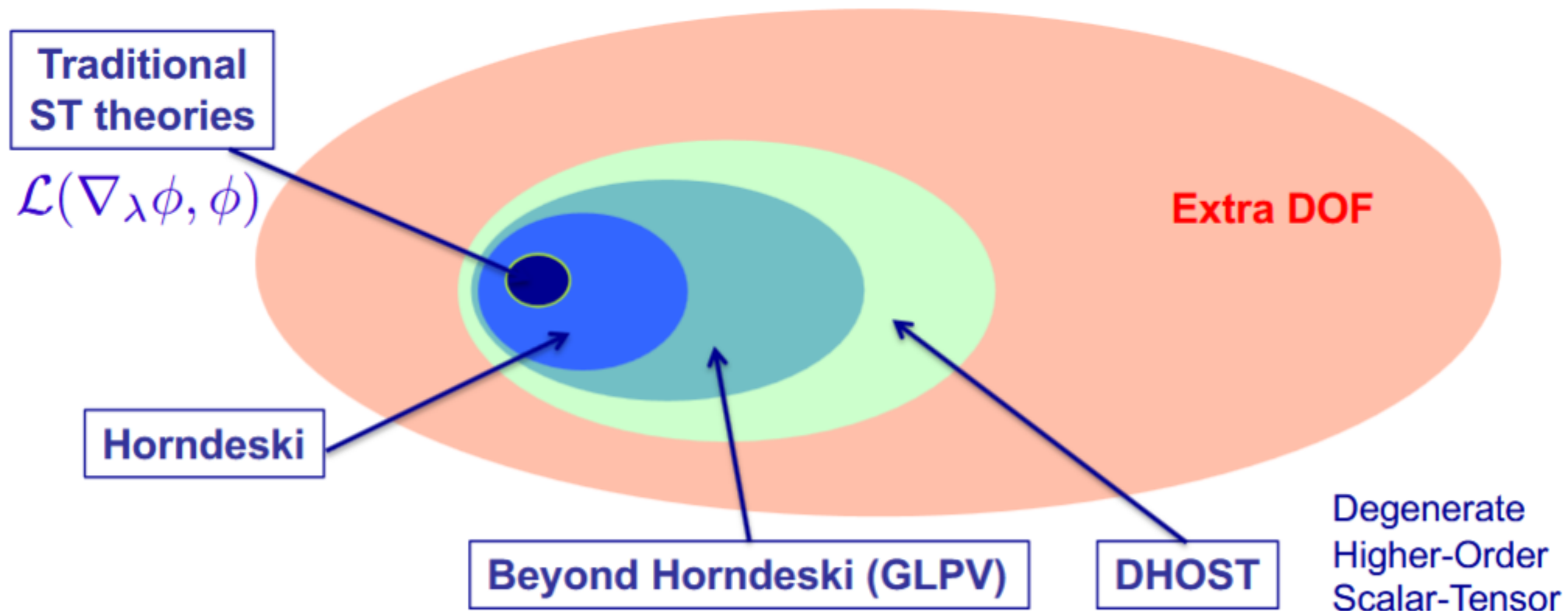


Gravité modifiée: Etat de l'art

En 2017, la contrainte $c_{\text{GW}} = c$ a beaucoup restreint les possibilités (GW170817)

DHOST est maintenant le cadre le plus général pour les théories ST avec un seul degré de liberté (DOF)

→ Tests possibles avec trous noirs, étoiles à neutrons, grandes structures



Conclusions

→ Les propositions sont nombreuses pour l'énergie noire
Quintessence, K-essence, gaz de Chaplygin, tachyons, caméléons..

→ Multiples théories de gravité modifiée, pour l'énergie noire!
 $f(R)$, Tenseur-scalaire Tenseur-vectorel (même TeVeS..)
Formalisme de Horndeski, DHOST pour généraliser

→ Episode précoce d'Énergie noire **EDE**,
Résoudre la tension de H_0 , de S8? Pas uniquement à $z > 1000$

→ Théorie des cordes, ou théorie
quantique à boucle, qui crée son espace-temps

