

Colloque national dark energy – 2ème édition

Le coté obscur de la gravité
et l'accélération de l'Univers

Octobre 23-25 2018, Paris IAP

F Henry-Couannier
CPPM & Aix-Marseille Univ
fppt.com

Les théories de gravité avec versant obscur (DG) sont des extensions de la Relativité Générale visant un secteur anti-gravitationnel stable

J.P. Petit, Twin Universe cosmology, *Astrophys. Space Sci.* Vol. 226, pp 273, 1995. and many other articles

F. Henry-Couannier, Discrete symmetries and General Relativity, the Dark Side of Gravity, *Int.J.Mod.Phys*, vol. A20, no. NN, pp. 2341-2346, 2004.

F. Henry-Couannier, Dark Gravity, *GJSFR A*. Vol 13, Issue 3, pp 1-53, 2013.

S. Hossenfelder, Bimetric theory with exchange symmetry *Phys. Rev. D* 78, 044015, 2008.

M. Milgrom, Matter and twin matter in bimetric MOND, *MNRAS* 405 (2), pp 1129-1139, 2010.

Laura Bernard, Luc Blanchet, Lavinia Heisenberg Bimetric gravity and dark matter 50th Rencontres de Moriond, "Gravitation: 100 years after GR", 2015

De l'indépendance de fond à la Gravité Obscure (DG)

Jusqu'où pouvons nous aller ?

$$\text{RG} : g_{\mu\nu}$$

$$\text{DG} : g_{\mu\nu} \text{ et } \eta_{\mu\nu}$$

$$\text{Riem}(\eta_{\mu\nu}) = 0$$

$\Rightarrow g_{\mu\nu}$ a un jumeau, « la métrique inverse » $\tilde{g}_{\mu\nu}$

$$\tilde{g}_{\mu\nu} = \eta_{\mu\rho} \eta_{\nu\sigma} [g^{-1}]^{\rho\sigma}$$

$\Rightarrow (g_{\mu\nu}, \tilde{g}_{\mu\nu})$ est un champ Janus



De l'Action aux équations de champ de DG

L'Action doit respecter la **symétrie sous permutation** de $g_{\mu\nu}$ et $\tilde{g}_{\mu\nu}$:

$$\int d^4x (\sqrt{g}R + \sqrt{\tilde{g}}\tilde{R}) + \int d^4x (\sqrt{g}L + \sqrt{\tilde{g}}\tilde{L})$$

$$\delta g_{\mu\nu} \Rightarrow \delta S = 0$$



$$\sqrt{g}\eta^{\mu\sigma}g_{\sigma\rho}G^{\rho\nu} - \sqrt{\tilde{g}}\eta^{\nu\sigma}\tilde{g}_{\sigma\rho}\tilde{G}^{\rho\mu} + \mu \leftrightarrow \nu = -8\pi G(\sqrt{g}\eta^{\mu\sigma}g_{\sigma\rho}T^{\rho\nu} - \sqrt{\tilde{g}}\eta^{\nu\sigma}\tilde{g}_{\sigma\rho}\tilde{T}^{\rho\mu} + \mu \leftrightarrow \nu)$$

Forme contractée :

$$\sqrt{g}R - \sqrt{\tilde{g}}\tilde{R} = 8\pi G(\sqrt{g}T - \sqrt{\tilde{g}}\tilde{T})$$

Implications des équations de DG

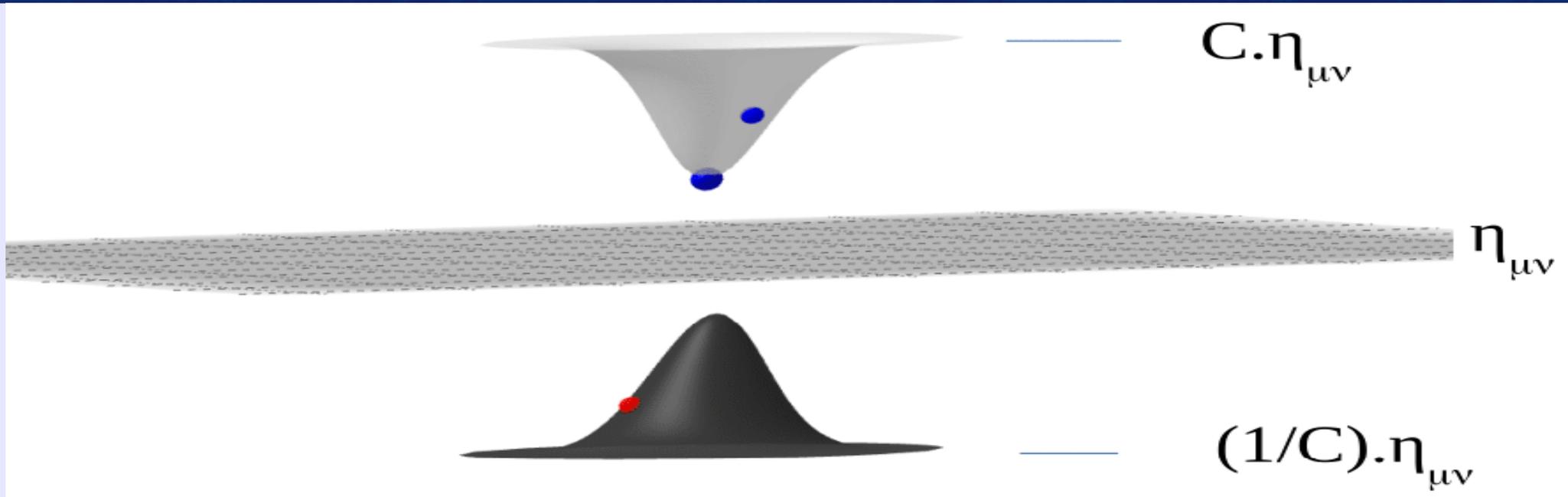
- DG est dépendante de fond et pourtant ses déviations de la RG peuvent rester arbitrairement petites à condition qu'un versant du champ Janus domine l'autre suffisamment.
- Interaction « ghost » entre Janus et sources \Rightarrow le champ Janus n'est pas quantique !
 - DG plus naturelle que RG en tant que théorie semi-classique* de la gravité
 - Stabilité de DG semi-classique : OK**
- Nouvelle symétrie discrète (permutation) vraiment fondamentale : sera interprétée comme une symétrie d'inversion du temps globale.

* <https://arxiv.org/abs/0802.1978> Mark Albers, Claus Kiefer, Marcel Reginatto, Measurement Analysis and Quantum Gravity : « Despite the many physical arguments which speak in favor of a quantum theory of gravity, it appears that the justification for such a theory must be based on empirical tests and does not follow from logical arguments alone »

** <https://arxiv.org/pdf/1401.4024.pdf> V. A. Rubakov, page 8 : Gradient, tachyonic and ghost instabilities in scalar-tensor theories : « fo ghosts, background is QM unstable but classically stable »

La solution statique isotrope

Animggb



- Antigravité sans « run away » !
- Le C asymptotique compte : RG correspond à C infini

La solution statique isotrope

C=1

DG:

$$g_{ii}(r) = A = e^{2MG/r} \approx 1 + 2\frac{MG}{r} + 2\frac{M^2G^2}{r^2}$$

$$-g_{00}(r) = \frac{1}{A} = e^{-2MG/r} \approx 1 - 2\frac{MG}{r} + 2\frac{M^2G^2}{r^2} - \frac{4}{3}\frac{M^3G^3}{r^3}$$

C=∞

RG (Schwarzschild) :

$$g_{ii}(r) = \left(1 + \frac{MG}{2r}\right)^4 \approx 1 + 2\frac{MG}{r} + \frac{3}{2}\frac{M^2G^2}{r^2}$$

$$g_{00}(r) = \frac{\left(1 - \frac{MG}{2r}\right)^2}{\left(1 + \frac{MG}{2r}\right)^2} \approx 1 - 2\frac{MG}{r} + 2\frac{M^2G^2}{r^2} - \frac{3}{2}\frac{M^3G^3}{r^3}$$

- Pas d'Horizon
- Zero ondes Gravitationnelles

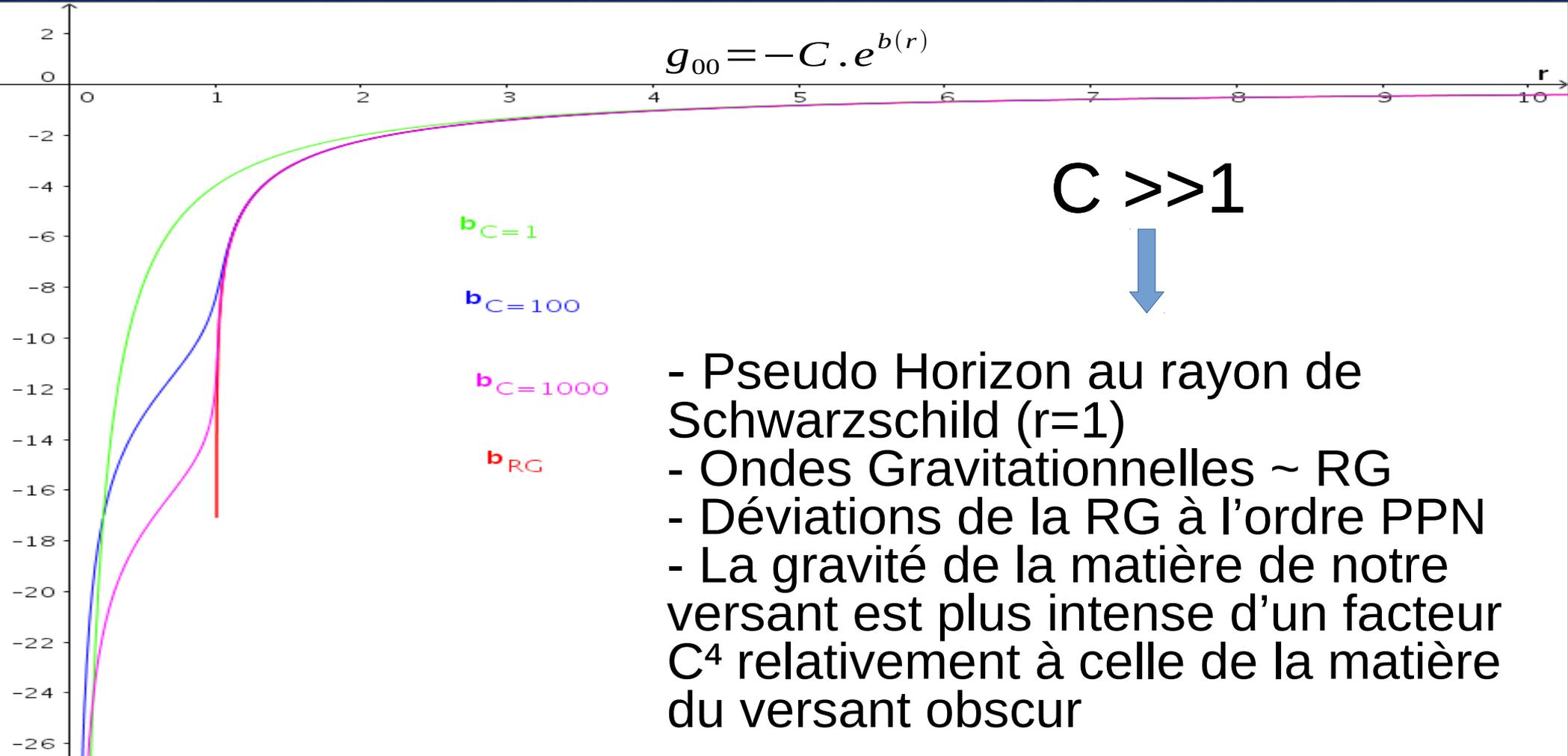
$$\tilde{h}_{\mu\nu} = -h_{\mu\nu} + O(h^2)$$

$$2(R_{\mu\nu}^{(1)} - \frac{1}{2}\eta_{\mu\nu}R_{\lambda}^{(1)\lambda}) = -8\pi G(T_{\mu\nu} - \tilde{T}_{\mu\nu} + t_{\mu\nu} - \tilde{t}_{\mu\nu})$$

→ 0

- Déviations de la RG à l'ordre PPN seulement

La solution statique isotrope



Equation Cosmologique

- La solution Homogène & isotrope du champ Janus est spatialement plate et statique : C était effectivement une constante !
⇒ On introduit un champ Janus scalaire- η homogène pour la cosmologie :

$$g_{\mu\nu} = \Phi \eta_{\mu\nu} \text{ and } \tilde{g}_{\mu\nu} = \frac{1}{\Phi} \eta_{\mu\nu} \quad \Phi(t) = a^2(t)$$

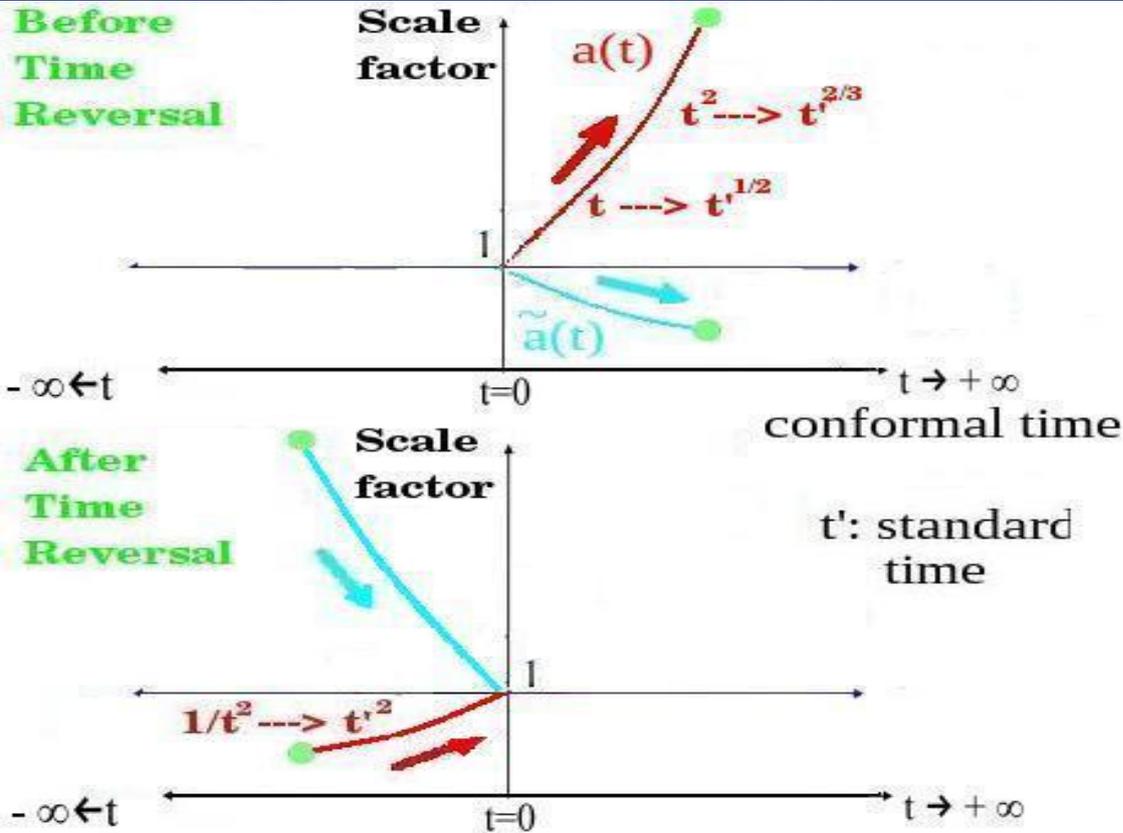
- Unique équation satisfaite par le facteur d'échelle :

$$a\ddot{a} - \tilde{a}\ddot{\tilde{a}} = \frac{4\pi G}{3} (a^4(\rho - 3p) - \tilde{a}^4(\tilde{\rho} - 3\tilde{p}))$$

$$\tilde{a}(t) = \frac{1}{a(t)}$$

Solutions Cosmologiques

Anim ggb



- Les facteurs d'échelle de Janus sont liés par une **symétrie globale d'inversion du temps conforme T** :

$$\tilde{a}(t) = \frac{1}{a(t)} = a(-t)$$

- Evolution continue mais aussi **permutation T discontinue** permise dès que :

$$\rho - 3p = \tilde{\rho} - 3\tilde{p}$$

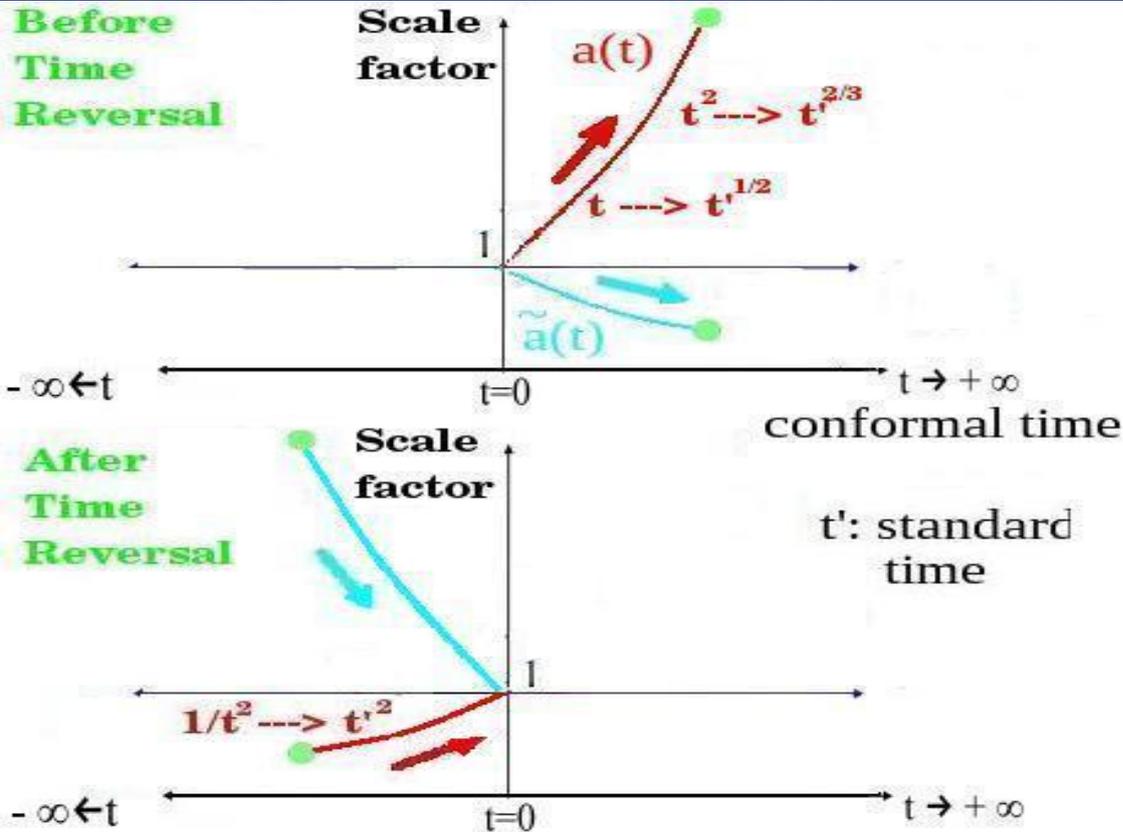


Inversion globale du temps : ne remonte pas le temps, mais saute au temps opposé !

Un Univers cyclique ?

Cosmologie de DG

Animggb



Hyp : $\rho \simeq \rho - 3p = \tilde{\rho} - 3\tilde{p} \simeq \tilde{\rho}$ s'est produit au redshift de transition T vers $a'(t') \sim t'^2$

Avec $H(t)$ continue à la transition et en supposant le même âge de l'univers que dans le cadre LCDM:

$$a'(t') \sim t'^\alpha \implies z_{\text{tr}} = \left(\frac{2/3 - \alpha}{1 - \alpha} \right)^\alpha - 1$$

$$\Rightarrow z_{\text{tr}} = 0.78 \text{ vs observé : } z_{\text{tr}} = 0.67 \pm 0.1$$



- ~ Même évolution du facteur d'échelle qu'en LCDM
- Sans énergie noire
- Inflation pas nécessaire pour obtenir $k=0$
- Sans singularité de Big Bang
- Matière noire cosmologique toujours requise
- Effets du versant obscur significatifs seulement depuis la transition t_{tr} ou au voisinage de $t=0$

Problème en suspens (traité après la conclusion)

- Nous avons en l'état deux théories séparées:
 - DG asymptotiquement statique décrivant correctement tous les aspects de la gravité excepté l'expansion
 - DG scalaire- η ne décrivant correctement que l'expansion
- Comment obtenir des Eq diff mixant de manière non triviale fond et perturbations (comme en RG) pour reproduire la phénoménologie du CMB ?
- Il faut unifier les deux théories ce qui est possible de plusieurs façons et conduit à de nouvelles retombées phénoménologiques fascinantes (effet Pioneer, phénoménologie MOND, nouveaux candidats à la matière noire).

Conclusion et perspectives

- DG évite par nature les singularités de Big-Bang et d'horizon de trou noir
- Accélération, $k=0$, homogénéité à grande échelle, asym matière/anti-matière
- Probable compensation de la gravité produite par les énergies du vide
- Perspectives (cf slides suivants):
 - Unification \Rightarrow Nouvelle phénoménologie riche et efficace

Jusqu'où avons nous pu avancer ?

- Dépendance de fond \Rightarrow  Violations d'EP
- + Ghost \Rightarrow OK* \Rightarrow  Quantiquement instable
- + Semiclassique \Rightarrow OK \Rightarrow OK** \Rightarrow  Evolution non bornée
- + Discontinu \Rightarrow OK \Rightarrow OK \Rightarrow OK \Rightarrow  Théorie non unifiée & incomplète

+ Dynamiques émergentes et/ou transferts de matière \Rightarrow OK !

* Effets de violation d' EP (liés à la présence de η) faibles en général , **instabilités classiques sans danger

\Rightarrow Fascinantes implications phénoménologiques et théoriques !

Symétries discrètes dynamiques

- Vue standard :

Symétries (cont & disc) \Rightarrow Action

Principe d'extrême action \Rightarrow Equations du mvt & équations de conservation

Pas de processus dynamiques associés aux symétries discrètes

- Vue étendue :

Symétries (cont & disc) \Rightarrow Action

Principe d'extrême action \Rightarrow Equations du mvt & équations de conservation

Symétries discrètes \Rightarrow Processus Discontinus

Symétries discrètes dynamiques

- 1) Symétrie discrète (permutation) et symétries continues déjà unifiées dans le cadre de DG
 - 2) Tout comme symétries discrètes (T&P) et continues d'espace-temps déjà unifiées dans le groupe de Lorentz
- 1) & 2) s'avèrent liés : la symétrie globale T est la symétrie sous permutation!

Symétries discrètes dynamiques \Rightarrow transitions discontinues en plus des habituels processus d'évolution continue déduits des Eq différentielles.

\Rightarrow Comble le fossé entre le discret et le continu en physique

\Rightarrow Ouvrira peut être la voie à une unification (compréhension) véritable des lois discrètes et non locales de la MQ au reste de la physique !

Termes d'énergie du vide dans les équations de DG

Terme source d'énergie du vide en DG:

$$(\sqrt{g}\Lambda - \sqrt{\tilde{g}}\tilde{\Lambda}) g^{\mu\nu}$$

S'annule pour $g_{\mu\nu} = \tilde{g}_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu}$ et $\Lambda = \tilde{\Lambda}$ (naturel)

⇒ pourrait bien rester nul quand le champ Janus commence à évoluer, peut être grâce à l'auto-ajustement des « cut-offs » pour préserver la compensation.

Unification de DG par échange adiabatique de particules ?

* adapté d'une idée originale de Prigogin et al

- Equations de conservation des champs de matière et radiation incluant transferts adiabatiques induits* par la gravité entre les deux métriques :

$$\begin{aligned} \nabla_{\nu} T_{\mu}^{\nu} \neq 0 & \implies \frac{\dot{\rho}}{H} = \left(\frac{\Gamma}{H} - 3\right)(\rho + p) \\ \tilde{\nabla}_{\nu} \tilde{T}_{\mu}^{\nu} \neq 0 & \implies \frac{\dot{\tilde{\rho}}}{\tilde{H}} = \left(\frac{\tilde{\Gamma}}{\tilde{H}} - 3\right)(\tilde{\rho} + \tilde{p}) \end{aligned} \quad \boxed{\tilde{\Gamma} = -\Gamma}, \tilde{H} = -H$$

- On remplace dans les équations de DG_Friedmann

$$\begin{aligned} a\ddot{a} - \tilde{a}\ddot{\tilde{a}} &= K(a^4(\rho - 3p) - \tilde{a}^4(\tilde{\rho} - 3\tilde{p})) \\ \dot{a}^2 - \dot{\tilde{a}}^2 &= 2K(a^4\rho - \tilde{a}^4\tilde{\rho}) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} a\ddot{a} &= K(a^4(\rho - 3p) + \frac{1}{2}(C + \tilde{C})) \\ \tilde{a}\ddot{\tilde{a}} &= K(\tilde{a}^4(\tilde{\rho} - 3\tilde{p}) + \frac{1}{2}(C + \tilde{C})) \end{aligned}$$

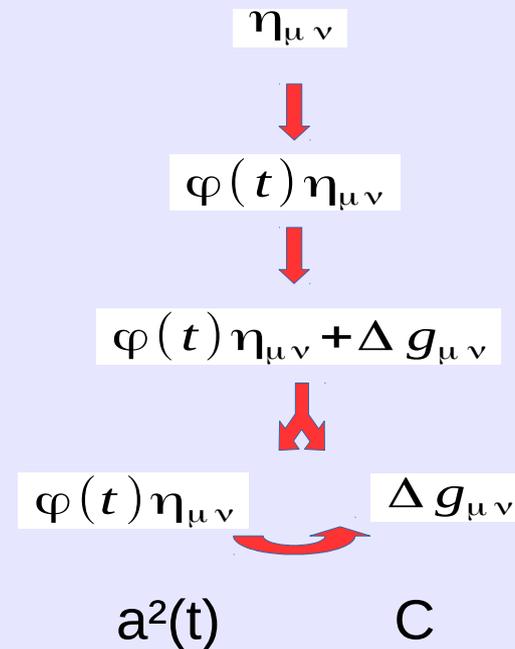
$$\begin{aligned} C &= a^4 \frac{\Gamma}{H} (\rho + p) \\ \tilde{C} &= \tilde{a}^4 \frac{\tilde{\Gamma}}{\tilde{H}} (\tilde{\rho} + \tilde{p}) \end{aligned}$$

$\Rightarrow \sim$ solutions usuelles valides si $\Gamma \approx 2H \frac{a\ddot{a}}{\tilde{a}\ddot{\tilde{a}}}$ (pour $a \ll \tilde{a}$)

Unification de DG basée sur les Dynamiques émergentes (ED)

Au fur et à mesure que l'univers évolue de nouveaux ddofs sont libérés :

- Non dynamique
- Scalaire-eta homogène
- Scalaire-eta + fluctuation non dynamique
- Dynamiques séparées



ED : Unification précoce de DG

- Pour $a^2(t) < \text{seuil fondamental (dont on postule l'existence)}$,

$$g_{\mu\nu} = \varphi(t) \eta_{\mu\nu} + \Delta g_{\mu\nu}$$

mais seul le scalaire $\varphi(t)$ est dynamique \Rightarrow unique équation

- Symétries liées à notre système de coordonnées privilégiées (plutôt qu'aux isométries liées aux sources) force la forme des métriques primordiales en Jauge de Newton:

$$d\tau^2 = a^2(t)((1 + 2\Psi)dt^2 - (1 - 2\Psi)d\sigma^2)$$

- \Rightarrow On trouve les mêmes équations du mvt pour le facteur d'échelle (ordre 0) et le potentiel (ordre 1) qu'en RG mais les modes rotationnels et radiatifs devraient être absents CMB.

ED : Unification tardive de DG

- $a^2(t) > \text{seuil fondamental}$ \Rightarrow brisure des symétries primordiales
 \Rightarrow $\varphi(t)\eta_{\mu\nu}$ et $\Delta g_{\mu\nu}$ vont jouer leur dynamique indépendamment
- $\Delta g_{\mu\nu}$ est asymptotiquement $\eta_{\mu\nu}$ en temps conforme dans certains domaines spatio-temporels
- $\Delta g_{\mu\nu}$ est asymptotiquement $\eta_{\mu\nu}$ en temps standard (défini grâce à $\varphi(t)\eta_{\mu\nu}$) dans d'autres domaines spatiotemporels.
 \Rightarrow Nouvelle phénoménologie liée à la présence de discontinuités de champ (effets de type Pioneer) à la frontière des domaines !

Des instabilités classiques ?

- Les facteurs d'échelle restent bornés grâce à l'inversion du temps
- Les perturbations linéaires du secteur obscur sont instables surtout en phase de contraction mais leur propre gravité est négligeable : supprimée d'un facteur C^4 ($\sim \text{factor_d_échelle}^8$) avant la transition en régime d'accélération.
- Ces perturbations ne peuvent commencer à croître sous leur propre gravité qu'après la transition en régime d'accélération.
- Les perturbations de gravité forte sont probablement toujours stables sur les deux versants grâce à $C > 1$ (resp $C < 1$) au voisinage des structures de notre versant (resp du versant obscur)

Problèmes avec la gravité semi-classique ?

- Cas I : La gravité classique déclenche les effondrements quantiques \Rightarrow pas de violation de la conservation de l'énergie-impulsion, ni violation des relations d'incertitude contrairement à l'argument souvent cité de Eppley & Hannah ...

voir <https://arxiv.org/pdf/0802.1978.pdf>

sinon :

- Cas 2A : Interprétation « de l'effondrement illusoire » de la MQ (MWI, décohérence ...) exclue car la gravité classique serait sensible aux superpositions non effondrées.
- Cas 2B : Interprétation réaliste de l'effondrement en MQ conduit à de possibles transmissions supra-luminiques. Soit un modèle précis plus local de l'effondrement quantique peut résoudre ce problème soit ... DG : les transmissions instantanées ne constituent plus une menace à la causalité dès qu'il existe un unique référentiel privilégié d'instantanéité pour tout effondrement !