L'Energie Sombre: un Problème de Physicien

Philippe Brax

IPhT Saclay

L’accélération de l’expansion de l’Univers est un problème de physique fondamentale:

Pourquoi?

La dynamique de l’expansion de l’Univers obéit à une loi ressemblant à la loi de Newton:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G_N}{3}(\rho + 3p)$$

Equation de Raychaudhuri

qui est une conséquence de la description de l’Univers utilisant trois ingrédients:

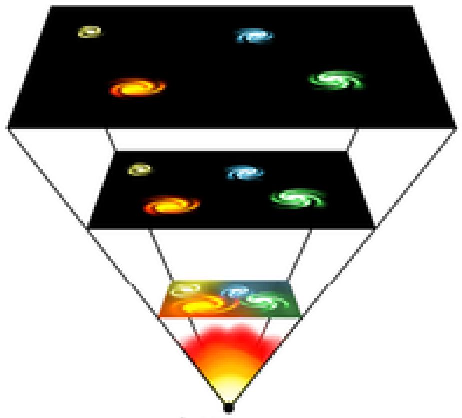
- La relativité générale
- Le principe cosmologique
- Quatre types d’énergie dans l’univers

Pour un Univers dominé par la matière (ou la radiation) qui vérifie une équation d'état:

$$p = \omega \rho$$

avec:

$$\omega = 0 \text{ ou } \frac{1}{3}$$



avec les hypothèses précédentes, l'Univers ne peut accélérer:

$$\ddot{a} < 0$$

en contradiction avec les observations de l'univers récent à bas décalage vers le rouge.

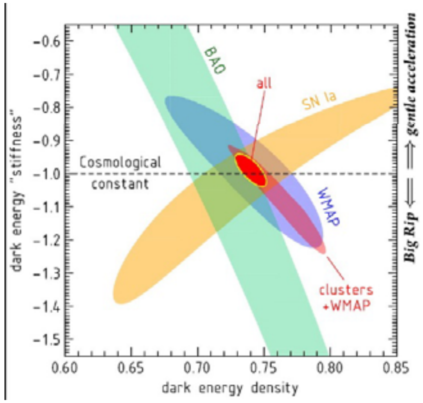
QUE FAIRE ?

Il suffit de supposer que l’Univers récent est en majorité constitué d’un fluide d’équation d’état

$$\omega_{DE} < -\frac{1}{3}$$

Comprendre, enfin essayer…, l’origine physique d’un tel fluide dominant le contenu en énergie de l’Univers va nous occuper le restant de cette exposé et occupe des centaines de physiciens à travers le monde depuis presque 20 ans.

Un excellent candidat est:



L’énergie du vide

Le premier réflexe est d’écrire l’intégrale première de la dynamique: l’équation de Friedmann

$$H^2 = (\frac{\dot{a}}{a})^2 = \frac{8\pi G_N}{3}(\rho + \rho_\Lambda) - \frac{k}{a^2}$$

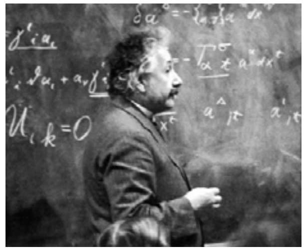
faisant intervenir une nouvelle forme d’énergie introduite par Einstein, la constante cosmologique et la courbure k=-1,0,1 spatiale de l’Univers (hyperbolique,plat,sphérique). Le fluide associé à une équation d’état -1:

$$p_\Lambda = -\rho_\Lambda$$

Einstein l’avait introduite pour realiser un modèle “Aristotélicien” de l’Univers: l’Univers d’Einstein.

Univers statique et sphérique:

$$\begin{cases} \rho_m = 2\rho_\Lambda \\ R = \sqrt{\dfrac{1}{8\pi G_N \rho_\Lambda}} \end{cases}$$



Dès les années 1910 Nernst, puis dans les années 1920 Pauli avaient pensé relier cette mystèrieuse constante cosmologique avec la nouvelle physique quantique:

$$\rho_\Lambda = \frac{1}{2}\sum_i \omega_i = \frac{1}{8\pi^2}\int_0^{m_e} dk\, k^2\sqrt{k^2+m_e^2}$$

venant de l'énergie de point zéro, l'énergie du vide, de l'ensemble des oscillateurs que la balbutiante théorie des champs associait à une des deux particules connues a l'époque: l'électron. Comme l'intégrale est divergente à l'infini, Pauli met une coupure Ultra-Violette (UV) à la masse de l'electron. Cela donne:

$$\rho_\Lambda \sim \frac{m_e^4}{32\pi^2}$$

et immédiatement donne un Univers d'Einstein de rayon plus petit que la distance terre-lune. Ce résultat a ensuite été "oublié" jusqu'à Zeldovich en 1969:

Univers d'Einstein supplanté par l'Univers dynamique

Malgré ceci, dès les années 1920, ce problème du calcul de l'énergie du vide aurait du apparaitre comme le problème fondamentale de la cosmologie. Il est possible d'apprendre beaucoup de physique en examinant le calcul de Pauli de près :

- ✓ Le calcul semble dépendre de la coupure UV.
- ✓ Le calcul devrait prendre en compte non seulement l'électron mais toutes la particules connues.
- ✓ La contribution du proton est plus grande que l'énergie de la matière depuis la BBN (Big Bang Nucleosynthesis) empêchant donc de comprendre la dynamique de l'Univers observable.

C'est donc une catastrophe. Les deux premiers points ont été compris dans les années 1950 avec le développement de la renormalisation en théorie quantique des champs:

$$\rho_\Lambda = \underbrace{\Lambda m_{\mathrm{Pl}}^2}_{\text{Constante cosmologique}} + \underbrace{\rho_{\mathrm{transition}}}_{\text{Transition de phase}} + \underbrace{\sum (2j+1)(-1)^{2j} \frac{m_j^4}{64\pi^2} \ln \frac{\mu^2}{m_j^2}}_{\text{Fluctuations quantiques}}$$

Il existe donc trois contributions dont la “chaleur latente” des transitions de phase dans l’univers primordial et les fluctuations du vide. Jusqu’à la découverte de l’accélération, ce terme etait oublié! Mais, et c’est toujours comme ceci en physique, la nature nous rappelle à l’ordre:

$$\rho_{\Lambda 0}^{1/4} = 2.4\mathrm{meV}$$

C’est une échelle d’énergie bien plus faible que toutes les échelles de masse dans l’univers (à part les neutrinos ….) !

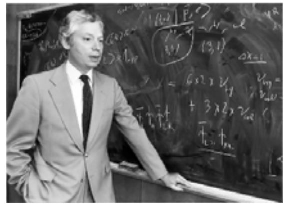
Il faut donc que la constante cosmologique, qui joue le rôle d’un contre-terme en théorie des champs, annule quasiment la contribution de toutes les particules et toutes les transitions de phase:

WHO ORDERED THAT ?   I.I. Rabi au sujet du muon en 1936

Et donc comment peut-on justifier cet ajustement fin?

Weinberg a prouvé un theorème “sans issue” qui permet de comprendre comment modéliser ce phénomène.
Pour ce faire, on se place en théorie quantique des champs et on cherche a trouver une description de l’Univers et de son état fondamental:

$$\mathcal{L} = \sum_i \frac{(\partial \phi_i)^2}{2} + V(\phi_i)$$



par un Lagrangien très simple mettant en jeu uniquement des champs scalaires (pour simplifier). On suppose aussi qu’ aucune échelle d’énergie n’intervient dans le potentiel pour éviter d’introduire une échelle finement ajustée. L’état fondamental minimise le potentiel:

$$\phi_i = \lambda z_i, \quad V(\phi_i) = \lambda^4 \tilde{V}(z_i)$$

$$\begin{cases} \tilde{V}(z_i) = 0 \\ \partial_{z_i} \tilde{V}(z_i) = 0 \end{cases}$$

$$\tilde{V}(z_i) = y^{ijkl} z_i z_j z_k z_l$$

dilaton

Etat fundamental, N équations
pour (N-1) champs!

$$g(y^{ijkl}) = 0$$

Il faut donc une relation entre tous les couplages pour qu'il existe un état fondamental. MAIS les couplages varient sous l'effet de la renormalisation:

$$g(y^{ijkl}(\mu)) \neq 0$$

De façon image, on dit que la "direction plate" d'énergie nulle paramétrisée par le dilaton est "levée" par les corrections quantiques.

Le seul état fondamental préservé est:

$$\phi_i = 0$$

Mais les champs scalaires servent à donner une masse aux fermions par le mécanisme de Higgs:

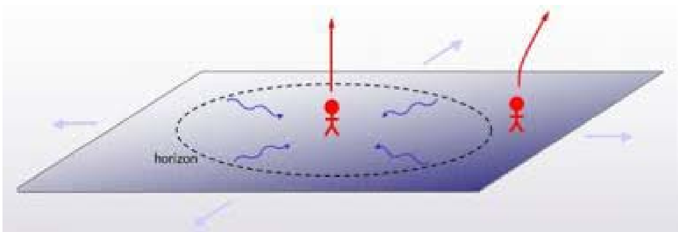
$$\mathcal{L} = x^{ijk}\phi_i\bar{\psi}_j\psi_j \quad \rightarrow m_{ij} = x^{kij}\phi_k$$

Il n'existerait donc aucun fermion massif dans l'Univers! □

Rien n’est plus doux aux oreilles des physiciens que de violer les hypothèses des théorèmes “sans issues”:

- Les configurations de champ sont dynamiques (auto-ajustement) et il existe un attracteur à grand temps.
- Une symétrie permet de relier les couplages et donc réaliser des configurations statiques non-triviales.
- Il se pourrait qu’il existe plus de quatre dimensions.
- La théorie décrivant l’énergie du vide ne serait pas une théorie des champs habituelle: violation globale de la causalité.

Cette dernière possibilité n’est pas si folle: en effet connaitre la valeur de l’énergie du vide, si constant, nécessite de connaitre sa valeur dans notre passé mais aussi dans notre future et même en dehors de notre horizon.



Un exemple d'énergie noire: pseudo-Goldstone

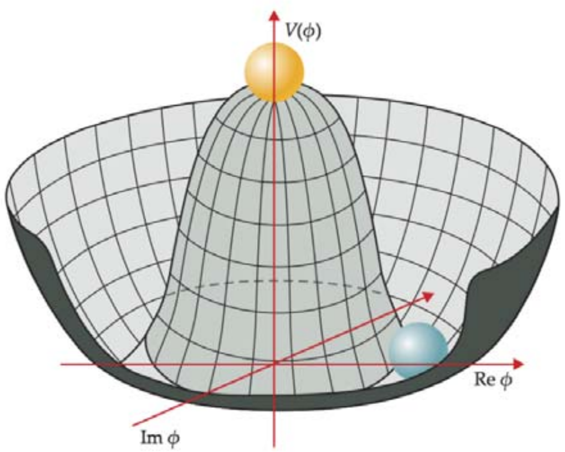
Imaginons qu'il existe une symétrie globale U(1) brisée par une valeur moyenne dans le vide (vev) d'un champ chargé:

$$\Phi \to e^{i\alpha}\Phi \qquad \text{brisée par} \qquad \Phi = f e^{i\phi/\sqrt{2}f}$$

Boson de Goldstone

Et que le minimum du potential s'annule:

$$V(\Phi) = V(f e^{i\phi/\sqrt{2}f}) = 0$$



C'est l'hypothèse ad hoc faite dans la plupart des modèles d'énergie noire:
Il doit "exister" un mécanisme inconnu qui résoud le "vieux" problème de la constant cosmologique.

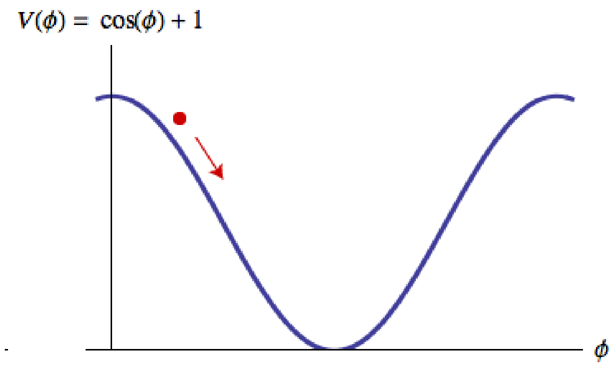
Supposons que la symétrie U(1) soit brisée explicitement par un petit paramètre (rappelez-vous les pions et la symétrie chirale)

$$\mathcal{L}_{\text{brise}} = \mu^4\left(\frac{\Phi + \bar{\Phi}}{2f} + 1\right)$$

Cette brisure est dite naturelle à la 't Hooft … car si μ s'annule la symétrie est restaurée.

A basse énergie, la physique est décrite par un modèle de dégel:

$$\mathcal{L} = \frac{(\partial\phi)^2}{2} + \mu^4\left(\cos\frac{\phi}{\sqrt{2}f} + 1\right)$$



Le champ est bloqué en haut du potentiel par la friction de Hubble, puis roule vers son minimum. L'accélération de l'Univers requiert que:

$$f \sim m_{\rm Pl}, \quad \mu^4 \sim \rho_{\Lambda 0}$$

La dynamique du champ φ permet de modéliser l'accélération. C'est à dire de donner une solution au problème de l'énergie noire: comment engendrer un petite valeur pour l'énergie du vide au prix de:

- **Un ajustement de l' échelle μ.**
- **la nécessite d'invoquer une physique inconnue pour le "vieux" problème de la constant cosmologique.**

Cette approche en deux étapes est commune à la plupart des modèles d'énergie noire.

De même le champ est très leger:

$$m_\phi \sim H_0 \sim 10^{-42}\ \mathrm{GeV}$$

Portée de la taille de l'horizon

Heureusement, son couplage à la matière est dérivatif et n'induit pas d'effet de cinquième force:

$$\mathcal{L}_{\rm couplage} \sim \frac{(\partial\phi)^2}{f^4} m_\psi \bar{\psi}\psi$$

La Supersymétrie?

La supersymétrie globale semble offrir de grands espoirs. C'est une symétrie fermionique dont le "carré" équivaut à une translation d'espace:

$$\{Q_\alpha, \bar{Q}_{\dot{\alpha}}\} = 2\sigma^\mu_{\alpha\dot{\alpha}} P_\mu$$

Puisque le générateur des translations dans le temps, le Hamiltonien apparait ici on a:

$$Q_\alpha|0>=0 \qquad\qquad H \equiv P_0 \rightarrow <0|H|0>=0$$

Pas d'énergie du vide!

Vide supersymétrique

Miraculeux!

Mais la physique des particules nous enseigne que la supersymétrie est brisée et donc le vide non-supersymétrique!

$$M_{\mathrm{SUSY}} \geq M_Z$$

De plus la supersymétrie doit être une symétrie locale, car en gravité on se permet des changements de coordonnées locaux. Or en supergravité, même si le vide est supersymétrique son énergie est négative …..

Pendant longtemps en supergravité, on a construit des modèles où le “vieux” problème de la constante cosmologique est supposé résolu:

$$\sum_i |F_i|^2 - 3m_{3/2}^2 m_{\mathrm{Pl}}^2 \equiv 0$$

Masse du gravitino

Paramètre d’ordre de brisure
de supersymétrie

Mais alors la contribution des particules et sparticules aux corrections quantiques devient grande:

$$\sum_i (2j+1)(-1)^{2j} m_j^4 \sim M_{\mathrm{SUSY}}^4$$

Enorme!

DIMENSIONS SUPPLEMENTAIRES

Si l'univers n'est pas 4d, alors la preuve du théorème de Weinberg tombe. Une proposition mélant supersymétrie et dimensions supplémentaires a été formulée il y a une quinzaine d'années (SLED).

Commençons par une théorie 6d ou notre Univers serait une “brane”, c'est à dire un espace 4d placé à un des pôles des deux dimensions supplémentaires (de topologie sphérique).

Près de notre “brane”, l'action gravitationnelle est simplement:

$$S_6 = \frac{1}{16\pi G_6} \int d^6x \sqrt{-g_6} R_6 - T_6 \int d^4x \sqrt{-g_4}$$

Constante de Newton à 6d

“tension”= énergie du vide sur la “brane”

Quelle que soit la tension de la brane, les équations d'Einstein à 6d nous apprennent que la dimension supplémentaire a la forme d'un ballon de rugby avec un défaut topologique sur la brane:

L'angle de défaut du cône est:

$$\theta = 8\pi G_6 T_6$$

Notre brane-Univers est au sommet d'une singularité conique.

De plus, l'énergie du vide observable sur notre brane:

$$\rho_\Lambda = 0$$

Elle s'annule car la tension de notre brane "courbe" les dimensions supplémentaires.

Et l'énergie noire ?

C’est plus compliqué mais la supergravité 6d vient à la rescousse.

Commençons par nous intéresser à ce à quoi la gravité ressemble à basse énergie: comme les dimensions supplémentaires sont “petites” de taille L, la gravité aux échelles plus grandes que L ne les “voit” pas et se comporte comme à 4d avec:

$$G_6 = 4\pi L^2 G_N$$

La supersymétrie à 6d est brisée par la présence de notre brane: les fluctuations du vide 6d vont induire une énergie:

$$\rho_\Lambda \sim L^{-4}$$

La gravité 4d étant testée jusqu’à des échelles du mm, si

$$L \sim 1 \text{ mm}$$

alors le problème d’énergie noire est résolu!

Le problème du calcul de la valeur de L dit de “stabilisation des modules” n’est pas résolu. Si les modules ne sont pas stabilisés alors il existe une cinquième force qui pourrait être détectable ou exclure le modèle….

SEQUESTREMENT

Le point de départ de ce modèle est certainement le théorème de Weinberg et le fait que la causalité/localité y joue un grand rôle. Partons donc de l'action habituelle:

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left(\frac{R}{16\pi G_N} + \lambda^4 \mathcal{L}_m(\lambda^2 g_{\mu\nu}, \psi^i) - 2\Lambda \right)$$

Action pour la matière

ou le champ de dilatation λ et l'énergie du vide Λ sont des champs constants dans tout l'espace-temps.

En l'absence de tout autre ingrédient la masse des particules s'annule car le champ λ=0 et donc :

$$m_\psi = \lambda m_\psi^{(0)} \quad \to m_\psi = 0$$

Pour violer le théorème de Weinberg on peut ajouter une action *non-locale:*

$$S_\sigma = \sigma(\frac{\Lambda}{\lambda\mu})$$

ou σ est une function qui s'annule à l'origine et μ une échelle donnée. Ce choix contredit la localité en théorie quantique des champs mais de façon douce car uniquement dans un secteur ne mettant pas en jeu la matière ou la gravité. Les equations des champs imposent

$$\int d^4x\sqrt{-g} = \frac{1}{2\lambda^4\mu^4}\sigma'(\frac{\Lambda}{\lambda^4\mu^4})$$

Volume d'espace-temps fini: l'espace doit être fini et le temps doit commencer par un bang et finir par un crunch…

Mais alors les équations d'Einstein se simplifient:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi G_N (T_{\mu\nu} - \frac{<T>}{4}g_{\mu\nu})$$

Tenseur d'Einstein décrivant la courbure de l'espace-temps

Tenseur énergie-impulsion de la matière et énergie du vide.

Terme de constante cosmologique

$$\Lambda = \frac{<T>}{4}$$

$$<T> = \frac{\int d^4x\sqrt{-g}T}{\int d^4x\sqrt{-g}}$$

En décomposant le tenseur energie-impulsion:

$$T_{\mu\nu} = T^m_{\mu\nu} - V_\Lambda g_{\mu\nu} \longrightarrow R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi G_N (T^m_{\mu\nu} - \frac{<T^m>}{4}g_{\mu\nu})$$

On trouve donc que :

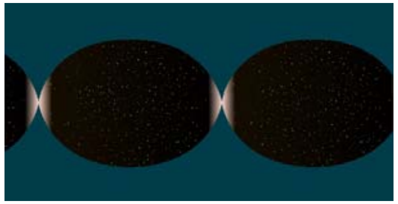
- ✓ Le vieux problème de la constante cosmologique a une solution venant de la stabilisation du dilaton à une valeur non-nulle.
- ✓ Le problème de l'energie est intimement lié à la violation globale de causalité:

$$\rho_\Lambda = \frac{< T^m >}{4}$$

Un modèle explicite met en jeu un champ scalaire avec:

Nécessité de connaitre le futur jusqu'au crunch…

$$V(\phi) = m^3\phi$$



Le champ roule doucement et engendre l'accélération jusqu'à ce qu'il devienne négatif: *CRUNCH*

Et si la gravité etait modifiée?

Il est possible qu'une partie de l'explication de l'accélération cosmique vienne d'une modification de la relativité générale à grande échelle.

La façon la plus naturelle d'introduire cette modification pourrait être de donner une masse au graviton:

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

Champ associé au graviton, particule de spin 2 et sans masse.

Equation de propagation:

$$\nabla^\rho \nabla_\rho (h_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\eta_{\mu\nu} T) = -16\pi G_N T_{\mu\nu}$$

$$h_{\mu\nu} = \frac{16\pi G_N}{p^2}(T_{\mu\nu} - \frac{\eta_{\mu\nu}}{2} T)$$

Fierz-Pauli en 1939 ont ajouté un terme de masse pour le graviton:

$$\mathcal{L}_{FP} = -\frac{m_G^2 m_{\rm Pl}^2}{8}(h_{\mu\nu}h^{\mu\nu} - (h^\mu_\mu)^2)$$

qui modifie la propagation:

$$h_{\mu\nu} = \frac{16\pi G_N}{p^2 + m_G^2}(T_{\mu\nu} - \frac{T}{3}\eta_{\mu\nu})$$

Discontinuité vDVZ!

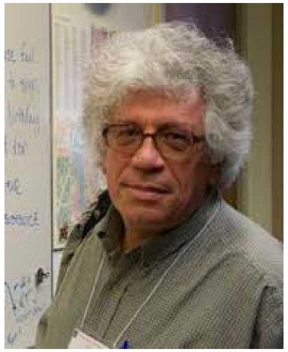
Cette discontinuité est due à l'existence:

$$5 = 2 + 2 + 1$$

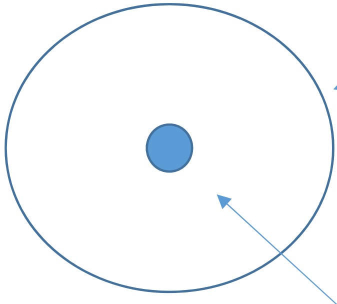
Cinq polarisations

Champ scalaire!

L'existence d'un champ scalaire couplé à la matière implique que le modèle devient non-linéaire proche d'un objet massif. Dans ce cas Vainshtein a suggéré que l'interaction engendrée par le mode scalaire devient négligeable à l'interieur du rayon de Vainshtein:



$$r_V = \left(\frac{m}{m_{\text{Pl}}^2 m_G^4}\right)^{1/5}$$



$$h_{\mu\nu} = \frac{16\pi G_N}{p^2 + m_G^2}\left(T_{\mu\nu} - \frac{T}{3}\eta_{\mu\nu}\right) \longrightarrow h_{\mu\nu} = \frac{16\pi G_N}{p^2}\left(T_{\mu\nu} - \frac{\eta_{\mu\nu}}{2}T\right)$$

Mais ces mêmes non-linéarites qui sauvent la gravité massive à courte portée condamnent le modèle a être instable: il possède un

FANTÔME

Champ d'énergie négative

Il a fallu attendre les années 2010 pour résoudre ce problème! (cf exposé de Cédric Deffayet)

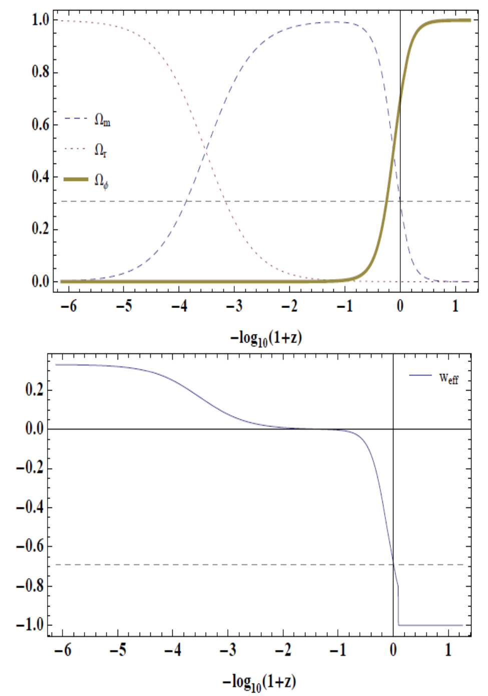
De nombreuses recherches actuelles ont pour but la construction de modàles violant le théorèm d'Ostrograski: génériquement un système physique dont le Lagrangien dépent de l'accélération et de ses dérivées possède un fantôme.

Une grande classe de modèles avec champ scalaire sans fantôme a été découverte en 1974 par Horndeski puis redécouverte indépendamment récemment. Le Lagrangien est extrèmement complexe et inclut les modèles simples d'énergie noire comme celui des bosons de Goldstone.

Heureusement le Lagrangien se simplifie en utilisant le principe cosmologique:

$$\mathcal{L} = a^3 \sum_{i=0}^{2} X_i(\dot\phi) H^i$$

$\alpha = 10^{-6},\ n = 16,\ m = 1,\ \beta = 1.5$



Ces modèles possèdent un attracteur de de Sitter à grand temps avec taux de Hubble constant.

$$f_0(\dot\phi) = -\beta\dot\phi^{-m},\ f_1(\dot\phi) = -\alpha\dot\phi^n + \beta\dot\phi^{-m},\ f_2(\dot\phi) = \alpha\dot\phi^n$$

$$3m_{\rm Pl}^2 X_i(\dot\phi) = f_i(\dot\phi) H_0^{i-2}$$

WHO ORDERED THAT (AGAIN) ?

Un problème pour les physiciens?

Un MERVEILLEUX problème pour les physiciens (théoriciens)!

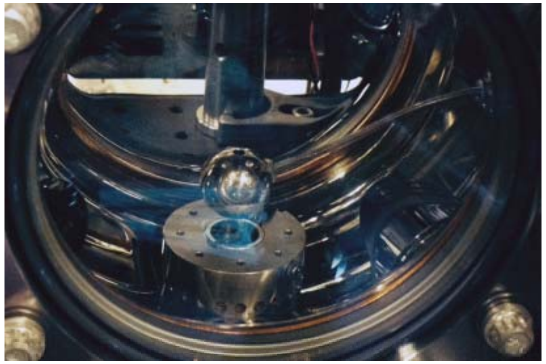
De nombreux obstacles → Le théorème “sans issue” de Weinberg

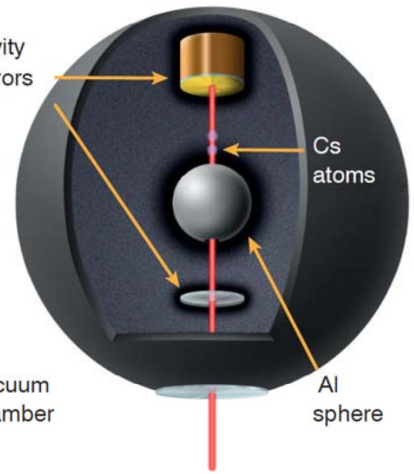
Mais de nombreuses pistes:

- Les dimensions supplémentaires
- La violation de la causalité
- L’auto-ajustement dans les modèles d’Horndeski

Et de la nouvelle physique: la gravité modifiée et ses tests en cosmologie, astrophysique, dans le système solaire ou au laboratoire.

Il est possible de contraindre expérimentalement un champ d'enérgie noire couplé à la matière, et qui donc doit être “écranté” dans le système solaire, au laboratoire.





H. Muller (Berkeley 2016)

Un atome de césium dans le champ d'une sphère d'aluminium aurait une influence scalaire qui modifierait les figures d'interférence atomique. Et donc une accélération anormale, de modification de la gravité, pourrait être détectée.