Modèles de gravitation modifiée
énergie noire

Journée des jeunes chercheurs

Radouane Gannouji

LPTA, Montpellier

10 décembre 2007

Sommaire

Un peu de relativité générale

Accélération de l’univers

Gravitation modifiée, énergie noire

Sommaire

Action de la RG

$$S = \frac{1}{2\kappa^2}\int \mathrm{d}^4x\sqrt{-g}R + S_{\mathrm{mat}}$$

- $\kappa^2 = 8\pi G$
- métrique
- Courbure scalaire
- Action de la matière

Action de la RG

$$S = \frac{1}{2\kappa^2}\int \mathrm{d}^4x\sqrt{-g}R + S_{\mathrm{mat}}$$

- $\kappa^2 = 8\pi G$
- métrique
- Courbure scalaire
- Action de la matière

Action de la RG

$$S = \frac{1}{2\kappa^2} \int \mathrm{d}^4x \sqrt{-g} R + S_{\mathrm{mat}}$$

- $\kappa^2 = 8\pi G$
- métrique
- Courbure scalaire
- Action de la matière

Action de la RG

$$S = \frac{1}{2\kappa^2}\int \mathrm{d}^4x\sqrt{-g}R + S_{\mathrm{mat}}$$

- $\kappa^2 = 8\pi G$
- métrique
- Courbure scalaire
- Action de la matière

Action de la RG

$$S = \frac{1}{2\kappa^2}\int \mathrm{d}^4x\sqrt{-g}R + S_{\mathrm{mat}}$$

- $\kappa^2 = 8\pi G$
- métrique
- Courbure scalaire
- Action de la matière

- Tenseur d'Einstein
- Tenseur Energie-Impulsion

Action de la RG

$$S = \frac{1}{2\kappa^2} \int \mathrm{d}^4 x \sqrt{-g} R + S_{\mathrm{mat}}$$

- $\kappa^2 = 8\pi G$
- métrique
- Courbure scalaire
- Action de la matière

$$G_{\mu\nu} = \kappa^2 T_{\mu\nu}$$

- Tenseur d'Einstein
- Tenseur Energie-Impulsion

Action de la RG

$$S = \frac{1}{2\kappa^2}\int \mathrm{d}^4x\sqrt{-g}R + S_{\mathrm{mat}}$$

- $\kappa^2 = 8\pi G$
- métrique
- Courbure scalaire
- Action de la matière

$$G_{\mu\nu} = \kappa^2 T_{\mu\nu}$$

- Tenseur d'Einstein
- Tenseur Energie-Impulsion

Action de la RG

$$S = \frac{1}{2\kappa^2} \int \mathrm{d}^4x \sqrt{-g} R + S_{\mathrm{mat}}$$

- $\kappa^2 = 8\pi G$
- métrique
- Courbure scalaire
- Action de la matière

$$G_{\mu\nu} = \kappa^2 T_{\mu\nu}$$

- Tenseur d'Einstein
- Tenseur Energie-Impulsion

FLRW: Univers homogène et isotrope

$$ds^2 = -\mathrm{dt}^2 + \mathrm{a}^2(\mathrm{t})\left(\frac{\mathrm{dr}^2}{1-\mathrm{kr}^2} + \mathrm{r}^2(\mathrm{d}\theta^2 + \sin^2\theta \mathrm{d}\phi^2)\right)$$

- Minkowski
- Coordonnées sphériques
- Courbure spatiale
- Facteur d'échelle

FLRW: Univers homogène et isotrope

$$ds^2 = -\mathrm{dt}^2 + \mathrm{a}^2(\mathrm{t})\left(\frac{\mathrm{dr}^2}{1-\mathrm{kr}^2} + \mathrm{r}^2(\mathrm{d}\theta^2 + \sin^2\theta\mathrm{d}\phi^2)\right)$$

- Minkowski
- Coordonnées sphériques
- Courbure spatiale
- Facteur d'échelle

FLRW: Univers homogène et isotrope

$$ds^2 = -\mathrm{dt}^2 + \mathrm{a}^2(\mathrm{t})\left(\frac{\mathrm{dr}^2}{1-\mathrm{kr}^2} + \mathrm{r}^2(\mathrm{d}\theta^2 + \sin^2\theta \mathrm{d}\phi^2)\right)$$

- Minkowski
- Coordonnées sphériques
- Courbure spatiale
- Facteur d’échelle

FLRW: Univers homogène et isotrope

$$ds^2 = -\mathrm{dt}^2 + \mathrm{a}^2(\mathrm{t})\left(\frac{\mathrm{dr}^2}{1-\mathrm{k}\mathrm{r}^2} + \mathrm{r}^2(\mathrm{d}\theta^2 + \sin^2\theta\mathrm{d}\phi^2)\right)$$

- Minkowski
- Coordonnées sphériques
- Courbure spatiale
- Facteur d'échelle

FLRW: Univers homogène et isotrope

$$ds^2 = -\mathrm{dt}^2 + \mathrm{a}^2(\mathrm{t})(\frac{\mathrm{dr}^2}{1-\mathrm{kr}^2} + \mathrm{r}^2(\mathrm{d}\theta^2 + \sin^2\theta\mathrm{d}\phi^2))$$

- Minkowski
- Coordonnées sphériques
- Courbure spatiale
- Facteur d'échelle

Tenseur Energie-Impulsion

$$T_{\mu\nu} = (P + \rho) u_\mu u_\nu + P g_{\mu\nu} \quad \text{avec} \quad u^\mu = \frac{\mathrm{dx}^\mu}{\mathrm{d}\tau}$$

- Densité d'énergie
- Pression
- Vitesse

Tenseur Energie-Impulsion

$$T_{\mu\nu} = (P + \rho)u_\mu u_\nu + P g_{\mu\nu} \quad \text{avec} \quad u^\mu = \frac{\mathrm{dx}^\mu}{\mathrm{d}\tau}$$

- Densité d’énergie
- Pression
- Vitesse

Tenseur Energie-Impulsion

$$T_{\mu\nu} = (P + \rho) u_\mu u_\nu + P g_{\mu\nu} \quad \text{avec} \quad u^\mu = \frac{\mathrm{d}x^\mu}{\mathrm{d}\tau}$$

- Densité d’énergie
- Pression
- Vitesse

Tenseur Energie-Impulsion

$$T_{\mu\nu} = (P + \rho) u_\mu u_\nu + P g_{\mu\nu} \quad \text{avec} \quad u^\mu = \frac{\mathrm{dx}^\mu}{\mathrm{d}\tau}$$

- Densité d'énergie
- Pression
- Vitesse

$$3H^2 = \kappa^2 \rho - 3\frac{k}{a^2}$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{\kappa^2}{6}\rho(1+3w)$$

- Première équation de Friedmann
- Fonction de Hubble: $\frac{\dot{a}}{a}$
- Deuxième équation de Friedmann
- $w = \frac{P}{\rho}$

$$3H^2 = \kappa^2\rho - 3\frac{k}{a^2}$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{\kappa^2}{6}\rho(1+3w)$$

- Première équation de Friedmann
- Fonction de Hubble: $\frac{\dot{a}}{a}$
- Deuxième équation de Friedmann
- $w = \frac{P}{\rho}$

$$3H^2 = \kappa^2 \rho - 3\frac{k}{a^2}$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{\kappa^2}{6}\rho(1+3w)$$

- Première équation de Friedmann
- Fonction de Hubble: $\frac{\dot{a}}{a}$
- Deuxième équation de Friedmann
- $w = \frac{P}{\rho}$

$$3H^2 = \kappa^2 \rho - 3\frac{k}{a^2}$$
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{\kappa^2}{6}\rho(1 + 3w)$$

- Première équation de Friedmann
- Fonction de Hubble: $\frac{\dot{a}}{a}$
- Deuxième équation de Friedmann
- $w = \frac{P}{\rho}$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{\kappa^2}{6}\rho(1+3w)$$

- $w_{\text{mat}} = 0 \quad w_{\text{rad}} = \frac{1}{3}$
- $w \geq 0 \quad \Rightarrow \quad \ddot{a} \leq 0$
- L'univers accélère $\Leftrightarrow 1 + 3\omega \leq 0 \quad i.e. \quad \omega \leq -\frac{1}{3}$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{\kappa^2}{6}\rho(1+3w)$$

- $w_{\text{mat}} = 0 \quad w_{\text{rad}} = \frac{1}{3}$
- $w \geq 0 \quad \Rightarrow \quad \ddot{a} \leq 0$
- L'univers accélère $\Leftrightarrow 1 + 3\omega \leq 0 \quad i.e. \quad \omega \leq -\frac{1}{3}$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{\kappa^2}{6}\rho(1+3w)$$

- $w_{\text{mat}} = 0 \quad w_{\text{rad}} = \frac{1}{3}$
- $w \geq 0 \quad \Rightarrow \quad \ddot{a} \leq 0$
- L'univers accélère $\Leftrightarrow 1 + 3\omega \leq 0 \quad i.e. \quad \omega \leq -\frac{1}{3}$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{\kappa^2}{6}\rho(1+3w)$$

- $w_{\text{mat}} = 0 \quad w_{\text{rad}} = \frac{1}{3}$
- $w \geq 0 \quad \Rightarrow \quad \ddot{a} \leq 0$
- L'univers accélère $\Leftrightarrow 1 + 3\omega \leq 0 \quad i.e. \quad \omega \leq -\frac{1}{3}$

Un peu de relativité générale

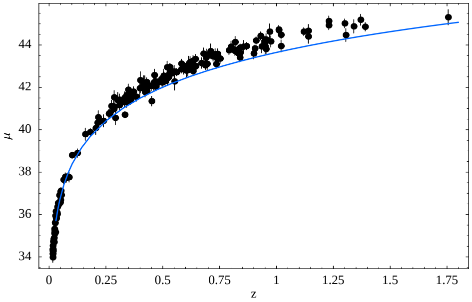
Accélération de l’univers

Gravitation modifiée, énergie noire

Supernovae

$$H^2(z) \;=\; \sum_i \,\Omega_i\,(1+z)^{3(1+w_i)}$$

$$\mu \;=\; 5\,log\left((1+z)\,\int_0^z \frac{\mathrm{d}x}{H(x)}\right) + 25$$

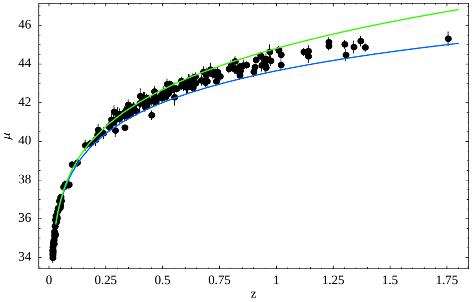


$\Omega_m = 1$

Supernovae

$$H^2(z) \;=\; \sum_i \; \Omega_i \; (1+z)^{3(1+w_i)}$$

$$\mu \;=\; 5\; log \left((1+z) \; \int_0^z \frac{\mathrm{d}x}{h(x)} \right) + 25$$



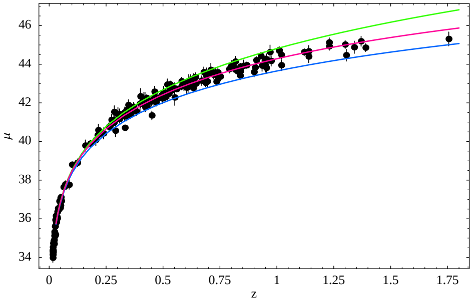
$\Omega_m = 1$

$\Omega_\Lambda = 1$

Supernovae

$$H^2(z) = \sum_i \Omega_i \, (1+z)^{3(1+w_i)}$$

$$\mu = 5 \, log \left((1+z) \int_0^z \frac{\mathrm{d}x}{h(x)} \right) + 25$$

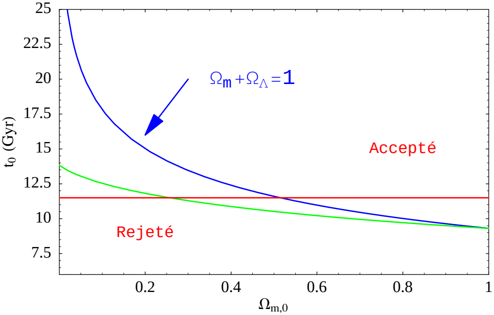


$\Omega_m = 1$

$\Omega_\Lambda = 1$

$\Omega_m = 0.27 \quad \Omega_\Lambda = 0.73$

Age de l'univers



$$t_0 = \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}z}{(1+z)\ H(z)}$$

Un peu de relativité générale

Accélération de l’univers

Gravitation modifiée, énergie noire

Constante cosmologique

$$S = \frac{1}{16\ \pi\ G} \int \mathrm{d}^4x\sqrt{-g}\,(R - 2\ \Lambda)$$

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 16\pi G\ T_{\mu\nu}$$

- Problème lié à la constante cosmologique
  - Lien avec l'énergie du vide

Constante cosmologique

$$S = \frac{1}{16\ \pi\ G} \int \mathrm{d}^4x\sqrt{-g}\,(R-2\ \Lambda)$$

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 16\pi G\ T_{\mu\nu}$$

- Problème lié à la constante cosmologique
  - Lien avec l'énergie du vide

Constante cosmologique

$$S = \frac{1}{16\ \pi\ G}\ \int \mathrm{d}^4x\sqrt{-g}\,(R - 2\ \Lambda)$$

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 16\pi G\ T_{\mu\nu}$$

- Problème lié à la constante cosmologique
  - Lien avec l'énergie du vide

Constante cosmologique

$$S = \frac{1}{16\ \pi\ G} \int \mathrm{d}^4x\sqrt{-g}\,(R - 2\ \Lambda)$$

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 16\pi G\ T_{\mu\nu}$$

- Problème lié à la constante cosmologique
  - Lien avec l'énergie du vide

Théories Scalaire-Tenseur

$$S = \frac{1}{16\ \pi\ G^*} \int \mathrm{d}^4x \sqrt{-g}\,\left(F(\Phi)\ R - Z(\Phi)\ g^{\mu\nu}\partial_\mu\Phi\ \partial_\nu\Phi - 2\ U(\Phi)\right)$$

- G^*: Constante de gravitation "nue"
- Φ: Champs scalaire (dilaton)
- Différentes paramétrisations du système
  - Brans-Dicke $F(\Phi) = 1/\Phi$, $Z(\Phi) = w(\Phi)/\Phi$
  - $F(\Phi)$ arbitraire, $Z(\Phi) = 1$

$$F(\Phi)G_{\mu\nu} = 8\pi G^*(T_{\mu\nu} + T^{\Phi}_{\mu\nu})$$

Théories Scalaire-Tenseur

$$S = \frac{1}{16\ \pi\ G^*} \int \mathrm{d}^4 x \sqrt{-g} \left(F(\Phi)\ R - Z(\Phi)\ g^{\mu\nu} \partial_\mu \Phi\ \partial_\nu \Phi - 2\ U(\Phi) \right)$$

- G^*: Constante de gravitation "nue"
- Φ: Champs scalaire (dilaton)
- Différentes paramétrisations du système
  - Brans-Dicke $F(\Phi) = 1/\Phi$, $Z(\Phi) = w(\Phi)/\Phi$
  - $F(\Phi)$ arbitraire, $Z(\Phi) = 1$

$$F(\Phi) G_{\mu\nu} = 8\pi G^* (T_{\mu\nu} + T^{\Phi}_{\mu\nu})$$

Théories Scalaire-Tenseur

$$S = \frac{1}{16\ \pi\ G^*}\ \int \mathrm{d}^4x\sqrt{-g}\left(F(\Phi)\ R - Z(\Phi)\ g^{\mu\nu}\partial_\mu\Phi\ \partial_\nu\Phi - 2\ U(\Phi)\right)$$

- G^*: Constante de gravitation "nue"
- Φ: Champs scalaire (dilaton)
- Différentes paramétrisations du système
  - Brans-Dicke $F(\Phi) = 1/\Phi$, $Z(\Phi) = w(\Phi)/\Phi$
  - $F(\Phi)$ arbitraire, $Z(\Phi) = 1$

$$F(\Phi)G_{\mu\nu} = 8\pi G^*(T_{\mu\nu} + T^{\Phi}_{\mu\nu})$$

Théories Scalaire-Tenseur

$$S = \frac{1}{16\ \pi\ G^*} \int d^4x \sqrt{-g}\left(F(\Phi)\ R - Z(\Phi)\ g^{\mu\nu}\partial_\mu\Phi\ \partial_\nu\Phi - 2\ U(\Phi)\right)$$

- G^*: Constante de gravitation "nue"
- Φ: Champs scalaire (dilaton)
- Différentes paramétrisations du système
  - Brans-Dicke $F(\Phi) = 1/\Phi$, $Z(\Phi) = w(\Phi)/\Phi$
  - $F(\Phi)$ arbitraire, $Z(\Phi) = 1$

$$F(\Phi)G_{\mu\nu} = 8\pi G^*(T_{\mu\nu} + T^{\Phi}_{\mu\nu})$$

Théories Scalaire-Tenseur

$$S = \frac{1}{16\ \pi\ G^*}\ \int \mathrm{d}^4x\sqrt{-g}\left(F(\Phi)\ R - Z(\Phi)\ g^{\mu\nu}\partial_\mu\Phi\ \partial_\nu\Phi - 2\ U(\Phi)\right)$$

- G^*: Constante de gravitation "nue"
- Φ: Champs scalaire (dilaton)
- Différentes paramétrisations du système
  - Brans-Dicke $F(\Phi) = 1/\Phi$, $Z(\Phi) = w(\Phi)/\Phi$
  - $F(\Phi)$ arbitraire, $Z(\Phi) = 1$

$$F(\Phi)G_{\mu\nu} = 8\pi G^*(T_{\mu\nu} + T^{\Phi}_{\mu\nu})$$

Théories Scalaire-Tenseur

$$S = \frac{1}{16\ \pi\ G^*} \int \mathrm{d}^4x \sqrt{-g}\,\left(F(\Phi)\ R - Z(\Phi)\ g^{\mu\nu}\partial_\mu\Phi\ \partial_\nu\Phi - 2\ U(\Phi)\right)$$

- G^*: Constante de gravitation "nue"
- Φ: Champs scalaire (dilaton)
- Différentes paramétrisations du système
  - Brans-Dicke $F(\Phi) = 1/\Phi$, $Z(\Phi) = w(\Phi)/\Phi$
  - $F(\Phi)$ arbitraire, $Z(\Phi) = 1$

$$F(\Phi)G_{\mu\nu} = 8\pi G^*(T_{\mu\nu} + T^{\Phi}_{\mu\nu})$$

Théories Scalaire-Tenseur

$$S = \frac{1}{16\ \pi\ G^*} \int \mathrm{d}^4x \sqrt{-g}\, \left(F(\Phi)\ R - Z(\Phi)\ g^{\mu\nu}\partial_\mu\Phi\ \partial_\nu\Phi - 2\ U(\Phi)\right)$$

- G^*: Constante de gravitation "nue"
- Φ: Champs scalaire (dilaton)
- Différentes paramétrisations du système
  - Brans-Dicke $F(\Phi) = 1/\Phi$, $Z(\Phi) = w(\Phi)/\Phi$
  - $F(\Phi)$ arbitraire, $Z(\Phi) = 1$

$$F(\Phi)G_{\mu\nu} = 8\pi G^*(T_{\mu\nu} + T^{\Phi}_{\mu\nu})$$

Relativité générale	Théorie scalaire-tenseur
$G_{\mu\nu} = 8\pi G_N \, T_{\mu\nu,m}$	$F(\Phi)\, G_{\mu\nu} = 8\pi G_N \, (T_{\mu\nu,\Phi} + T_{\mu\nu,m})$
G_N	$G_{eff} = \frac{G_N}{F} \, \frac{2F+4(\mathrm{d}F/\mathrm{d}\Phi)^2}{2F+3(\mathrm{d}F/\mathrm{d}\Phi)^2}$
$\ddot{\delta}_m + 2H\dot{\delta}_m = 4\pi\rho\delta_m$	$\ddot{\delta}_m + 2H\dot{\delta}_m = 4\pi\rho\frac{G_{eff}}{G_N}\delta_m$

Relativité générale	Théorie scalaire-tenseur
$G_{\mu\nu} \;=\; 8\pi G_N \, T_{\mu\nu,m}$	$F(\Phi)\, G_{\mu\nu} \;=\; 8\pi G_N \; (T_{\mu\nu,\Phi} + T_{\mu\nu,m})$
G_N	$G_{eff} = \frac{G_N}{F} \, \frac{2F+4(\mathrm{d}F/\mathrm{d}\Phi)^2}{2F+3(\mathrm{d}F/\mathrm{d}\Phi)^2}$
$\ddot{\delta}_m + 2H\dot{\delta}_m = 4\pi\rho\delta_m$	$\ddot{\delta}_m + 2H\dot{\delta}_m = 4\pi\rho\frac{G_{eff}}{G_N}\delta_m$

Relativité générale	Théorie scalaire-tenseur
$G_{\mu\nu} \; = \; 8\pi G_N \, T_{\mu\nu,m}$	$F(\Phi)\, G_{\mu\nu} \; = \; 8\pi G_N \; (T_{\mu\nu,\Phi} + T_{\mu\nu,m})$
G_N	$G_{eff} = \frac{G_N}{F} \; \frac{2F+4(\mathrm{d}F/\mathrm{d}\Phi)^2}{2F+3(\mathrm{d}F/\mathrm{d}\Phi)^2}$
$\ddot{\delta}_m + 2H\dot{\delta}_m = 4\pi\rho\delta_m$	$\ddot{\delta}_m + 2H\dot{\delta}_m = 4\pi\rho\frac{G_{eff}}{G_N}\delta_m$

Relativité générale	Théorie scalaire-tenseur
$G_{\mu\nu} \ = \ 8\pi G_N \, T_{\mu\nu,m}$	$F(\Phi)\, G_{\mu\nu} \ = \ 8\pi G_N \ (T_{\mu\nu,\Phi} + T_{\mu\nu,m})$
G_N	$G_{eff} = \frac{G_N}{F} \ \frac{2F+4(\mathrm{d}F/\mathrm{d}\Phi)^2}{2F+3(\mathrm{d}F/\mathrm{d}\Phi)^2}$
$\ddot{\delta}_m + 2H\dot{\delta}_m = 4\pi\rho\delta_m$	$\ddot{\delta}_m + 2H\dot{\delta}_m = 4\pi\rho\frac{G_{eff}}{G_N}\delta_m$

Quelques Résultats

$$
\begin{aligned}
F(z) &= 1 + F_1\, z + F_2\, z^2 + ... \\
U(z) &= U_0 + ...
\end{aligned}
$$

- $|F_1| \leq 10^{-2}$
- $F_2 < -\frac{3}{2}\left(1 + \Omega_{DE,0} - 2U_0\right)$
- $1 - F_\infty < \frac{\rho_{DE}}{\rho_m + \rho_{DE}}$

Quelques Résultats

$$\begin{aligned} F(z) &= 1 + F_1\, z + F_2\, z^2 + ... \\ U(z) &= U_0 + ... \end{aligned}$$

- $|F_1| \leq 10^{-2}$
- $F_2 < -\frac{3}{2}\left(1 + \Omega_{DE,0} - 2U_0\right)$
- $1 - F_\infty < \frac{\rho_{DE}}{\rho_m + \rho_{DE}}$

Quelques Résultats

$$
\begin{aligned}
F(z) &= 1 + F_1\, z + F_2\, z^2 + ... \\
U(z) &= U_0 + ...
\end{aligned}
$$

- $|F_1| \leq 10^{-2}$
- $F_2 < -\frac{3}{2}\left(1 + \Omega_{DE,0} - 2U_0\right)$
- $1 - F_\infty < \frac{\rho_{DE}}{\rho_m + \rho_{DE}}$

Quelques Résultats

$$
\begin{aligned}
F(z) &= 1 + F_1\, z + F_2\, z^2 + ... \\
U(z) &= U_0 + ...
\end{aligned}
$$

- $|F_1| \leq 10^{-2}$
- $F_2 < -\frac{3}{2}\left(1 + \Omega_{DE,0} - 2U_0\right)$
- $1 - F_\infty < \frac{\rho_{DE}}{\rho_m + \rho_{DE}}$

Théories $f(R)$

- Plusieurs scalaires
- Λ
- R
- $P = R_{\mu\nu}\ R^{\mu\nu}$
- $Q = R_{\mu\nu\rho\sigma}\ R^{\mu\nu\rho\sigma}$
- $G = R^2 - 4P + Q$

$$S = \frac{1}{2\kappa^2} \int \mathrm{d^4x\sqrt{-g}\ f(R)}$$

$$f'(R)\ G_{\mu\nu}\ =\ \kappa^2\ \left(T_{\mu\nu,R} + T_{\mu\nu,m}\right)$$

- Résultats

Théories $f(R)$

- Plusieurs scalaires
- Λ
- R
- $P = R_{\mu\nu}\ R^{\mu\nu}$
- $Q = R_{\mu\nu\rho\sigma}\ R^{\mu\nu\rho\sigma}$
- $G = R^2 - 4P + Q$

$$S = \frac{1}{2\kappa^2}\int \mathrm{d}^4\mathrm{x}\sqrt{-\mathrm{g}}\ \mathrm{f(R)}$$

$$f'(R)\ G_{\mu\nu}\ =\ \kappa^2\ \left(T_{\mu\nu,R} + T_{\mu\nu,m}\right)$$

- Résultats

Théories $f(R)$

- Plusieurs scalaires
- Λ
- R
- $P = R_{\mu\nu}\ R^{\mu\nu}$
- $Q = R_{\mu\nu\rho\sigma}\ R^{\mu\nu\rho\sigma}$
- $G = R^2 - 4P + Q$

$$S = \frac{1}{2\kappa^2} \int \mathrm{d^4x\sqrt{-g}\ f(R)}$$

$$f'(R)\ G_{\mu\nu}\ =\ \kappa^2\ \left(T_{\mu\nu,R} + T_{\mu\nu,m}\right)$$

- Résultats

Théories $f(R)$

- Plusieurs scalaires
- Λ
- R
- $P = R_{\mu\nu}\ R^{\mu\nu}$
- $Q = R_{\mu\nu\rho\sigma}\ R^{\mu\nu\rho\sigma}$
- $G = R^2 - 4P + Q$

$$S = \frac{1}{2\kappa^2} \int \mathrm{d^4x \sqrt{-g}\ f(R)}$$

$$f'(R)\ G_{\mu\nu}\ =\ \kappa^2\ \left(T_{\mu\nu,R} + T_{\mu\nu,m}\right)$$

- Résultats

Théories $f(R)$

- Plusieurs scalaires
- Λ
- R
- $P = R_{\mu\nu}\ R^{\mu\nu}$
- $Q = R_{\mu\nu\rho\sigma}\ R^{\mu\nu\rho\sigma}$
- $G = R^2 - 4P + Q$

$$S = \frac{1}{2\kappa^2} \int \mathrm{d^4x\sqrt{-g}\ f(R)}$$

$$f'(R)\ G_{\mu\nu}\ =\ \kappa^2\ \left(T_{\mu\nu,R} + T_{\mu\nu,m}\right)$$

- Résultats

Théories $f(R)$

- Plusieurs scalaires
- Λ
- R
- $P = R_{\mu\nu}\ R^{\mu\nu}$
- $Q = R_{\mu\nu\rho\sigma}\ R^{\mu\nu\rho\sigma}$
- $G = R^2 - 4P + Q$

$$S = \frac{1}{2\kappa^2} \int \mathrm{d}^4\mathrm{x}\sqrt{-\mathrm{g}}\ \mathrm{f(R)}$$

$$f'(R)\ G_{\mu\nu}\ =\ \kappa^2\ \left(T_{\mu\nu,R} + T_{\mu\nu,m}\right)$$

- Résultats

Théories $f(R)$

- Plusieurs scalaires
- Λ
- R
- $P = R_{\mu\nu}\ R^{\mu\nu}$
- $Q = R_{\mu\nu\rho\sigma}\ R^{\mu\nu\rho\sigma}$
- $G = R^2 - 4P + Q$

$$S = \frac{1}{2\kappa^2} \int \mathrm{d}^4\mathrm{x}\sqrt{-\mathrm{g}}\ \mathrm{f(R)}$$

$$f'(R)\ G_{\mu\nu}\ =\ \kappa^2\ \left(T_{\mu\nu,R} + T_{\mu\nu,m}\right)$$

- Résultats

Théories $f(R)$

- Plusieurs scalaires
- Λ
- R
- $P = R_{\mu\nu}\ R^{\mu\nu}$
- $Q = R_{\mu\nu\rho\sigma}\ R^{\mu\nu\rho\sigma}$
- $G = R^2 - 4P + Q$

$$S = \frac{1}{2\kappa^2} \int \mathrm{d^4x\sqrt{-g}\ f(R)}$$

$$f'(R)\ G_{\mu\nu}\ =\ \kappa^2\ \left(T_{\mu\nu,R} + T_{\mu\nu,m}\right)$$

- Résultats

Théories $f(R)$

- Plusieurs scalaires
- Λ
- R
- $P = R_{\mu\nu}\ R^{\mu\nu}$
- $Q = R_{\mu\nu\rho\sigma}\ R^{\mu\nu\rho\sigma}$
- $G = R^2 - 4P + Q$

$$S = \frac{1}{2\kappa^2}\int \mathrm{d^4x\sqrt{-g}\ f(R)}$$

$$f'(R)\ G_{\mu\nu}\ =\ \kappa^2\ \ (T_{\mu\nu,R} + T_{\mu\nu,m})$$

- Résultats

Merci