Редукция Калуцы-Клейна в теории Хорндески

Основано на работах в соавторстве с С.А. Мироновым, В.Е. Волковой, М. Valencia-Villegas и М.Р. Шаровым

Arxiv: 2405.02281, 2408.01480, 2408.04626, 2408.06329

by Арина Штенникова (ИЯИ РАН & ИТМФ МГУ)

on Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, посвященная 70-летию В.А. Рубакова

20.02.2025

» Framework

- Мы рассматриваем теорию Хорндески

» Framework

- Мы рассматриваем теорию Хорндески
- Наиболее общая скалярно-тензорная теория со старшими производными в действии, но с уравнениями второго порядка

  Позволяет нарушать NEC без возникновения патологий.

» Framework

- Мы рассматриваем теорию Хорндески
- Наиболее общая скалярно-тензорная теория со старшими производными в действии, но с уравнениями второго порядка

  Позволяет нарушать NEC без возникновения патологий.

- Широко используются для описания:

— космологии ранней вселенной;

» Framework

- Мы рассматриваем теорию Хорндески
- Наиболее общая скалярно-тензорная теория со старшими производными в действии, но с уравнениями второго порядка

  Позволяет нарушать NEC без возникновения патологий.

- Широко используются для описания:
  - космологии ранней вселенной;
  - космологии современной вселенной;

» Framework

- Мы рассматриваем теорию Хорндески
- Наиболее общая скалярно-тензорная теория со старшими производными в действии, но с уравнениями второго порядка

  Позволяет нарушать NEC без возникновения патологий.

- Широко используются для описания:

– космологии ранней вселенной;

– космологии современной вселенной;

– различных компактных объектов и других решений, требующих модифицировать гравитацию.

» Мотивация Зачем компактифицировать Хорндески?

* Проблемы:

» Мотивация Зачем компактифицировать Хорндески?

* Проблемы:

  GW170817: $|\frac{c_T}{c} - 1| < 10^{-15}$

» Мотивация Зачем компактифицировать Хорндески?

* Проблемы:

  GW170817: $|\frac{c_T}{c} - 1| < 10^{-15}$

  Отсутствие теории векторных Галилеонов

» Мотивация Зачем компактифицировать Хорндески?

* Проблемы:

  GW170817: $|\frac{c_T}{c} - 1| < 10^{-15}$

  Отсутствие теории векторных Галилеонов

$$R^5 \qquad \longrightarrow \qquad R^4 \times S^1$$

» Мотивация Зачем компактифицировать Хорндески?

* Проблемы:
  GW170817: $|\frac{c_T}{c} - 1| < 10^{-15}$
  Отсутствие теории векторных Галилеонов

$$\begin{array}{ccc} R^5 & \longrightarrow & R^4 \times S^1 \end{array}$$

* Обобщенные Галилеоны $\longrightarrow$ Обобщенные Галилеоны

» Мотивация Зачем компактифицировать Хорндески?

- Проблемы:

  GW170817: $|\frac{c_T}{c} - 1| < 10^{-15}$

  Отсутствие теории векторных Галилеонов

$$R^5 \qquad \longrightarrow \qquad R^4 \times S^1$$

- Обобщенные Галилеоны $\longrightarrow$ Обобщенные Галилеоны

  вторые производные в действии $\longrightarrow$ вторые производные в действии

» Мотивация Зачем компактифицировать Хорндески?

* Проблемы:
  GW170817: $|\frac{c_T}{c} - 1| < 10^{-15}$
  Отсутствие теории векторных Галилеонов

$$R^5 \qquad \longrightarrow \qquad R^4 \times S^1$$

* Обобщенные Галилеоны $\longrightarrow$ Обобщенные Галилеоны

  вторые производные в действии $\longrightarrow$ вторые производные в действии

  EOMs 2 порядка $\longrightarrow$ EOMs 2 порядка

» Мотивация Зачем компактифицировать Хорндески?

* Проблемы:
  GW170817: $|\frac{c_T}{c} - 1| < 10^{-15}$
  Отсутствие теории векторных Галилеонов

$$R^5 \quad \longrightarrow \quad R^4 \times S^1$$

* Обобщенные Галилеоны $\longrightarrow$ Обобщенные Галилеоны

  вторые производные в действии $\longrightarrow$ вторые производные в действии

  EOMs 2 порядка $\longrightarrow$ EOMs 2 порядка

* Метрика + скаляр $\longrightarrow$ Метрика + вектор + 2 скаляра

» Мотивация Что получили?

* Теория Хорндески связанная с U(1) калибровочным бозоном и скаляром

» Мотивация Что получили?

* Теория Хорндески связанная с U(1) калибровочным бозоном и скаляром

Естественный путь связать Хорндески с полями материи

» Мотивация Что получили?

* Теория Хорндески связанная с U(1) калибровочным бозоном и скаляром

  Естественный путь связать Хорндески с полями материи

  Естественный путь получить теорию с векторным Галилеоном

» **Мотивация** **Что получили?**

* Теория Хорндески связанная с U(1) калибровочным бозоном и скаляром

  Естественный путь связать Хорндески с полями материи

  Естественный путь получить теорию с векторным Галилеоном

  Некоторое единство тензорного и векторного секторов

» Обобщенные Галилеоны в 5D

$$S = \int \mathrm{d}^5x\sqrt{-g}\,(\mathcal{L}_2 + \mathcal{L}_3 + \mathcal{L}_4 + \mathcal{L}_5)\,,$$

$$\mathcal{L}_2 = F(\pi, X),$$

$$\mathcal{L}_3 = K(\pi, X)\Box\pi,$$

$$\mathcal{L}_4 = -G_4(\pi, X)\hat{R} + 2G_{4X}(\pi, X)\left[\left(\hat{\Box}\pi\right)^2 - \pi_{;MN}\pi^{;MN}\right],$$

$$\mathcal{L}_5 = G_5(\pi, X)\hat{G}^{MN}\pi_{;MN}$$
$$+ \frac{1}{3}G_{5X}(\pi, X)\left[\left(\hat{\Box}\pi\right)^3 - 3\hat{\Box}\pi\pi_{;MN}\pi^{;MN} + 2\pi_{;MN}\pi^{;MP}\pi_{;P}^{\;N}\right],$$

$$\mathcal{L}_6 = G_6(\pi, X)\,\mathcal{O}\left[R^2\right] + G_{6X}(\pi, X)\,\mathcal{O}\left[R(\nabla^2\pi)^2\right] + G_{6XX}(\pi, X)\,\mathcal{O}\left[(\nabla^2\pi)^4\right]\,,$$

$$\hat{g}_{MN} = \begin{pmatrix} g_{\mu\nu} + \phi^2 A_\mu A_\nu & \phi^2 A_\mu \\ \phi^2 A_\nu & \phi^2 \end{pmatrix},$$

» Теория Хорндески → U(1) векторное калибровочное поле

$$S = \int \mathrm{d}^5 x \sqrt{-g}\, (\mathcal{L}_2 + \mathcal{L}_3 + \mathcal{L}_4 + \mathcal{L}_5 + \mathcal{L}_6)\,,$$

$$\mathcal{L}_2 = F(\pi, X),$$

$$\mathcal{L}_3 = K(\pi, X)\Box\pi,$$

$$\mathcal{L}_4 = -G_4(\pi, X)\hat{R} + 2G_{4X}(\pi, X)\left[\left(\hat{\Box}\pi\right)^2 - \pi_{;MN}\pi^{;MN}\right],$$

$$\mathcal{L}_5 = G_5(\pi, X)\hat{G}^{MN}\pi_{;MN} + \frac{1}{3}G_{5X}(\pi, X)\left[\left(\hat{\Box}\pi\right)^3 - 3\hat{\Box}\pi\pi_{;MN}\pi^{;MN} + 2\pi_{;MN}\pi^{;MP}\pi_{;P}^{\ \ N}\right],$$

$$\mathcal{L}_6 = G_6(\pi, X)\,\mathcal{O}\left[R^2\right] + G_{6X}(\pi, X)\,\mathcal{O}\left[R(\nabla^2\pi)^2\right] + G_{6XX}(\pi, X)\,\mathcal{O}\left[(\nabla^2\pi)^4\right]\,,$$

$\mathcal{L}_2$, $\mathcal{L}_3$ → нединамический A_μ

» Теория Хорндески → U(1) векторное калибровочное поле

$$S = \int \mathrm{d}^5x\sqrt{-g}\left(\mathcal{L}_2 + \mathcal{L}_3 + \mathcal{L}_4 + \mathcal{L}_5 + \mathcal{L}_6\right),$$

$$\mathcal{L}_2 = F(\pi, X),$$

$$\mathcal{L}_3 = K(\pi, X)\Box\pi,$$

$$\mathcal{L}_4 = -G_4(\pi, X)R + 2G_{4X}(\pi, X)\left[\left(\hat{\Box}\pi\right)^2 - \pi_{;MN}\pi^{;MN}\right],$$

$$\mathcal{L}_5 = G_5(\pi, X)\hat{G}^{MN}\pi_{;MN}$$
$$+\frac{1}{3}G_{5X}(\pi, X)\left[\left(\hat{\Box}\pi\right)^3 - 3\hat{\Box}\pi\pi_{;MN}\pi^{;MN} + 2\pi_{;MN}\pi^{;MP}\pi_{;P}^{\ N}\right],$$

$$\mathcal{L}_6 = G_6(\pi, X)\,\mathcal{O}\left[R^2\right] + G_{6X}(\pi, X)\,\mathcal{O}\left[R(\nabla^2\pi)^2\right] + G_{6XX}(\pi, X)\,\mathcal{O}\left[(\nabla^2\pi)^4\right],$$

$\mathcal{L}_4$ → появляется неминимальная связь с A_μ

» Теория Хорндески → U(1) векторное калибровочное поле

$$S = \int \mathrm{d}^5 x \sqrt{-g}\, (\mathcal{L}_2 + \mathcal{L}_3 + \mathcal{L}_4 + \mathcal{L}_5 + \mathcal{L}_6)\,,$$

$$\mathcal{L}_2 = F(\pi, X),$$

$$\mathcal{L}_3 = K(\pi, X)\Box\pi,$$

$$\mathcal{L}_4 = -G_4(\pi, X)R + 2G_{4X}(\pi, X)\left[\left(\hat{\Box}\pi\right)^2 - \pi_{;MN}\pi^{;MN}\right],$$

$$\mathcal{L}_5 = G_5(\pi, X)\hat{G}^{MN}\pi_{;MN}$$

$$+\frac{1}{3}G_{5X}(\pi, X)\left[\left(\hat{\Box}\pi\right)^3 - 3\hat{\Box}\pi\pi_{;MN}\pi^{;MN} + 2\pi_{;MN}\pi^{;MP}\pi_{;P}^{\ \ N}\right],,$$

$$\mathcal{L}_6 = G_6(\pi, X)\,\mathcal{O}\left[R^2\right] + G_{6X}(\pi, X)\,\mathcal{O}\left[R(\nabla^2\pi)^2\right] + G_{6XX}(\pi, X)\,\mathcal{O}\left[(\nabla^2\pi)^4\right],$$

$\mathcal{L}_5$, $\mathcal{L}_6$ $\to$ A_μ – векторный Галилеон

» Теория Хорндески → U(1) векторное калибровочное поле

$$\mathcal{L}_{4A} = -\frac{\phi^2}{4} G_4 F_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta} + \phi^2 G_{4X} F_{\alpha\gamma} F^{\alpha}{}_{\beta} \pi^{;\beta} \pi^{;\gamma};$$

$$\mathcal{L}_{5A} = G_5 \phi^2 \left(\frac{1}{2} F^{\alpha\beta} F_{\alpha}{}^{\gamma} \pi_{;\beta\gamma} - \frac{1}{8} F^{\alpha\beta} F_{\alpha\beta} \Box\pi + \frac{1}{2} F^{\alpha\beta} \nabla^{\gamma} F_{\alpha\gamma} \pi_{;\beta} \right)$$
$$+ G_5 \phi^2 \left(\frac{3}{2\phi} F^{\alpha\beta} F_{\alpha}{}^{\gamma} \phi_{;\beta} \pi_{;\gamma} - \frac{3}{8\phi} F^{\alpha\beta} F_{\alpha\beta} \phi^{;\gamma} \pi_{;\gamma} \right)$$
$$+ G_{5X} \phi^2 \left(\frac{1}{2} F^{\alpha\beta} F_{\alpha}{}^{\gamma} \Box\left(\pi\right) \pi_{;\beta} \pi_{;\gamma} - \frac{1}{2} F^{\alpha\beta} F^{\gamma\delta} \pi_{;\alpha\gamma} \pi_{;\beta} \pi_{;\delta} \right);$$

$$\mathcal{L}_{6A} = G_6 \phi^2 \left(-\frac{9}{\phi} F_{\alpha}{}^{\beta} \nabla^{\gamma} F_{\beta\gamma} \phi^{;\alpha} + \frac{3}{2} \nabla^{\alpha} F_{\alpha\beta} \nabla^{\gamma} F_{\gamma}{}^{\beta} - \frac{3}{\phi} F^{\alpha\beta} \nabla^{\gamma} F_{\alpha\beta} \phi_{;\gamma} \right.$$
$$\left. + \frac{3}{\phi} F_{\alpha}{}^{\beta} \nabla^{\alpha} F_{\beta\gamma} \phi^{;\gamma} - \frac{15}{16} \nabla^{\alpha} F_{\beta\gamma} \nabla_{\alpha} F^{\beta\gamma} + \frac{3}{8} \nabla^{\alpha} F_{\beta\gamma} \nabla^{\beta} F_{\alpha}{}^{\gamma} \right)$$
$$+ 6 G_{6X} \left(-F_{\alpha}{}^{\beta} \Box\left(\pi\right) \nabla^{\gamma} F_{\beta\gamma} \pi^{;\alpha} + F_{\alpha\beta} \nabla^{\gamma} F_{\gamma\delta} \pi^{;\alpha\delta} \pi^{;\beta} \right.$$
$$\left. + F_{\alpha}{}^{\beta} \nabla^{\gamma} F_{\beta\delta} \pi_{;\gamma}{}^{\delta} \pi^{;\alpha} \right) + \mathcal{O}\left(\left(F_{\alpha\beta}\right)^4 \right)$$

» Скорости фотона и гравитона над космологическим фоном

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t)\left(dx^2 + dy^2 + dz^2\right) ,$$

$$S_V = \int \mathrm{d}t\, \mathrm{d}^3x\, a\phi^3 \left(\mathcal{G}_V\, \left(\dot{A}_i\right)^2 - \mathcal{F}_V\, \left(\frac{\vec{\nabla}}{a} \times \vec{A}\right)^2\right) ,$$

$$\mathcal{G}_V = \tfrac{1}{2}\left[G_4 - 2XG_{4X} - X\left(2H\dot{\pi}G_{5X} - \frac{1}{2}G_{5\pi}\right)\right]$$

$$\mathcal{F}_V = \frac{1}{2}\left[G_4 - \frac{1}{2}X\left(G_{5\pi} + 2G_{5X}\ddot{\pi}\right)\right]$$

$$S_T = \int \mathrm{d}t\ \mathrm{d}^3x a^3\phi\left[\mathcal{G}_T\left(\dot{h}_{ij}\right)^2 - \frac{\mathcal{F}_T}{a^2}\left(\vec{\nabla}h_{ij}\right)^2\right] ,$$

$$\mathcal{G}_T = 2\left[G_4 - 2XG_{4X} - X\left(H\dot{\pi}G_{5X} - \frac{1}{2}G_{5\pi}\right)\right]$$

$$\mathcal{F}_T = 2\left[G_4 - X\left(\ddot{\pi}G_{5X} + G_{5\pi}\right)\right]$$

» Скорости фотона и гравитона над космологическим фоном

$$S = \int \mathrm{d}^4x\sqrt{-g}\left(\mathcal{L}_2 + \mathcal{L}_3 + \mathcal{L}_4 + \mathcal{L}_5\right),$$

$$\mathcal{L}_2 = F(\pi, X),$$

$$\mathcal{L}_3 = K(\pi, X)\Box\pi,$$

$$\mathcal{L}_4 = -G_4(\pi, X)R + \cancel{2G_{4X}(\pi, X)\left[(\Box\pi)^2 - \pi_{;\mu\nu}\pi^{;\mu\nu}\right]},$$

$$\mathcal{L}_5 = \cancel{G_5(\pi, X)G^{\mu\nu}\pi_{;\mu\nu}} + \cancel{\frac{1}{3}G_{5X}\left[(\Box\pi)^3 - 3\Box\pi\pi_{;\mu\nu}\pi^{;\mu\nu} + 2\pi_{;\mu\nu}\pi^{;\mu\rho}\pi_{;\rho}{}^{\nu}\right]},$$

$$c_T^2 = c_v^2 = 1$$

$$\mathcal{G}_T = 2\left[G_4 - \cancel{2XG_{4X}} - \cancel{X\left(H\dot{\pi}G_{5X} - \frac{1}{2}G_{5\pi}\right)}\right]$$

$$\mathcal{F}_T = 2\left[G_4 - \cancel{X\left(\ddot{\pi}G_{5X} + G_{5\pi}\right)}\right]$$

» Скорости фотона и гравитона над космологическим фоном

$$S = \int \mathrm{d}^4x\sqrt{-g}\left(\mathcal{L}_2 + \mathcal{L}_3 + \mathcal{L}_4 + \mathcal{L}_5\right),$$

$$\mathcal{L}_2 = F(\pi, X),$$

$$\mathcal{L}_3 = K(\pi, X)\Box\pi,$$

$$\mathcal{L}_4 = -G_4(\pi, X)R + 2G_{4X}(\pi, X)\left[(\Box\pi)^2 - \pi_{;\mu\nu}\pi^{;\mu\nu}\right],$$

$$\mathcal{L}_5 = G_5(\pi)G^{\mu\nu}\pi_{;\mu\nu} + \cancel{\frac{1}{3}G_{5X}\left[(\Box\pi)^3 - 3\Box\pi\pi_{;\mu\nu}\pi^{;\mu\nu} + 2\pi_{;\mu\nu}\pi^{;\mu\rho}\pi_{;\rho}{}^{\nu}\right]},$$

$$c_T^2 = c_v^2 \neq 1$$

$$\mathcal{G}_T = 2\left[G_4 - 2XG_{4X} - X\left(\cancel{H\dot{\pi}G_{5X}} - \frac{1}{2}G_{5\pi}\right)\right]$$

$$\mathcal{F}_T = 2\left[G_4 - X\left(\cancel{\ddot{\pi}G_{5X}} + G_{5\pi}\right)\right]$$

» Допустимые теории Хорндески

$$
\begin{aligned}
S &= \int \mathrm{d}^4x\sqrt{-g}\left(\mathcal{L}_2+\mathcal{L}_3+\mathcal{L}_4+\mathcal{L}_5\right), \\
\mathcal{L}_2 &= F(\pi, X), \\
\mathcal{L}_3 &= K(\pi, X)\Box\pi, \\
\mathcal{L}_4 &= -G_4(\pi, X)R \\
\mathcal{L}_5 &= c\, G_{\mu\nu}\pi^{;\mu\nu}
\end{aligned}
$$

» Допустимые теории Хорндески

$$S = \int \mathrm{d}^4x\sqrt{-g}\left(\mathcal{L}_2 + \mathcal{L}_3 + \mathcal{L}_4 + \mathcal{L}_5\right),$$
$$\mathcal{L}_2 = F(\pi, X),$$
$$\mathcal{L}_3 = K(\pi, X)\Box\pi,$$
$$\mathcal{L}_4 = -G_4(\pi, X)R$$
$$\mathcal{L}_5 = c\, G_{\mu\nu}\pi^{;\mu\nu}$$

$$S = \int \mathrm{d}^4x\sqrt{-g}\left(\mathcal{L}_2 + \mathcal{L}_3 + \mathcal{L}_4 + \mathcal{L}_5\right),$$
$$\mathcal{L}_2 = F(\pi, X),$$
$$\mathcal{L}_3 = K(\pi, X)\Box\pi,$$
$$\mathcal{L}_4 = -G_4(\pi, X)R + 2G_{4X}(\pi, X)\left[(\Box\pi)^2 - \pi_{;\mu\nu}\pi^{;\mu\nu}\right],$$
$$\mathcal{L}_5 = G_5(\pi)G^{\mu\nu}\pi_{;\mu\nu}$$

» Скорости фотона и гравитона над сферически-симметричным фоном

Сферически-симметричный фон:

$$ds^2 = -A(t,r)dt^2 + \tfrac{dr^2}{B(t,r)} + J^2(t,r)\left(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2\right)$$

» Скорости фотона и гравитона над сферически-симметричным фоном

Сферически-симметричный фон:

$$ds^2 = -A(t,r)dt^2 + \frac{dr^2}{B(t,r)} + J^2(t,r)\left(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2\right)$$

2 тензорные моды		Вектор		2 Скаляра
$\swarrow$	$\searrow$	$\swarrow$	$\searrow$	$\Downarrow$
нечет (Q)	чет	нечет $(\mathcal{V})$	чет	2 чет

» Скорости фотона и гравитона над сферически-симметричным фоном

Сферически-симметричный фон:

$$ds^2 = -A(t,r)dt^2 + \frac{dr^2}{B(t,r)} + J^2(t,r)\left(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2\right)$$

2 тензорные моды		Вектор		2 Скаляра
$\swarrow\searrow$		$\swarrow\searrow$		$\Downarrow$
нечет (Q)	чет	нечет $(\mathcal{V})$	чет	2 чет
$\searrow$		$\swarrow$		

Нечетный сектор (гравитон+фотон)

» Скорости фотона и гравитона над сферически-симметричным фоном

$$\mathcal{L}^{(2)}_{h+\mathcal{V}} = \mathcal{K}_{ij}\dot{v}^i\dot{v}^j - \mathcal{G}_{ij}v^{i\prime}v^{j\prime} + \mathcal{Q}_{ij}\dot{v}^i v^{j\prime} - \ell(\ell+1)\mathcal{M}_{ij(\ell^2)}v^i v^j + \ldots$$

где $v^1 = Q,\ v^2 = \mathcal{V}$

» Скорости фотона и гравитона над сферически-симметричным фоном

$$\mathcal{L}^{(2)}_{h+\mathcal{V}} = \mathcal{K}_{ij}\dot{v}^i\dot{v}^j - \mathcal{G}_{ij}v^{i\prime}v^{j\prime} + \mathcal{Q}_{ij}\dot{v}^i v^{j\prime} - \ell(\ell+1)\mathcal{M}_{ij(\ell^2)}v^i v^j + \ldots$$

где $v^1 = Q,\ v^2 = \mathcal{V}$

$$\left(\omega^2\mathcal{K}_{ij} - k^2\mathcal{G}_{ij} - \omega k\mathcal{Q}_{ij} - \ell(\ell+1)\mathcal{M}_{ij(\ell^2)}\right)\Big|_{Eigenvalues} = 0$$

» Скорости фотона и гравитона над сферически-симметричным фоном

$$\mathcal{L}^{(2)}_{h+\mathcal{V}} = \mathcal{K}_{ij}\dot{v}^i\dot{v}^j - \mathcal{G}_{ij}v^{i\prime}v^{j\prime} + \mathcal{Q}_{ij}\dot{v}^i v^{j\prime} - \ell(\ell+1)\mathcal{M}_{ij(\ell^2)}v^i v^j + \dots$$

где $v^1 = Q,\ v^2 = \mathcal{V}$

$$\left(\omega^2\mathcal{K}_{ij} - k^2\mathcal{G}_{ij} - \omega k\mathcal{Q}_{ij} - \ell(\ell+1)\mathcal{M}_{ij(\ell^2)}\right)\Big|_{Eigenvalues} = 0$$

$$c_r^2 - 2\sqrt{\frac{B}{A}}\frac{\mathcal{J}}{\mathcal{F}}\cdot c_r - \frac{\mathcal{G}}{\mathcal{F}} = 0$$

» Скорости фотона и гравитона над сферически-симметричным фоном

$$\mathcal{L}^{(2)}_{h+\mathcal{V}} = \mathcal{K}_{ij}\dot{v}^i\dot{v}^j - \mathcal{G}_{ij}v^{i\prime}v^{j\prime} + \mathcal{Q}_{ij}\dot{v}^i v^{j\prime} - \ell(\ell+1)\mathcal{M}_{ij(\ell^2)}v^i v^j + \dots$$

где $v^1 = Q,\ v^2 = \mathcal{V}$

$$\left(\omega^2\mathcal{K}_{ij} - k^2\mathcal{G}_{ij} - \omega k\mathcal{Q}_{ij} - \ell(\ell+1)\mathcal{M}_{ij(\ell^2)}\right)\Big|_{Eigenvalues} = 0$$

$$c_r^2 - 2\sqrt{\frac{B}{A}}\frac{\mathcal{J}}{\mathcal{F}}\cdot c_r - \frac{\mathcal{G}}{\mathcal{F}} = 0$$

$$c_r^{(\pm)} = \sqrt{\frac{B}{A}}\frac{\mathcal{J}}{\mathcal{F}} \pm \frac{1}{\mathcal{F}}\sqrt{\mathcal{Z}}$$

$$c^+_{r,Q} = c^+_{r,\mathcal{V}}, \quad c^-_{r,Q} = c^-_{r,\mathcal{V}}$$

» Скорости фотона и гравитона над сферически-симметричным фоном

$$\mathcal{L}^{(2)}_{h+\mathcal{V}} = \mathcal{K}_{ij}\dot{v}^i\dot{v}^j - \mathcal{G}_{ij}v^{i\prime}v^{j\prime} + \mathcal{Q}_{ij}\dot{v}^i v^{j\prime} - \ell(\ell+1)\mathcal{M}_{ij(\ell^2)}v^i v^j + \dots$$

где $v^1 = Q, \ v^2 = \mathcal{V}$

$$\left(\omega^2\mathcal{K}_{ij} - k^2\mathcal{G}_{ij} - \omega k\mathcal{Q}_{ij} - \ell(\ell+1)\mathcal{M}_{ij(\ell^2)}\right)\Big|_{Eigenvalues} = 0$$

$$c_r^2 - 2\sqrt{\frac{B}{A}}\frac{\mathcal{J}}{\mathcal{F}}\cdot c_r - \frac{\mathcal{G}}{\mathcal{F}} = 0$$

$$c_r^{(\pm)} = \sqrt{\frac{B}{A}}\frac{\mathcal{J}}{\mathcal{F}} \pm \frac{1}{\mathcal{F}}\sqrt{\mathcal{Z}}$$

$$c^+_{r,Q} = c^+_{r,\mathcal{V}}, \quad c^-_{r,Q} = c^-_{r,\mathcal{V}}$$

$$\left(c_\theta^2 \cdot \mathbf{I}_{ij} - \frac{J^2}{A}\mathcal{K}^{-1}_{ik}\mathcal{M}_{kj}\right)\Big|_{Eigenvalues} = 0$$

» Скорости фотона и гравитона над сферически-симметричным фоном

$$\mathcal{L}^{(2)}_{h+\mathcal{V}} = \mathcal{K}_{ij}\dot{v}^i\dot{v}^j - \mathcal{G}_{ij}v^{i\prime}v^{j\prime} + \mathcal{Q}_{ij}\dot{v}^i v^{j\prime} - \ell(\ell+1)\mathcal{M}_{ij(\ell^2)}v^i v^j + \dots$$

где $v^1 = Q,\ v^2 = \mathcal{V}$

$$\left(\omega^2\mathcal{K}_{ij} - k^2\mathcal{G}_{ij} - \omega k\mathcal{Q}_{ij} - \ell(\ell+1)\mathcal{M}_{ij(\ell^2)}\right)\Big|_{Eigenvalues} = 0$$

$$c_r^2 - 2\sqrt{\frac{B}{A}}\frac{\mathcal{J}}{\mathcal{F}}\cdot c_r - \frac{\mathcal{G}}{\mathcal{F}} = 0$$

$$c_r^{(\pm)} = \sqrt{\frac{B}{A}}\frac{\mathcal{J}}{\mathcal{F}} \pm \frac{1}{\mathcal{F}}\sqrt{\mathcal{Z}}$$

$$c^+_{r,Q} = c^+_{r,\mathcal{V}}, \quad c^-_{r,Q} = c^-_{r,\mathcal{V}}$$

$$\left(c_\theta^2 \cdot \mathbf{I}_{ij} - \frac{J^2}{A}\mathcal{K}^{-1}_{ik}\mathcal{M}_{kj}\right)\Big|_{Eigenvalues} = 0$$

$$c^2_{\theta,Q} = c^2_{\theta,\mathcal{V}} = \frac{\mathcal{Z}}{\mathcal{F}\mathcal{H}}$$

» Скорости фотона и гравитона над сферически-симметричным фоном

$$\mathcal{L}^{(2)}_{h+\mathcal{V}} = \mathcal{K}_{ij}\dot{v}^i\dot{v}^j - \mathcal{G}_{ij}v^{i\prime}v^{j\prime} + \mathcal{Q}_{ij}\dot{v}^i v^{j\prime} - \ell(\ell+1)\mathcal{M}_{ij(\ell^2)}v^i v^j + \dots$$

где $v^1 = Q,\ v^2 = \mathcal{V}$

$$\left(\omega^2\mathcal{K}_{ij} - k^2\mathcal{G}_{ij} - \omega k\mathcal{Q}_{ij} - \ell(\ell+1)\mathcal{M}_{ij(\ell^2)}\right)\Big|_{Eigenvalues} = 0$$

$$c_r^2 - 2\sqrt{\frac{B}{A}}\frac{\mathcal{J}}{\mathcal{F}}\cdot c_r - \frac{\mathcal{G}}{\mathcal{F}} = 0$$

$$c_r^{(\pm)} = \sqrt{\frac{B}{A}}\frac{\mathcal{J}}{\mathcal{F}} \pm \frac{1}{\mathcal{F}}\sqrt{\mathcal{Z}}$$

$$c^+_{r,Q} = c^+_{r,\mathcal{V}}, \quad c^-_{r,Q} = c^-_{r,\mathcal{V}}$$

$$\left(c_\theta^2\cdot\mathbf{I}_{ij} - \frac{J^2}{A}\mathcal{K}^{-1}_{ik}\mathcal{M}_{kj}\right)\Big|_{Eigenvalues} = 0$$

$$c^2_{\theta,Q} = c^2_{\theta,\mathcal{V}} = \frac{\mathcal{Z}}{\mathcal{F}\mathcal{H}}$$

$$\mathcal{F} = 2\phi\left[G_4 - G_{4X}\frac{\dot\pi^2}{A} - G_{5\pi}\left(X - \frac{\dot\pi^2}{A}\right)\right]$$

$$\mathcal{G} = 2\phi\left[G_4 - 2G_{4X}\left(X - \frac{\dot\pi^2}{2A}\right) + G_{5\pi}\left(X - \frac{\dot\pi^2}{A}\right)\right]$$

$$\mathcal{H} = 2\phi\left[G_4 - 2G_{4X}X + G_{5\pi}X\right]$$

$$\mathcal{J} = 2\phi\,\dot\pi\pi'(G_{4X} - G_{5\pi})$$

$$\mathcal{Z} = \mathcal{G}\mathcal{F} + \frac{B}{A}\cdot\mathcal{J}^2$$

» Итоги

* Теория Хорндески подходит для описания современной вселенной

» Итоги

* Теория Хорндески подходит для описания современной вселенной

* Темная Материя и Темная энергия из теории Хорндески не закрыты после GW170817

* GW170817: $|\frac{c_T}{c} - 1| < 10^{-15}$

» Итоги

* Теория Хорндески подходит для описания современной вселенной

* Темная Материя и Темная энергия из теории Хорндески не закрыты после GW170817
  * GW170817: $|\frac{c_T}{c} - 1| < 10^{-15}$

* Построение теории калибровочных векторных галилеонов возможно

Итоги

* Теория Хорндески подходит для описания современной вселенной
* Темная Материя и Темная энергия из теории Хорндески не закрыты после GW170817
* GW170817: $|\frac{c_T}{c} - 1| < 10^{-15}$
* Построение теории калибровочных векторных галилеонов возможно

Спасибо за внимание!

» Итоги

* Теория Хорндески подходит для описания современной вселенной

* Темная Материя и Темная энергия из теории Хорндески не закрыты после GW170817
* GW170817: $|\frac{c_T}{c} - 1| < 10^{-15}$

* Построение теории калибровочных векторных галилеонов возможно

Спасибо за внимание!