

Модели темной энергии

В. И. Докучаев

Институт ядерных исследований, РАН

Марковские чтения — 2010

Основные компоненты Вселенной

Материя состоит из частиц и полей, а более строго — только из квантовых полей

Частицы являются локализованными возбуждениями полей

В англоязычной физике материей часто называют только фермионы, а бозоны (переносчики взаимодействия) называют полями

Определение: компонента Вселенной называется “темной”, если от нее не регистрируется свет

- **70% — ‘темное поле’ \iff ‘темная энергия’**

В соответствии со Стандартной космологической моделью (теория+эксперимент) доминирующей компонентой во Вселенной является либо равномерно заполняющее всю Вселенную поле с отрицательным давлением ($p < 0$), либо ненулевое вакуумное среднее всех полей ($\equiv \Lambda$ — космологическая постоянная)

Эта компонента по определению называется ‘Темной Энергией’ (ТЭ)

- **25% — ‘темные частицы’ \iff ‘темная материя’**

На долю частиц остается 30% Вселенной

Природа большей части этих частиц неизвестна

Неизвестные частицы составляют компоненту Вселенной с нулевым давлением ($p = 0$), называемую темной материей

- **3-5% — видимая материя (барионы)**

Известные частицы (это в основном барионы в звездах и в межзвездном газе) составляют лишь очень малую долю в наблюдаемой Вселенной

Состав ‘темной энергии’ и ‘темной материи’ неизвестен!

Приходится констатировать, что физический состав основных компонентов Вселенной (>95%) неизвестен!

Широкое поле для разработки моделей темной энергии и темной материи!

Термин 'темная энергии' физически неграмотен

- У энергии должен быть физический носитель

Энергия не существует сама по себе

Энергия не может быть темной или светлой

- Более правильно говорить о 'темном поле'

Неправильная терминология, однако, прочно прижилась и теперь физики пытаются нагрузить термин 'темная энергия' разумным содержанием

- Интерпретации наблюдательных данных существенно зависят от используемых моделей темной энергии поскольку теоретические модели используются на стадии подготовки астрофизических наблюдений и на стадии обработки экспериментальных результатов

- В нулевом приближении теория обслуживает эксперимент, либо, наоборот, эксперимент подтверждает или опровергает теорию

На самом деле теория и эксперимент тесно переплетены между собой

Физическая теория без экспериментального подтверждения вырождается в неплодотворную (метафизическую) схему поскольку в соответствии с теоремой Геделя для согласования конечного числа фактов (или аксиом) методами формальной логики можно разработать бесконечное число 'правильных' теорий

В свою очередь интерпретация эксперимента невозможна без привлечения и использования теоретических моделей и представлений

- Проблема 'темной энергии' — пример взаимосвязи эксперимента и теории

Пополняющийся список моделей темной энергии

В рамках ОТО:

- Λ
- квинтэссенция
- k -эссенция
- векторная
- неидеальная жидкость
- БКШ конденсат
- конденсат Борна-Инфельда
- конденсат духов
- нейтринная
- тахионная
- фантомная
- хамелеонная
- дилатонная

Обобщения ОТО:

- $f(R)$
- скалярно-тензорная
- геометрическая
- гравитация Гаусса-Бонне
- голографическая
- D -гравитация
- суперструнная
- конденсат Янга-Милса
- квантово запутанная
- взаимодействующая
- темная метрика
- доменные стенки
- отталкивающее тяготение

Теоретическое моделирование

(необязательные, но важные принципы, методы и критерии)

- **Научный метод: эксперимент в качестве критерия истинности**
Френсис Бэкон, Карл Поппер
Теория опровергается или подтверждается экспериментом
В более жесткой формулировке **Поппера**: теория является научной, если ее можно опровергнуть (принцип фальсифицируемости)
- **Метод экономии: “Не множь сущности без надобности”**
бритва Оккама
Эйнштейн сожалел о введении космологического члена Λ , **Ландау** запрещал говорить о Λ
- **Критерий красоты: теория должна быть красивой**
Красивые теории: геометрия Эвклида, теория электромагнитная поля, теория относительности, квантовая теория, суперсимметрия, теория (супер)струн ...
Сахаров на вопрос **Зельдовича** о величине космологической плотности отвечал, что $\Omega = 1$ из эстетических соображений
Ожидание: в полной КТП плотность энергии вакуума должно быть нулевой
- **Критерий новизны: предсказание новых эффектов**
- **Принцип свободы: разрешено все, что не запрещено**
В XX веке были актуальны 4 возможных “способа существования белковых тел”:
 - 1) ‘английский’: разрешено все, что не запрещено;
 - 2) ‘немецкий’: разрешено только то, что не запрещено;
 - 3) ‘французский’: разрешено все и даже то, что запрещено;
 - 4) ‘китайский’: запрещено все и даже то, что разрешено.Природа выбрала по крайней мере в нашей Вселенной английский вариант

‘Темная энергия’: начало

Открытие антигравитации в 1998 г. ?

- ‘Темная энергия’ составляет $\sim 70\%$ Вселенной
- ‘Темная энергия’ ускоряет расширение Вселенной

Антигравитация?

- В ньютоновской теории антигравитация невозможна
- В ОТО ускорение Вселенной может быть вызвано отрицательным давлением

‘Темная энергия’ в ОТО: $G = T(\rho, p, v)$

Космология Фридмана: однородная и изотропная Вселенная

- Ускорение

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

- Постоянная Хаббла

$$H^2(t) \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{k}{a^2}, \quad \dot{H} = -\frac{8\pi G}{3} (\rho + p) + \frac{k}{a^2}$$

- Плотность энергии

$$\dot{\rho} = -3H(\rho + p)$$

Космологическая постоянная Λ

Плотность энергии вакуума $\rho_v = -p_v = \frac{c^4}{8\pi G}\Lambda$

Глинер 1965, 1970; Зельдович 1968

● Лоренцевская инвариантность $\rho_v = -p_v = \text{const}$

● Проблема малости масштаба энергии
 \sim мэВ много меньше $M_{\text{Pl}} \sim 10^{19}$ ГэВ

● Проблема совпадения (тонкая настройка):
 $m_{\text{DE}} \sim H_0 \sim 1/(10^{28} \text{ см}) \sim 10^{-33}$ эВ

● Ожидание: в правильной (самосогласованной и полной) КТП плотность энергии вакуума должно быть нулевой, $\rho_v = \langle 0 | \text{все поля} | 0 \rangle = 0$

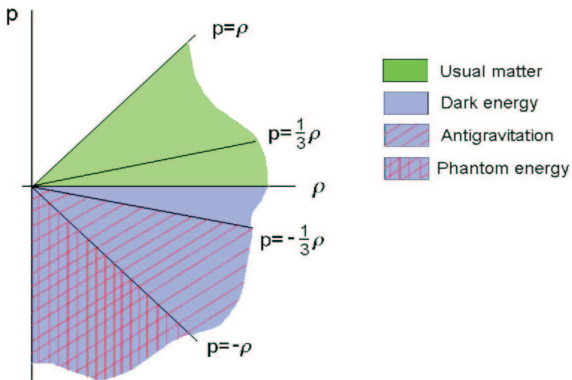
В ненарушенной суперсимметрии бозонные и фермионные вклады компенсируют друг друга. Однако суперсимметрия нарушается:

$$M_{\text{SUSY}} = 10^{12} \text{ eV}, \quad \rho_{v,\text{SUSY}} = M_{\text{SUSY}}^4 = 10^{60} \rho_{v,\text{obs}}$$

● Антропный принцип?

● Вероятностное предсказание: $\Omega_\Lambda \sim 1$ *S. Weinberg 1993*

Фазовая диаграмма и определения



Уравнения состояния:

сверхжесткая жидкость	$p = \rho$
тепловой фотонный газ	$p = \rho/3$
темная энергия	$p < 0$
квинтэссенция	$p < -\rho/3$
вакуум	$p = -\rho$
фантомная энергия	$p + \rho < 0$

За пределами Λ

Динамическая темная энергия

‘Темная энергия’ \iff ‘скалярное поле’ (квинтэссенция)

- Скалярное поле с минимальной связью

$$L_\phi = (1/2)(\partial_\mu\phi)^2 - V(\phi)$$

- Тензор энергии-импульса

$$T_{\mu\nu} = (2/\sqrt{-g})[\delta(\sqrt{-g}L)/\delta g_{\mu\nu}]$$

- Идеальная жидкость в космологии Фридмана

$$\rho_\phi = (1/2)\dot{\phi}^2 + V(\phi), \quad p_\phi = (1/2)\dot{\phi}^2 - V(\phi)$$

- Уравнение Клейна-Гордона

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} = dV(\phi)/d\phi$$

- Уравнение непрерывности

$$[(1/2)\dot{\phi}^2] + 6H[(1/2)\dot{\phi}^2] = -\dot{V} \Rightarrow d\rho/d \ln a = -3(\rho + p)$$

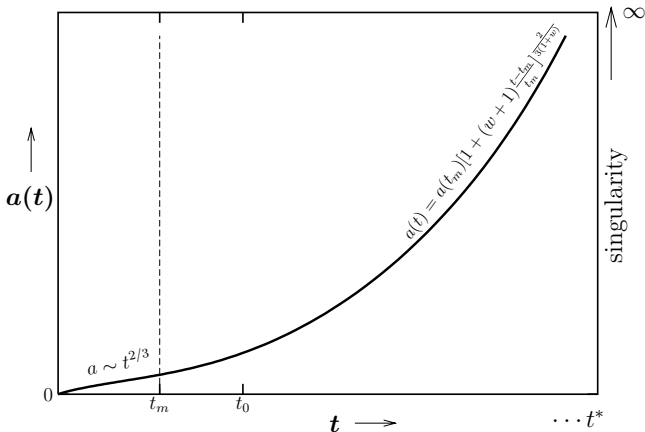
‘Большой Разрыв’ в конце Большого Взрыва?

Фантомная угроза при $w \equiv p/\rho = \text{const} < -1$

Фантом: отрицательная или сильно нелинейная кинетическая энергия (k -эссенция, струны, браны).

Проблема (квантовой) нестабильности фантома!?

Видимый горизонт сокращается, Вселенная расширяется до бесконечного радиуса за конечное время



Фантомная энергия ($\rho + p < 0$) и черные дыры

- Поток энергии идеальной жидкости

$$\vec{\Phi} = \frac{\rho c^2 + p}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \vec{v}$$

В случае фантомной жидкости поток энергии направлен против потока жидкости!

- Темп аккреции на черную дыру

$$\dot{m} = 4\pi m^2 A [\rho_\infty + p(\rho_\infty)], \quad A = \text{const} > 0$$

- $\dot{m} < 0$ при $\rho + p < 0$ независимо от уравнения состояния

Масса черной дыры уменьшается при аккреции фантома!

При Большом Разрыве все черные дыры независимо от их массы 'растворяются' в фантоме

Кинетическая-эссенция

- Неканоническая кинетическая энергия $K=f(X)$, $X \equiv \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi)^2$

$$L = -\frac{R}{6} + g(\phi)\check{p}(X), \quad X = (1/2)(\nabla\phi)^2, \quad 8\pi G/3 = 1$$

$$\check{p}(X) = \text{const} + X + \mathcal{O}(X), \quad X \rightarrow 0$$

- Решение слежения (tracking) с динамическим аттрактором

Обеспечивает позднее доминирование темной энергии

Самонастраивающаяся Вселенная может стартовать в широком интервале начальных условий, но затем вследствие существования аттрактора множество возможных решений выходит на следящее решение. На начальном этапе требуется режим быстрого замедления скатывания (fast-slow roll).

Zlatev Wang Steinhardt 1999

Armendariz-Picon Damour Mukhanov 1999

Armendariz-Picon Mukhanov Steinhardt 2000

Тахионная темная энергия

Мотивация из теории суперструн

$$\mathcal{L} = (1/2)(\partial_\mu\phi)^2 - V(\phi) \quad \Longrightarrow \quad \mathcal{L} = -V(\phi)\sqrt{1 - (\partial_\mu\phi)^2}$$

$$\rho = \frac{V(\phi)}{\sqrt{1 - (\partial_\mu\phi)^2}}, \quad p = -V(\phi)\sqrt{1 - (\partial_\mu\phi)^2}$$

Мягкая интерполяция между $p = -\rho \iff w = -1$
(вакуум) и $p = 0 \iff w = 0$ (пыль, газ Чаплыгина
 $p = 1/\rho$)

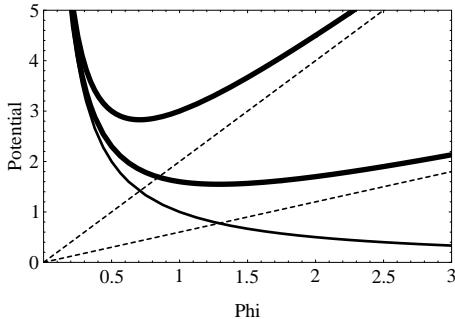
Sen hep-th/0203211

Padmanabhan hep-th/0204150

Взаимодействующая ТМ и ТЭ

Частицы переменной массы (variable-mass particles: 'vamps')

- $m_\psi = \lambda \langle \phi \rangle$, $V(\phi) = u_0 \phi^{-p} + \lambda \phi n_\psi$, $\langle \phi \rangle = \left(\frac{\rho u_0}{\lambda n_\psi} \right)^{1/(1+p)}$



- $\phi \propto a^{3/(1+p)}$, $m_\phi \propto a^{-3(2+p)/(1+p)}$, $m_\psi = \lambda \propto a^{3/(1+p)}$

Anderson Carroll astro-ph/9711288

Farrar Peebles astro-ph/0307316

Нейтринная темная энергия:

Нейтрино переменной массы (mass varying ν : MaVaNs)

- Масштаб энергии ТЭ $E_0 \simeq 2 \times 10^{-3} \text{ eV} \iff m_\nu = m_\nu(n_\nu)$

$$\mathcal{L} \sim \frac{\partial_\mu \phi}{\Lambda} \bar{\nu}_L \gamma^\mu \nu_L, \quad \text{or} \quad \mathcal{L}_{\text{int}} = \beta \frac{\phi}{M_{\text{pl}}} \frac{2}{f} |L_L|^2 H H + \text{h.c}$$

Li Wang Feng Zhang 2002

Fardon Nelson Weiner astro-ph/0309800

Peccei hep-ph/0411137

Голографическая (holographic) ТЭ

Мотивация из термодинамики черных дыр

Энтропия черной дыры

$$S_{\text{BH}} = \frac{1}{4}A = \pi[2mr_+ - e^2], \quad T_{\text{BH}} = \frac{\kappa}{2\pi} = \frac{\sqrt{m^2 - a^2}}{4\pi mr_+}$$

Голографический принцип: энтропия системы (и число степеней свободы) зависит не от объема системы V , а от ее поверхностной площади A

Следствием голографического принципа является связь между ИК и УФ обрезаниями в КТП:

$$L^3 \rho_{\text{DE}} \leq M_{\text{BH}} = L \sim H^{-1} \iff \rho_{\text{DE}} = 3L^{-2} \propto H^2$$

Переменная космологическая постоянная Λ !

Решается проблемы тонкой настройки: $\rho_{\text{DE}} \simeq \rho_{\text{DM}}$

Проблема: как сделать отрицательным давление $p_{\text{DE}} < 0$ для обеспечения ускорения Вселенной?

't Hooft 1993, Susskind 1994

Maldacena 1998, Fischler Susskind, 1998

Cohen Kaplan Nelson 1999

Hsu 2004, Li 2004, Horvat 2004

Темна ли темная энергия?

Темная энергия взаимодействует только гравитационно?

- **Связь с гравитацией: скалярно-тензорные теории**
Расширенная (обобщенная) квинтэссенция
Темная энергия (ТЭ) может сгущаться: **гравитационное линзирование**
- **Самодействие: псевдоскалярная квинтэссенция**
Связь с материей: газ Чаплыгина (пятая сила, объединение ТМ и ТЕ, влияние на спектр возмущений реликтового излучения)

Sandvik et al 2003

Какова природа 'темной энергия'?

- Ускоренное расширение Вселенной $\Lambda, \phi(t)\dots?$

Система Эйнштейна $f(R) = R$: $G + \Lambda = T$

Скалярно-тензорная гравитация $R/(8\pi G) \rightarrow F(\phi)R$

- Геометрическая 'темная энергия'?

Обобщение ОТО, теории $f(R)$: $G = T + \blacksquare$

'Наблюдаемое' ускорение расширения Вселенной — артефакт использования неправильных уравнений?

Модифицированная гравитация

Гравитация Гаусса-Бонне $\mathcal{G} = R^2 - 4R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} + R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma}$ $f(R)$

(мотивировано суперструнами)

Многомерная D-гравитация

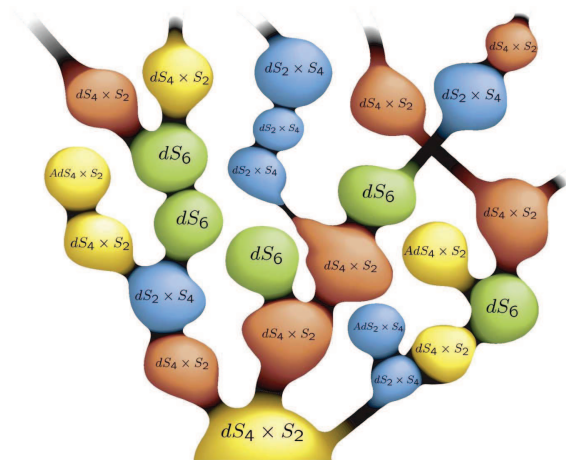
D-dim

(индуцированная геометрия на бране)

- Хаббловский пузырь (Hubble bubble)?
наша Вселенная лишь флуктуация в бóльшей вселенной
- Неправильный вопрос...?

Мультивселенная \iff multiverse

самовоспроизводящаяся и бесконечная во времени и пространстве



Наша Вселенная — отдельный пузырь в бесконечной пространственно-временной пене

Linde 1994

Blanco-Pillado Schwartz-Perlov Vilenkin arXiv:0912.4082

Антропный принцип

(очень популярный и очень странный)

B. Carter 1973

- В отдельных вселенных мультивселенной могут реализоваться любые состояния, в том числе разные числа пространственных измерений и разные величины мировых констант
- Нам всем очень повезло: совершенно случайно в нашей Вселенной реализовалось совсем неплохое состояние по сравнению с неудобными для жизни состояниями во многих других других вселенных

В соответствии с антропным принципом в нашей Вселенной (в нашем Пузыре) случайным образом реализовался английский вариант бытия

Во многих других вселенных некому даже удостовериться насколько они неудобны для обитания "белковых тел"

На бесконечных просторах мультивселенной реализуются все 4 "способа существования белковых тел", а также бесконечно много других экзотических способов

Некоторые вселенные в мультивселенной даже не связаны между собой причинным образом

В соответствии с антропным принципом в мультивселенной реализуются все, в том числе самые странные классические и квантовые состояния, и, например, существует бесконечное количество вселенных, в которых есть бог, а также бесконечное количество вселенных, в которых бога нет

- Антропный принцип примиряет с реальностью, но чувства "глубокого удовлетворения" не вызывает

Что же такое 'темная энергия' ?

(Ожидание и частное мнение)

- Скорее всего это динамическое скалярное поле, оставшееся после инфляции или после последнего фазового перехода во Вселенной
- В любом случае это новая физика вне Стандартной модели