

ЯБ - 100 Москва 2014

**В.Н. ЛУКАШ,**

**Астрокосмический центр,**

**ФИАН имени П.Н. Лебедева,**

**М.Л. ФИЛЬЧЕНКОВ,**

**Институт гравитации и космологии, РУДН**

# **ОТ ВАКУУМА ГЛИНЕРА–ЗЕЛЬДОВИЧА К ТЁМНОЙ ЭНЕРГИИ**

## **Содержание доклада**

1. Введение
2. Решение де Ситтера и вакуум Глинера–Зельдовича
3. Космологические модели
4. Космологические параметры и тёмная энергия
5. Заключение

## 1. Введение

Одними из важных достижений XX века явилось осознание важности учёта космологической постоянной в уравнениях гравитационного поля. Этот процесс был не простым. Эйнштейн в 1917 г. предположил, что космологическая постоянная необходима для обеспечения стационарности Вселенной. В том же году де Ситтер получил нестационарное решение для Вселенной без материи. После того как Фридман в 1922 г. предложил нестационарную модель расширяющейся Вселенной с материей, Эйнштейн отказался от введения космологической постоянной. В 1929 г. Хаббл установил, опираясь на наблюдения Слайфера (1912–1922 гг.), что скорости разбегающихся галактик пропорциональны расстояниям до них, что могло быть интерпретировано в рамках моделей де Ситтера и Фридмана. В 1934 г. Толмен обратил внимание на то, что решение де Ситтера соответствует нефизическому уравнению состояния с отрицательным давлением. В 1965 г. Глинер предложил считать, что начальной стадией эволюции Вселенной является вакуумоподобная среда с уравнением состояния  $p = -\varepsilon$ , согласующимся с решением де Ситтера. Идеи Глинера развивались в работах Дымниковой,

Гуревича, Маркова и Черниным. В 1968 г. Зельдович рассмотрел модель с космологической постоянной, отвечающую тому же уравнению состояния, что и у Толмена и Глинера. В 1979 г. Старобинский доказал, что решение де Ситтера получается из уравнений гравитационного поля с квантовыми поправками. В 1981 г. Зельдович ещё раз обратил внимание на роль деситтеровского вакуума в космологии. В силу его неустойчивости (скорость звука в нём мнимая) он распадается с рождением частиц (интерпретируемым как Большой взрыв), переходя в состояние материи с неотрицательным давлением. В 1987 г. Зельдович упомянул об инфляции с квазидеситтеровским уравнением состояния в связи рассмотрением спонтанного рождением Вселенной из ничего. Достижения космологии в последнее десятилетие XX века, основанные на интерпретации анизотропии реликтового излучения и ускоренного расширения Вселенной, привели к выводу о том, что в настоящую эпоху более 70% материи находится в состоянии с отрицательным давлением (квинтэссенция, деситтеровский вакуум, фантомная материя), близком к вакууму Глинера–Зельдовича, которое было названо тёмной энергией.

## 2. Решение де Ситтера и вакуум Глинера–Зельдовича

---

Уравнения гравитационного поля

$$R_{ik} - \frac{1}{2}Rg_{ik} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{ik}, \quad (1)$$

решенные де Ситтером для случая

$$\frac{8\pi G}{c^4}T_{ik} = \Lambda g_{ik}, \quad (2)$$

где  $\Lambda$  – космологическая постоянная, дают для тензора макроскопических тел

$$T_{ik} = (p + \varepsilon)u_i u_k - p g_{ik} \quad (3)$$

при

$$p = -\varepsilon, \quad \Lambda = \frac{8\pi G\varepsilon}{c^4} = \frac{3}{r_0^2} = const, \quad \varepsilon = const, \quad (4)$$

пространство постоянной кривизны

$$K = \frac{\Lambda}{3}, \quad (5)$$

при любом  $u_i$ , т.е. независимо от системы отсчёта (поэтому это состояние и считается вакуумным), которому соответствует статическая метрика де Ситтера

$$ds^2 = \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{r^2}{r_0^2}} - d\Omega^2, \quad (6)$$

где  $r_0$  – горизонт де Ситтера.

Координатным преобразованием эта метрика может быть приведена к общему виду метрики для однородных изотропных космологических моделей

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t)[d\chi^2 + f^2(\chi)d\Omega^2], \quad (7)$$

где  $\chi$  – гиперсферический угол,

$$f(\chi) = \begin{cases} \sin(\chi), & k = 1, \\ \chi, & k = 0, \\ sh(\chi) & k = -1. \end{cases}, \quad (8)$$

$$a(t) = r_0 \begin{cases} 2ch\frac{ct}{r_0}, & k = 1, \\ \exp\frac{ct}{r_0}, & k = 0, \\ 2sh\frac{ct}{r_0}, & k = -1. \end{cases}, \quad (9)$$

$$r = a(t)f(\chi), \quad (10)$$

в системе отсчёта, сопутствующей пробным телам – частицам, рождающимся при распаде деситтеровского вакуума; галактикам в современную эпоху. Вакуум Глинера–Зельдовича с уравнением состояния деситтеровского вакуума является начальной стадией эволюции Вселенной и, согласно Глинеру, конечной стадией гравитационного коллапса.

### 3. Космологические модели

Описание космологических моделей с помощью идеальной жидкости, имеющей баротропное уравнение состояния  $p = w\varepsilon$ , охватывает все виды материи, в том числе с отрицательным давлением:

- 1) фантомная материя при  $w < -1$ ,
- 2) деситтеровский вакуум при  $w = -1$ ,
- 3) доменные стенки при  $w = -\frac{2}{3}$ ,
- 4) космические струны при  $w = -\frac{1}{3}$ ,
- 5) пыль при  $w = 0$ ,
- 6) излучение при  $w = \frac{1}{3}$ ,
- 7) идеальный газ при  $w = \frac{2}{3}$ ,
- 8) предельно жёсткая материя при  $w = 1$ ,
- 9) экпиротическая материя при  $w > 1$ .

Мотивация для полевого описания космологических моделей определяется, прежде всего, тем, что материя состоит из фермионов, т.е. квантов спинорных полей, а взаимодействия осуществляются путем обмена виртуальными квантами векторных калибровочных полей.

Скалярные поля вводятся в рамках стандартной модели элементарных частиц для получения массы по механизму Хиггса. Они впервые были введены в космологию Гутом в 1981 г. при построении ин-

фляционной квазидеситтеровской модели с  $p \approx -\varepsilon$ . Инфляционная космология с тех пор остается в поле зрения большого числа специалистов (Линде, Виленкин и др.) и, как показывают последние данные по поляризации реликтового излучения, по-видимому, подтверждается регистрацией первичных гравитационных волн, возникающих в ранней Вселенной.

$$\varepsilon = \frac{\dot{\phi}^2}{2} + V(\phi), \quad (11)$$

$$p = \frac{\dot{\phi}^2}{2} - V(\phi). \quad (12)$$

В однородной изотропной модели скалярное поле и его потенциал удовлетворяют уравнению:

$$\ddot{\phi} + 3\frac{\dot{a}}{a}\dot{\phi} + \frac{dV}{d\phi} = 0. \quad (13)$$

Отсюда получаем

$$V(\phi) = V_0 e^{\mp \frac{2}{c} \sqrt{6\pi G(1+w)}\phi} \quad (14)$$

для баротропного уравнения состояния  $p = w\varepsilon$ .

Таким образом, описание однородных изотропных космологических моделей с помощью скалярного поля с экспоненциальным потенциалом эквивалентно описанию с помощью идеальной жидкости с баротропным уравнением состояния за исключением случая фантомной материи.

Нелинейное спинорное поле со степенной нелинейностью может моделировать уравнения состояния всех видов материи от экпиротической до фантомной.

#### 4. Космологические параметры и тёмная материя

Основными параметрами наблюдательной космологии являются:

параметр Хаббла

$$H = \frac{\dot{a}}{a}, \quad (15)$$

который определяется из зависимости  $z(m)$ , где  $z$  – красное смещение,  $m$  – звёздная величина галактик;

средняя плотность материи в единицах критической плотности

$$\Omega = \frac{8\pi G\varepsilon}{3c^2 H^2}, \quad (16)$$

который определяется из автокорреляционной функции  $l(l+1)C_l$  реликтового излучения, где  $l$  – номер мультиполя;

параметр замедления

$$q = -\frac{\ddot{a}a}{\dot{a}^2}, \quad (17)$$

который определяется из зависимости  $z(m)$ .



Легко получить, что

$$q = \frac{\Omega}{2}(1 + 3w). \quad (18)$$

Следовательно, определяя  $q$  и  $\Omega$  из наблюдений, можно вычислить  $w$ , т.е. величину фиксирующую тип материи в уравнении состояния  $p = w\varepsilon$ .

Наблюдения свидетельствуют об ускоренном расширении ( $\ddot{a} > 0$ ) плоской Вселенной ( $k = 0$ ). Полагая

$$q = -1 + \Delta q, \quad \Omega = 1 + \Delta\Omega, \quad w = -1 + \Delta w, \quad (19)$$

при

$$|\Delta q|, |\Delta\Omega|, |\Delta w| \ll 1, \quad (20)$$

получаем

$$\Delta w \approx \frac{2}{3}(\Delta q + \Delta\Omega). \quad (21)$$

Поскольку закон Хаббла выполняется уже на масштабах порядка границы Местной группы, а распределение галактик может считаться однородным и изотропным на масштабах более чем на два порядка его превышающим (парадокс Сэндиджа), то динамика расширения Вселенной должна определяться не галактиками, а тёмной энергией, существование которой объясняется в рамках инфляционных моделей.

## 5. Заключение

Таким образом среда или поле с отрицательным давлением, следующие из решения де Ситтера, и являющиеся основой для вакуумоподобных и инфляционных моделей, определяют эволюцию Вселенной как на ранней стадии, так в современную эпоху. Плотность энергии на инфляционной стадии в ранней Вселенной более чем на сто порядков превышает плотность тёмной энергии. Отличие от деситтеровской стадии в современную эпоху больше, чем в ранней Вселенной, т.к. помимо тёмной энергии в полную плотность энергии даёт заметный вклад тёмная и барионная материя с пылевым уравнением состояния ( $p = 0$ ).