



Современные расширения общей теории относительности

С.О.Алексеев



ХАОС

порядок, который только предстоит понять

Общая теория относительности

ВСЁ ОТНОСИТЕЛЬНО



Общая теория относительности

- Лагранжиан:

$$S = \text{const} * \int d^4x (-g)^{1/2} R$$

Общая теория относительности

- Лагранжиан:

$$S = \text{const} * \int d^4x (-g)^{1/2} R$$

- Уравнения Гильберта-Эйнштейна:

$$R_{\mu\nu} - (1/2) g_{\mu\nu} R = \text{const} * T_{\mu\nu}$$

Общая теория относительности

- Лагранжиан:

$$S = \text{const} * \int d^4x (-g)^{1/2} R$$

- Уравнения Гильберта-Эйнштейна:

$$R_{\mu\nu} - (1/2) g_{\mu\nu} R = \text{const} * T_{\mu\nu}$$

- Метрика Шварцшильда: ($d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2$)

$$ds^2 = \Delta dt^2 - \Delta^{-1} dr^2 - r^2 d\Omega^2$$

- $\Delta = 1 - 2M/r$

Общая теория относительности

- Лагранжиан:

$$S = \text{const} * \int d^4x (-g)^{1/2} R$$

- Уравнения Гильберта-Эйнштейна:

$$R_{\mu\nu} - (1/2) g_{\mu\nu} R = \text{const} * T_{\mu\nu}$$

- Метрика Шварцшильда: ($d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2$)

$$ds^2 = \Delta dt^2 - \Delta^{-1} dr^2 - r^2 d\Omega^2$$

- $\Delta = 1 - 2M/r$

- $\Delta = 1 - 2M/r - Q^2/r^2$ - Рейсснер-Нордстрем

Общая теория относительности

- Лагранжиан:

$$S = \text{const} * \int d^4x (-g)^{1/2} R$$

- Уравнения Гильберта-Эйнштейна:

$$R_{\mu\nu} - (1/2) g_{\mu\nu} R = \text{const} * T_{\mu\nu}$$

- Метрика Шварцшильда: ($d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2$)

$$ds^2 = \Delta dt^2 - \Delta^{-1} dr^2 - r^2 d\Omega^2$$

- $\Delta = 1 - 2M/r$
- $\Delta = 1 - 2M/r - Q^2/r^2$ - Рейсснер-Нордстрем
- $\Delta = 1 - 2M/r - Q^2/r^2 + A/r^3 + \dots$

Общая теория относительности

- Лагранжиан:

$$S = \text{const} * \int d^4x (-g)^{1/2} R$$

- Уравнения Гильберта-Эйнштейна:

$$R_{\mu\nu} - (1/2) g_{\mu\nu} R = \text{const} * T_{\mu\nu}$$

- Метрика Шварцшильда: $(d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2)$

$$ds^2 = \Delta dt^2 - \Delta^{-1} dr^2 - r^2 d\Omega^2$$

- $\Delta = 1 - 2M/r$

- $\Delta = 1 - 2M/r - Q^2/r^2$ - Рейсснер-Нордстрем

- Метрика Фридмана-Робертсона-Уокера (закр.):

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t)(d\chi^2 - \sin^2\chi d\Omega^2)$$



- ДЕТКА, Я ИЗ ГОРОДА АНГЕЛОВ!
- ЛОС АНДЖЕЛЕСА?
- АРХАНГЕЛЬСКА!

Проблемы ОТО

Современные представления о распределении типов материи во Вселенной по данным WMAP



Проблемы ОТО

- «Темная материя», «темная энергия»;

Проблемы ОТО

- «Темная материя», «темная энергия»;
- Отсутствие квантовой теории гравитации;

Проблемы ОТО

- «Темная материя», «темная энергия»;
- Отсутствие самосогласованной квантовой теории гравитации;
- Отсутствие единой теории всех физических взаимодействий;

Проблемы ОТО

- «Темная материя», «темная энергия»;
- Отсутствие самосогласованной квантовой теории гравитации;
- Отсутствие единой теории всех физических взаимодействий;
- Законы сохранения;

Проблемы ОТО

- «Темная материя», «темная энергия»;
- Отсутствие самосогласованной квантовой теории гравитации;
- Отсутствие единой теории всех физических взаимодействий;
- Законы сохранения;
- Протяженные тела;

Проблемы ОТО

- «Темная материя», «темная энергия»;
- Отсутствие самосогласованной квантовой теории гравитации;
- Отсутствие единой теории всех физических взаимодействий;
- Законы сохранения;
- Протяженные тела;
- Отсутствие экспериментального подтверждения новых подходов;

Проблемы ОТО

- «Темная материя», «темная энергия»;
- Отсутствие самосогласованной квантовой теории гравитации;
- Отсутствие единой теории всех физических взаимодействий;
- Законы сохранения;
- Протяженные тела;
- Отсутствие экспериментального подтверждения новых подходов;
- ...

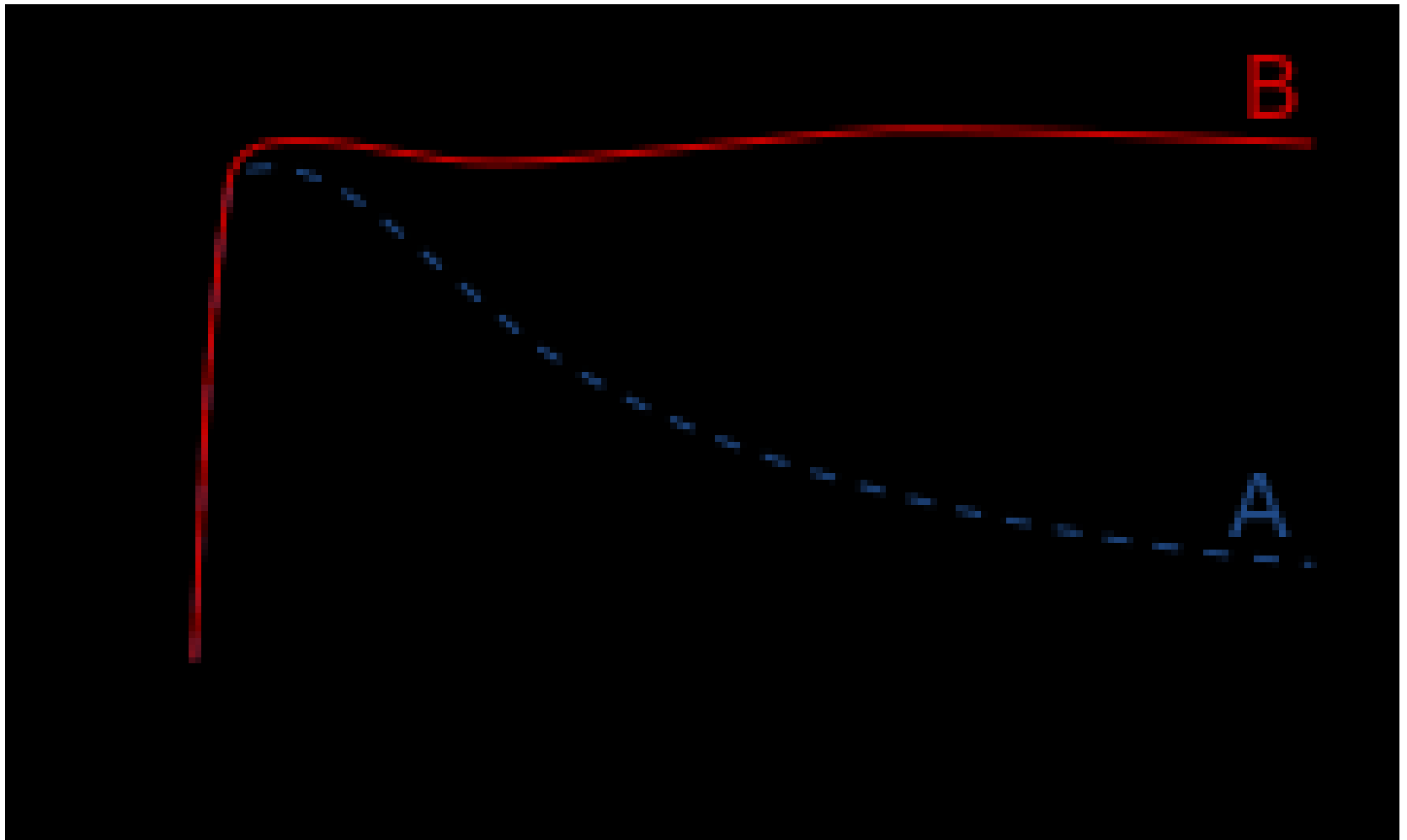


И что делать дальше?

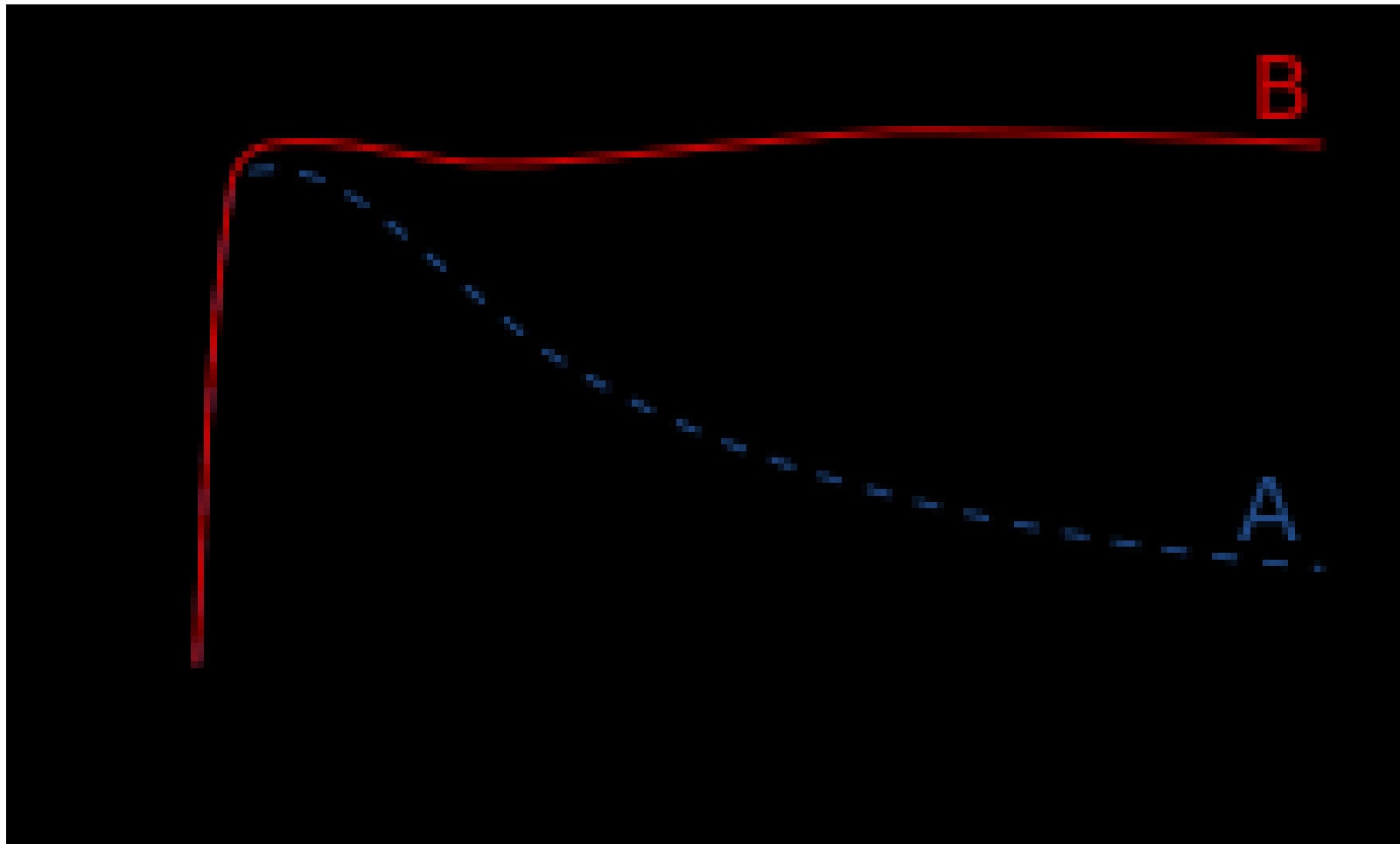
Развитие теории гравитации

Темная материя

- Модифицированная ньютоновская динамика (MOND)



Темная материя



MOND:

$$F = \frac{Mm}{r^2} \rightarrow F = \frac{Mm}{r^2} (1 - \beta r^2)$$

Темная энергия:

стандартный подход

- $S = (16\pi)^{-1} \int d^4x \sqrt{-g} [R - \Lambda]$

Темная энергия:

стандартный подход

- $S = (16\pi)^{-1} \int d^4x \sqrt{-g} [R - \Lambda]$
- Λ - не соответствует ни одному известному типу физического взаимодействия

Моделирование DM & DE

- MOND
- Гравитация со скалярным полем

$$S = (16\pi)^{-1} \int d^4x \sqrt{-g} \left[\Phi R - (\omega/\Phi) g^{\mu\nu} \partial_\mu \Phi \partial_\nu \Phi + V(\Phi) + 16\pi L_{\text{matter}} \right]$$

- $F(R)$ гравитация

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} (R + R^2 + \dots + R^\alpha)$$

Гравитация со скалярным полем (Модель Бранса-Дикке)

$$S = (16\pi)^{-1} \int d^4x \sqrt{-g} \left[\Phi R - (\omega/\Phi) g^{\mu\nu} \partial_\mu \Phi \partial_\nu \Phi + V(\Phi) + 16\pi L_{\text{matter}} \right]$$

$$G \sim 1/\Phi$$

GR limit $|\omega| \rightarrow \infty$

Cassini-Huygens: $|\omega| > 50000$

Гравитация со скалярным полем (Модель Бранса-Дикке)

$$S = (16\pi)^{-1} \int d^4x \sqrt{-g} \left[\Phi R - (\omega/\Phi) g^{\mu\nu} \partial_\mu \Phi \partial_\nu \Phi + V(\Phi) + 16\pi L_{\text{matter}} \right]$$

$$G \sim 1/\Phi$$

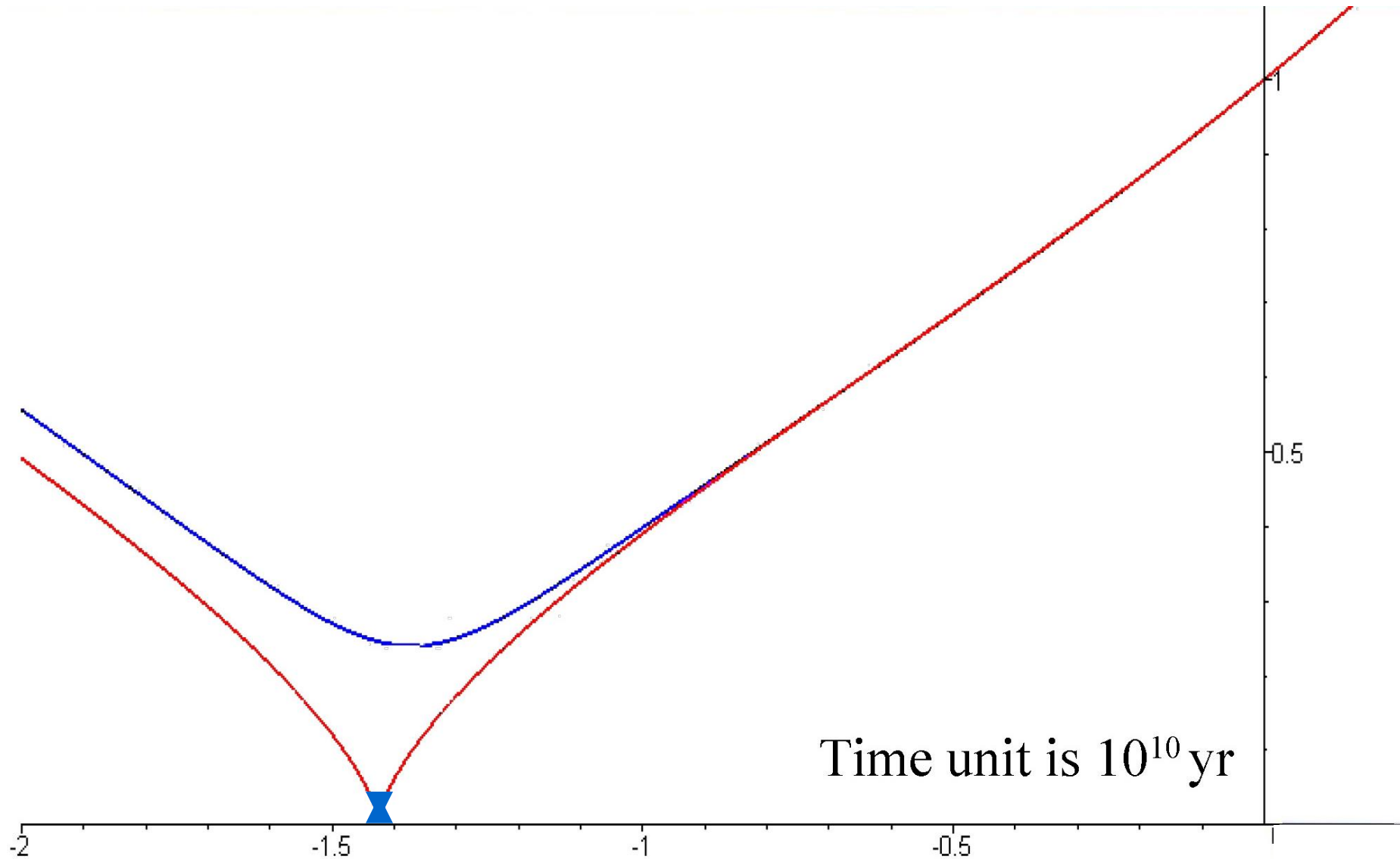
$$\text{GR limit } |\omega| \rightarrow \infty$$

$$\text{Cassini-Huygens: } |\omega| > 50000$$

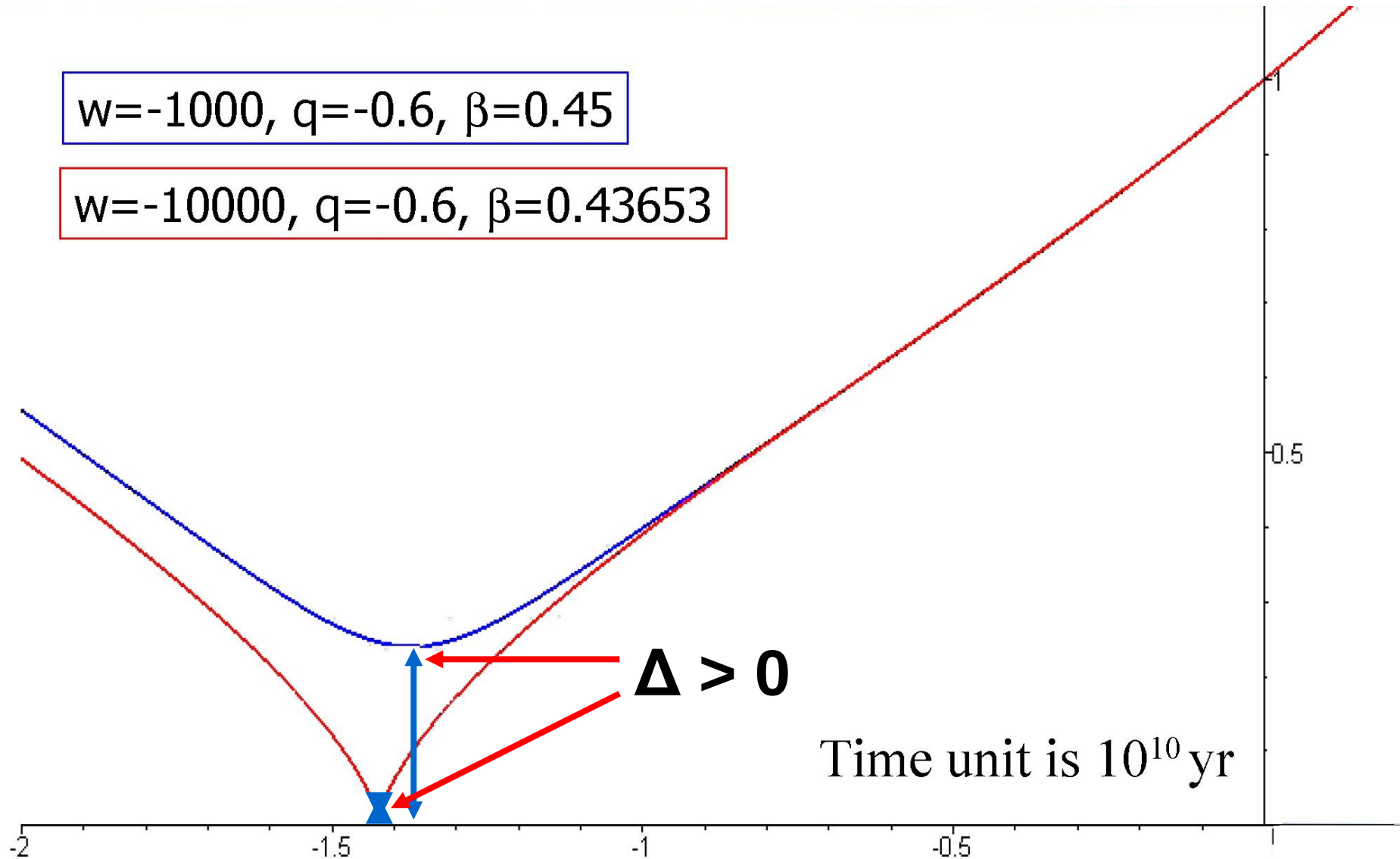
Метрика Фридмана-Робертсона-Уокера (закр.):

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t)(d\chi^2 - \sin^2\chi d\Omega^2)$$

Отскок масштабного фактора



Отскок масштабного фактора



- Гравитация со скалярным полем

$$S = (16\pi)^{-1} \int d^4x \sqrt{-g} \left[\Phi R - (\omega/\Phi) g^{\mu\nu} \partial_\mu \Phi \partial_\nu \Phi + V(\Phi) + 16\pi L_{\text{matter}} \right]$$

- $F(R)$ гравитация

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} (R + R^2 + \dots + R^n)$$

Хиггс, 1959

Хиггс, 1959

- $I_A = \int d^4x R^2 (-g)^{1/2}$

Хиггс, 1959

- $I_A = \int d^4x R^2 (-g)^{1/2}$
- $I_B = \int d^4x R_{\lambda\mu} R^{\lambda\mu} (-g)^{1/2}$

Хиггс, 1959

- $I_A = \int d^4x R^2 (-g)^{1/2}$
- $I_B = \int d^4x R_{\lambda\mu} R^{\lambda\mu} (-g)^{1/2}$
- **Инвариантность относительно преобразований Вейля $g_{\mu\nu} \rightarrow \varphi(x) g_{\mu\nu}$**

Хиггс, 1959

- $I_A = \int d^4x R^2 (-g)^{1/2}$
- $I_B = \int d^4x R_{\lambda\mu} R^{\lambda\mu} (-g)^{1/2}$
- Инвариантность относительно преобразований Вейля $g_{\mu\nu} \rightarrow \varphi(x) g_{\mu\nu}$
- Сводятся к уравнениям Эйнштейна с космологической постоянной

Развитие теории гравитации

- MOND (?)
- F(R) гравитация, скалярно-тензорная гравитация

- Модели Хорндески $S = \int d^4x \sqrt{-g} \sum_I L_I$

$$L_2 \equiv G_2(\phi, X), \quad L_3 \equiv G_3(\phi, X) \square \phi,$$

$$L_4 \equiv G_4(\phi, X) {}^{(4)}R - 2G_{4,X}(\phi, X) (\square \phi^2 - \phi^{\mu\nu} \phi_{\mu\nu}) \\ + F_4(\phi, X) \varepsilon^{\mu\nu\rho}_{\sigma} \varepsilon^{\mu'\nu'\rho'}_{\sigma} \phi_{\mu} \phi_{\mu'} \phi_{\nu\nu'} \phi_{\rho\rho'},$$

$$L_5 \equiv G_5(\phi, X) {}^{(4)}G_{\mu\nu} \phi^{\mu\nu} \\ + \frac{1}{3} G_{5,X}(\phi, X) (\square \phi^3 - 3 \square \phi \phi_{\mu\nu} \phi^{\mu\nu} + 2 \phi_{\mu\nu} \phi^{\mu\sigma} \phi^{\nu}_{\sigma}) \\ + F_5(\phi, X) \varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma} \varepsilon^{\mu'\nu'\rho'\sigma'} \phi_{\mu} \phi_{\mu'} \phi_{\nu\nu'} \phi_{\rho\rho'} \phi_{\sigma\sigma'},$$

Развитие теории гравитации

- MOND (?)
- $F(R)$ гравитация, скалярно-тензорная гравитация
- Модели Хорндески
- Квантование гравитации: ряд поправок по кривизне

Гравитация Лавлока, 1971

- Требования к тензору Эйнштейна G^{ij} (вакуумный случай):
 1. $G^{ij} = G^{ji}$
 2. $G^{ij} = G^{ij}(g_{ij}, g'_{ij}, g''_{ij})$
 3. $G^{ij}_{;j} = 0$
 4. G^{ij} линеен по вторым производным

Гравитация Лавлока, 1971

- Требования к тензору Эйнштейна G^{ij} (вакуумный случай):
 1. $G^{ij} = G^{ji}$
 2. $G^{ij} = G^{ij}(g_{ij}, g'_{ij}, g''_{ij})$
 3. $G^{ij}_{;j} = 0$
 4. G^{ij} линеен по вторым производным

Предложение Лавлока: отказ от п.4

Общая форма лагранжиана

$$L = \sqrt{-g}(R - 2\Lambda + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots)$$

где $S_2, S_3, \dots$ - Эйлеровы характеристики,

$$S_2 = S_{\text{GB}} = R_{ijkl}R^{ijkl} - 4R_{ij}R^{ij} + R^2$$

член Гаусса-Боннэ

Квантование ОТО

Квантование ОТО

- В областях, где $L \gg l_P$ можно использовать разложение по малому параметру $\epsilon = (l_P/L)^2$ и ограничиться первыми членами разложения
- Первый член порядка ϵ^0 совпадает с выражением для тензора энергии-импульса классического поля.
- Член ϵ^1 , содержащий множитель $\hbar$, дает основной вклад квантовых эффектов.
- Следующие члены описывают добавки, возникающие при учете дополнительных взаимодействий виртуальных частиц и квантов поля

Диаграммы Фейнмана

Диаграммы Фейнмана

- Древесные:

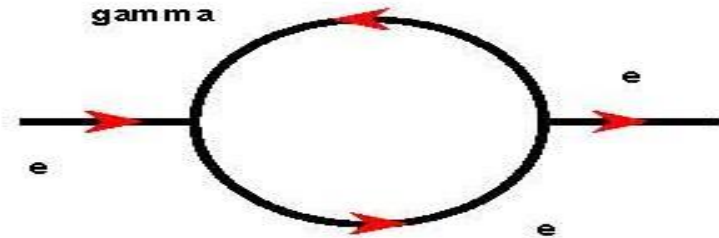


Диаграммы Фейнмана

- Древесные:



- Однопетлевые:

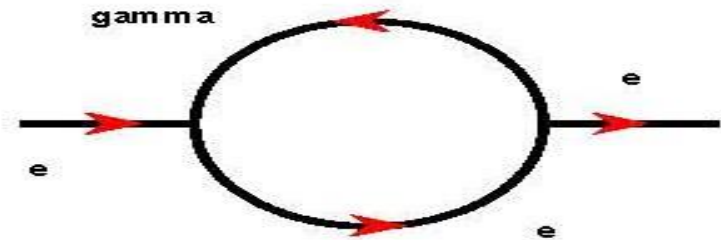


Диаграммы Фейнмана

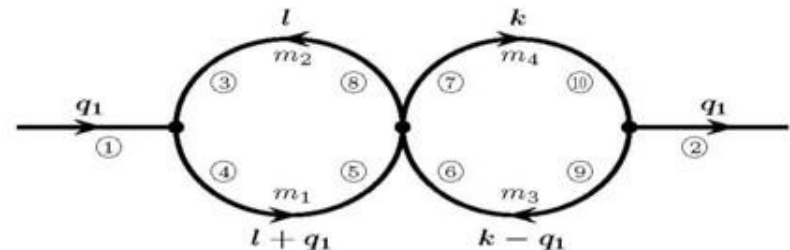
- Древесные:



- Однопетлевые:



- Многопетлевые:



Гравитация с поправками высших порядков по кривизне

$$\begin{aligned} (-g)^{-1/2} L = & \alpha_0 \\ & + \alpha_1 R \\ & + \alpha_2 (R_{ijkl} R^{ijkl} - 4R_{ij} R^{ij} + R^2) \\ & + \alpha_3 O(R^3) \end{aligned}$$

Развитие теории гравитации

- MOND (?)
- $F(R)$ гравитация, скалярно-тензорная гравитация
- Модели Хорндески
- Квантование гравитации – ряд поправок по кривизне
- Струнная гравитация

Развитие теории гравитации

- MOND (?)
- $F(R)$ гравитация, скалярно-тензорная гравитация
- Модели Хорндески
- Квантование гравитации – ряд поправок по кривизне
- Струнная гравитация
- Несохранение Лоренц-инвариантности

Развитие теории гравитации

- MOND (?)
- $F(R)$ гравитация, скалярно-тензорная гравитация
- Модели Хорндески
- Квантование гравитации – ряд поправок по кривизне
- Струнная гравитация
- Несохранение Лоренц-инвариантности
- Фундаментальные константы

Развитие теории гравитации

- MOND (?)
- $F(R)$ гравитация, скалярно-тензорная гравитация
- Модели Хорндески
- Квантование гравитации – ряд поправок по кривизне
- Струнная гравитация
- Несохранение Лоренц-инвариантности
- Фундаментальные константы
- Петлевая квантовая гравитация

Развитие теории гравитации

- MOND (?)
- $F(R)$ гравитация, скалярно-тензорная гравитация
- Модели Хорндески
- Квантование гравитации – ряд поправок по кривизне
- Струнная гравитация
- Несохранение Лоренц-инвариантности
- Фундаментальные константы
- Петлевая квантовая гравитация
- Конформная гравитация

Конформная гравитация

- $$I_{\text{EFF}} = \int d^4x (-g)^{1/2} C \left[\frac{1}{20} \left[R^{\mu\nu} R_{\mu\nu} - \frac{1}{3} (R^\alpha{}_\alpha)^2 \right] + \frac{1}{3} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \right].$$
- Это не что иное, как
$$I_W = \alpha_g \int d^4x (-g)^{1/2} C_{\alpha\beta\gamma\delta} C^{\alpha\beta\gamma\delta}$$
- Кроме прочего, инвариантно относительно
$$g_{\mu\nu}(x) \rightarrow e^{2\alpha(x)} g_{\mu\nu}(x)$$
- Так как α_g --- безразмерная константа $\Rightarrow$ модель перенормируема!
- Уравнения поля 4го порядка $\Rightarrow$ модель неунитарна
- В 2008м году нашли, что унитарности можно добиться!

$F(R)$ гравитация

$F(R)$ гравитация

- Действие для гравитации является комбинацией степеней тензоров кривизны;

$F(R)$ гравитация

- Действие для гравитации является комбинацией степеней тензоров кривизны;
- Действия вида $1/R$ или $R^{-\alpha}$ моделируют темную энергию (космологическую постоянную);

$F(R)$ гравитация

- Действие для гравитации является комбинацией степеней тензоров кривизны;
- Действия вида $1/R$ или $R^{-\alpha}$ моделируют темную энергию (космологическую постоянную);
- Действия вида R^2 , R^α или $\ln R$ моделируют темную материю;

$F(R)$ гравитация

- Действие для гравитации является комбинацией степеней тензоров кривизны;
- Действия вида $1/R$ или $R^{-\alpha}$ моделируют темную энергию (космологическую постоянную);
- Действия вида R^2 , R^α или $\ln R$ моделируют темную материю;
- Не существует общего вида поправок для всех масштабов;

F(R) гравитация

- Действие для гравитации является комбинацией степеней тензоров кривизны;
- Действия вида $1/R$ или $R^{-\alpha}$ моделируют темную энергию (космологическую постоянную);
- Действия вида R^2 , R^α или $\ln R$ моделируют темную материю;
- Не существует общего вида поправок для всех масштабов;
- Отсутствует Ньютоновский предел!!!

Проблема ньютоновского предела: способ решения

**Общая теория
гравитации**

```
graph TD; A[Общая теория гравитации] --- B[Асимптотика на масштабе солнечной Системы: ОТО]; A --- C[Асимптотика на масштабе галактик: теория R^alpha]; A --- D[Асимптотика на внегалактических масштабах : теория R^-alpha];
```

**Асимптотика на
масштабе
солнечной
Системы:
ОТО**

**Асимптотика на
масштабе
галактик:
теория R^α**

**Асимптотика на
внегалактических
масштабах :
теория $R^{-\alpha}$**

Дополнительные измерения

$$S_5 = C_5 \int d^5x L_5 \rightarrow S_4 = \int d^4x [L_4 + X]$$

Дополнительные измерения

$$S_5 = C_5 \int d^5x L_5 \rightarrow S_4 = \int d^4x [L_4 + X]$$

$$S_5 = C_5 \int d^5x L_5 \Leftrightarrow S_4 = \int d^4x [L_4 + X]$$

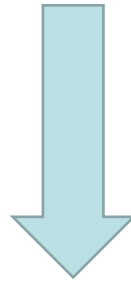
Схема ухода в многомерные

Схема ухода в многомерные

$$S_4 = c_4 \int d^4x \sqrt{-g^{(4)}} [R + L_{41} + L_{42} + \dots]$$

Схема ухода в многомерные

$$S_4 = c_4 \int d^4x \sqrt{-g^{(4)}} [R + L_{41} + L_{42} + \dots]$$



$$S_D = c_D \int d^Dx \sqrt{-g^{(D)}} L_D$$



Nataliya Trenina

@natatara



Рассказала сыну теорию струн. Пусть лучше от
меня, чем во дворе.

1:22 AM - 26 Oct 2013

220 RETWEETS 67 FAVORITES



Photo.net

Компактификация дополнительных измерений

String/M Theory (*11d*)



General Relativity (*4d*)

Дополнительные измерения

- Компактные дополнительные измерения
- Некомпактные дополнительные измерения:

Дополнительные измерения

- Компактные дополнительные измерения
- Некомпактные дополнительные измерения:

Решение проблемы иерархии

Дополнительные измерения

- Компактные дополнительные измерения
- Некомпактные дополнительные измерения:

Решение проблемы иерархии

Возможность решения проблемы космологической постоянной (вклад балка)

Дополнительные измерения

- Компактные дополнительные измерения
- Некомпактные дополнительные измерения:

Решение проблемы иерархии

Возможность решения проблемы космологической постоянной (вклад балка)

Возможна коррекция закона Ньютона

Ограничения на
размер
дополнительных
измерений из
проверки закона
Ньютона (2013)

10^{-5} мм

**Ограничения на размер
дополнительных измерений из
астрофизики
(по данным от SN1987A)**

Число некомпактных дополнительных измерений	2	3	4
Размер некомпактных дополнительных измерений	10^{-4}	10^{-7}	10^{-8}

Ограничения на размер дополнительных измерений из КОСМОЛОГИИ

- Отсутствие противоречий с моделями инфляции
- Отсутствие противоречий с данными экспериментов по реликтовому излучению **COBE, WMAP**
- Отсутствие противоречий с результатами **GW170817**

Компактификация Калуццы-Кляйна

Полный набор
координат

$$X^A = (x_\mu, y)$$

$$A = 0, 1, 2, 3, 5$$

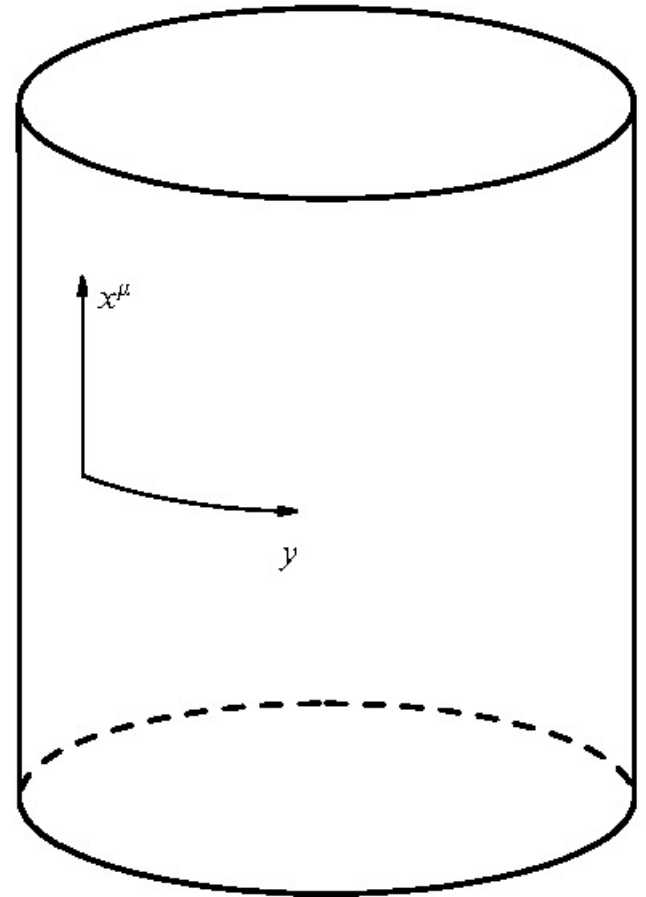
$$\mu = 0, 1, 2, 3$$

$$-\infty < x < \infty$$

$$0 < y < 2\pi L$$

Метрика

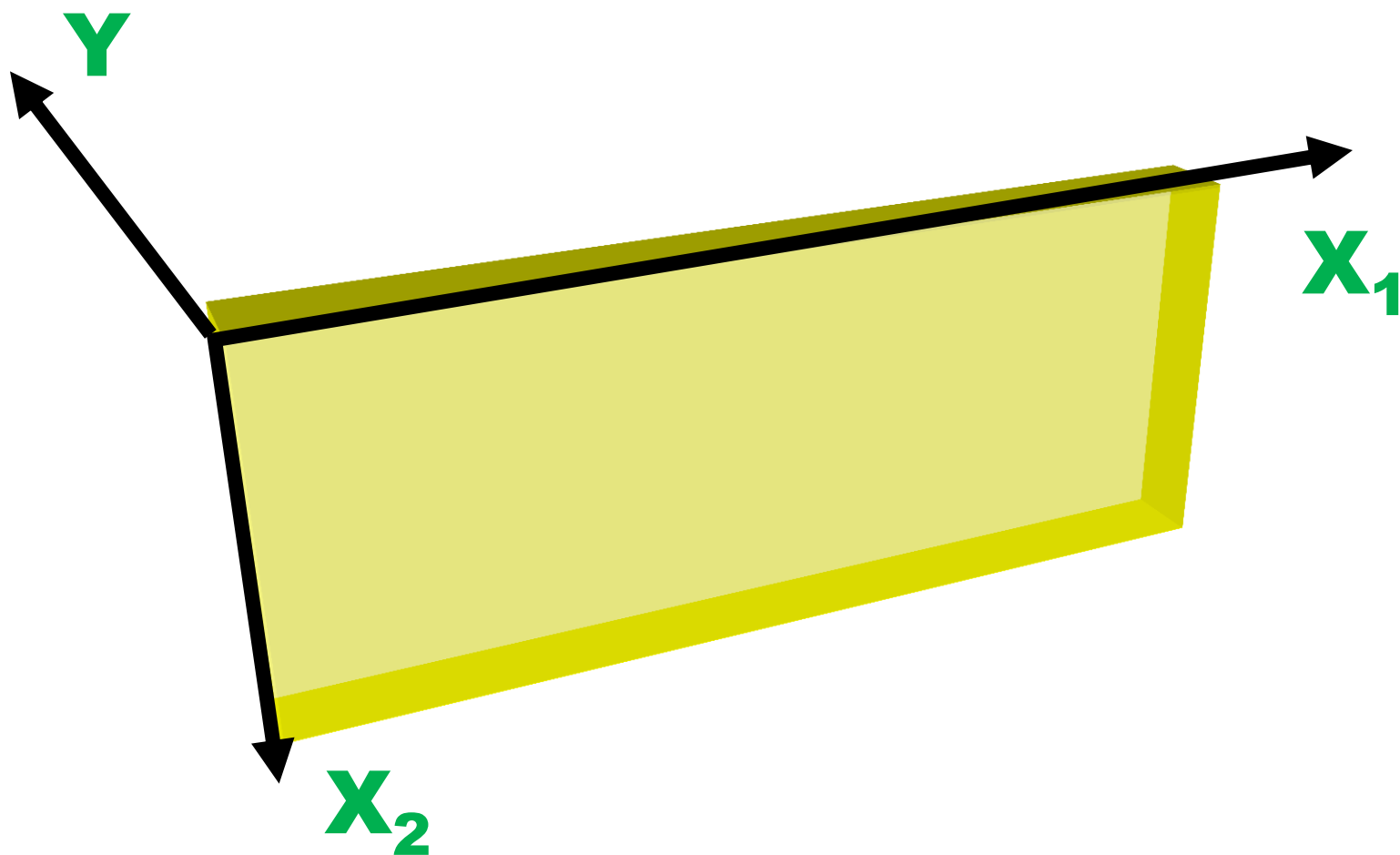
$$\eta_{\mu\nu} = \text{diag}(-1, 1, 1, 1)$$



Модели вида «мир на бране»



Модель ADD



Модель ADD

- **Аркани-Хамеди – Димитрополус – Двали**

Модель ADD

- Аркани-Хамеди – Димитрополус – Двали
- $G_4 = 1/M_P^4$ – не фундаментальна

Модель ADD

- Аркани-Хамеди – Димитрополус – Двали
- $G_4 = 1/M_P^4$ – не фундаментальна
- $S = \frac{1}{16\pi G_D} \int d^D X \sqrt{G} R(G_{AB})$ D=4+N
- $G_D = 1/M^{D-2}$ – фунд. грав. постоянная

Модель ADD

- Аркани-Хамеди – Димитрополус – Двали
- $G_4 = 1/M_P^4$ – не фундаментальна
- $S = (16\pi G_D)^{-1} \int d^D X \sqrt{G} R(G_{AB})$ $D=4+N$
- $G_D = 1/M^{D-2}$ – фунд. грав. постоянная
- В низкоэнергетическом приближении (основной вклад от 4D, L- масштаб доп.изм.)

$$\int d^D X = \int d^N y \int d^4 x = L^N \int d^4 x$$

Смещение фундаментальных планковских величин

$$M_D = \left(\frac{M_{Pl}^2}{V_{D-4}} \right)^{1/(D-2)}$$

Смещение фундаментальных планковских величин (в диапазон 1 ТэВ)

$$M_D = \left(\frac{M_{Pl}^2}{V_{D-4}} \right)^{1/(D-2)}$$

Смещение планковской энергии

- Планковская энергия в 4D пространстве
- 10^{19} ГэВ
- Фундаментальная планковская энергия
- до ≈ 1 ТэВ

Смещение планковской энергии («решение» проблемы иерархии)

- Планковская энергия в 4D пространстве
- 10^{19} ГэВ
- Фундаментальная планковская энергия
- ≈ 1 ТэВ

Смещение планковской энергии («решение» проблемы иерархии)

- Планковская энергия в 4D пространстве
- 10^{19} ГэВ
- Масштаб объединения взаимодействий – 1 ТэВ
- Фундаментальная планковская энергия
- ≈ 1 ТэВ

Смещение планковской энергии («решение» проблемы иерархии)

- Планковская энергия в 4D пространстве
- 10^{19} ГэВ
- Масштаб объединения взаимодействий – 1 ТэВ
- Масштаб квантовой гравитации – 1 ТэВ
- Фундаментальная планковская энергия
- ≈ 1 ТэВ

Смещение планковской энергии («решение» проблемы иерархии)

- Планковская энергия в 4D пространстве
- 10^{19} ГэВ
- Фундаментальная планковская энергия
- ≈ 1 ТэВ
- Масштаб объединения взаимодействий – 1 ТэВ
- Масштаб квантовой гравитации – 1 ТэВ
- Рождение черных дыр в квантовых процессах

Смещение планковской энергии («решение» проблемы иерархии)

- Планковская энергия в 4D пространстве
- 10^{19} ГэВ
- Фундаментальная планковская энергия
- ≈ 1 ТэВ
- Масштаб объединения взаимодействий – 1 ТэВ
- Масштаб квантовой гравитации – 1 ТэВ
- Рождение черных дыр в квантовых процессах
- Черные дыры на Большом адронном коллайдере

Смещение планковской энергии («решение» проблемы иерархии)

- Планковская энергия в 4D пространстве
- 10^{19} ГэВ
- Фундаментальная планковская энергия
- ≈ 1 ТэВ
- Масштаб объединения взаимодействий – 1 ТэВ
- Масштаб квантовой гравитации – 1 ТэВ
- Рождение черных дыр в квантовых процессах
- Черные дыры на Большом адронном коллайдере
- 2003 год: Black holes at LHC: Караул!!!!

Смещение планковской энергии («решение» проблемы иерархии)

- Планковская энергия в 4D пространстве
- 10^{19} ГэВ
- Фундаментальная планковская энергия
- ≈ 1 ТэВ
- Масштаб объединения взаимодействий – 1 ТэВ
- Масштаб квантовой гравитации – 1 ТэВ
- Рождение черных дыр в квантовых процессах
- Черные дыры на Большом адронном коллайдере
- 2003 год: Black holes at LHC: Караул!!!!
- Как искать:

Смещение планковской энергии («решение» проблемы иерархии)

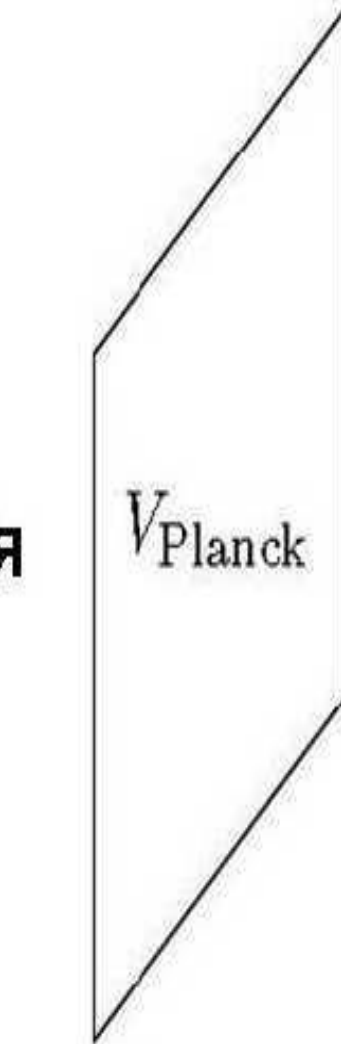
- Планковская энергия в 4D пространстве
- 10^{19} ГэВ
- Фундаментальная планковская энергия
- ≈ 1 ТэВ
- Масштаб объединения взаимодействий – 1 ТэВ
- Масштаб квантовой гравитации – 1 ТэВ
- Рождение черных дыр в квантовых процессах
- Черные дыры на Большом адронном коллайдере
- 2003 год: Black holes at LHC: Караул!!!!
- Как искать: Сечение рассеяния, поперечный импульс

Смещение планковской энергии («решение» проблемы иерархии)

- Планковская энергия в 4D пространстве
- 10^{19} ГэВ
- Фундаментальная планковская энергия
- ≈ 1 ТэВ
- Масштаб объединения взаимодействий – 1 ТэВ
- Масштаб квантовой гравитации – 1 ТэВ
- Рождение черных дыр в квантовых процессах
- Черные дыры на Большом адронном коллайдере
- 2003 год: Black holes at LHC: Караул!!!!
- Как искать: Сечение рассеяния, поперечный импульс
- 2019 год: No any black holes at LHC!!!

Модели RS

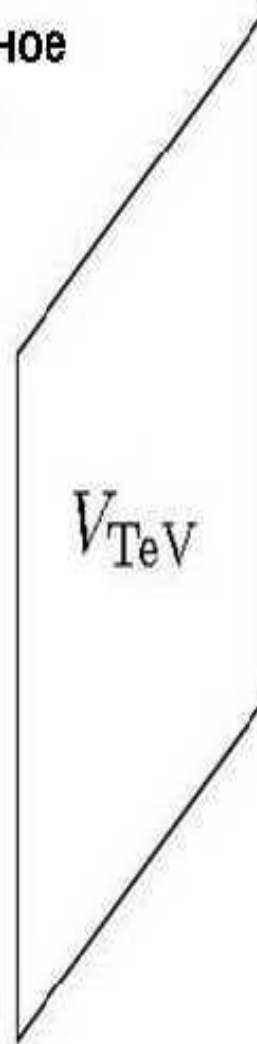
Планковская
брана



$$y = 0$$

Дополнительное
пространство

$$-\Lambda$$

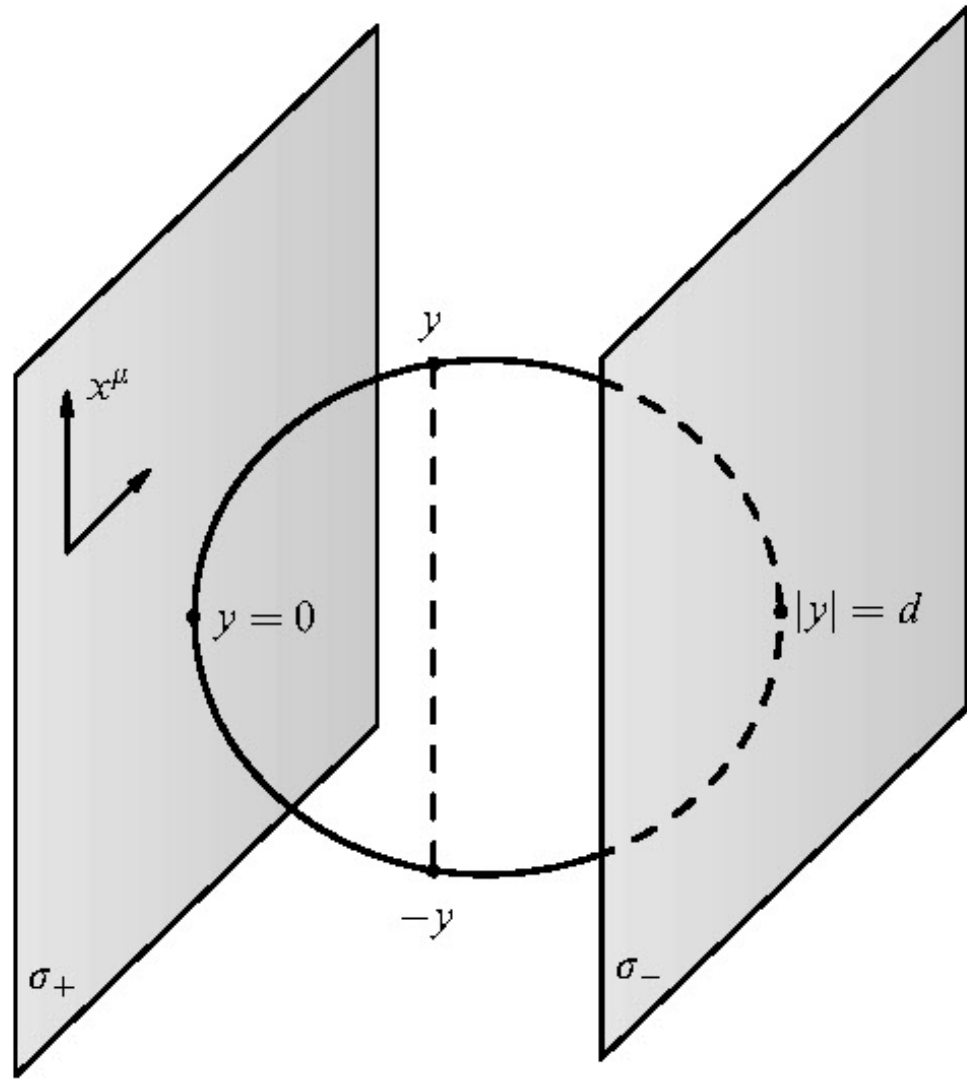


$$y = b$$

ТэВ
брана

Модели RS

- *Lisa Randall, Raman Sundrum / An Alternative to compactification // Phys.Rev.Lett. 83 (1999) 4690-4693*
- **Модель RS I**



Модели RS

- *Lisa Randall, Raman Sundrum / An Alternative to compactification // Phys.Rev.Lett. 83 (1999) 4690-4693*
- **Модель RS I**
- **Модель RS II: ТэВ брана $\rightarrow \infty$**

Модели RS

Модель RS I

- Модель RS II: ТэВ брана $\rightarrow \infty$
- Брана обладает натяжением σ и населена 4D материальным полем ψ с лагранжианом $L_m(g_{\alpha\beta}, \psi, \partial\psi)$ и индуцированной метрикой $g_{\mu\nu}(x)$

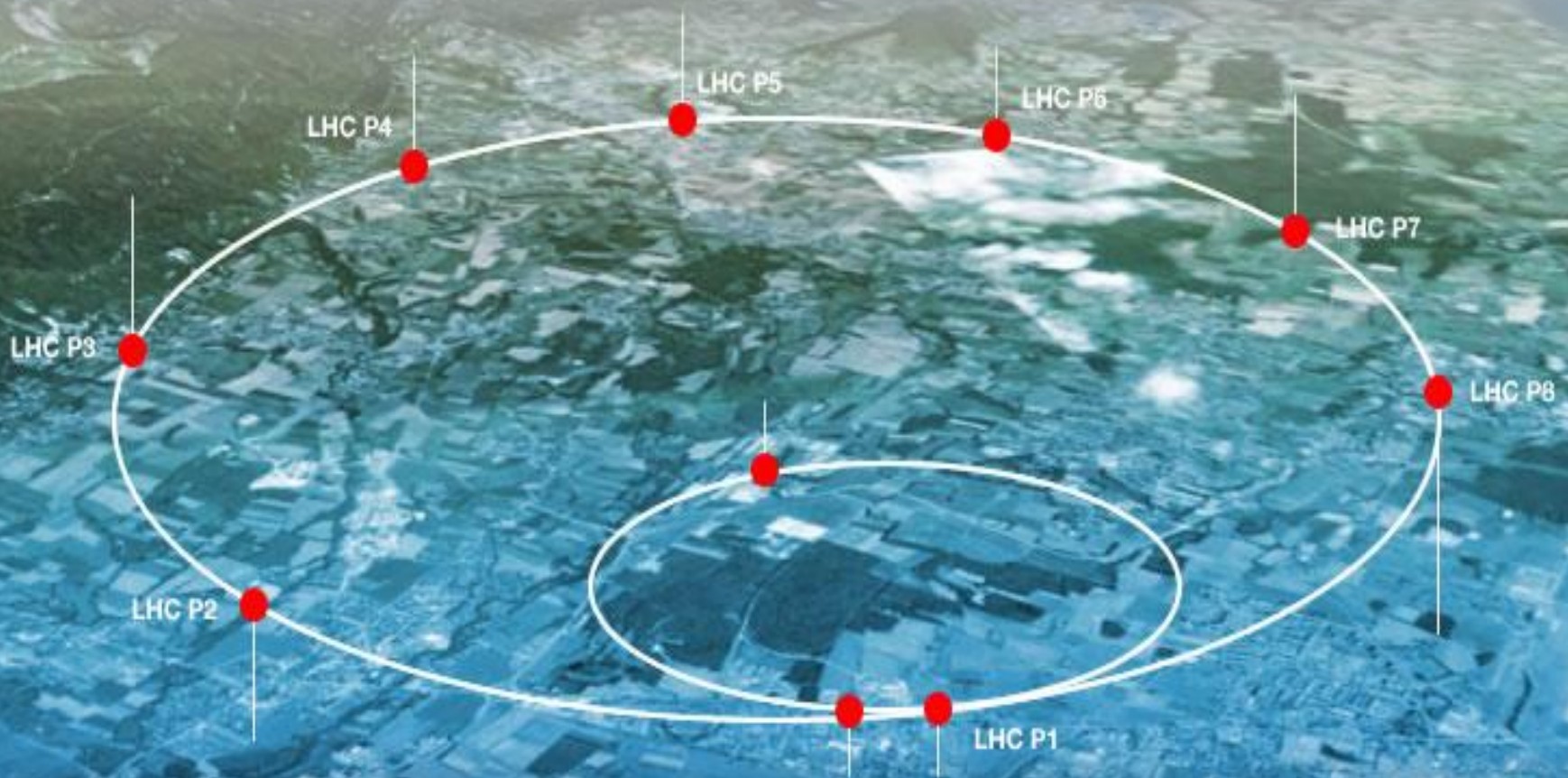
Модели RS

- Модель RS I
- Модель RS II: ТэВ брана $\rightarrow \infty$
- Брана обладает натяжением σ и населена 4D материальным полем ψ с лагранжианом $L_m(g_{\alpha\beta}, \psi, \partial\psi)$ и индуцированной метрикой $g_{\mu\nu}(x)$
- Физические поля «живут» на бране, гравитация распространяется в балк

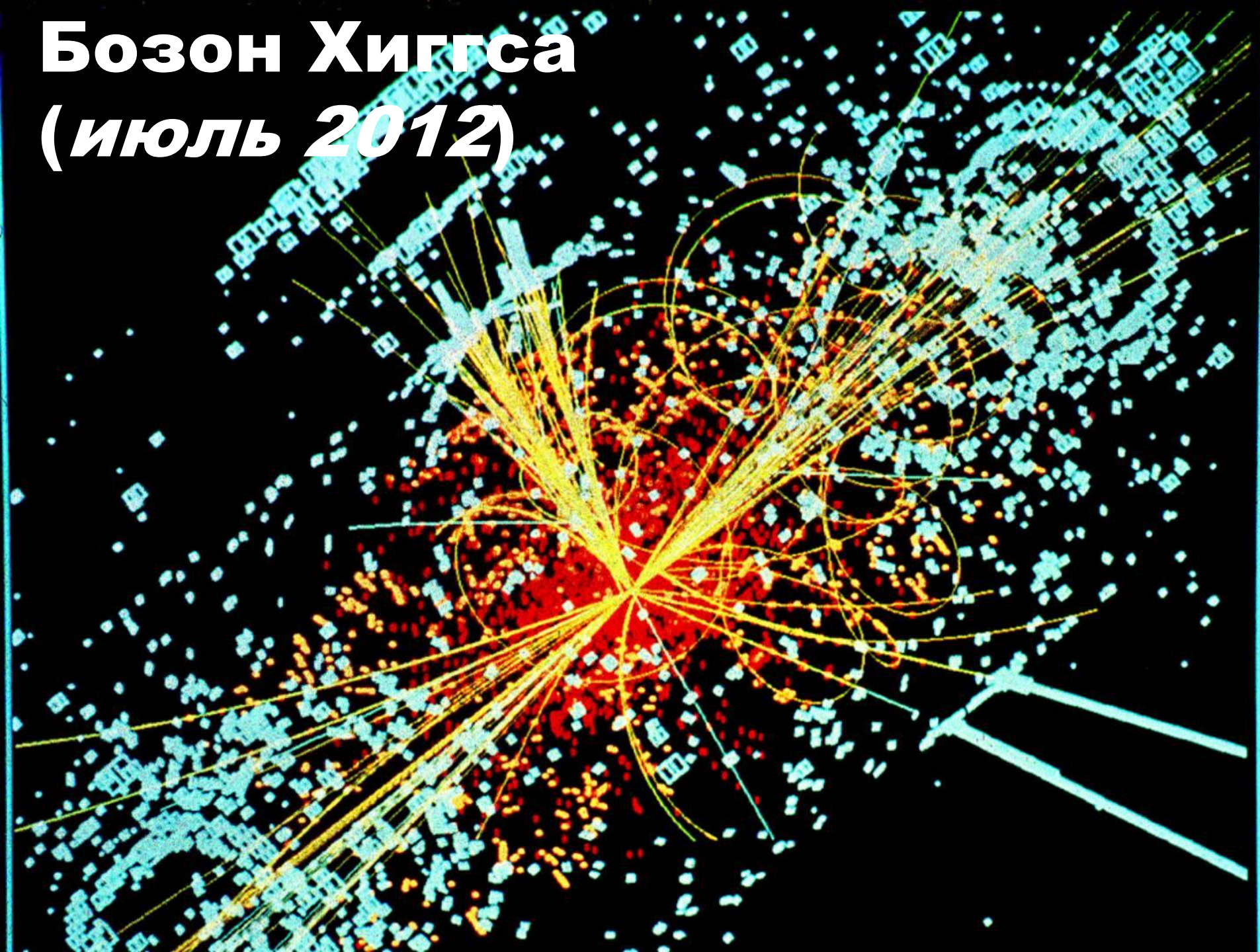
Модели RS

- Модель RS I
- Модель RS II: ТэВ брана $\rightarrow \infty$
- Брана обладает натяжением σ и населена 4D материальным полем ψ с лагранжианом $L_m(g_{\alpha\beta}, \psi, \partial\psi)$ и индуцированной метрикой $g_{\mu\nu}(x)$
- Физические поля «живут» на бране, гравитация распространяется в балк
- 2018: Ограничение от GW170817 - плоская брана!

Large Hadron Collider (LHC)



Бозон Хиггса (июль 2012)



Способы верификации моделей расширенной гравитации

Пост-ньютоновский формализм

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{Теория} \\ \text{гравитации} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \text{Теория} \\ \text{Ньютона} \\ \hline \end{array} + (1/c^2) \begin{array}{|c|} \hline \gamma \\ \beta \\ \eta \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \zeta_3 \\ \zeta_4 \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|} \hline \text{Параметры} \\ \text{теории} \\ \hline \end{array}$$

Пост-Ньютоновские параметры

- γ – мера искривления пространства гравитирующей массой, равна **0** в ньютоновской гравитации и **1** в ОТО;
- β – мера нелинейности при наложении гравитационных полей, для ОТО равной **1**;
- η – эффекты привилегированного положения;
- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – измеряют величину и природу эффектов привилегированной системы отсчета. Все теории, в которых как минимум один из параметров не равен **0**, называются теориями с привилегированной системой отсчета;
- $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \zeta_4$ - описывают отклонения от глобальных законов сохранения. В теориях гравитации, содержащих полный набор законов сохранения: **4** для энергии-импульса и **6** для момента импульса, все эти параметры должны быть равны **0**.

Лазерная локация Луны (JPL NASA)



GW170817 / GRB170817A



ЗДЕСЬ АСТРОНОМИЧЕСКИ
ВКУСНО

ПЕЛЬМЕНАРИИ

WWW.VK.COM/VELAENASTY

УЛ. КАРОВА, 3А

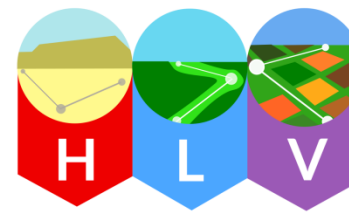
609-500

МЫ ОТКРЫТЫ
Пн-Пт
10-23
Сб-Ср
10-00

GW170817

Binary neutron star merger

A LIGO / Virgo gravitational wave detection with associated electromagnetic events observed by over 70 observatories.



 Distance
130 million light years

 Discovered
17 August 2017

 Type
Neutron star merger



12:41:04 UTC

A gravitational wave from a binary neutron star merger is detected.

gravitational wave signal

Two neutron stars, each the size of a city but with at least the mass of the sun, collided with each other.

gamma ray burst

A short gamma ray burst is an intense beam of gamma ray radiation which is produced just after the merger.

+ 2 seconds

A gamma ray burst is detected.



GW170817 allows us to measure the expansion rate of the universe directly using gravitational waves for the first time.



Detecting gravitational waves from a neutron star merger allows us to find out more about the structure of these unusual objects.



This multimessenger event provides confirmation that neutron star mergers can produce short gamma ray bursts.



The observation of a kilonova allowed us to show that neutron star mergers could be responsible for the production most of the heavy elements, like gold, in the universe.



Observing both electromagnetic and gravitational waves from the event provides compelling evidence that gravitational waves travel at the same speed as light.

kilonova

Decaying neutron-rich material creates a glowing kilonova, producing heavy metals like gold and platinum.

+10 hours 52 minutes

A new bright source of optical light is detected in a galaxy called NGC 4993, in the constellation of Hydra.

+11 hours 36 minutes

Infrared emission observed.

+15 hours

Bright ultraviolet emission detected.

+9 days

X-ray emission detected.

radio remnant

As material moves away from the merger it produces a shockwave in the interstellar medium - the tenuous material between stars. This produces emission which can last for years.

+16 days

Radio emission detected.

Проверка расширенной гравитации

Проверки расширенной гравитации

- **Model independent!**
- **Скорость распространения GW. LIGO:**
 $m_{\text{graviton}} < 7.7 * 10^{-23} \text{ eV}$

$$|c_g/c - 1| < 4.5 * 10^{-16}$$

$$|c_g/c - 1| < 4.5 * 10^{-16}$$

В некоторых моделях темная энергия может корректировать скорость распространения GWs. Измерение соотношения времен прихода GW/EM **исключает** модели с различными временами прихода GW и EM ($c_g \neq c$).

Пример: bigravity

Summary of the viable (left) and non-viable (right) scalar-tensor theories after GW170817.

	$c_g = c$	$c_g \neq c$
Horndeski	General Relativity quintessence/k-essence [42] Brans-Dicke/$f(R)$ [43, 44] Kinetic Gravity Braiding [46]	quartic/quintic Galileons [13, 14] Fab Four [15, 16] de Sitter Horndeski [45] $G_{\mu\nu}\phi^\mu\phi^\nu$ [47], Gauss-Bonnet
beyond H.	Derivative Conformal (20) [18] Disformal Tuning (22) DHOST with $A_1 = 0$	quartic/quintic GLPV [19] DHOST [20, 48] with $A_1 \neq 0$
	Viable after GW170817	Non-viable after GW170817





Бывает, ведро выскальзывает