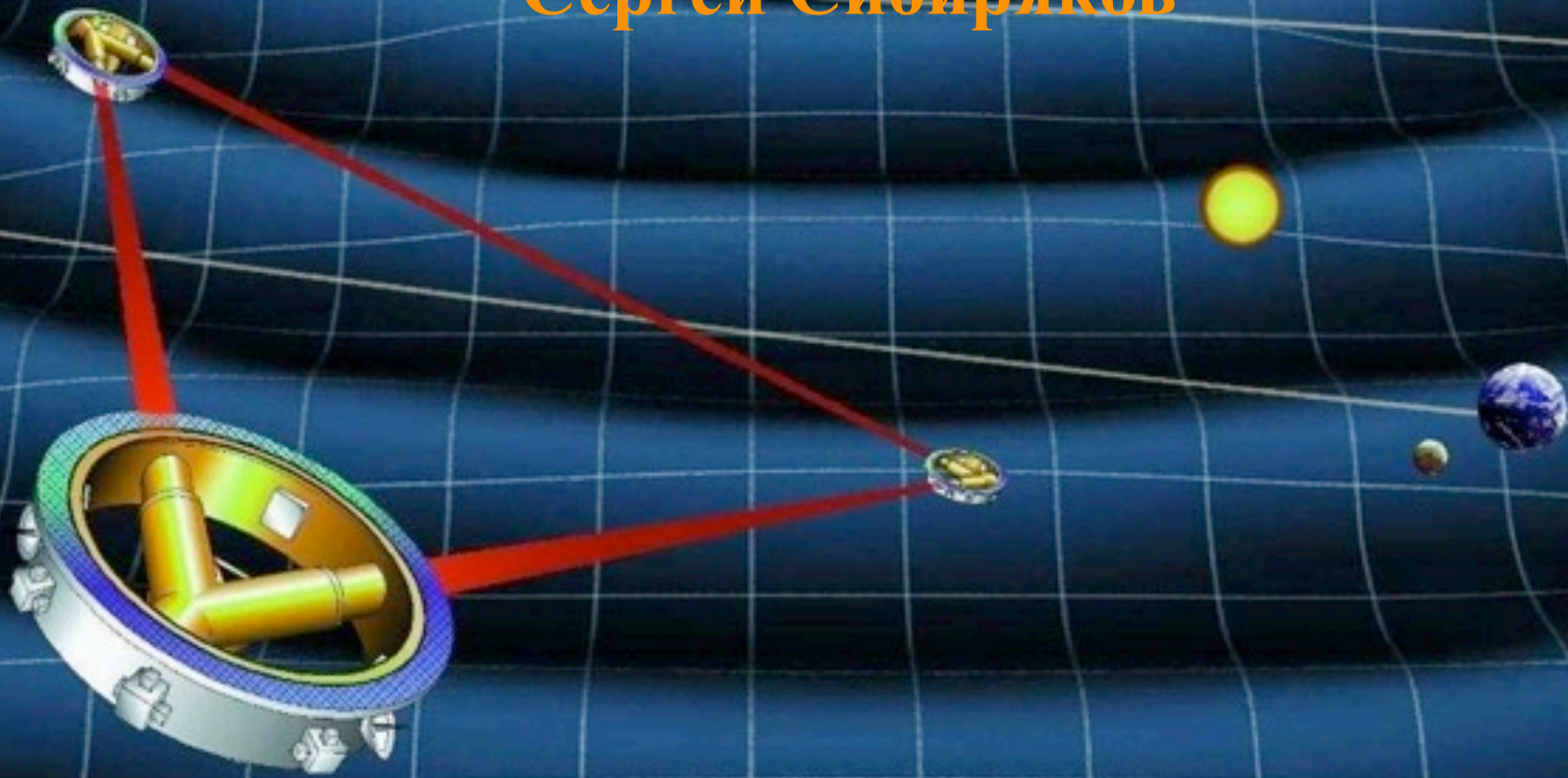


Гравитация: что мы о ней (не) знаем?

Сергей Сибиряков



Немного истории

Законы Кеплера:

*1 Планеты
движутся по
эллипсам*

*2 Площадь,
которая
заметается
линией,
соединяющей
планету и Солнце,
за одинаковое
время, одинакова*

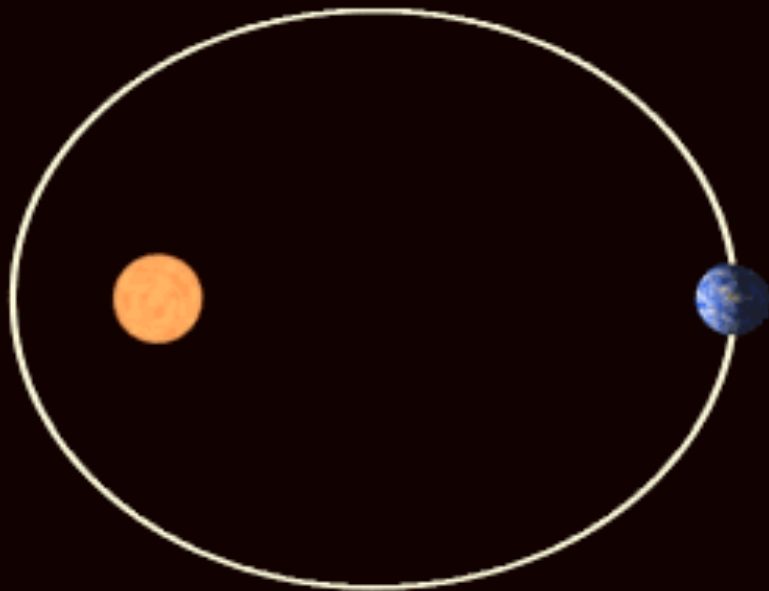


*3 Отношение квадратов периодов обращения
планет равно отношению кубов длин
главных полуосей их орбит*





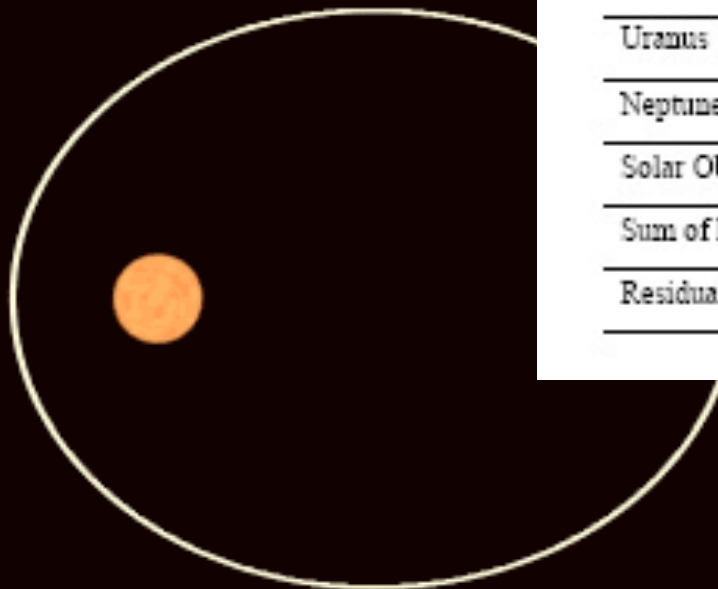
“Небольшая” проблема: аномальная прецессия перигелия Меркурия



“Небольшая” проблема: аномальная прецессия перигелия Меркурия

Sources of precession of the planet Mercury as observed at the Earth
G.M. Clemence Rev Mod Phys 19 361 1947

source	magnitude seconds arc/century
Total observed precession	5599.74 $\pm$ 0.41
General precession of the equinoxes	5025.645 $\pm$ 0.50
Venus	277.856 $\pm$ 0.68
Earth	90.038 $\pm$ 0.08
Mars	2.536 $\pm$ 0.00
Jupiter	153.584 $\pm$ 0.01
Saturn	7.302 $\pm$ 0.01
Uranus	0.141 $\pm$ 0.00
Neptune	0.042 $\pm$ 0.00
Solar Oblateness (1930 German #)	0.010 $\pm$ 0.02
Sum of known terms	5557.18 $\pm$ 0.85
Residual	42.56 $\pm$ 0.94



Попытки объяснения:

Новая планета **ВУЛКАН**.

Ранее блестяще использовано для предсказания существования Нептуна (позже Плутона).

Многочисленные свидетельства “открытия”
Вулкана

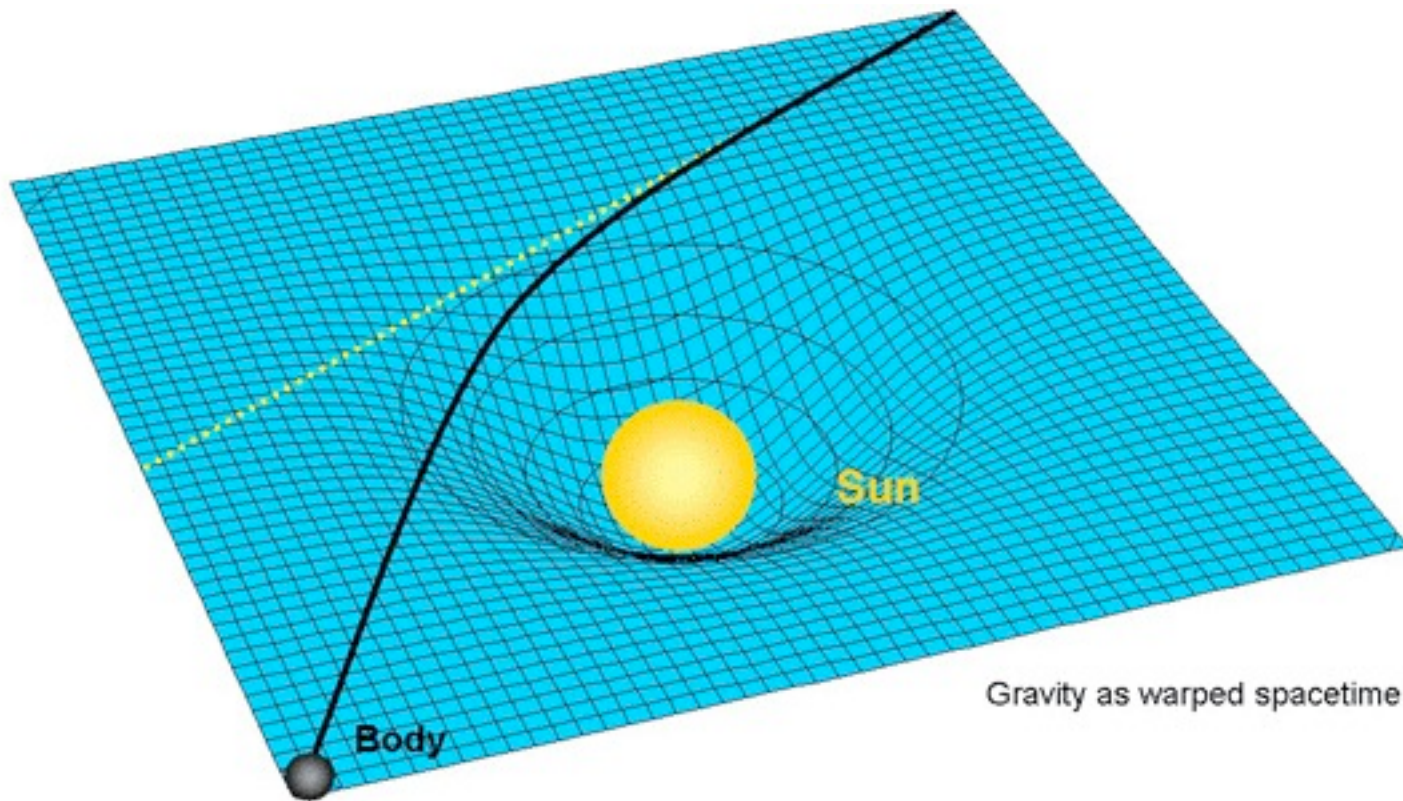
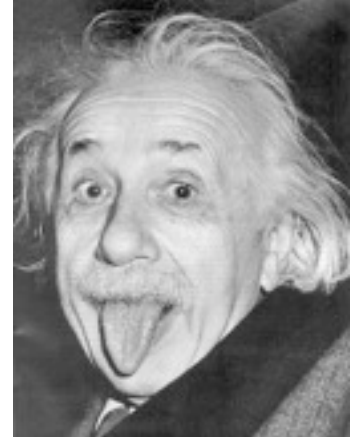


НО

все они не подтвердились . . .



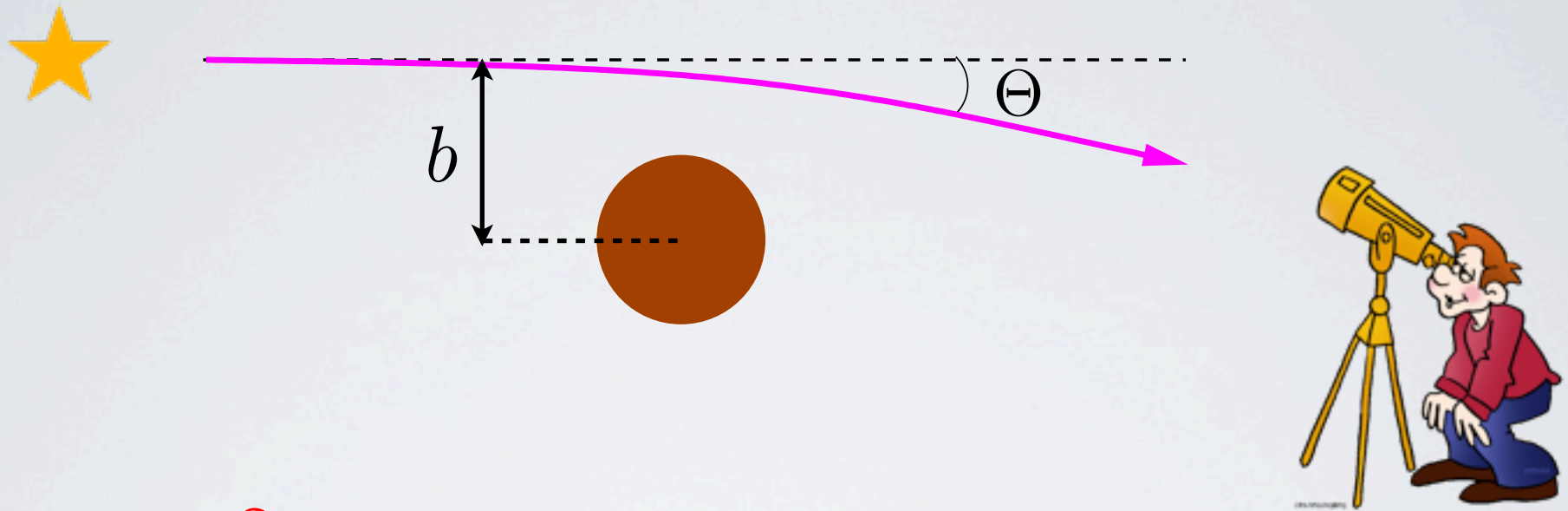
Правильное объяснение:
Гравитация = искривление
пространства-времени



$$ds^2 = g_{\mu\nu}(x)dx^\mu dx^\nu$$

Предсказания ОТО и их проверка

Отклонение света

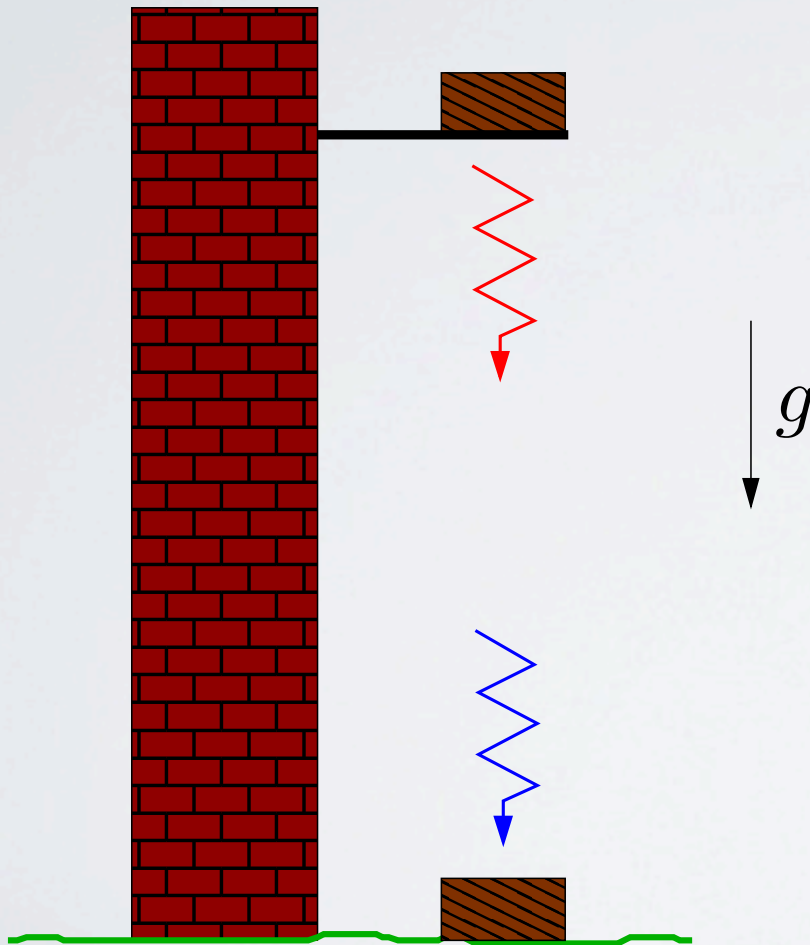


$$\Theta = \frac{2r_g}{b} \quad r_g = \frac{2GM}{c^2}$$

В ньютоновской теории: $\Theta = \frac{r_g}{b}$

Гравитационное красное смещение

Pound, Rebka, 1959

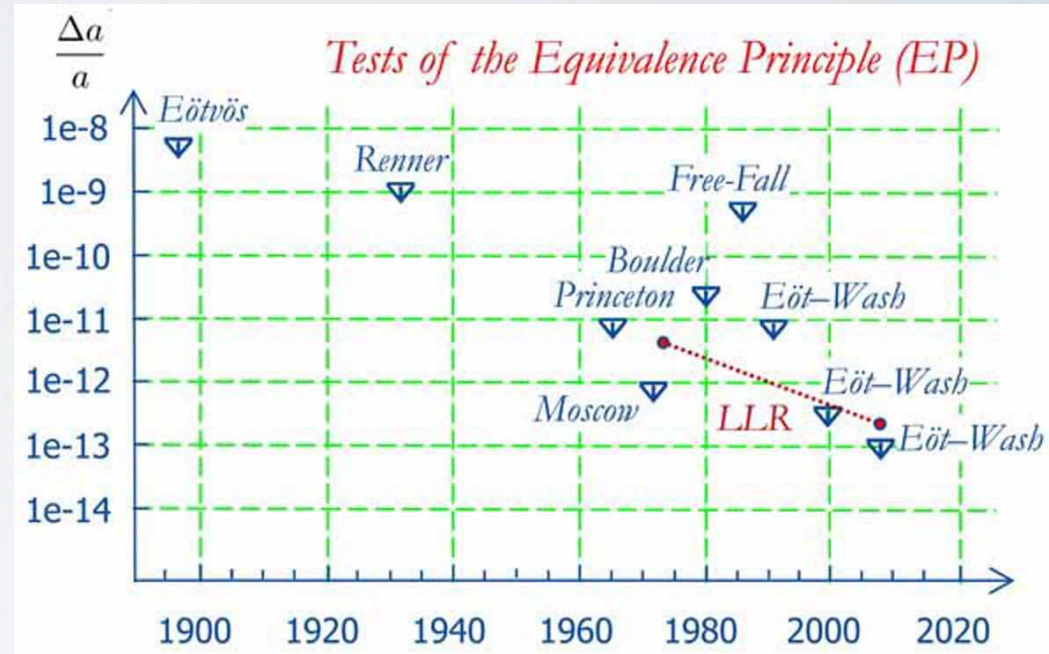
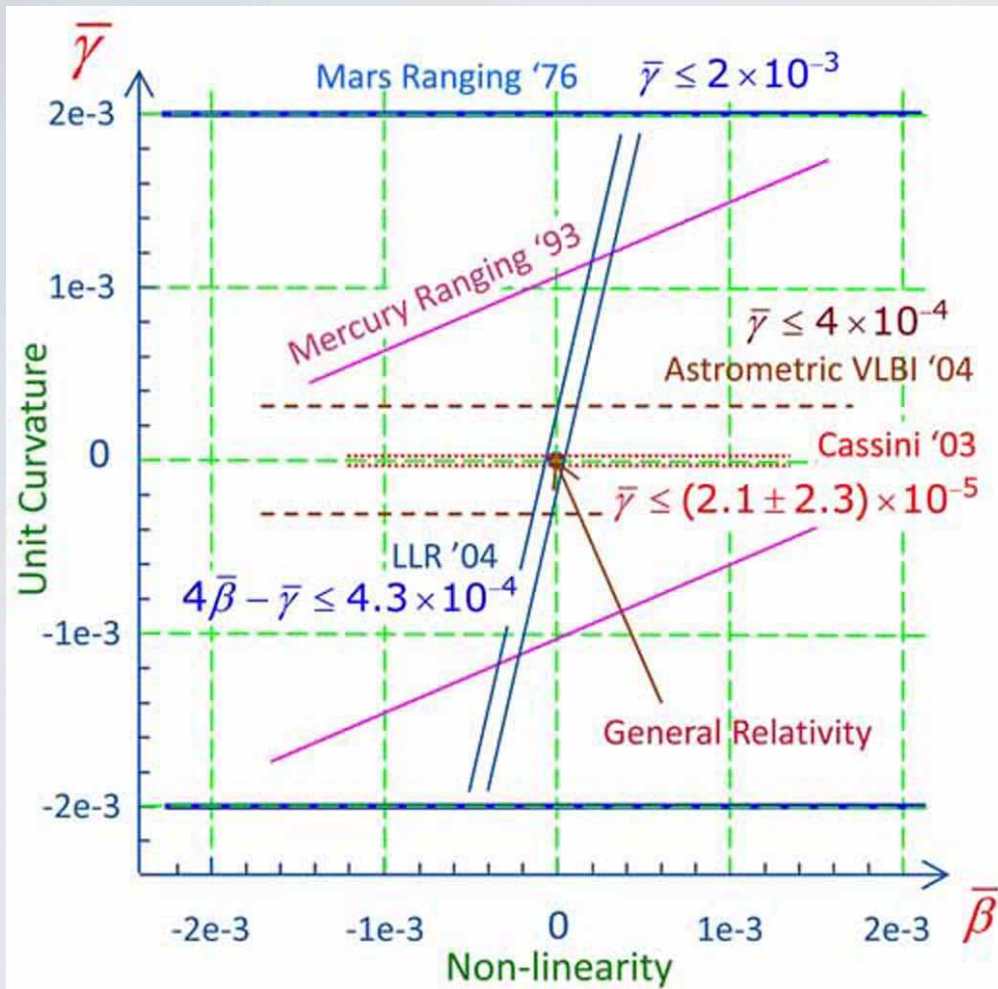


$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega} = \frac{\phi_1 - \phi_2}{c^2} = \frac{gH}{c^2}$$

1959- сегодня: прецизионные тесты ОТО

- лабораторные наземные эксперименты
- эксперименты в космосе
- точные наблюдения за движением планет
- слежение за космическими аппаратами
- глубокая астрономия (пульсары, галактики скопления, квазары, ...)
- космологические обзоры

Современный статус: примеры

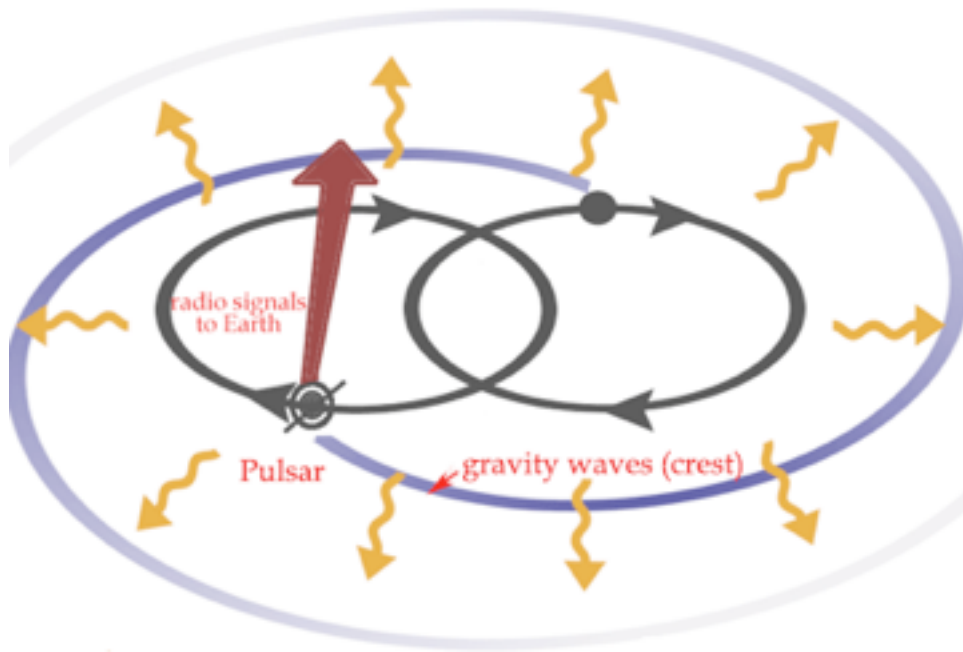


Из С.Г. Турышев, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 58 (2008) 207

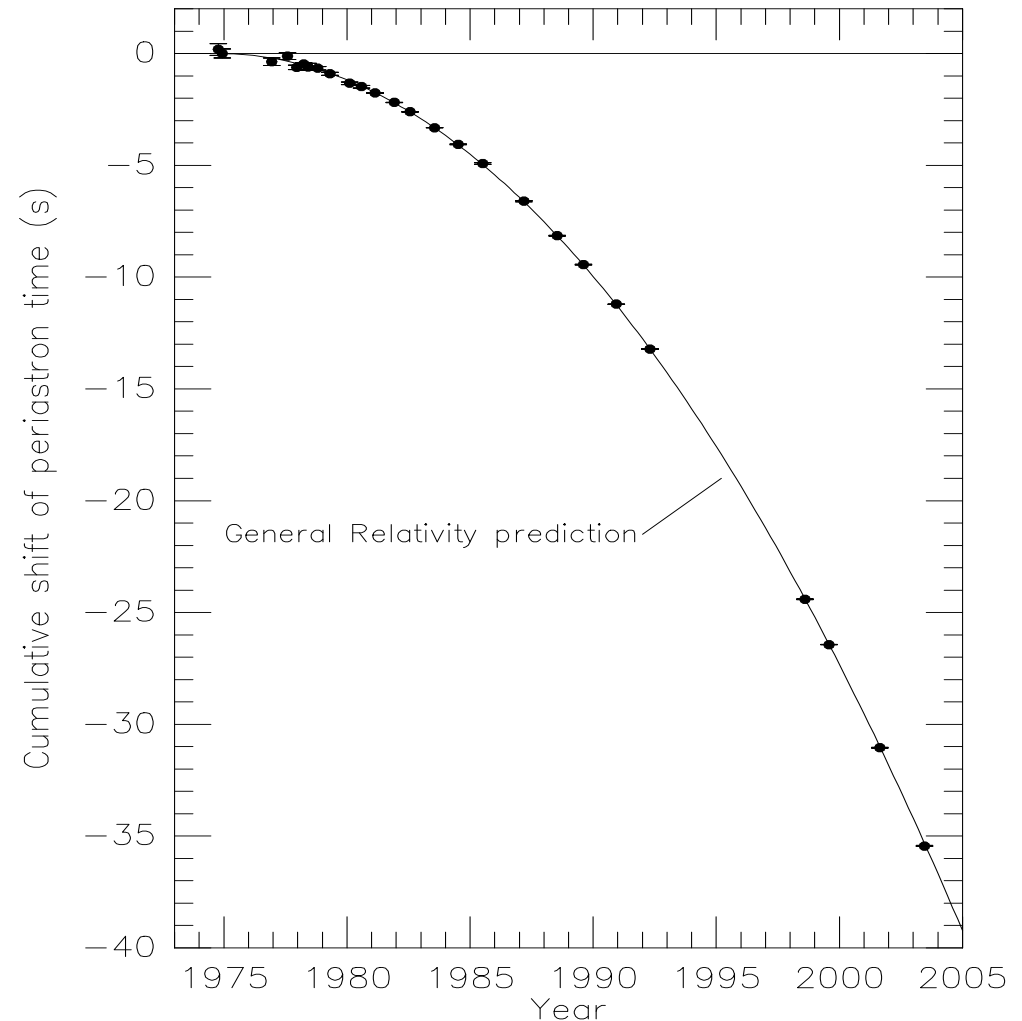
Современный статус: не прямое наблюдение гравитационных волн

Hulse, Taylor (1975)

Нобелевская премия 1993



$$\frac{d\mathcal{E}}{dt} = -\frac{G}{45c^5} \ddot{D}_{ij}^2$$



Из Weisberg, Taylor (2004)

Результат:

принятие ОТО за основу при описания гравитационных явлений (использование в индустрии: GPS, Глонасс)

исключение альтернативных теорий:

Эйнштейн (1912) (не ОТО), Нордстрем (1912),
Нордстрем (1913), Ейнштейн-Фоккер (1914), Уайтхед (1922),
Бирхофф (1943), Милне (1948), Тири (1948),
Папапетроу (1954), Жордан (1955), Литлвуд-Бергман (1956),
Бранс-Дике (1961), Йилмаз (1962), Витроу-Мордух (1960,
1965), Пейдж-Тапер (1968), Бергман (1968),
Дезер-Лоран (1968), Нордведт (1970), Вагонер (1970),
Болмини и др. (1970), Розен (1971), Ни (1972, 1973),
Ли-Лайтман-Ни (1974), Белминфанте-Свайхарт (1975),
Бекенштейн (1977), Баркер (1978), Коулман (1983), ...

Результат:

принятие ОТО за основу при описания гравитационных явлений (использование в индустрии: GPS, Глонасс)

исключение альтернативных теорий:

~~Эйнштейн (1912) (не ОТО), Нордстрем (1912),
Нордстрем (1913), Ейнштейн-Фоккер (1914), Уайтхед (1922),
Бирхофф (1943), Милне (1948), Тири (1948),
Папапетроу (1954), Жордан (1955), Литлвуд-Бергман (1956),
Бранс-Дике (1961), Йилмаз (1962), Витроу Мордух (1960,
1965), Пейдж-Тапер (1968), Бергман (1968),
Дезер-Лоран (1968), Нордведт (1970), Вагонер (1970),
Боллини и др. (1970), Розен (1971), Ни (1972, 1973),
Ли-Лайтман-Ни (1974), Беллинфанте-Свайхарт (1975),
Бекенштейн (1977), Баркер (1978), Коулман (1983), ...~~

Результат:

принятие ОТО за основу при описания гравитационных явлений (использование в индустрии: GPS, Глонасс)

исключение альтернативных теорий:

~~Эйнштейн (1912) (не ОТО), Нордстрем (1912),
Нордстрем (1913), Ейнштейн-Фоккер (1914), Уайтхед (1922),
Бирхофф (1943), Милне (1948), Тири (1948),
Папапетроу (1954), Жордан (1955), Литлвуд-Бергман (1956),
Бранс-Дике (1961), Йилмаз (1962), Витроу Мордух (1960,
1965), Пейдж-Тапер (1968), Бергман (1968),
Дезер-Лоран (1968), Нордведт (1970), Вагонер (1970),
Боллини и др. (1970), Розен (1971), Ни (1972, 1973),
Ли-Лайтман-Ни (1974), Беллинфанте-Свайхарт (1975),
Бекенштейн (1977), Баркер (1978), Коулман (1983), ...~~

Но не всех . . .

Планы на ближайшее будущее:

- уточнение существующих измерений
- прямое наблюдение гравитационных волн ►
- непосредственное наблюдение сверхмассивных черных дыр в центрах галактик
- использование слабого гравитационного линзирования для определения распределения плотности вещества во Вселенной

**Небольшие (?)
проблемы ОТО**

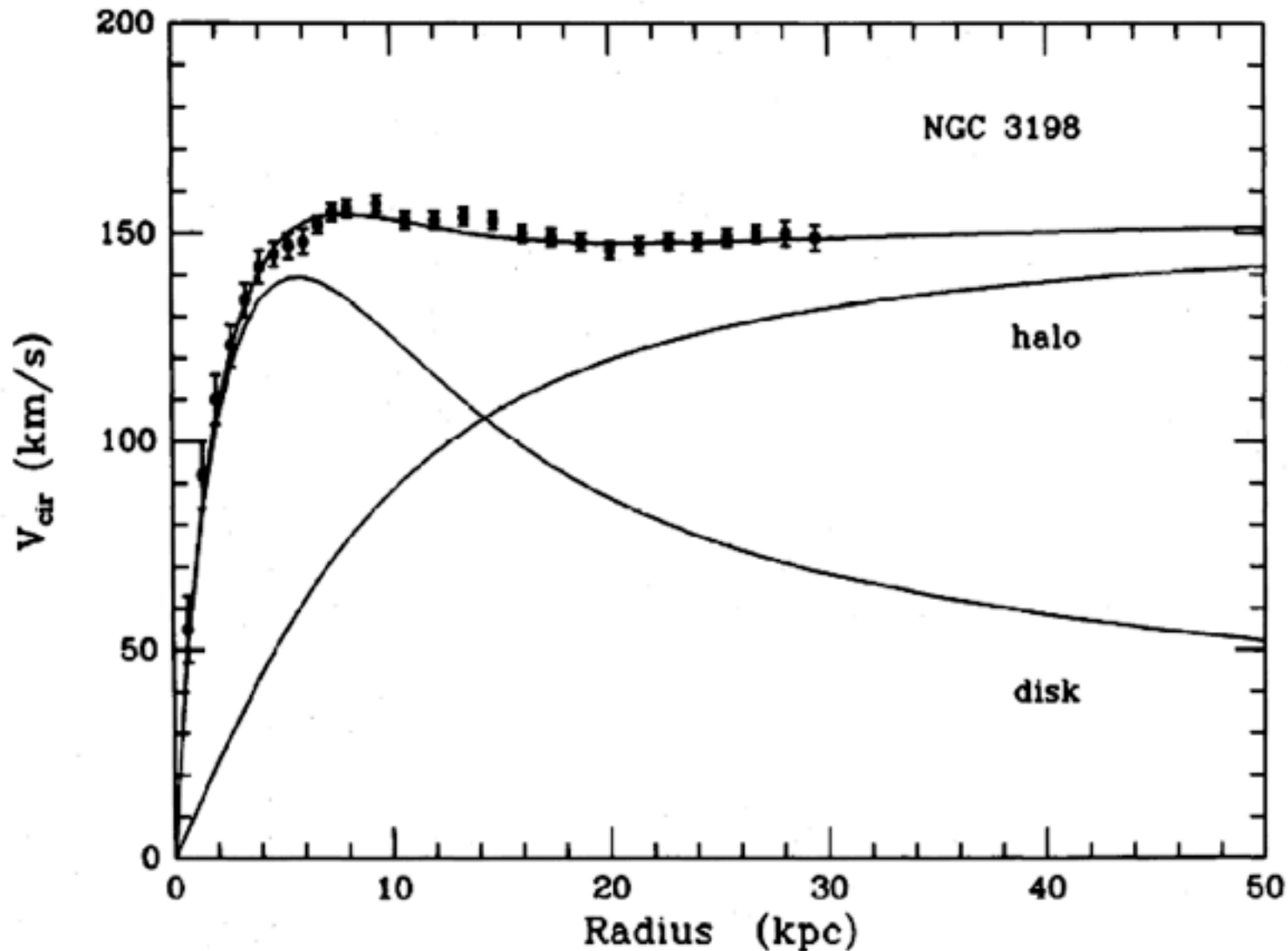
Кривые вращения галактик

ОТО дает:

$$v = \left(\frac{GM}{R} \right)^{1/2}$$



Противоречит наблюдениям:

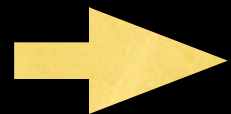
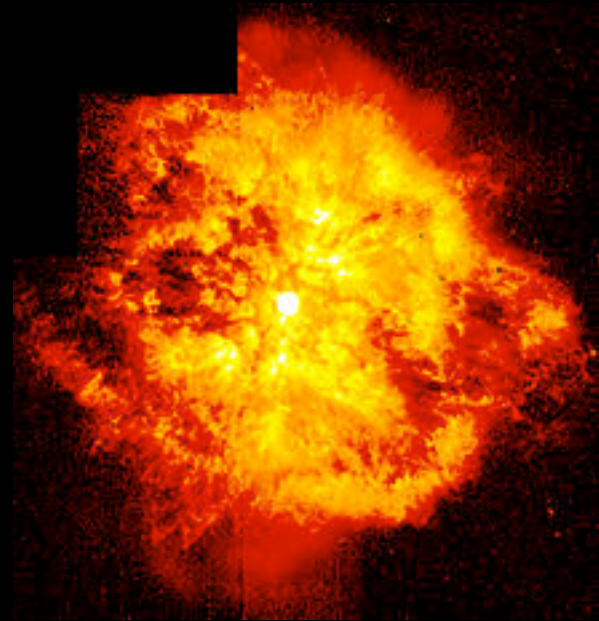


Нужна **темная материя**, взаимодействующая с обычным веществом лишь гравитационно

ОТО позволяет вычислить темп расширения Вселенной, если известно, чем она наполнена

Нужны “стандартные свечи”, чтобы связать скорость (красное смещение) с расстоянием (видимая светимость)

Подходящие объекты -
сверхновые типа Ia



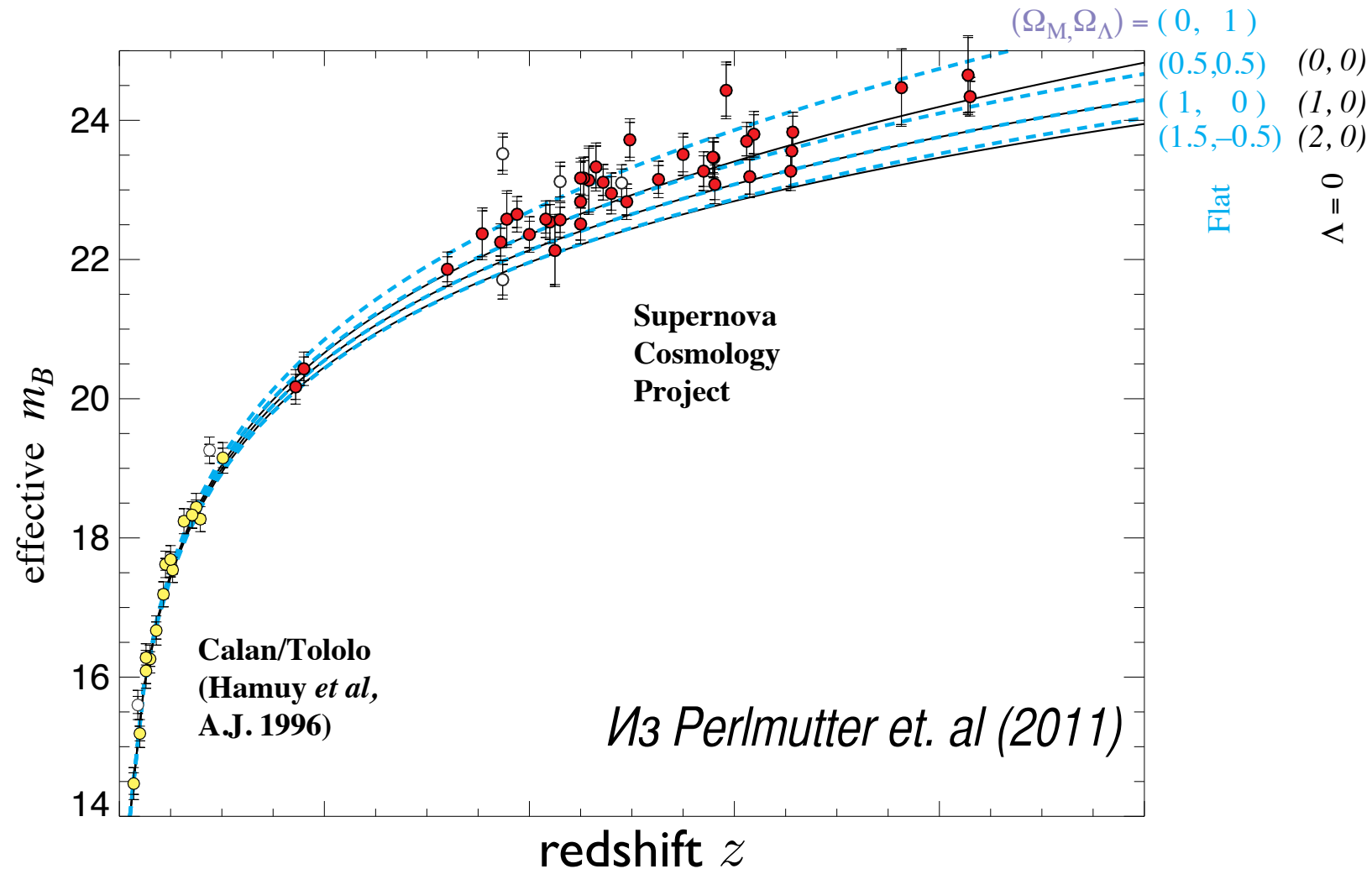
получаем теоретическую формулу,
предполагая, что Вселенная заполнена
холодной материей

Противоречит наблюдениям:

Riess et al. (1998)

Perlmutter et al. (1999)

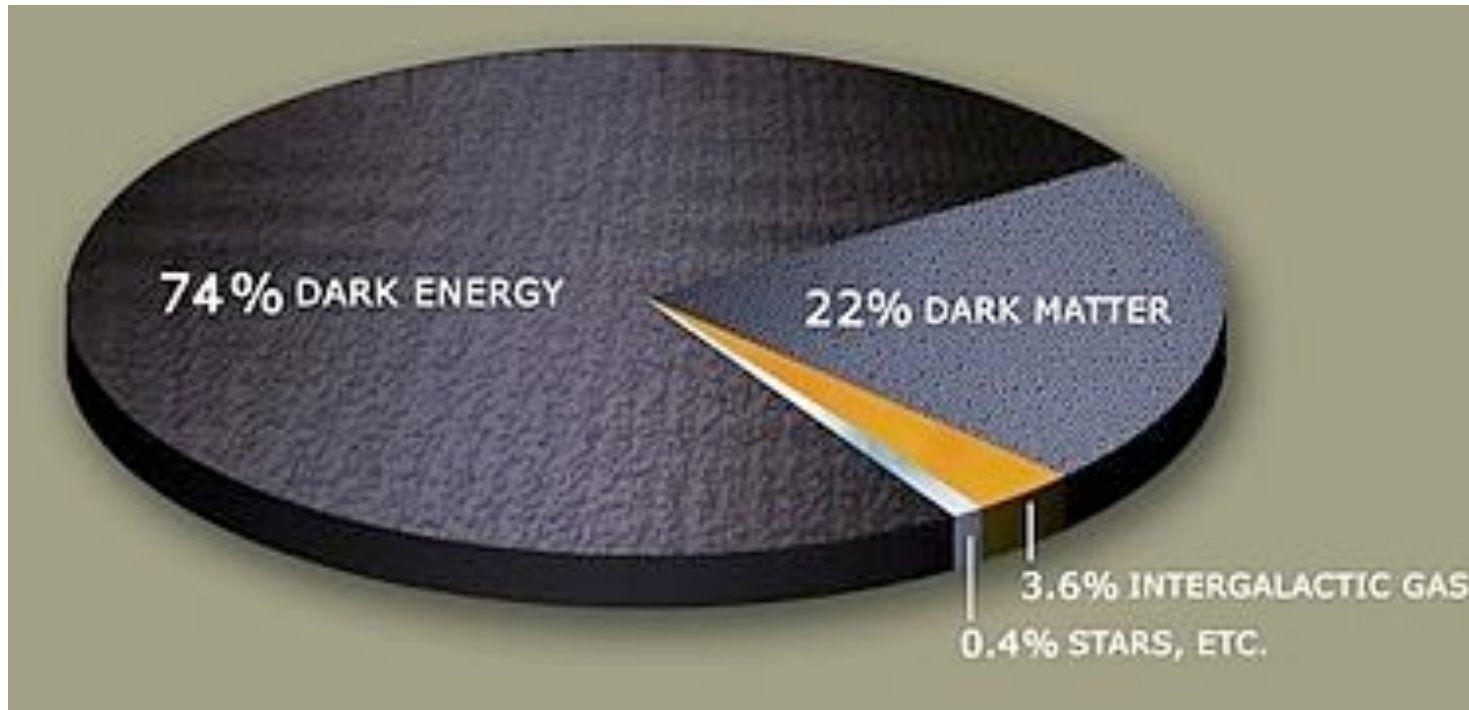
Нобелевская премия 2011



Нужна **темная энергия** ($p < 0$).

Простейший вариант -- энергия вакуума

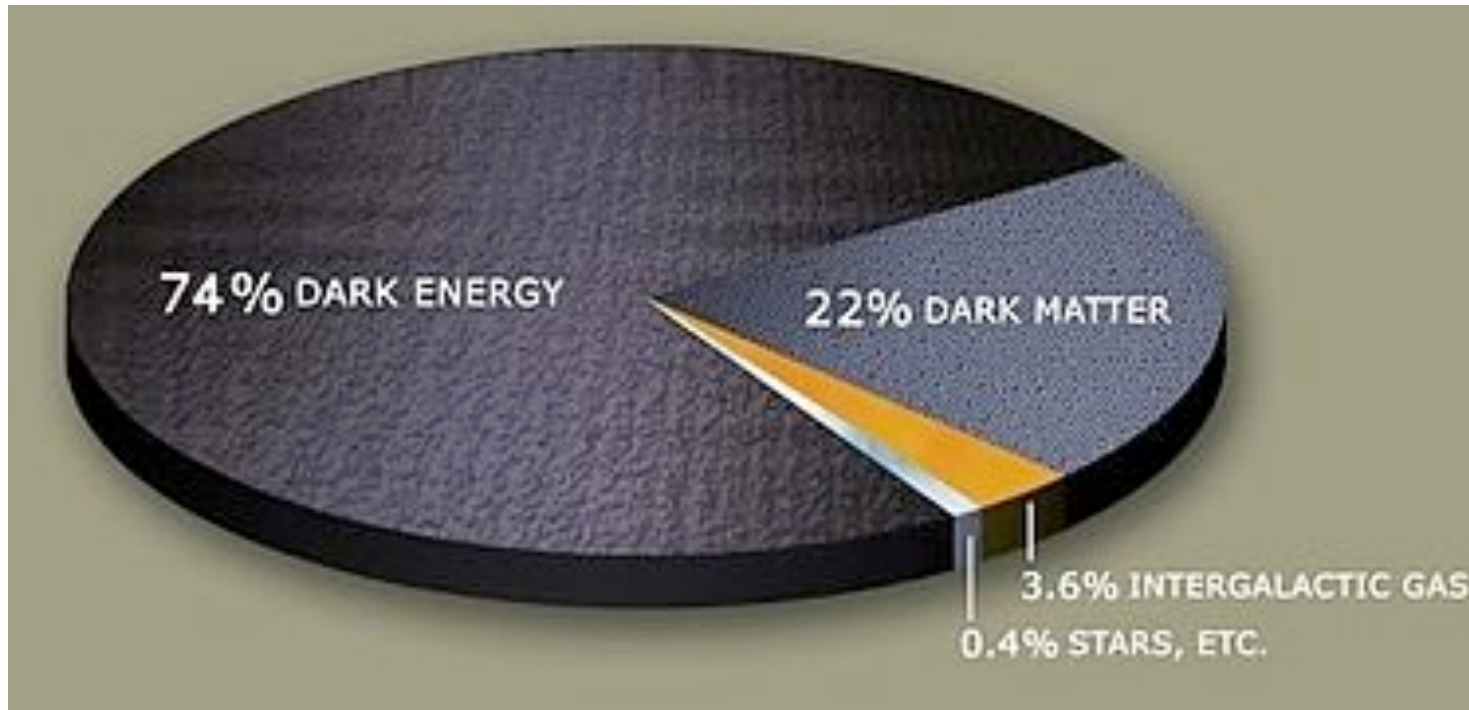
Наше современное представление о Вселенной



... она сделана неизвестно из чего ...



Наше современное представление о Вселенной



... она сделана неизвестно из чего ...

... или мы не понимаем законов гравитации
на больших расстояниях ...



***Гравитация и кванты:
ОТО нужна замена***

Почему гравитацию нужно квантовать ?

Почему гравитацию нужно квантовать ?

- все поля квантовые, и гравитация должна быть квантовой

Почему гравитацию нужно квантовать ?

- все поля квантовые, и гравитация должна быть квантовой

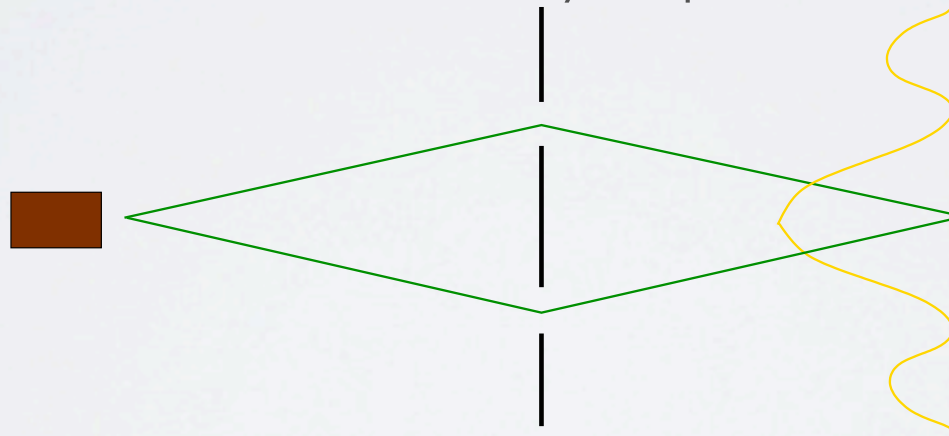
плохой аргумент

Почему гравитацию нужно квантовать ?

- все поля квантовые, и гравитация должна быть квантовой

плохой аргумент

- электрон в суперпозиции состояний, значит и его гравитационное поле в суперпозиции

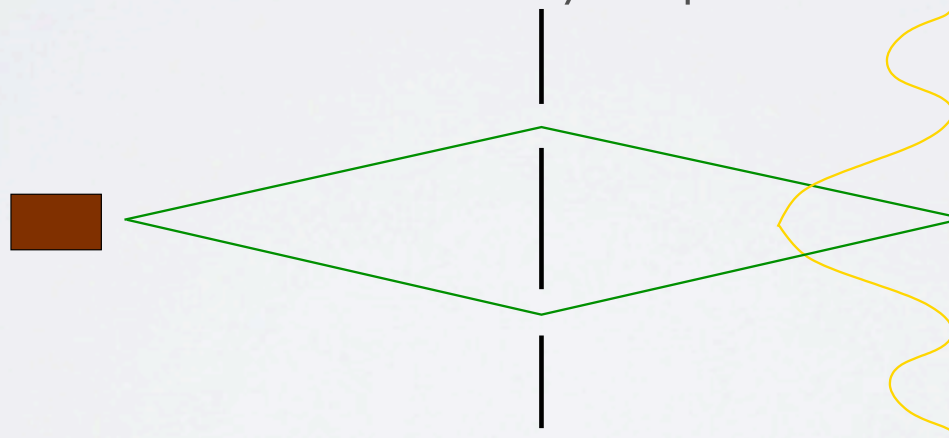


Почему гравитацию нужно квантовать ?

- все поля квантовые, и гравитация должна быть квантовой

плохой аргумент

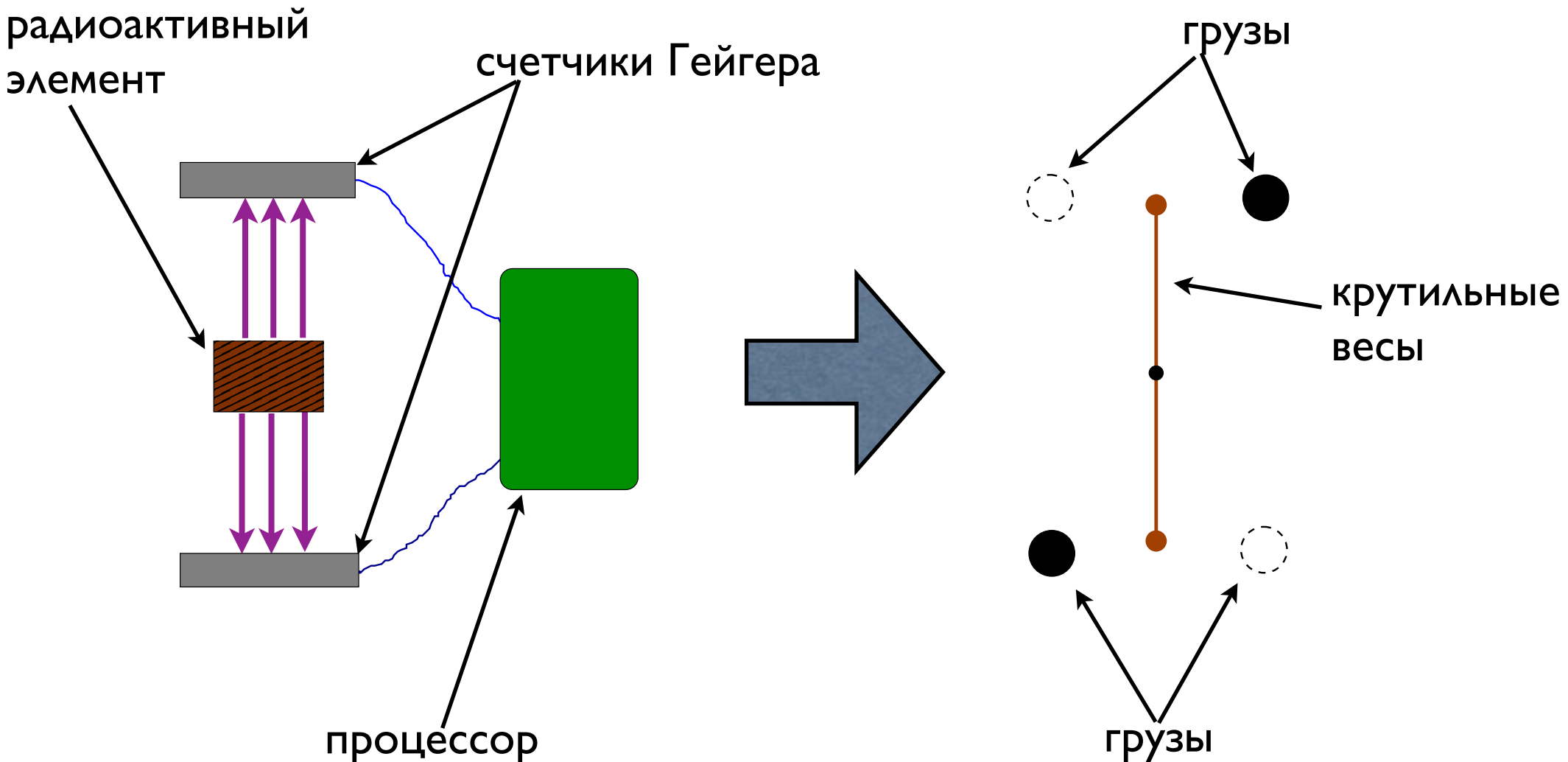
- электрон в суперпозиции состояний, значит и его гравитационное поле в суперпозиции



лучше, но у нас нет возможности измерить гравитационное поле одного электрона

Схема эксперимента для подтверждения квантовой природы гравитации

Page & Geiker (1981)



Неполнота ОТО

Попытка измерить расстояния меньше

$$l_p = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \sim 10^{-33} \text{ см}$$

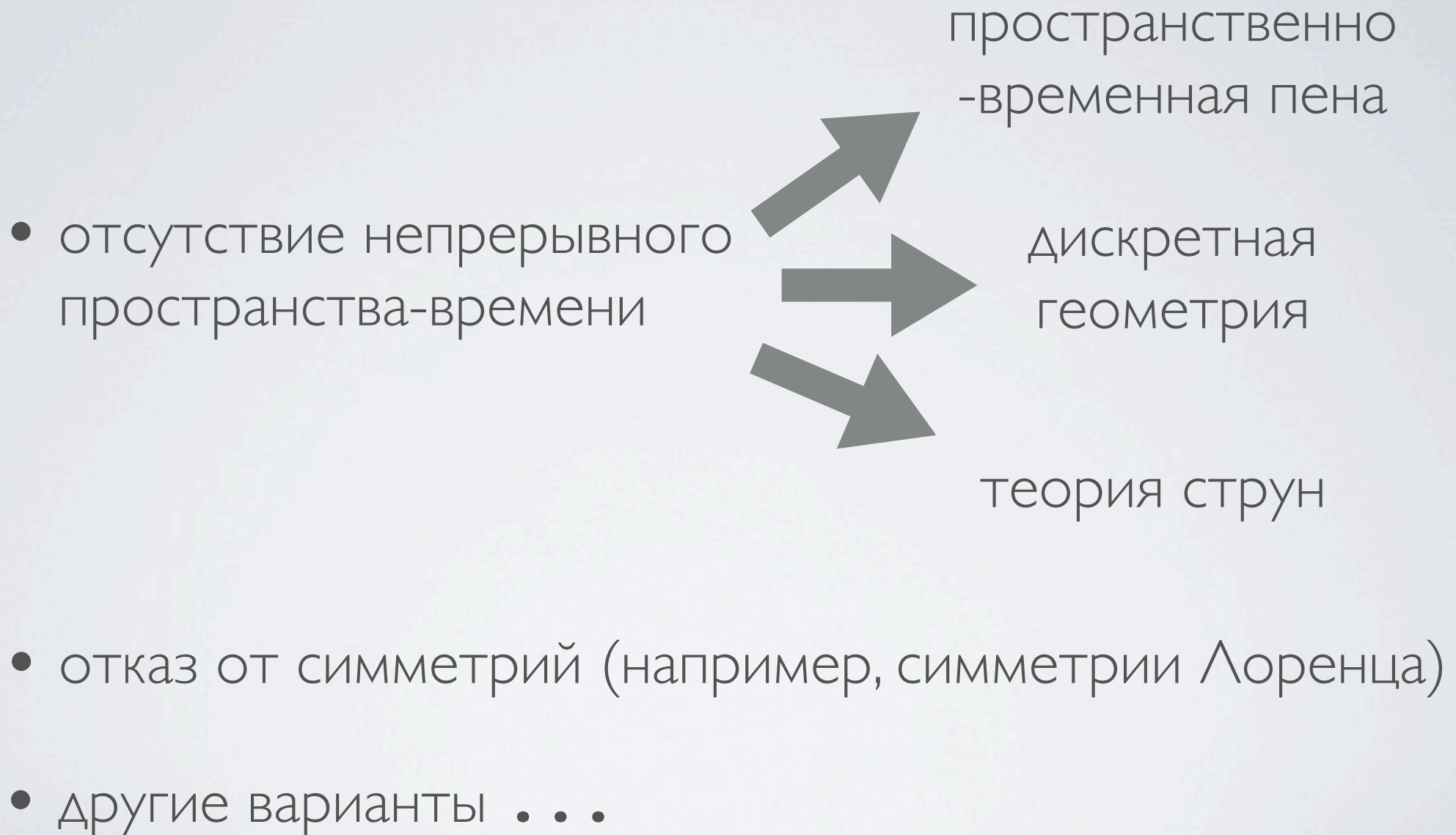
приводит к коллапсу в черную дыру

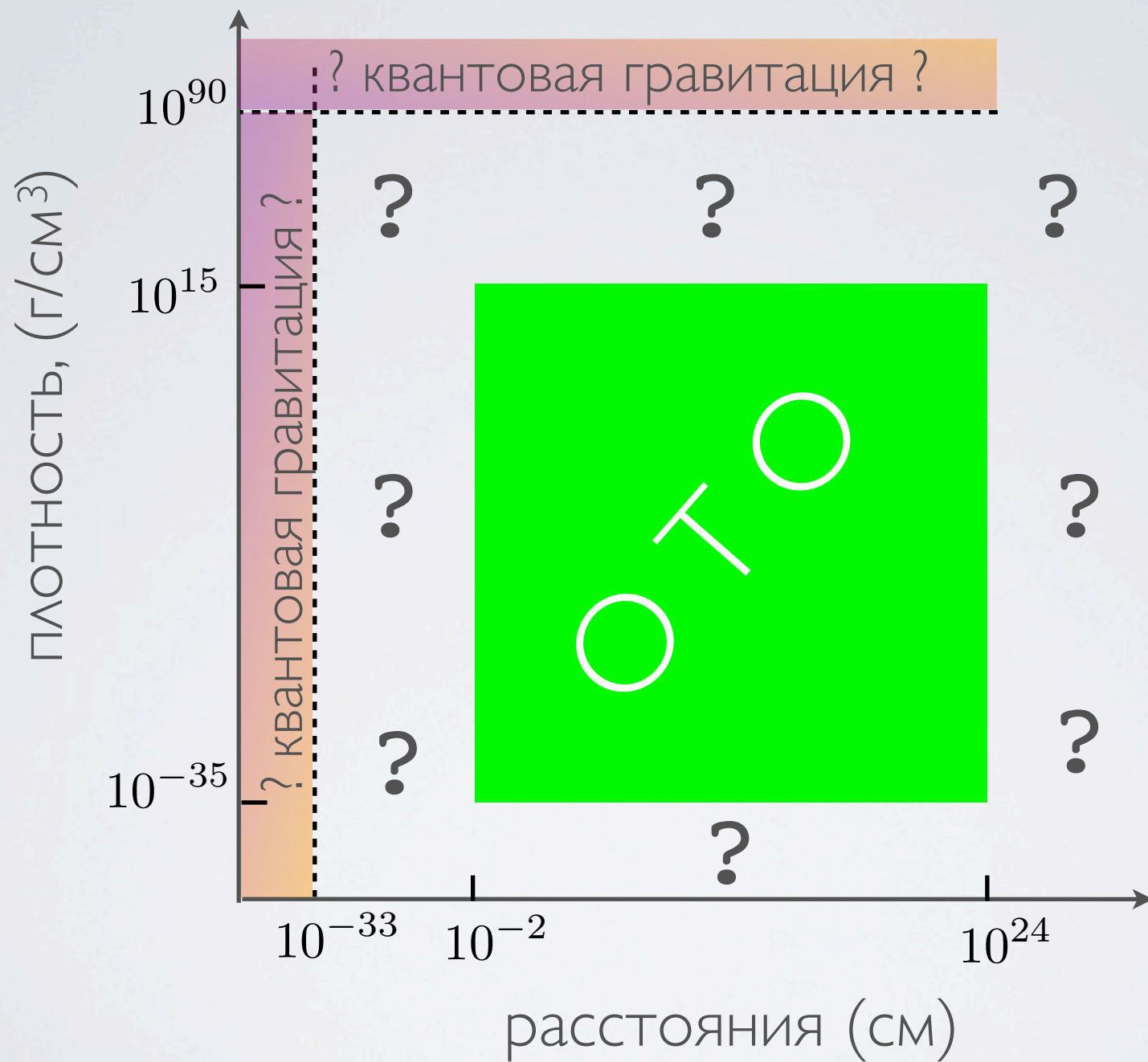
экстремально малые расстояния = экстремально высокие плотности

Необходимо знать, что происходит при экстремальных плотностях для понимания

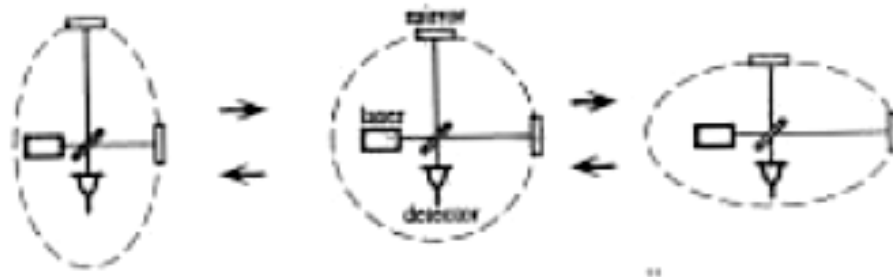
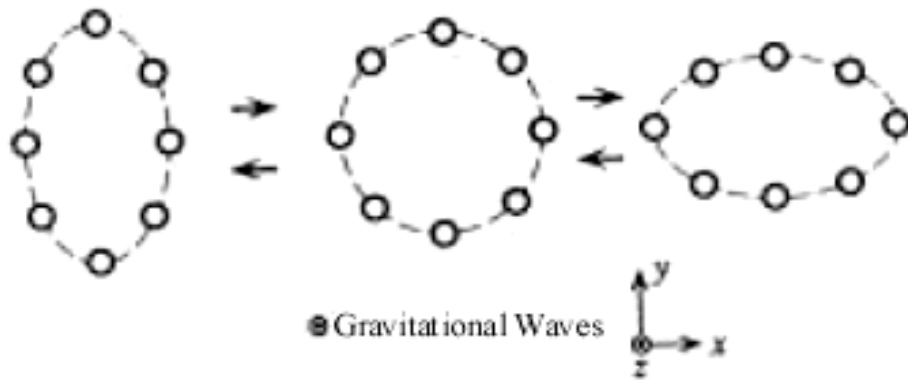
- начала Вселенной
- окончания гравитационного коллапса

Необходимо отказаться от каких-то постулатов





Гравитационные интерферометры



$$\Delta g_{\mu\nu} < 10^{-23} \quad \Rightarrow \quad \Delta l < 10^{-18} \text{ см}$$

Для сравнения: размер атомного ядра 10^{-13} см