

В поисках соединения квантовой и гравитационной физики

Семинар памяти академика
В.Г. Кадышевского

Д.В. Фурсаев

Университет «Дубна» & ОИЯИ

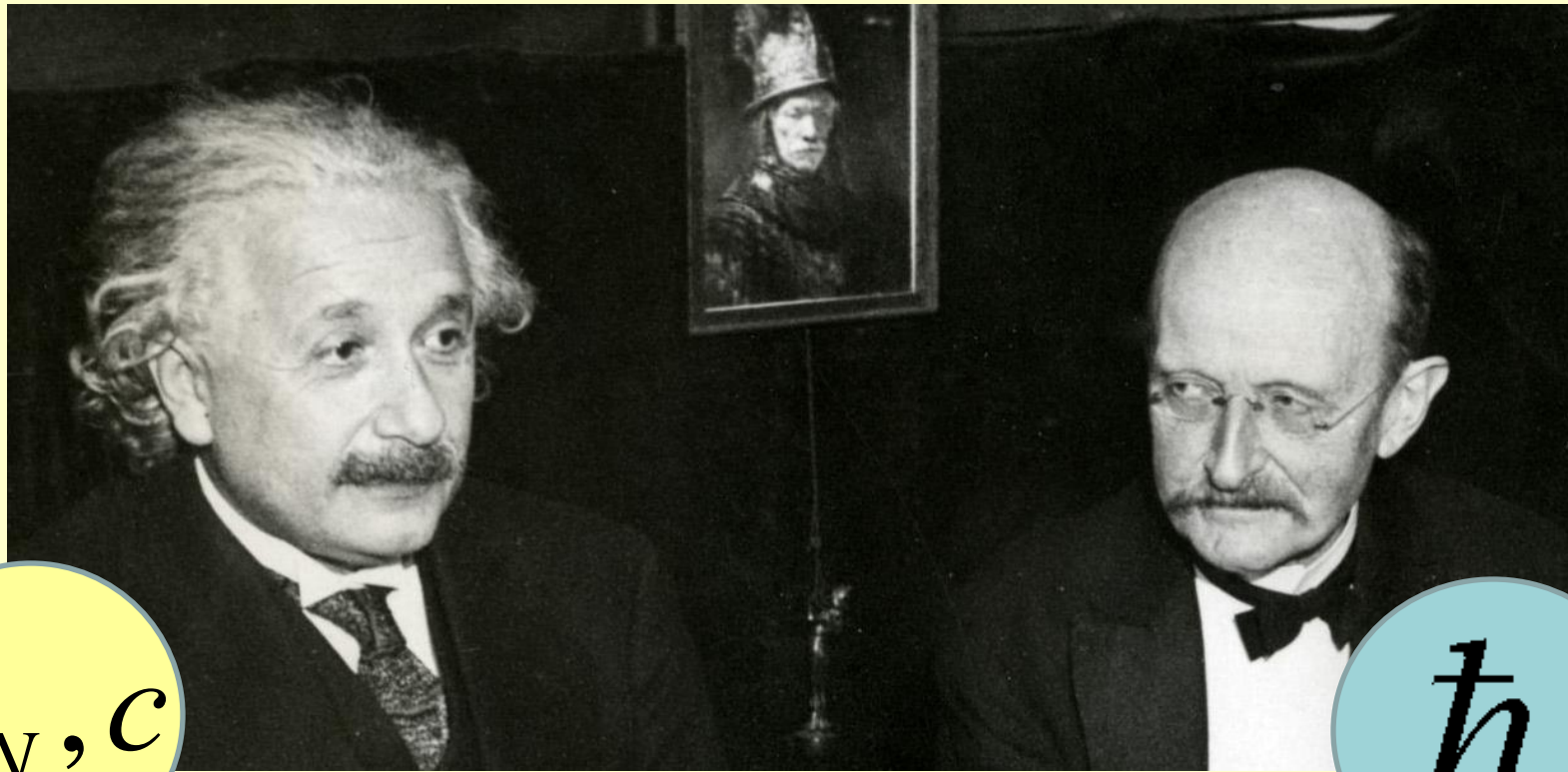
02.12.2015

ЛТФ

2015 год:

**100 – лет создания общей теории
относительности (1915 г.) ;**

гравитационная физика и квантовая физика



G_N, c

\hbar

Альберт Эйнштейн и Макс Планк (1931)

Вопросы:

Нужно ли распространять принципы квантовой теории на гравитационные явления?

Далеко ли до масштабов, где возможны эффекты квантовой гравитации?

Что квантовать в гравитации?

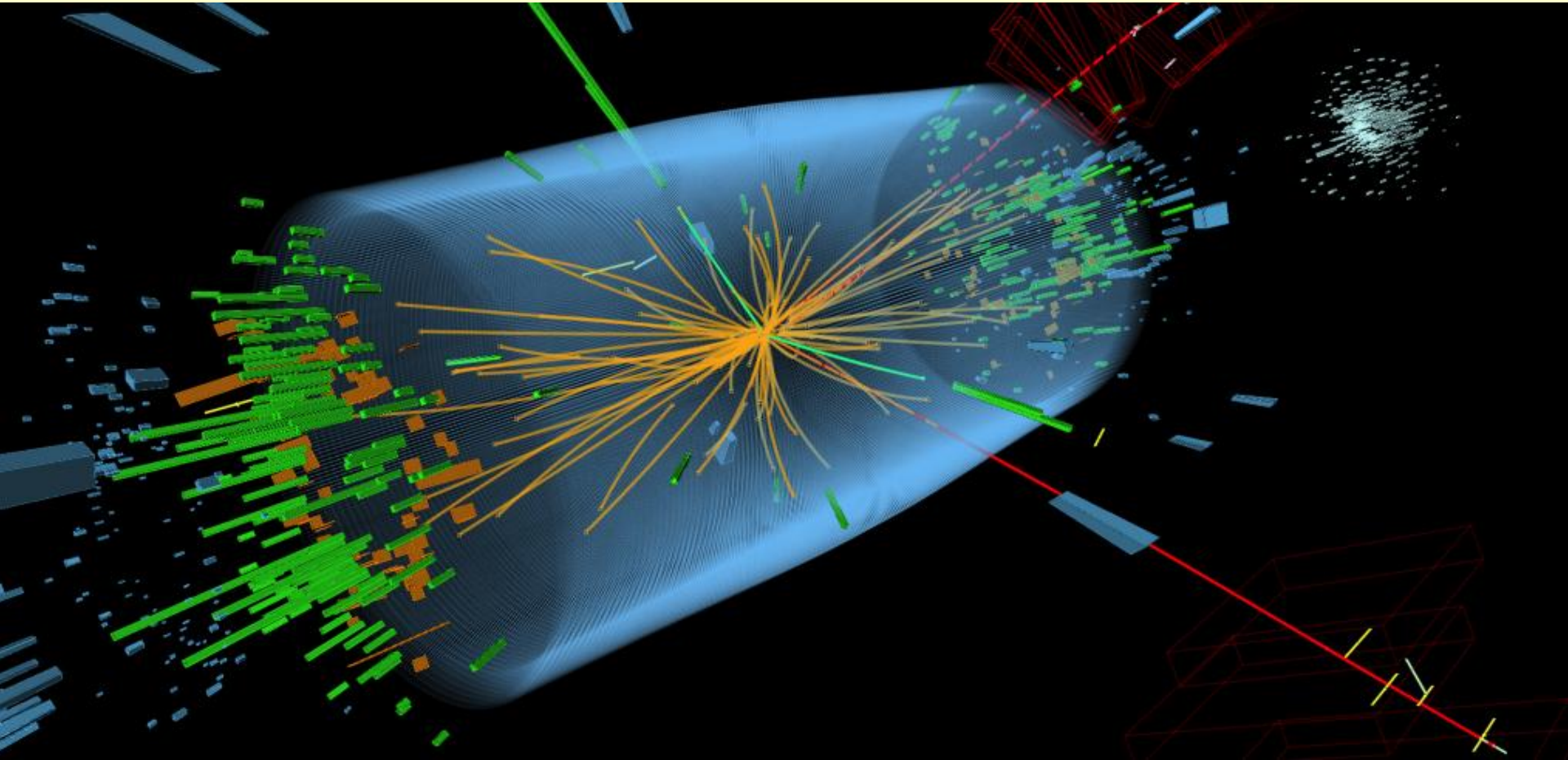
Что скрывается за уравнениями Эйнштейна?

Нужно ли распространять принципы квантовой теории на гравитационные явления?

А. Эйнштейн (1916 г.)

«...Атом, вследствие внутриатомного движения электронов, должен излучать не только электромагнитную, но и гравитационную энергию... Поскольку в действительности ничего подобного в природе быть не может то, видимо, квантовая теория должна модифицировать не только максвелловскую электродинамику, но также и новую теорию гравитации.»

- принципы квантовой механики распространяются на все другие известные типы взаимодействий: электромагнитные, слабые и сильные;



- программа по объединению электромагнитных и слабых взаимодействий оказалась очень успешной; найден бозон Хиггса; объединение с сильными взаимодействиями не представляет фундаментальных трудностей и возможно без пересмотра принципов квантовой теории поля;



Гравитационные силы не мог быть включены в единое описание с другими взаимодействиями без учета квантовой механики!

- теория гравитации не является полной (обладает конечной областью применимости):

содержит сингулярности (теоремы Хокинга-Пенроуза) ,
например, в космологических моделях;

в окрестности сингулярностей необходимо учитывать квантовые эффекты

- теория гравитации приводит к противоречиям:

к нарушению второго начала термодинамики в процессах с черными дырами,

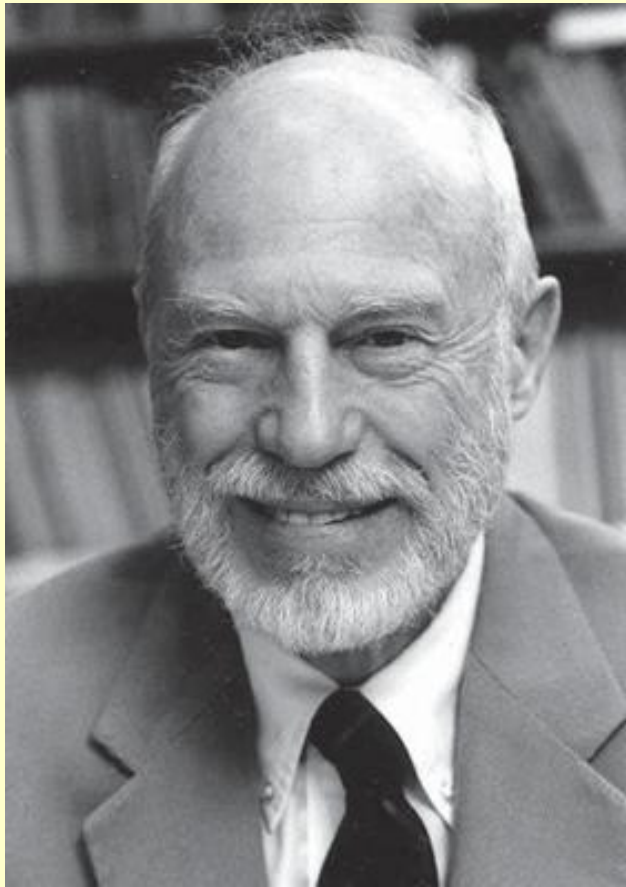
разрешение этих противоречий возможно, если теорию Эйнштейна рассматривать как эффективную;

- теория гравитации приводит к противоречиям, даже если ее развивать «полуклассически»: квантуется только материя

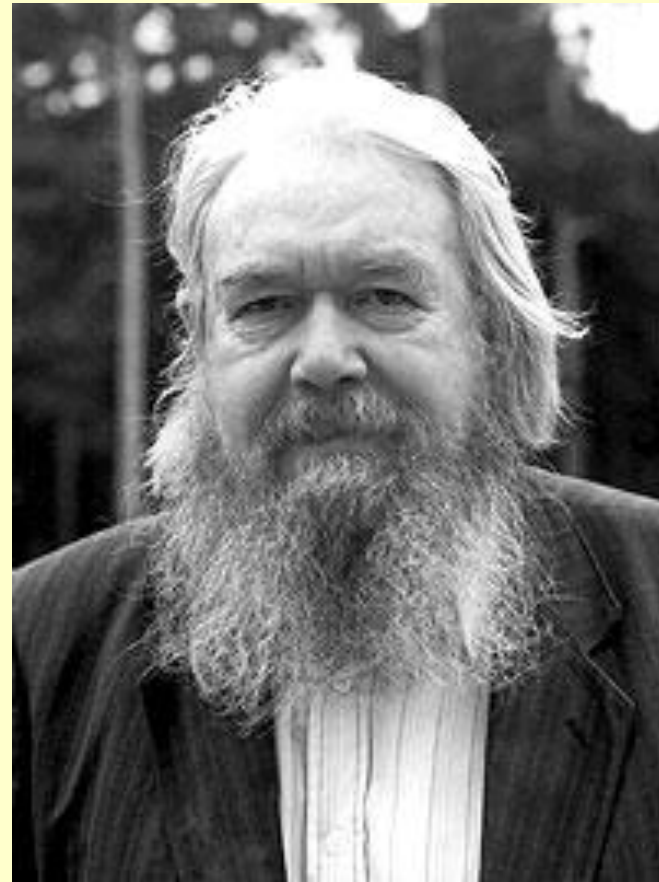
$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G_N}{c^4} \langle \hat{T}_{\mu\nu} \rangle \quad \leftarrow \text{квантовое среднее ТЭИ материи}$$

- возникают расходимости в гравитационной постоянной;
- эволюция квантового состояния в процессе гравитационного коллапса оказывается неунитарной

Квантование полей материи во внешнем гравитационном поле



Б. Де Витт
(1923-2004)



Н.А. Черников
(1928-2007)

черные дыры и квантовая теория



Стивен Хокинг (1942)

температура Хокинга

$$T_H \sim 10^{-6} \frac{M_{\odot}}{M} \left[\text{градусов Кельвина} \right]$$

черные дыры испаряются за счет квантовых эффектов, излучая частицы с планковским спектром, отвечающим температуре T_H

При гравитационном коллапсе чистое состояние превращается в смешанное!

вариационные формулы для изменения параметров черной дыры

$$\delta M = T_H \delta S^{BH} + \Omega_H \delta J$$

M - масса черной дыры

$$T_H = \frac{h\kappa}{2\pi c} \quad - \text{«температура»}$$

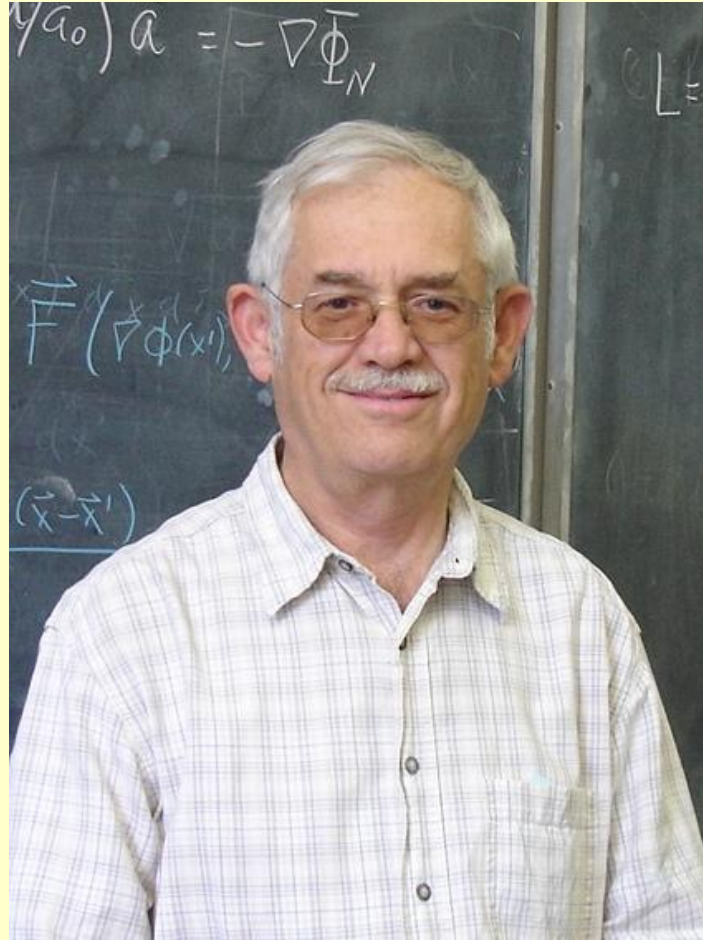
$$S^{BH} = \frac{c^3}{4Gh} A \quad - \text{«энтропия»}$$

A - площадь поверхности горизонта

J - угловой момент

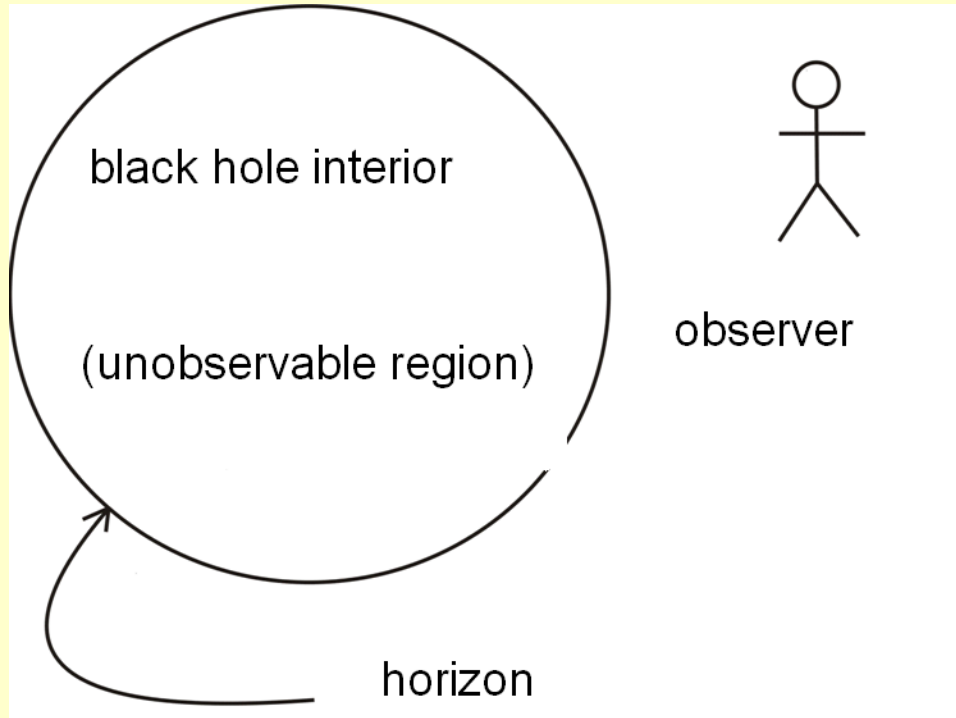
вариационные формулы выглядят как первое начало термодинамики !

Черная дыра должна обладать собственной энтропией,
иначе не будет выполняться второе начало термодинамики



Дж. Бекенштейн

Энтропия черной дыры (энтропия Бекенштейна-Хокинга)



$$S^{BH} = \frac{c^3 A_H}{4\hbar G_N}$$

A_H - площадь горизонта

Соотношения между термодинамическими параметрами некоторых типов черных дыр воспроизводят в деталях соотношения в физических системах совершенно иной природы :

- кварк-глюонная плазма (физика элементарных ч.)
- физика конденсированного состояния вещества (нано-физика)

Вопросы:

- Почему классические гравитирующие системы похожи на квантовые?
- Где скрываются степени свободы черной дыры, ответственные за ее энтропию, и какова их природа?

Далеко ли до масштабов, где возможны эффекты квантовой гравитации?

$$I_{Gravity} = \frac{c^3}{16\pi G_N} \left[\int_M \sqrt{-g} d^4 x R + 2 \int_{\partial M} \sqrt{h} K d^3 x \right]$$

$$I_{Gravity} = \frac{c^3 r_G^2}{\pi G_N}, \quad r_G = \frac{2MG_N}{c^2} \text{ — гравитационный радиус}$$

$$I_{Gravity} \sim \hbar \rightarrow r_G \sim \sqrt{\frac{\hbar G_N}{c^3}} = \ell_{Planck} \text{ — Планковская длина}$$

$$\ell_{Planck} \approx 10^{-35} \text{ м} \quad (\text{размер атома } 10^{-10} \text{ м}, \quad \text{радиус ядерных сил } 10^{-15} \text{ м})$$

$$\text{Планковская энергия } E_{Planck} = \sqrt{\frac{\hbar c^3}{G_N}} \approx 10^{19} \text{ GeV}$$

Планковская энергия на 15 порядков выше энергии на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе (Женева)

Модели с дополнительными измерениями

пусть число измерений пространства-времени $4 + n$,

n дополнительных измерений обозначим координатами y^k

$0 < y^k < L$, L – размер дополнительных измерений

$$I^{(n)}_{Gravity} = \frac{1}{16\pi G_N^{(n)}} \left[\int_M \sqrt{-g} d^4x d^n y R^{(n)}(x, y) + \dots \right]$$

если $R^{(n)}(x, y) = R(x)$

$$I^{(n)}_{Gravity} = \frac{L^n}{16\pi G_N^{(n)}} \left[\int_M \sqrt{-g} d^4x R(x) + \dots \right]$$

$$G_N = \frac{G_N^{(n)}}{L^n} \text{ — эффективная гравитационная постоянная}$$

Модели с дополнительными измерениями

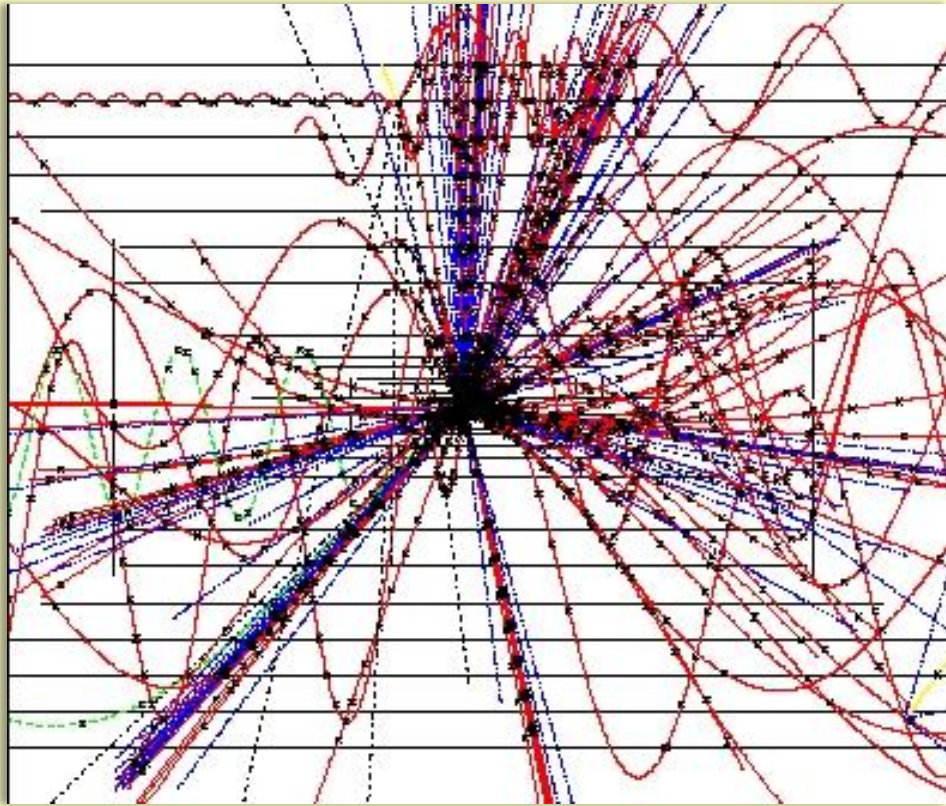
$$G_N = \frac{G_N^{(n)}}{L^n} \text{ — эффективная гравитационная постоянная}$$

масштаб энергий квантовой гравитации будет

$$E_{QG} \sim (G_N^{(n)})^{-\frac{1}{n+2}} = (G_N L^n)^{-\frac{1}{n+2}}$$

при большом размере дополнительных измерений эффекты квантовой гравитации могут быть доступны современным ускорителям

«Фабрика» черных дыр на БАК?



Если бы планковский масштаб был 1TeV , черные дыры с массой 5TeV рождались со скоростью 1 ч.д. в сек.

Компьютерное моделирование распада мини черной дыры. «Струи» кварков и глюонов образуются за счет эффекта Хокинга квантового испарения черной дыры.

Что квантовать в гравитации?

Квантовое пространство-время

$$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar \quad , \quad \Delta x \Delta p \geq \hbar$$

координаты \mathcal{X} не могут быть зафиксированы со сколь угодно малой точностью: этому препятствует гравитационный коллапс, возникающий при концентрации больших импульсов (энергии); чтобы ввести ограничение на точность измерения координат, их можно сделать некоммутирующими

$$[\hat{x}_i, \hat{x}_j] \neq 0$$

нужна дополнительная размерная константа

Квантовое пространство-время и криволинейное импульсное пространство в КТП



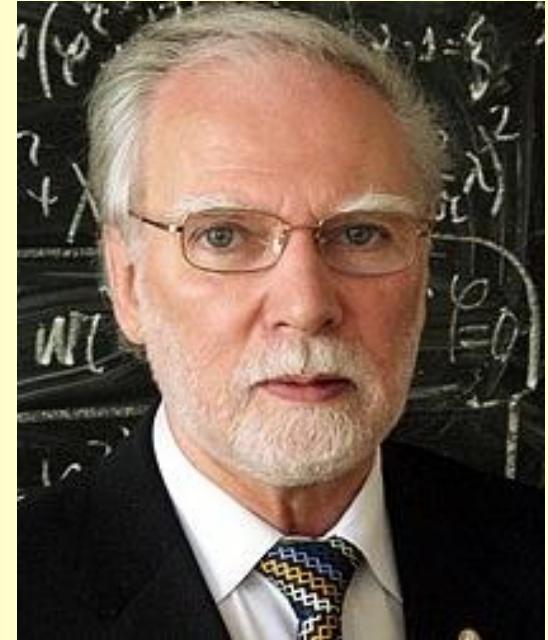
Х.С. Снайдер
(1913-1962)

пионерская работа
в 1947 г.



Ю.А. Гольфанд
(1922-1994)

1959 г. , ЖЭТФ



В.Г. Кадышевский
(1937-2014)

1960 г. ,
ДАН СССР

Импульсное пространство Снайдера

$$\eta^L \eta_L = \eta^\mu \eta_\mu + \eta_5^2 = b^2$$

импульсы $p^\mu = \frac{1}{a} \frac{\eta^\mu}{\eta_5}$

L_{KL} — генераторы $SO(1, 4)$ на кривом импульсном пространстве

определение операторов координат $\hat{x}^\mu = iaL_{\mu 5}$

$$\left[\hat{x}_\mu, \hat{x}_\nu \right] = ia^2 L_{\mu\nu}$$

модифицируются также другие коммутационные соотношения, но

стандартные соотношения восстанавливаются в пределе

$$a \rightarrow 0$$

Теория поля с фундаментальной массой и «максимон» Маркова

$$-p^\mu p_\mu + p_5^2 = M^2$$

M — фундаментальная масса, ограничения

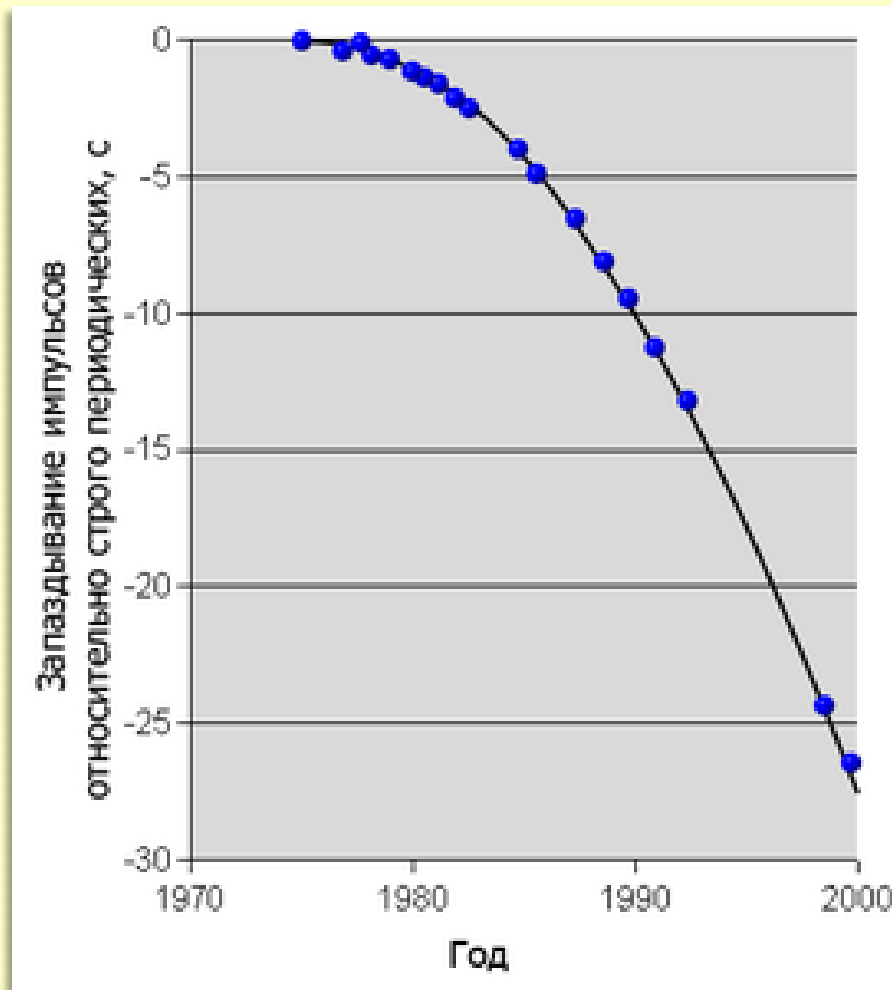
на массы частиц $m \leq M$



подход В.Г. Кадышевского: локальная формулировка КТП, в которой поля материи являются данными Коши для 5-мерного уравнения

$$(\partial_L \partial^L - M^2) \phi(x, x^5) = 0$$

Квантование линеаризованной теории Эйнштейна (каноническое квантование)



Пульсар Халса и Тэйлора
(1974 г.),

Нобелевская премия 1993 г.
за подтверждение
предсказания ОТО о
гравитационном излучении

Диссертация по квантовой теории гравитонов (1935 г.)



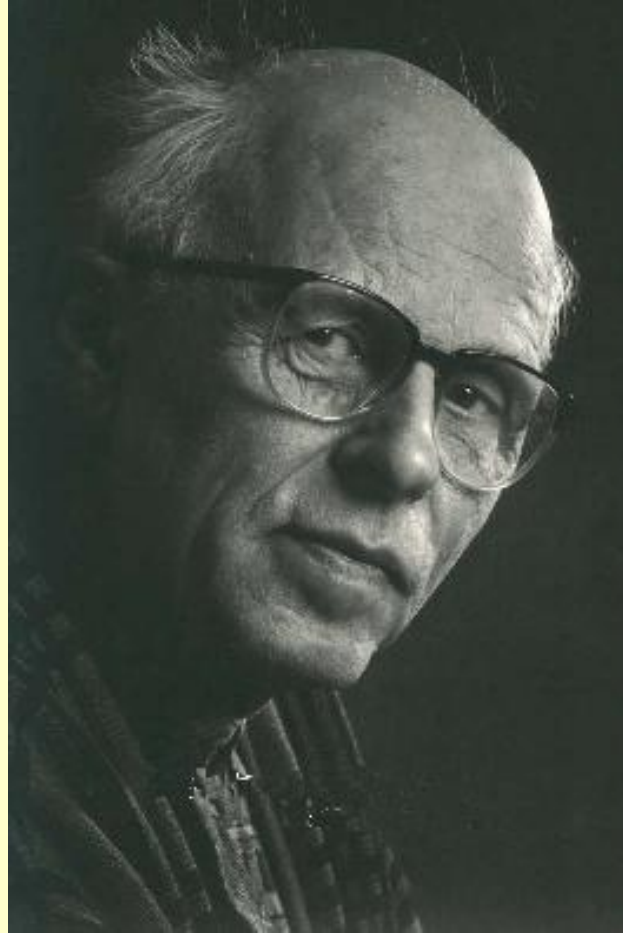
М.П. Бронштейн
(1906-1938)

- воспроизведена классическая формула для гравитационного излучения;

-воспроизведен закон Ньютона

Среди первых работ по квантованию гравитонов – работа Л. Розенфельда

Гравитация может быть индуцирована квантовыми эффектами



А.Д. Сахаров

Работа Сахарова (1968):

$$0 = \langle \hat{T}_{\mu\nu} \rangle = \langle \hat{T}_{\mu\nu}^M \rangle + \langle \hat{T}_{\mu\nu}^m \rangle =$$

$$= \left(\begin{array}{c} \text{фундаментальные степени} \\ \text{свободы} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{низкоэнергетические степени} \\ \text{свободы} \end{array} \right)$$

$$\langle \hat{T}_{\mu\nu}^M \rangle \approx aG_{\mu\nu} + bg_{\mu\nu} + \dots \quad , \quad a = -\frac{1}{G_{eff}}, \quad b = -\frac{\Lambda_{eff}}{G_{eff}}$$

гравитоны = коллективные возбуждения

аналогия: фононы в твердом теле

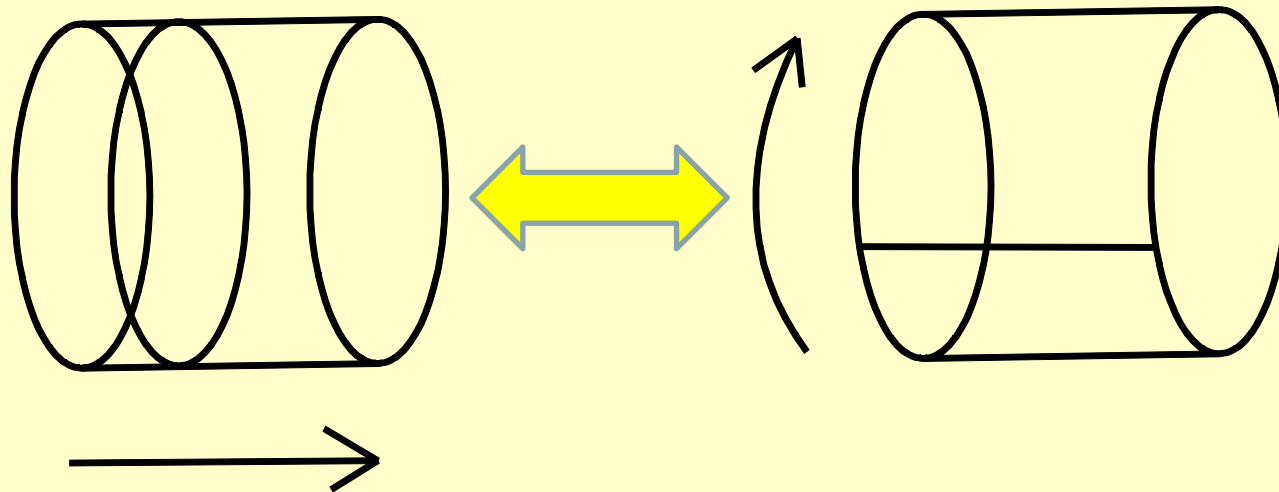
Λ_{eff} , G_{eff} - модуль Юнга, коэффициент Пуассона

Уравнения Эйнштейна могут быть выведены из первого закона термодинамики (1995)



**Т. Джекобсон:
Гравитацию не надо квантовать канонически!**

Теория струн:



«древесная» диаграмма
(замкнутая струна)

однопетлевая диагр.
(открытая струна)
“картина Сахарова”

низкоэнергетический предел (10D (super)gravity, ...)

Современные концепции

каноническое квантование метрики



квантование других переменных
(пременные Аштекара, петлевая гравитация)

индуцированная гравитация



теория струн

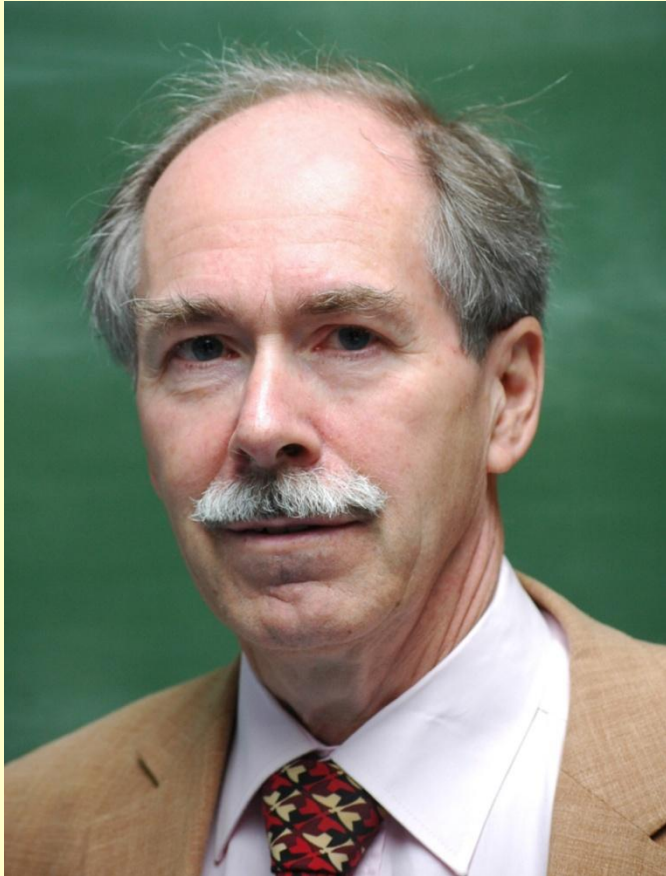
квантовое пространство-время



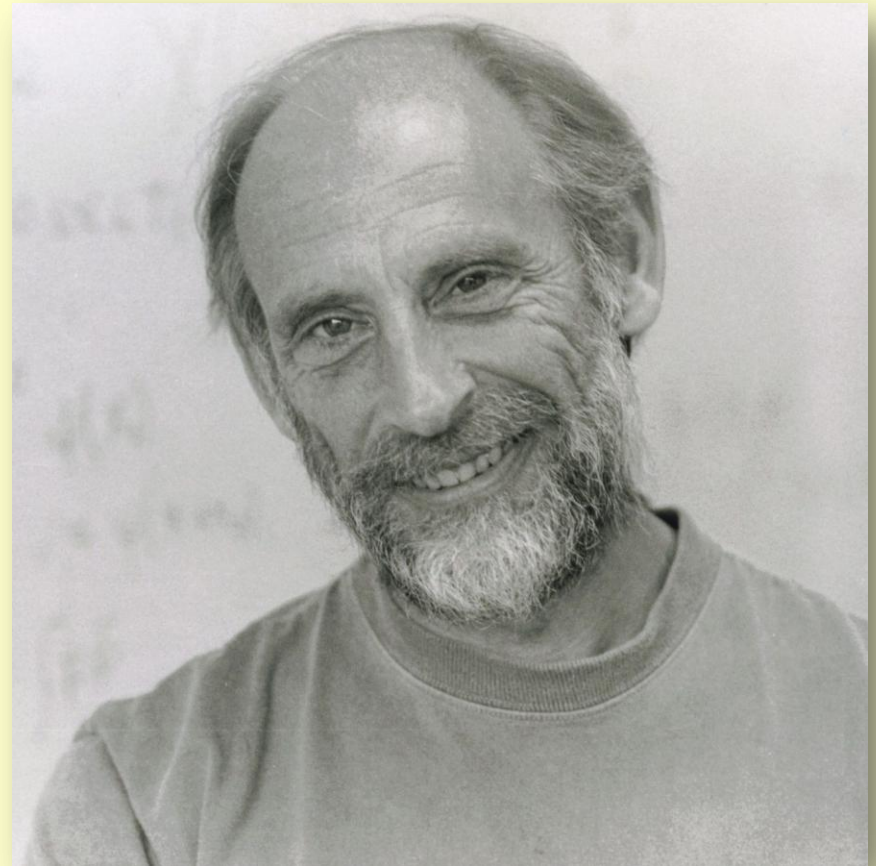
некоммутативная геометрия

Мир – голограмма!

Черные дыры указывают на то, что гравитация может иметь голографический характер (1993)



Г. т'Хоофт



Л. Сасскинд

Голография: в квантовой гравитации энтропия области пространства ведет себя как площадь ограничивающей поверхности

$$S_{Thermal} \sim VT^3 = L^3T^3$$

T температура не может расти безгранично: гравитационный коллапс

$$T < T_{\max} :$$

$$E_{\max} \sim VT_{\max}^4 : \quad GE_{\max} < L - \text{гравитационный радиус}$$

$$S_{QG}(V) \sim S_{BH} \sim \frac{L^2}{G}$$

AdS/CFT соответствие (1997)



Х.Малдасена

Вопросы:

Нужно ли распространять принципы квантовой теории на гравитационные явления? **Да**

Далеко ли до масштабов, где возможны эффекты квантовой гравитации? **Может быть, нет**

Что квантовать в гравитации? **Не гравитоны**

Что скрывается за уравнениями Эйнштейна?

Пока мы только находим важные указания на наличие фундаментальных степеней свободы (вопрос о струнах, бранах, петлях ... открыт)

Спасибо за внимание!