

Специальная теория относительности (СТО)



Герман Минковский
(Hermann Minkowski)
1864-1909 –не-мецкий математик, разработавший геометрическую теорию чисел и геометрическую

четырёхмерную модель Премии по физике 1921 г., теории относительности.

- общественный деятель-гуманист. Разработал теории:
1. Специальная теория относительности (1905)
 2. Общая теория относительности (1907—1916).
 3. Квантовая теория фотоэффекта.
 4. Квантовая теория теплоёмкости.
 5. Квантовая статистика Бозе — Эйнштейна.
 6. Статистическая теория броуновского движения, заложившая основы теории флуктуаций.
 7. Теория индуцированного излучения.
 8. Теория рассеяния света на термодинамических флуктуациях в среде.
 9. Предсказал

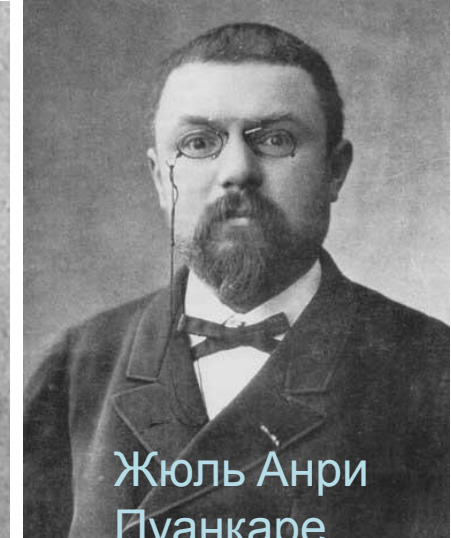


Альберт Эйнштейн и Хендрик

Эйнштейн (Albert Einstein)

физик-теоретик, один лауреат Нобелевской премии современной теоретической физики

Hendrik Antoon Lorentz; 1853-1928 – нидерландский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии Создал классическую электронную теорию. Вывел формулу, связывающую показатель преломления вещества с его плотностью. Разработал теорию дисперсии света. Объяснил ряд магнитооптических явлений (в частности, эффект Зеемана). На основе электронной теории учёный развил электродинамику движущихся сред. Предложил направление их движения (сокращение



Жюль Анри Пуанкаре

Jules Henri Poincaré;

1854-1912 - французский математик. Достижения:

1. Создание топологии.
2. Качественная теория дифференциальных уравнений.
3. Теория автоморфных функций.
4. Разработка новых методов небесной механики.
5. Создание

математических основ СТО и ОТО. 6. Создание теории Фейнмановых диаграмм —

Противоречия классической физики

Классическая ньютоновская космология принимала следующие постулаты:

- Вселенная – это весь существующий материальный мир, включая и тот, который находится за пределами планеты Земля и не известен человеку. Космология познает мир таким, каким он существует сам по себе, безотносительно к условиям познания.
- Пространство и время Вселенной абсолютны, они не зависят от материальных объектов и процессов. Время не зависит от пространства.
- Пространство и время метрически бесконечны.
- Пространство и время однородны.
- Материя сама по себе косна, пассивна и не способна к движению.
- Вселенная стационарна, не претерпевает эволюции, изменяться могут конкретные космические системы, но не мир в целом.

В ньютоновской космологии возникали два парадокса, связанные с постулатом бесконечности Вселенной:

- *Гравитационный*: если Вселенная бесконечна, и в ней существует бесконечное количество небесных тел, то сила тяготения будет бесконечно большая, и Вселенная должна *сколлапсировать* (гравитационный коллапс – катастрофически быстрое сжатие тел под действием гравитационных сил), а не существовать вечно;
- *Фотометрический*– если существует бесконечное количество небесных тел, то должна быть бесконечная светимость неба, что не наблюдается.

Эти парадоксы разрешает современная космология, в границах которой было введено представление о расширяющейся эволюционирующей Вселенной.

СТО объясняет...

- увеличение времени жизни нестабильных частиц, разогнанных до больших скоростей.
- уменьшение синхротронной частоты с ростом скорости частиц
- объясняет, откуда вообще берётся спин электронов, а также значения магнетона Бора и множителей Ланде.
- величину Лэмбовского сдвига
- в теории относительности уравнения Максвелла инвариантны относительно преобразований Лоренца.
- теория относительности объясняет не только взаимные преобразования электрических и магнитных полей, но и откуда берётся само магнитное поле.
- с помощью запаздывающих потенциалов Лиенара-Вихерта теория относительности объясняет свойства и величину дипольного и мультипольных излучений.
- объясняет количественно эффект Комптона
- Предсказывает существование и абсолютно точно описывает свойства античастиц
- объясняет, почему частицы с целым спином – бозоны, а с полуцелым – фермионы.
- объясняет существование дефекта масс в ядрах

- предсказывает парадокс двойни
г $p'_x = p_x - mv$ мол $E' = E - vp_x + \frac{mv^2}{2}$ исыва
- запрещает существование фермионов в гвёрдд
- закон преобразования энергии и импульса в теории с
естественнее и эстетичнее, чем в механике Ньютона

$$p'_x = \frac{p_x - \frac{v}{c^2} \cdot E}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad E' = \frac{E - vp_x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$p'_y = p_y \quad p'_z = p_z$$

Формулы преобразования энергии и импульса
при преобразовании Галилея (вдоль оси x)

Противники СТО

- СТО не была принята «на ура» сразу же, как только была опубликована. Даже Лоренц, хотя в своих лекциях читал про математическую часть СТО, который сам же и придумал, но интерпретацию Эйнштейна не разделял и до конца жизни верил в эфир. Так называемые парадоксы СТО тоже были придуманы в десяти-двадцатых годах прошлого века для троллинга новой теории, впрочем примерно в это же время и были разрешены. Отрицали-критиковали СТО немало хорошо известных для своего времени учёных: Тесла, Жуковский, Ленард, Штарк, Дж.-Дж Томсон.
- Отдельного внимания заслуживает критика в среде [советских](#) учёных. Ввиду того, что некоторые особо одарённые представители дорелятивистской физики и советской философии увидели в ТО чертовщину и якобы противоречие с ньютоновской механистической определённой мира и материализмом (хотя никаких предпосылок для подрыва материализма сам Эйнштейн или его труды не давали), труЪ- (thruе-) материалисты и поддержавшие их [за компанию](#) партийные коммунисты стали [опасаться](#) этого и принялись на всякий случай поносить ТО или отдельные её аспекты на чём свет стоит. Особо выделился в этом некто [Тимирязев](#), отрицавший также и квантовую механику; [самоучка из Калуги](#) Циолковский отвергал релятивистскую космологию и ограничение на скорость движения, подрывавшее его планы по заселению космоса;
- Немалое количество [философов](#) сделали академическую карьеру на критике современной физики: так, «специалист» по [философским проблемам](#) естествознания [Омельяновский](#) написал аж несколько моно-графий по поводу и стал-таки академиком АН УССР и член-корреспондентом АН СССР. Некто, [А. А. Максимов](#), член-корреспондент АН СССР и профессор философского факультета МГУ, выступил против реакци-онных измышлений Эйнштейна аж в 1952 году в газете «Красный флот», в связи с чем попавшие под раздачу физики деликатно обратились к [Лаврентию Павловичу](#) Барии... Который, кроме того что был начальником КГБ, по совместительству являлся руководителем [атомного проекта](#). Более подробно об истории взаимоотношений физиков и философов, физиков и партии и физиков между собой можно почитать в книге А. С. Сонины «Физический идеализм: история одной идеологической кампании».

Вывод преобразований Лоренца из общих соображений

Пусть при переходе из одной системы отсчёта, в которой события описываются

ко-

$x' = a(v)x + b(v)t$; $t' = g(v)x + f(v)t$ являются не только координаты, но и время:

О линейности преобразований Лоренца. В книге В. А. Фока «Теория пространства, времени и тяготения», (1961) в Добавлении А на стр. 510-514 показано, что самым общим видом преобразования, переводящим прямую в прямую, является дробно-линейное. Преобразования, которые получаются в этом случае ([преобразования Лоренца-Фока](#)), приводят к интересным и необычным свойствам пространства-времени. Так например, точки, бесконечно удаленные друг от друга (в пространстве или во времени) в одной системе отсчёта, оказываются на конечных расстояниях в другой системе отсчёта. Чем-то это похоже на преобразование в **оптических системах** (вроде линзы). Однако, если ввести дополнительное требование

1. Возьмём $x = 0$, тогда $b_v = -b_{-v}$, $f_v = f_{-v}$ (b нечётно, f чётно). $x' = -vt'$, $\Rightarrow b = -vf$
2. Возьмём $x = vt$, тогда $x' = 0$, $b_v = -a_v v$, $a_{-v} = a_v$. \Rightarrow (учтем, что $f = -b/v$) $f = a$.

Следовательно, уравнение (1) можно переписать как $x' = a(x - vt)$; $t' = gx + at$

3. Если система «2» движется относительно системы «1» со скоростью v , то «1» относительно «2» движется со скоростью $-v$. Перейдём из системы «1» в «2» и обратно из «2» в «1»:

$$x = a(a(x - vt) + v(gx + at)) = (a^2 + vag)x + \dots t \quad \Rightarrow a^2 + vag = 1, g_{-v} = -g_v$$

Обозначим $g = kv$, тогда $k = (1 - a^2)^{-1/2} kv$, тогда $k = \frac{1 - a^2}{av}$ примут вид:

(3)

Остаётся воспользоваться тем, что преобразования Лоренца представляют собой группу

Продолжение вывода

(мы дошли до $x' = a(x - vt); t' = \frac{(1 - a^2)}{av}x + at$)

4. Перейдем из системы отсчета «2» в систему «3», которая движется относительно «2» со скоростью u .

$$x'' = a_u(a_v(x - vt) - u(\frac{1 - a_v^2}{a_v v}x + a_v t)) = (a_u a_v - a_u u \frac{1 - a_v^2}{a_v v})x - a_u a_v(v + u)t;$$

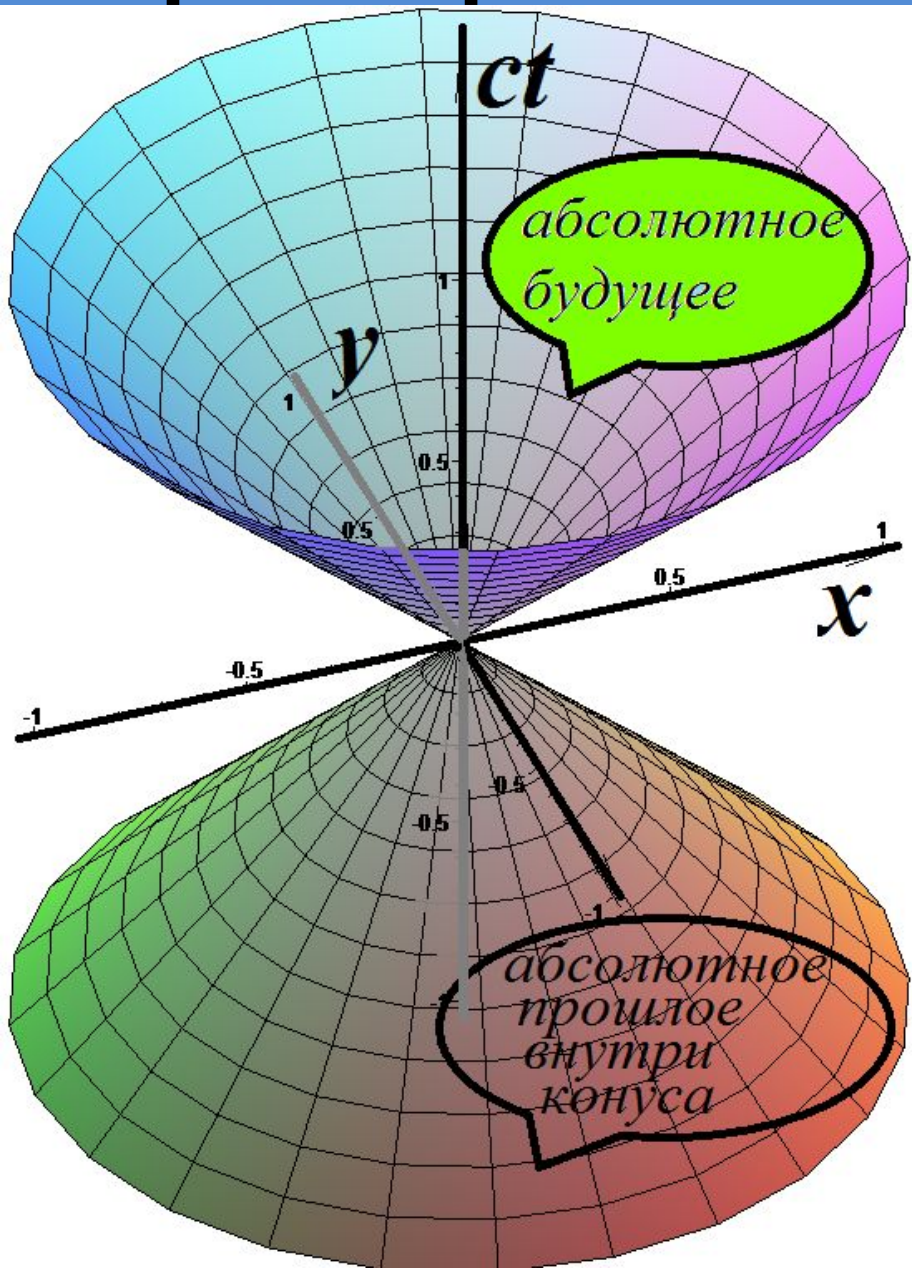
$$\begin{aligned} t'' &= \frac{1 - a_u^2}{a_u u} a_v(x - vt) + a_u \frac{1 - a_v^2}{a_v v} x + a_u a_v t = \\ &= (a_u \frac{1 - a_v^2}{a_v v} + a_v \frac{1 - a_u^2}{a_u u})x + (a_u a_v - \frac{1 - a_u^2}{a_u u} a_v v)t \end{aligned}$$

Как мы видели, коэффициенты при t в выражении для t' и при x в выражении для x' одинаковы, т.е.

$$\frac{1 - a_u^2}{(a_u u)^2} = \frac{1 - a_v^2}{(a_v v)^2} = s$$

Эта величина не может зависеть ни от u , ни от v . Если мы обозначим $s = -1/c^2$, то отсюда получим преобразования Лоренца. Кстати, почему $s < 0$? Но тогда для всех 4-векторов

Пространство Минковского



Интервал между событиями

$$s^2 = c^2(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2$$

1. $s^2 > 0, \Delta t > 0$ – абсолютное будущее
2. $s^2 > 0, \Delta t < 0$ – абсолютное прошлое
3. $s^2 = 0, \Delta t > 0$ – абсолютное будущее
4. $s^2 = 0, \Delta t < 0$ – абсолютное прошлое
5. $s^2 < 0$ - причинно несвязанные

СОБЫТИЯ

4-векторы

(ct, x, y, z) - времени-координаты ($\Rightarrow s$)
 $(E/c, p_x, p_y, p_z)$ - энергии-импульса ($\Rightarrow mc$)

$\left(\frac{c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \frac{\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right)$ - скорости ($\Rightarrow c$)

$(\omega, ck_x, ck_y, ck_z)$ - частоты ($\Rightarrow 0$)

$\left(\frac{\vec{v}\vec{a}}{c}, \frac{(\vec{v}\vec{a})\vec{v}}{c^2} + \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)\vec{a} \right)$ - 4-вектор ускорения.

Аналог скалярного произведения $(A^4, B^4) = A_0 B_0 - \vec{A} \vec{B}$

«Скалярное» произведение 4-скорости и 4-ускорения = 0

Преобразование

скорости

Пусть в старой СО скорость $(u_{\parallel}, u_{\perp})$, в новой $(w_{\parallel}, w_{\perp})$, а скорость перехода $(v, 0)$.

$$\frac{c}{\sqrt{1 - \frac{w^2}{c^2}}} = \frac{c - \frac{v u_{\parallel}}{c}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \frac{w_{\parallel}}{\sqrt{1 - \frac{w^2}{c^2}}} = \frac{u_{\parallel} - v}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \frac{w_{\perp}}{\sqrt{1 - \frac{w^2}{c^2}}} = \frac{u_{\perp}}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

Если скорости параллельны, то $w = \frac{u-v}{1 - \frac{uv}{c^2}}$. Если скорости перпендикулярны ($u_{\parallel} = 0$),

то $w^2 = u^2 + v^2 - u^2 v^2 / c^2$. Видно, что теорема Пифагора здесь не выполняется.

Движение с постоянным собственным

ускорением

В этой заметке из Л-Л рассматривается движение вдоль оси x с постоянным собственным ускорением обозначим w .

$$v = \frac{wt}{\sqrt{1 + \frac{w^2 t^2}{c^2}}}$$

$$x = \frac{c^2}{w} \left(\sqrt{1 + \frac{w^2 t^2}{c^2}} - 1 \right).$$

При $wt \ll c$ эти формулы переходят в классические выражения $v = wt$, $x = wt^2/2$. При $wt \rightarrow \infty$ скорость стремится к постоянному значению c .

Собственное время равноускоренно движущейся частицы дается интегралом

$$\int_0^t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} dt = \frac{c}{w} \operatorname{Arsh} \frac{wt}{c}.$$

где $\operatorname{Arsh}(x) = \ln(x + \sqrt{x^2 + 1})$

При $t \rightarrow \infty$ оно растет по значительно более медленному чем t закону $\frac{c}{w} \ln \frac{2wt}{c}$

Л.-Л. –
знаменитый
курс
теоретической
физики
Ландау и
Лифшица

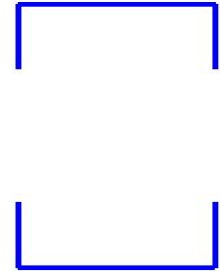
Парадокс шеста и сарая

$\theta = 0$.

В системе сарая



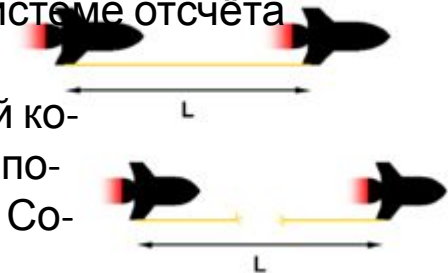
В системе шеста



Теория относительности запрещает существование твёрдых тел

Парадокс Белла

Один из известных и самых нелепых [релятивистских парадоксов специальной теории относительно-сти](#). В наиболее известном варианте самого Белла^[1] парадокс возникает при рассмотрении [мысленно-го эксперимента](#), включающего в себя два ускоряющихся в одном и том же направлении космических корабля и соединяющую их натянутую до предела струну (один корабль летит строго впереди другого, т. е. ускорение направлено вдоль струны). Если корабли начнут синхронно ускоряться, то в сопутствующей кораблям системе отсчёта расстояние между ними начнёт увеличиваться и *струна разорвётся*. С другой стороны, в системе отсчёта, в которой корабли сначала покоились, расстояние между ними не увеличивается, и поэтому *струна разорваться не должна*. Какая точка зрения правильная? Согласно теории относительности, первая — разрыв струны.



Парадокс близнецов



Рис. 1. Парадокс близнецов с точки зрения инерциальной системы отсчёта, связанной с Землёй

Ключ к разгадке – выражение для собственного

времени $d\tau = dt \sqrt{1 - v^2/c^2}$



Рис. 2. Парадокс близнецов с точки зрения инерциальной системы отсчёта, на первой половине пути совпадающей с удаляющимся кораблём

Эксперимент Хафеле — Китинга — один из тестов [теории относительности](#).

Непосредственно продемонстрировал реальность [парадокса близнецов](#) — предсказываемого теорией относительности замедления времени для движущихся объектов, а также [гравитационное замедление времени](#).

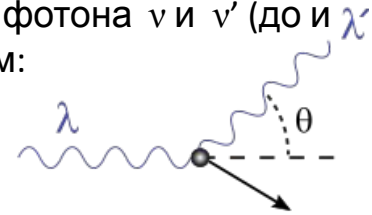
В октябре [1971 года](#) Дж. Хафеле (J. C. Hafele) и Ричард Китинг (Richard E. Keating) дважды облетели вокруг света, сначала на восток, затем на запад, с четырьмя комплектами

Эффект Комптона



При рассеянии [фотона](#) на свободном [электроне](#) частоты фотона ν и ν' (до и после рассеяния соответственно) связаны соотношением:

$$\nu' = \frac{\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$



Перейдя к длинам волн (λ_k - [КОМПТОНОВСКАЯ ДЛИНА ВОЛНЫ](#) электрона) :

$$\lambda' - \lambda = \lambda_k (1 - \cos \theta), \quad \text{где } \lambda_k = \frac{h}{m_e c} = 2,4263 \cdot 10^{-12} \text{ м}$$

Уменьшение энергии фотона в результате комптоновского рассеяния называется **КОМПТОНОВСКИМ СДВИГОМ**. Объяснение эффекта Комптона в рамках [классической электродинамики](#) невозможно, так как рассеяние электромагнитной волны на заряде ([ТОМСОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ](#)) не меняет её частоты.

Эффект Комптона является одним из доказательств

справедливости [корпускулярно-волнового дуализма](#) микрочастицы. **Обратный эффект Комптона**. Эффектом, обратным эффекту Комптона, является увеличение частоты света, претерпевающего рассеяние

на релятивистских электронах, имеющих энергию выше, чем энергия фотонов. То есть в процессе такого взаимодействия происходит передачи энергии от электрона фотону.

$$\varepsilon_1 = \frac{4}{3} \varepsilon_0 \frac{K}{m_e c^2}$$

Энергия рассеянных фотонов определяется выражением:

где ε_1 и ε_0 — энергия рассеянного и падающего фотонов соответственно, K — [кинети-ческая энергия](#) электрона. Обратный эффект Комптона ответственен

за [рентгеновс-кое излучение](#) галактических источников, рентгеновскую составляющую [реликтового фонового излучения](#) ([эффект Сюняева — Зельдовича](#)), трансформацию [плазменных волн](#) в высокочастотные [электромагнитные волны](#).

Эффекты, предсказанные ОТО

- Гравитационное отклонение света в ускоренной системе отсчёта. В частности, эффект гравитационного линзирования возникает тогда, когда между наблюдателем и источником света находится массивный объект. В результате этот объект чем-то напоминает линзу, гравитация которой изменяет направление распространения электромагнитной волны. Самый известный пример — [Крест Эйнштейна](#). Свет от квазара расщепляется и отклоняется расположенной ближе к нам галактикой, в результате чего мы видим не одно, а четыре изображения одной и той же звезды. Как луч фонарика, пропущенный через гранёный стакан с водой. Только преломление — не преломление, а гравитационное отклонение.
- Гравитационное красное смещение света. Частота света будет уменьшаться (то есть линии спектра будут смещаться к красному концу) при выходе из гравитационной ямы наружу (то есть при удалении света от чего-то очень тяжёлого). Это смещение было обнаружено в спектрах звёзд и Солнца и подтверждено в эксперименте.
- Геодезическая прецессия. Эффект состоит в том, что ось вращающегося тела (планеты) сама вращается и не потому, что действуют там какие-то силы. Просто потому, что время-пространство у нас кривое. Впрочем, прецессия планет была известна еще при Кеплере, и объяснялась именно воздействием внешних сил, меняющих направление момента импульса. Только пока её абсолютная величина рассчитывалась по Ньютоновской модели, результаты не очень-то хотели сходиться с реально наблюдаемой картиной, хотя в целом давали довольно похожий результат. Формулы же ОТО в пределах точности измерений полностью совпали с наблюдениями.
- Прецессия перигелия планетных орбит. На картинке чёрная точка — Солнце. Эллипсы — орбита планеты. Величину прецессии на бумаге вывел Эйнштейн, что потом совпало с наблюдаемой прецессией перигелия у Меркурия. «Аномальная прецессия перигелия Меркурия» — одна из «мелких» задач конца XIX, мешавшая построить полностью готовое здание физики.
- Предсказано существование гравитационных волн. До определённого момента были только косвенные доказательства из надёжных наблюдений за двойными звёздами и двойными пульсарами, такими как [PSR B1913+16](#) или [PSR J0737-3039](#). Но 11 февраля 2016 года мегамозги из [LIGO](#) объявили о первом прямом наблюдении гравитационных волн, за что уже в 2017-м им дали Нобелевскую премию.
- Гравитационная задержка сигнала (эффект Шапиро). Из-за этого эффекта в поле тяготения электромагнитные сигналы идут дольше, чем в отсутствие этого поля. Эффект подтверждён.