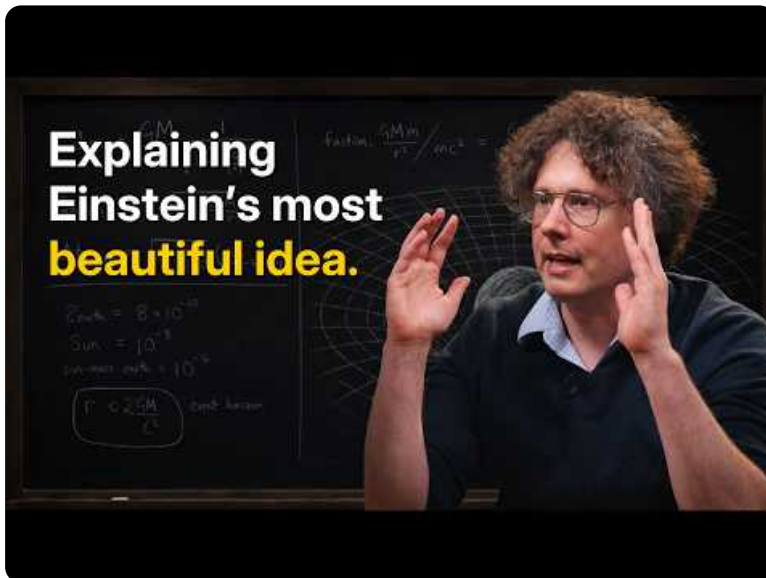


# General relativity from first principles - Adam Brown

Dwarkesh Patel · 2026-07-10 · <https://www.youtube.com/watch?v=QbdbAhaJoCQ>



Адам Браун (руководитель BlueShift в Google DeepMind, в прошлом физик из Стэнфорда) и Дваркеш Патель разбирают суть Общей теории относительности (ОТО) Эйнштейна. Главная мысль выпуска: гравитация — это не классическая сила притяжения, а фиктивная сила, возникающая из-за искривления пространства-времени, и понимание этого факта позволяет объяснить всё — от падения яблока до устройства чёрных дыр и эволюции Вселенной.

## От Ньютона к Эйнштейну: проблема гравитации

**Специальная теория относительности не применима к гравитации 00:31:**

Созданная Эйнштейном в 1905 году Специальная теория относительности (СТО) базируется на принципе: ничто не может двигаться быстрее скорости света. СТО отлично описывает электромагнетизм, а также сильное и слабое ядерные взаимодействия, но не работает с гравитацией. Общая теория относительности (ОТО), завершенная в 1915 году, расширяет этот принцип до максимума: быстрее света не может распространяться даже сама гравитация.

**Закон всемирного тяготения Ньютона противоречит пределу скорости**

**света 04:13:** Второй закон Ньютона ( $F=ma$ ) и Первый закон (движение по прямой при отсутствии сил) сохраняют свою концептуальную актуальность в ОТО при правильной трактовке. Однако закон тяготения Ньютона ( $F = G \cdot m_1 \cdot m_2 / r^2$ ) подразумевает мгновенное дальное действие. Если сдвинуть Солнце, формула Ньютона говорит, что сила притяжения на Земле изменится мгновенно, а не

через 8 минут, что нарушает фундаментальный запрет на сверхсветовую передачу информации.

### **Гравитацию нельзя было исправить по аналогии с электромагнетизмом**

**08:09:** Закон Кулона для электростатики тоже выглядел как мгновенное дальноедействие, но уравнения Максвелла исправили это, добавив магнетизм и релятивистскую инвариантность (лоренцеву симметрию). Применить тот же математический трюк к гравитации невозможно из-за разницы знаков. Одноименные заряды отталкиваются, а массы — притягиваются. Прямое копирование уравнений Максвелла привело бы к тому, что массы начали бы отталкиваться (на фундаментальном уровне это связано с тем, что фотон имеет спин 1, а гравитон — спин 2).

### **Принцип эквивалентности и гравитация как инерциальная сила**

#### **Равенство инертной и гравитационной масс — главная подсказка**

**Эйнштейна 12:38:** В физике Ньютона масса играет две совершенно разные роли. В формуле  $F=ma$  это «инертная масса», сопротивляющаяся ускорению. В законе тяготения это «гравитационная масса», определяющая силу притяжения. В электромагнетизме заряд и масса никак не связаны (тяжелый нейтрон не имеет заряда, легкий электрон заряжен). Но в гравитации инертная и гравитационная массы равны. Именно поэтому перо и кирпич в вакууме падают с одинаковым ускорением: большая сила притяжения кирпича точно компенсируется его большим сопротивлением ускорению. Сегодня это равенство подтверждено с точностью до 1 части на  $10^{15}$ .

**Фактчек: Равенство инертной и гравитационной масс подтверждено до 1 части на  $10^{15}$**  — □: Все три рецензента сходятся: спутник MICROSCOPE (финальные результаты 2022) дал именно такой предел на параметр Этвёша для тел из титана и платины. Оговорка GPT: это подтверждение в пределах чувствительности, а не доказательство абсолютного равенства.

#### **Фиктивные (инерциальные) силы всегда пропорциональны инертной**

**массе 16:36:** Если раскрутить ведро с водой, вода не выливается даже в верхней точке из-за центробежной силы. Центробежная сила — это фиктивная (инерциальная) сила, возникающая из-за нахождения в неинерциальной (вращающейся) системе отсчета. «Зарядом» для любой инерциальной силы всегда выступает именно инертная масса объекта, так как сама сила возникает из-за стремления массы двигаться по прямой.

**Гравитация является инерциальной силой 20:26:** Опираясь на то, что гравитационный заряд равен инертной массе, Эйнштейн в 1907 году выдвинул свою «самую красивую мысль»: гравитация — это не фундаментальное силовое поле, а инерциальная сила. Это объясняет равенство масс не как случайное совпадение, а как фундаментальную необходимость.

## Искривление пространства-времени

**ОТО требует пересмотра понятия прямой линии 23:15:** Инерциальные силы ощущаются только тогда, когда объект отклоняется от прямолинейного движения. Если гравитация — это инерциальная сила, значит, человек, неподвижно сидящий в кресле и чувствующий вес, на самом деле движется не по прямой. Напротив, подброшенный кусок мела, находящийся в свободном падении (описывающий параболу), движется по абсолютно прямой линии в пространстве-времени.

**Иллюзия кривизны возникает из-за попытки наложить траекторию на плоскую сетку 25:46:** На плоской карте Земли кратчайший маршрут от Сан-Франциско до Лондона выглядит как изогнутая дуга, задевающая Гренландию. Прямая линия на плоской карте не является кратчайшим путем в реальности. Ошибочное восприятие возникает из-за попытки спроецировать искривленную поверхность на плоскую. Точно так же парабола брошенного мела кажется кривой только потому, что мы пытаемся воспринимать искривленное пространство-время как плоское.

**Материя указывает пространству, как искривляться 28:37:** В 1915 году Эйнштейн вывел финальное уравнение ОТО. В левой части уравнения находится тензор, описывающий геометрию и кривизну пространства-времени. В правой части — тензор энергии-импульса (масса, энергия, давление). Суть уравнения сводится к правилу: материя говорит пространству-времени, как искривляться, а искривленное пространство-время говорит материи, как двигаться (по прямым линиям в этой кривой геометрии).

## Чёрные дыры и предел извлечения энергии

**Концепция черной дыры вытекает из предела скорости света 31:37:** Карл Шварцшильд, вычисляя артиллерийские траектории во время Первой мировой войны, нашел точное решение уравнений Эйнштейна для точечной массы. Еще в 18 веке физики (Мичелл, Лаплас) понимали, что если объект достаточно массивен и компактен, его вторая космическая скорость (скорость убегания) превысит скорость света. Критический радиус такого объекта равен  $2GM/c^2$ .

**Ньютоновская физика допускает извлечение более 100% энергии покоя 36:22:** Если медленно опускать кирпич массы  $m$  на веревке к массивной планете, можно извлекать энергию ( $G \cdot M \cdot m / r$ ). На поверхности Земли эта извлеченная энергия составляет ничтожную долю от энергии покоя кирпича ( $mc^2$ ) — около  $7 \times 10^{-10}$ . Это совпадает с эффективностью химического ракетного топлива ( $1.5 \times 10^{-10}$ ), где энергия связи ничтожна по сравнению с массой нуклонов. На поверхности Солнца доля извлеченной энергии достигает  $2 \times 10^{-6}$ . Но если

радиус объекта меньше  $GM/c^2$ , ньютоновская формула показывает, что при опускании кирпича можно извлечь энергию, превышающую его собственную массу ( $mc^2$ ), что абсурдно.

**Фактчек: Химия  $\sim 10^{-10}$ , гравитация у Земли  $7 \times 10^{-10}$ , у Солнца  $2 \times 10^{-6}$ , ядро  $\sim 10^{-3}$  от  $mc^2$  —**  $\square$ : Числа сходятся с расчётами ( $GM/rc^2$  для Земли  $\approx 6.9 \times 10^{-10}$ , для Солнца  $\approx 2.1 \times 10^{-6}$ ; водород+кислород  $\approx 1.5 \times 10^{-10}$ ; синтез  $\approx 0.7\%$ ). GPT добавляет: формулировка «массы нуклонов не затрагиваются» огрублена — они не являются принципиально неприкосновенным запасом.

**ОТО решает парадокс бесконечным усилением гравитации 44:41:** В электромагнетизме при сближении зарядов квантовые эффекты ослабляют силу притяжения. В ОТО происходит обратное: гравитация становится сильнее, чем предсказывает Ньютон. На конечном расстоянии от центра (на горизонте событий) сила гравитации становится бесконечной, веревка неизбежно рвется, и кирпич падает внутрь, не позволяя извлечь энергии больше, чем  $mc^2$ .

[46:20-47:29] Рекламная вставка Crusoe AI.

## Три формулы метрики Шварцшильда

**Формула 1: Гравитационное поле и горизонт событий 47:29:** Чтобы оставаться неподвижным на расстоянии  $r$  от черной дыры, нужно ускорение, которое в ОТО умножается на поправочный коэффициент  $1/\sqrt{1 - 2GM/(c^2 r)}$ . При  $r = 2GM/c^2$  (горизонт событий) требуемое ускорение уходит в бесконечность. Вращение по орбите не спасает вблизи черной дыры: на расстоянии ближе  $3GM/c^2$  кинетическая энергия орбитального движения сама начинает создавать дополнительное гравитационное притяжение, которое перевешивает центробежную силу. Внутри  $3GM/c^2$  стабильных орбит не существует.

**Фактчек: Внутри  $3GM/c^2$  не существует стабильных орбит** —  $\triangle$ : Единодушно неточно. Последняя устойчивая круговая орбита (ISCO) у невращающейся дыры — на  $6GM/c^2$ ; между 3 и 6  $GM/c^2$  круговые орбиты есть, но неустойчивые;  $3GM/c^2$  — фотонная сфера, внутри неё круговых орбит нет вообще. GPT также считает объяснение через «кинетическая энергия сама притягивает» некорректным.

**Фактчек: Гравитация у горизонта становится бесконечной** —  $\triangle$ : Расходится ускорение, необходимое для зависания на месте, а не кривизна: свободно падающий наблюдатель на горизонте никакой бесконечной силы не встречает. Приливные эффекты при этом физически реальны и свободным падением не устраняются.

**Формула 2: Гравитационное замедление времени 55:27:** Время для наблюдателя, висящего вблизи черной дыры, течет медленнее по сравнению с удаленным наблюдателем на тот же фактор  $\sqrt{1 - 2GM/(c^2 r)}$ . В отличие от СТО, где замедление времени симметрично, здесь эффект абсолютен: удаленный наблюдатель видит, что человек у черной дыры движется в замедленной съемке, а человек у дыры видит, что удаленная Вселенная живет в ускоренной

перемотке. Этот эффект (гравитационное красное смещение) требует постоянной корректировки часов на спутниках GPS.

**Формула 3: Черная дыра как идеальная электростанция 1:02:41:** Энергия объекта массы  $m$ , находящегося глубоко в гравитационном колодце, оценивается удаленным наблюдателем не как  $mc^2$ , а как  $mc^2 \cdot \sqrt{1 - 2GM/(c^2 r)}$ . Разница — это энергия, которую можно извлечь, опуская объект к черной дыре. Если опустить кирпич ровно до горизонта событий (где корень равен нулю), извлеченная энергия составит ровно 100% от  $mc^2$ . Для сравнения: химическое горение извлекает  $\sim 10^{-10}$  массы, ядерный распад/синтез —  $\sim 10^{-3}$ , так как они не затрагивают массу самих протонов и нейтронов. Гравитация позволяет конвертировать массу в энергию со 100% эффективностью.

**Фактчек: Чёрная дыра как электростанция со 100% КПД** —  $\Delta$ : Формула  $mc^2 \cdot \sqrt{1 - 2GM/c^2 r}$  верна, но 100% — идеализированный предел с бесконечно прочной верёвкой и невозможным зависанием ровно на горизонте (Claude:  $\square$  с оговоркой, GPT:  $\Delta$ ). Реальная аккреция даёт  $\sim 6\%$  для дыры Шварцшильда и до  $\sim 42\%$  для быстро вращающейся дыры Керра — всё равно на 1-2 порядка выше ядерных реакций.

**Квантовая гравитация уничтожает барионное число 1:11:07:** В классической ОТО упавшие протоны и нейтроны просто продолжают существовать внутри черной дыры. Но с учетом квантовой механики (излучение Хокинга) черная дыра со временем испаряется, излучая фотоны и гравитоны. Исходные протоны и нейтроны исчезают навсегда, что нарушает закон сохранения числа нуклонов — глобальную симметрию, которую уважают все остальные фундаментальные силы.

**Фактчек: Барионное число уважают все остальные фундаментальные силы** —  $\square$ : В Стандартной модели барионное число нарушается электрослабыми сфалеронами (сохраняется только  $B-L$ ), хотя при обычных условиях процесс крайне подавлен. Разрушение глобальных симметрий квантовой гравитацией — общепринятое ожидание, но не доказанная теорема (Claude ставит  $\Delta$ , GPT —  $\square$ ). Излучение Хокинга тоже не сводится к фотонам и гравитонам — состав зависит от температуры дыры.

[1:12:41-1:13:44] Рекламная вставка Cursor.

## Падение в чёрную дыру и доказательства их существования

**Удаленный наблюдатель никогда не увидит пересечение горизонта событий 1:13:44:** Если смотреть на падающего в черную дыру человека издали, сначала он будет ускоряться, но затем начнет замедляться из-за гравитационного замедления времени. Свет от него будет испытывать всё большее красное смещение, длина волны растянется, и объект просто плавно потускнеет и исчезнет. С точки зрения внешней Вселенной, объект бесконечно долго приближается к горизонту, но никогда его не пересекает.

## Для падающего человека горизонт событий незаметен 1:16:20: В

собственной системе отсчета падающего время течет нормально. Он пересекает горизонт событий, не замечая ничего особенного. Приливные силы (спагеттификация) разорвут человека на горизонте событий черной дыры звездной массы, но для сверхмассивных черных дыр (размером с галактику) приливные силы на горизонте ничтожны. Человек может прожить всю жизнь внутри гигантской черной дыры, пока не достигнет сингулярности в центре ( $r=0$ ), где гравитация становится бесконечной и наступает неминуемая смерть.

**Фактчек: Внутри сверхмассивной чёрной дыры можно прожить всю жизнь —** □:

Максимальное собственное время от горизонта до сингулярности  $\sim \pi GM/c^3$ : около минуты для Стрельца А\*,  $\sim 1.8$  суток для  $10^{10} M_\odot$ ,  $\sim 2$  недели для самых тяжёлых известных дыр ( $\sim 10^{11} M_\odot$ ). Для человеческой жизни нужна масса  $\sim 10^{14} M_\odot$  — таких объектов нет; горизонты «размером с галактику» тоже не существуют (радиус TON 618 — порядка 1000 а.е.). Верна только часть про ничтожные приливные силы на горизонте. Claude оценивает как преувеличение, GPT — как ошибку.

## Существование черных дыр доказано множеством независимых методов

**1:19:00:** Роджер Пенроуз математически доказал, что формирование черных дыр — это неизбежное следствие ОТО при коллапсе звезд, а не математический артефакт. Эмпирические доказательства включают: 1) Наблюдение за звездами в центре Млечного Пути, которые вращаются вокруг невидимого, сверхмассивного (миллионы масс Солнца) и сверхкомпактного объекта (Стрелец А\*). 2) Детекторы LIGO зафиксировали рябь пространства-времени от столкновения двух черных дыр (по 30 масс Солнца) на расстоянии 1.6 млрд световых лет. 3) Телескоп Горизонта Событий (ЕНТ) получил радиоизображения материи, падающей в черные дыры.

**Фактчек: LIGO: слияние дыр по 30  $M_\odot$  на расстоянии 1.6 млрд световых лет —**

△: GW150914 — массы  $\sim 36$  и  $29 M_\odot$ , расстояние  $\sim 410$  Мпк  $\approx 1.3$  млрд св. лет с погрешностью  $\pm 0.5$ ; 1.6 — на краю интервала.

## Триумф ОТО и будущее физики с ИИ

### Экспедиция 1919 года сделала Эйнштейна мировой знаменитостью

**1:24:28:** ОТО идеально объяснила аномалию орбиты Меркурия, но настоящим триумфом стало предсказание нового эффекта — отклонения света звезд гравитацией Солнца. ОТО предсказывала угол отклонения ровно в два раза больше, чем ньютоновская физика. Ранние экспедиции (1911, 1914) сорвались из-за погоды и начала Первой мировой войны, что спасло Эйнштейна, так как его первоначальные расчеты были ошибочными и совпадали с ньютоновскими. В 1919 году британская экспедиция Артура Эддингтона во время солнечного затмения подтвердила удвоенное отклонение света, доказав правоту ОТО.

**Фактчек: История 1911-1919: ошибка Эйнштейна и сорвавшиеся экспедиции —**

△: Суть верна — расчёт 1911 года давал  $0.87''$  (ньютоновское значение), исправлен до

1.75" в 1915, экспедиция 1914 в Крым сорвалась из-за интернирования Фрейндлиха. Мелкая неточность: первая сорванная экспедиция была в 1912 году (Аргентина/Бразилия, дождь), а не в 1911.

**ОТО — уникальный пример теории, созданной чистым разумом 1:29:20:** В отличие от большинства физических теорий, требующих огромного количества экспериментальных данных, ОТО была создана Эйнштейном почти исключительно путем мысленных экспериментов, опираясь лишь на конечность скорости света и принцип эквивалентности. Теория струн сегодня пытается повторить этот успех, пытаясь объединить ОТО и квантовую механику через математическую непротиворечивость, так как для экспериментальной проверки потребовались бы коллайдеры размером с галактику.

**Фактчек: ИИ доказал проблему Эрдёша, предложив понятные людям концепции** — □: Рецензенты расходятся. Gemini подтверждает (ссылаясь на решение нескольких задач Эрдёша моделями OpenAI и DeepMind), Claude указывает, что часть громких заявлений оказалась поиском уже опубликованных результатов, GPT — что без номера задачи проверить нельзя. Даты в ревью тоже не совпадают (Gemini — май 2026, Claude — конец 2025). Прогноз «ИИ станет сверхчеловеческим объяснителем» — экстраполяция из одного-двух кейсов.

**ИИ не превратит математику в нечитаемый код 1:35:27:** Существует опасение, что ИИ-модели будут выдавать доказательства теорем в виде миллиардов строк нечитаемого кода на Lean, давая результат без человеческого понимания. Однако Адам Браун считает, что ИИ станет сверхчеловеческим «объяснителем». Недавнее доказательство проблемы Эрдёша с помощью ИИ показало обратное: машина предложила концепции, которые были настолько понятны людям, что математики смогли использовать их для доказательства новых теорем. ИИ обладает бесконечным терпением для проверки гипотез, от которых люди отказываются из-за ложных предубеждений.

## ЛИЧНО ДЛЯ ТЕБЯ

**Шкала эффективности энергии как якорь интуиции:** химия  $10^{-10}$ , ядро  $10^{-3}$ , гравитация — до единиц процентов реально (аккреция) и до 1 в идеальном пределе. Держи в голове при любых новостях про батареи и термояд: аккумулятор физически никогда не приблизится к ядерному топливу, а разговоры о «прорывах» в плотности энергии всегда упрутся в этот потолок.

**Эвристика Эйнштейна: подозрительное совпадение → искать тождество:** две «разные» массы совпали до  $10^{-15}$ , и вместо объяснения совпадения он объявил их одной сущностью — из этого выпала вся теория. При отладке чего угодно: если два независимых параметра упорно совпадают, скорее всего это один параметр.

**Проверяй условия достижения предела:** «100% КПД чёрной дыры» требует невозможного зависания на горизонте, «жизнь внутри дыры» — несуществующей массы  $10^{14}$  Солнц. Тот же вопрос задавай к AI-бенчмаркам и заявлениям о стоимости инференса: что именно измерено, при каких ресурсах, насколько реализуемы условия.

**От ИИ требуй объяснение, из которого воспроизводится результат:** тезис о «бесконечном терпении» модели проверять отброшенные гипотезы реалистичен, тезис о понятности её объяснений — пока желаемое. Практика: просить Claude/GPT/Gemini выписывать допущения, проверять размерности и предельные случаи — это и есть тест понятности, а заодно — хорошая ментальная модель самой ОТО (акселерометр на столе показывает  $1g$ , в свободном падении — ноль; кресло ускоряет тебя, а не Земля тянет).

## КОНСЕНСУС РЕЦЕНЗЕНТОВ

Все трое подтвердили MICROSCOPE ( $10^{-15}$ ), шкалу энергий и единодушно поправили границу орбит (ISCO на  $6GM/c^2$ , не 3). Разошлись по жёсткости оценок: Claude ставит  $\Delta$  там, где GPT —  $\square$  (барионное число, жизнь внутри дыры), а по проблеме Эрдёша полное расхождение — Gemini считает подтверждённым, Claude сомневается в качестве кейсов, GPT — в проверяемости вообще.