

Черные дыры

Удивительные объекты во
Вселенной

- **Путешествие в один конец:**

В черную дыру можно войти, но нельзя выйти. Даже свет не может выбраться оттуда

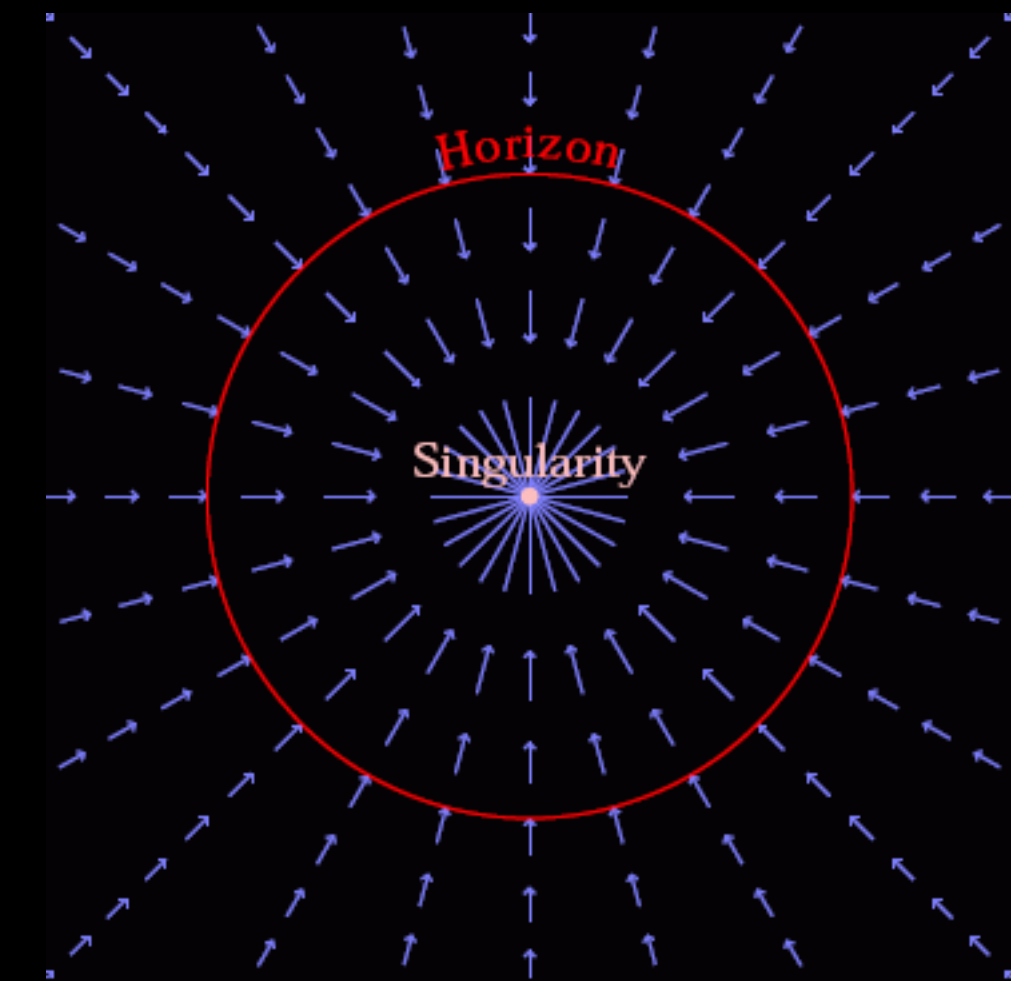
- **Замедление времени:**

Секунда у горизонта событий = годы вдали

- **Внутри ЧД:**

Пространство течет внутрь

Время вытягивает в спагетти



- **Инструкция по сборке Черной Дыры:**

упаковать массу M в шар с радиусом $r_s \simeq 3 \text{ км} \frac{M}{M_\odot}$

Масса Солнца: $\hookrightarrow 3 \text{ км}$

Масса Земли: $\hookrightarrow 9 \text{ мм}$

Масса человека: $\hookrightarrow 10^{-25} \text{ м}$

- **Черные дыры — невидимые соседи в галактике:**

100 миллионов ЧД (1/1000 от числа звезд) в «Млечном Пути»

- **Черные Дыры не вечны:**

Испаряются благодаря излучению Хокинга за время

$$t_{\text{исп}} \simeq 2 \cdot 10^{67} \text{ лет} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^3$$

Масса Солнца: $\hookrightarrow 2 \cdot 10^{67}$ лет

Масса 10^{11} кг: $\hookrightarrow 2.6$ миллиарда лет

Гипотетическая ЧД на БАК: $\hookrightarrow 10^{-85}$ секунды

Черные дыры

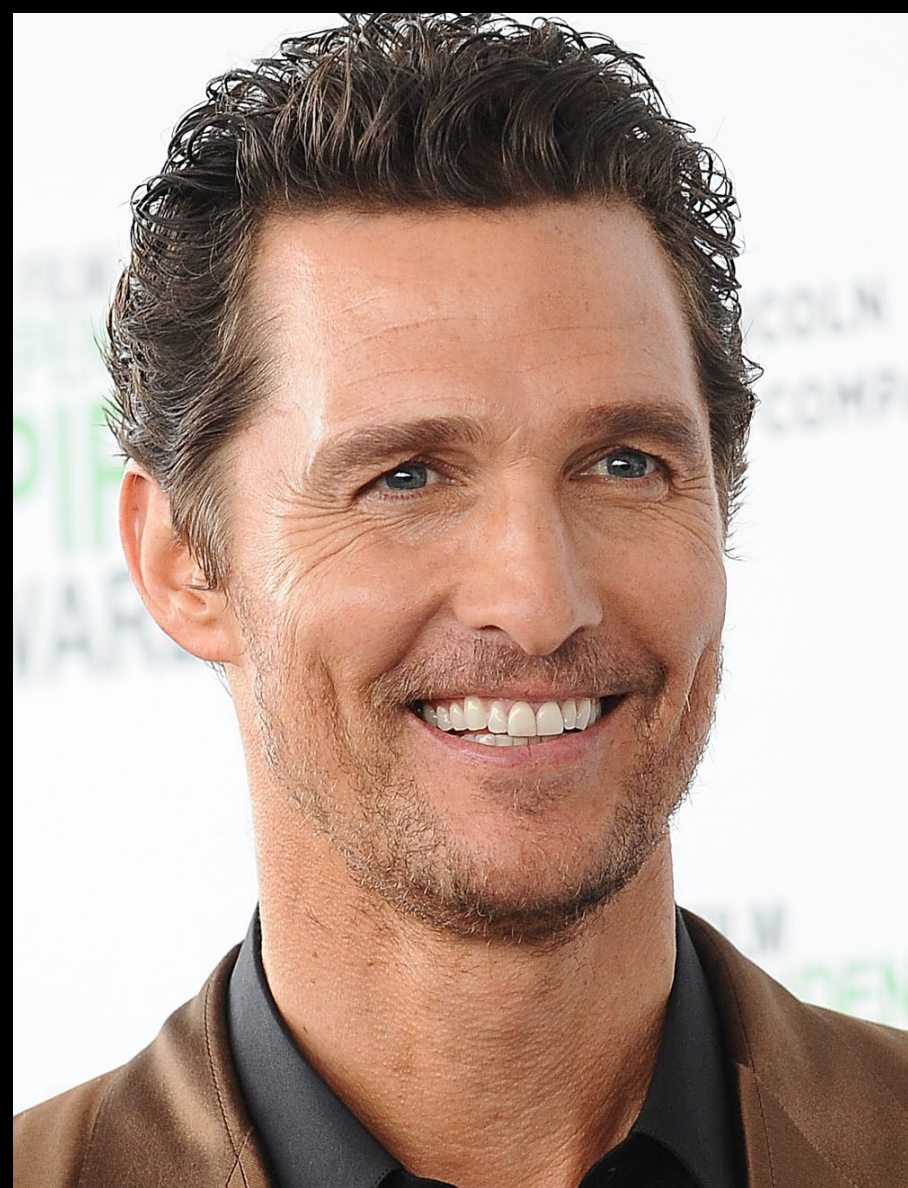
Удивительные объекты во Вселенной



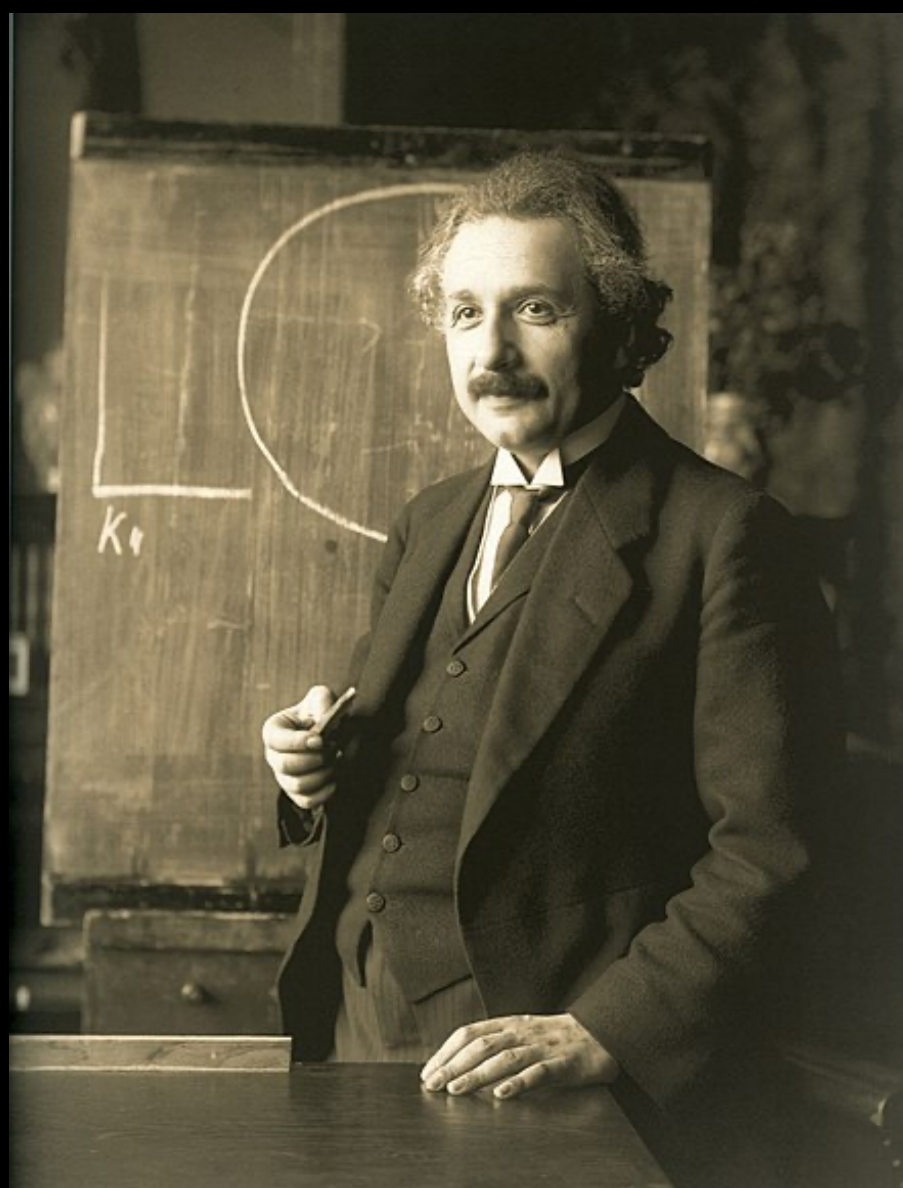
Image Credit: Roen Kelly/Discover

Дмитрий В.Наумов

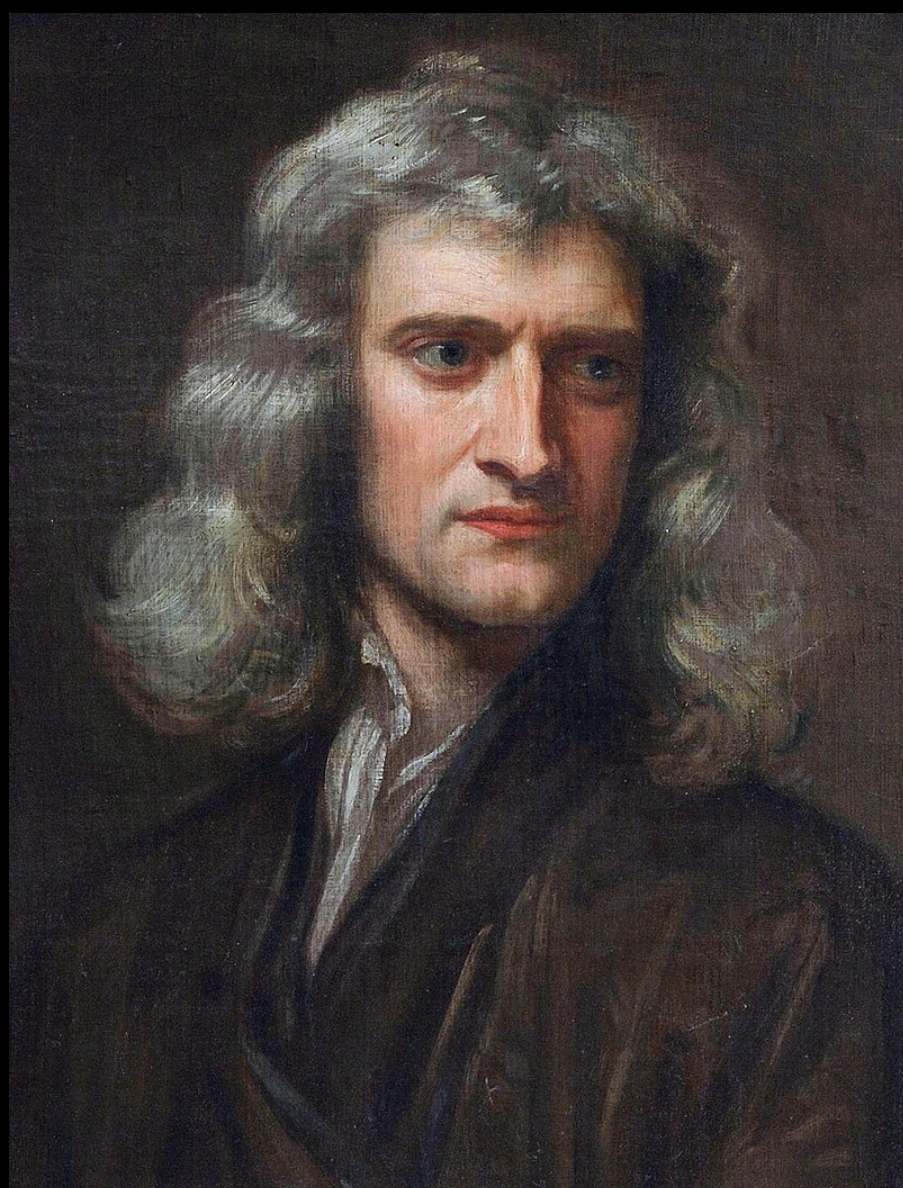
В главных ролях



Мэттью Макконахи — лаборант, инженер ОИЯИ (Дубна), американский актер.



Альберт Эйнштейн, научный консультант, специалист по искривлению пространства-времени



Исаак Ньютон — в роли учителя физики, отвечает за школьную гравитацию



Стивен Хокинг — научный консультант, теоретик горизонтов событий



Черный лебедь — положительный герой лекции.
Приносит благую весть из космоса



Макаронная фабрика «No Name» — за обеспечение спагеттификации в черной дыре



Дмитрий Наумов — в роли мойщика окон, следящего за ясностью экрана

I. Гравитация Ньютона

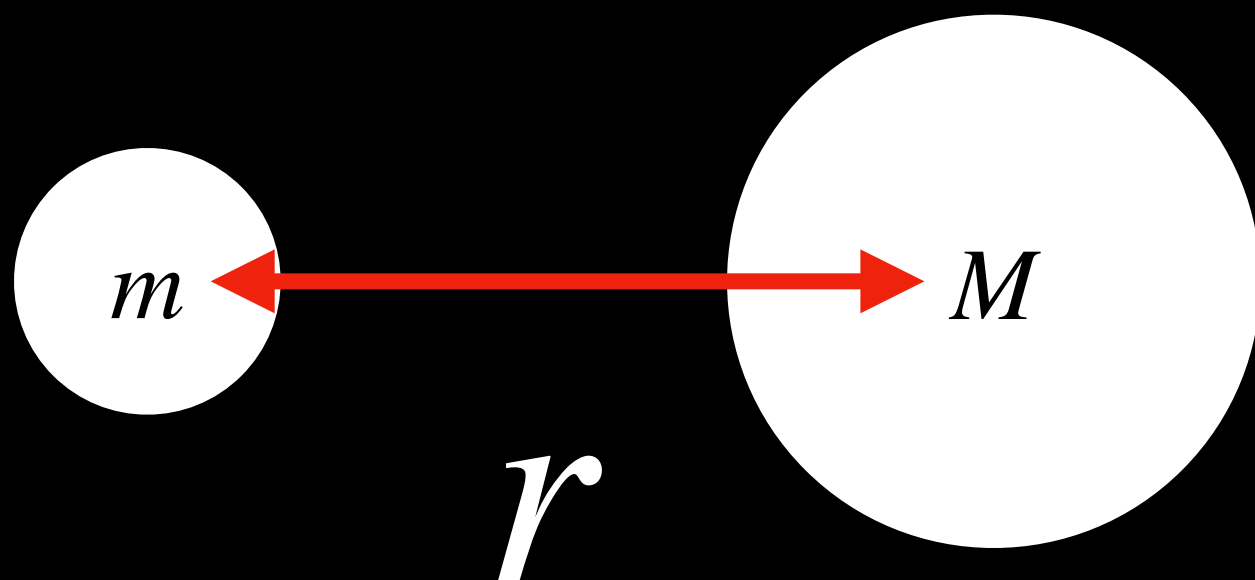


Сэр Исаак Ньютон (1643-1727)

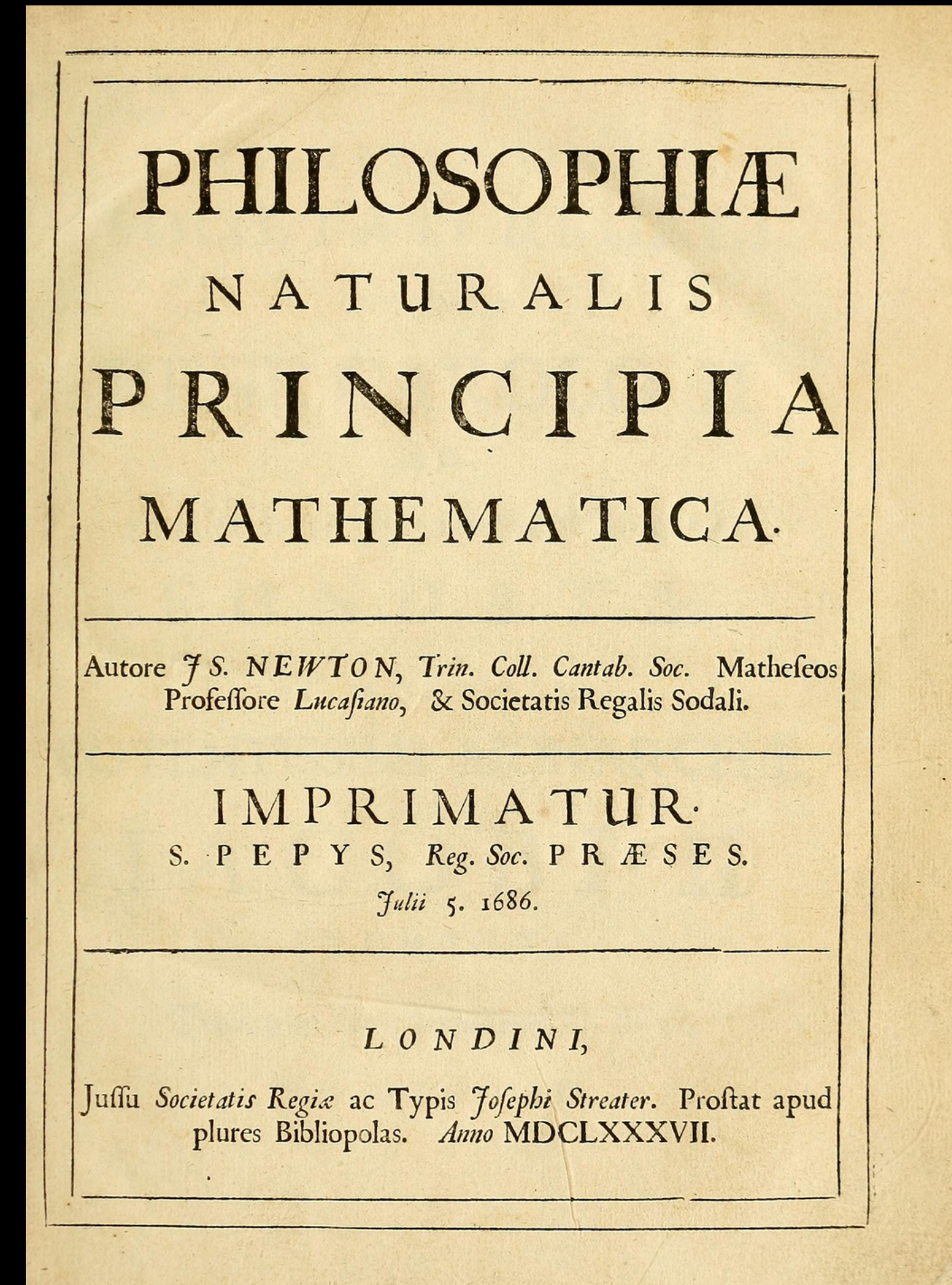
Ньютон. «Принципы»

- Не следует выдвигать больше причин для природных явлений, чем необходимо для их объяснения.
- Одинаковые явления имеют одинаковые причины.
- Свойства объектов общие для всех.
- Наблюдения считаются верными, пока не появится доказательство обратного

$$F = \frac{GmM}{r^2}$$



ДН. Текст адаптирован для современного слушателя



Принципы натуральной философии (1687)

Универсальная гравитация



Фантазия на тему. ДН + DALL-E

- эксцентричные орбиты комет,
- причина приливов и отливов
- прецессия земной оси,
- возмущение движения Луны под действием гравитации Солнца.
- Решены большинство известных проблем астрономии и физики Земли.
- Работы Галилея, Коперника и Кеплера объединены

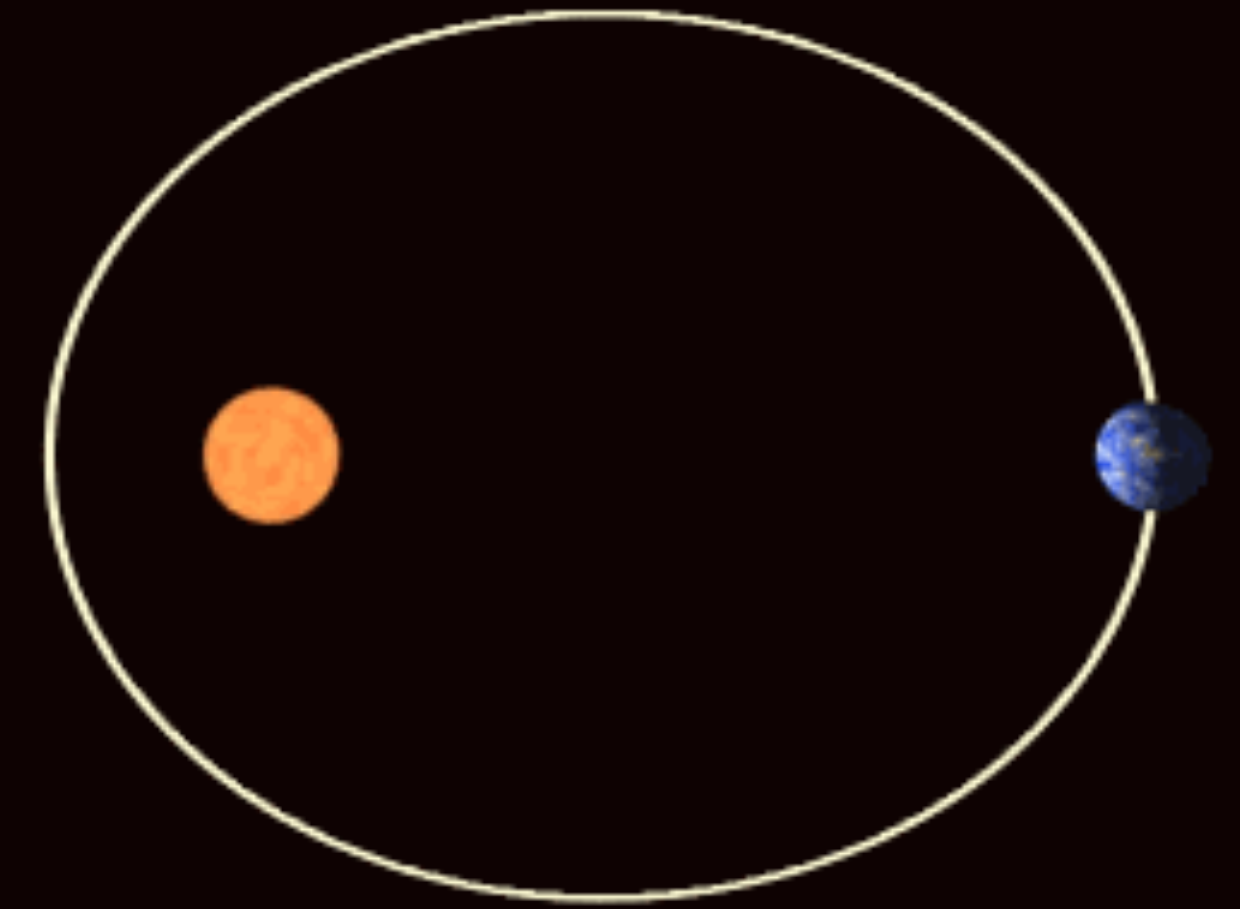
Первая идея черной дыры

- **Идея:** В 1784 году английский астроном и священник Джон Митчелл предложил идею объекта, для которого вторая космическая скорость превышает скорость света.
- **Вычисление:** Если радиус звезды с массой M меньше, чем
$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$
- **Невидимая звезда:** свет не сможет покинуть звезду.
- **Реакции ученых:**
 - **Восторг от идеи:** существования невидимых звезд
 - **Разочарование:** в начале XIX века стало понятно, что свет это волна. Как на волну действует гравитация было не понятно



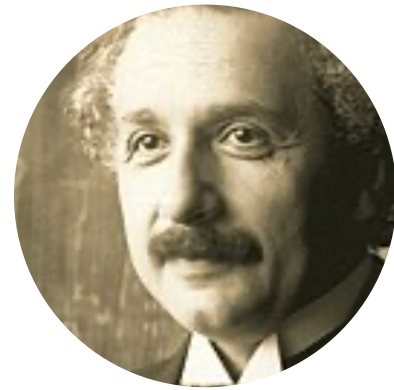
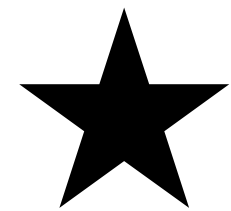
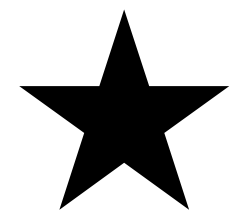
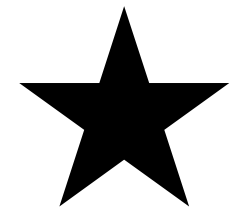
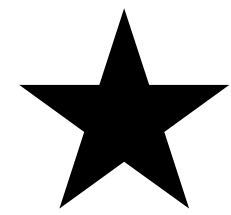
Что не так с теорией Ньютона?

- **Природа силы.** Как массивные тела действуют друг на друга на расстоянии?
- **Перигелий Меркурия.** Смещается быстрее, чем предсказывает теория Ньютона на 43 угловых секунд за столетие.
- **Отклонение света гравитацией.** В 1919 году во время солнечного затмения астрономы наблюдали отклонение света от звезд, проходящих рядом с Солнцем. Наблюдаемое отклонение было **вдвое** больше, чем предсказывала ньютоновская теория.



II. Гравитация Эйнштейна

Самая счастливая мысль
Эйнштейна



Внутренний монолог Эйнштейна

— Что он почувствует пока летит?

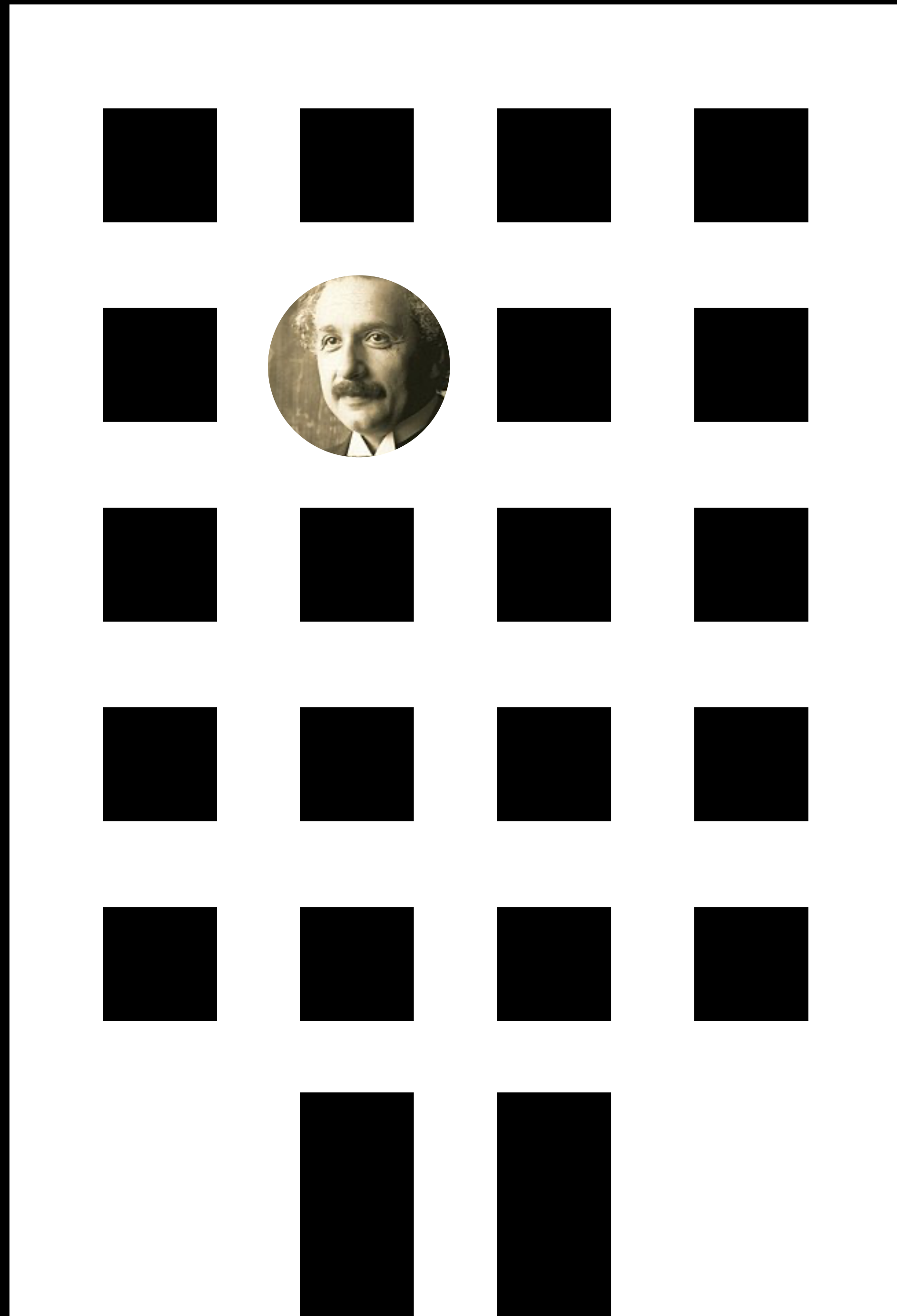
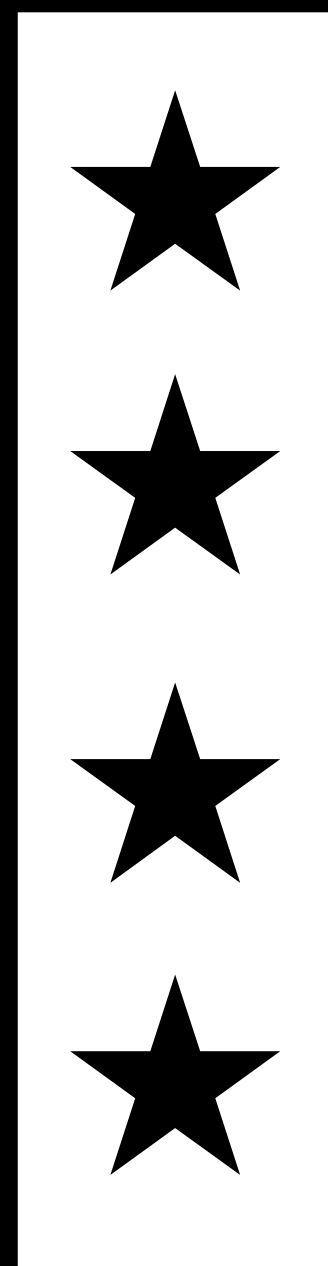
- 1 Сила притяжения к Земле $F_g = m_g g$ и сила инерции $F_i = m_i a$ равны:

$$m_i a = m_g g$$

- 2 Эксперименты указывают на то, что инерциальная и гравитационная массы равны: $m_g = m_i$

- 3 Значит, ускорения также равны: $a = g$

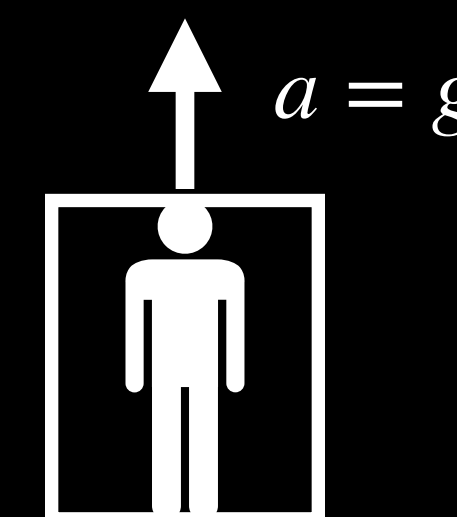
— Мойщик почувствует невесомость!



Принцип эквивалентности



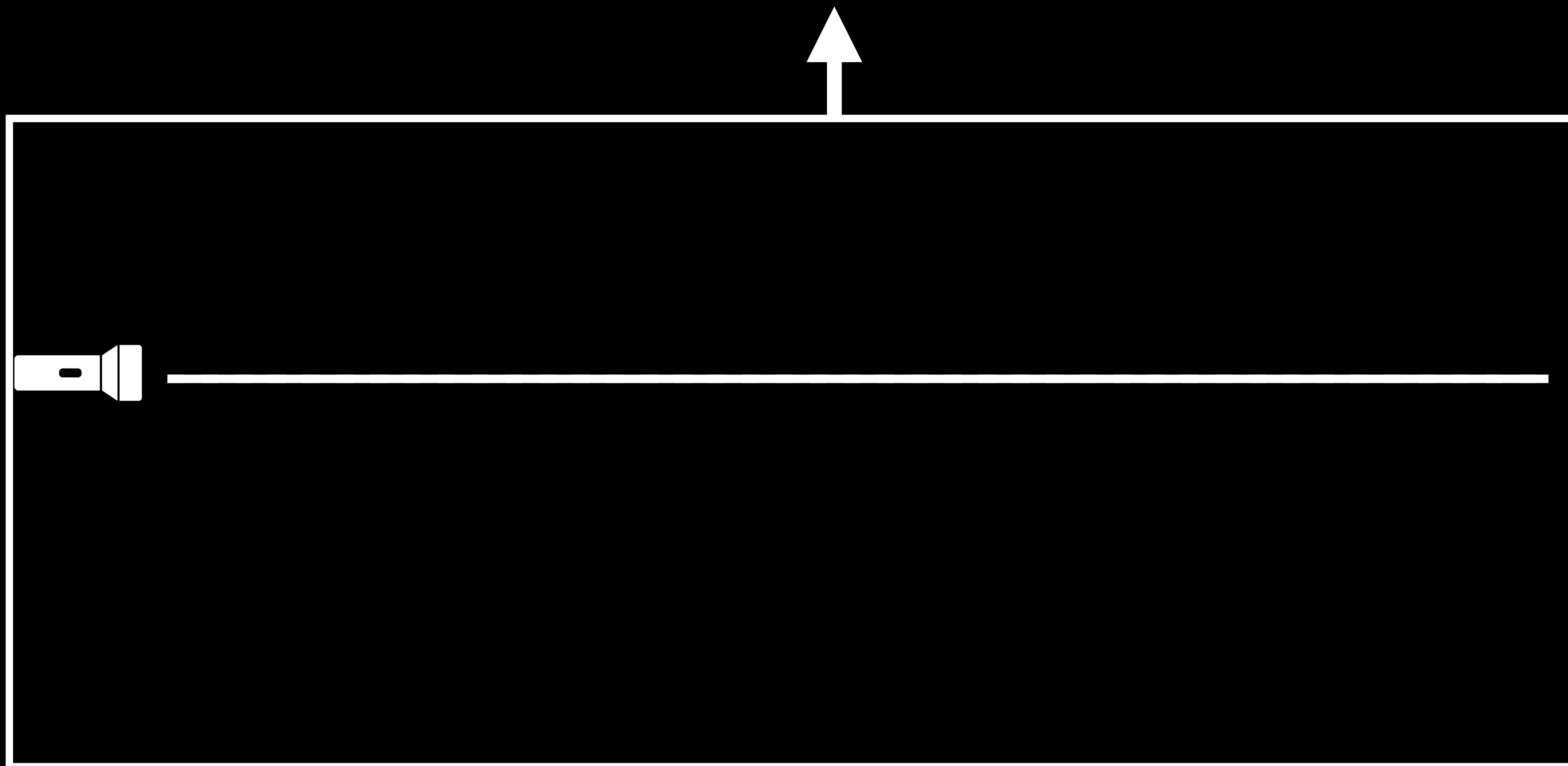
Локально невозможно отличить
гравитацию, притягивающую вниз
от ускорения вверх, если $a = g$



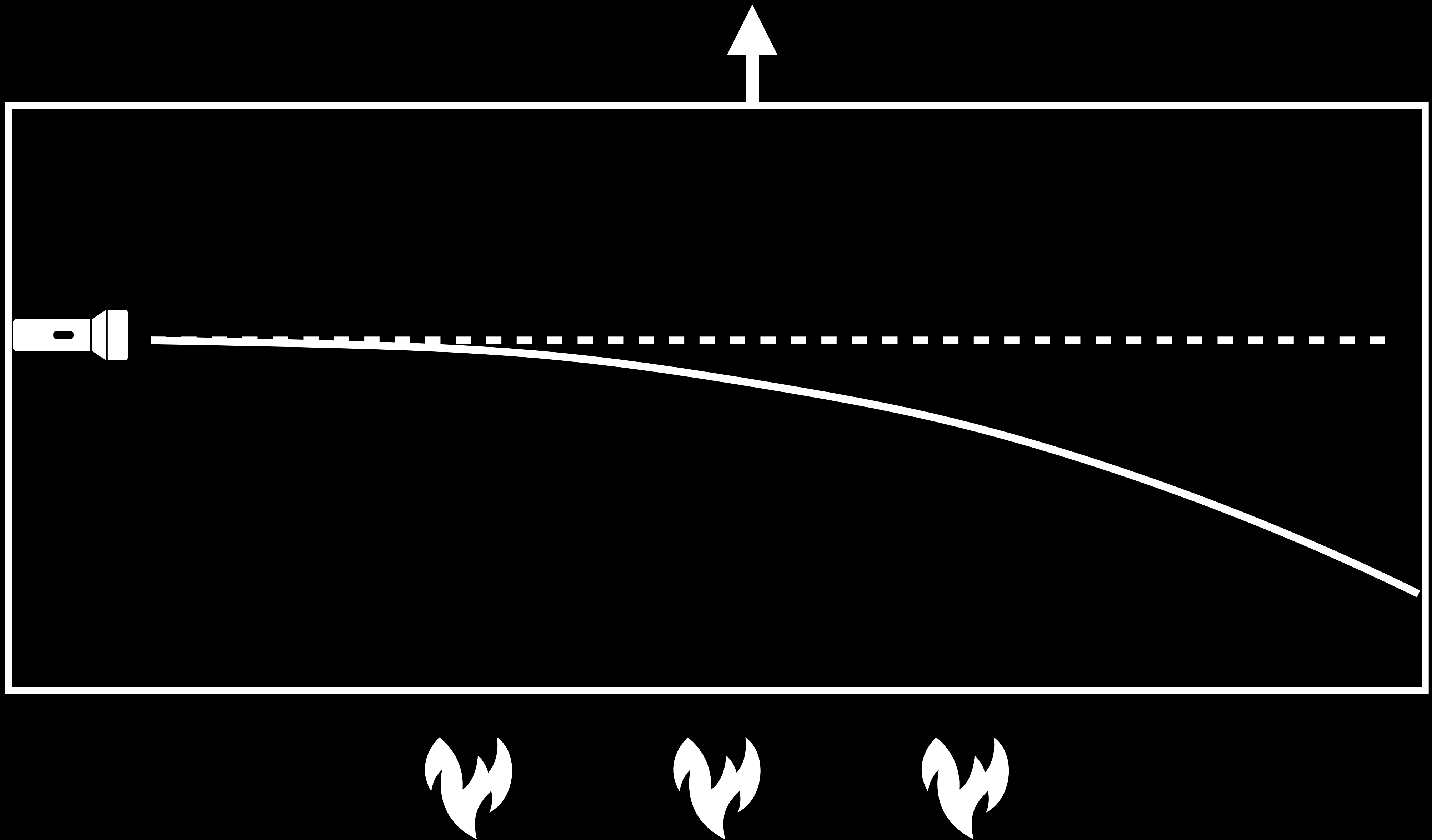
Свет в покоящемся лифте



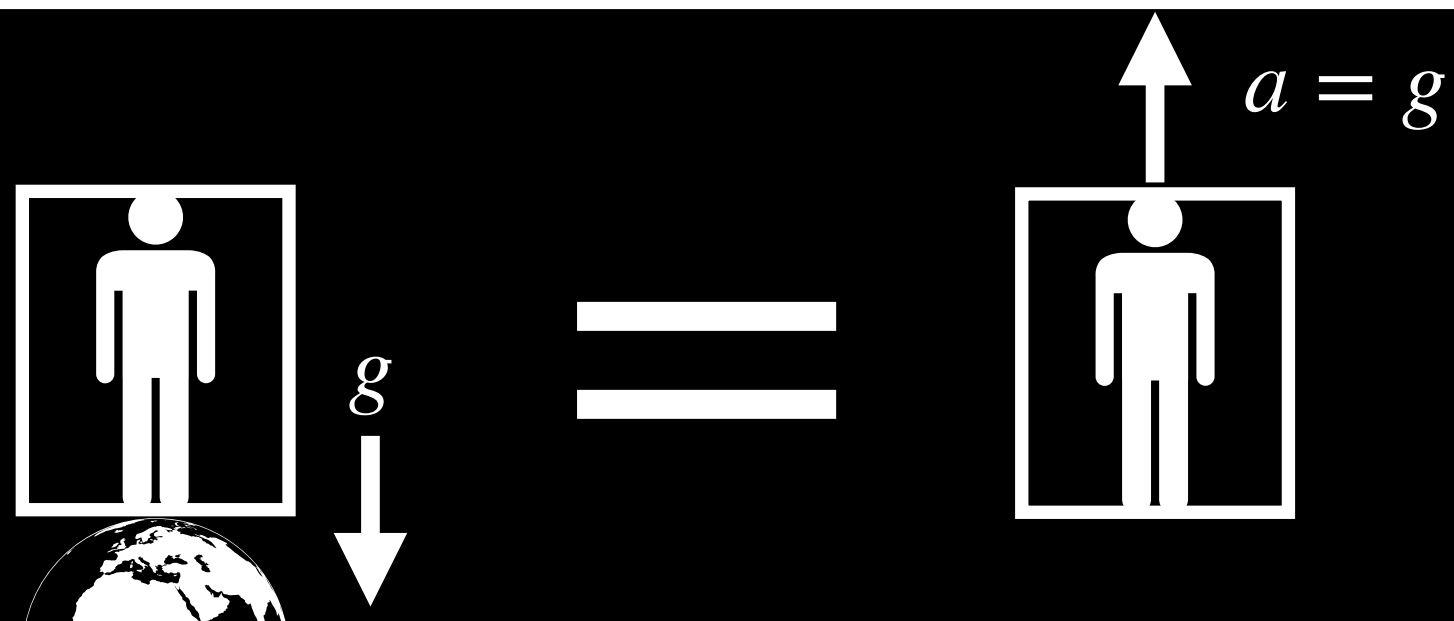
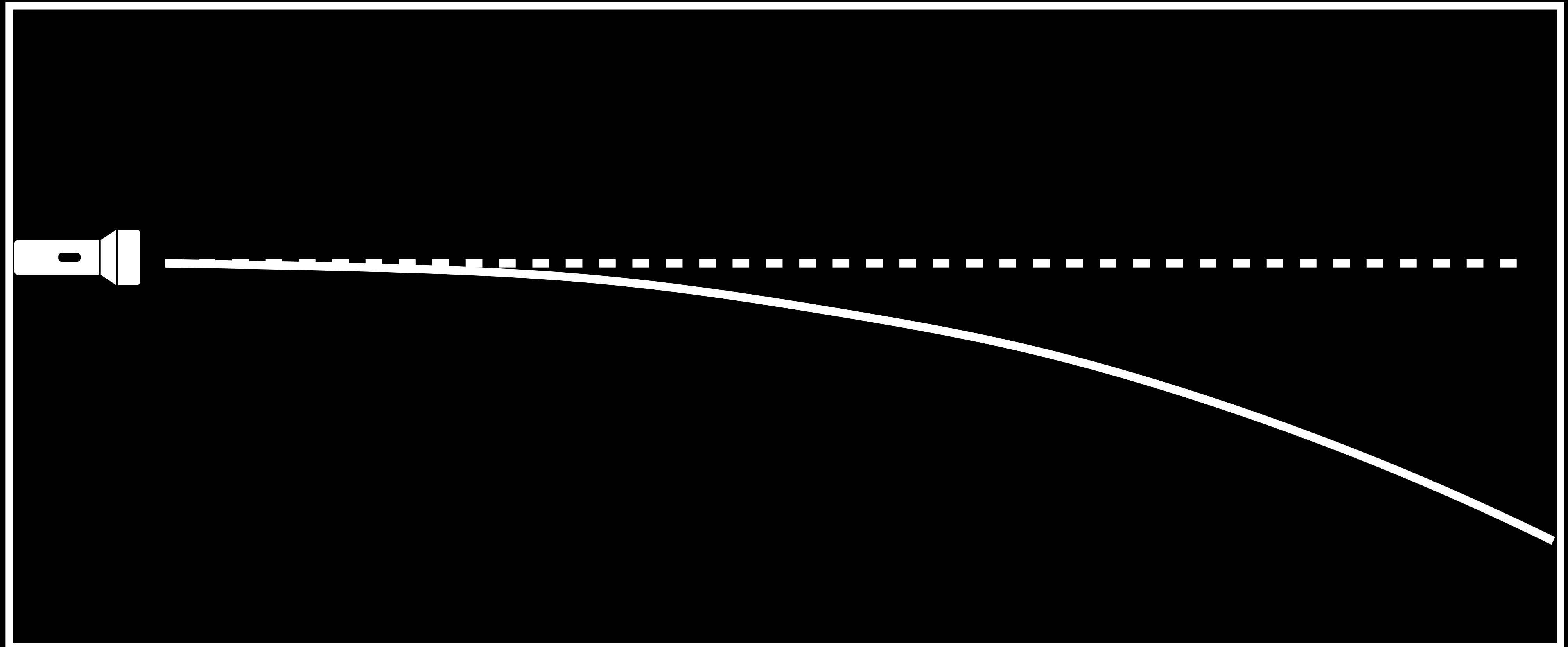
Свет в равномерно-движущемся лифте



Свет в ускоряющемся лифте



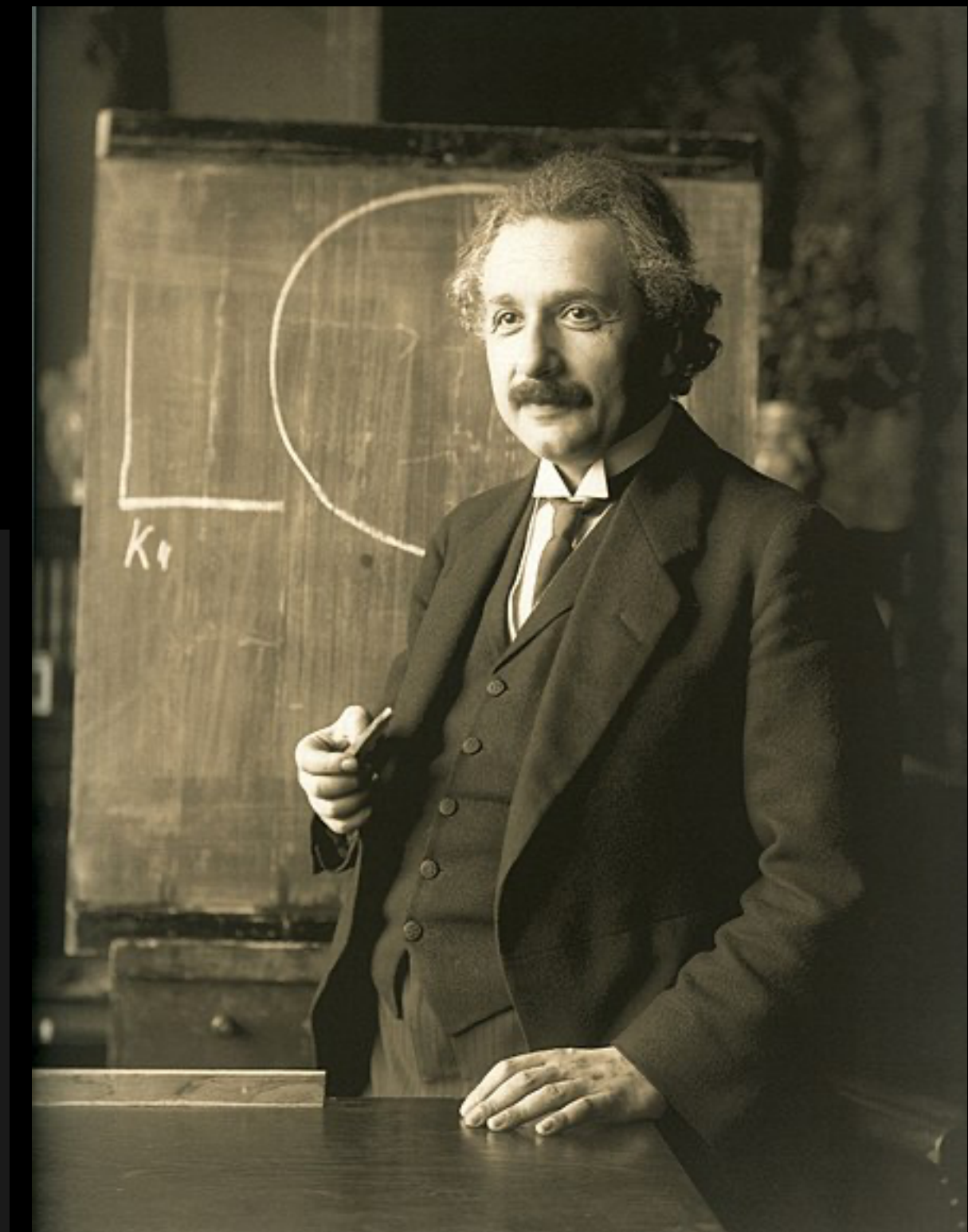
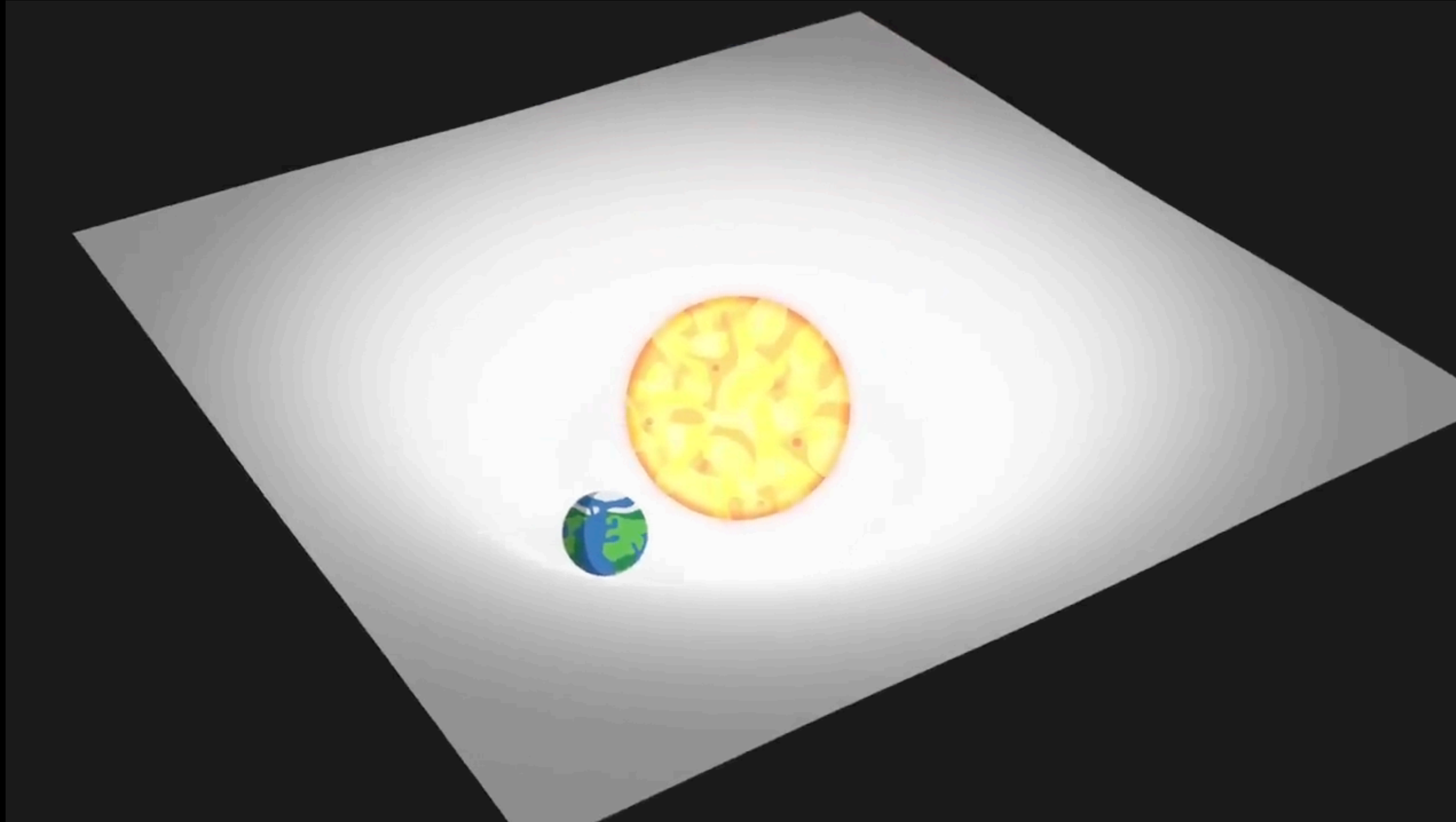
Свет в гравитационном поле



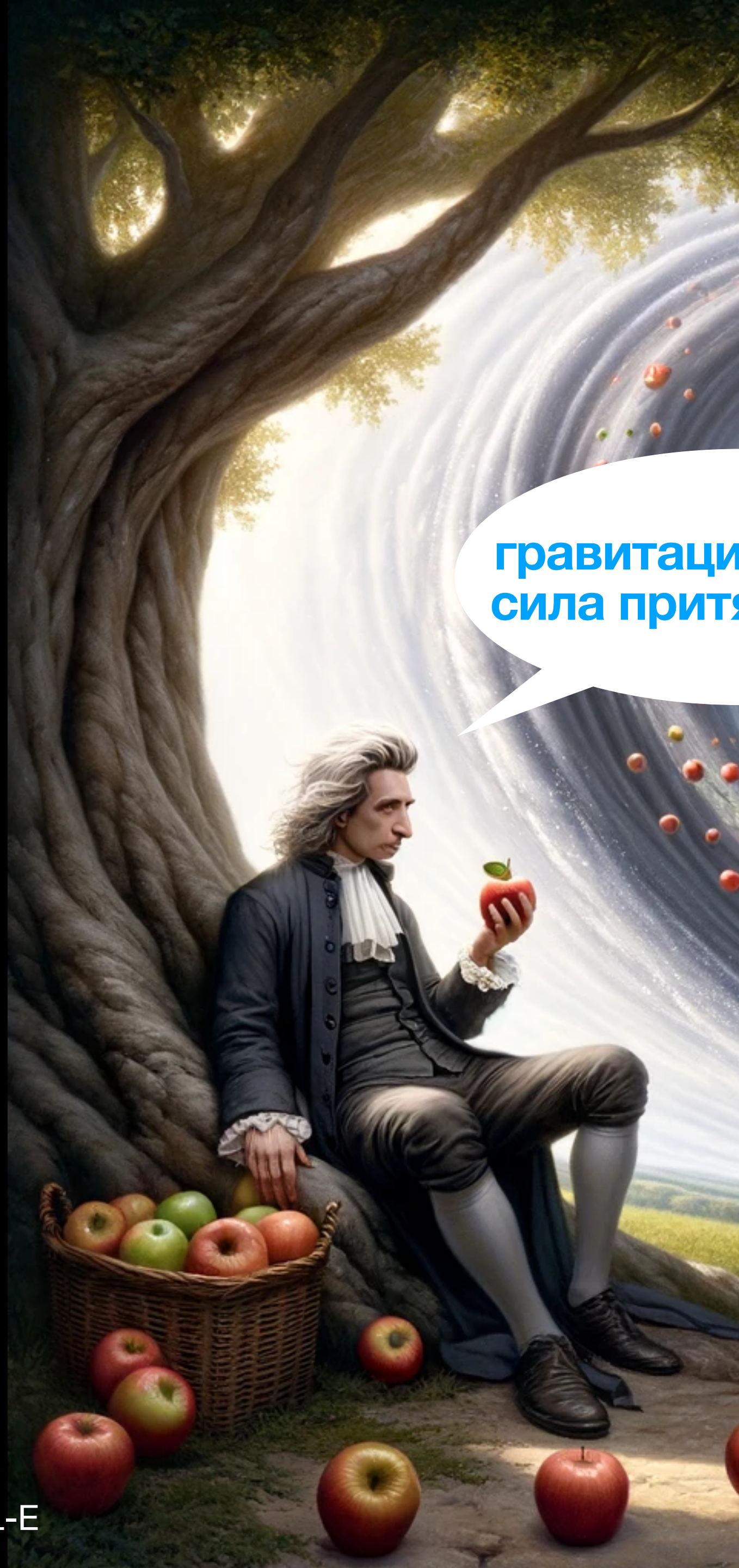
Почему в гравитационном поле
траектория света
искривляется?

**III. Потому что гравитация —
искривление пространства!**

- 1915. Общая теория относительности
 - Гравитационное притяжение – не сила, а кажущееся явление



А. Эйнштейн (1879-1955)

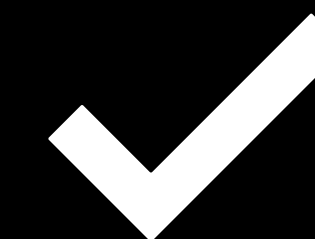
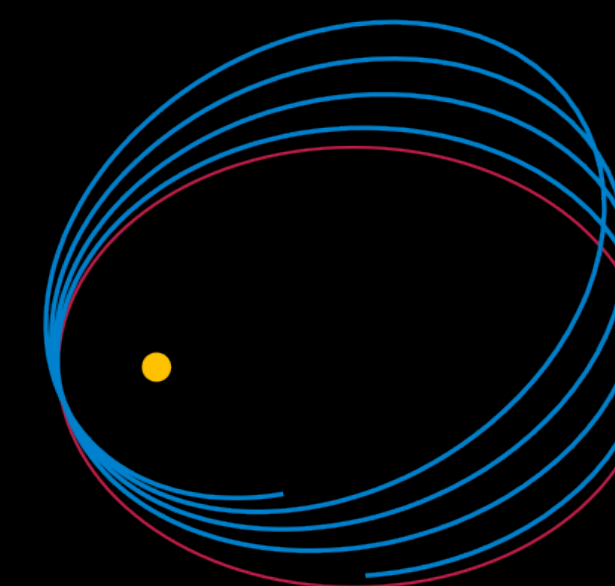


гравитация — это
сила притяжения

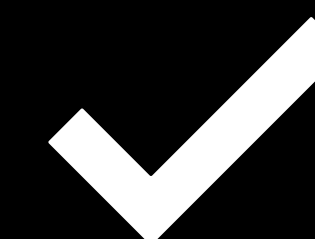
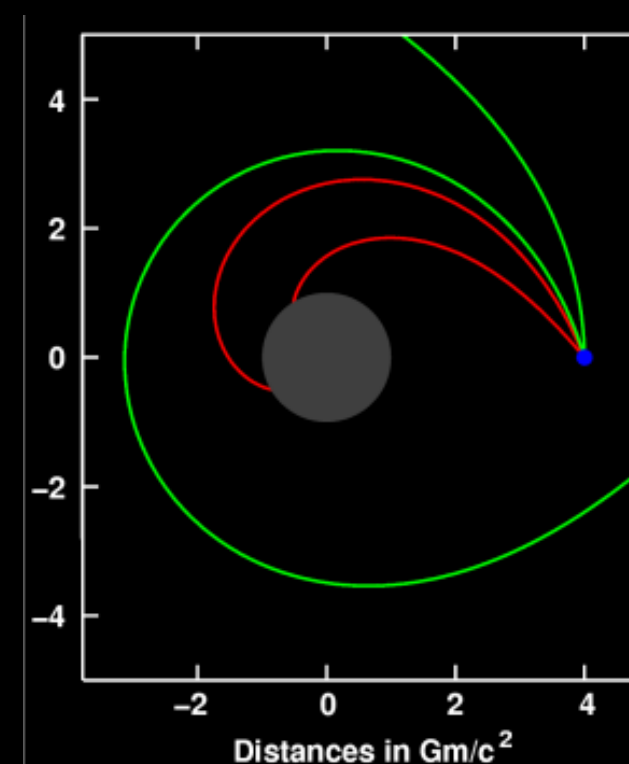
авитация — это
на. Притяжение —
ия»

IV. Предсказания общей теории относительности

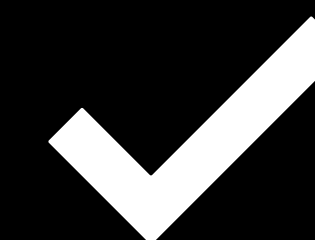
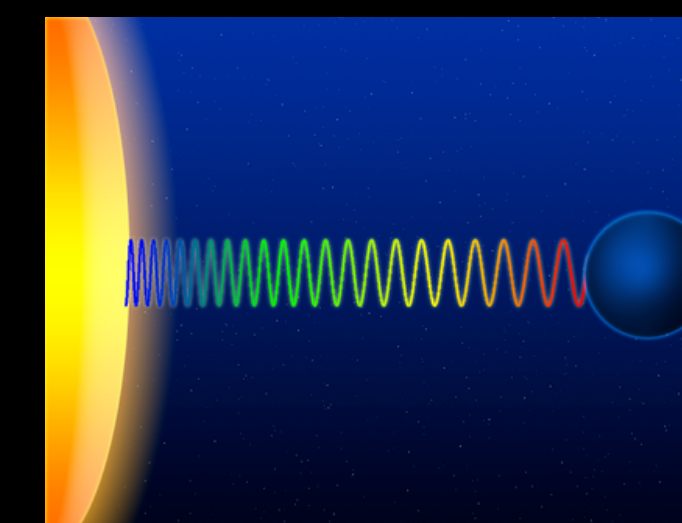
- Прецессия орбиты планеты



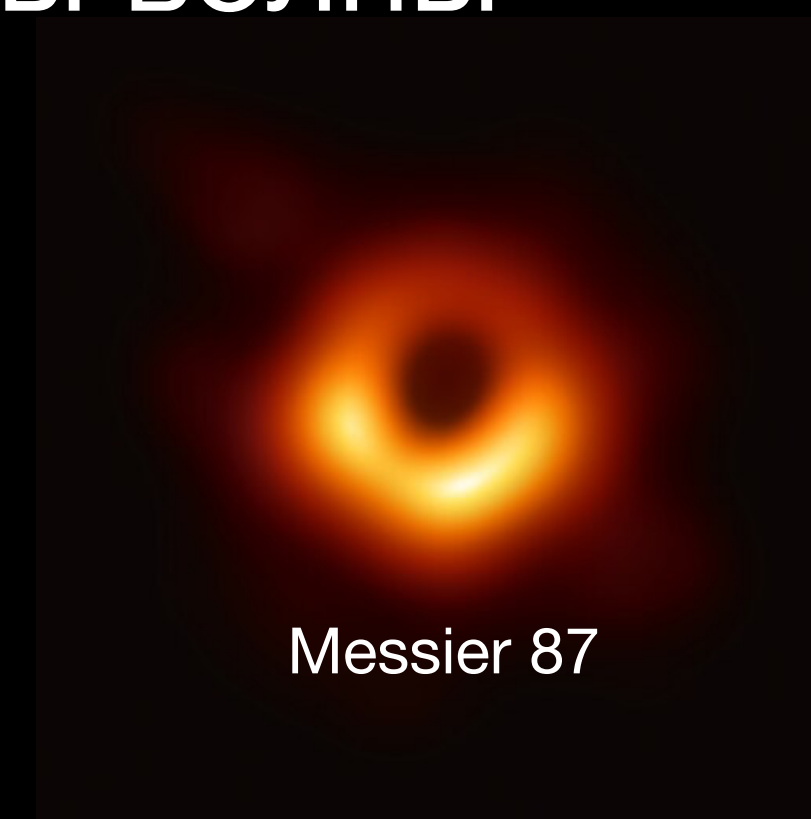
- Отклонение света



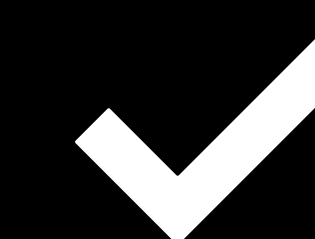
- Замедление времени и сдвиг частоты волны



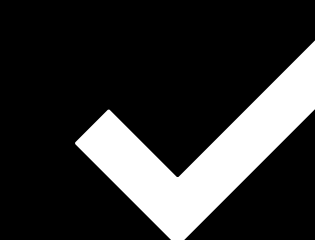
- Существование черных дыр



Messier 87



- Гравитационные волны



Замедление времени

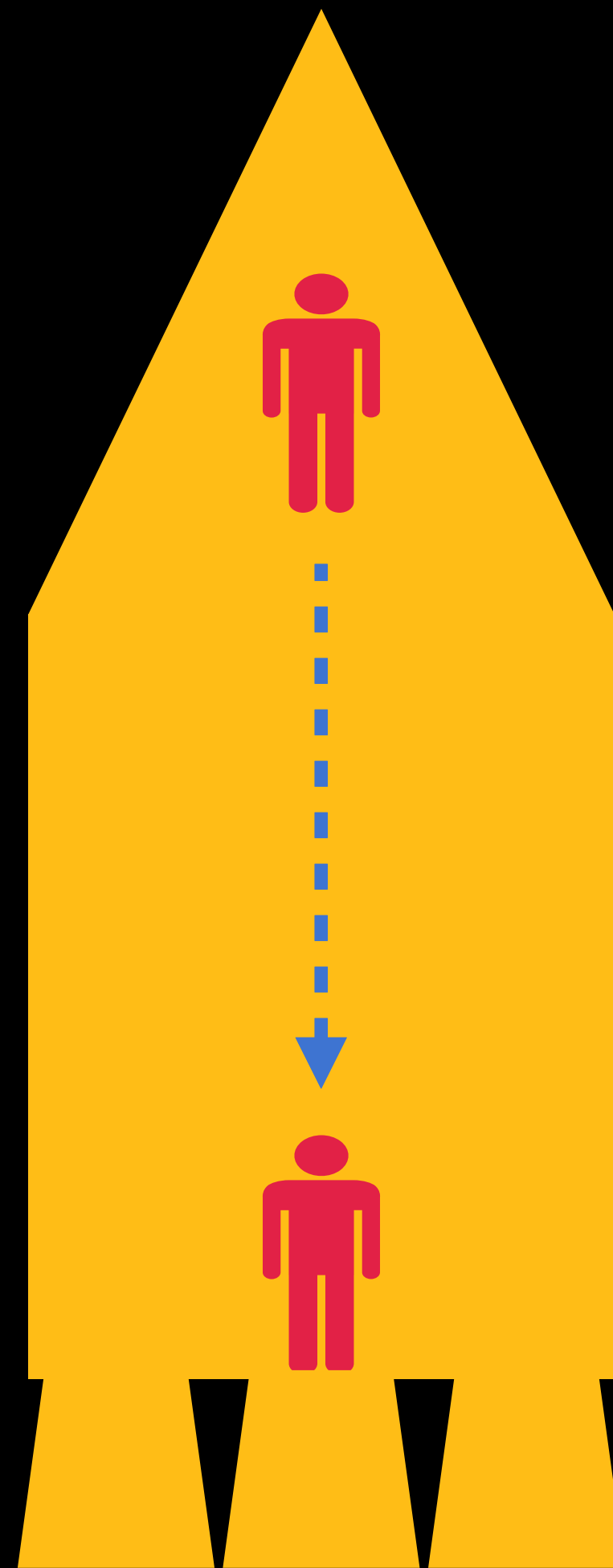
Если $g = a$, то эффект действия гравитации и ускорения одинаков

(для точечного тела)



Посылает сигнал
с интервалом
 $\Delta t = 1$

Принимает сигнал
и измеряет его
интервал Δt



$$\Delta t = 1 \text{ сек}$$

$$\Delta t = 1 \text{ сек}$$

Часы нижнего наблюдателя замедляются

Посылает сигнал
с интервалом
 $\Delta t = 1$

$$\Delta t = 1 \text{ сек}$$



Принимает сигнал и
измеряет его
интервал Δt

$$\Delta t < 1 \text{ сек}$$

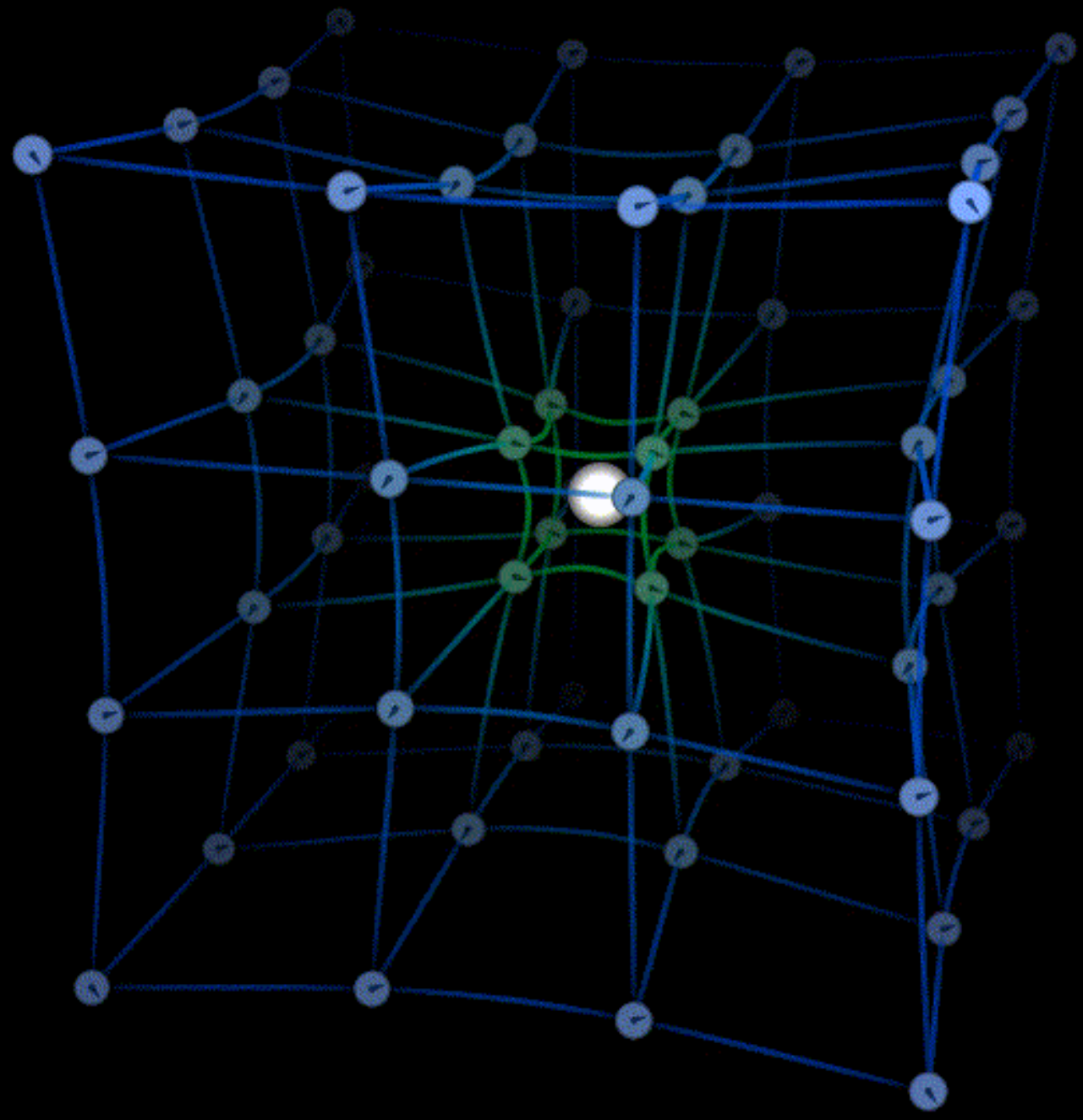






Время течет
быстрее

Время течет
медленнее



V. Что такое черная дыра?

Определения (без фанатизма)

- **Черная дыра** – это область в пространстве-времени, где гравитационное притяжение настолько велико, что ни свет, ни материальные объекты не могут ее покинуть.
- **Горизонт событий** – это граница вокруг черной дыры, за пределами которой ничто не может вернуться назад. Это точка невозврата для любой материи и излучения.
- **Сингулярность** – это центральная точка внутри черной дыры, где плотность материи и кривизна пространства-времени становятся бесконечными. Физические законы, как мы их знаем, возможно перестают действовать в этой области.

Singularity

At the very centre of a black hole, matter has collapsed into a region of infinite density called a singularity.

All the matter and energy that fall into the black hole ends up here.

The prediction of infinite density by general relativity is thought to indicate the breakdown of the theory where quantum effects become important.

Event horizon

This is the radius around a singularity where matter and energy cannot escape the black hole's gravity: the point of no return.

This is the "black" part of the black hole.

Photon sphere

Although the black hole itself is dark, photons are emitted from nearby hot plasma in jets or an accretion disc (see below). In the absence of gravity, these photons would travel in straight lines, but just outside the event horizon of a black hole, gravity is strong enough to bend their paths so that we see a bright ring surrounding a roughly circular dark "shadow".

Relativistic jets

When a black hole feeds on stars, gas or dust, the meal produces jets of particles and radiation blasting out from the black hole's poles at near light speed.

They can extend for thousands of light-years into space.

Innermost stable orbit

The inner edge of an accretion disc is the last place that material can orbit safely without the risk of falling past the point of no return.

Accretion disc

A disc of superheated gas and dust whirls around a black hole at immense speeds, producing electromagnetic radiation (X-rays, optical, infrared and radio) that reveal the black hole's location. Some of this material is doomed to cross the event horizon, while other parts may be forced out to create jets.

Аккреционный
диск

Горизонт
событий

Струя газа

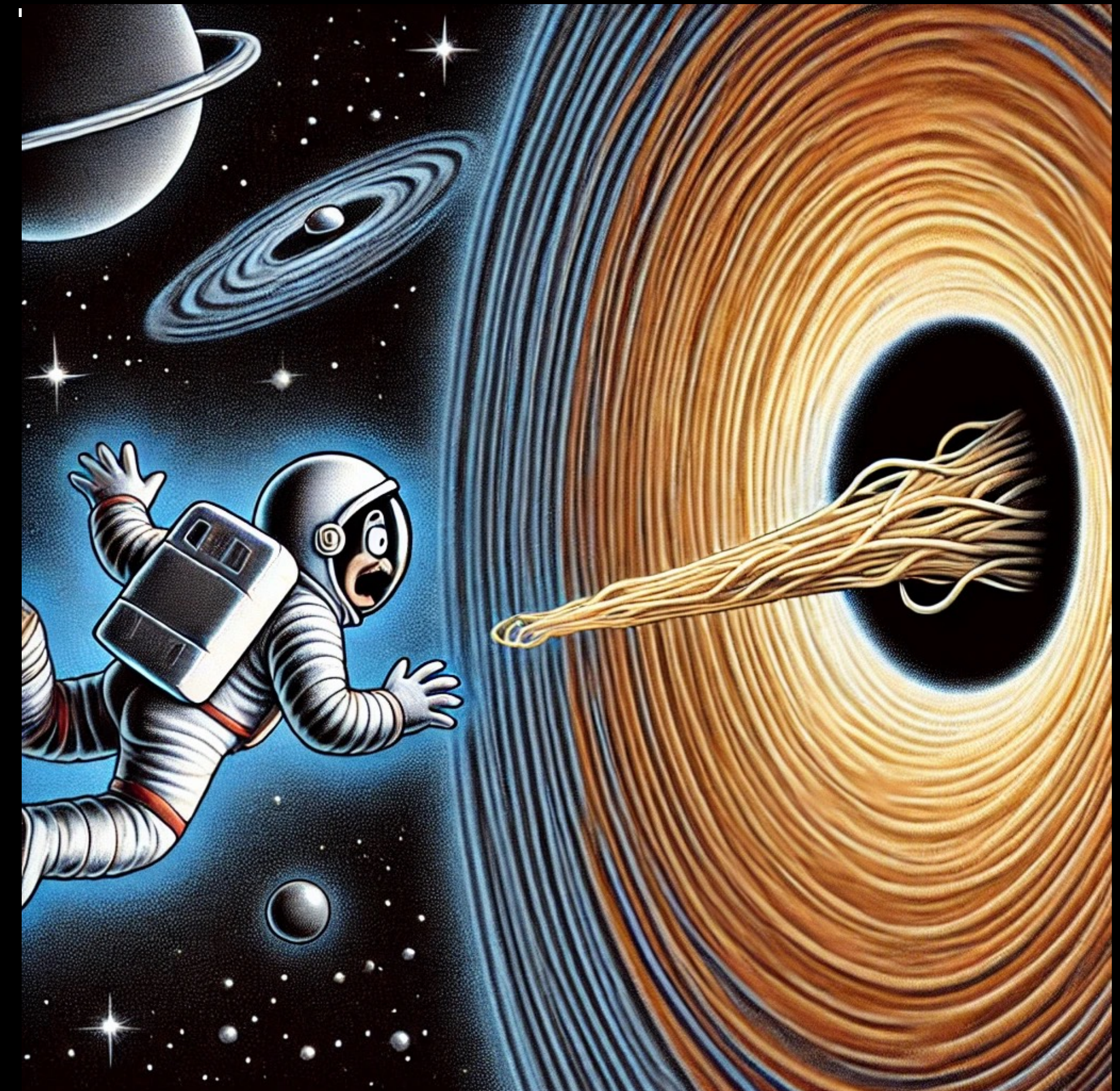
Сингулярность

Фотонная
сфера

Самая близкая
стабильная орбита

Черная дыра Шварцшильда

- **1915. Альберт Эйнштейн** разработал общую теорию относительности (ОТО), показав, что гравитация влияет на свет.
- **1916. Карл Шварцшильд** нашел решение уравнений Эйнштейна, описывающее гравитационное поле сферической массы.
 - Решение предсказывает «спагеттизацию» в области $r \leq r_s = 2GM/c^2$. r_s — «шварцшильдовский радиус»
 - Сингулярность при $r = 0$



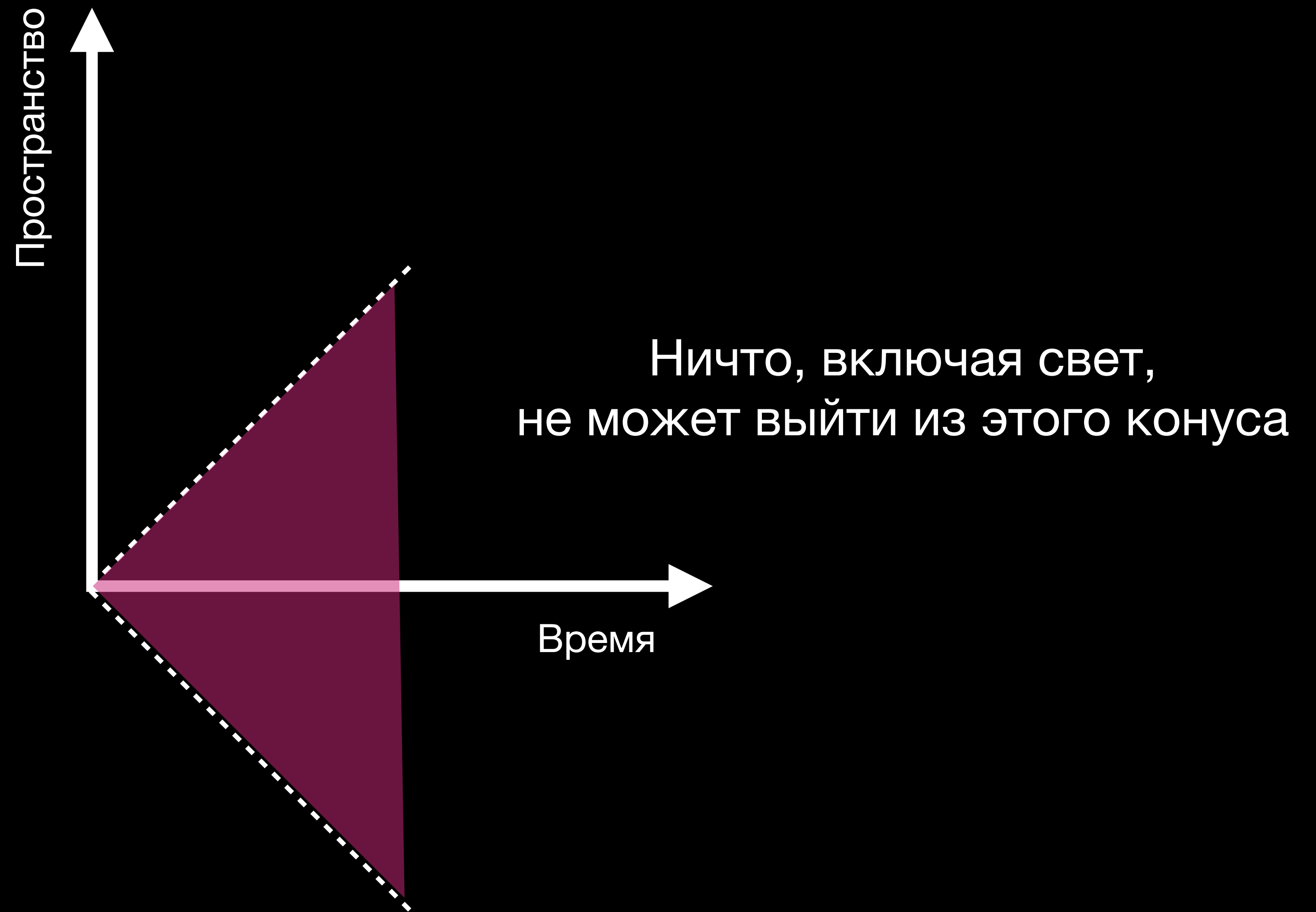
Черная дыра Шварцшильда. Время

- **Наблюдатель далеко-далеко от ЧД:**
 - Ему кажется, что космонавт замедляется с приближением к горизонту событий. Время падения бесконечно.
 - Свет от космонавта краснеет и тусклеет. Меньше, чем за секунду он исчезает из вида
- **Космонавт:**
 - Не замечает ничего необычного. Его часы тикают нормально.
 - Не замечает горизонта событий.
 - Превращается в бесконечно тонкую макаронину.

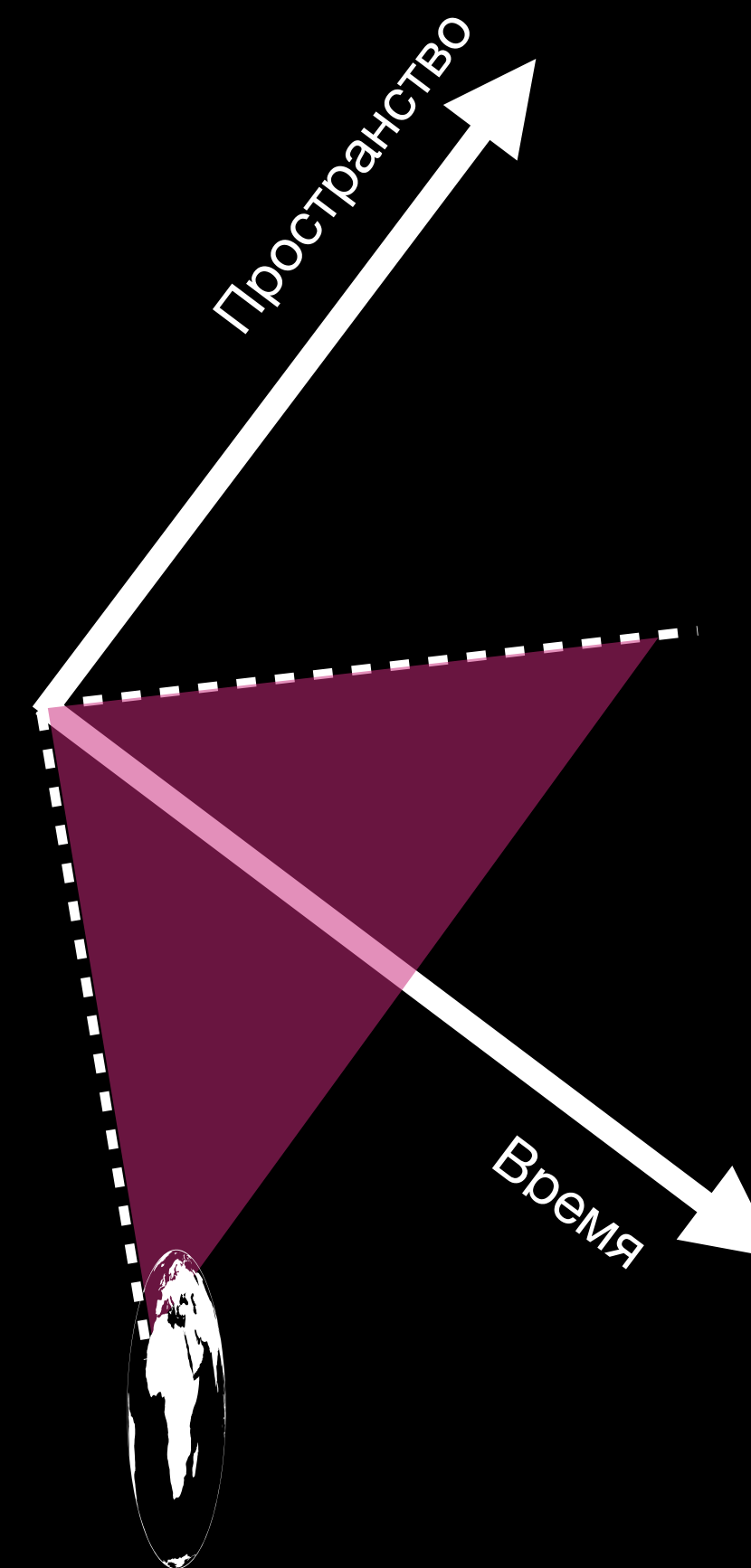
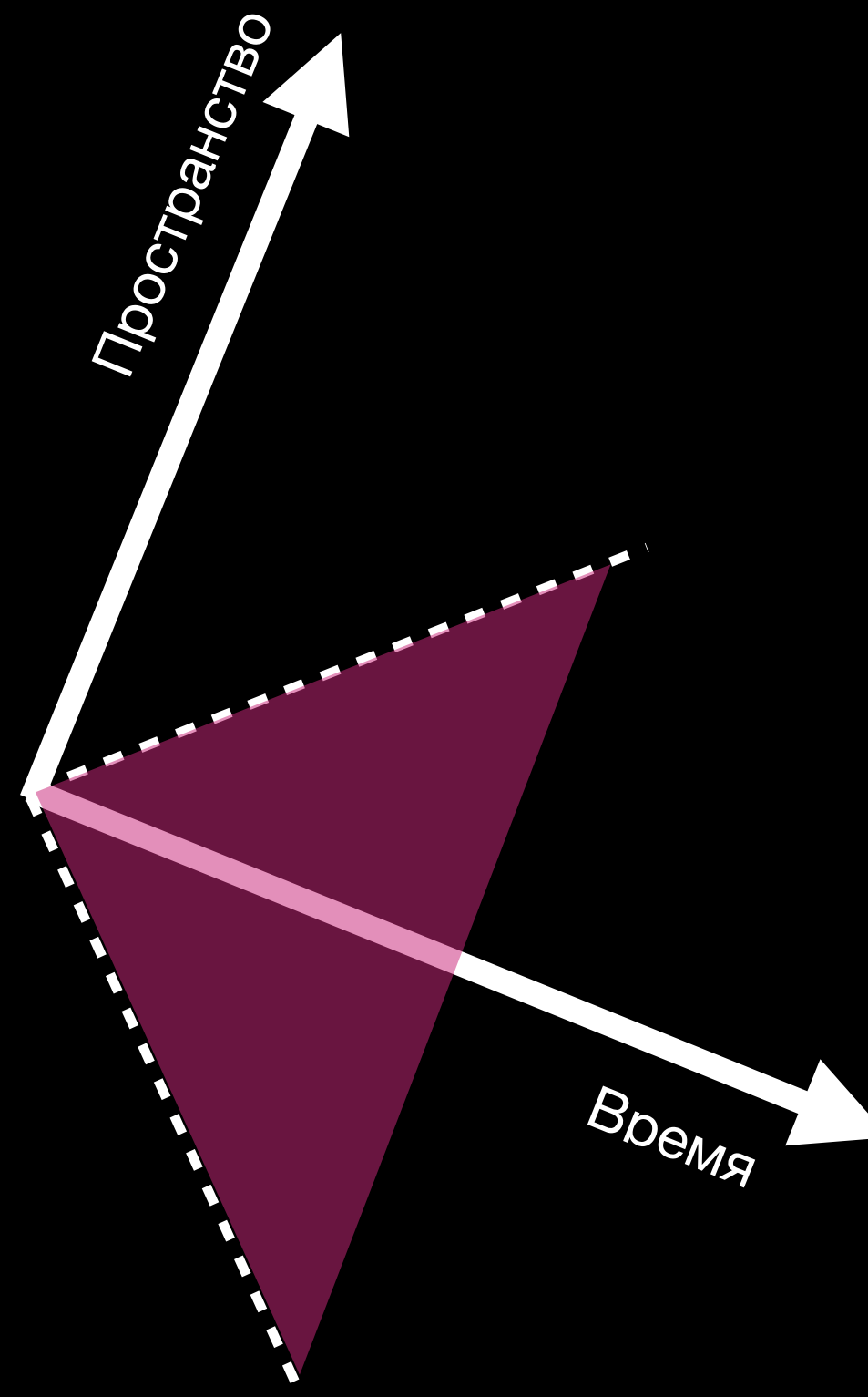
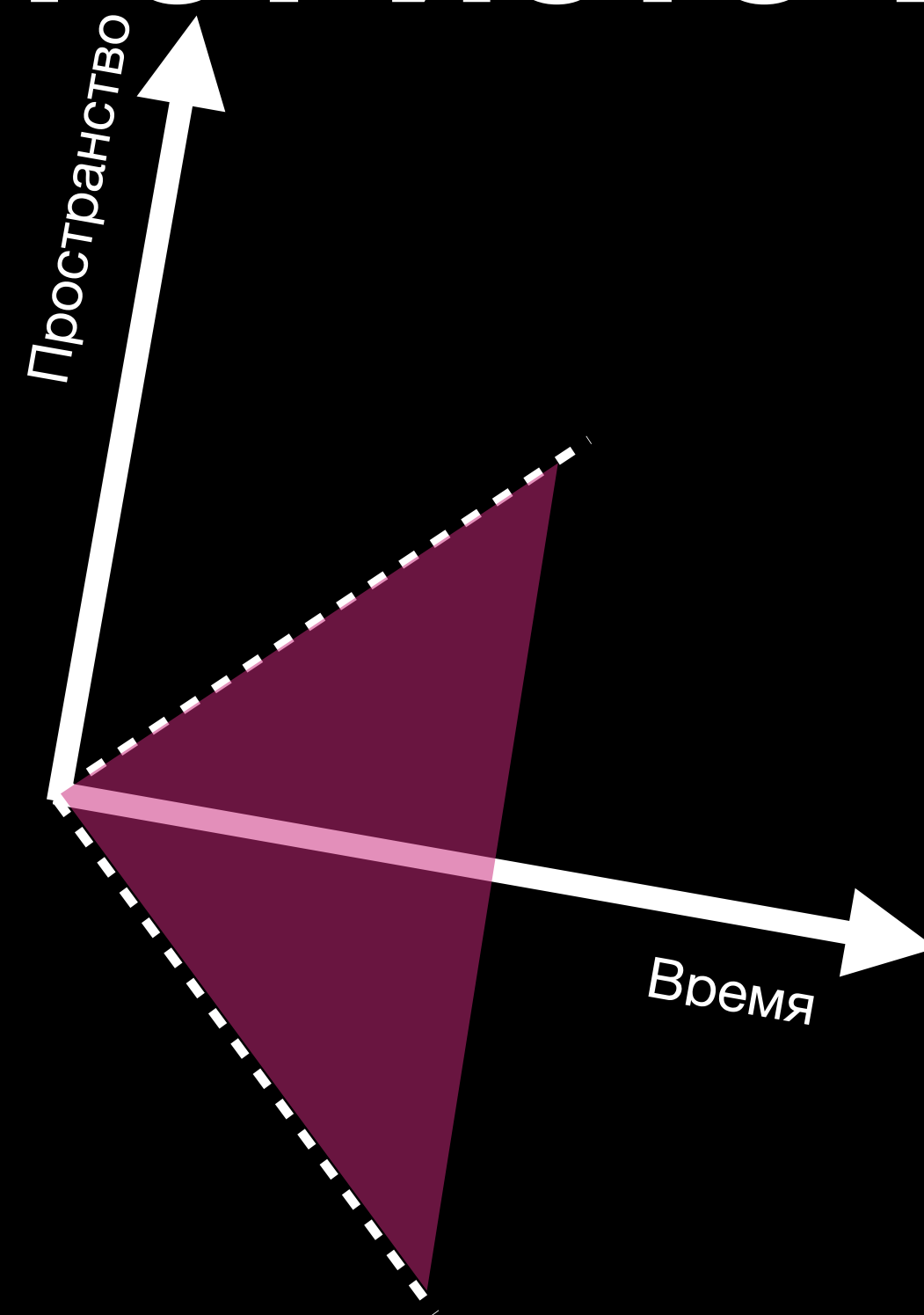
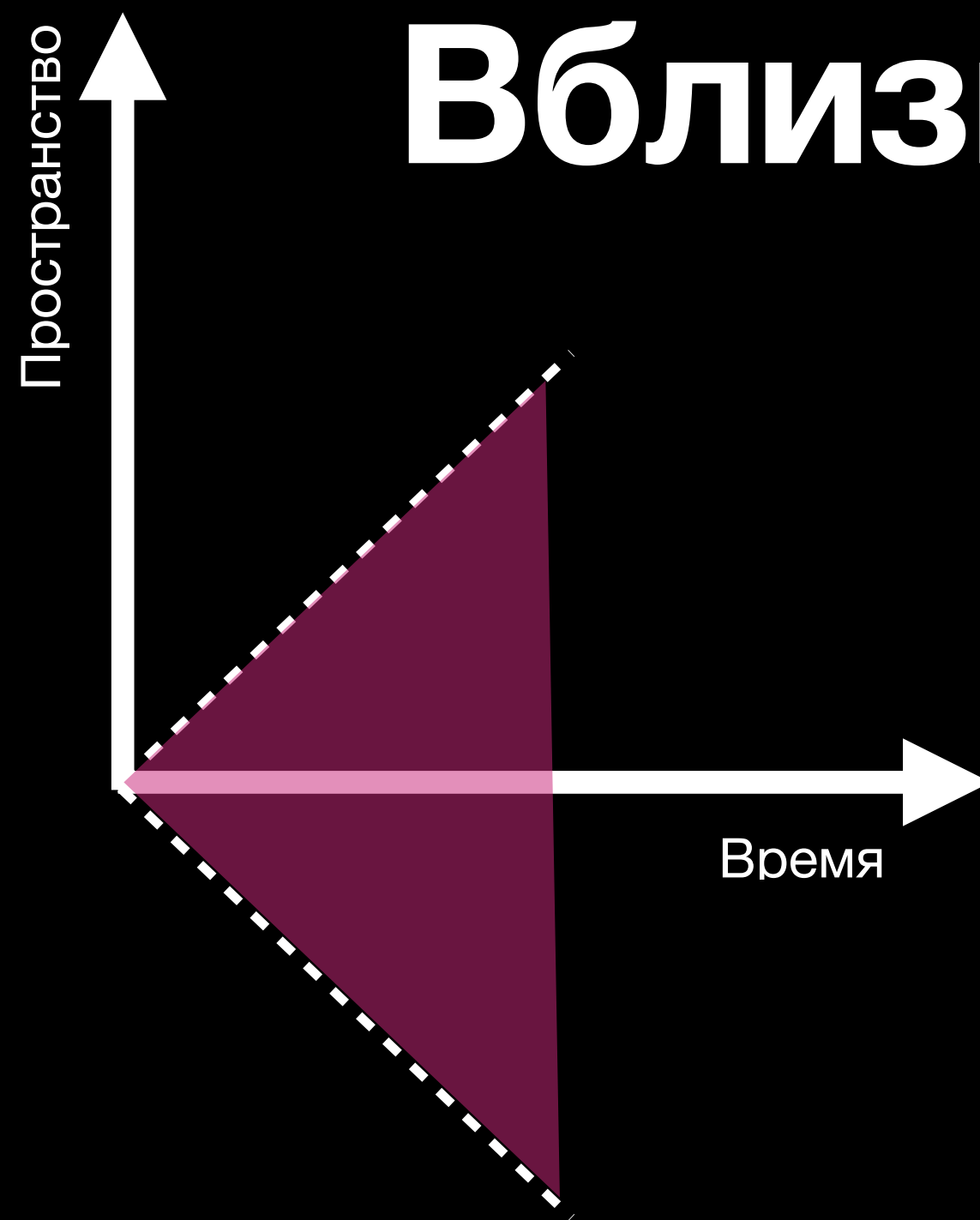


VI. Горизонт событий

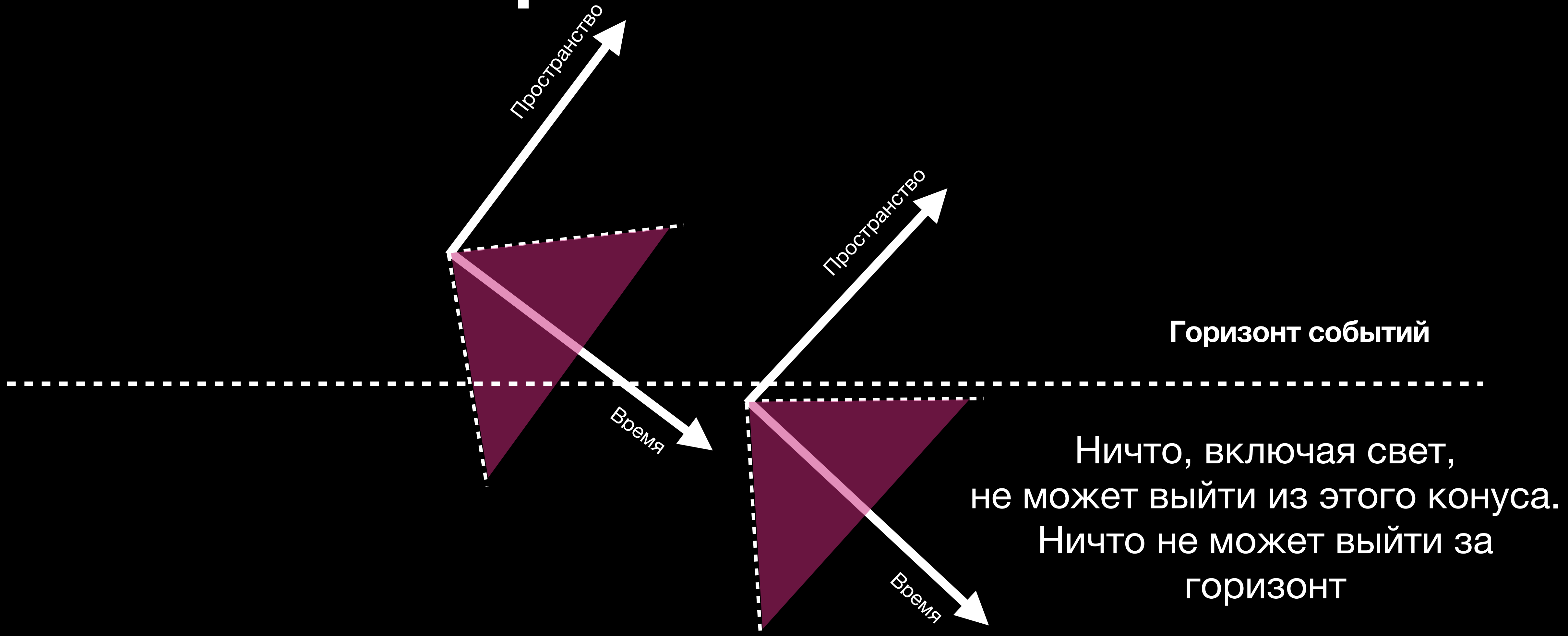
Далеко от источника гравитации



Вблизи от источника гравитации



Горизонт событий



**VII. Черные дыры —
фантастика или реальность?**

История идеи черных дыр

- **1939.** Эйнштейн на основе ОТО пытался доказать невозможность существования черных дыр.
- **1939.** Оппенгеймер и Снайдер на основе ОТО первыми показали, что черные дыры могут существовать.
- **1958.** Финкельштейн идентифицировал «шварцшильдовскую» поверхность как горизонт событий, или «одностороннюю мембрану» куда можно войти, но нельзя выйти.
- **1963 и далее.** Новые более общие решения для черных дыр были найдены (Керр, Ньюман и др). Золотой век ОТО

ПЕРВАЯ ЧЕРНАЯ ДЫРА

Индекс: $20^{\text{h}} 37^{\text{m}} 12^{\text{s}}, +42^{\circ} 01' 48''$

Адрес: Млечный Путь, Созвездие Лебедя.
Лебедь X1 (1964).

Mihovina
Severní Amerika

Вспышки рентгеновского излучения

Голубой сверхгигант
HDE 226868

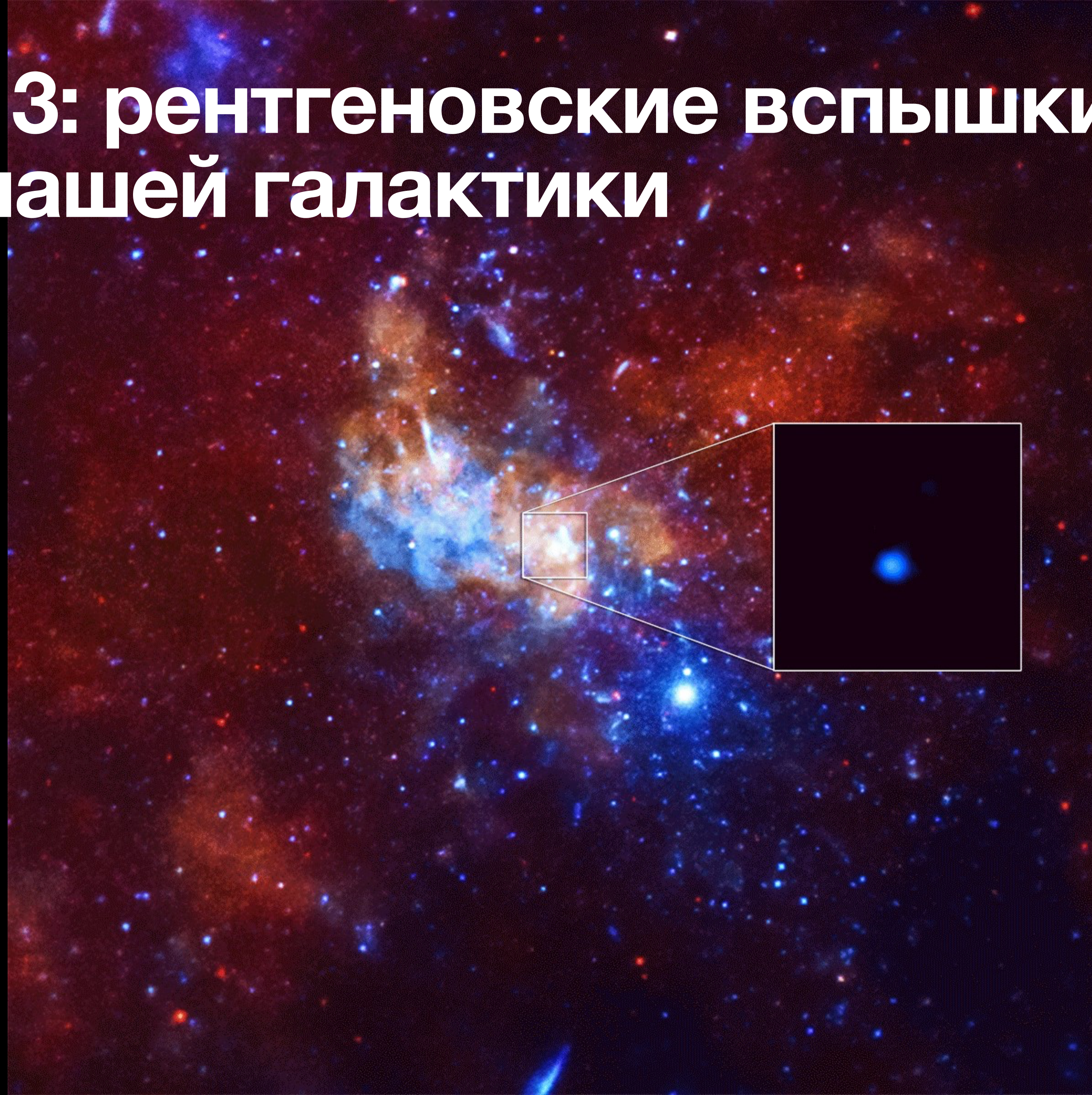
Черная дыра
X1

«Черный Лебедь». Реконструкция событий

- Масса черной дыры = 21.2 масс Солнца
- Масса голубого гиганта = 20-40 масс Солнца
- Расстояние между ними = 0.2 от расстояния Солнце-Земля
- Черная дыра образовалась в результате взрыва Сверхновой массой 40 масс Солнца 5 миллионов лет назад
- Черная дыра ли Лебедь X1 — предмет дружеского спора Стивена Хокинга и Кипа Торна: 1975 — 1990.

Стрелец A^* — сверхмассивная
черная дыра в нашей
галактике

2012-2013: рентгеновские вспышки из центра нашей галактики



**С 1995 астрономы отслеживают движение
90 звезд, вращающихся вокруг Стрельца А***

02 | MAR | 21

Сверхмассивная черная дыра в галактике Мессье 87

—2017-2019. Коллаборация Event Horizon Telescope (EHT)

Гравитационные волны от слияния черных дыр

—2015. Коллаборация LIGO

GW15014



VIII. Путешествие внутрь черной дыры

Моделирование NASA.

Осторожно! Соблюдайте технику безопасности — может поглотить

This is a **simulation** of a flight into
a **supermassive** black hole surrounded
by a hot, glowing **disk** of gas.

Осталось за кадром...

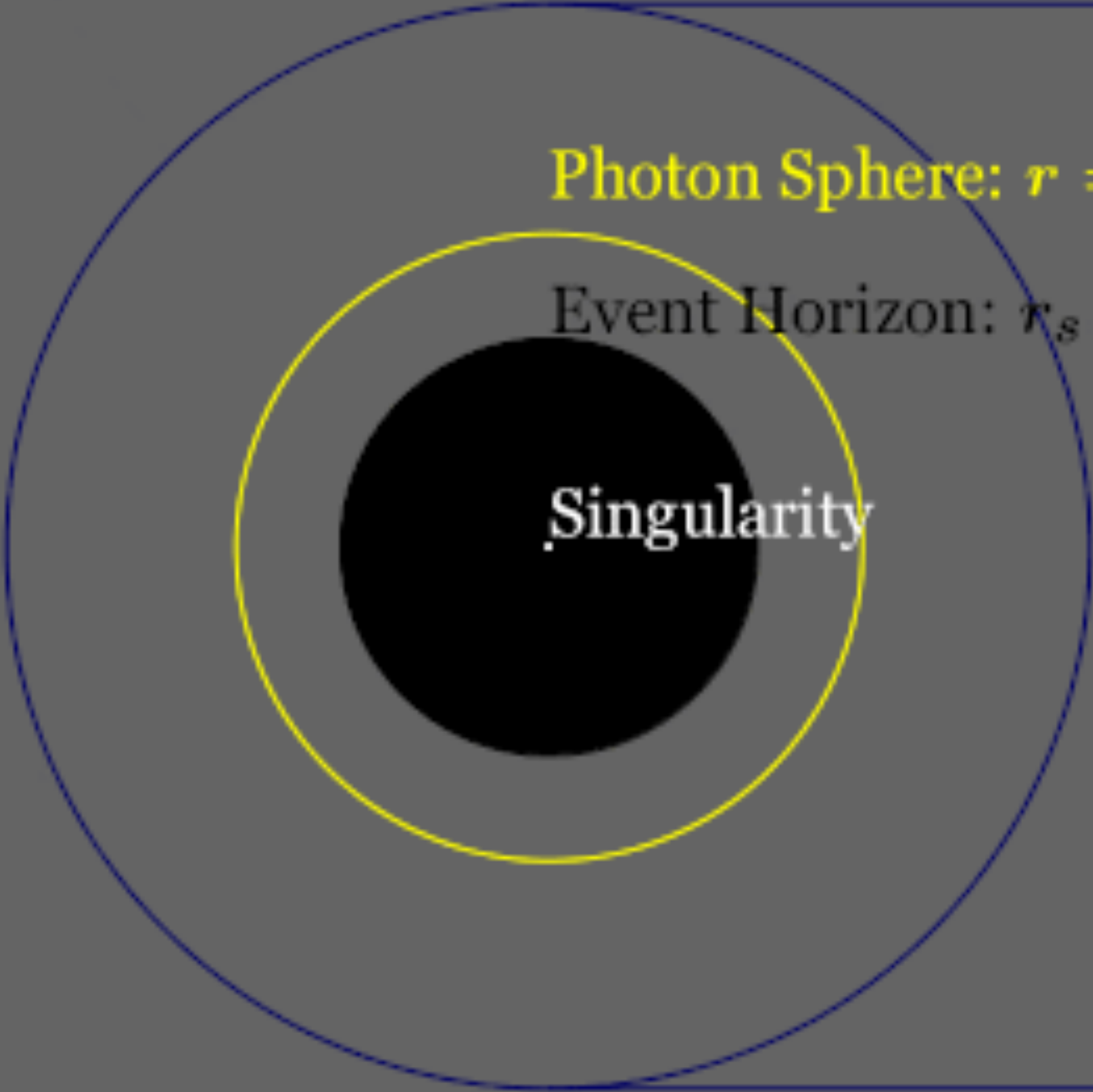
Свет и тень черной дыры

Shadow: $R = \frac{\sqrt{27}}{2}r_s \approx 2.6r_s$

Photon Sphere: $r = 1.5r_s$

Event Horizon: $r_s = \frac{2GM}{c^2}$

Singularity



The diagram illustrates the concentric regions of a black hole. At the center is a black circle labeled 'Singularity'. Surrounding it is a yellow circle representing the 'Photon Sphere'. The next layer is a blue circle representing the 'Event Horizon'. The outermost blue circle represents the 'Shadow'. The labels and their corresponding equations are placed to the right of the circles. The background is a dark gray gradient.

Излучение Хокинга

—Квантовая физика приводит к излучению света. Черная дыра светится и теряет энергию!

Масса черной дыры

Температура излучения

Время полного испарения

Масса Солнца

$$6 \cdot 10^{-8} K$$

$$10^{64} \text{ лет}$$

$$10^{11} M_{\odot}$$

$$6 \cdot 10^{-19} K$$

$$10^{100} \text{ лет}$$

$$10^3 \text{ кг}$$

$$10^{-9} \text{ с}$$

—Экспериментально пока не наблюдалось

Информационный парадокс

— Все черные дыры на одно лицо. Они полностью характеризуются только тремя параметрами: масса, электрический заряд и орбитальный момент.

— Независимо от типа пожираемого вещества

— Пропадает информация о строительном материале. А не должна!

В этом и есть парадокс