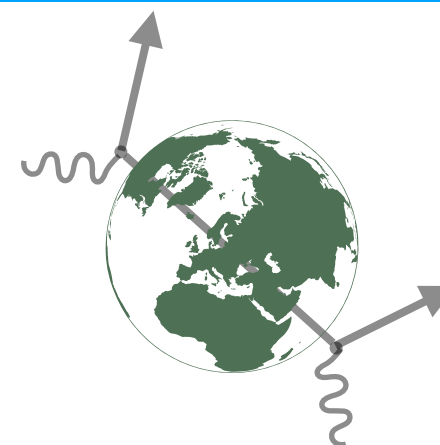


Мини-курс лекций для молодых ученых



От Революции к Эволюции в Моделировании Физической Реальности

Дмитрий В.Наумов



О чем этот курс лекций?

- **Об эволюции нашего понимания физической реальности за последний век**
- **О важнейших экспериментальных открытиях**
- **Об ученых**
- **Об исследованиях на переднем крае науки**

Зачем этот курс лекций?

- **Тернистый путь научных открытий**
 - Краткий обзор, на качественном уровне, неудач, идей и научных революций
- **Критическое мышление**
 - Умение задавать вопросы и искать ответы
- **Об ученых**
 - возможно, кого-то вдохновят эти истории на собственные открытия
- **Об исследованиях на переднем крае науки**
 - возможно, кто-то найдет верный путь

Четыре лекции

- **Лекция 1. «Три интеллектуальные революции»**
 - Квантовая механика. Специальная теория относительности. Общая теория относительности
- **Лекция 2. «Квантовая теория поля: бесконечные мучения и глоток надежды»**
 - Природа силы. Бесконечности. Бегущие константы
- **Лекция 3. «Стандартная модель: самое успешное соединение противоречий»**
 - Симметрии и нарушения симметрий. Триумф и трудности СМ
- **Лекция 4. «За горизонты Стандартной Модели: Пути к Новой Физике»**
 - Теории великого объединения. Струны и суперструны. Суперсимметрия. Будущее ФЭЧ

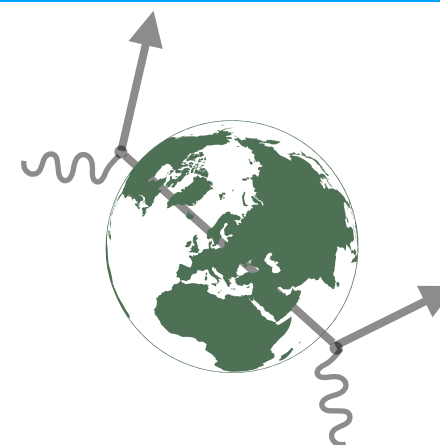
На кого рассчитан курс? Наше взаимодействие

- **На физиков:** студентов, аспирантов, молодых (и не очень) ученых
 - Возможно, часть материала будет доступна для менее подготовленной аудитории
- **Вопросы, комментарии, замечания**
 - Можно задавать по ходу лекции.
 - В конце каждой лекции
- **Материалы лекций**
 - PDF лекций + видео-запись (обращайтесь к организаторам)
- **Углубленное изучение**
 - Список рекомендуемой литературы, онлайн-материалы в конце каждой лекции



Лекция 1. «Три интеллектуальные революции»

1. Квантовая механика
2. Специальная теория относительности
3. Общая теория относительности



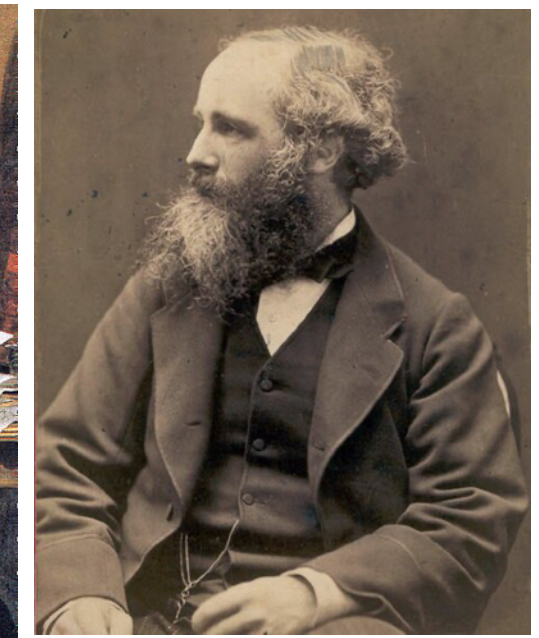
Физическая картина мира

В конце XIX века



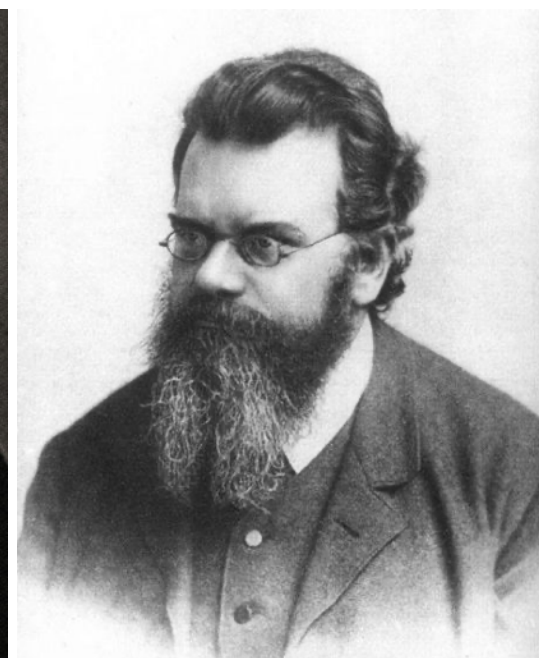
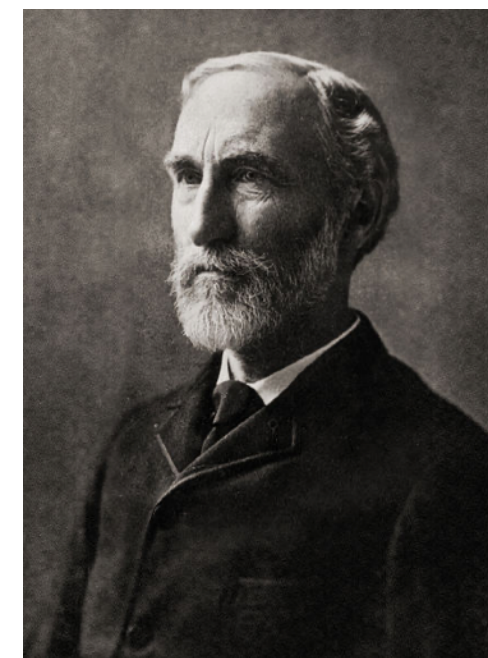
- **Классическая механика:**

- Ньютон, Лагранж, Гамильтон, Эйлер и др.
- Силы и энергия определяют эволюцию физической системы.
- Детерминизм



- **Две силы:**

- Гравитация (Ньютон)
- Электричество и магнетизм (Максвелл, Герц, Хевисайд)
- Эфир как среда для электромагнитных волн



- **Атомы:**

- Гипотеза разделяется не всеми

- **Термодинамика:**

- Развитие понятий энергии и энтропии

Физическая картина мира

В конце XIX века

- **Пространство**

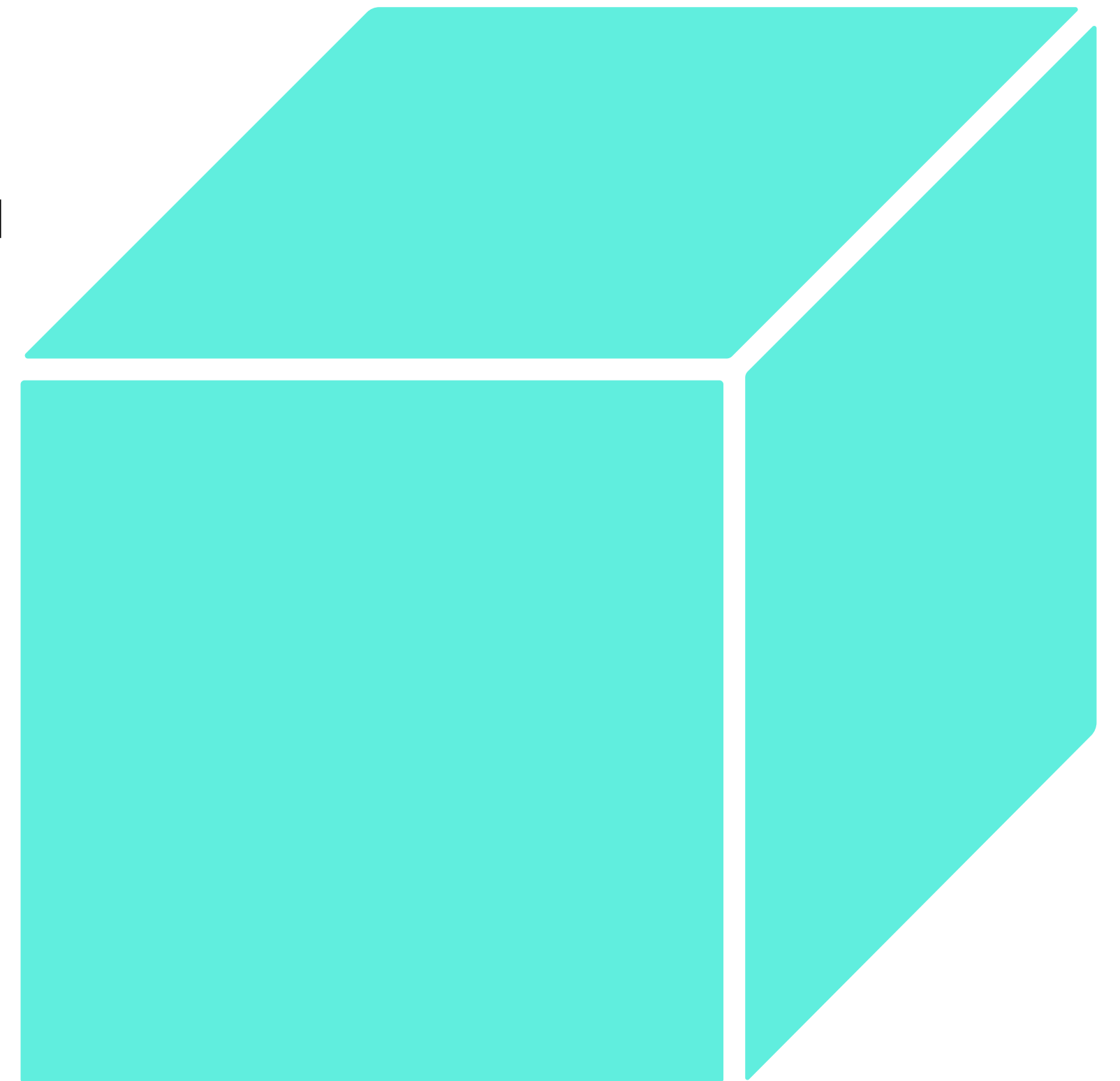
- трехмерный континуум событий с размерами длины, ширины, высоты

- **Время**

- не существует не тавтологического определения времени

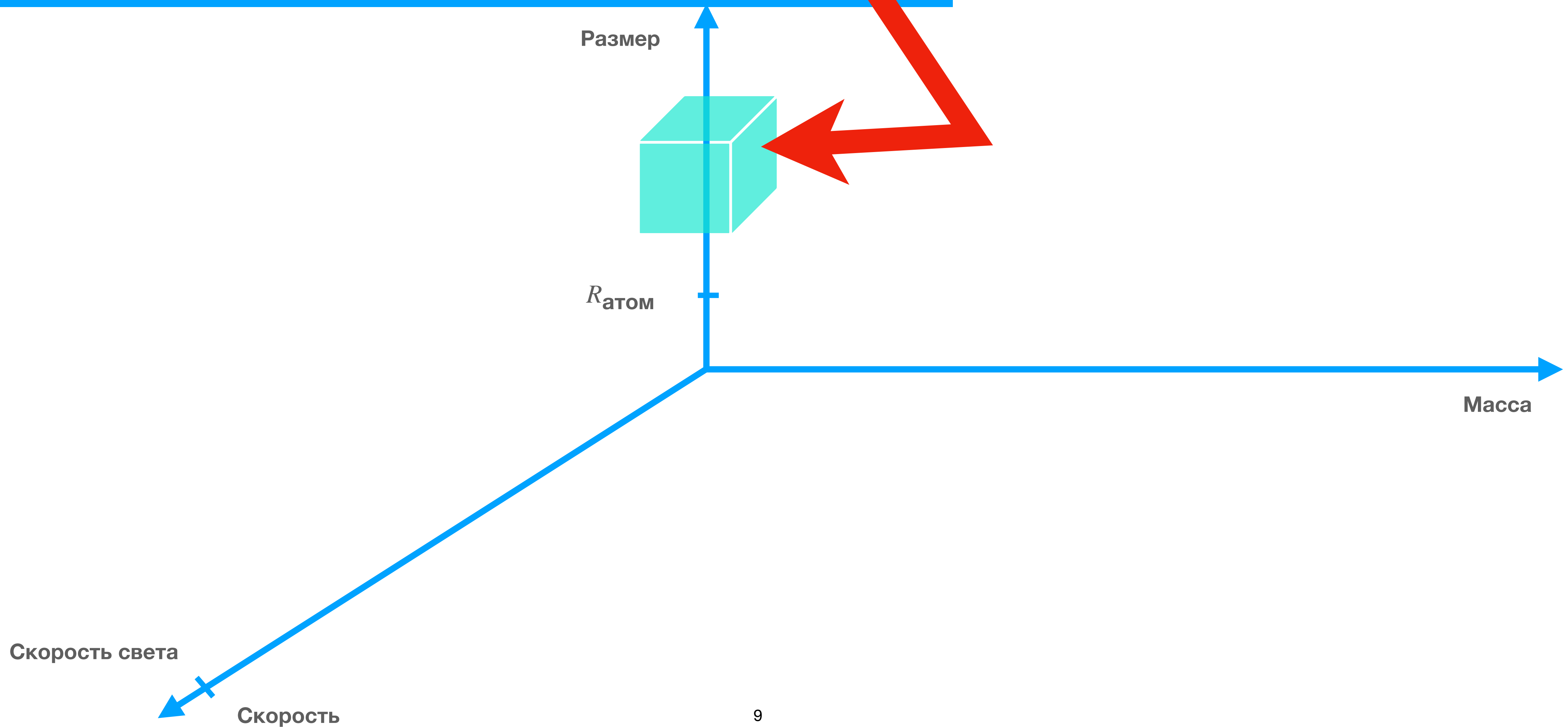
- на практике, время это то, что показывают часы

- время никак не связано с пространством



Область применимости

Классической физики

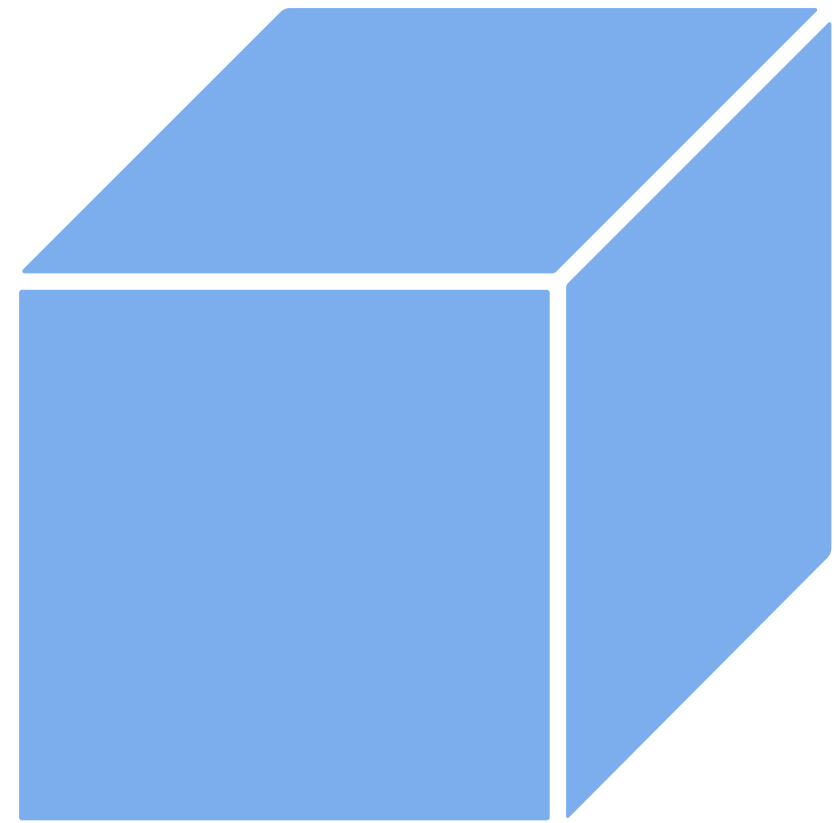


Специальная теория относительности

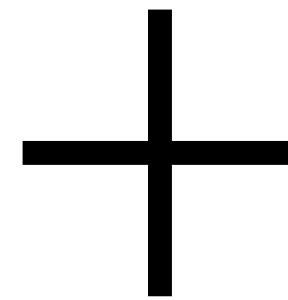
Интеллектуальная революция

1

Классическая физика до Эйнштейна



Пространство



Время

законы движения массивных тел

Электромагнетизм



НЬЮТОН



Максвелл

1905. Год чудес

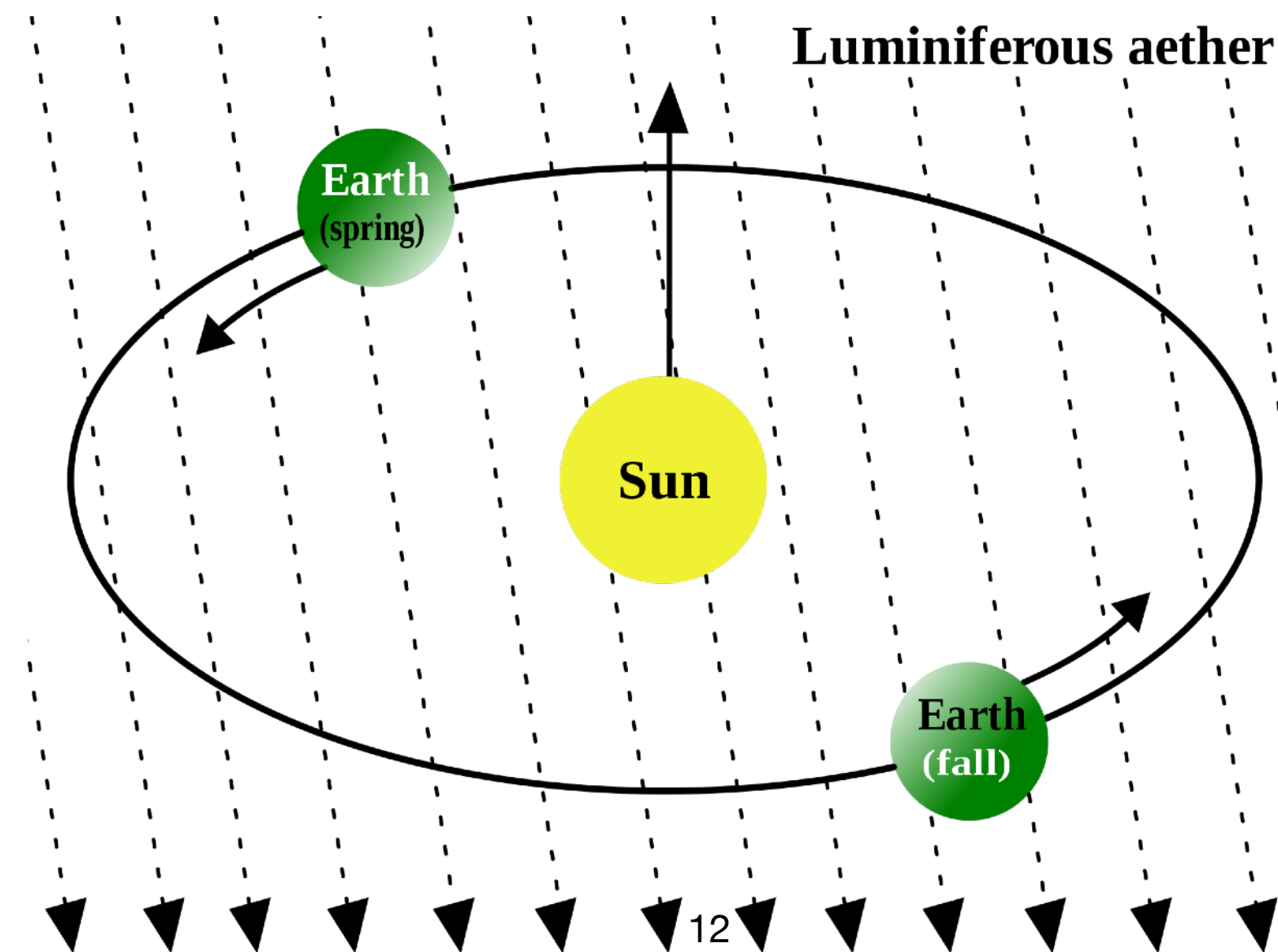
Два факта дали толчок к созданию **СТО**:

- о Механика Ньютона несовместима с уравнениями Максвелла
- о Эксперимент Майкельсона-Морли не обнаружил эфира

А. Эйнштейн, Г.Лоренц, А. Пуанкаре



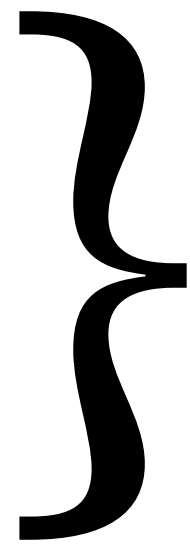
Альберт Эйнштейн. НП 1921



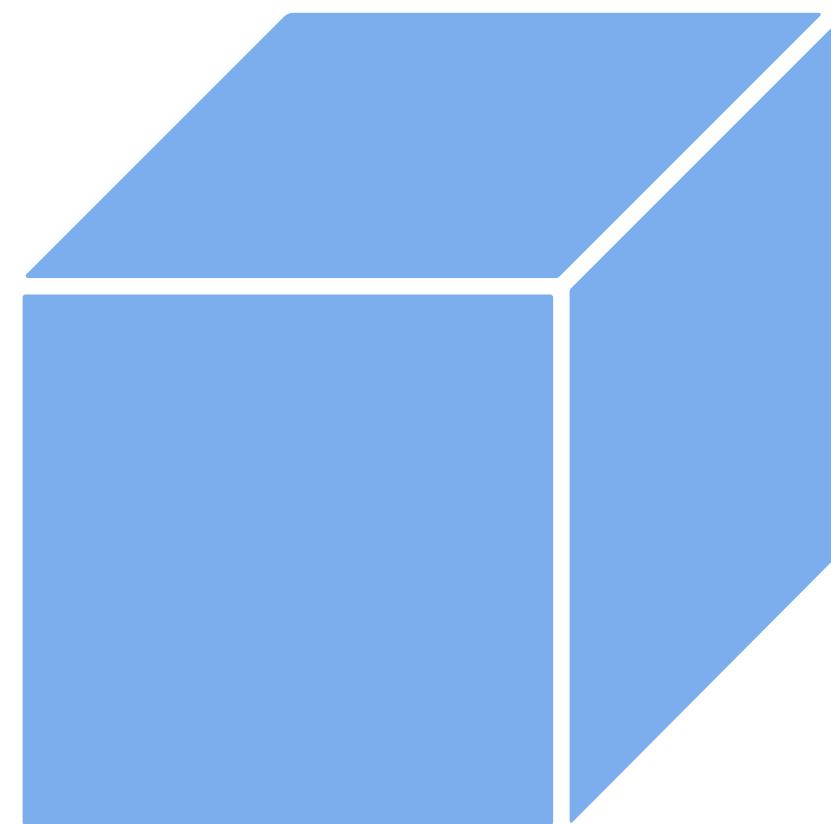
Пространство-время

Во всех инерциальных системах отсчета

- Физические законы одинаковы
- Скорость света в вакууме одинакова



Два постулата (1905)



Пространство



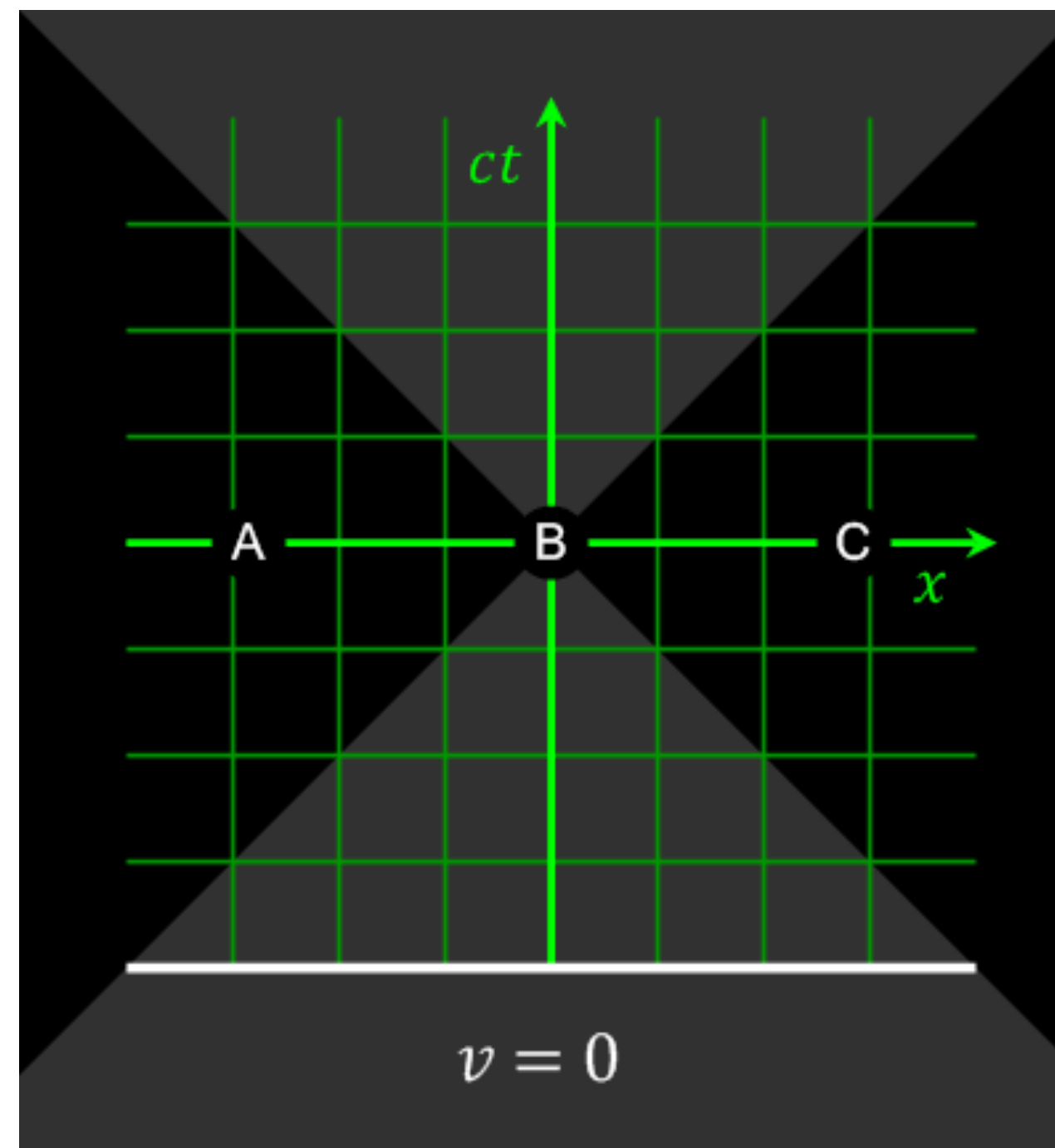
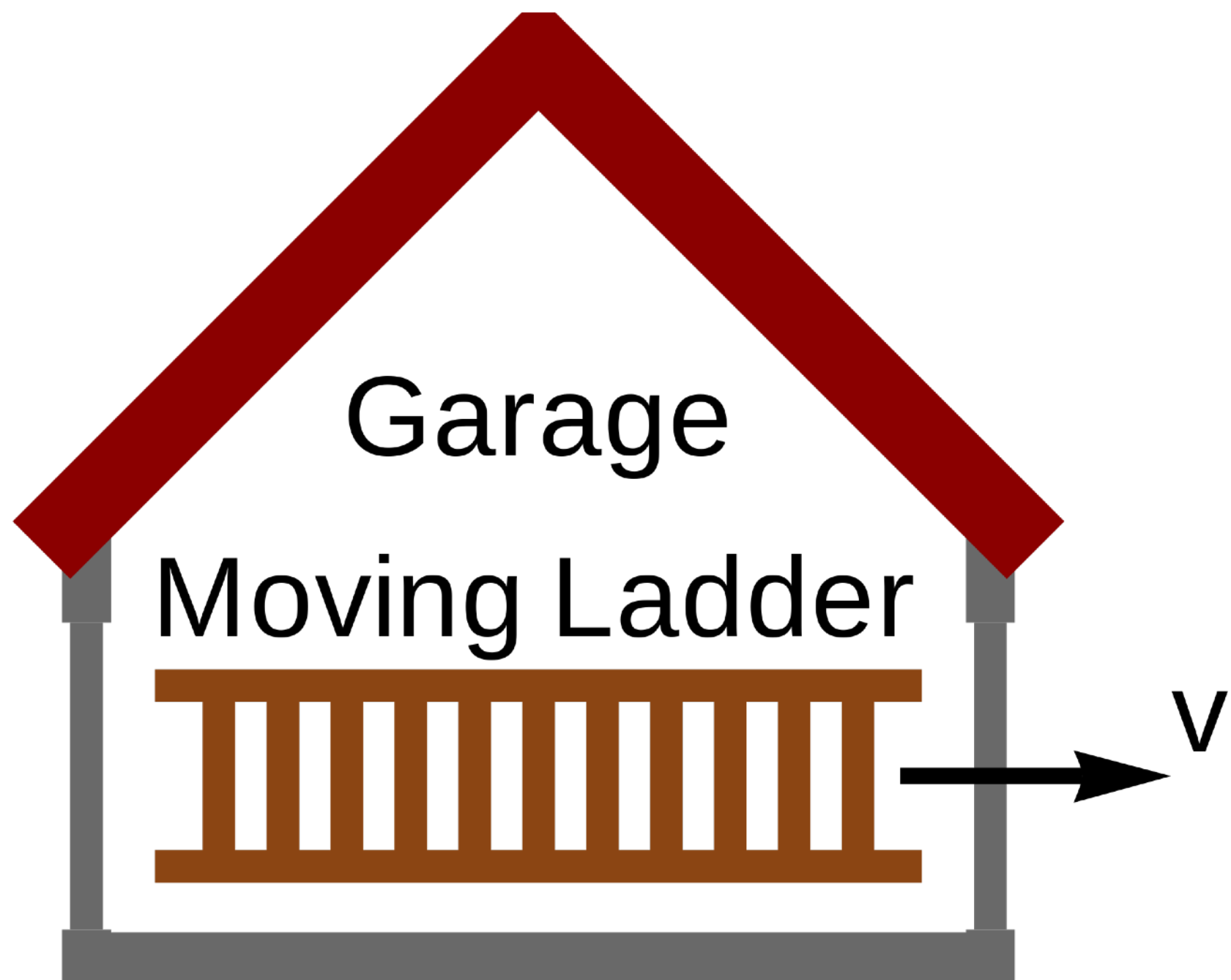
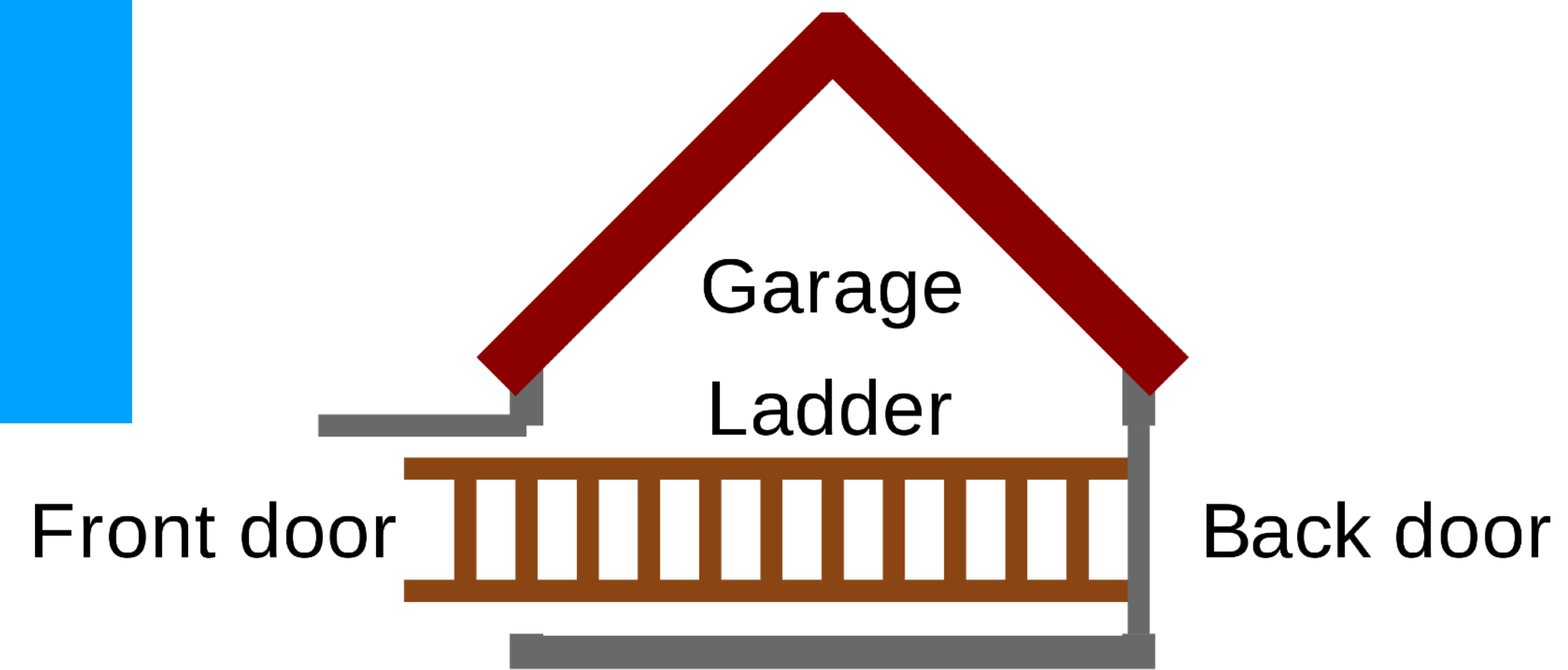
Время

Пространство-время

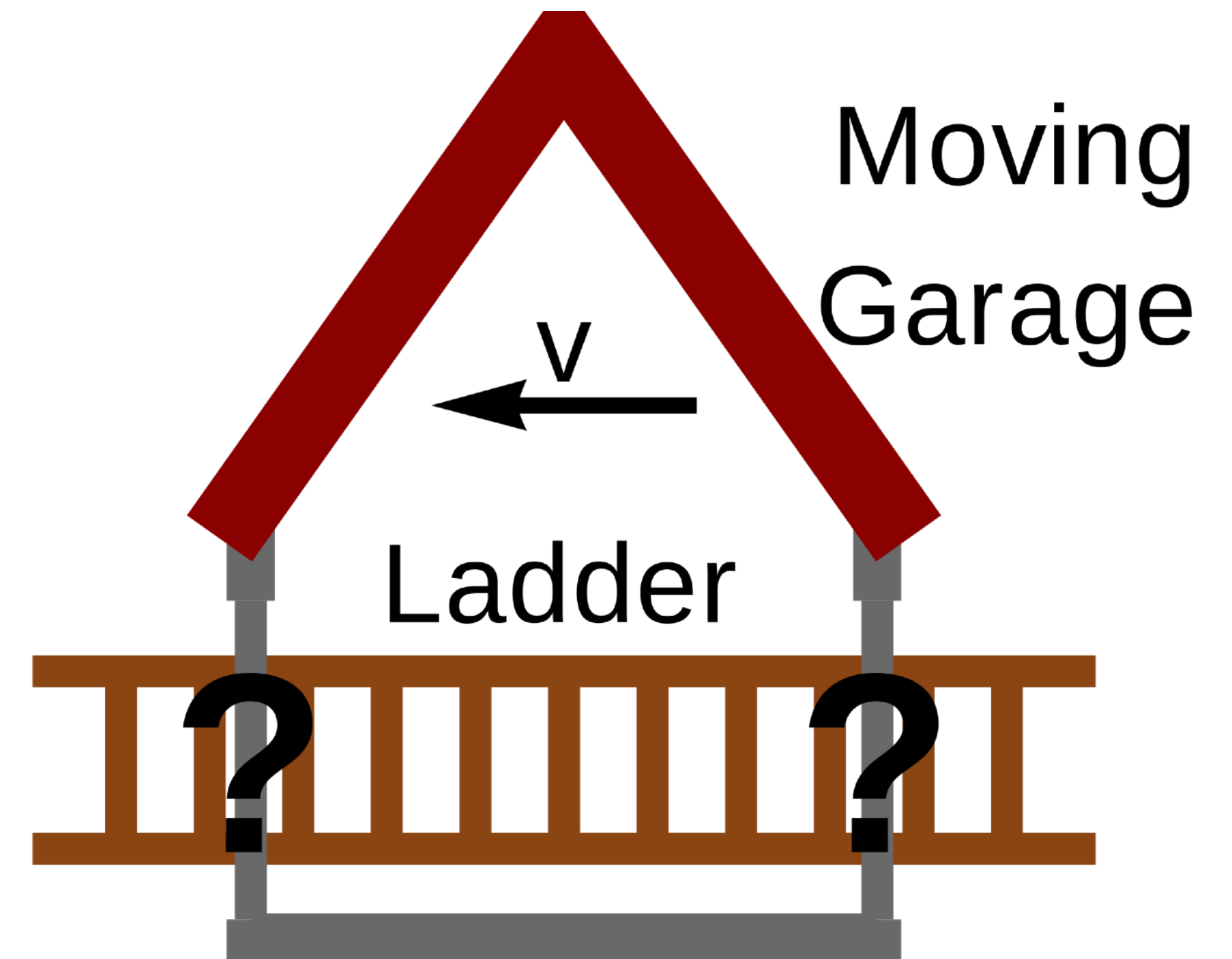
Важные следствия

- Время в движущейся системе замедляется
- Размер тела вдоль движения сокращается
- Одновременность событий относительна
- Скорость света — максимально возможная в природе
- Связь массы и энергии $E = mc^2$
 - Ядерная энергетика
- Основа всех современных теорий

Парадокс с лестницей и гаражом



Источник рисунков на слайде: википедия



Гараж покоится,
лестница движется

Гараж движется,
лестница покоится

**Пространство и время
объединяются в пространственно-
временной континуум**

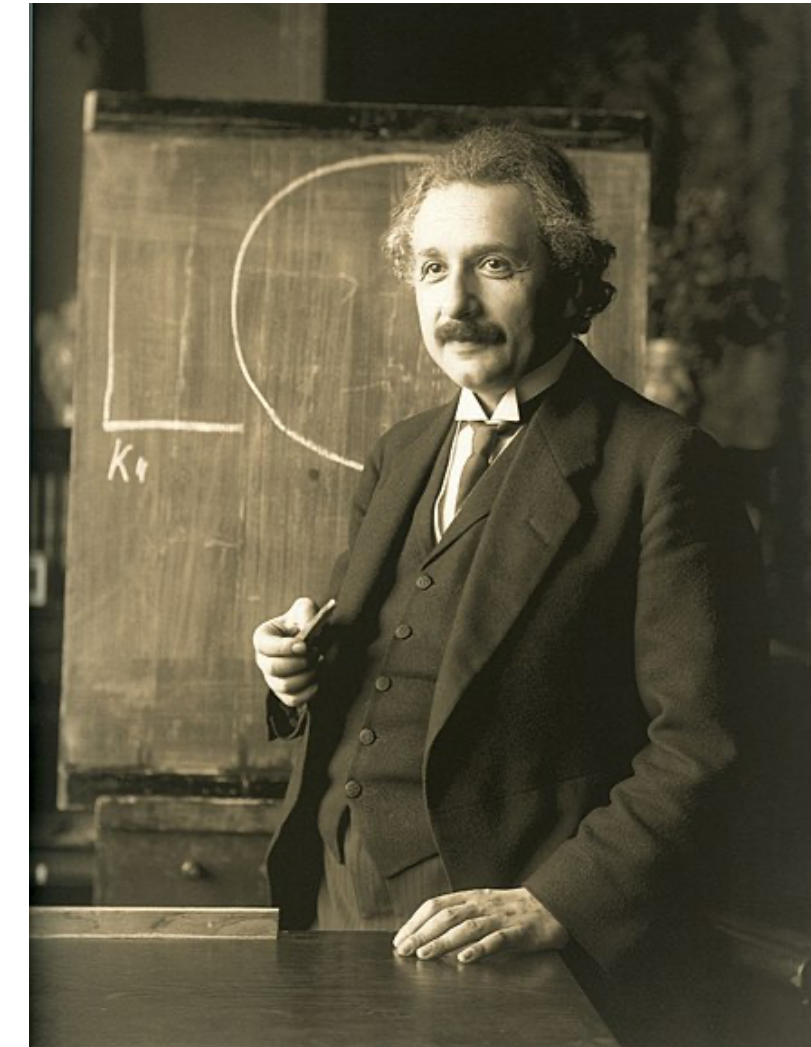
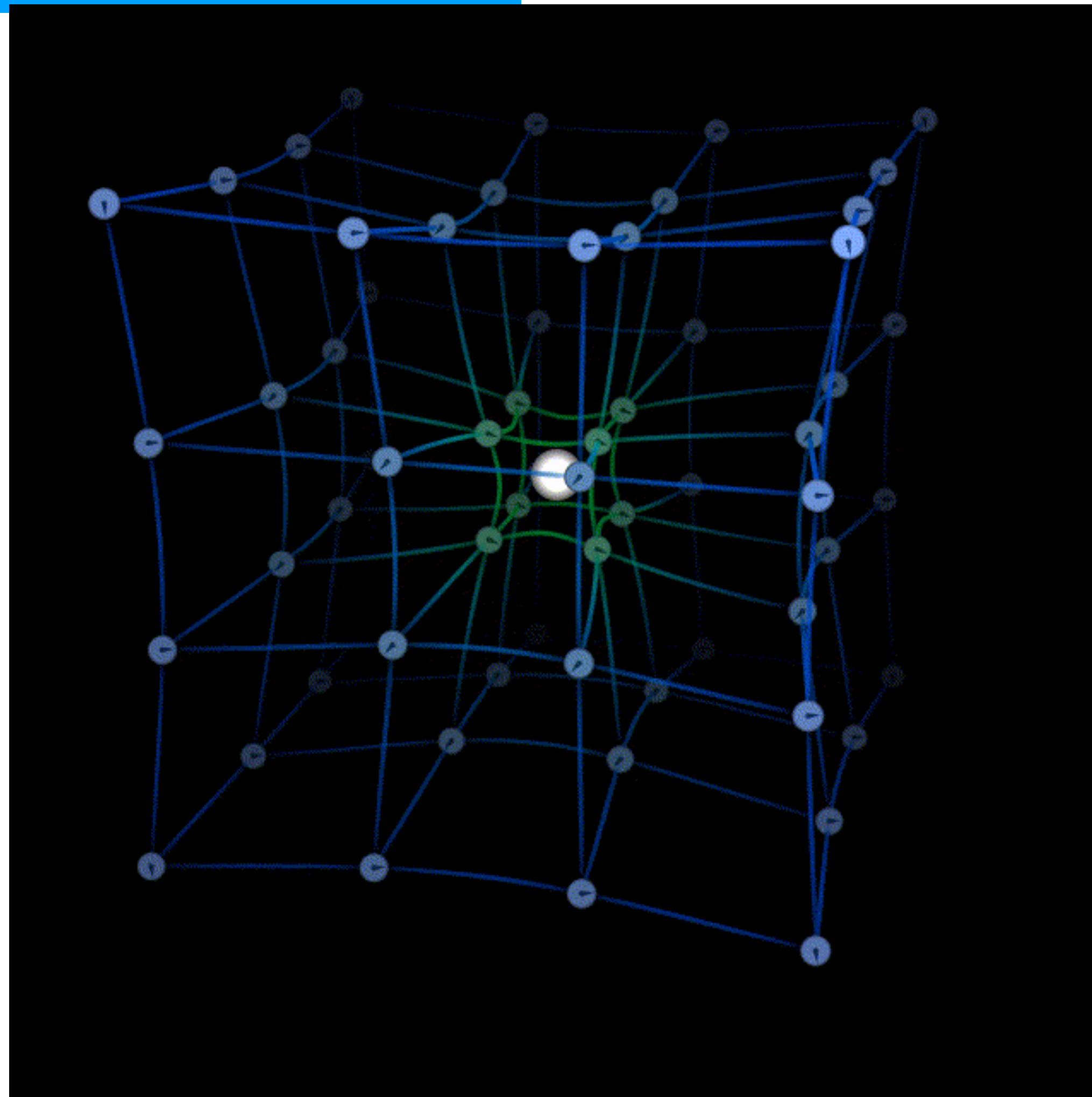
Общая теория относительности

Интеллектуальная революция

2

1915

- В ОТО энергия (масса, импульс, напряжения) искривляет пространство-время
- Следствия:
 - Время вблизи источника энергии течет медленнее
 - гравитационное линзирование
 - отклонение света
 - черные дыры/сингулярности
 - гравитационные волны



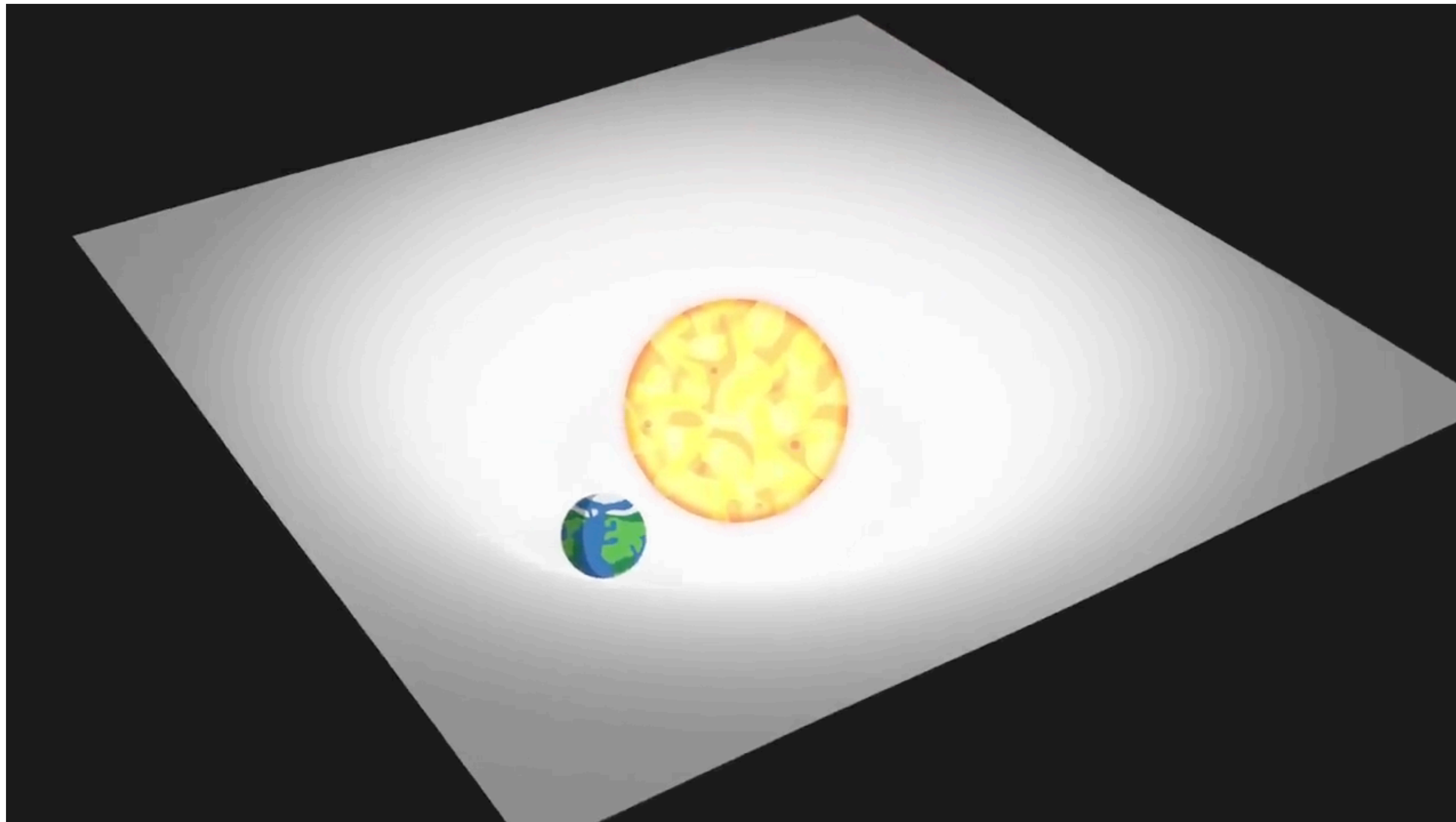
Эйнштейн

- **СТО:**

Пространство-время — единая фоновая линейка для физических процессов

- **ОТО:**

Пространство-время — динамическая структура, формируемая и искажаемая энергией

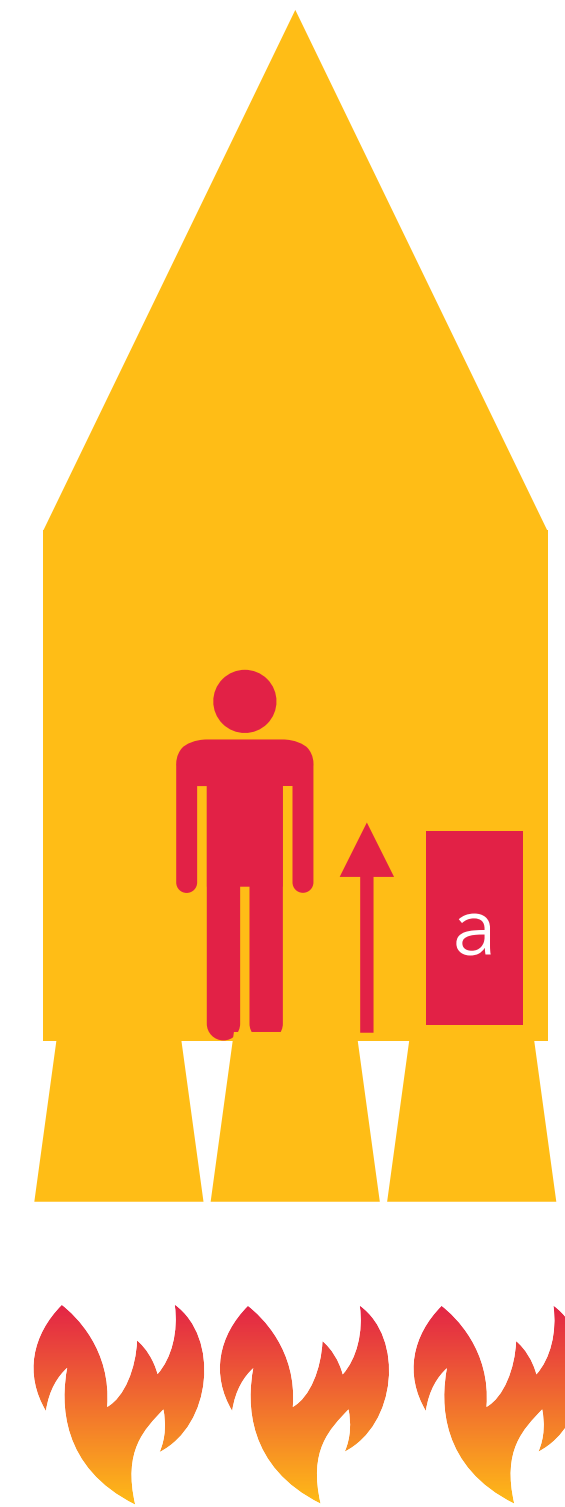


**Почему время замедляется
рядом с массивным телом?**

Постулат ОТО

Ускорение и гравитация тождественны

Если $g=a$, то эффект действия гравитации и ускорения одинаков (для точечного тела)

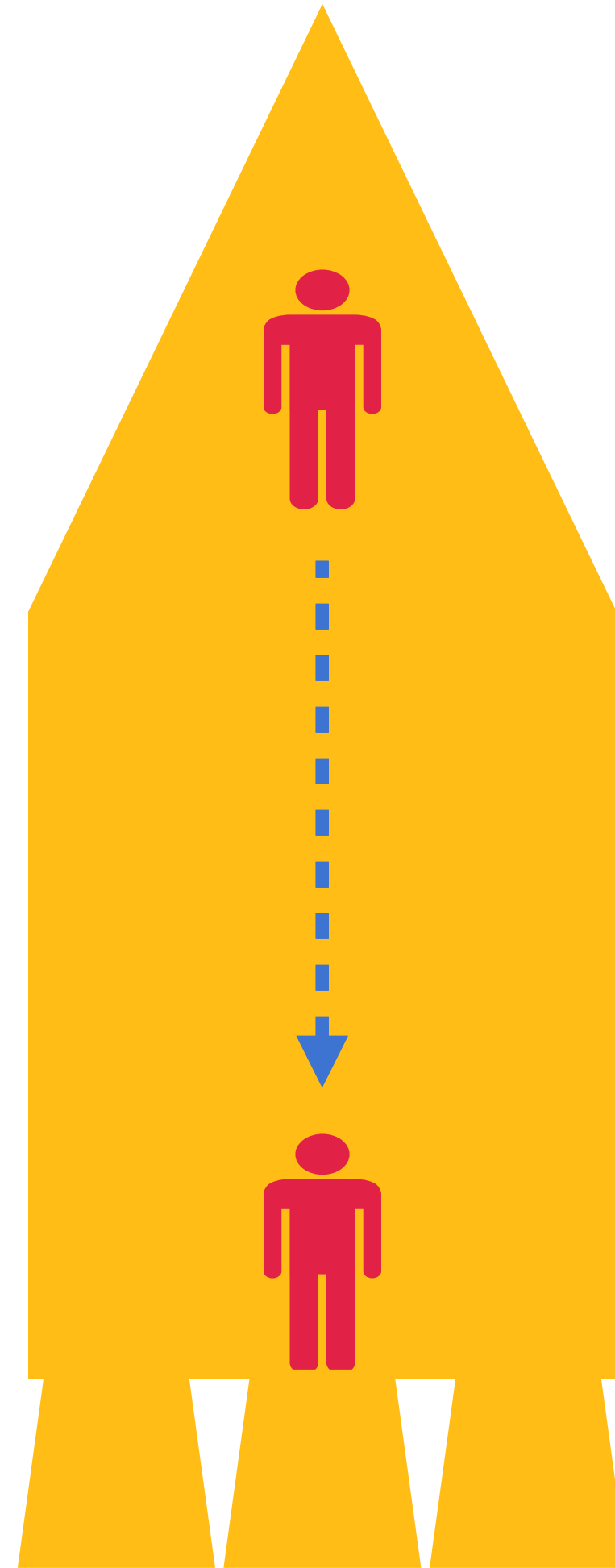


Замедление времени

Ускорение и гравитация тождественны

Посылает сигнал с интервалом $\Delta t = 1$

Принимает сигнал и измеряет его интервал Δt



$$\Delta t = 1 \text{ сек}$$

$$\Delta t = 1 \text{ сек}$$

Замедление времени

Ускорение и гравитация тождественны

Часы нижнего наблюдателя замедляются

Посылает сигнал с интервалом $\Delta t = 1$

$$\Delta t = 1 \text{ сек}$$



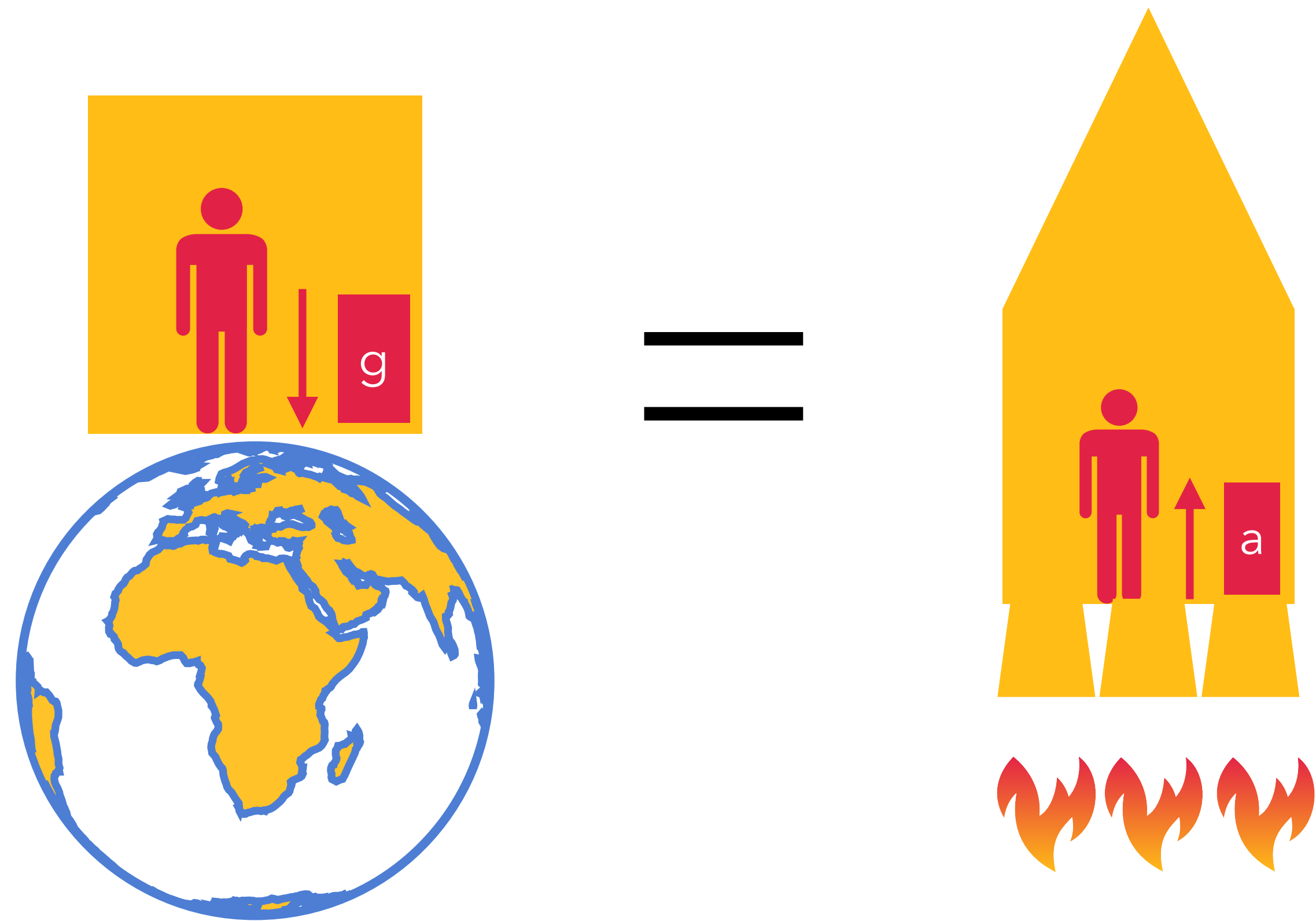
Принимает сигнал и измеряет его интервал Δt

$$\Delta t < 1 \text{ сек}$$



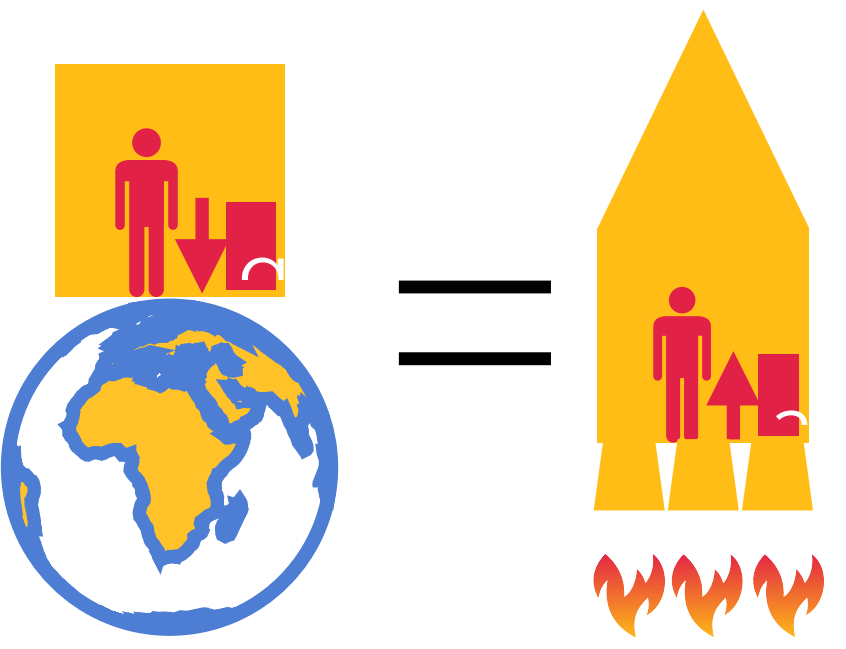
Замедление времени

Ускорение и гравитация тождественны



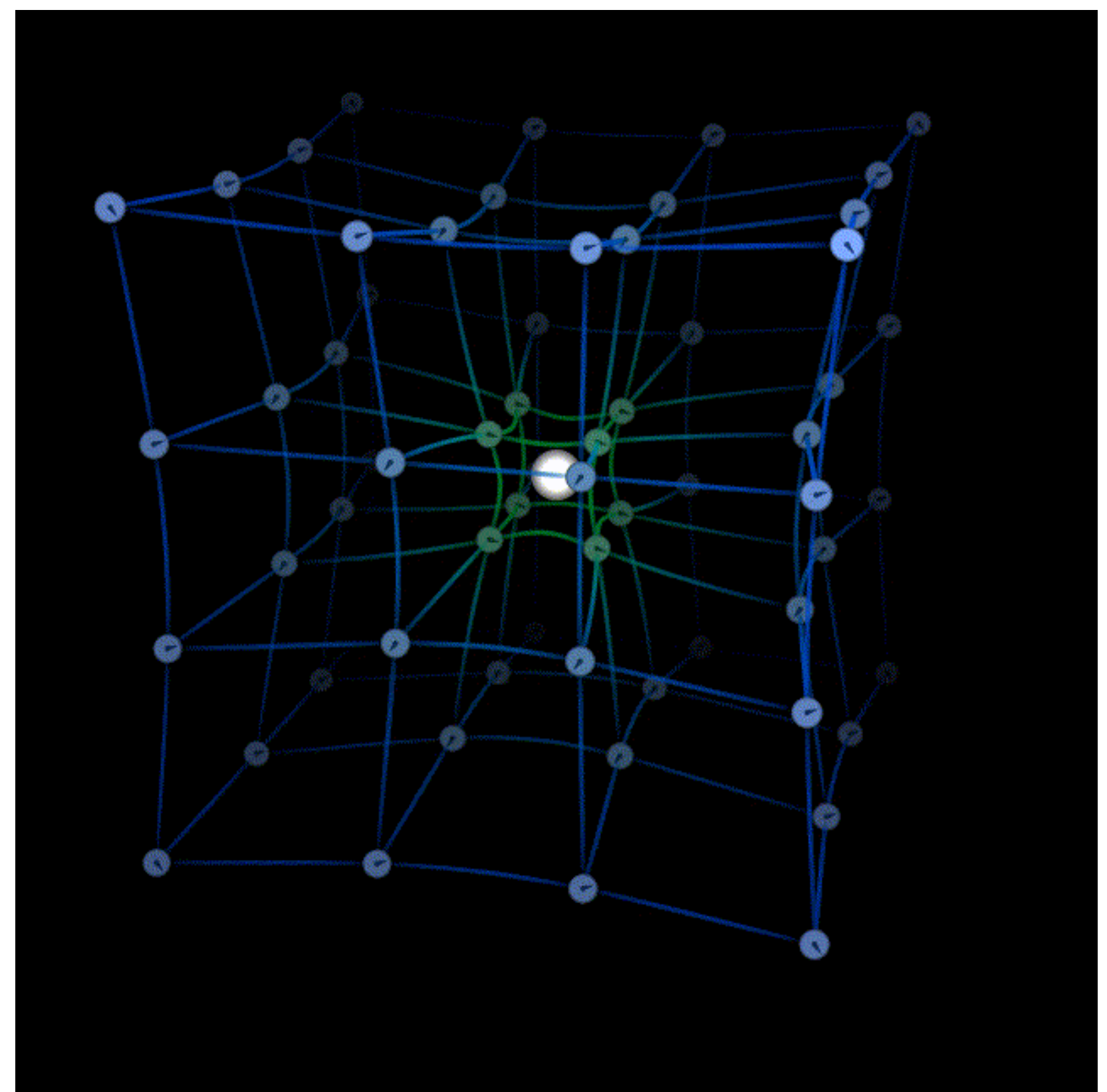
Замедление времени

Ускорение и гравитация тождественны



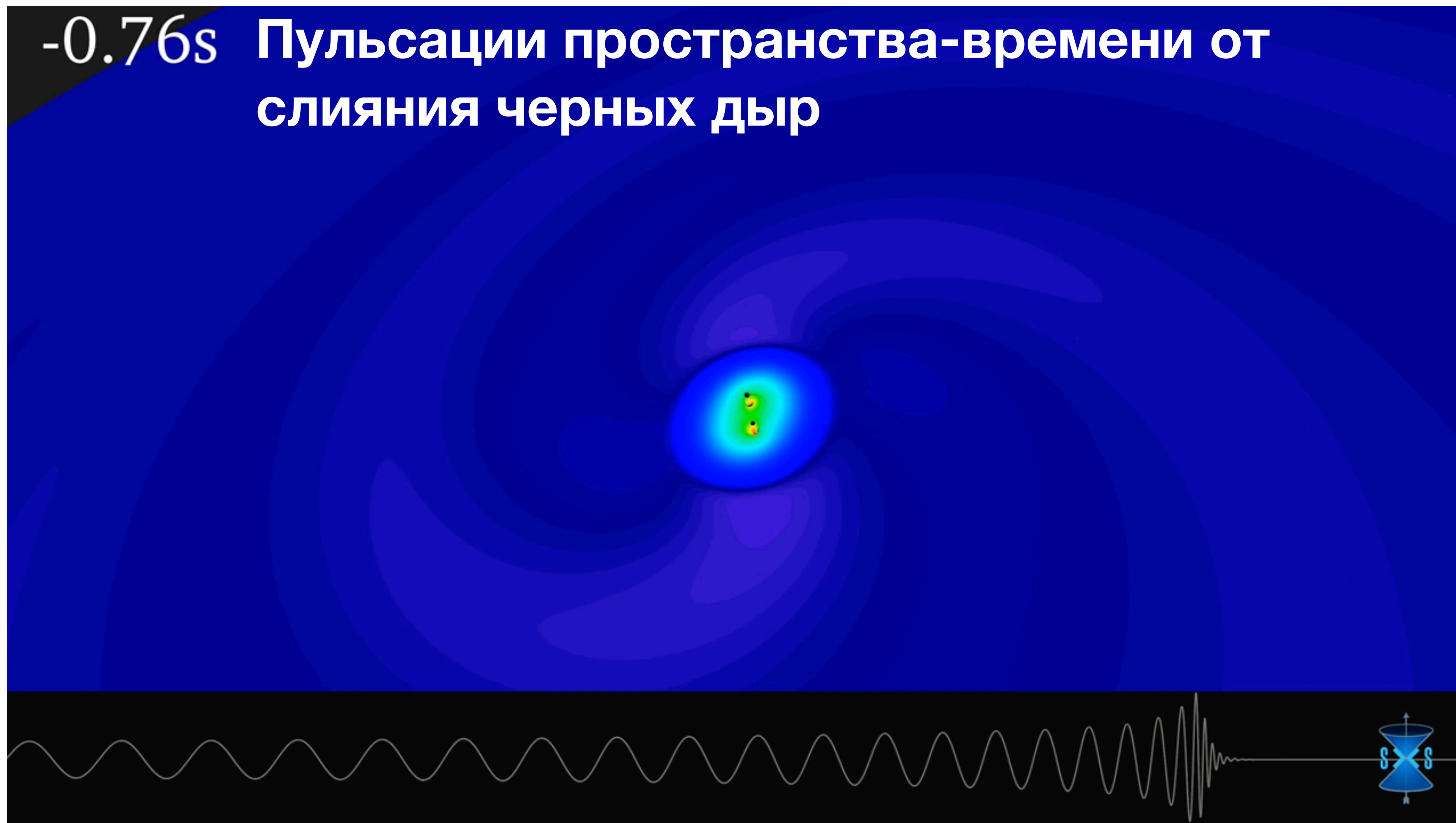
Время течет быстрее

Время течет медленнее



2015. Открытие гравитационной волны

-0.76s Пульсации пространства-времени от слияния черных дыр



Источник
рисунков на
слайде: LIGO

Квантовая механика

Интеллектуальная революция

3

1896. Открытие радиоактивности

«На небосклоне физики только два облака: парадоксы эфира и парадокс излучения черного тела». Лорд Кельвин

Анри Беккерель и Мария Склодовская-Кюри открыли спонтанную радиоактивность, обнаружив новое излучение солей урана. НП 1903

Представление древних греков о неделимости атома оказалось неверным

«В этой области почти всё уже открыто, и всё, что остаётся — заделать некоторые не очень важные пробелы».

Филипп Жолли Макс Планку (1878) о перспективах физики



Соль урана

Черная бумага



Металлический крест

Фотопленка

Тень от крестика

1897. Открытие электрона

1859. Плюккер открыл катодные лучи. Они отклоняются магнитным полем

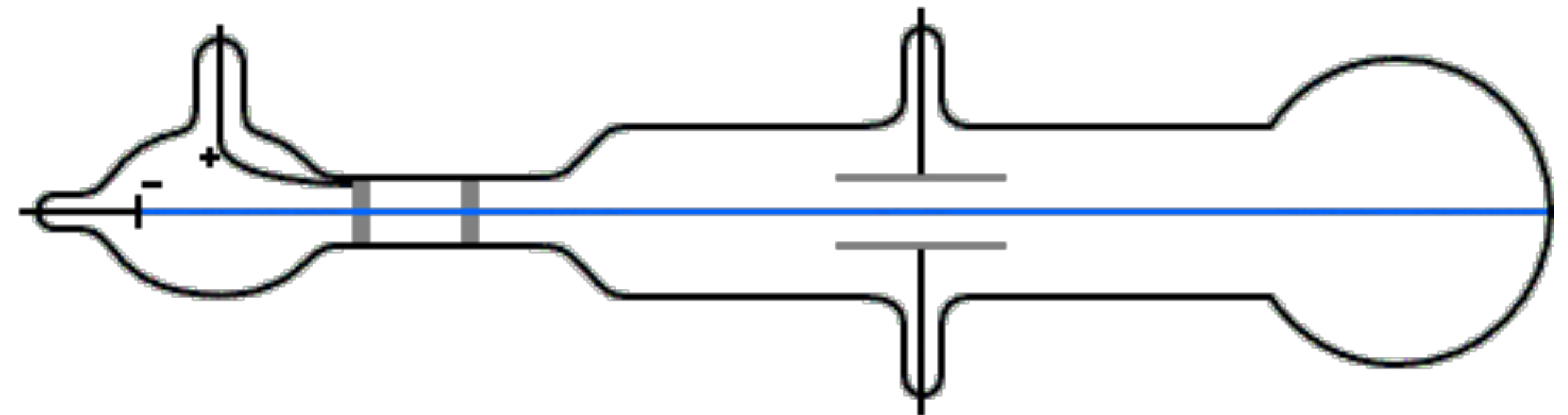
Две гипотезы:

1. «Лучистая материя» = электрически заряженные атомы
2. «Эфирные волны» = новая форма электромагнитного излучения

1897. Дж. Дж. Томсон измерил отношение заряд/масса частиц, в 1800 легче водорода

Частицы несут заряд, который не зависит от породившего их материала

1906. НП Дж. Дж. Томсону



1900. Первый квант энергии

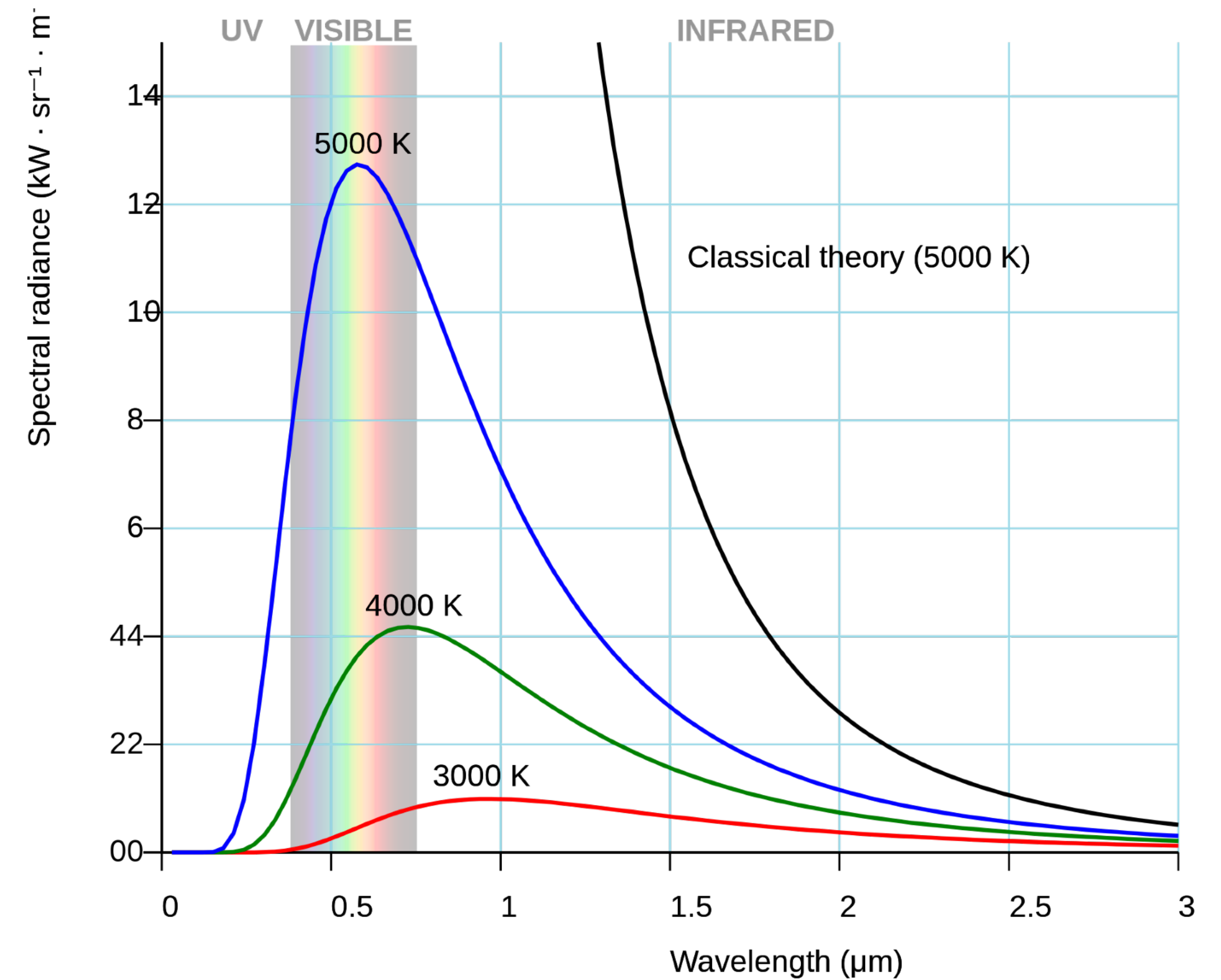
Классическая физика:
ультрафиолетовая катастрофа в
излучении абсолютно черного
тела

1899. Планк, избегая слов «атомы» и «молекулы», вывел формулу Вина, хорошо описывающую эксперимент

Новые эксперименты не описывались формулой Вина при малых частотах. Планк получил новую формулу при произвольной гипотезе о связи энтропии и энергии осцилляторов

1900. Планк, «в акте отчаяния» предположил, что энергия осциллятора $E = nE_0$, $E_0 = h\nu$

Никто не обратил внимания на революционность сделанной им гипотезы



1918. НП Планку

1905. Теория фотоэффекта

Год чудес

Теория Максвелла: энергия эм. излучения \propto интенсивности.

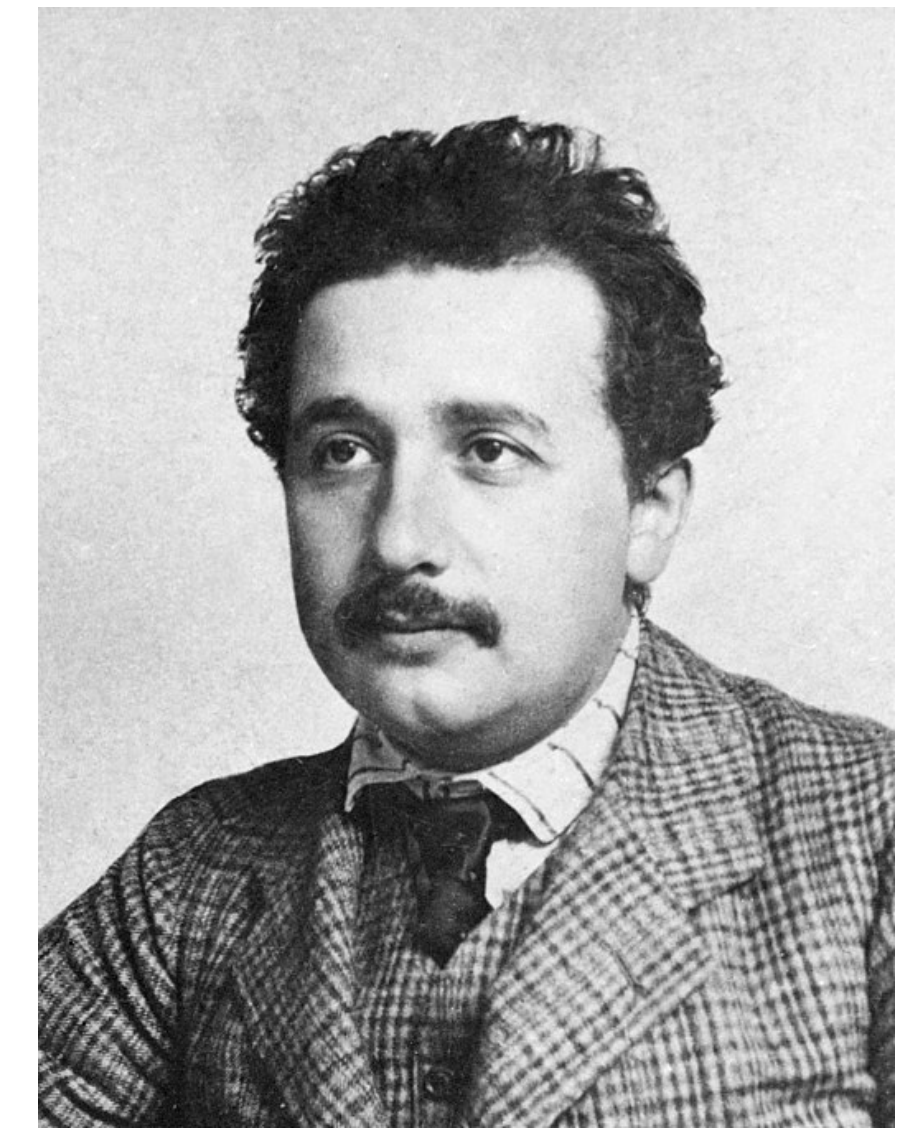
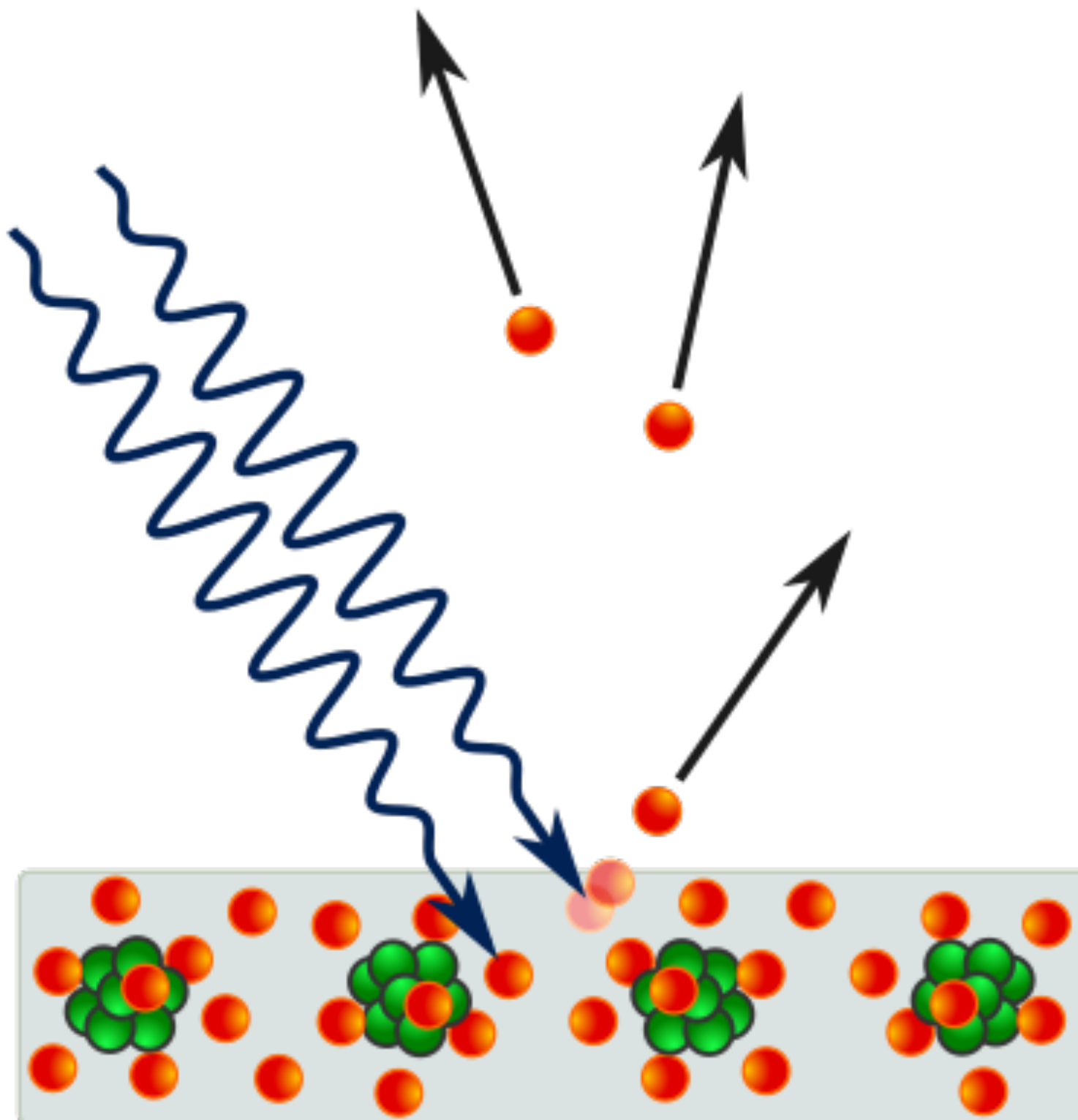
\hookrightarrow Максимальная энергия электронов $T_{max} \propto$ интенсивности.

Эксперимент: $T_{max} \propto$ частоте излучения.

Эйнштейн:

Излучение состоит из квантов и

$T_{max} = h\nu$ – работа.



Альберт Эйнштейн. НП 1921

1921. НП А. Эйнштейну за теорию фотоэффекта

1909. Измерение заряда электрона



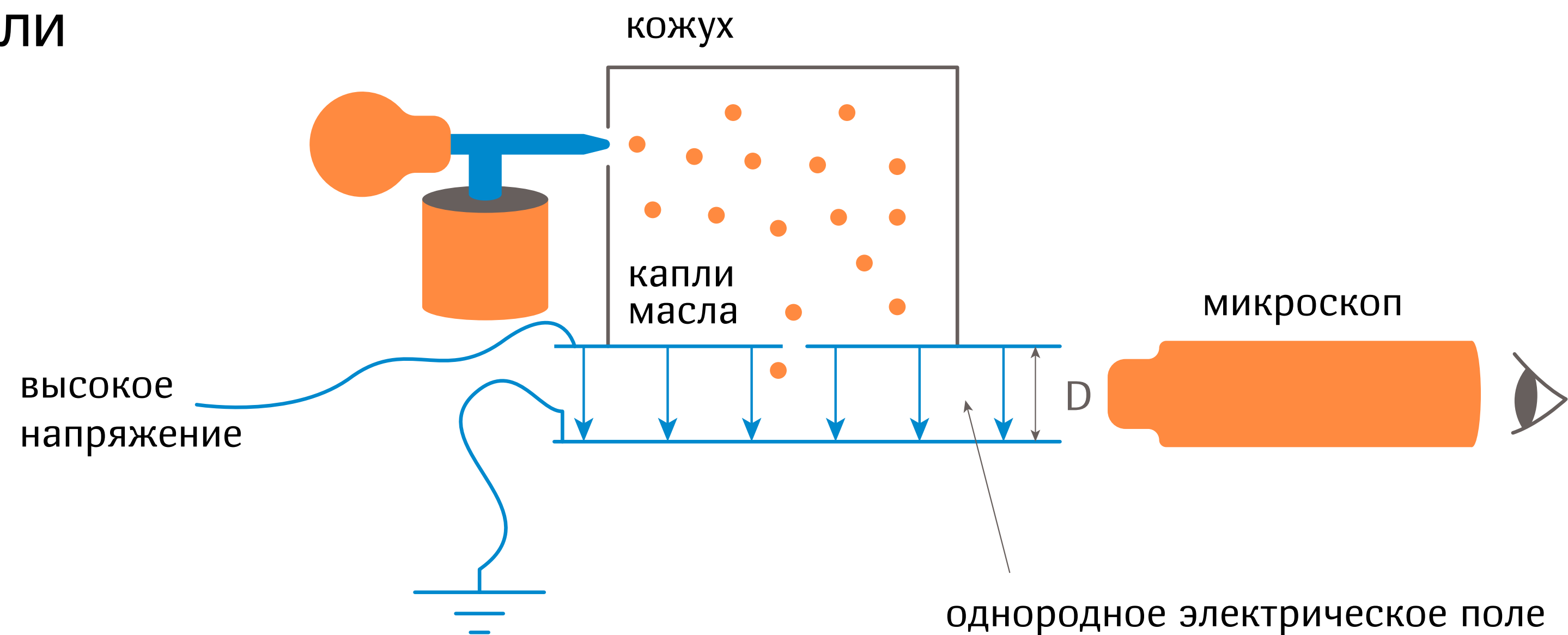
Роберт Милликен. НП 1923

- Рентгеновское излучение ионизует воздух и заряжает капли масла

- Равномерное движение в зазоре в воздухе без электрического поля позволяет определить массу капли

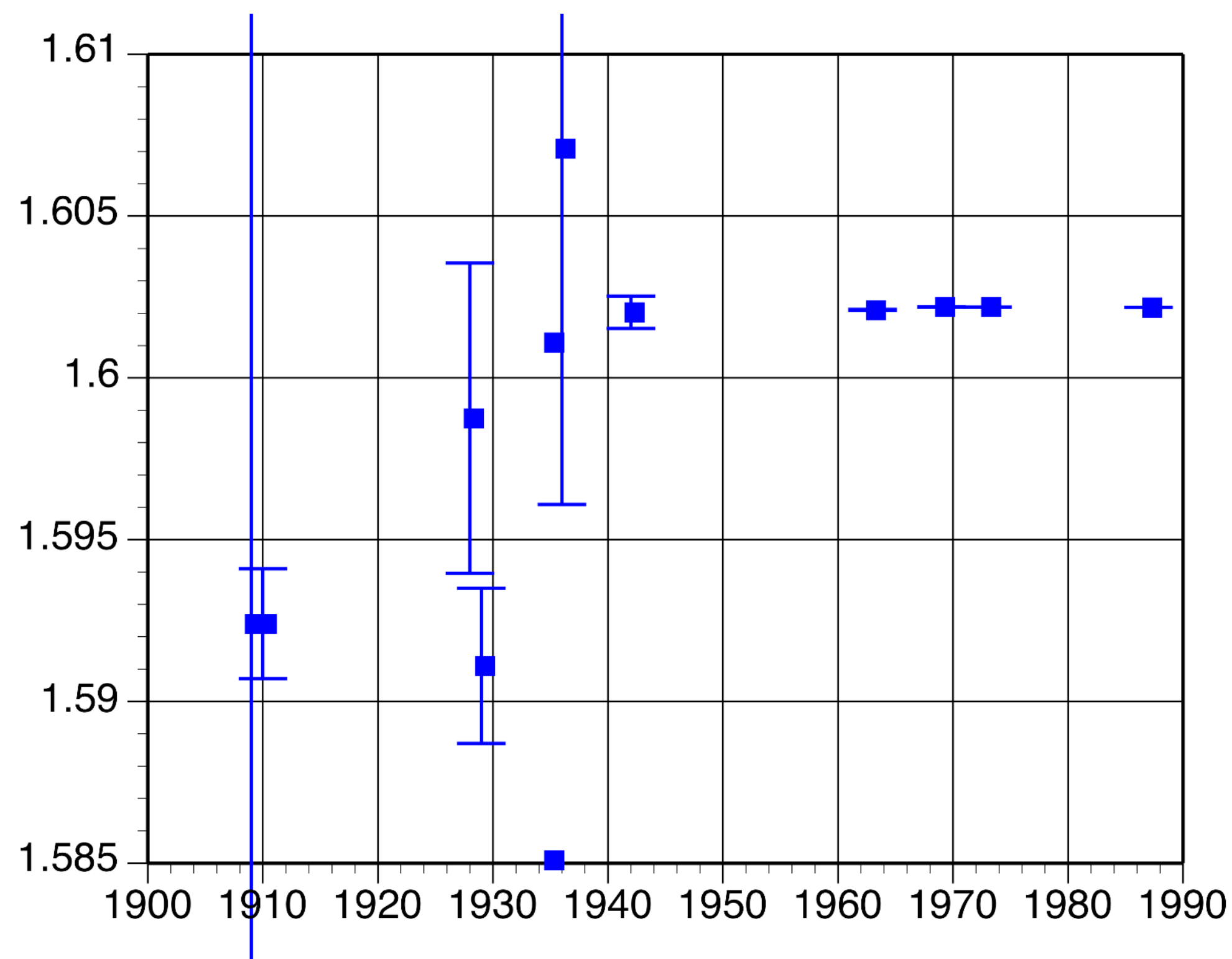
- Включение электрического поля позволяет определить заряд

- Эксперимент: заряд = $n \cdot e_0$. Так Р. Милликен и Харви Флетчер измерили заряд электрона e_0



1909. Измерение заряда электрона

- e_0 , измеренный Милликеном, немного неправильный из-за ошибки в вязкости воздуха. Больше 30 лет понадобилось физикам, чтобы исправить этот результат



После смерти Флетчера выяснилось, что Милликен заставил его отказаться от соавторства в качестве условия получения докторской степени.

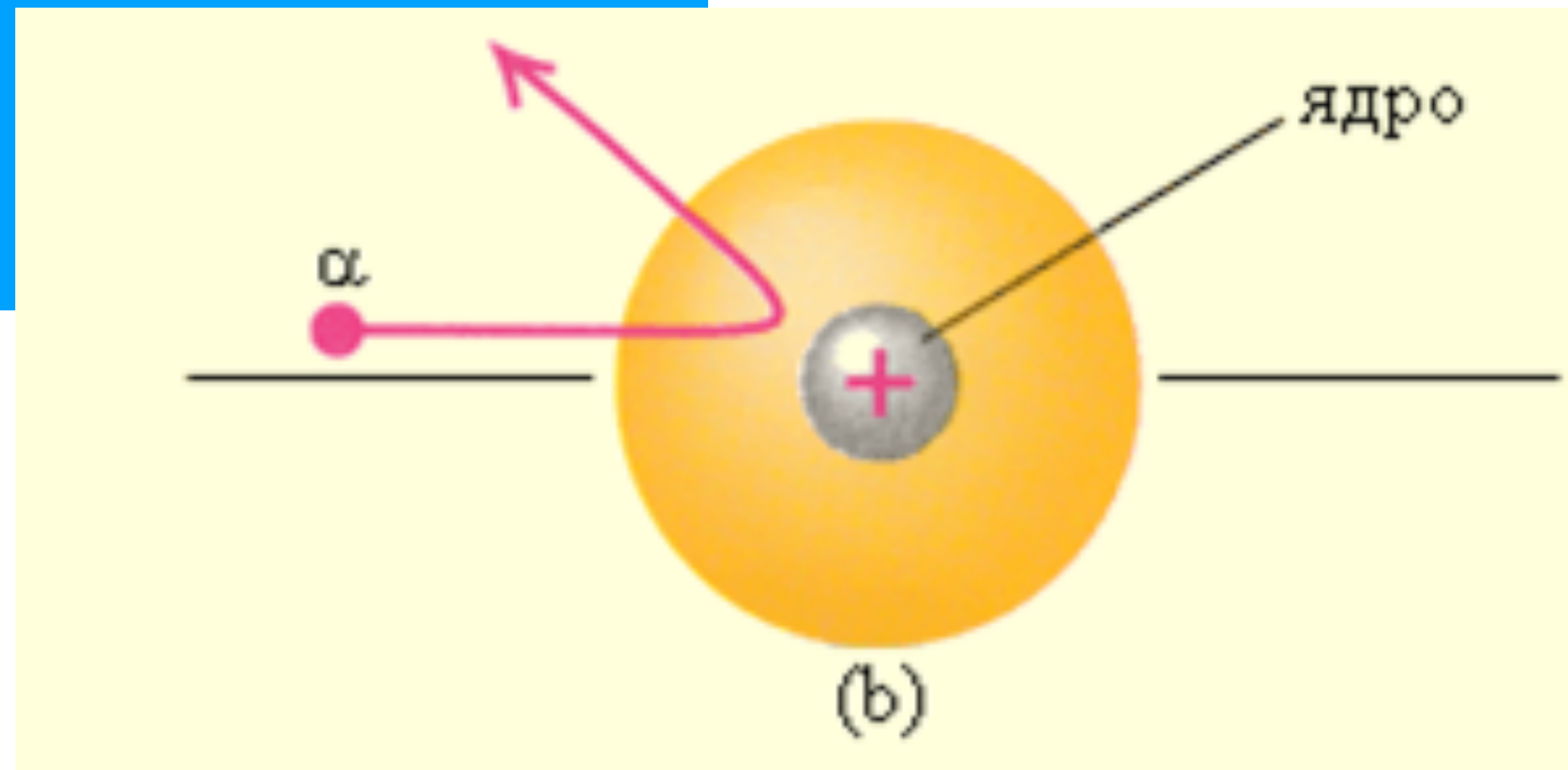
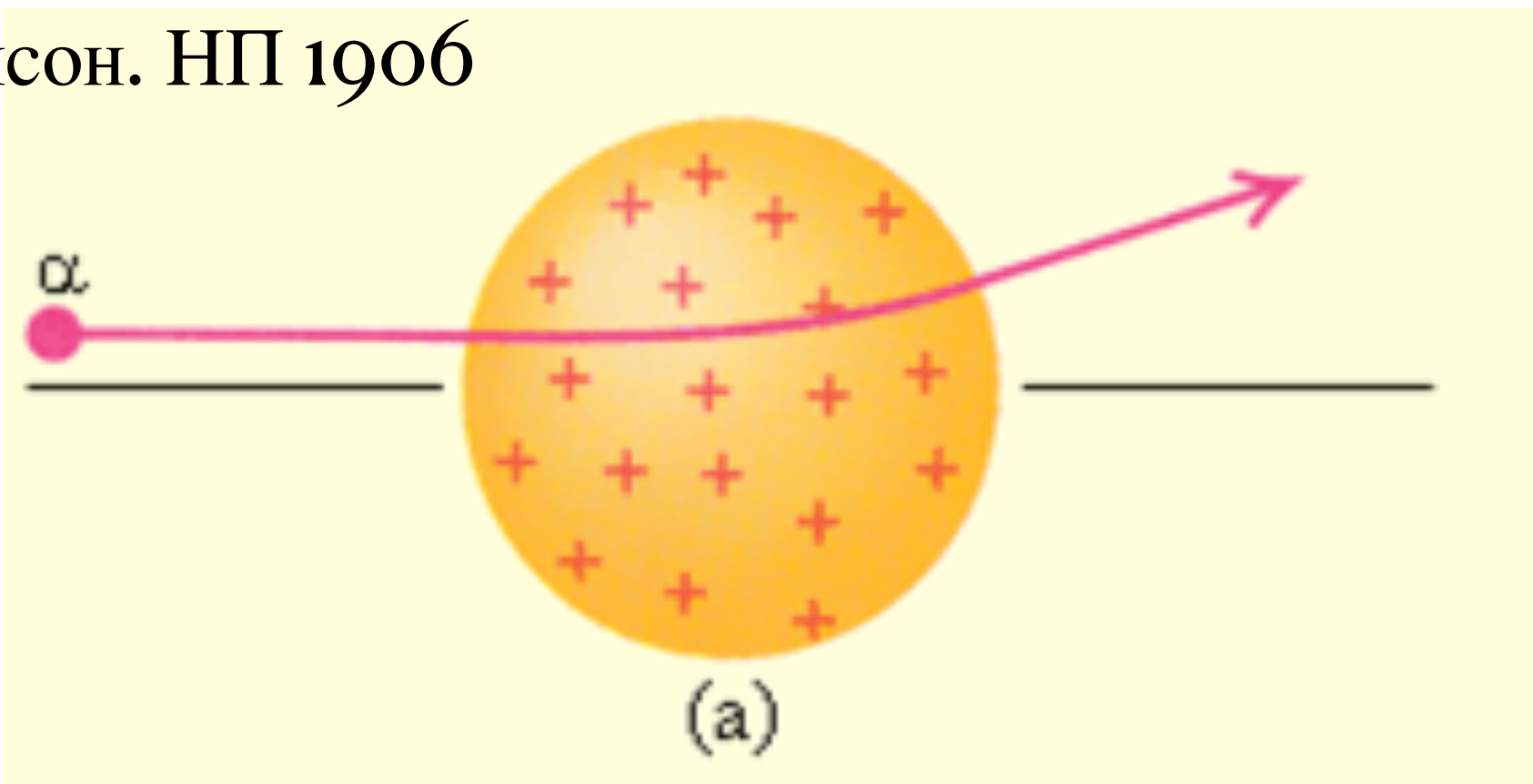
Флетчер придумал установку, собрал ее, провел и проанализировал эксперименты и написал 4 работы

1911. Открытие атомного ядра

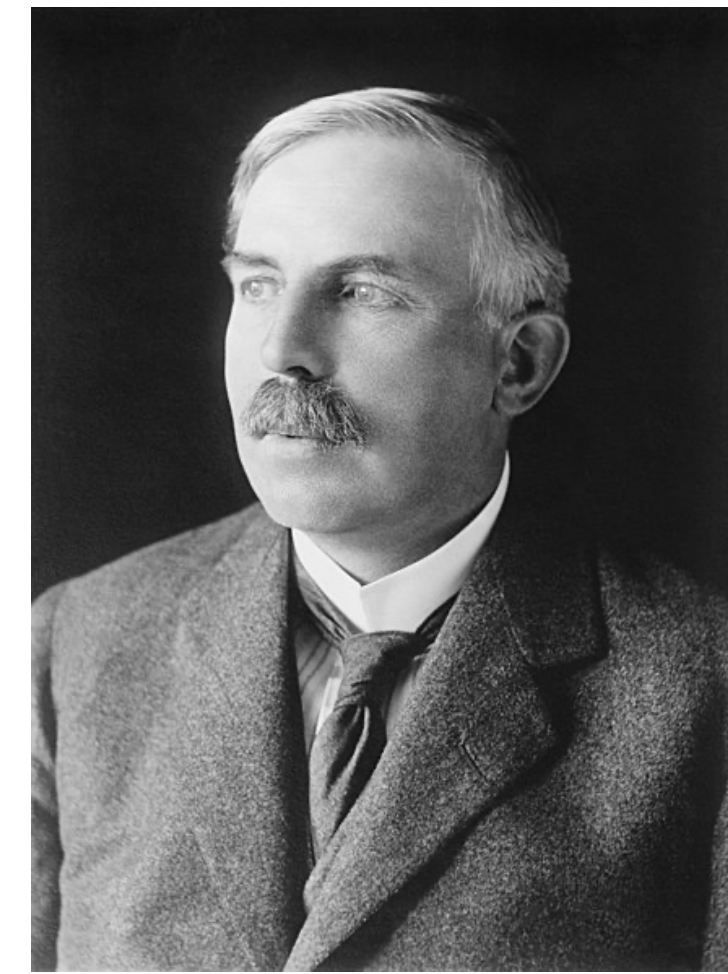


- 1897: открытие электрона
- 1904: модель атома (пудинг)
- 1906: Нобелевская Премия (НП)

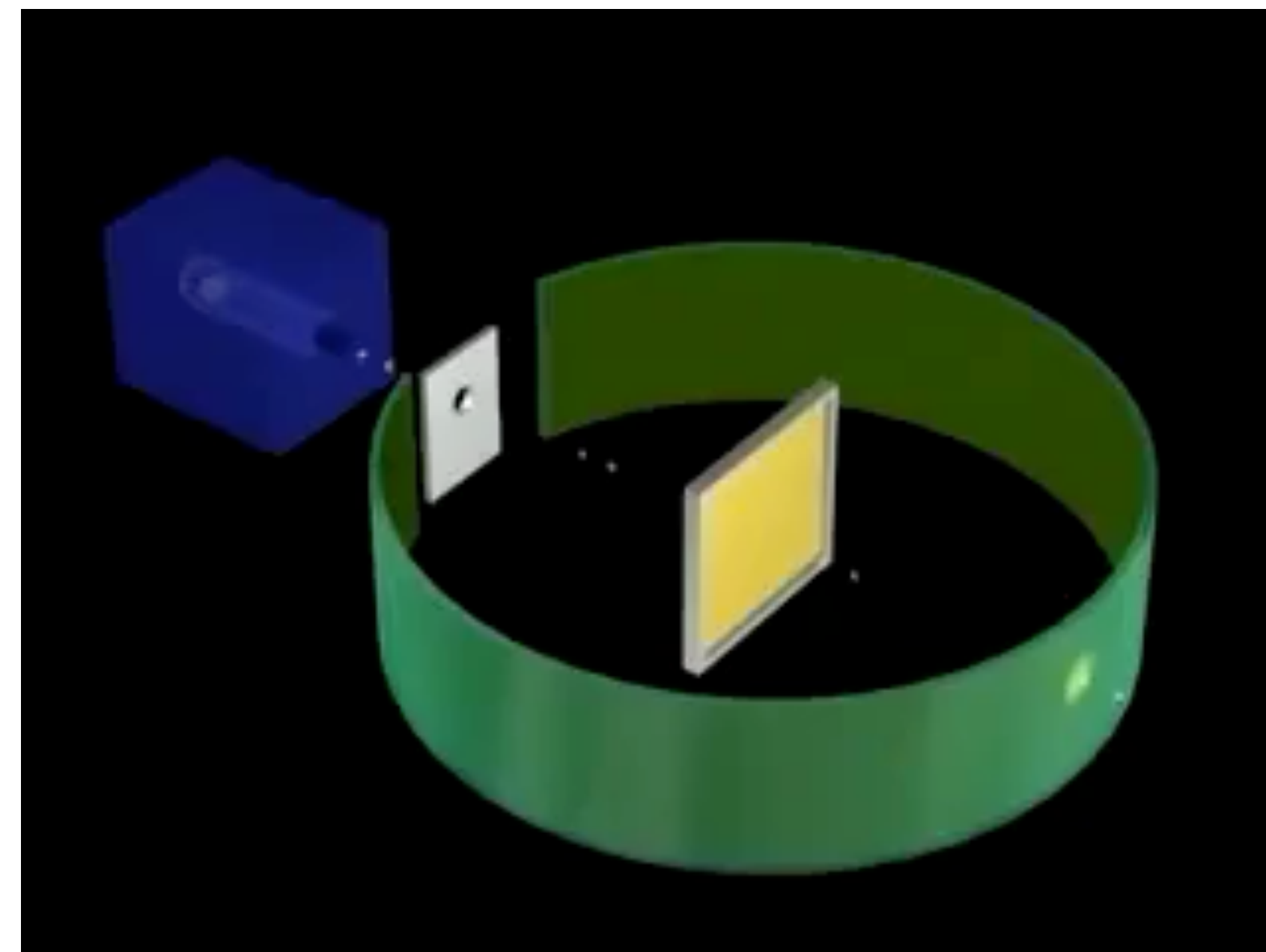
Томпсон. НП 1906



Эксперимент
Гейгера и Марсдена



Резерфорд



Почему электрон не падает на ядро?



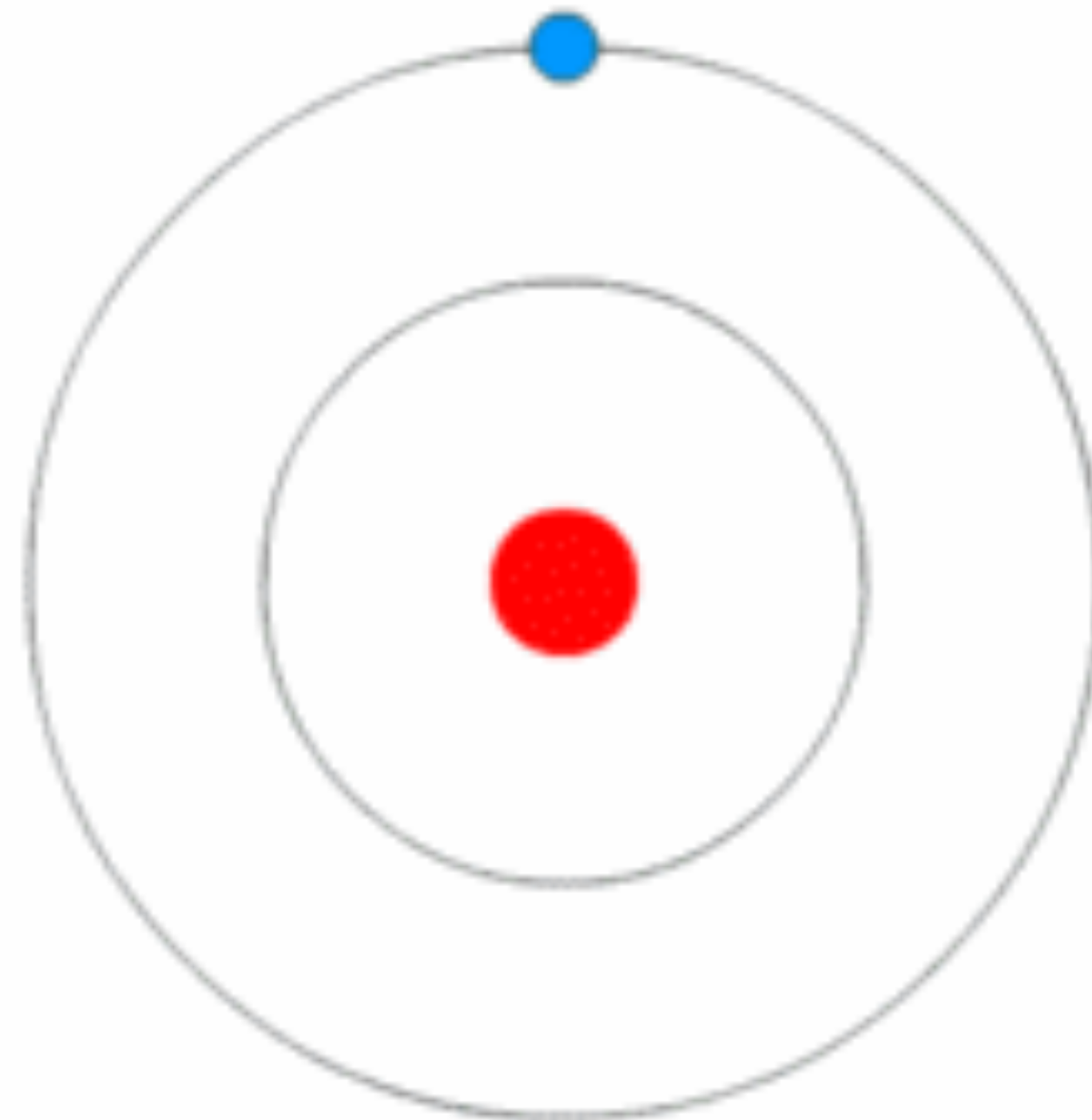
1913. Квантовая теория атомных спектров



Нильс Бор. НП 1922

1913: модель атома

1922: НП по физике



Гипотезы модели Бора

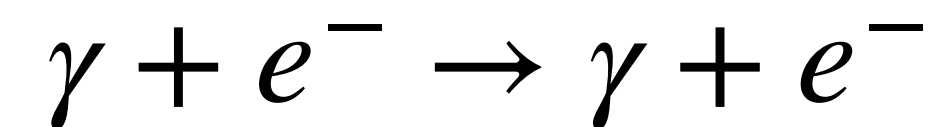
- Электроны могут вращаться только по строго определенным орбитам
- Каждой орбите отвечает определенная энергия (**квантование энергии**)
- Переход между орбитам происходит скачком при поглощении или излучении фотона

Рождение старой квантовой механики

Планк, Бор, Зоммерфельд, ...

1923. Фотон существует

Артур Комптон экспериментально доказал реальность кванта электромагнитной волны — фотона:



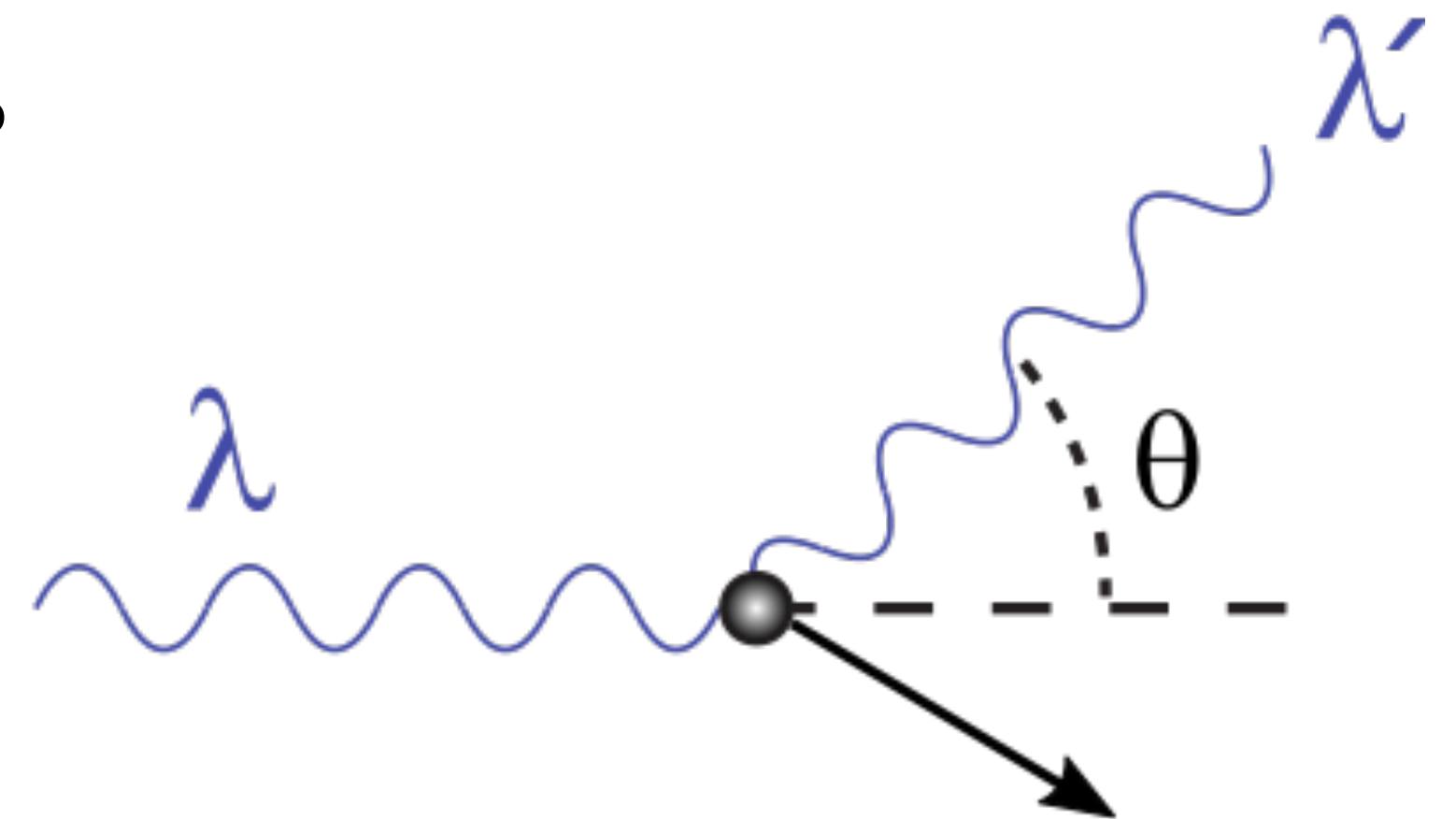
Измерив частоту рассеянного излучения.

Теория Максвелла: частоты падающего и рассеянного излучения одинаковы

Эксперимент: частота рассеянного излучения уменьшилась

Квантовая теория:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$



1925. Принцип Паули



Атомы с четным числом электронов более стабильны

1919. Химик Ленгмюр предположил, что электроны сгруппированы в виде оболочек вокруг ядра

1922. Нильс Бор предположил, что стабильные оболочки соответствуют 2, 8, 18 электронам

1925. Вольфганг Паули формулирует *эмпирическое* правило:

«в одном состоянии может находиться только один электрон»

Паули ввел новое квантовое число с двумя состояниями. Гудсмит и Уленбек идентифицировали его как спин электрона.

1940. Паули доказал свое *эмпирическое* правило как результат «теоремы о связи спина со статистикой»

1945. НП Паули «за принцип Паули»

1925. Квантовые механики Гейзенберга и Шредингера

1925. Гейзенберг, Борн, Джордан создали *матричную квантовую механику*

1925. Шредингер создал *волновую квантовую механику*.

Питер Дебай Шредингеру: «**Шрёдингер, в данный момент вы не заняты никакой важной проблемой. Не могли бы вы доложить нам о докторской работе де Бройля, которая привлекла к себе определенное внимание?**»

1925. Дирак показал, что обе формулировки эквивалентны

1932. НП Гейзенбергу «за создание квантовой механики...»

1933. НП Дираку и Шредингеру «за открытие новых производительных форм атомной теории»

1954. НП Борну «за статистическую интерпретацию квантовой механики»

1925. Квантовые механики Гейзенберга и Шредингера



Гейзенберг

1925: матричная квантовая механика

1932: НП по физике

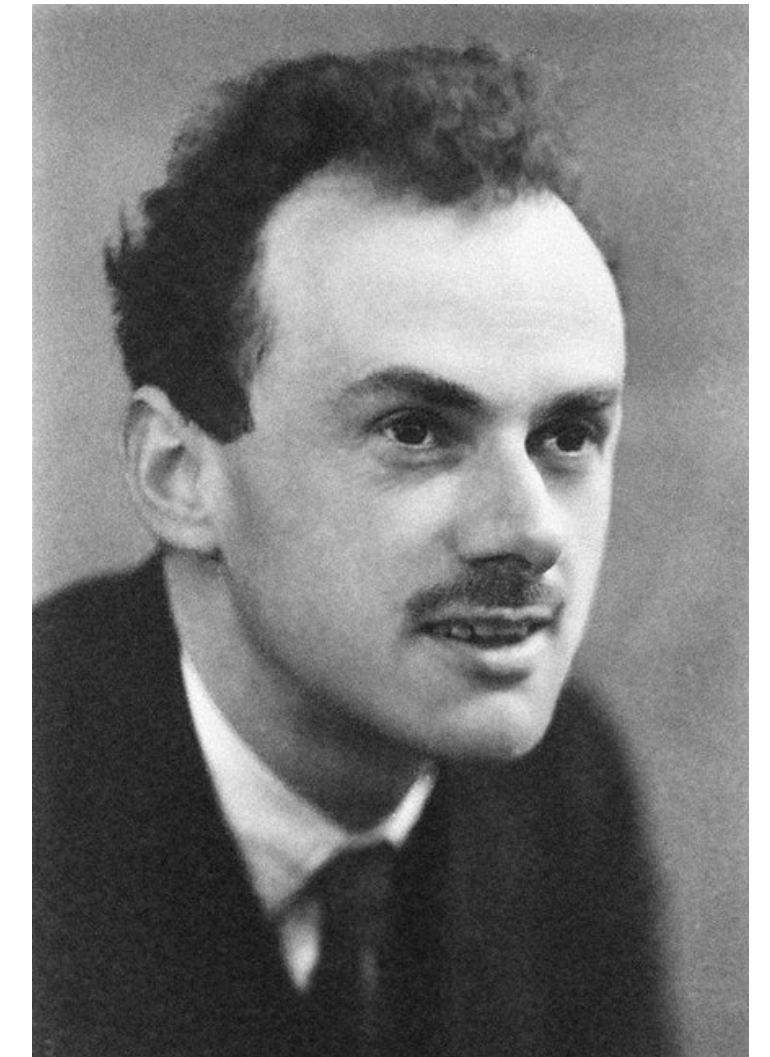


Шредингер

1926: волновая квантовая механика (уравнение Шредингера)

1933: НП по физике

Электрон не имеет определенной координаты.



Дирак

1928: уравнение Дирака

Показал эквивалентность теорий Гейзенберга и Шредингера

1933: НП по физике

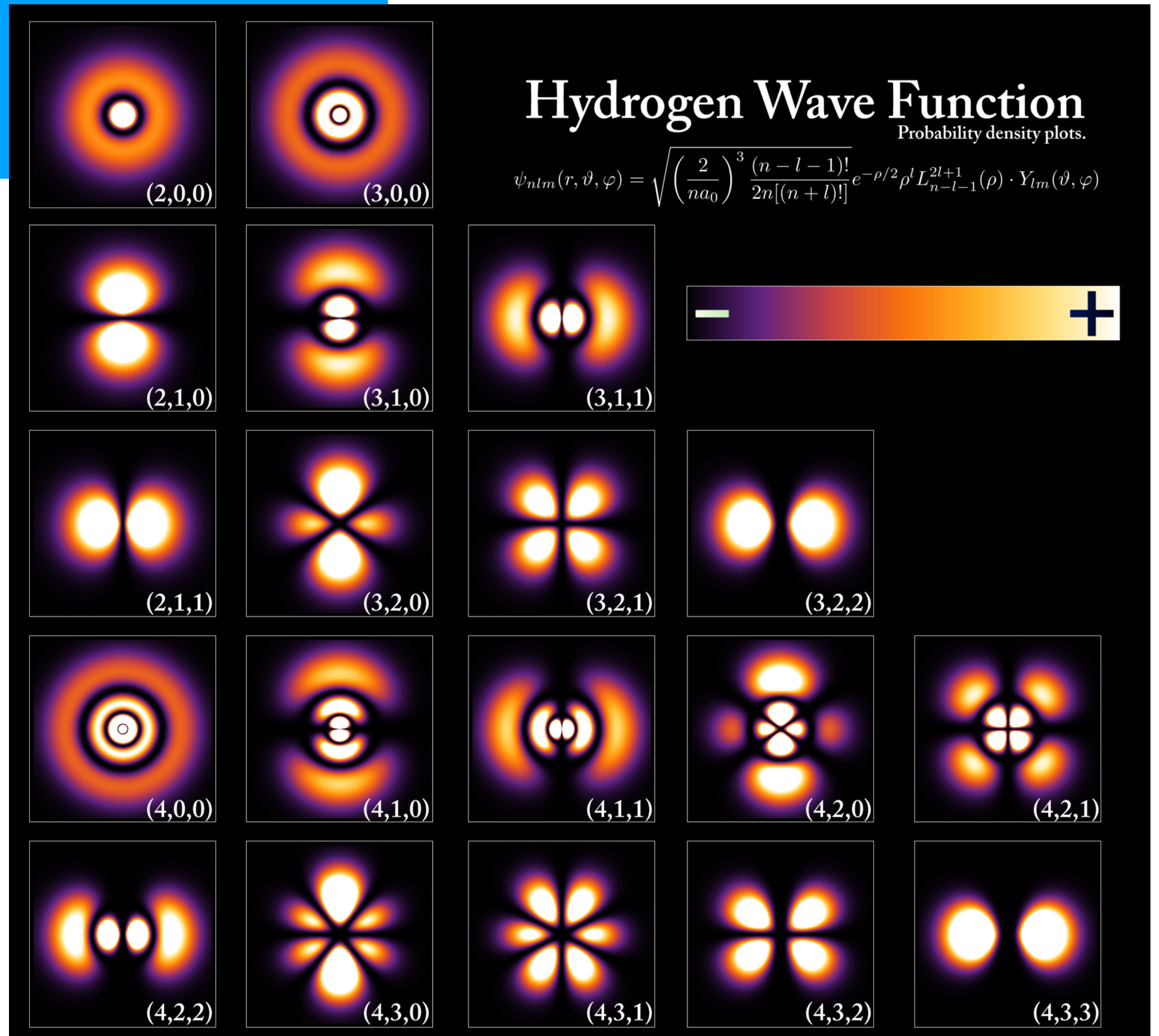
Положение электрона в атоме водорода

- **Положение электрона**

- Плотность вероятности $|\psi(t, x)|^2$

- **Энергия электрона**

- Дискретна (зависит от целых чисел)



Откуда в КМ неопределенность?

А. Эйнштейн: Бог не играет в кости

○ Уравнение Шредингера

- Дифференциальное уравнение с начальными условиями $\psi(0,x)$.
- Его решение детерминировано так же как и решения уравнений классической механики.
- Откуда взялись вероятности?

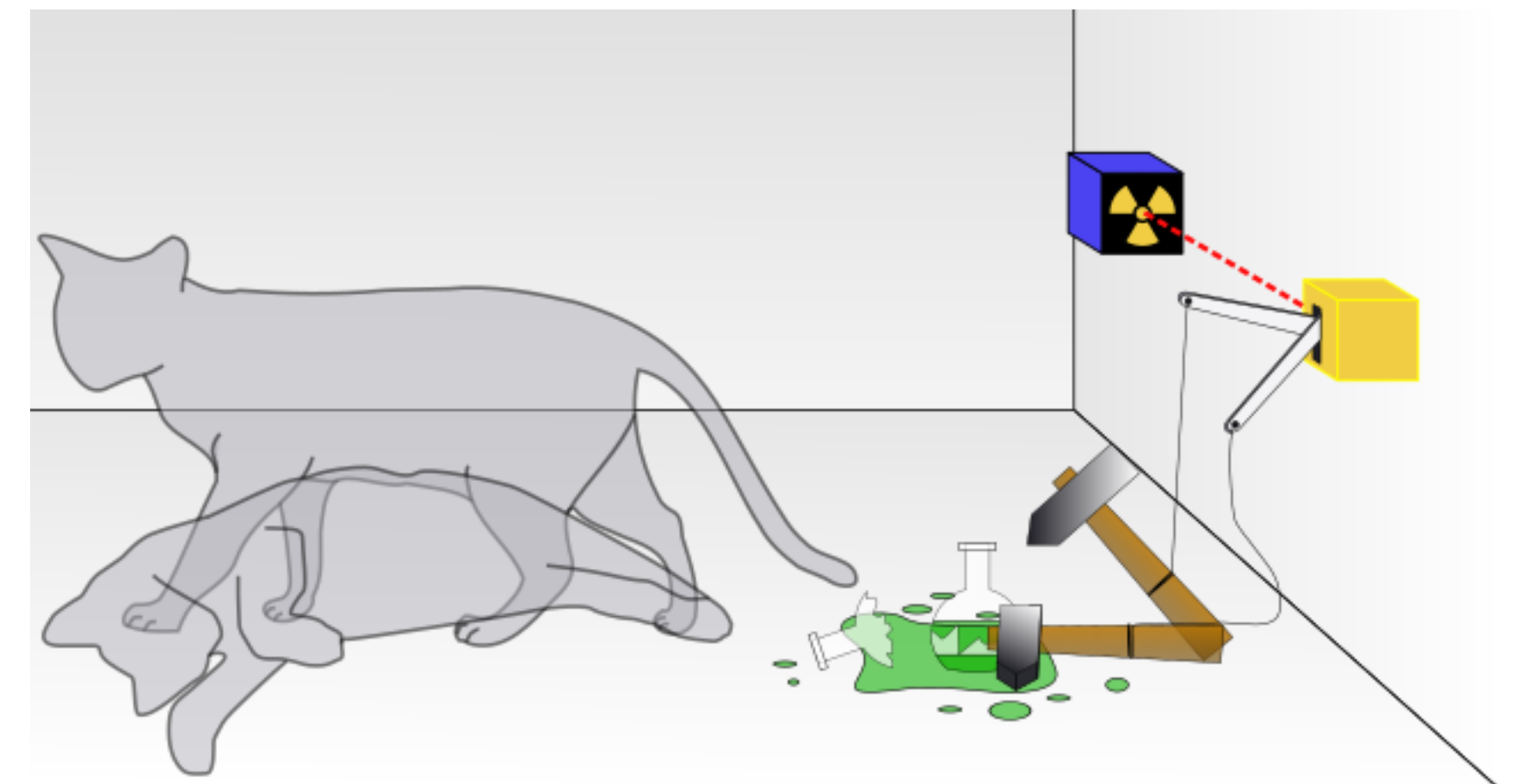
○ Измерение

- Макс Борн постулировал, что результат измерения — *случайная* величина

— **Проблема измерения** — самая противоречивая часть квантовой механики со многими парадоксами (кот Шредингера, EPR)

— До сих пор нет удовлетворительного решения проблемы измерения в КМ

— Множество интерпретаций



Электрон это волна



Дэвиссон (слева) и Гермер (справа)



Джордж Томсон

«Кто-то может почувствовать потребность сказать, что Томсон-отец был удостоен Нобелевской премии за то, что показал, что электрон — это частица, а Томсон-сын — за то, что показал, что электрон — это волна»

Моше Джеммер, историк науки

Электрон это волна

От открытия до наших дней

Диффракция электронов
важна в современных
электронных микроскопах

Diffraction of Cathode Rays by a Thin Film.

If a fine beam of homogeneous cathode rays is sent nearly normally through a thin celluloid film (of the order 3×10^{-6} cm. thick) and then received on a photographic plate 10 cm. away and parallel to the film, we find that the central spot formed by the undeflected rays is surrounded by rings, recalling in appearance the haloes formed by mist round the sun. A photograph so obtained is reproduced (Fig. 1). If the density of the plate is measured by a photometer at a number of points along a radius, and the intensity of the rays at these points found by using the characteristic blackening curve of the plate (see *Phil. Mag.*, vol. 1, p. 963, 1926), the rings appear as humps on the intensity-distance curves. In this way rings can be

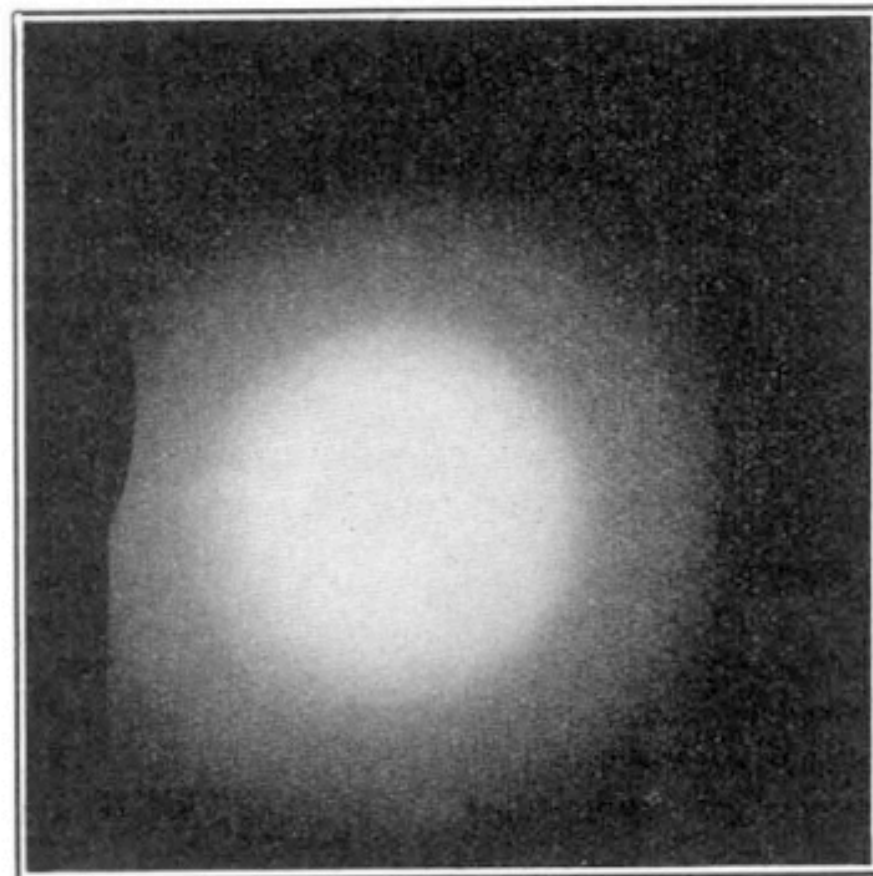
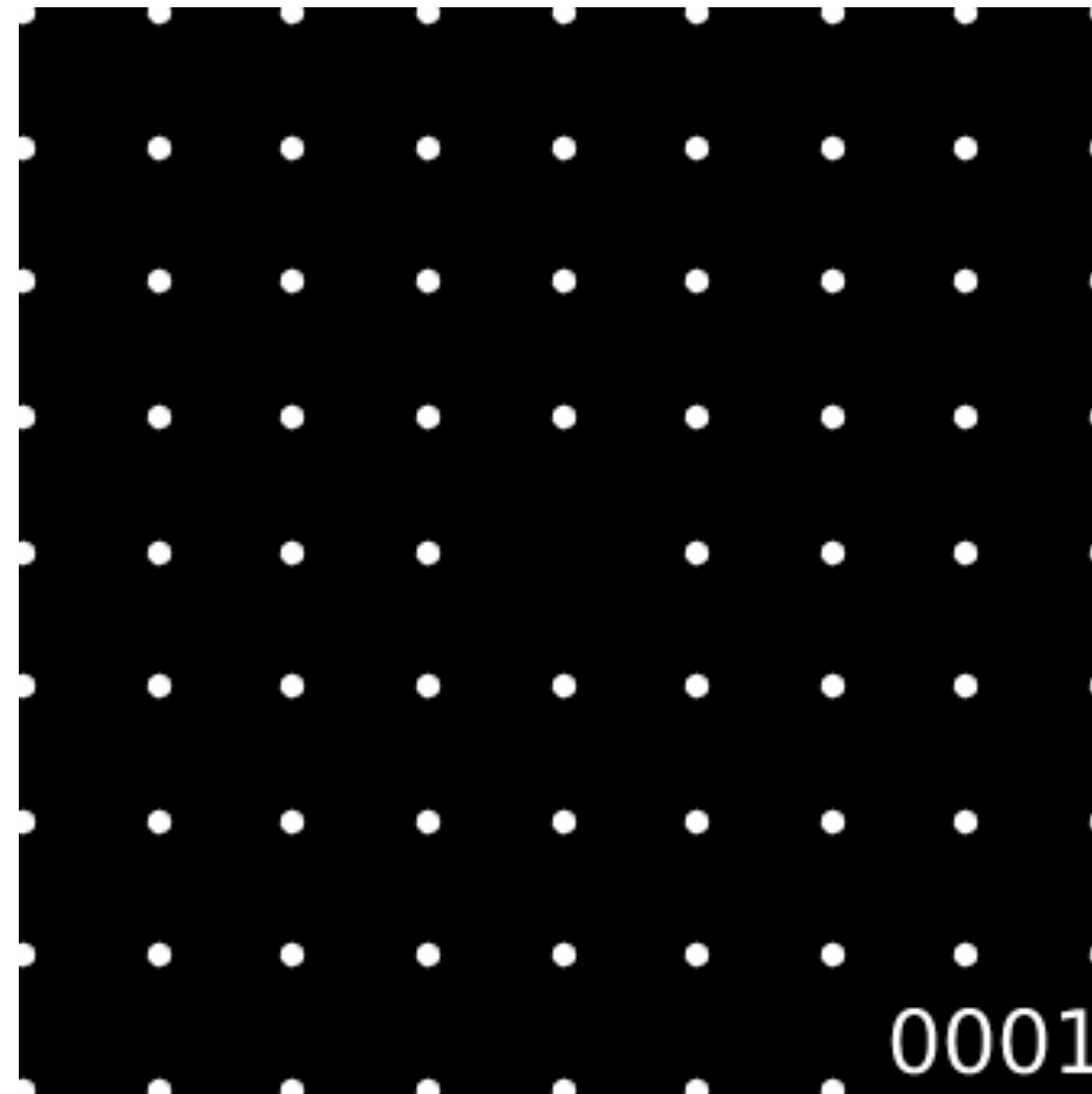


FIG. 1.

detected which may not be obvious to direct inspection. With rays of about 13,000 volts two rings have been found inside the obvious one. Traces have been found of a fourth ring in other photographs, but not more than three have been found on any one exposure. This is probably due to the limited range of intensity within which photometric measurements are feasible.

Nature 119, 890 (1927)



Взаимосвязь между точечной и
кольцевой дифракцией на примере от 1
до 1000 зерен MgO, симуляция в
CrysTBox.

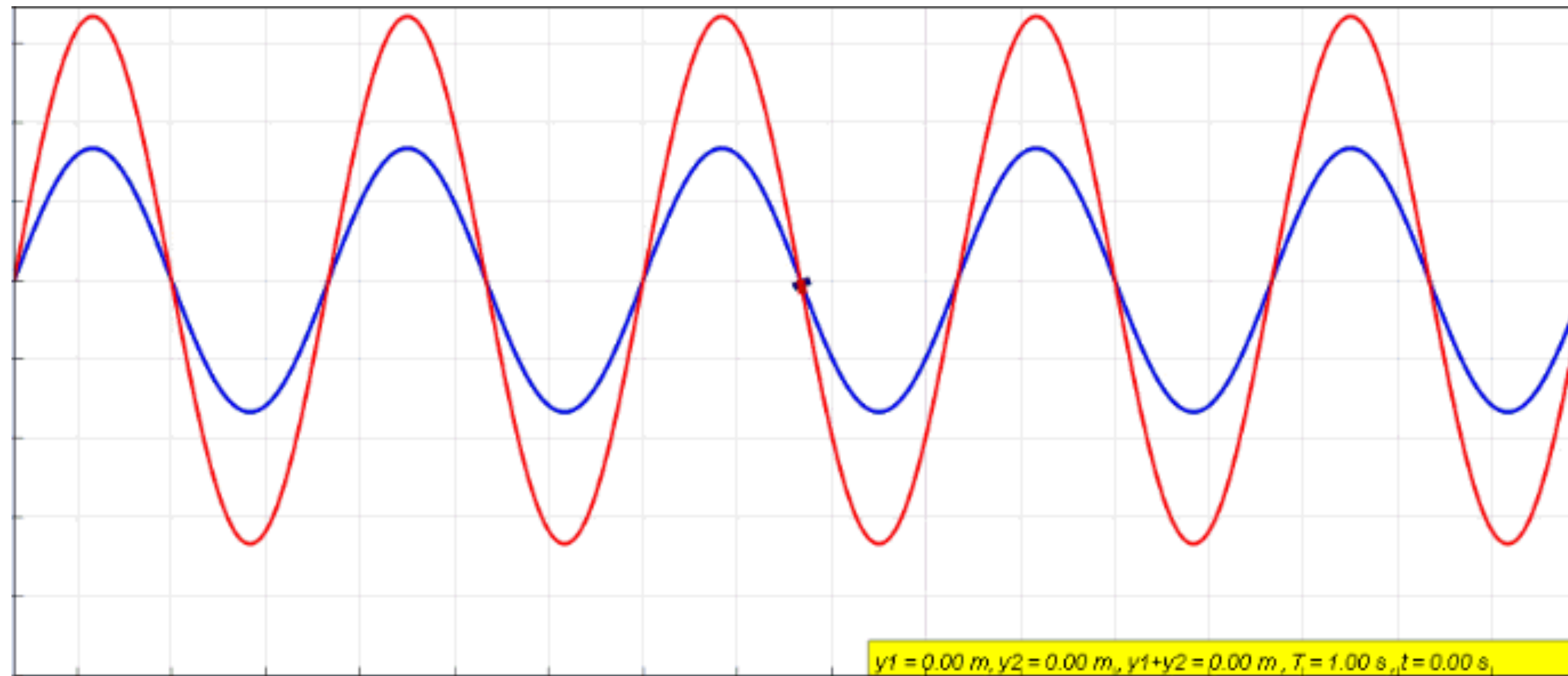


Эксперимент по дифракции
электронов на кристалле MgO

Электрон в атоме

Стоячие волны

Пример: встречные волны той же частоты



Зеленая волна — вправо **Синяя** волна — влево **Красная** волна — стоячая

Стоячие волны

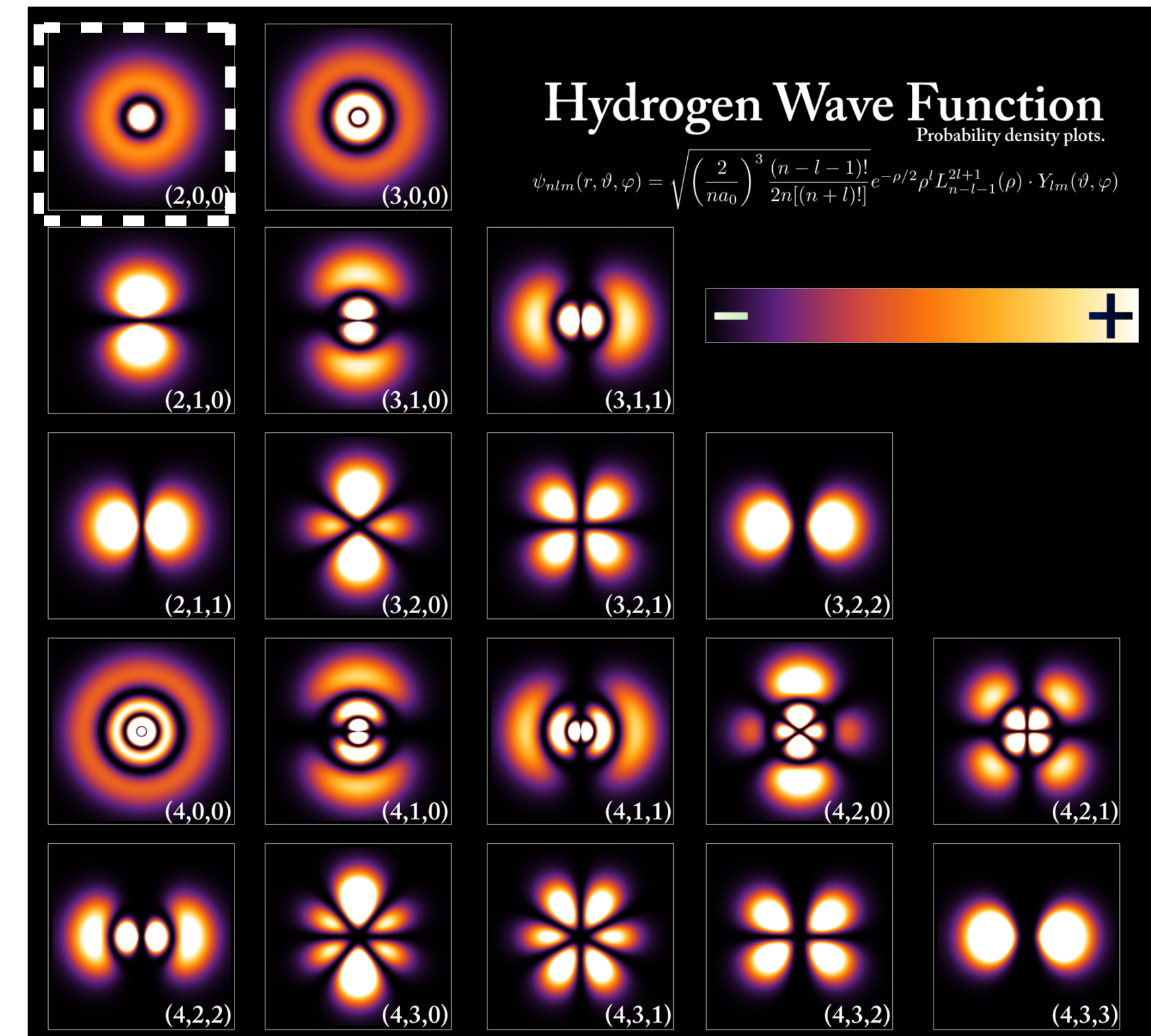
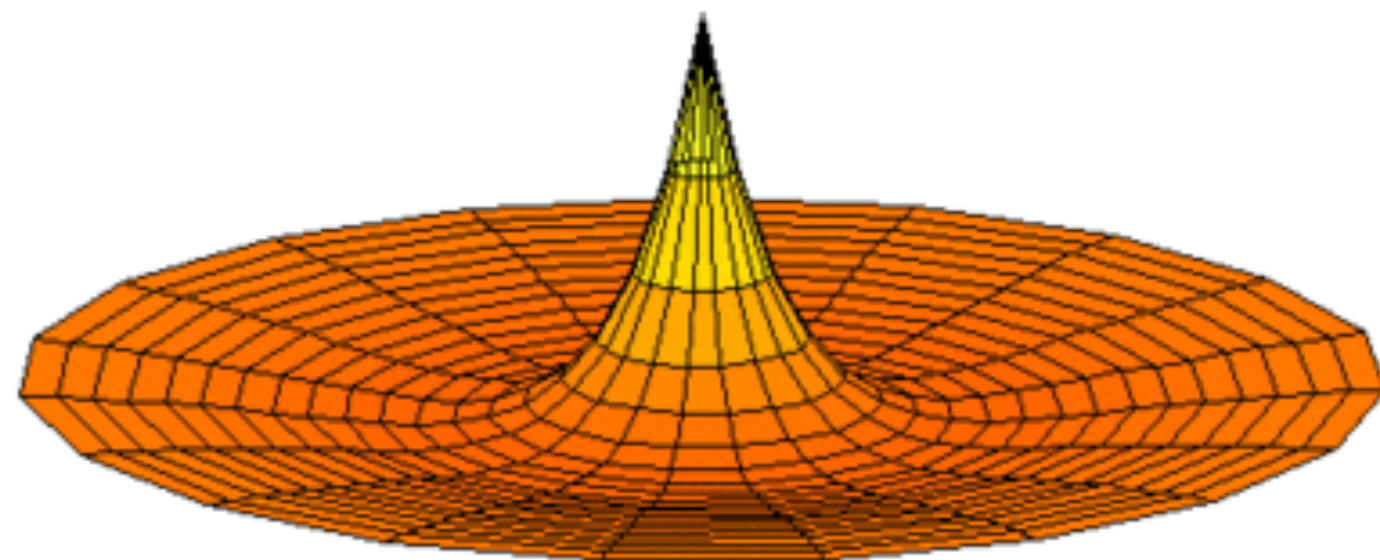
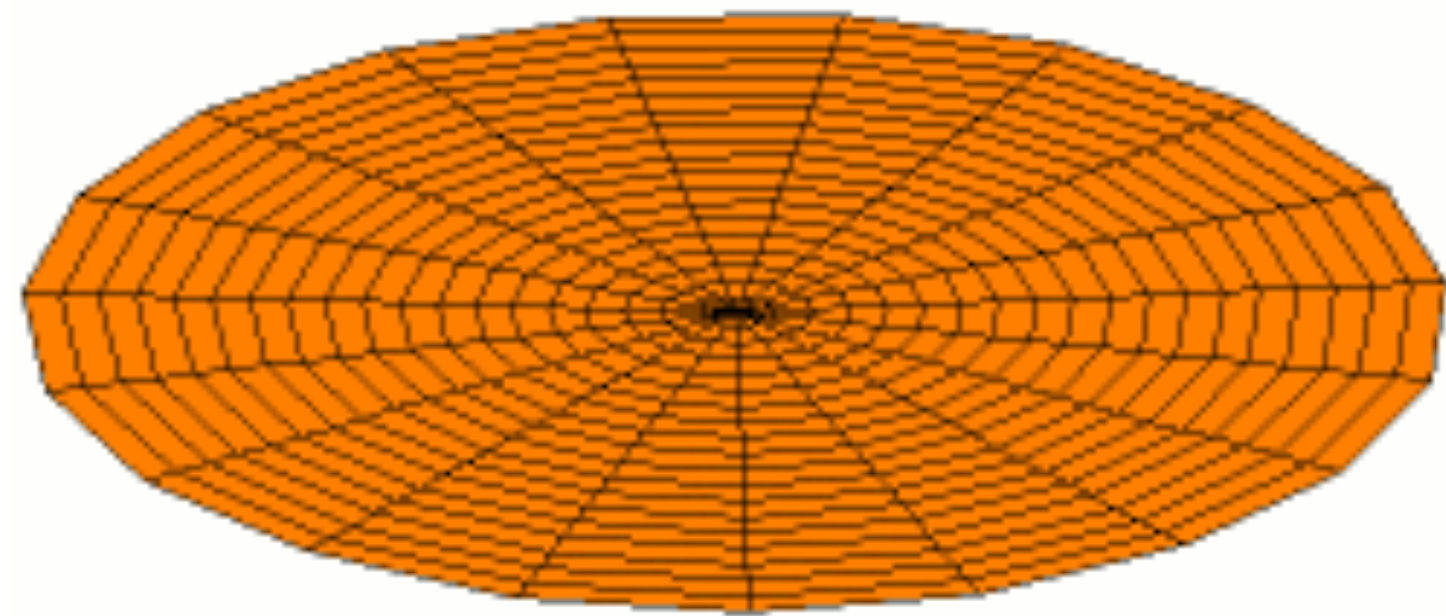
Пример: гитарная струна



Возможны только определенные частоты

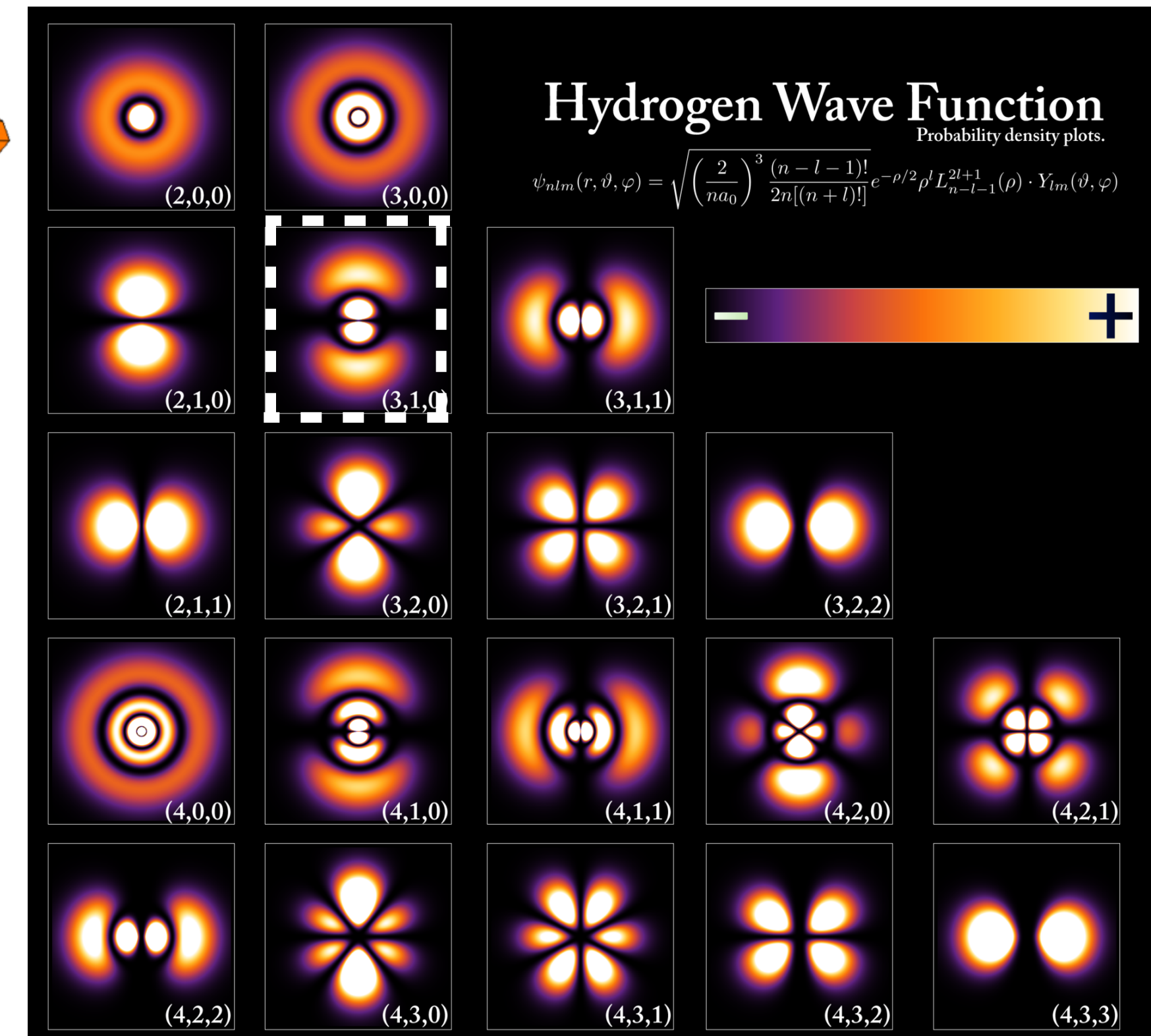
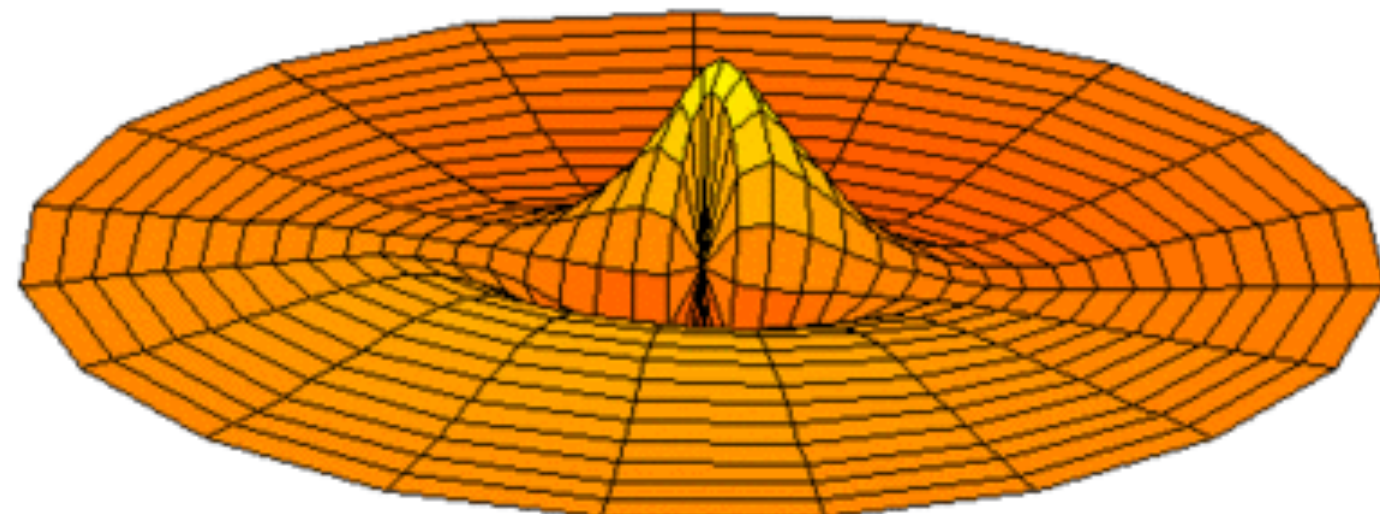
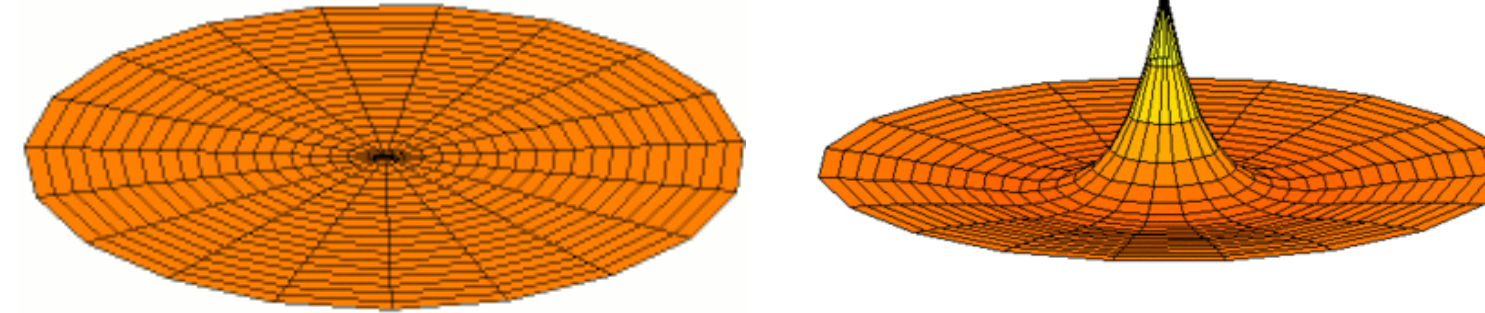
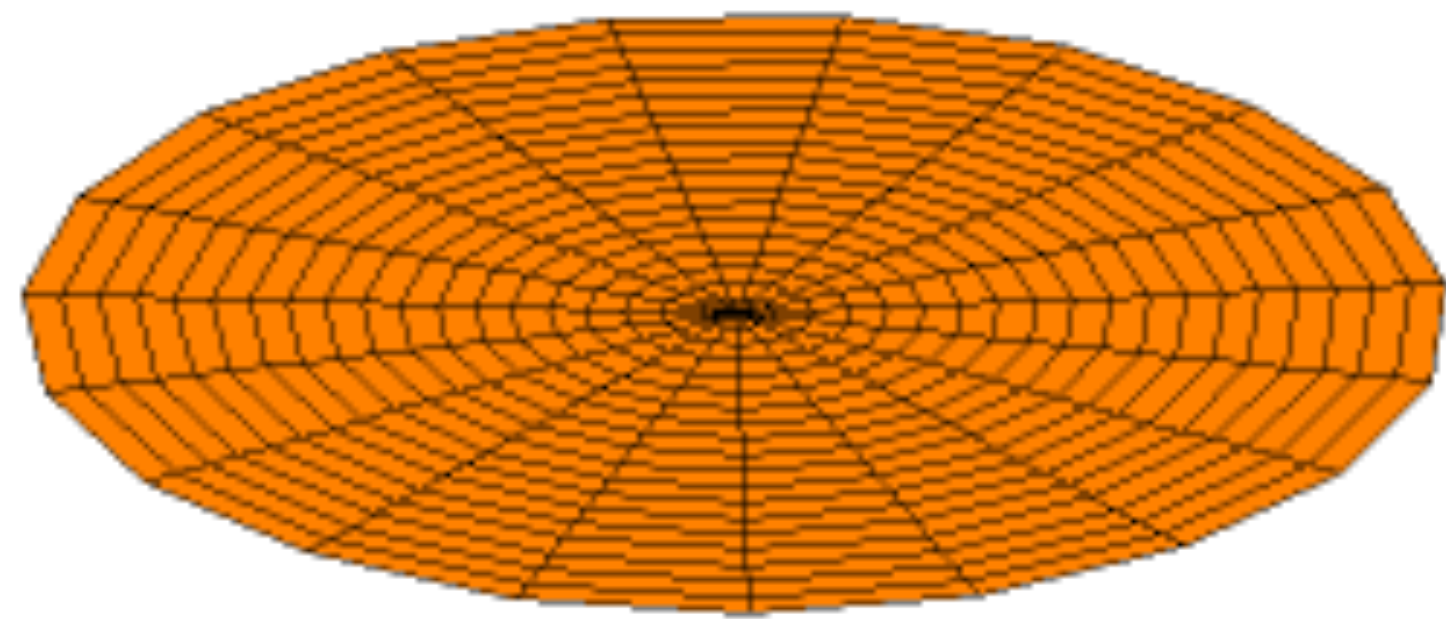
Стоячие волны

На поверхности барабана и в атоме водорода



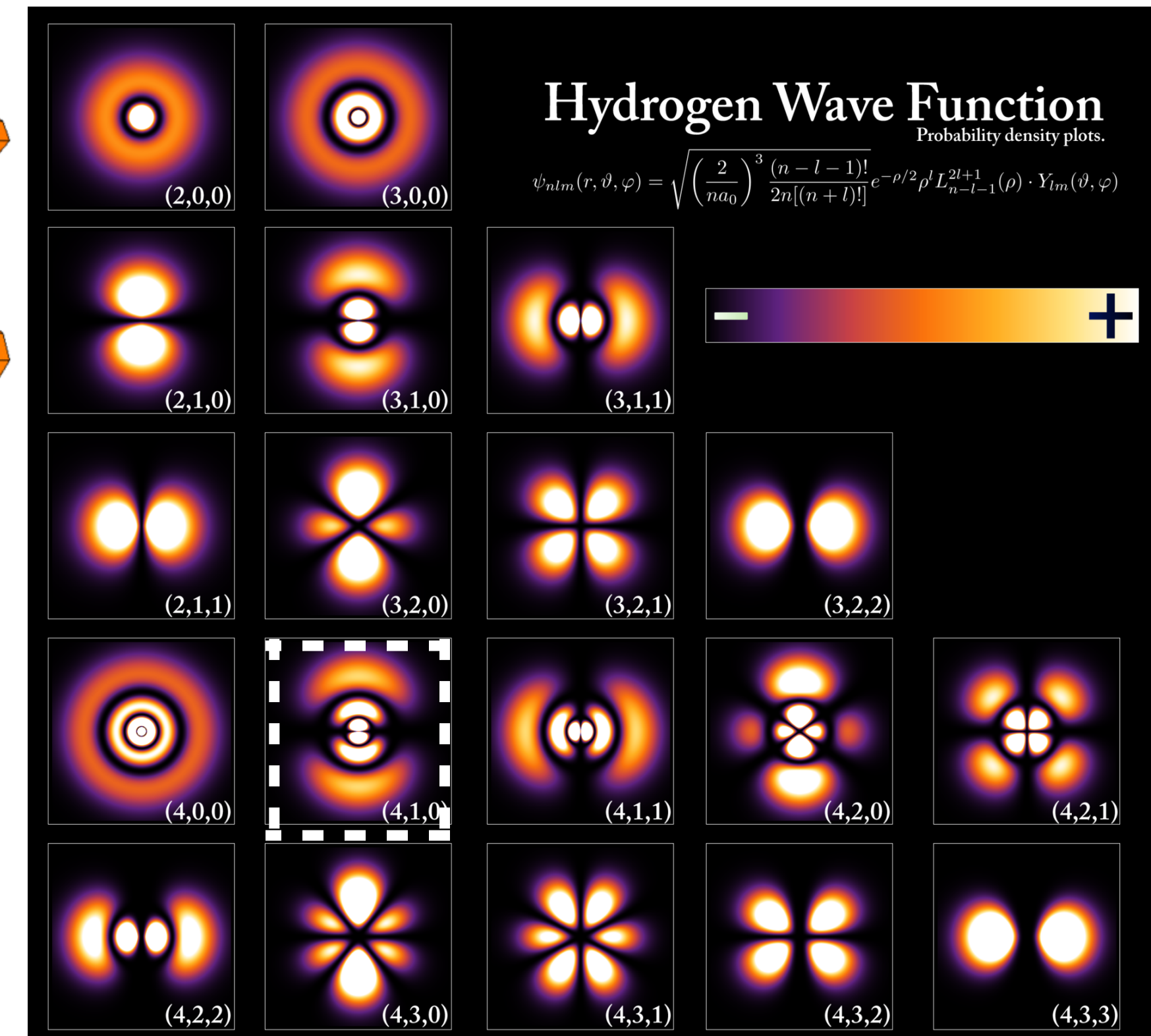
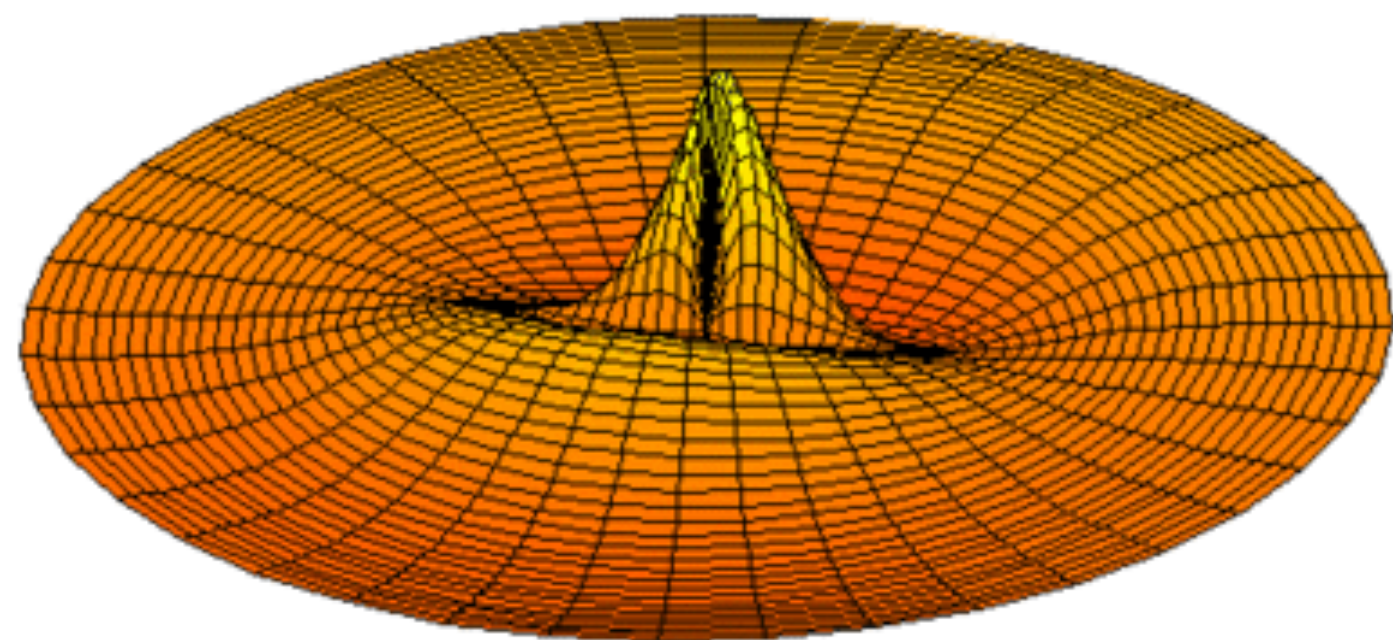
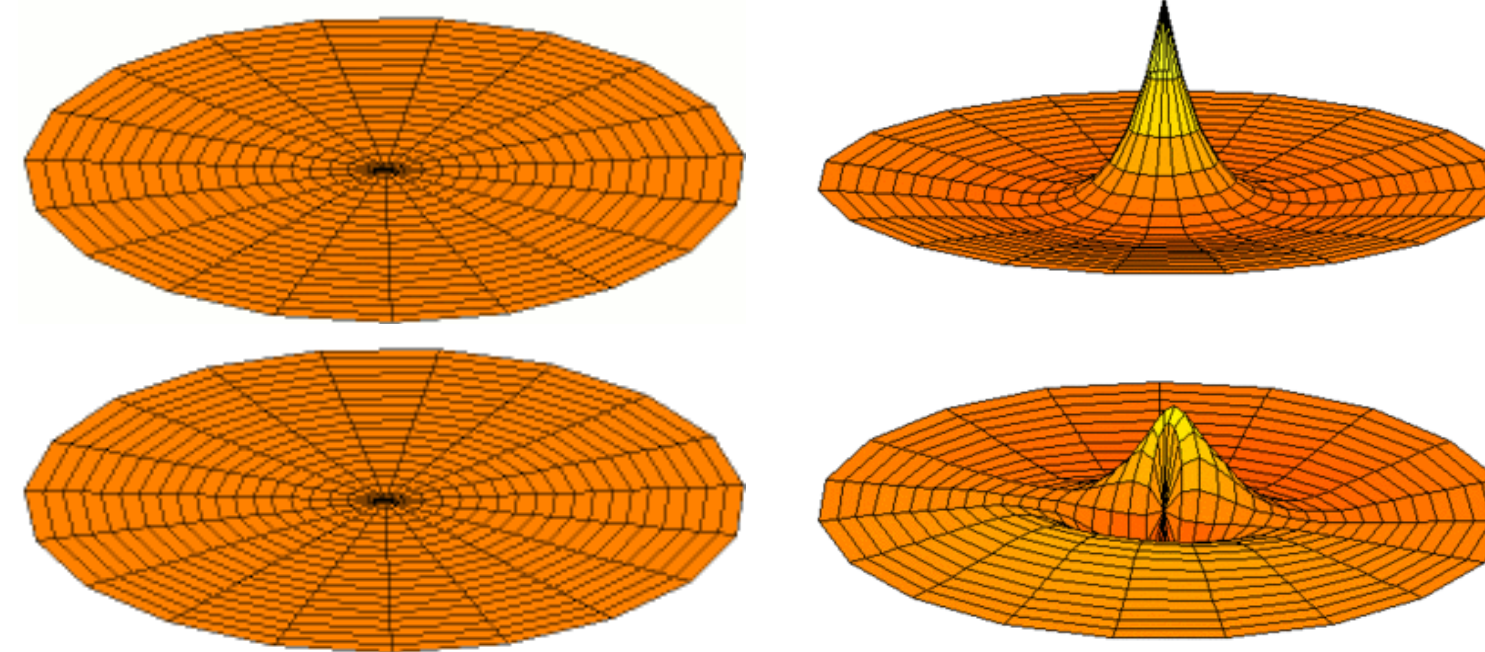
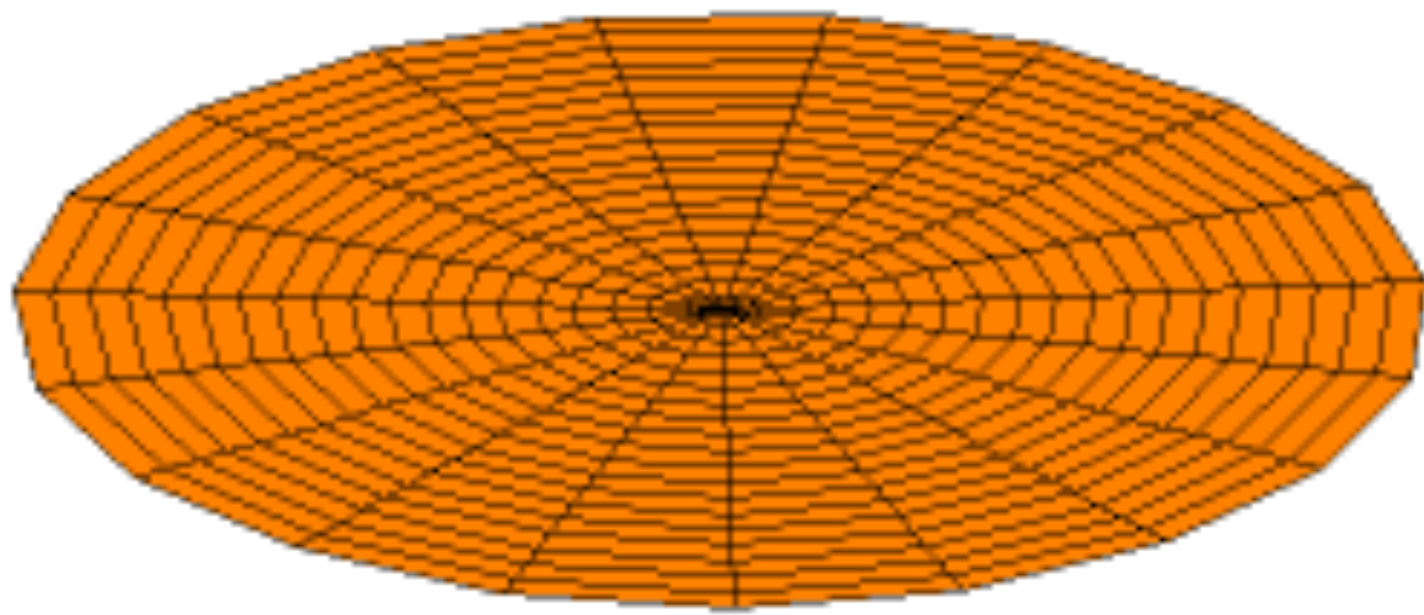
Стоячие волны

На поверхности барабана и в атоме водорода



Стоячие волны

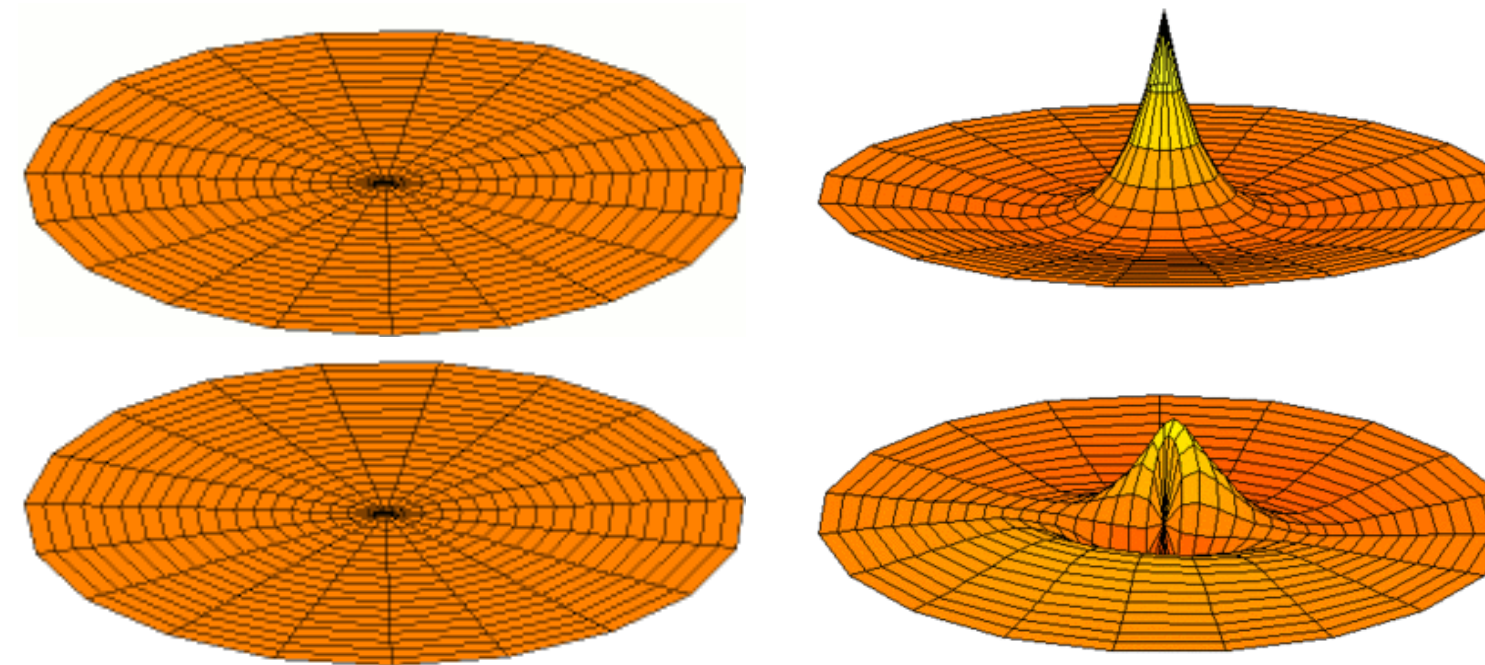
На поверхности барабана и в атоме водорода



Стоячие волны

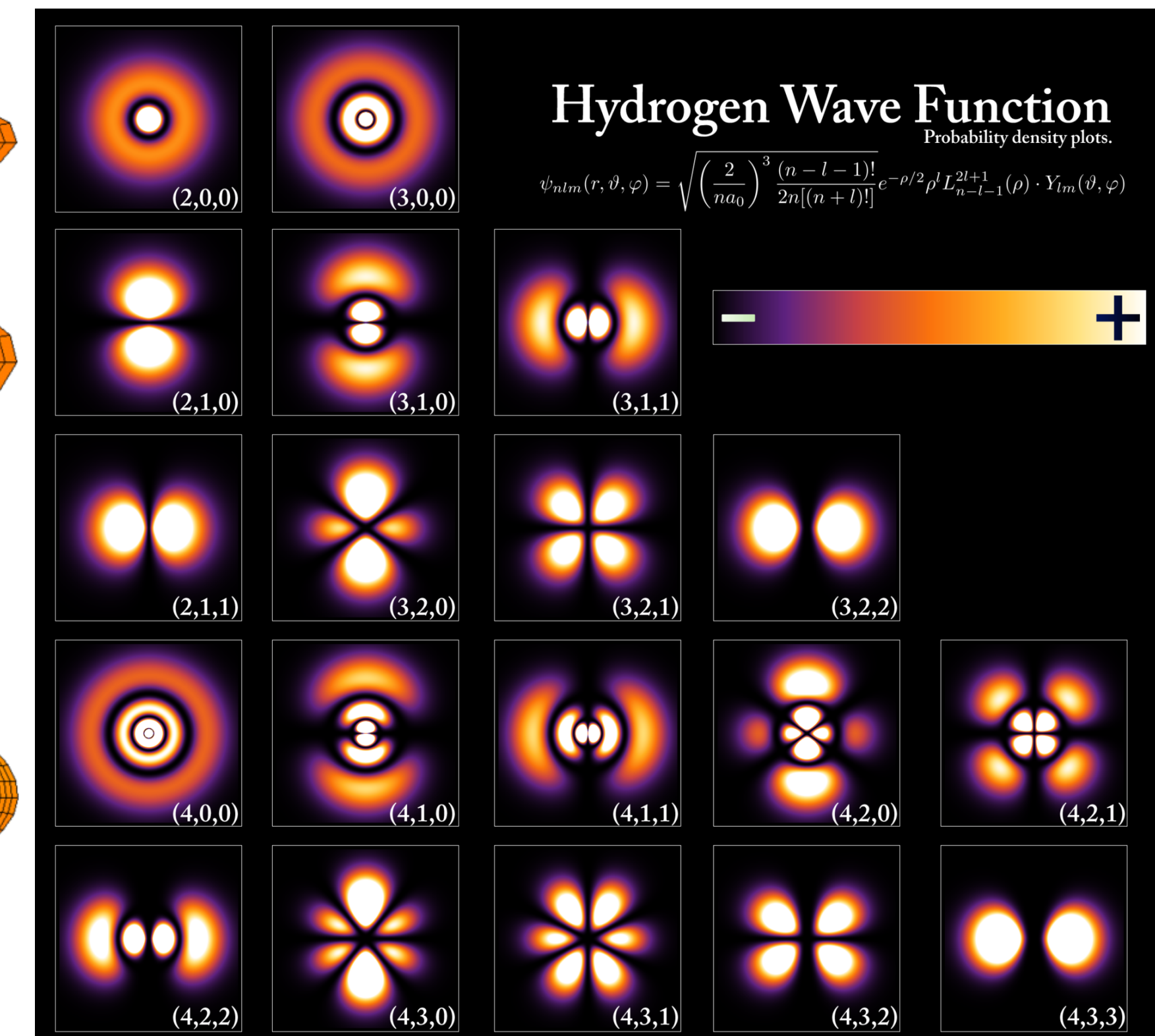
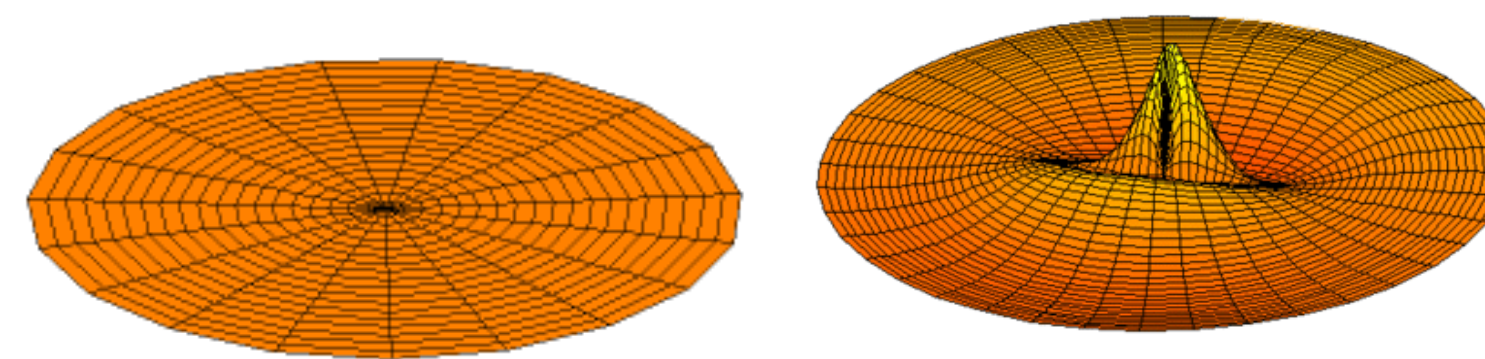
На поверхности барабана и в атоме водорода

Барабан: материальная волна

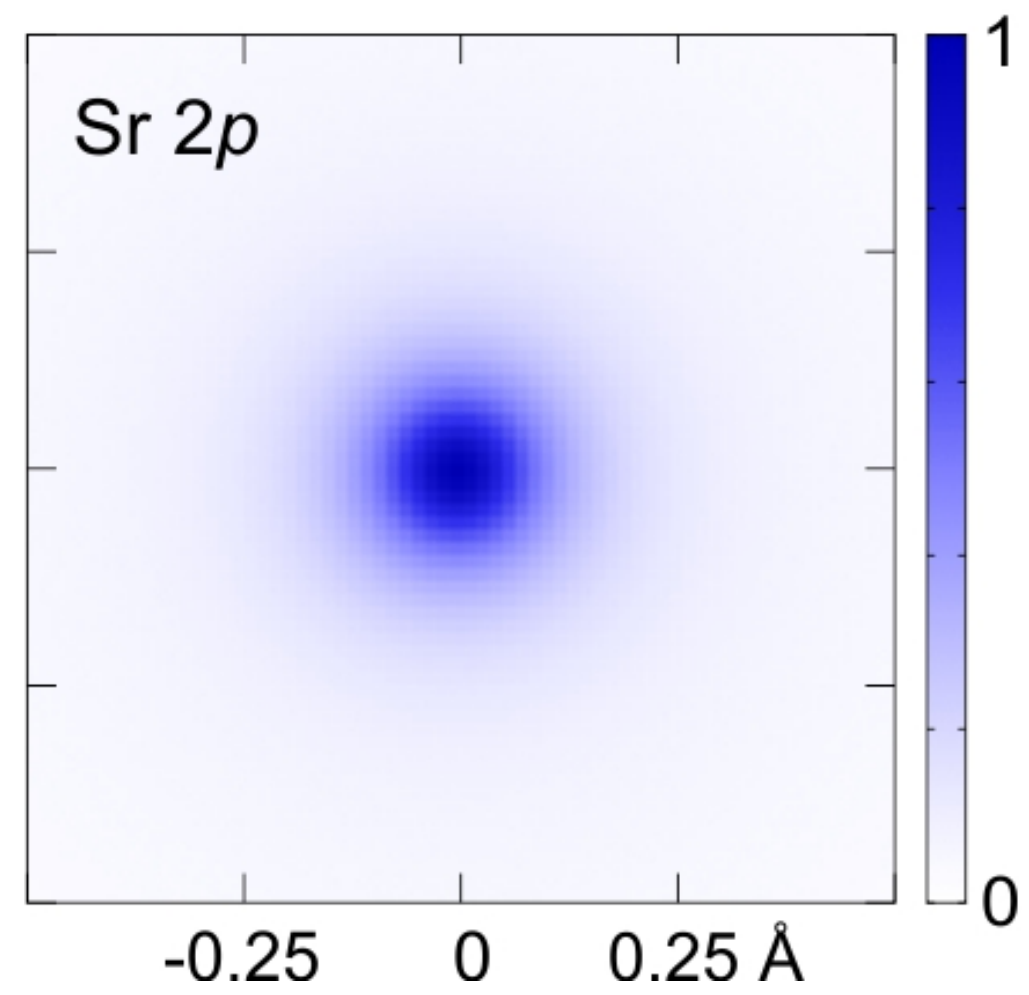
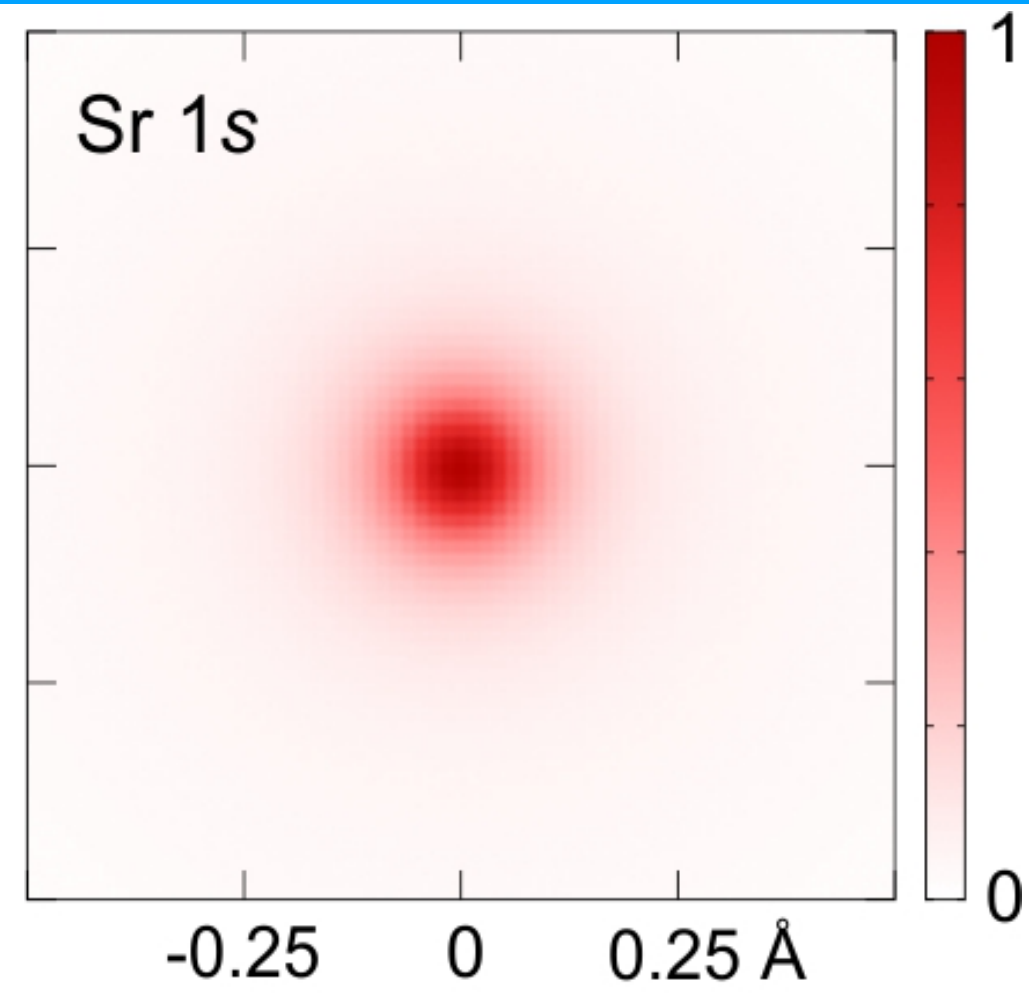


Электрон: волна чего?

Электрон: волна **амплитуды вероятности**



«Фотография» атома

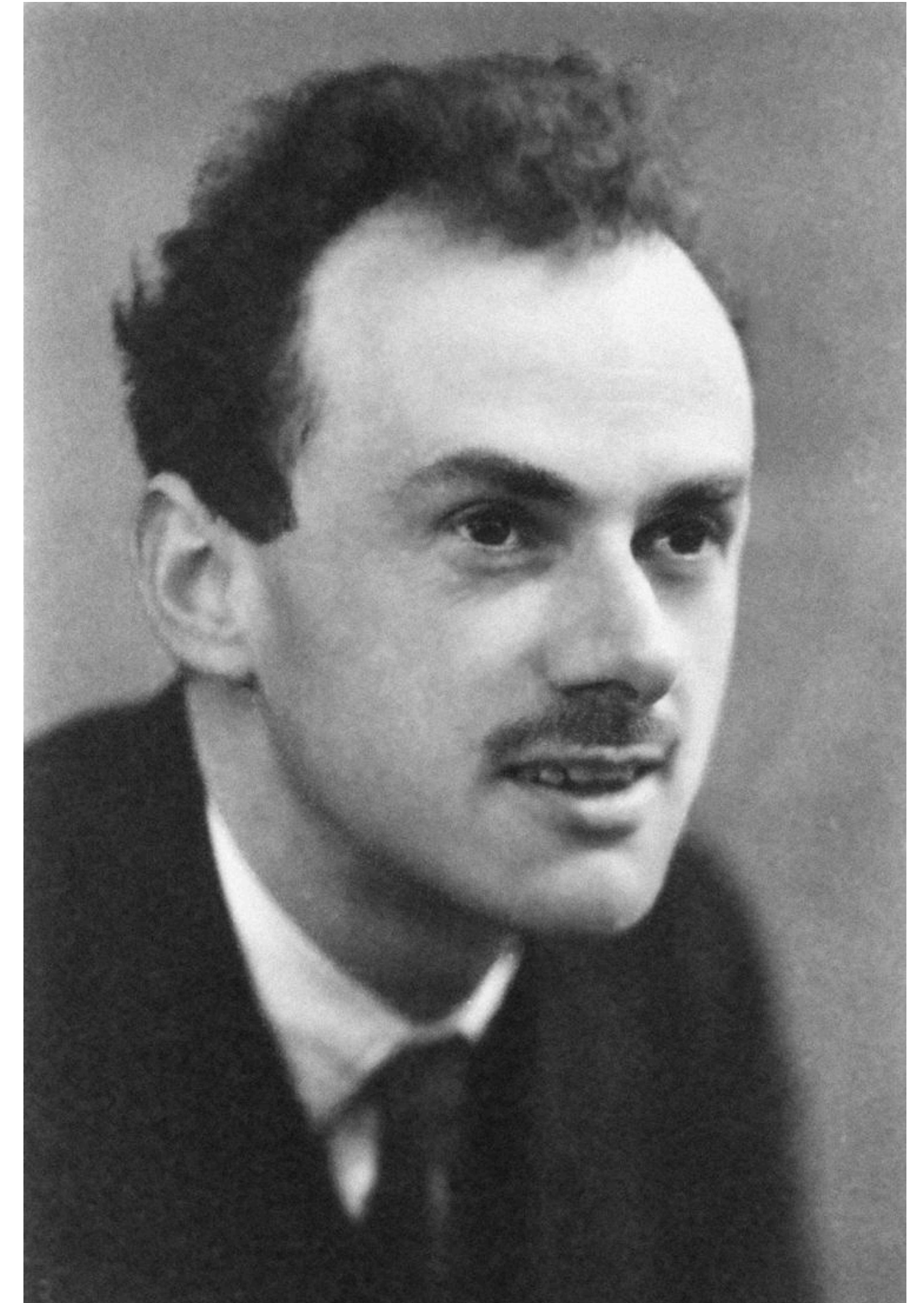


Квантовая механика и классическая физика

Особенность	Квантовая механика	Классическая физика
Наблюдаемая величина	Случайна	Детерминирована
Одновременная точность измерений	Ограничена $[A, B] \neq 0$	Не ограничена
Интерференция	Есть	Нет
Туннелирование	Есть	Нет
Квантовая запутанность	Есть	Нет
Спин	Целый и полуцелый	Не применим
Дискретные значения энергий	Есть	Нет

1928. Уравнение Дирака

- В попытке создать релятивистскую квантовую механику Поль Дирак открывает уравнение Дирака для частиц со спином $\hbar/2$.
- Объяснение спина $\hbar/2$ в результате объединения квантовой механики и СТО. Великое достижение, сравнимое с работами Ньютона, Максвелла и Эйнштейна
- 1931. Уравнение Дирака предсказывает существование позитрона — первой античастицы.
- 1932. Открытие позитрона Андерсоном



Поль Дирак. НП 1933

1928. Уравнение Дирака

Триумф. Падение. Снова триумф

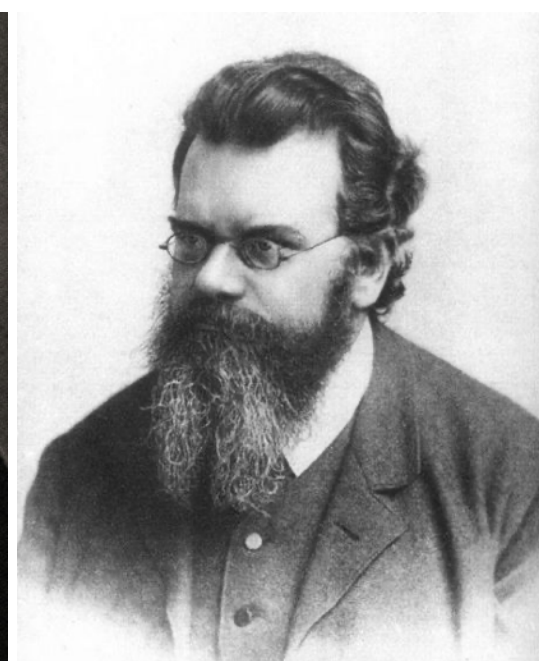
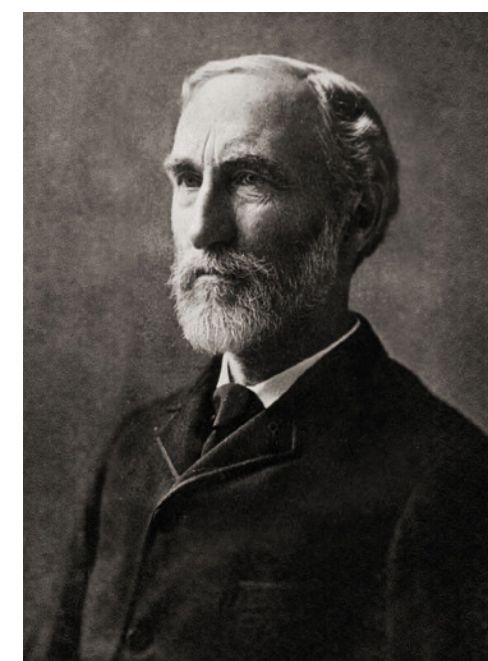
- **Уравнение Дирака описывает не одну частицу, а сразу две: частицу и анти-частицу**
 - Одночастичная интерпретация $\psi(x)$ невозможна в отличие от уравнения Шредингера.
- **Нет уравнения Дирака для N электронов**
 - Уравнение Дирака годится только для одного атома водорода в отличие от уравнения Шредингера.
- **Решение проблемы: $\psi(x)$ — не волновая функция, а квантовое поле!**

Физическая картина мира

В конце XIX века



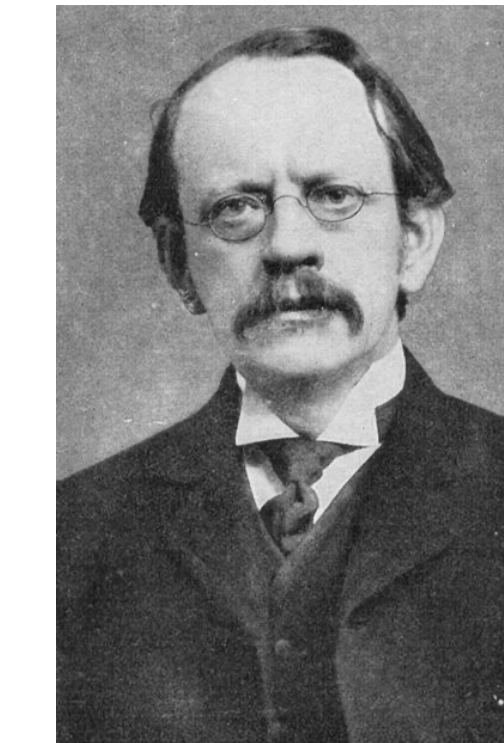
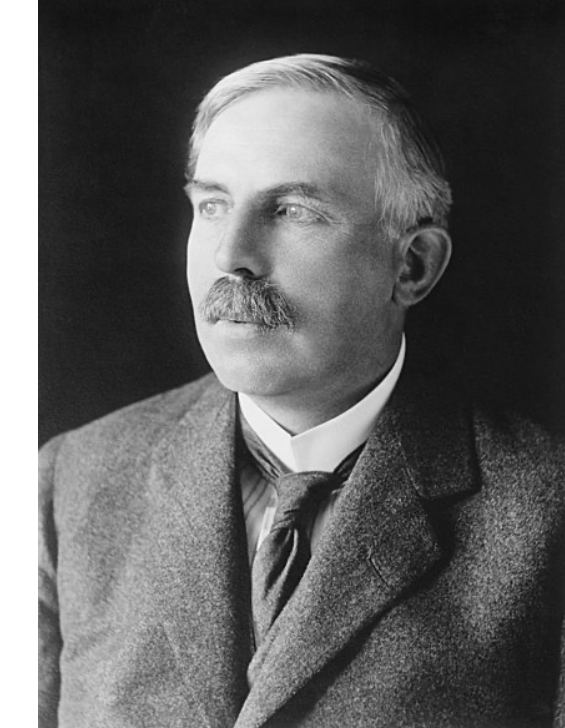
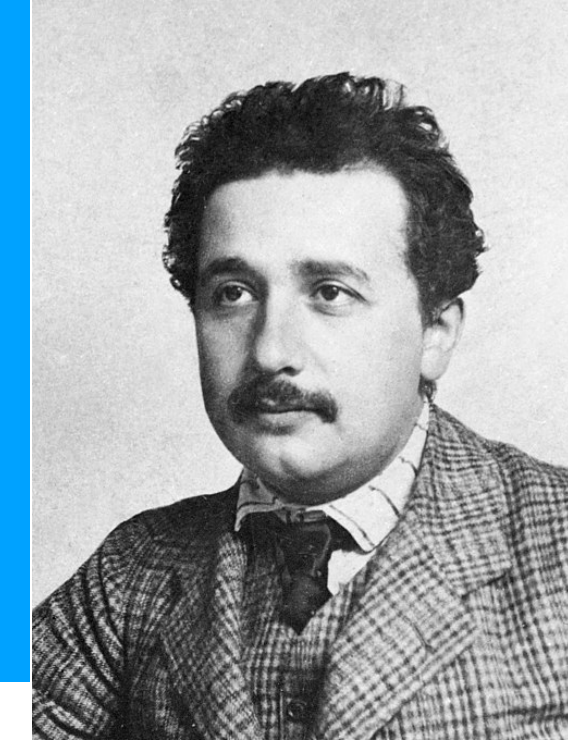
- **Классическая механика:**
 - Ньютон, Лагранж, Гамильтон, Эйлер и др.
 - Силы и энергия определяют эволюцию физической системы.
 - Детерминизм
- **Две силы:**
 - Гравитация (Ньютон)
 - Электричество и магнетизм (Максвелл, Герц, Хевисайд)
 - Эфир как среда для электромагнитных волн
- **Атомы:**
 - Гипотеза разделяется не всеми
- **Термодинамика:**
 - Развитие понятий энергии и энтропии



Физическая картина мира

К 1930 году

- **Специальная теория относительности**
 - Пространство-время, относительность одновременности, сокращение размеров, эквивалентность массы и энергии
- **Общая теория относительности**
 - Гравитация — это искривление пространства-времени
 - Черные дыры, гравитационные волны
- **Квантовая механика:**
 - Мир атомов и атомных ядер. (+ «ядерные электроны»)
 - Спин
 - Уравнение Дирака
- **Эксперимент:**
 - Электрон, протон, фотон
 - Два взаимодействия: электромагнитное и гравитационное



Проблемы физической картина мира

К 1930 году.

- **Квантовая механика:**

- Несовместимость с СТО и ОТО
- Что описывает уравнение Дирака?!
- Не умеет описывать рождение и уничтожение частиц
- Проблема измерения (коллапс волновой функции, нелокальность, ...)
- Природа силы

- **Эксперимент:**

- Указание на существование новых взаимодействий: сильного и слабого

Нужны новые идеи и революции!

Лекция 2. «Квантовая теория поля: бесконечные мучения и глоток надежды»

Рекомендуемая литература и ресурсы

○ **YouTube**

- PBS Space Time
- MinutePhysics
- Dr. PhysicsA
- ScienceClick
- Sabine Hossenfelder
- 3Blue1Brown

○ **Easy Reading**

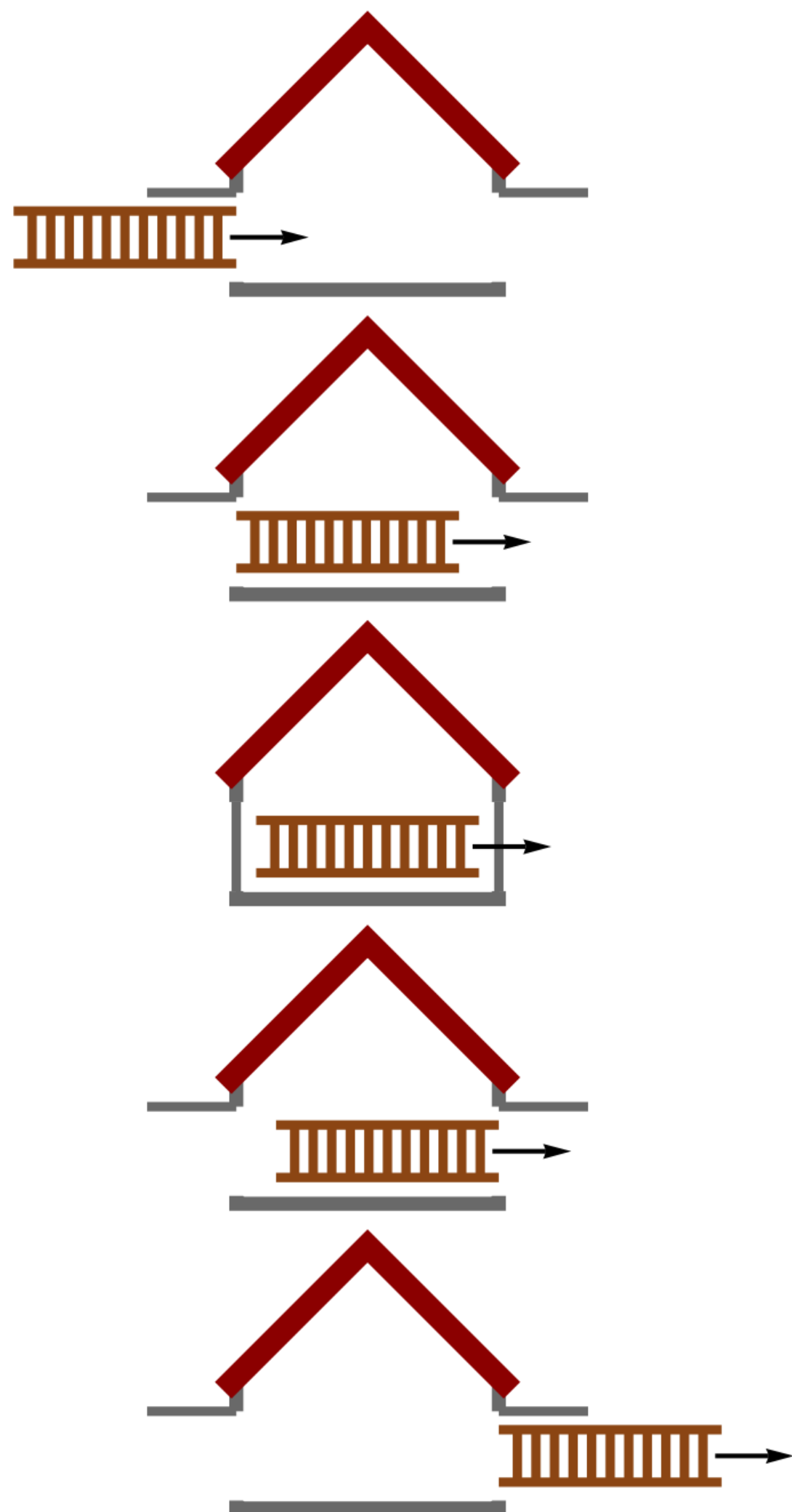
- Беркович А. Альберт Эйнштейн и "революция вундеркиндов". — М: URSS, 2021.
- Jeffrey Bennett: "What Is Relativity? An Intuitive Introduction to Einstein's Ideas, and Why They Matter"
- Kip S. Thorne: "Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy»
- Albert Einstein: "Relativity: The Special and General Theory"
- N. David Mermin: "It's About Time: Understanding Einstein's Relativity»
- Leonard Susskind & Art Friedman: "Quantum Mechanics: The Theoretical Minimum"

○ **Deeper Reading**

- Sean Carroll: "Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity"
- J.J. Sakurai and Jim Napolitano: "Modern Quantum Mechanics"
- David J. Griffiths: "Introduction to Quantum Mechanics"

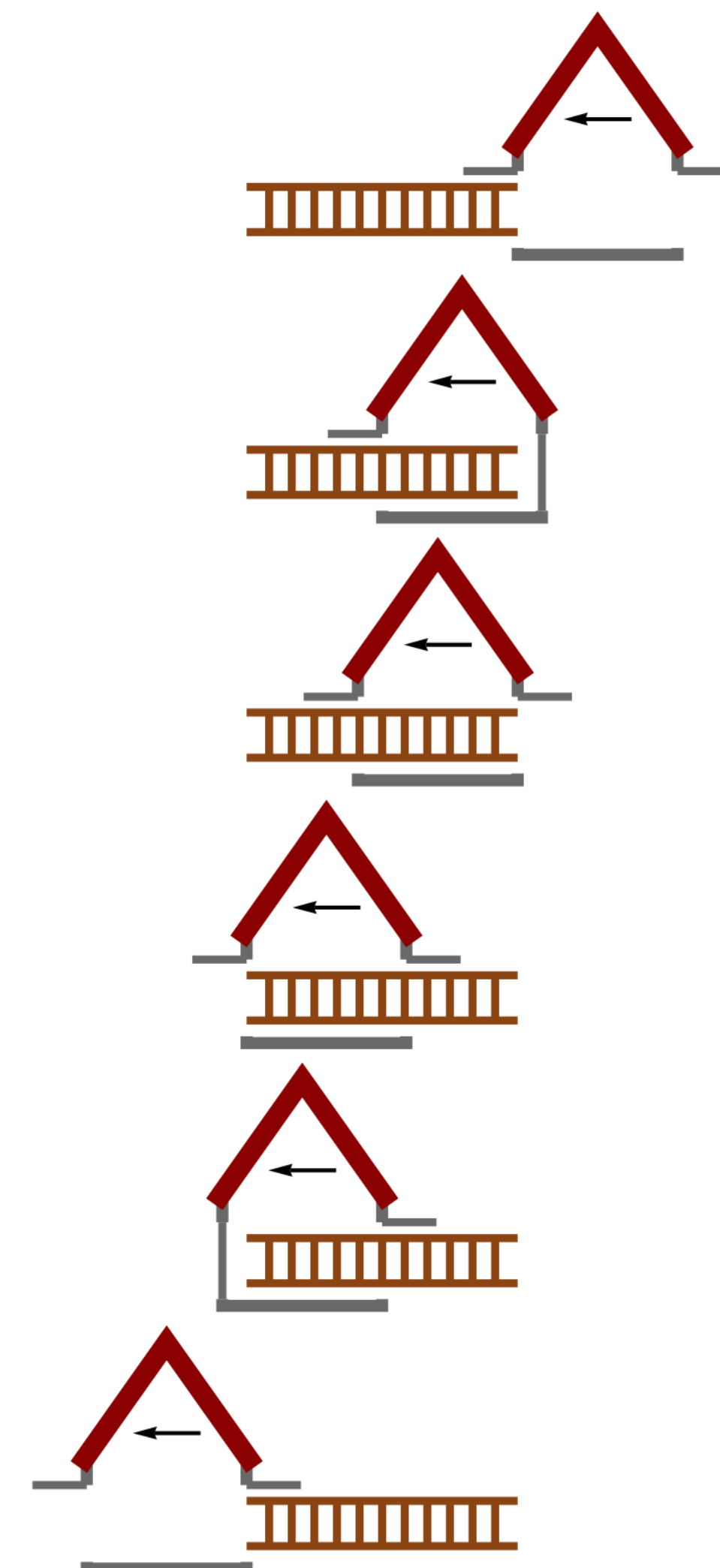
Дополнительные материалы

Решение парадокса с лестницей и гаражом



Гараж покоится, лестница движется

К парадоксу 63



Гараж движется, лестница покоится