

ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ
И
АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН

Альберт Эйнштейн (1879–1955)



Эйнштейн с первой
женой Милевой Мариц



Кратко об Эйнштейне



- Альберт Эйнштейн родился в 1879 году.
- В 1900 году окончил Цюрихский политехнический институт.
- В 1902 году Эйнштейн поступил на работу в патентное бюро в Берне.
- В **сентябре 1905** опубликована теория относительности.

**Анри Пуанкаре
(1854–1912)**



**Хендрик Лоренц
(1853–1928)**



Закон внешнего фотоэффекта. 1921 г. (Нобелевская премия Эйнштейна)

Энергия вылетающих фотоэлектронов различна. Наибольшей скоростью $v_{\text{макс}}$ и кинетической энергией $\frac{mv_{\text{макс}}^2}{2}$ будут обладать электроны, вырванные с самого верхнего энергетического уровня в металле (см. т. II, § 22). По закону сохранения энергии для этих электронов:

$$h\nu = eP + \frac{mv_{\text{макс}}^2}{2}. \quad (35.5)$$

Уравнение (35.5) называют **уравнением Эйнштейна**. Электроны, вырванные с более глубоких энергетических уровней или претерпевшие еще до выхода столкновения внутри вещества, будут иметь, очевидно, меньшую энергию.

Формула связи потери массы тела при излучении энергии



$$E = m \cdot c^2$$

Анри Пуанкаре (1900 г.) :

«Энергия излучения E
обладает массой $m = E / c^2$ »

Постулаты специальной теории относительности Эйнштейна (1905 г.)



Постулат 1. Принцип относительности

«Движение системы отсчёта по инерции не может быть обнаружено никакими физическими опытами внутри закрытой лаборатории, связанной с этой системой отсчёта»

Постулат 2. Принцип постоянства скорости света

«Свет в пустоте всегда распространяется с определенной скоростью c , не зависящей от движения излучающего тела»

Основные выводы из специальной теории относительности Эйнштейна (1905 г.)



- 1. Сокращение продольных размеров**
(при движении с околосветовой скоростью)
- 2. Замедление времени**
(при движении с околосветовой скоростью)
- 3. Запрет скоростей, больших скорости света**
- 4. Увеличение массы**
(при движении с околосветовой скоростью)

1. В системе отсчёта, движущейся равномерно и прямолинейно относительно наблюдателя, происходит сокращение длины вдоль направления движения

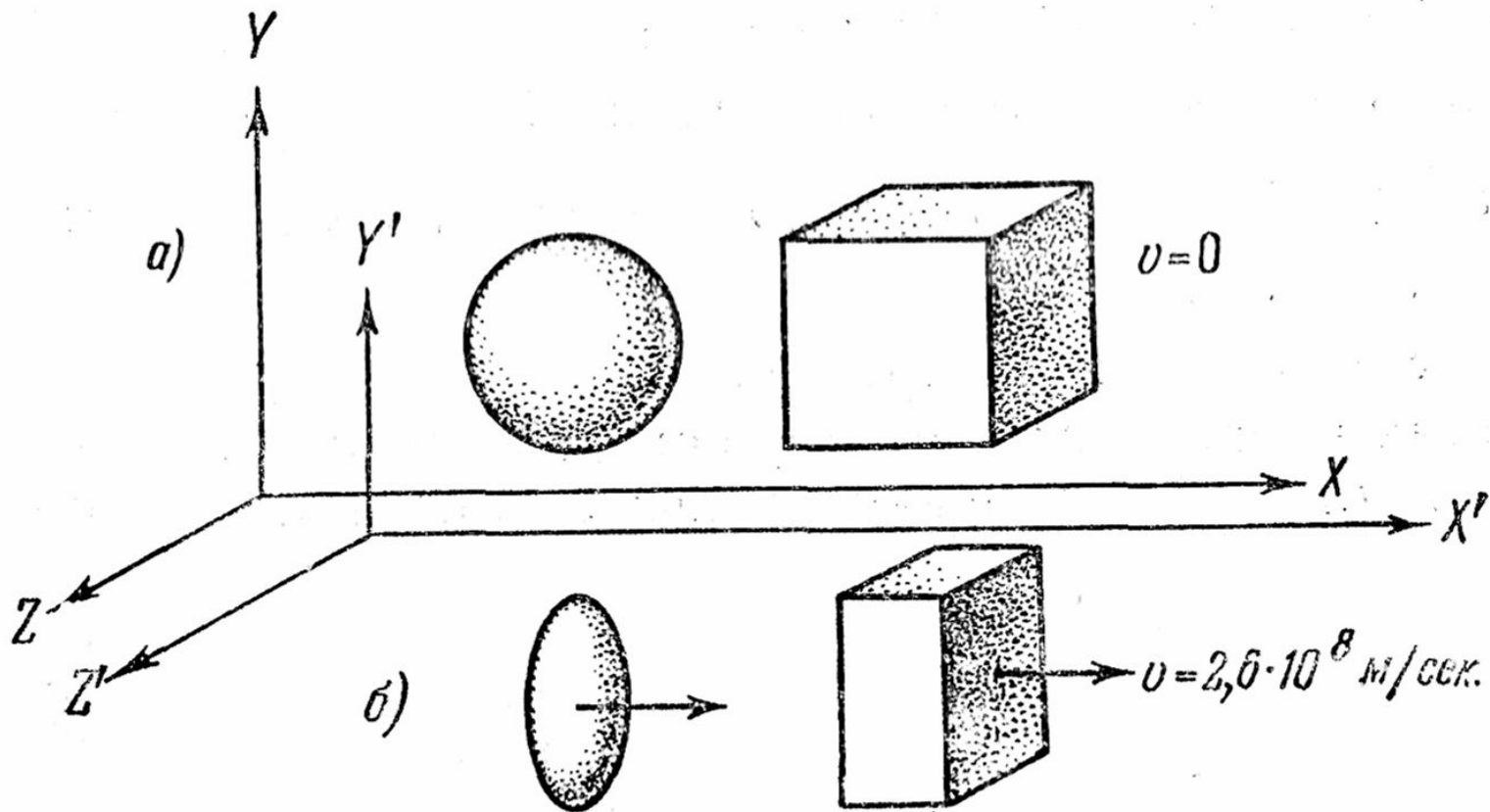
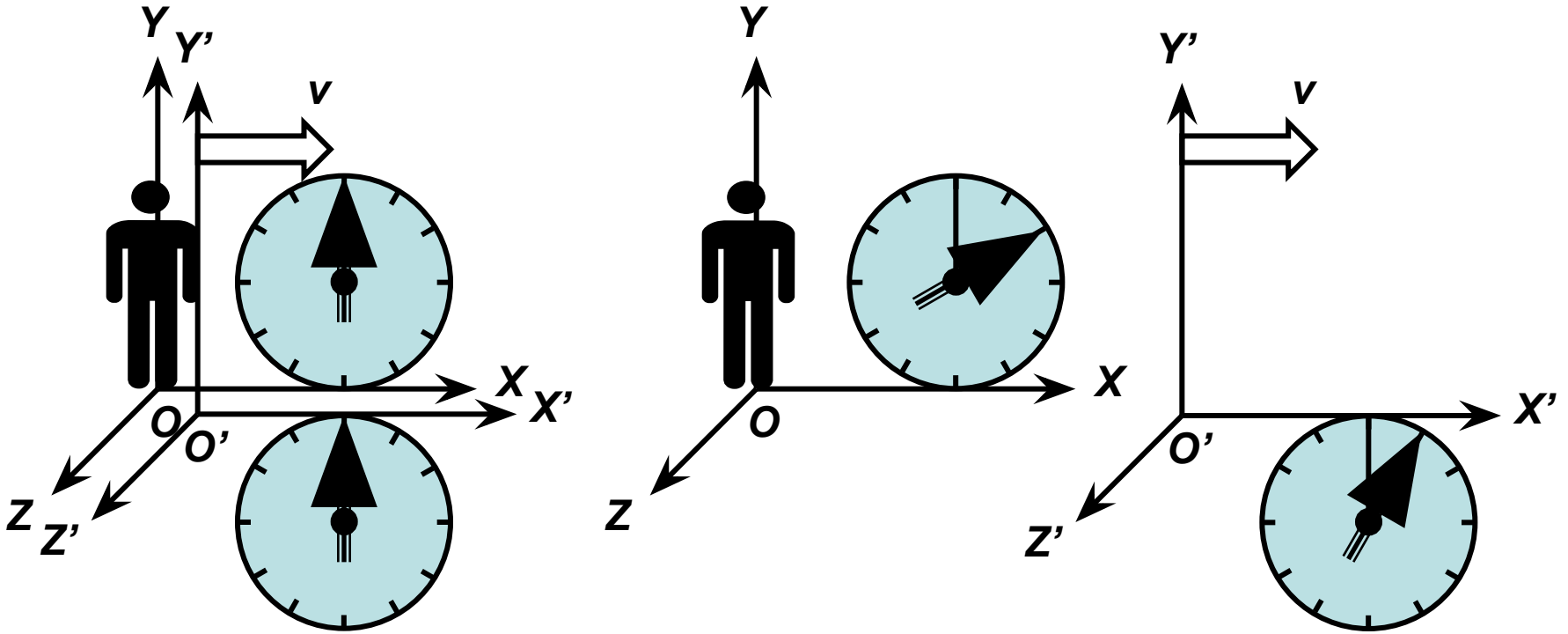
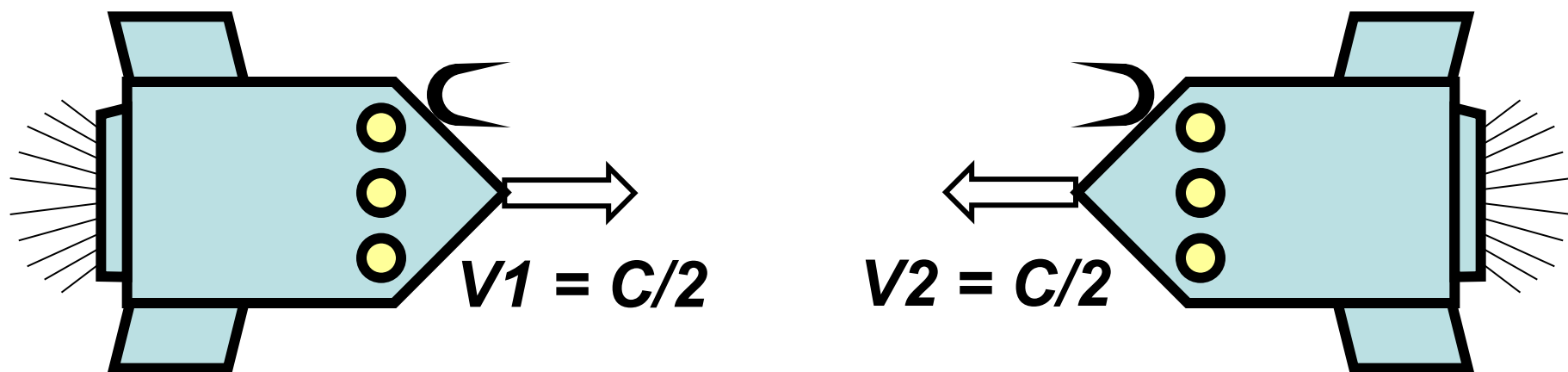


Рис. 1.133.

2. В системе отсчёта, движущейся равномерно и прямолинейно относительно наблюдателя, время движется медленнее



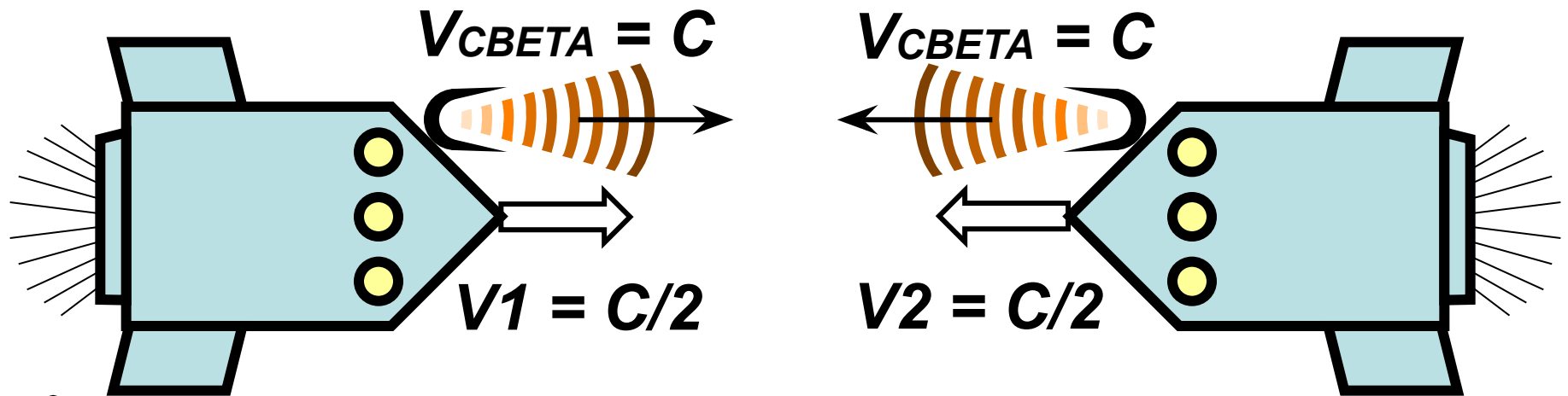
3. Движение со скоростью, превышающей скорость света, невозможно. (1)



$$V_{\text{СБЛИЖЕНИЯ РАКЕТ}} < V1 + V2$$



3. Движение со скоростью, превышающей скорость света, невозможно. (2)



$v_{\text{СБЛИЖЕНИЯ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ}} = c$, а не $c+c$

Преобразования Лоренца (1895 г.), которые Эйнштейн заново вывел в специальной теории относительности



преобразуются тождественно.

Итак, полученные преобразования (систем отсчета рис. 1.125*),
носящие название преобразований Лоренца, имеют вид:

преобразования

$$S \rightarrow S'$$

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

преобразования

$$S' \rightarrow S$$

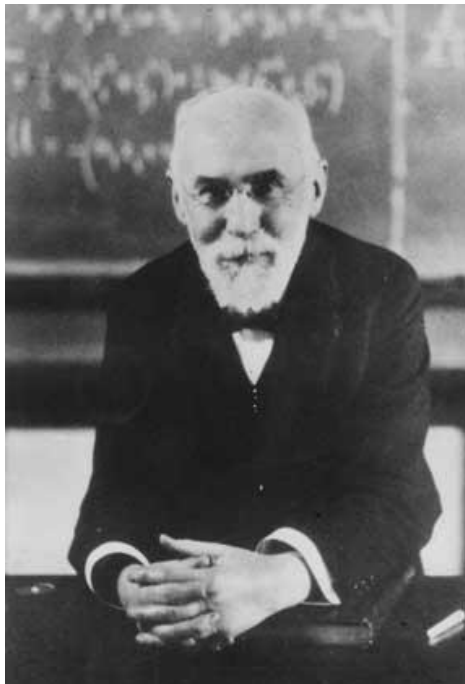
$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

$$y = y',$$

$$z = z',$$

$$t = \frac{t' + \frac{v}{c^2} x'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

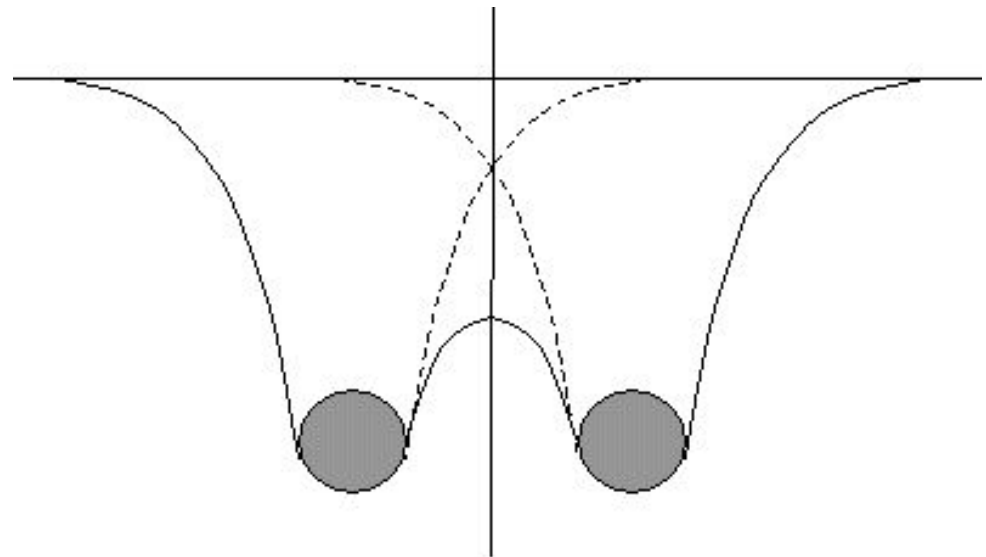
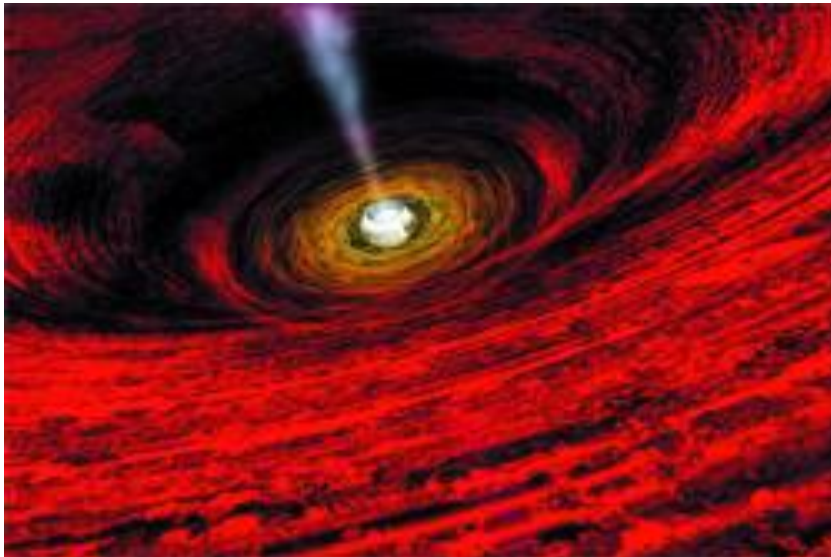
(26.12)



Основные выводы из общей теории относительности Эйнштейна (1915 г.)



- **Искривление пространства**
вблизи тяготеющих масс
- **Замедление времени**
вблизи тяготеющих масс



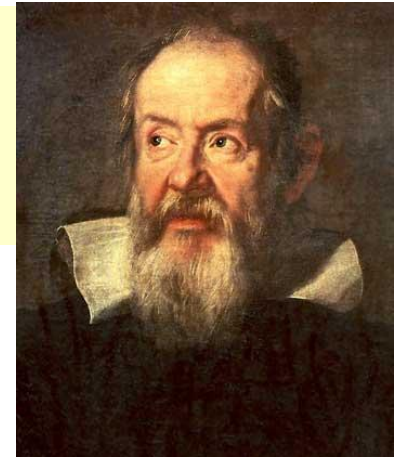
Явления, рассматривавшиеся в физике раздельно до XIX века

- Механика
- Свет
- Электричество
- Магнетизм
- Колебания
- Волны

Развитие физических представлений в XIX веке

- Электричество и магнетизм порождают друг друга
- Электромагнитное поле распространяется подобно волне
- Свет – электромагнитная волна
- Уравнения Максвелла для электромагнитного поля – высшая форма знаний об электромагнетизме

Классическая механика Ньютона и Галилея



- **Принцип инерции:**

«Тела, не испытывающие воздействия сил, движутся равномерно и прямолинейно»

- **Принцип сложения скоростей:**

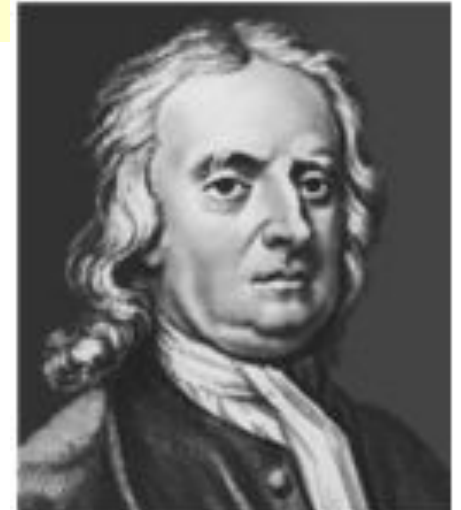
«Скорость тела складывается из скорости системы отсчёта и скорости движения тела в ней»

- **Принцип относительности Галилея:**

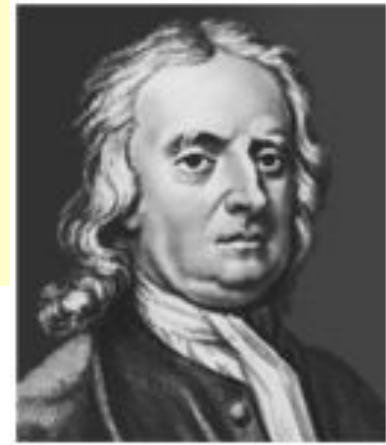
«Все законы механики одинаковы в инерциальных системах отсчёта»

Два представления о свете, сложившиеся в физике в XVII веке

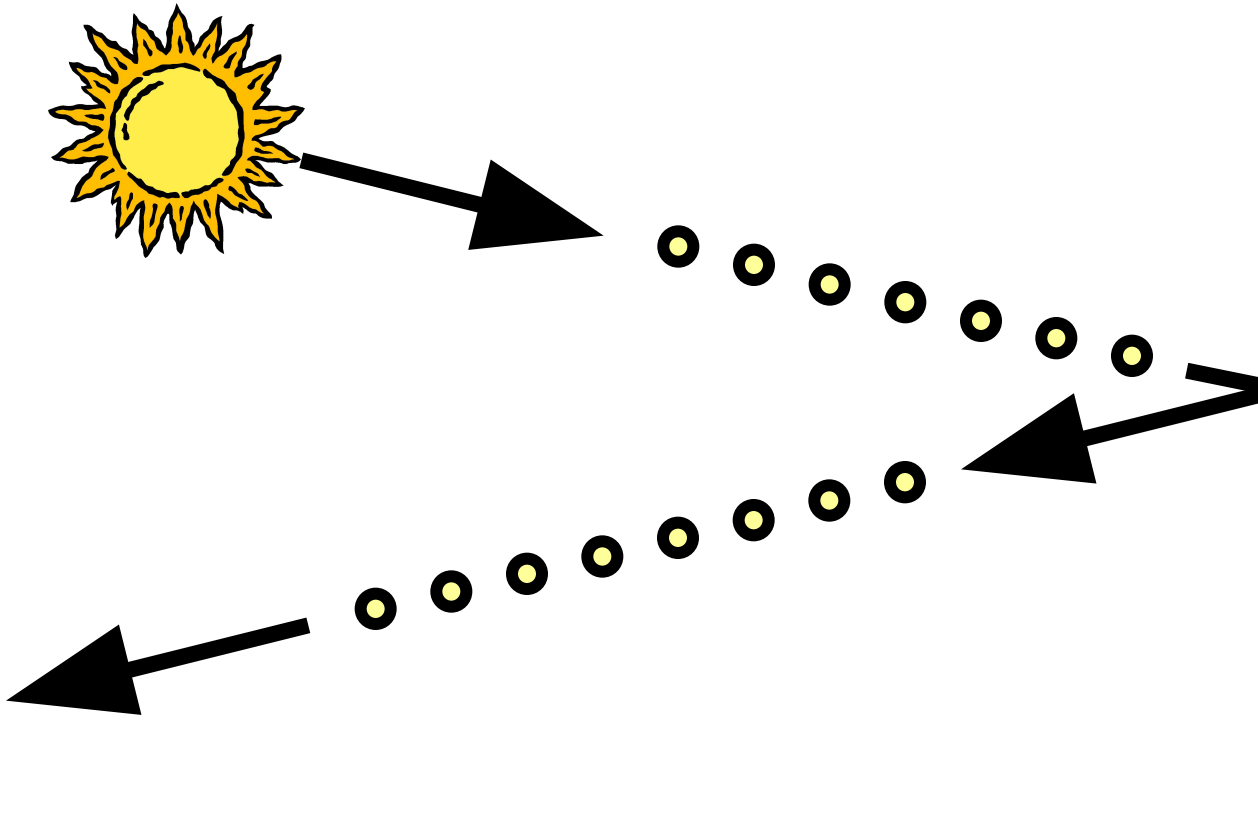
- **Ньютон (1643-1727):**
«Свет – это поток частиц в пустоте»
- **Гюйгенс (1629-1695):**
«Свет – это волна в эфире»



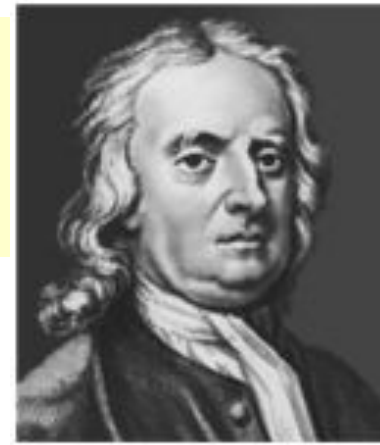
НЬЮТОН: Отражение света – это отскокивание частиц света от препятствия



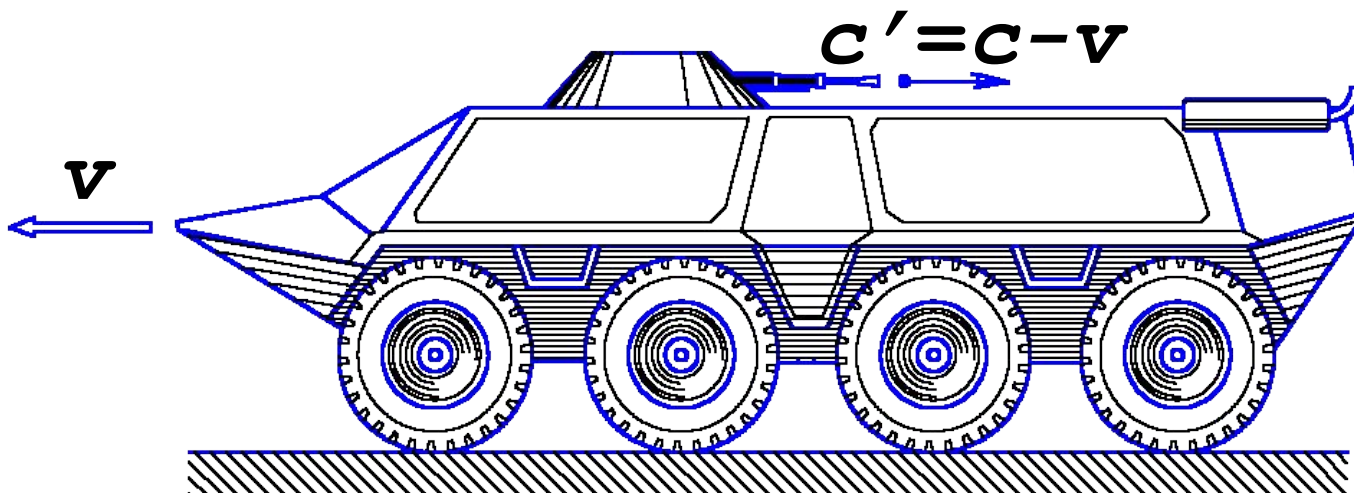
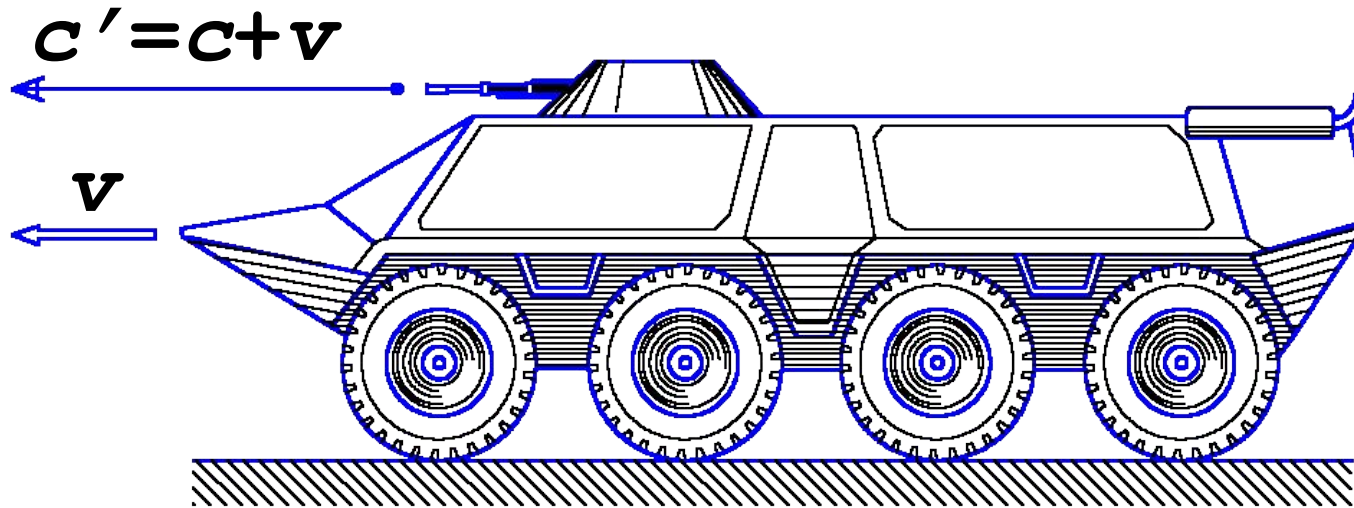
Исаак Ньютон



Сложение скорости системы отсчёта со скоростью частиц света в ней



Исаак Ньютон



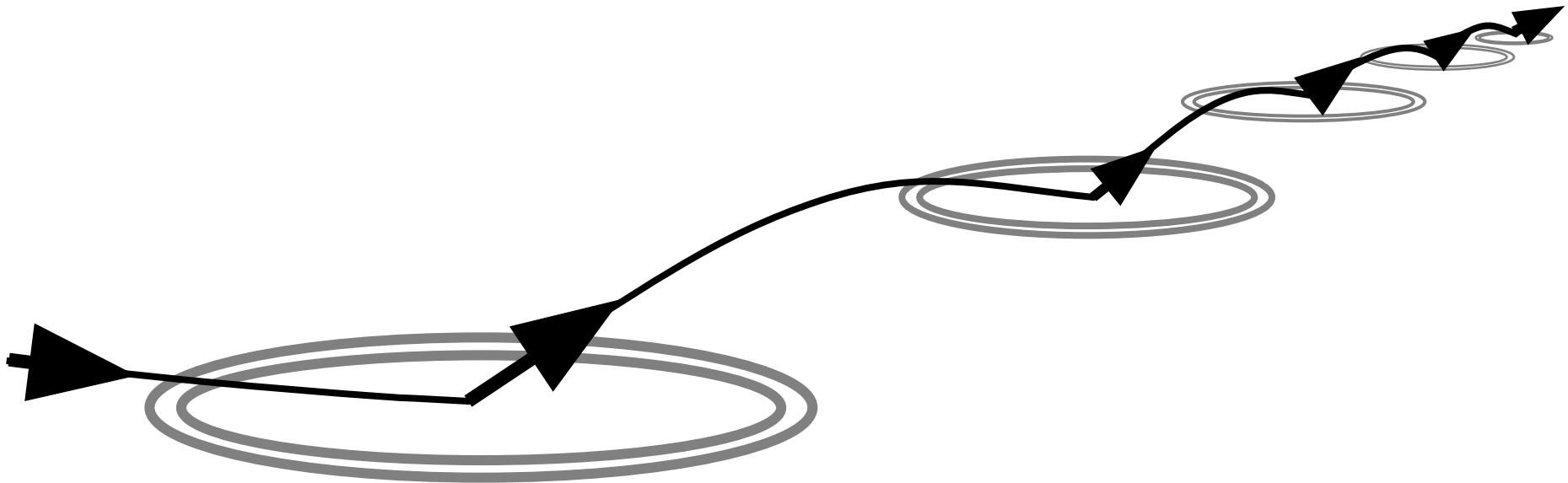
ГЮЙГЕНС: Свет – это волна в эфире

- Эфир – среда, в которой распространяется свет
- Скорость света в эфире не зависит от скорости источника
- Точка, до которой дошла волна, сама становится источником волны

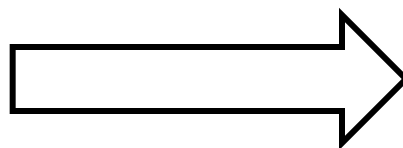


Круги на воде от «блинчиков».

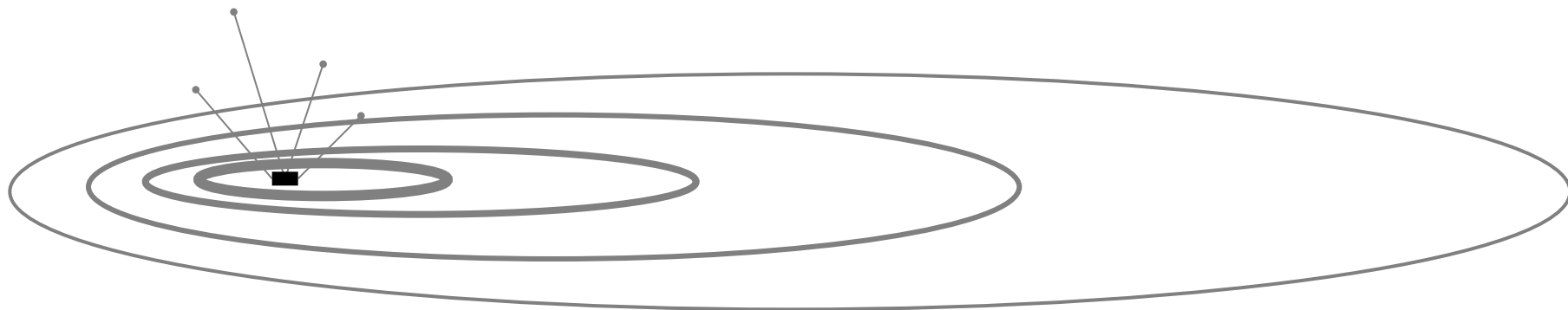
**Скорость распространения волны
не зависит от скорости источника**



**Круги от камней, отвесно падающих в реку.
Движущаяся среда уносит волны**

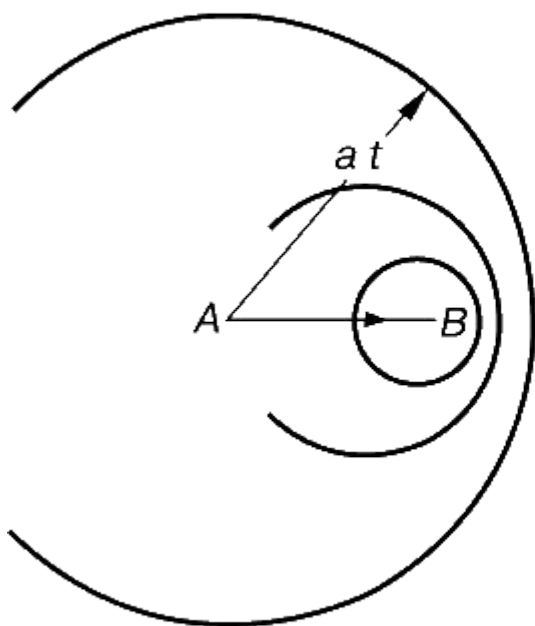


НАПРАВЛЕНИЕ ТЕЧЕНИЯ РЕКИ

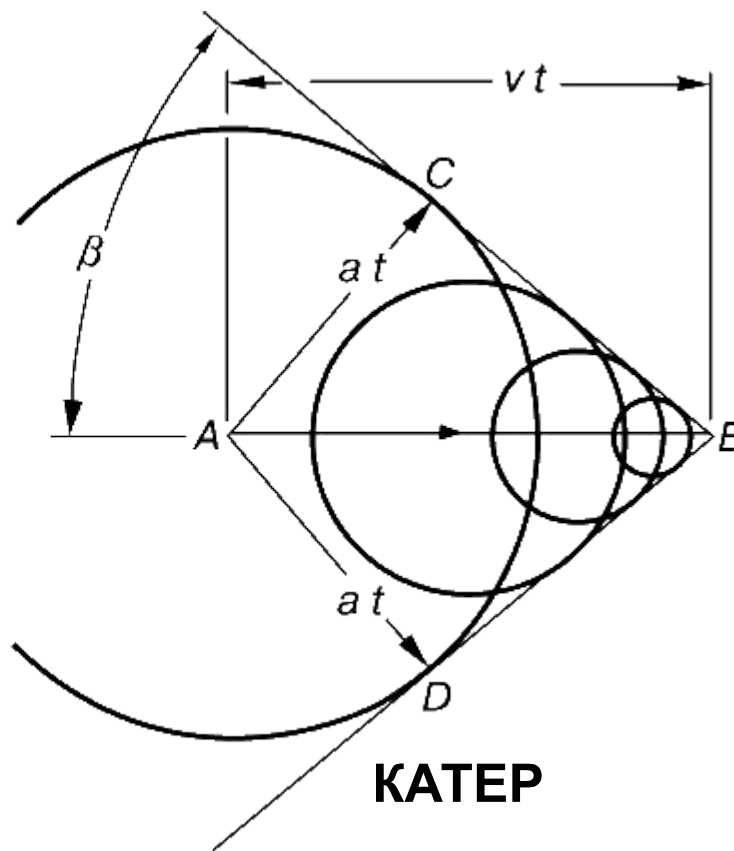


**Круги на озере, созданные
перемещающимся источником.**

**Скорость распространения волн в среде
не зависит от скорости источника**



ЛОДКА

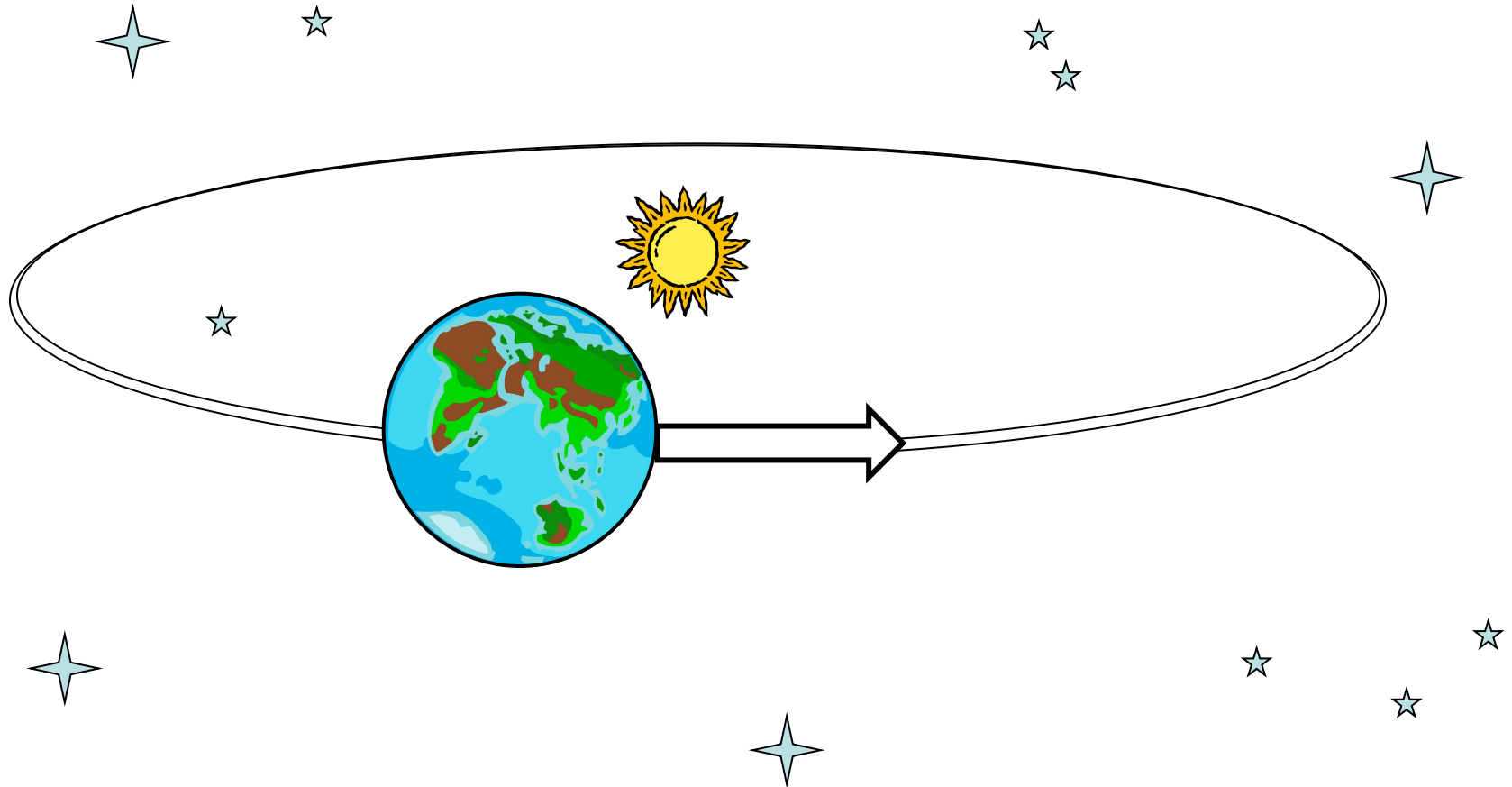


КАТЕР

Представления о свете в XIX веке

- **Свет** – это электромагнитная волна, распространяющаяся в мировом эфире
- **Мировой эфир** – это неподвижная среда, заполняющая всё пространство, для распространения электромагнитных волн

Движение Земли вокруг Солнца по орбите. Среда – мировой эфир?



Опыт Майкельсона (1881 г.)

- **Цель:**

измерить скорость движения Земли по орбите относительно мирового эфира

- **Средство:**

опыты со светом

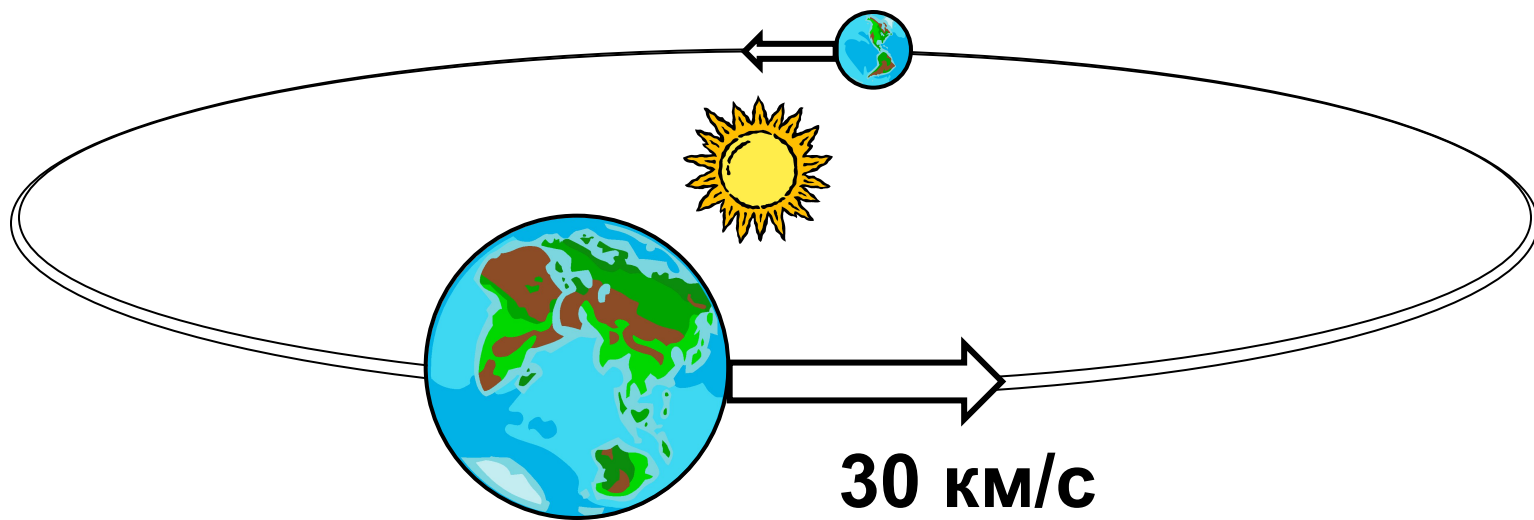
- **Способ:**

измерение разности задержек света при его распространении вдоль и поперёк движения Земли по орбите



**Альберт
Майкельсон
(1852 – 1931)**

Последовательные положения Земли на орбите через полгода



Установка Майкельсона по определению скорости движения Земли относительно мирового эфира с помощью опыта со светом

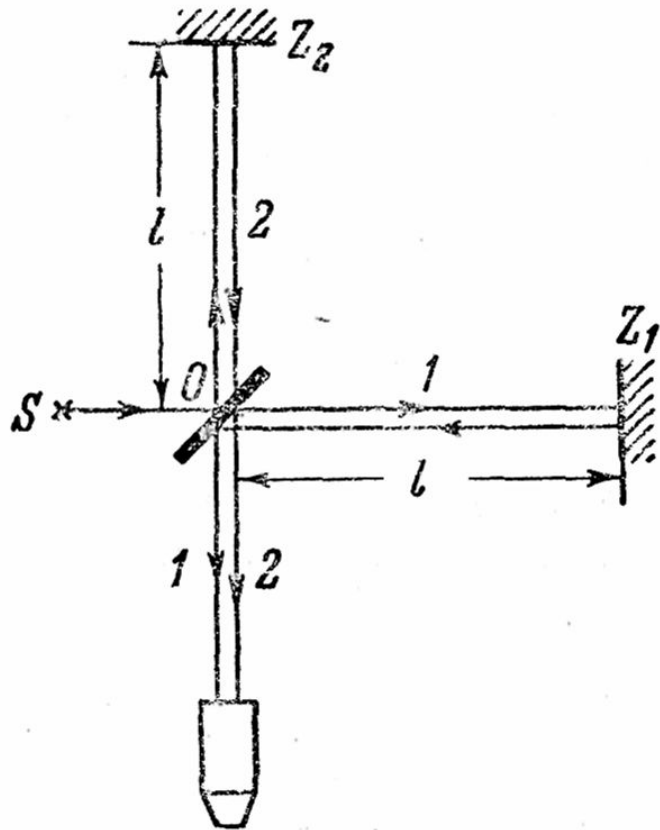
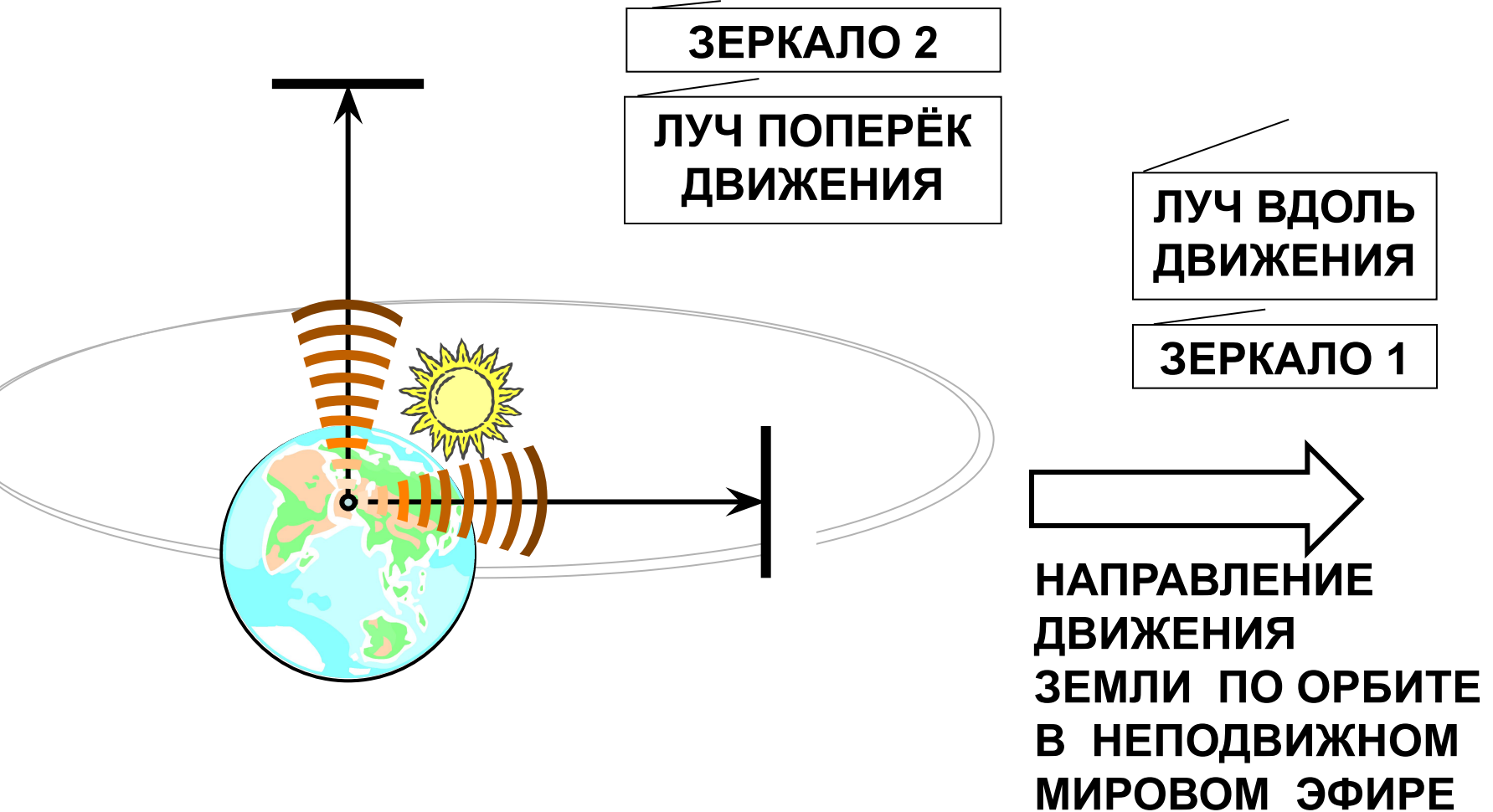


Рис. 1.129.

- Луч 1 распространяется вдоль движения Земли
- Луч 2 распространяется поперёк движения Земли

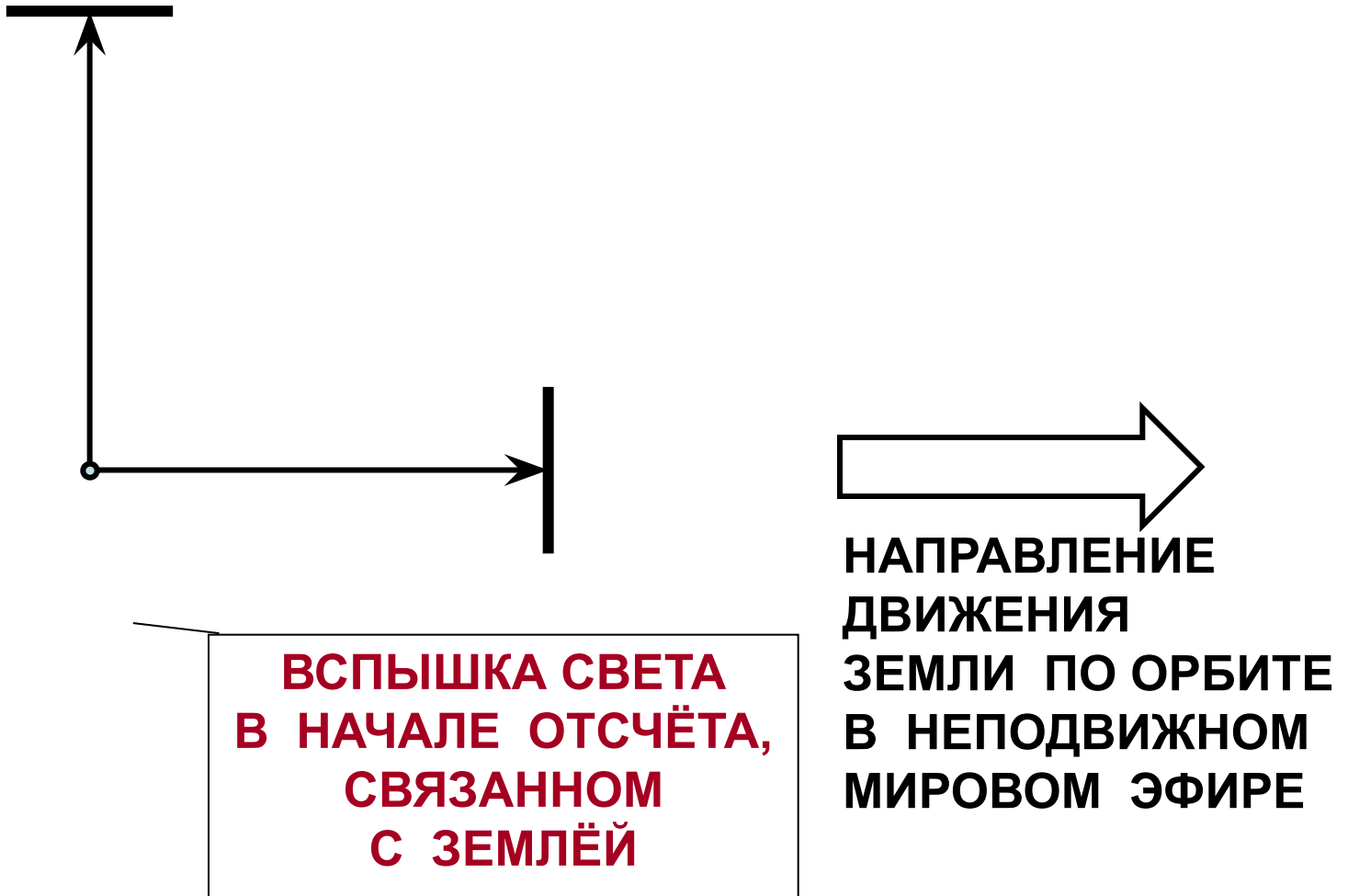
Упрощённая схема установки Майкельсона по измерению разницы в задержках света вдоль и поперёк движения Земли по орбите



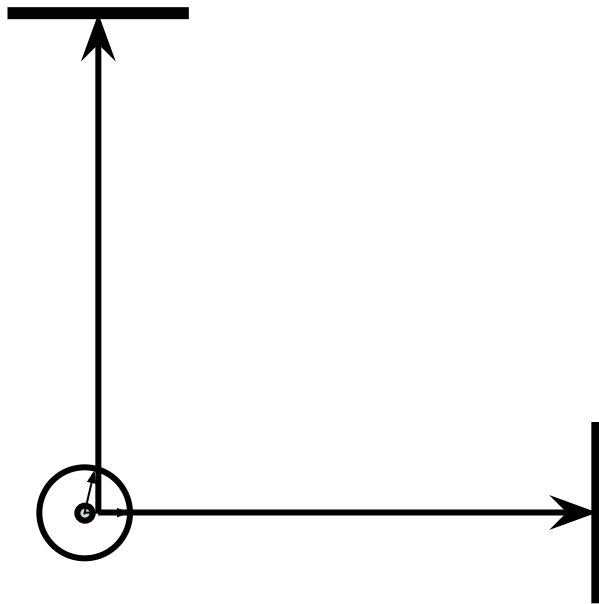
Идея опыта Майкельсона

мультфильм

Кадр 0



Кадр 1

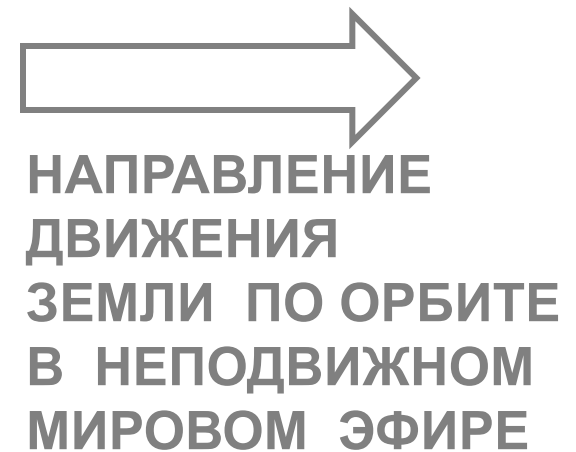
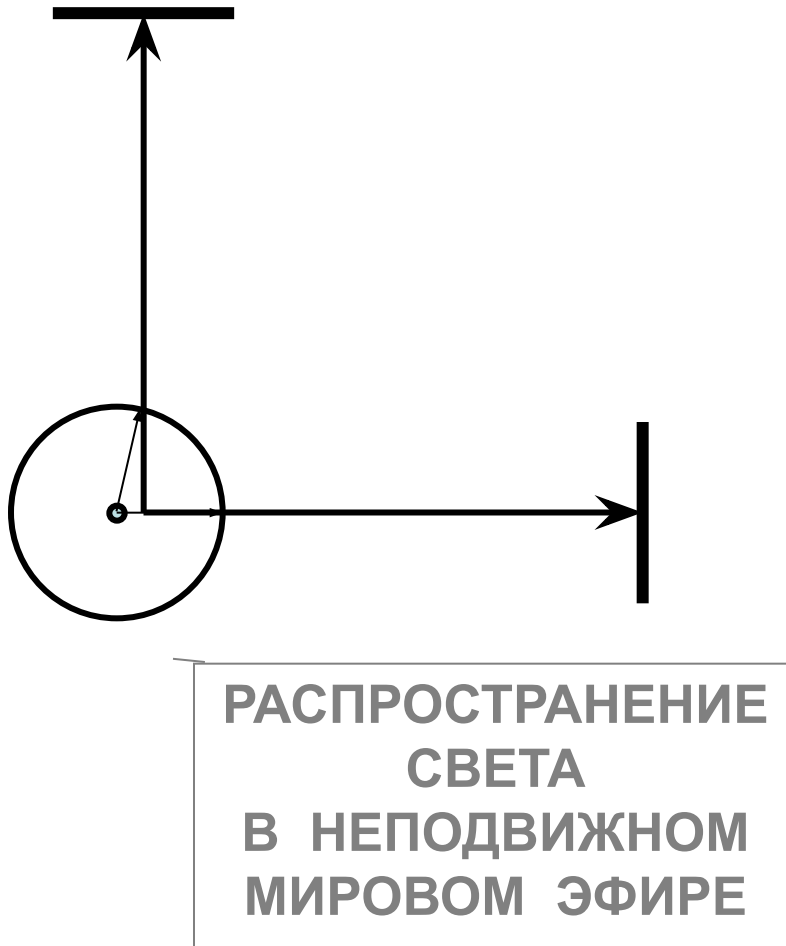


**РАСПРОСТРАНЕНИЕ
СВЕТА
В НЕПОДВИЖНОМ
МИРОВОМ ЭФИРЕ**

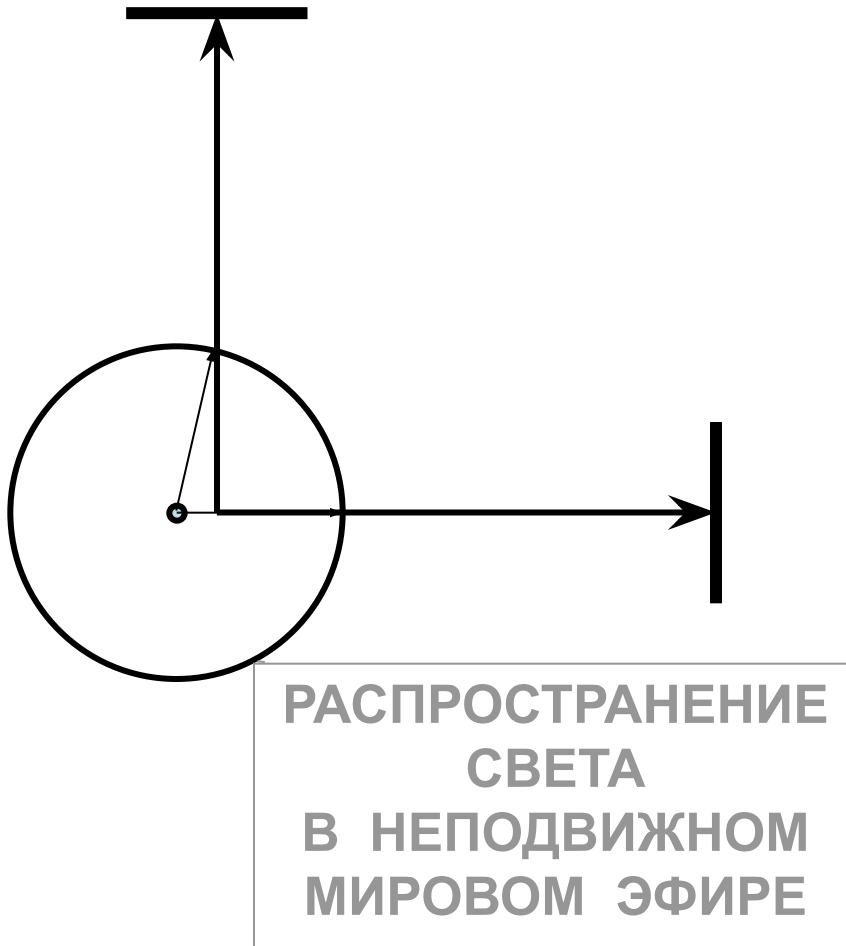


**НАПРАВЛЕНИЕ
ДВИЖЕНИЯ
ЗЕМЛИ ПО ОРБИТЕ
В НЕПОДВИЖНОМ
МИРОВОМ ЭФИРЕ**

Кадр 2

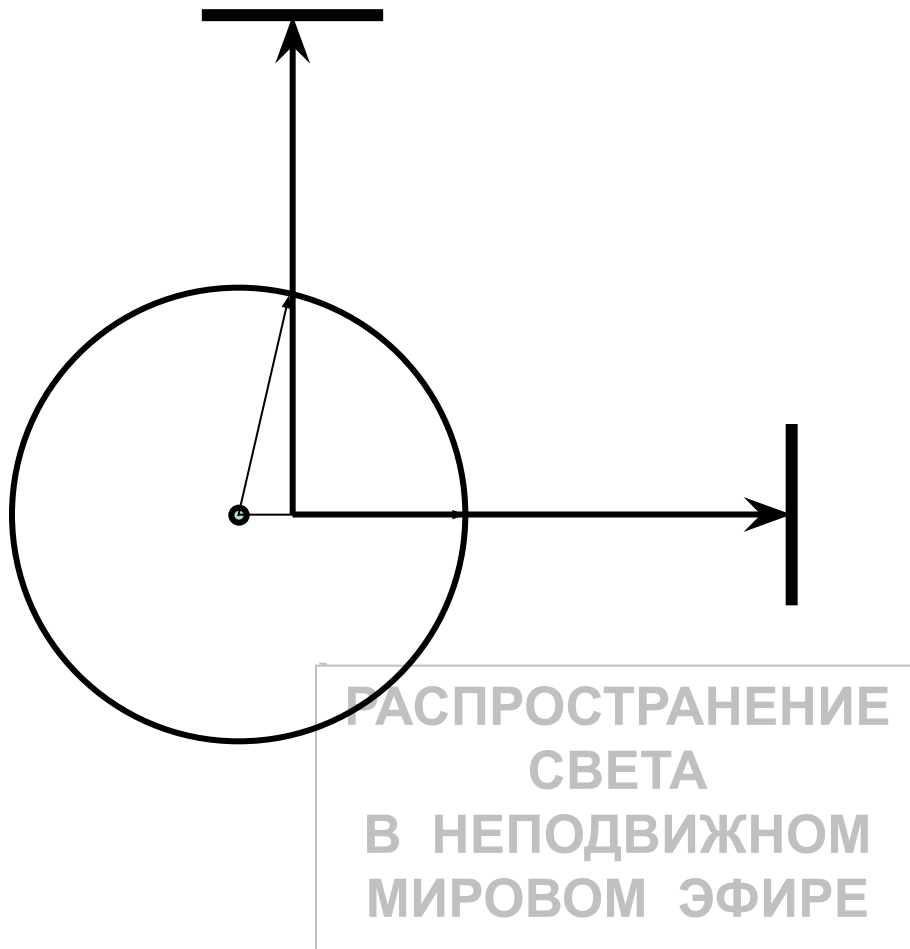


Кадр 3



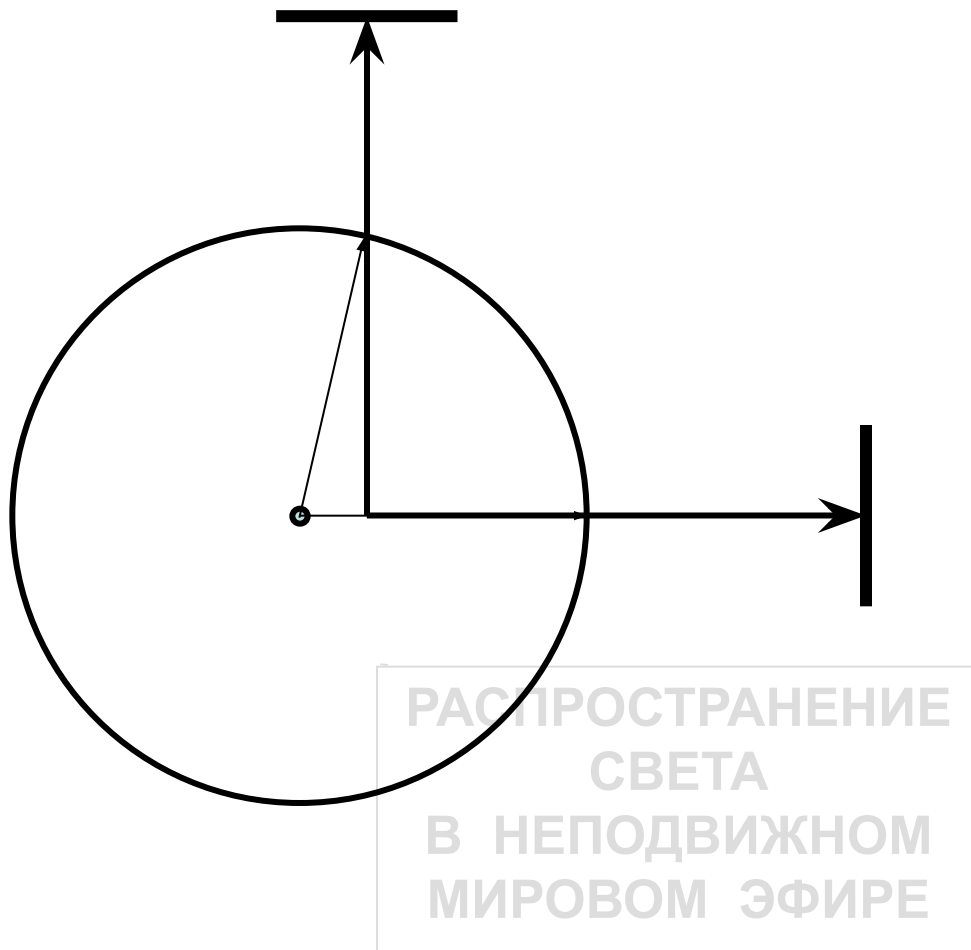
НАПРАВЛЕНИЕ
ДВИЖЕНИЯ
ЗЕМЛИ ПО ОРБИТЕ
В НЕПОДВИЖНОМ
МИРОВОМ ЭФИРЕ

Кадр 4



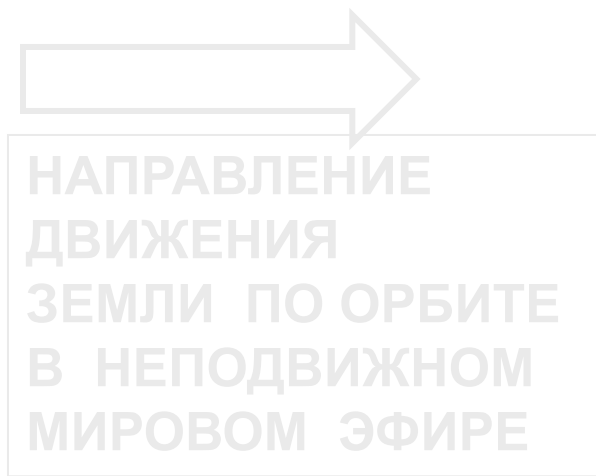
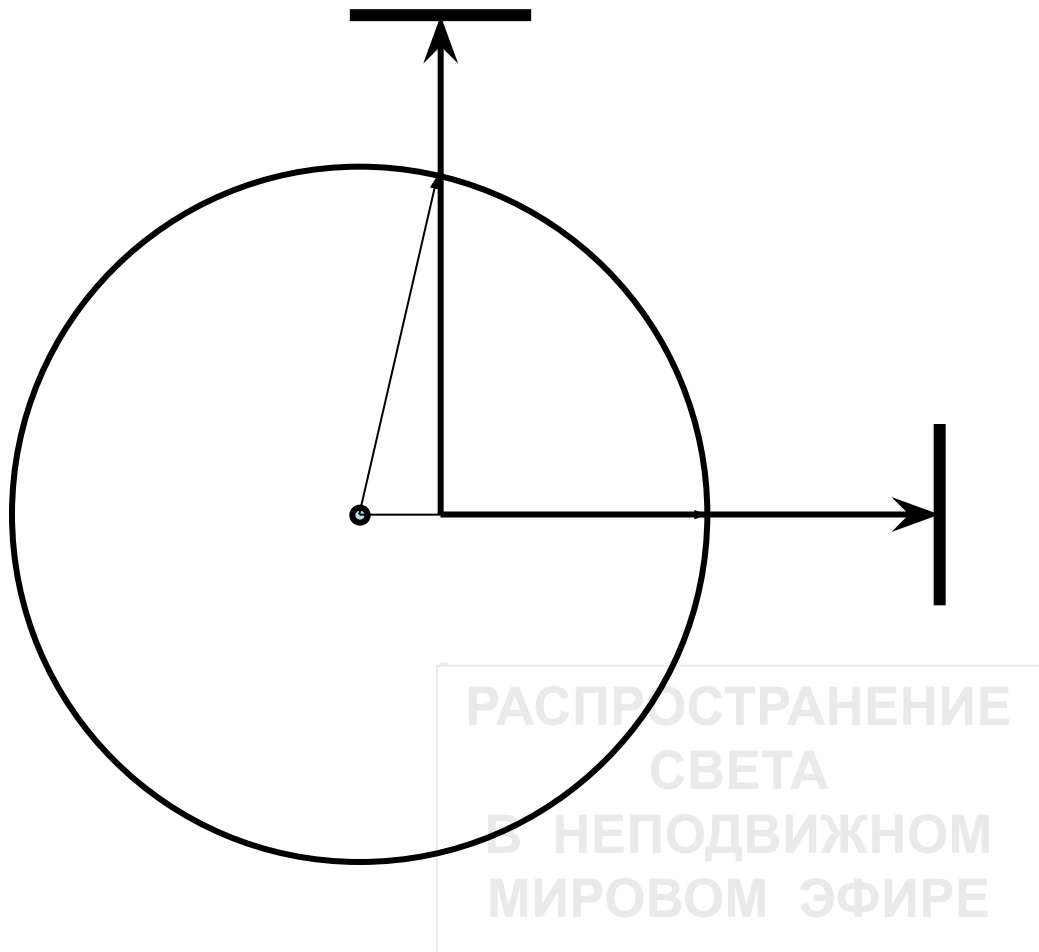
НАПРАВЛЕНИЕ
ДВИЖЕНИЯ
ЗЕМЛИ ПО ОРБИТЕ
В НЕПОДВИЖНОМ
МИРОВОМ ЭФИРЕ

Кадр 5

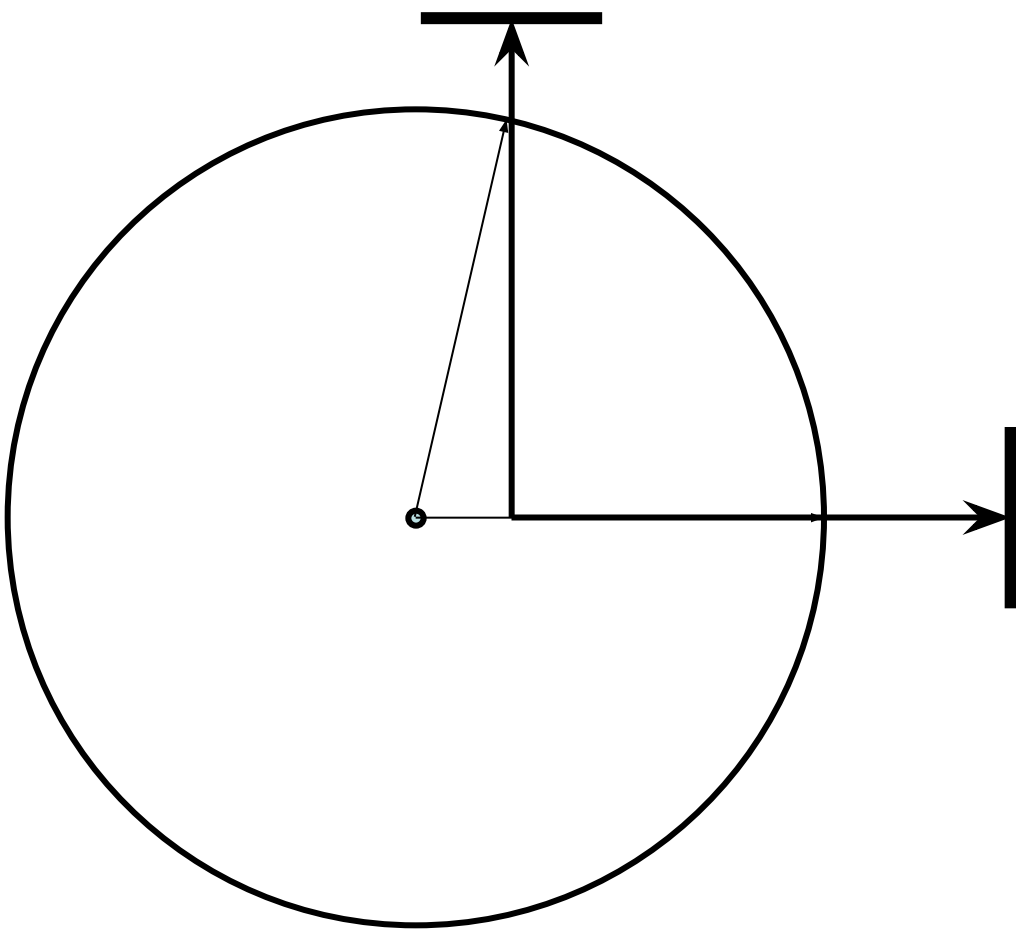


НАПРАВЛЕНИЕ
ДВИЖЕНИЯ
ЗЕМЛИ ПО ОРБИТЕ
В НЕПОДВИЖНОМ
МИРОВОМ ЭФИРЕ

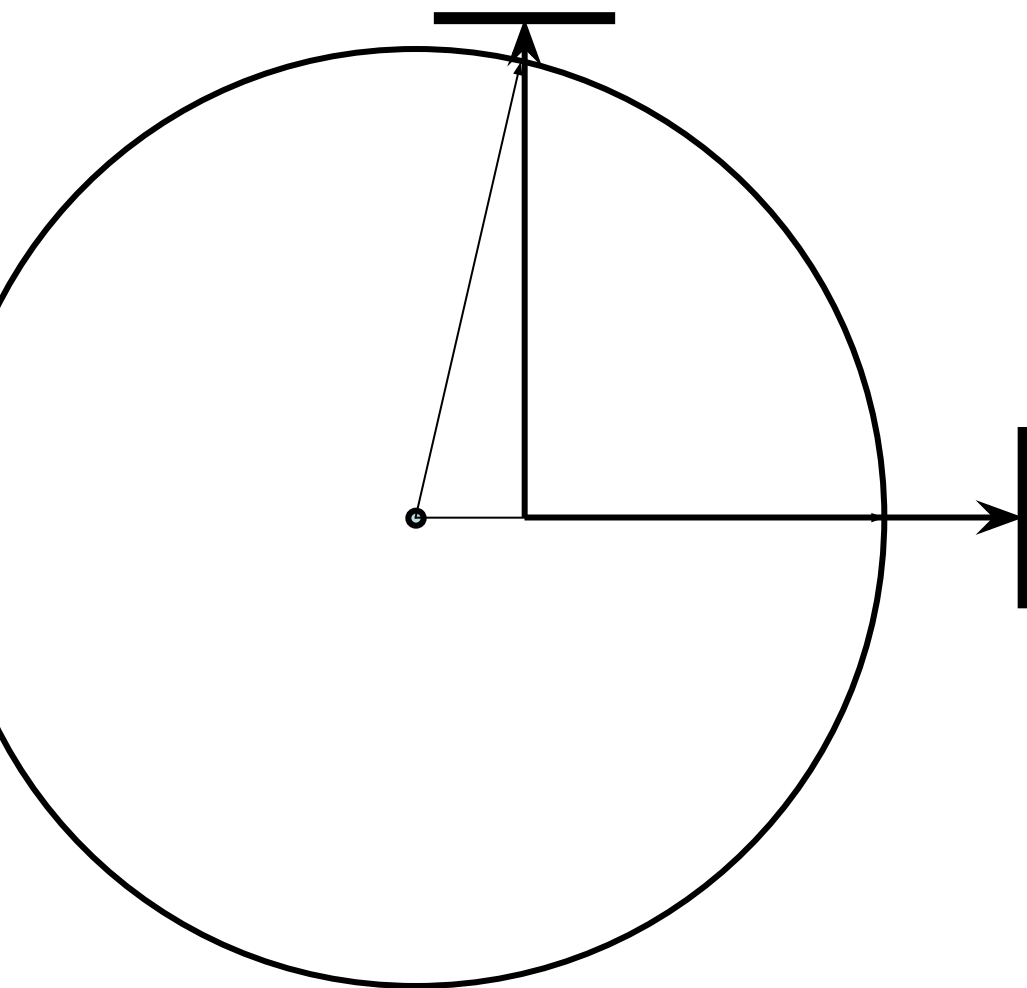
Кадр 6



Кадр 7

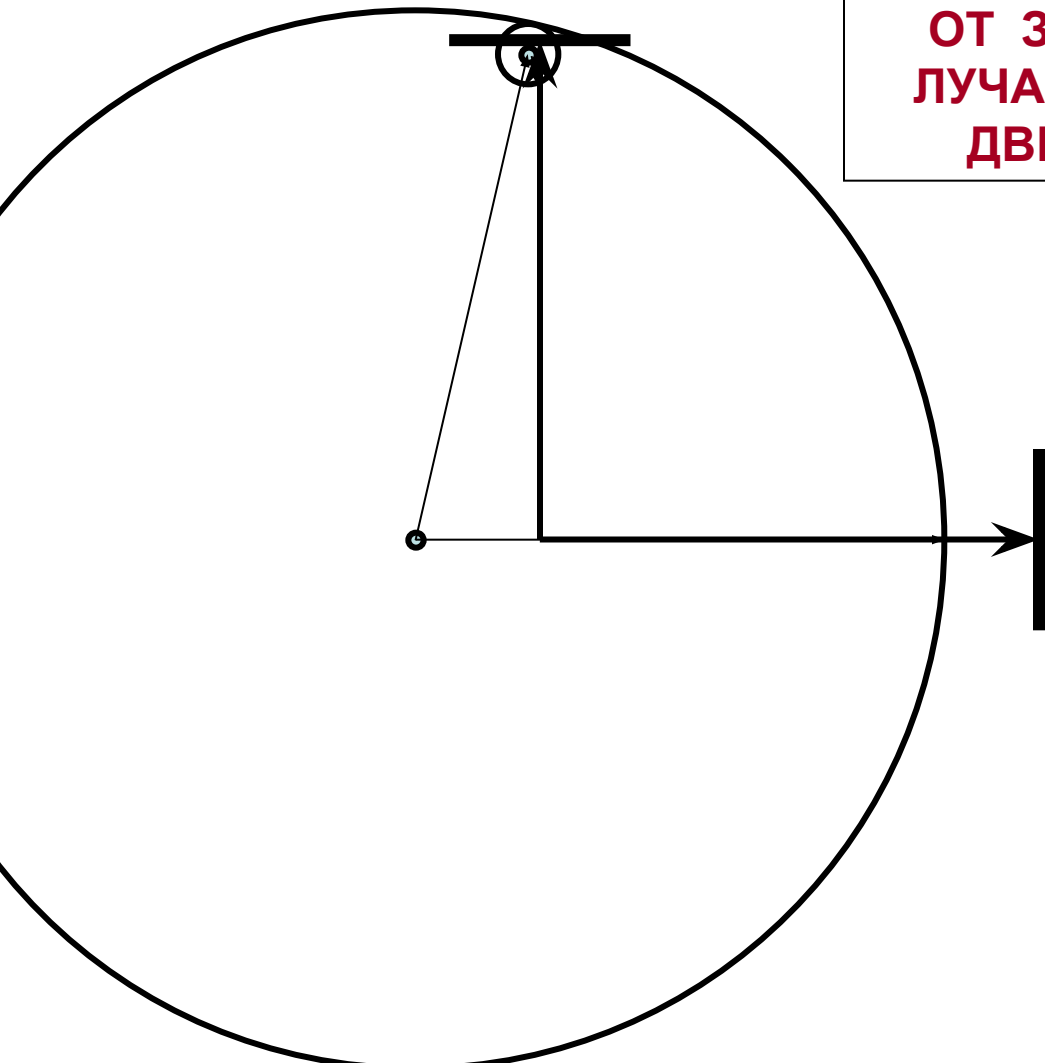


Кадр 8

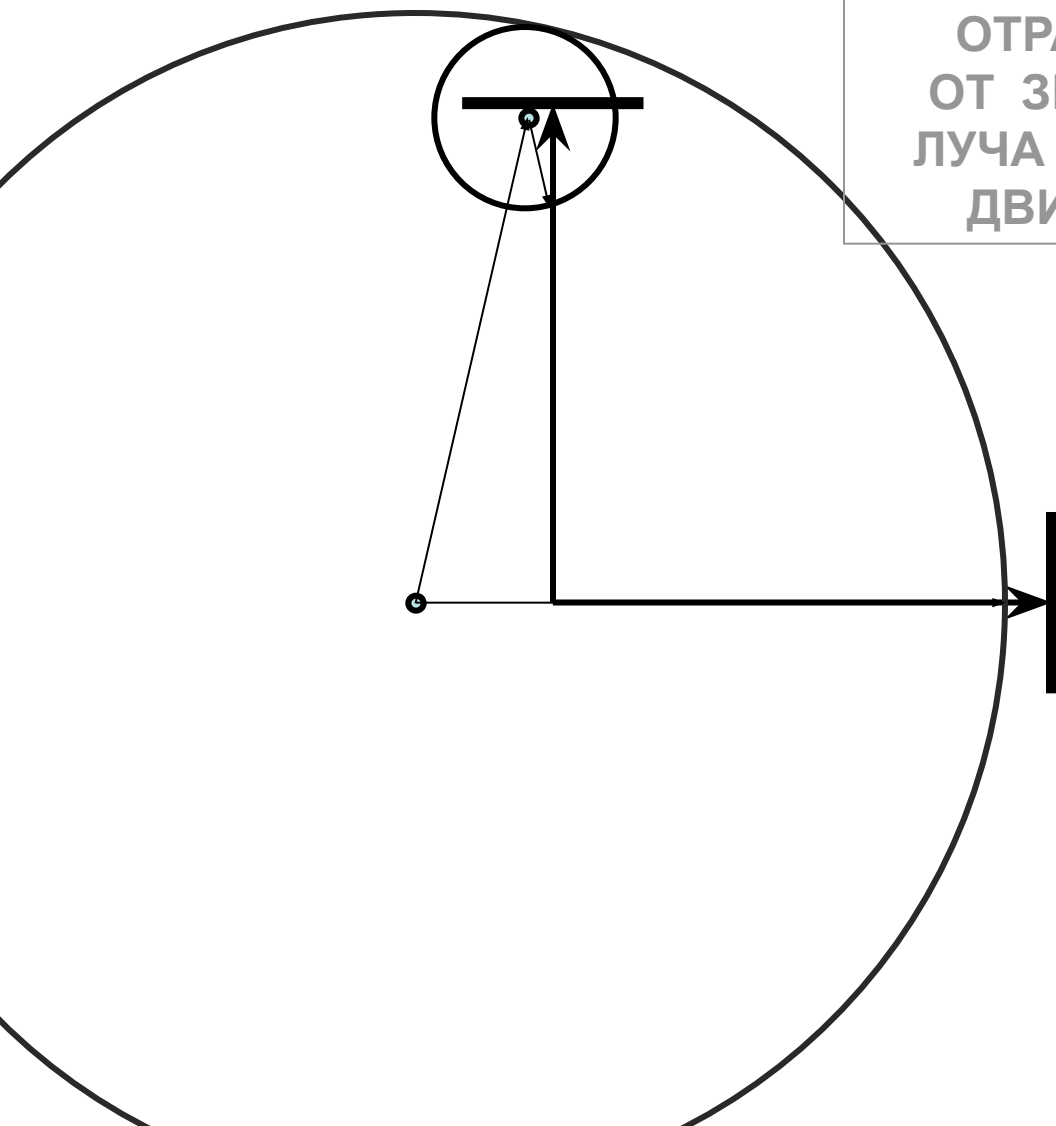


Кадр 9

ОТРАЖЕНИЕ
ОТ ЗЕРКАЛА 2
ЛУЧА ПОПЕРЁК
ДВИЖЕНИЯ

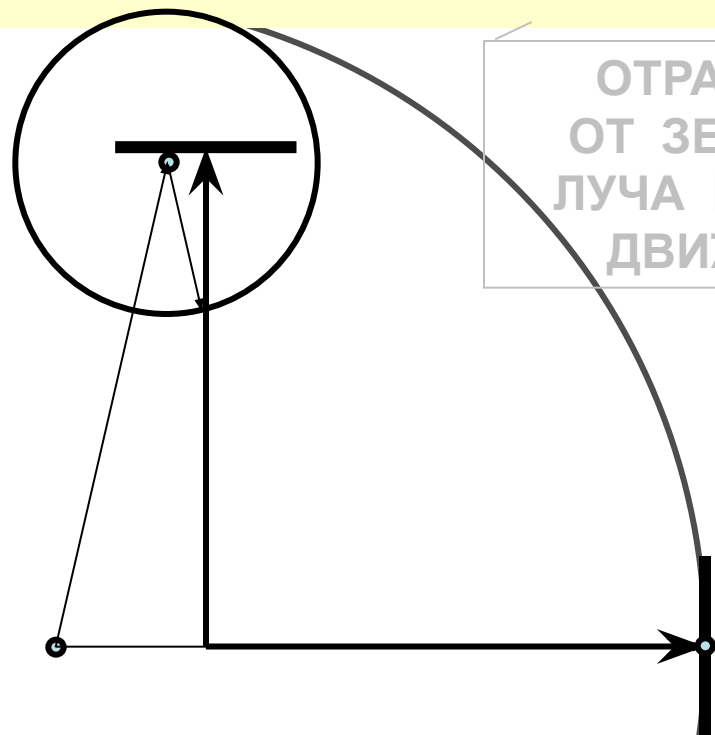


Кадр 10



ОТРАЖЕНИЕ
ОТ ЗЕРКАЛА 2
ЛУЧА ПОПЕРЁК
ДВИЖЕНИЯ

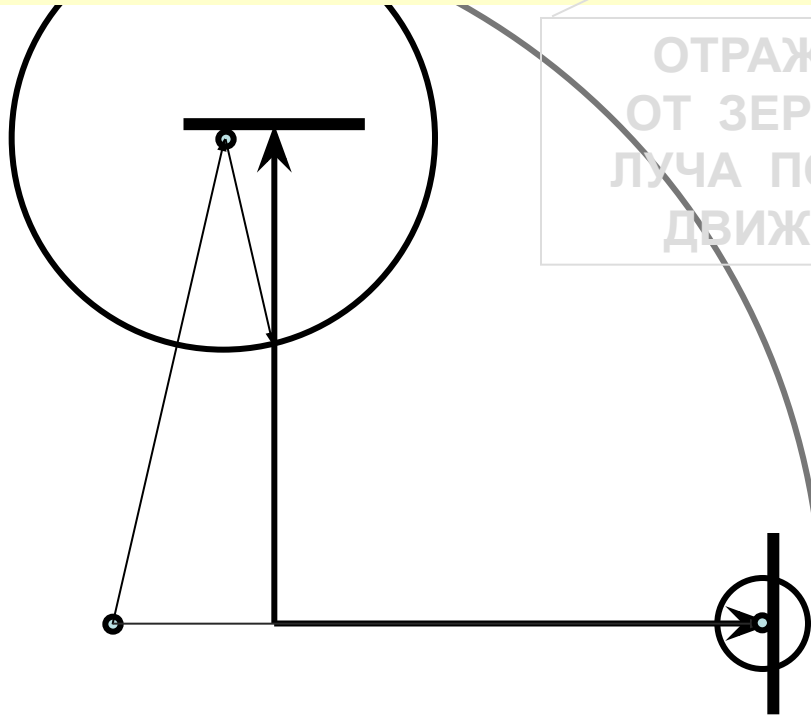
Кадр 11



ОТРАЖЕНИЕ
ОТ ЗЕРКАЛА 2
ЛУЧА ПОПЕРЁК
ДВИЖЕНИЯ

**ОТРАЖЕНИЕ
ОТ ЗЕРКАЛА 1
ЛУЧА ВДОЛЬ
ДВИЖЕНИЯ**

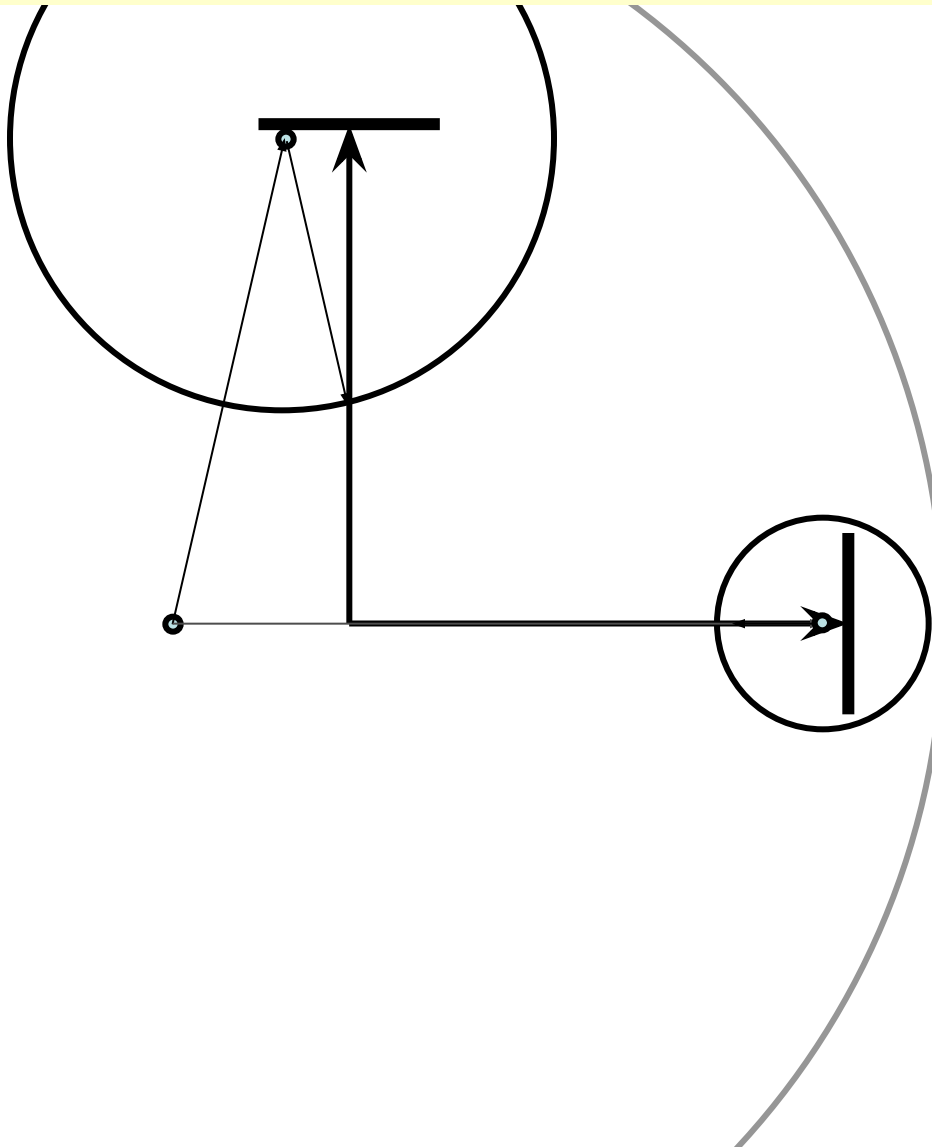
Кадр 12



ОТРАЖЕНИЕ
ОТ ЗЕРКАЛА 2
ЛУЧА ПОПЕРЁК
ДВИЖЕНИЯ

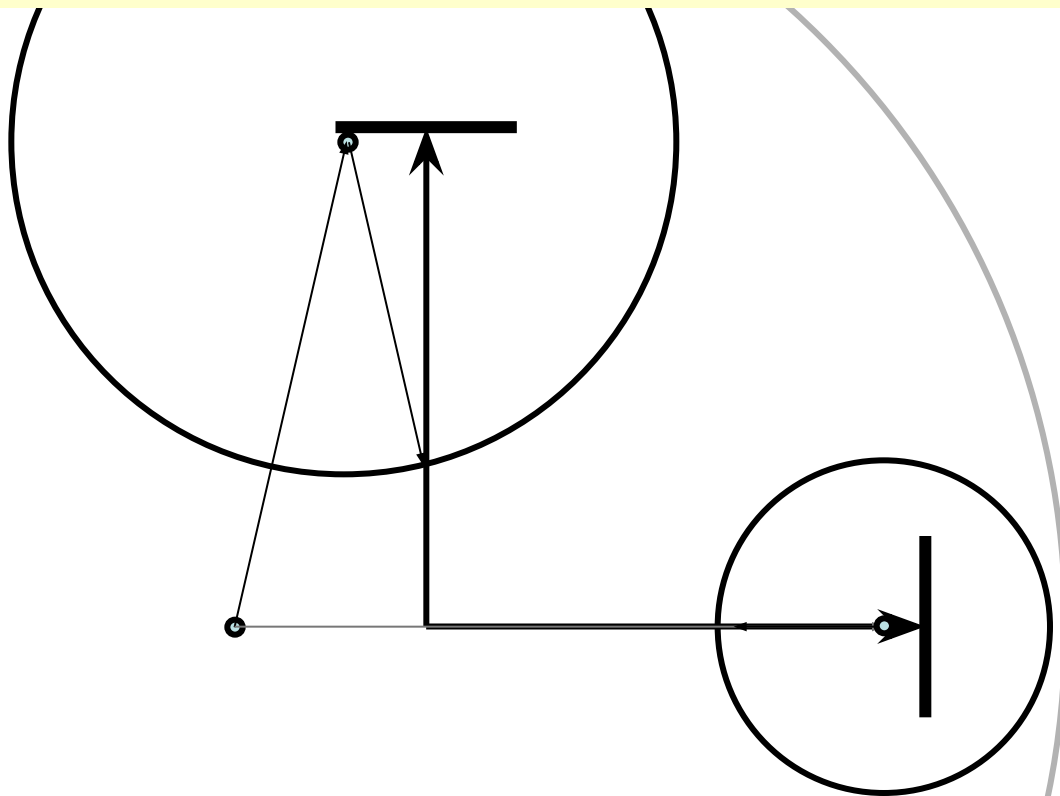
ОТРАЖЕНИЕ
ОТ ЗЕРКАЛА 1
ЛУЧА ВДОЛЬ
ДВИЖЕНИЯ

Кадр 13



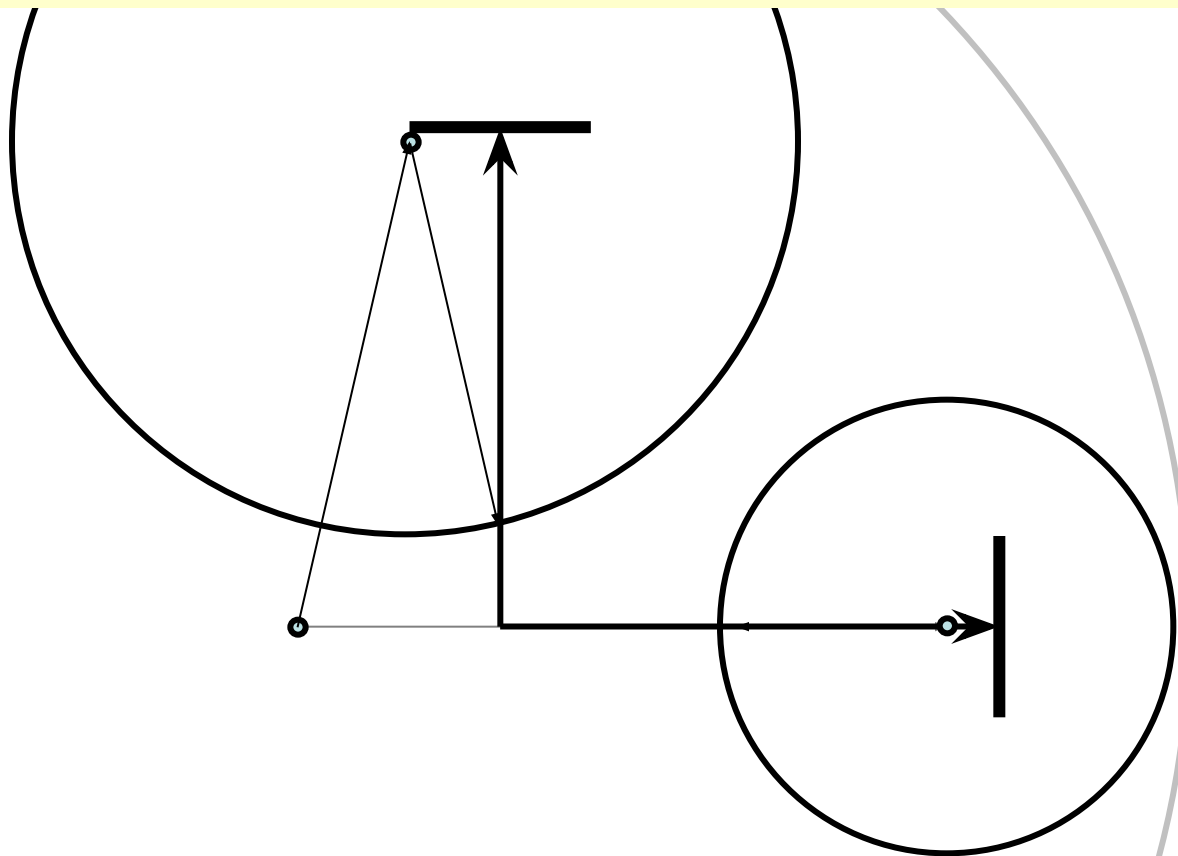
ОТРАЖЕНИЕ
ОТ ЗЕРКАЛА 1
ЛУЧА ВДОЛЬ
ДВИЖЕНИЯ

Кадр 14

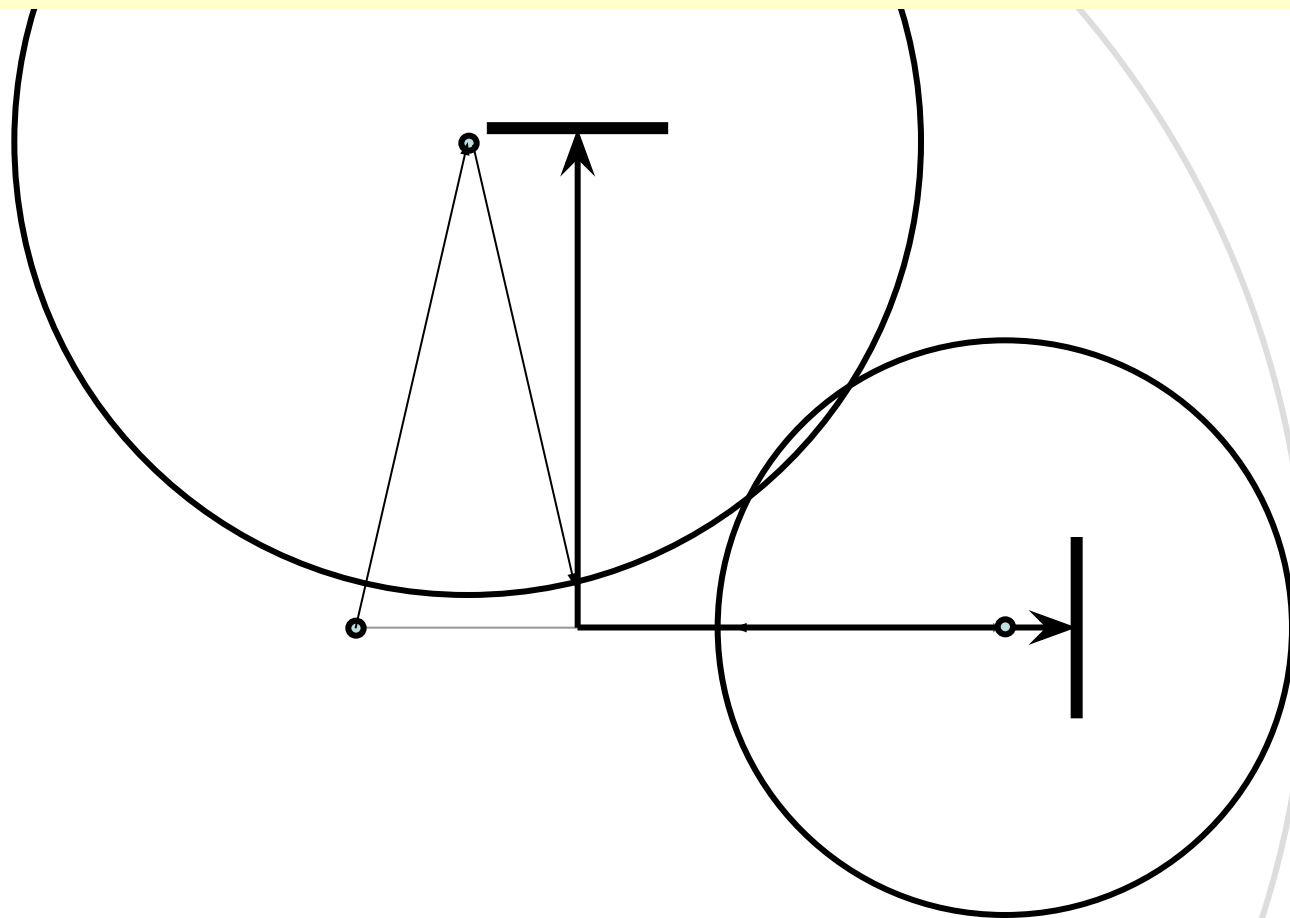


ОТРАЖЕНИЕ
ОТ ЗЕРКАЛА 1
ЛУЧА ВДОЛЬ
ДВИЖЕНИЯ

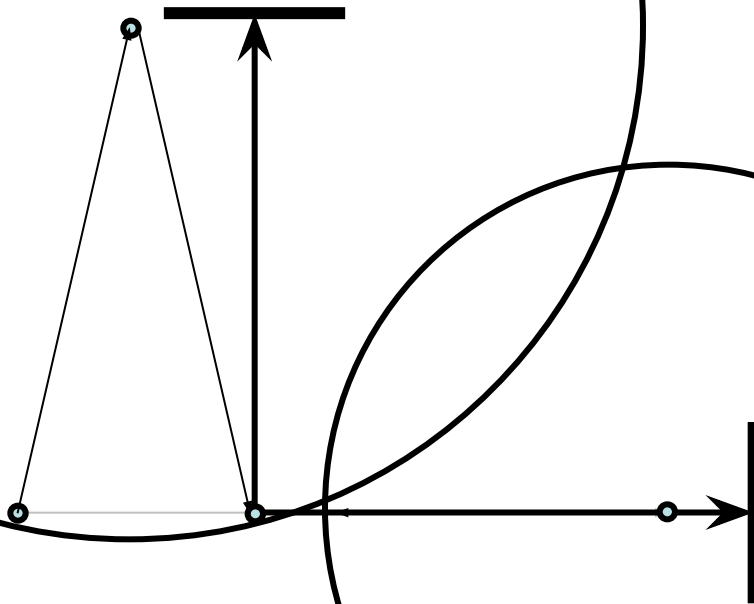
Кадр 15



Кадр 16



Кадр 17

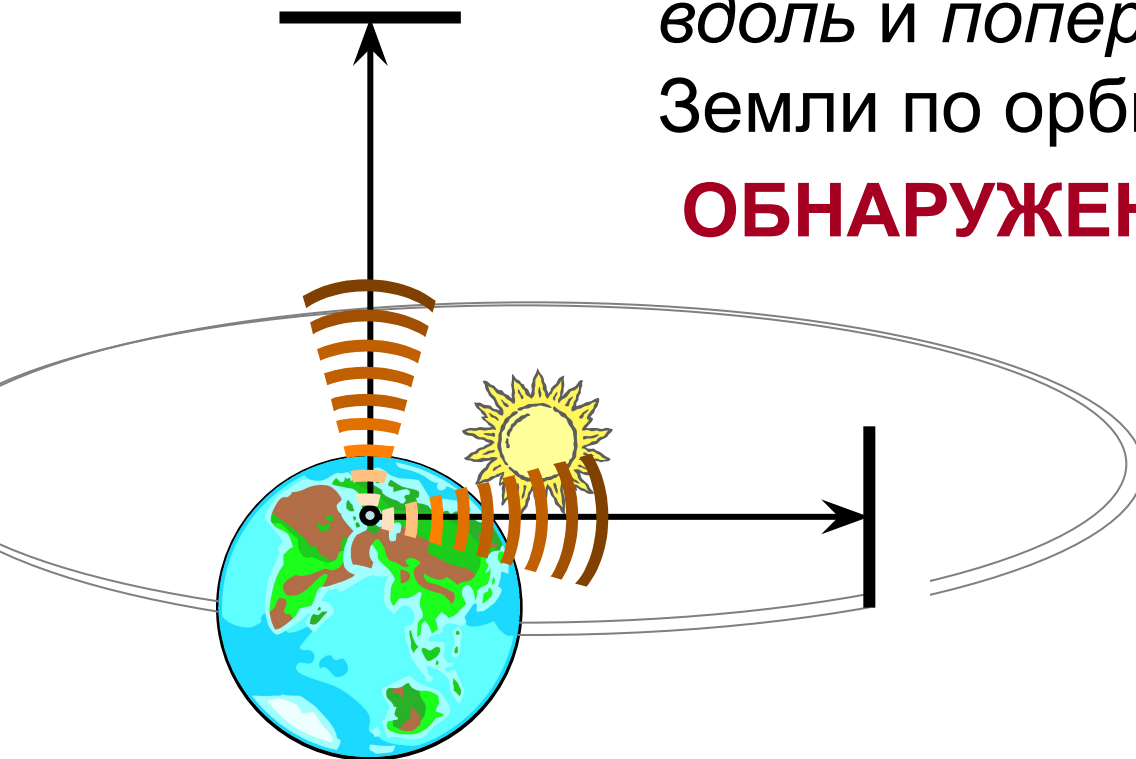


**ЛУЧ ПОПЕРЁК
ДВИЖЕНИЯ
ДОСТИГАЕТ
НАЧАЛА ОТСЧЁТА!**

Итог опыта Майкельсона



- **Ожидавшаяся разница** задержек при распространении света *вдоль и поперёк* движения Земли по орбите **ОБНАРУЖЕНА НЕ БЫЛА**



Погрешности опытов по определению скорости эфирного ветра

- Майкельсон (1881 г.) 18 км/с
- Майкельсон, Морли (1887 г.) 7 км/с
- Иллингворт (1925 г.) 1 км/с

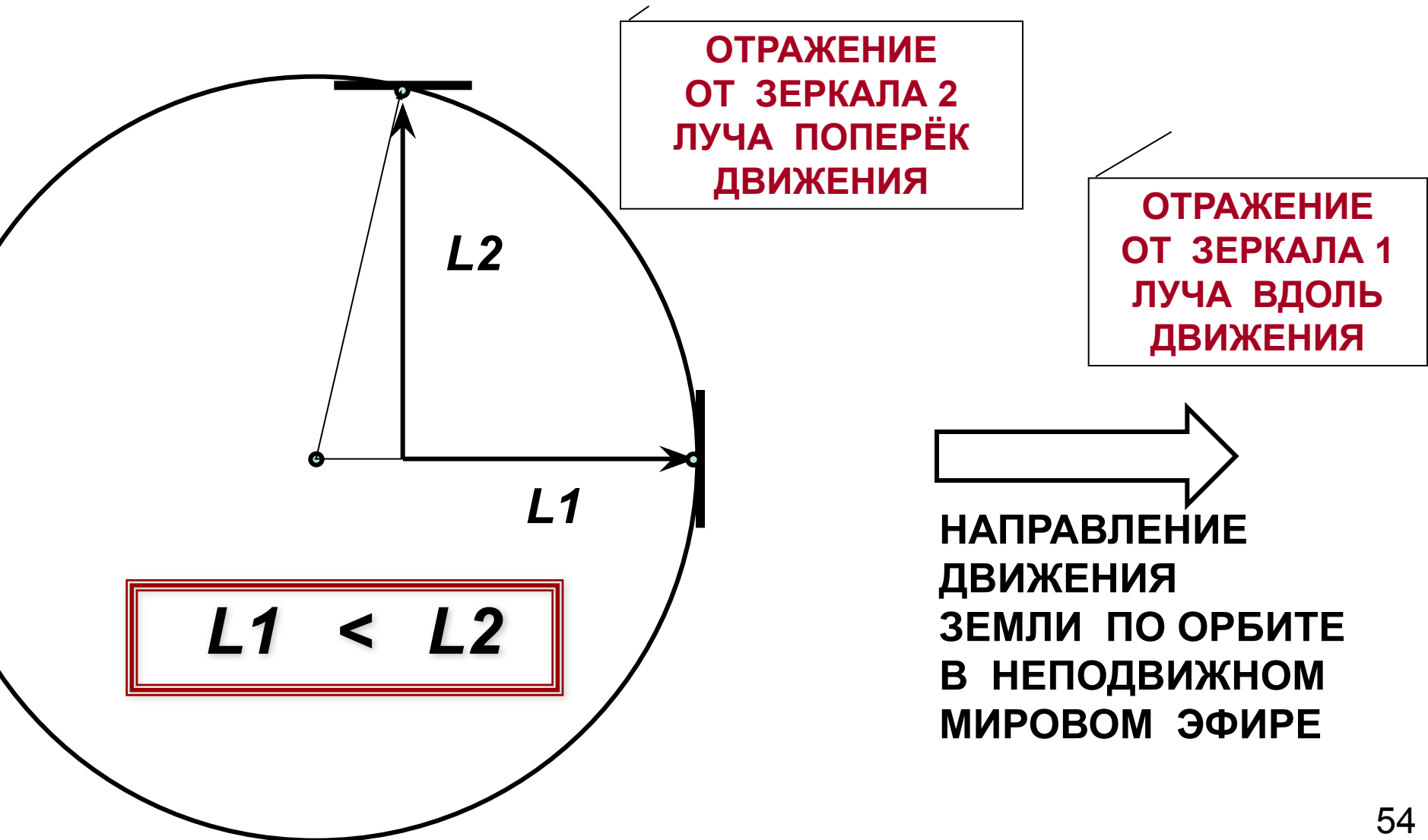
*Скорость движения Земли
по орбите – **30 км/с***

Предложение Хендрика Лоренца (1883 г.) для объяснения отрицательного результата опыта Майкельсона

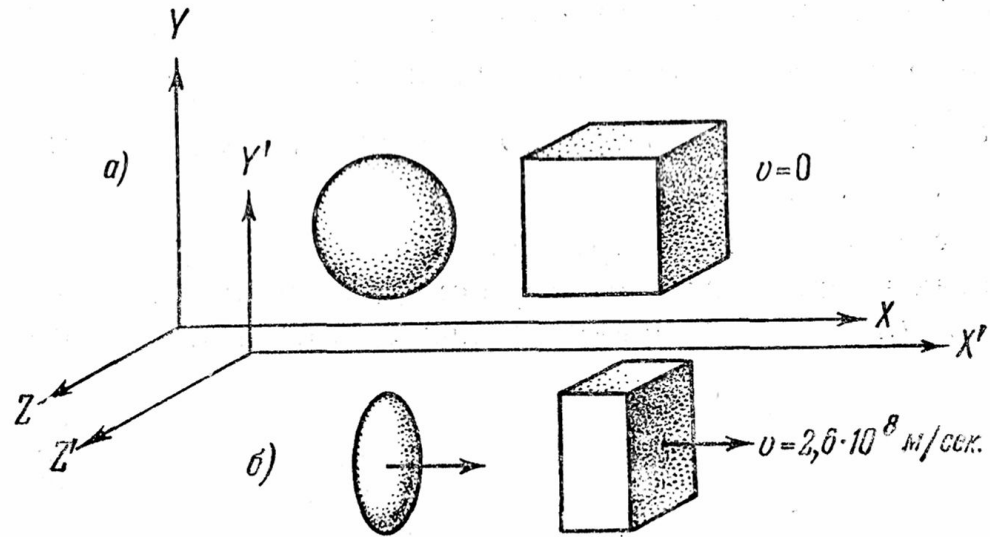


- Мировой эфир существует
- При движении происходит сокращение продольных размеров тел

Предложение Хендрика Лоренца: при движении происходит укорочение продольного плеча



Преобразования Лоренца (1895 г.), обеспечивающие сокращение продольных размеров тел при движении



$$x' \neq x$$

СОКРАЩЕНИЕ ДЛИН

$$S \rightarrow S'$$

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

$$S' \rightarrow S$$

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

$$y = y',$$

$$z = z',$$

$$t' \neq t$$

«МЕСТНОЕ» ВРЕМЯ

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

$$t = \frac{t' + \frac{v}{c^2} x'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Хендрик Лоренц
нидерландский физик



Анри Пуанкаре
французский математик



Взгляды Пуанкаре (1)



- Мирового эфира **нет**
- Все инерциальные системы отсчёта **равноправны**

Взгляды Пуанкаре (2)



- **Математическая** запись физических законов **должна быть** одинакова во всех инерциальных системах отсчёта

$$F = m \cdot a$$

Взгляды Пуанкаре (3)



- Математическая запись **уравнений электромагнетизма Максвелла** тоже должна быть одинакова во всех инерциальных системах отсчёта

Принцип относительности Пуанкаре (Книга «Наука и гипотеза», 1902 г.)



Все физические явления
должны быть
одинаковыми
для наблюдателей,
находящихся в разных
инерциальных системах
отсчёта

Лекция Пуанкаре в США о состоянии науки (1904 г.)



- Закон сохранения энергии
- Второе начало термодинамики
- Равенство действия противодействию
- Закон сохранения массы
- Принцип наименьшего действия

Лекция Пуанкаре в США о состоянии науки (1904 г.)



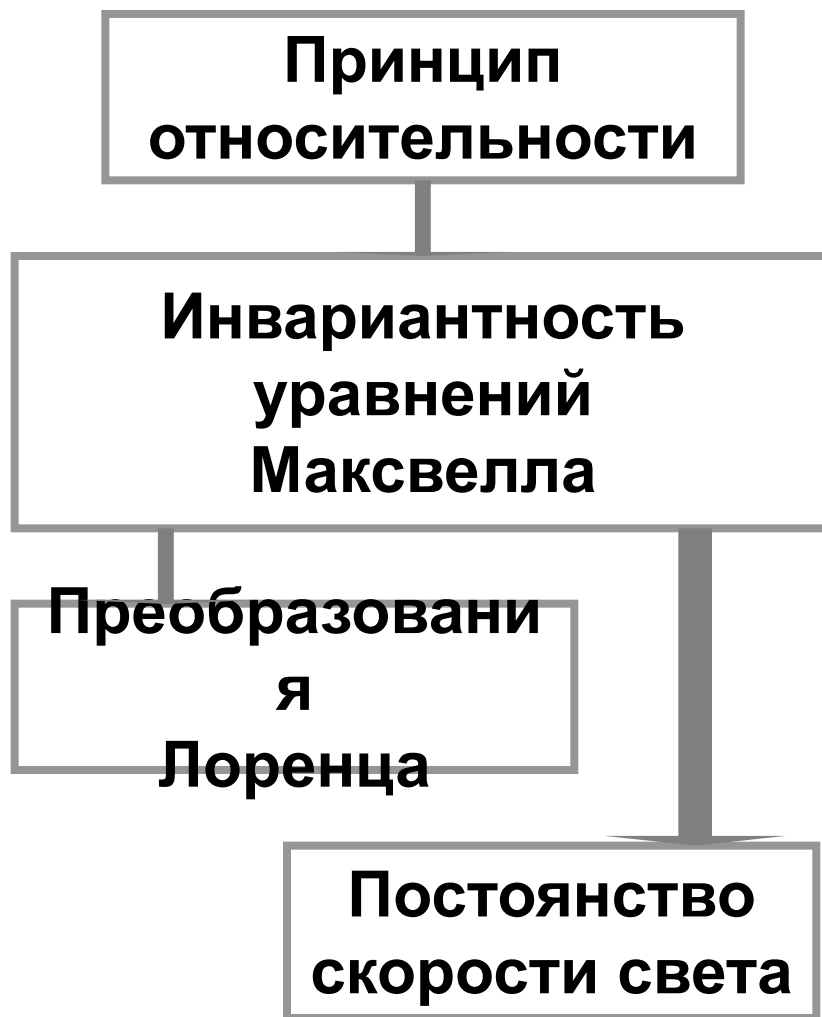
- Закон сохранения энергии
- Второе начало термодинамики
- Равенство действия противодействию
- Закон сохранения массы
- Принцип наименьшего действия
- **Принцип относительности**

Признание заслуг Лоренца



- Преобразования, предложенные Лоренцем, обеспечивают одинаковость уравнений Максвелла в различных системах отсчёта

Доклад Пуанкаре по теории относительности (Опубл. 5 июня 1905 г. «Заметки Академии наук»)



Работы Лоренца и Пуанкаре по теории относительности

- Г.А. Лоренц. **Интерференционный опыт Майкельсона**. Из книги *"Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern. Leiden, 1895, параграфы 89...92.*
- А. Пуанкаре. **Измерение времени**. *"Revue de Metaphysique et de Morale", 1898, t. 6, p. 1...13.*
- А. Пуанкаре. **Оптические явления в движущихся телах**. *Electricite et Optique, G. Carre et C. Naud, Paris, 1901, p. 535...536.*
- А. Пуанкаре. **О принципе относительности пространства и движения**. Главы 5...7 из книги *"Наука и гипотеза"* (H. Poincaré. *Science and Hypothesis. Paris, 1902.*)
- А. Пуанкаре. **Настоящее и будущее математической физики**. Доклад, напечатанный в журнале *"Bulletin des Sciences Mathematiques"*, **1904**, v. 28, ser. 2, p. 302.
- Г.А. Лоренц. **Электромагнитные явления в системе движущейся с любой скоростью, меньшей скорости света**. *Proc Acad., Amsterdam, 1904, v 6, p. 809.*
- А. Пуанкаре. **О динамике электрона**. *Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo, 1906* (поступила в печать **23** июля **1905** г.) v. XXI, p. 129.

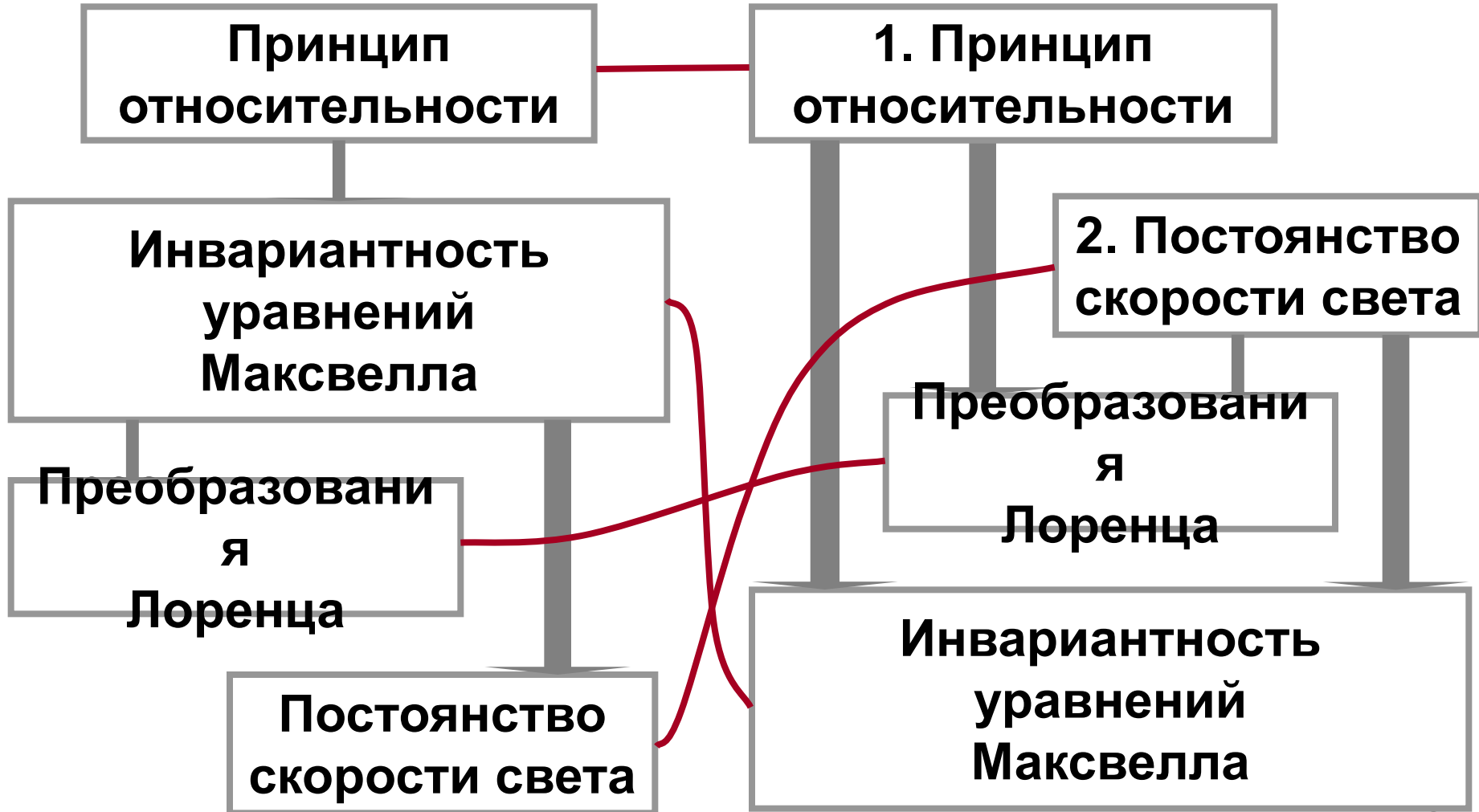
Первая работа Эйнштейна по теории относительности

- Г.А. Лоренц. **Интерференционный опыт Майкельсона**. Из книги "Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern. Leiden, **1895**, параграфы 89...92.
- А. Пуанкаре. **Измерение времени**. "Revue de Metaphysique et de Morale", **1898**, t. 6, p. 1...13.
- А. Пуанкаре. **Оптические явления в движущихся телах**. Electricite et Optique, G. Carre et C. Naud, Paris, **1901**, p. 535...536.
- А. Пуанкаре. **О принципе относительности пространства и движения**. Главы 5...7 из книги "Наука и гипотеза" (H. Poincaré. Science and Hypothesis. Paris, **1902**.)
- А. Пуанкаре. **Настоящее и будущее математической физики**. Доклад, напечатанный в журнале "Bulletin des Sciences Mathematiques", **1904**, v. 28, ser. 2, p. 302.
- Г.А. Лоренц. **Электромагнитные явления в системе движущейся с любой скоростью, меньшей скорости света**. Proc Acad., Amsterdam, **1904**, v 6, p. 809.
- **А. Эйнштейн. К электродинамике движущихся тел**. Ann. d. Phys., **1905** (рукопись поступила **30** июня **1905** г.), b. 17, s. 89.
- А. Пуанкаре. **О динамике электрона**. Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo, **1906** (рукопись поступила **23** июля **1905** г.) v. XXI, p. 129.

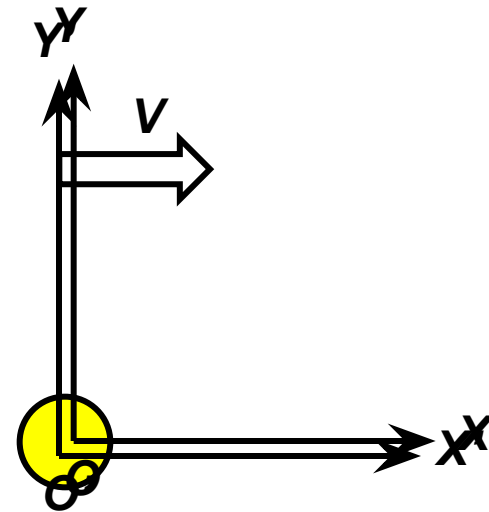
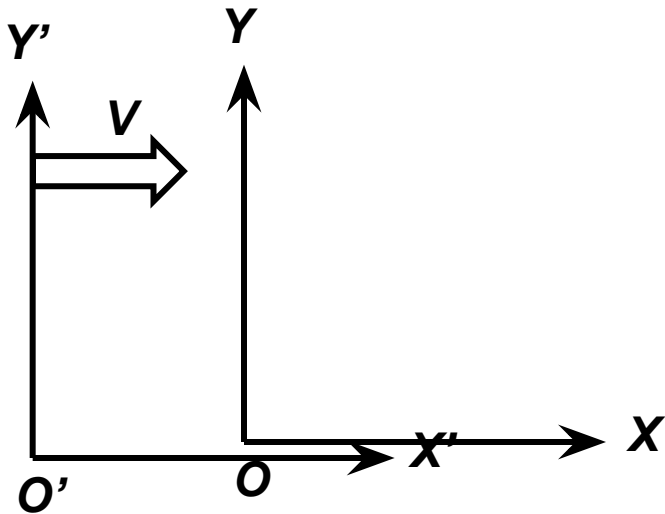
Сравнение строения теорий относительности Пуанкаре (5 мая 1905 г.)



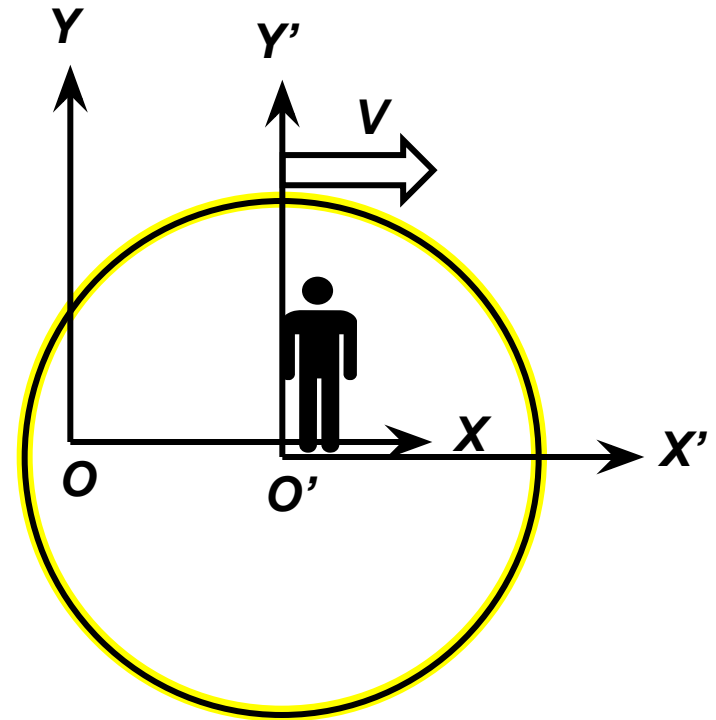
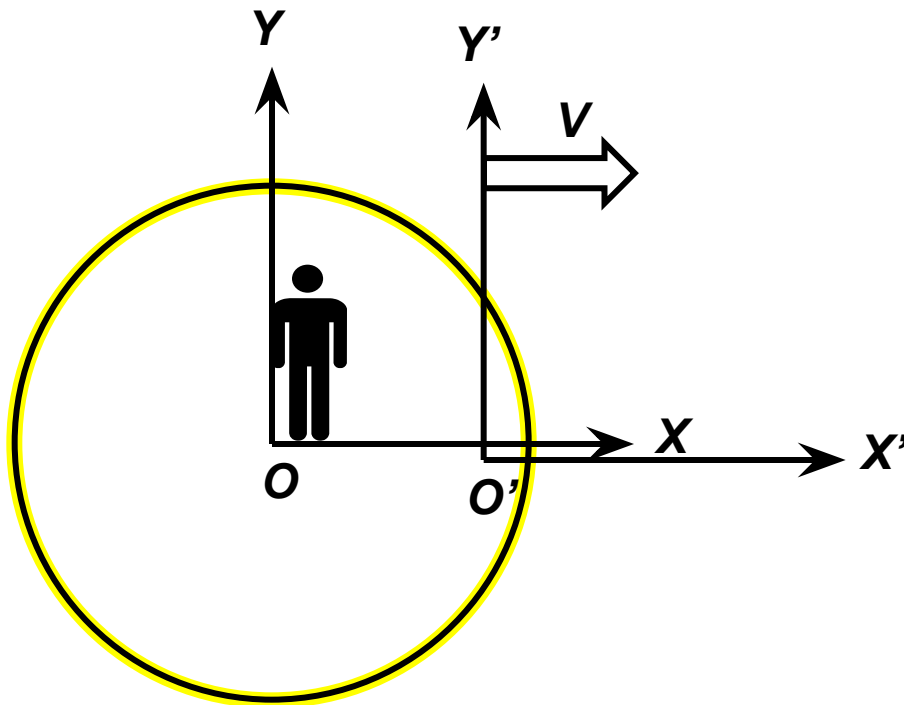
Эйнштейна (30 июня 1905 г.)



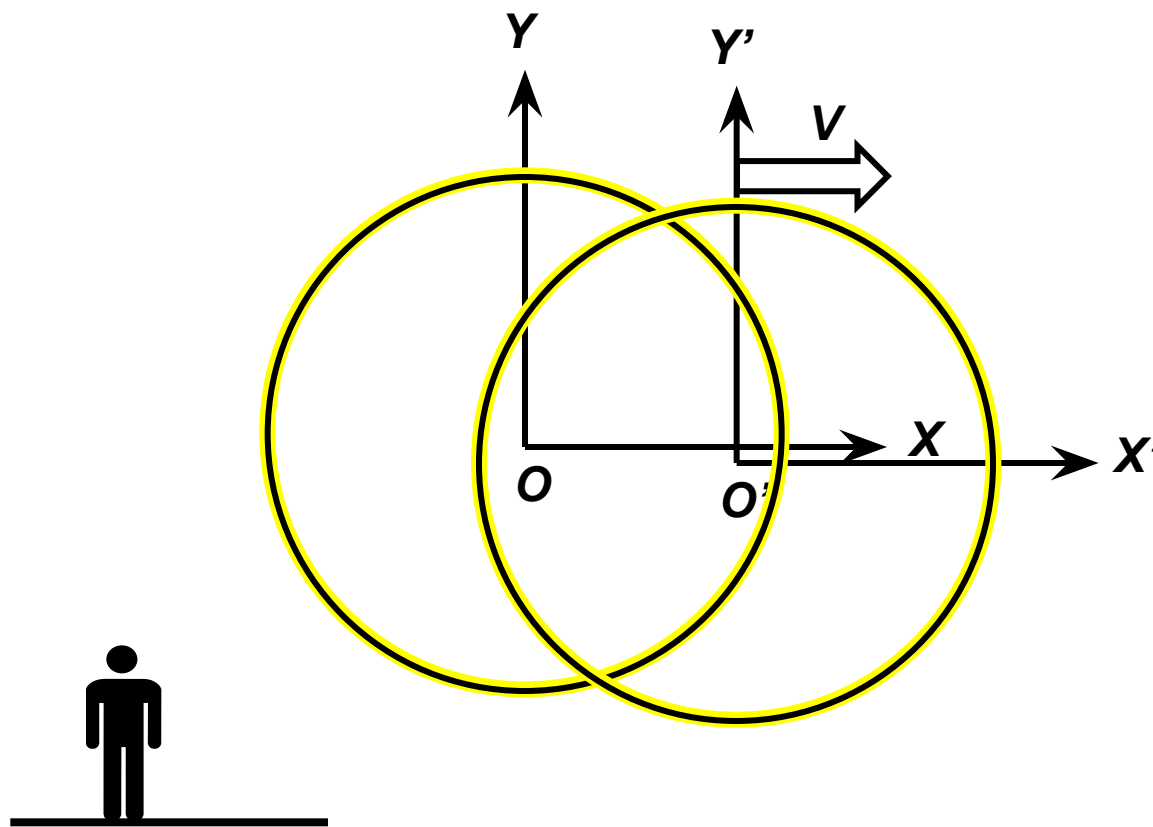
Короткая вспышка света при совмещении начал систем отсчёта



Распространение света с точки зрения различных наблюдателей



Две сферы от одной вспышки... ?..



Изложение мысленного эксперимента Эйнштейна в учебнике по физике



Лоренца — Фицджеральда), но и представления о времени.

Рассмотрим две инерциальные системы отсчета: S с осями XYZ и началом в точке O и S' с осями $X'Y'Z'$ с началом в точке O' . Все соответствующие оси параллельны, как показано на рис. 1.131, и оси X и X' совпадают (для ясности рисунок они несколько смещены). Система S' движется относительно S вправо, вдоль оси X со скоростью v . Времена t и t' в обеих системах отсчитываются от момента, когда точки O и O' совпадали. При $t=t'=0$ в начале координат (общем в этот момент времени!) происходит вспышка света и световой сигнал начинает распространяться во все стороны. Сосредоточим свое внимание на осях X и X' вдоль которых про-

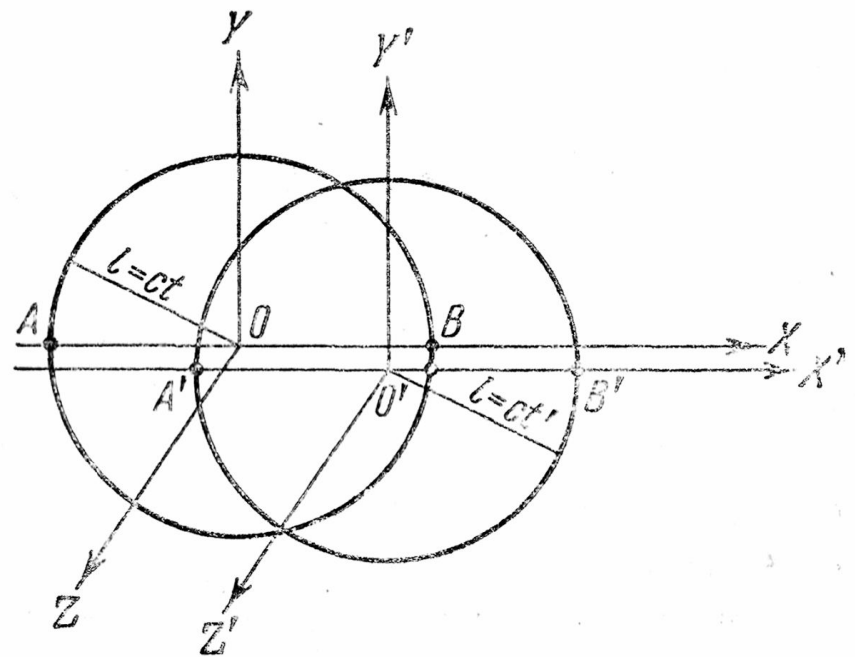


Рис. 1.131.

Использованный источник: Г.А.Зисман и О.М.Тодес. КУРС ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Г. А. ЗИСМАН и О. М. ТОДЕС

КУРС ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

ТОМ III

ОПТИКА,
ФИЗИКА АТОМОВ И МОЛЕКУЛ,
ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА
И МИКРОЧАСТИЦ

ИЗДАНИЕ ПЯТОЕ, СТЕРЕОТИПНОЕ

*Допущено Министерством
высшего и среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия для студентов
высших технических учебных заведений*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1972

Гирш Абрамович Зисман

Оскар Мошевич Тодес

Курс общей физики, том III
М., 1972 г., 496 стр. с илл.

Редактор *Е. Б. Кузнецова*

Техн. редактор *С. Я. Шкляр*

Корректор *Е. А. Белицкая*

Печать с матриц. Подписано к печати 19/IX 1972 г. Бумага 60×90^{1/16}. Физ. печ. л. 31+1 вкл. Условн. печ. л. 31,25. Уч.-изд. л. 31,8. Тираж 200 000 экз.

Цена книги 1 руб. Заказ № 3230.

Издательство «Наука»

Главная редакция

физико-математической литературы.

117071, Москва, В-71,

Ленинский проспект, 15.

Ордена Трудового Красного Знамени
Первая Образцовая типография
имени А. А. Жданова Главполиграфпрома
Государственного комитета
Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли.
Москва, М-54, Валовая, 28.

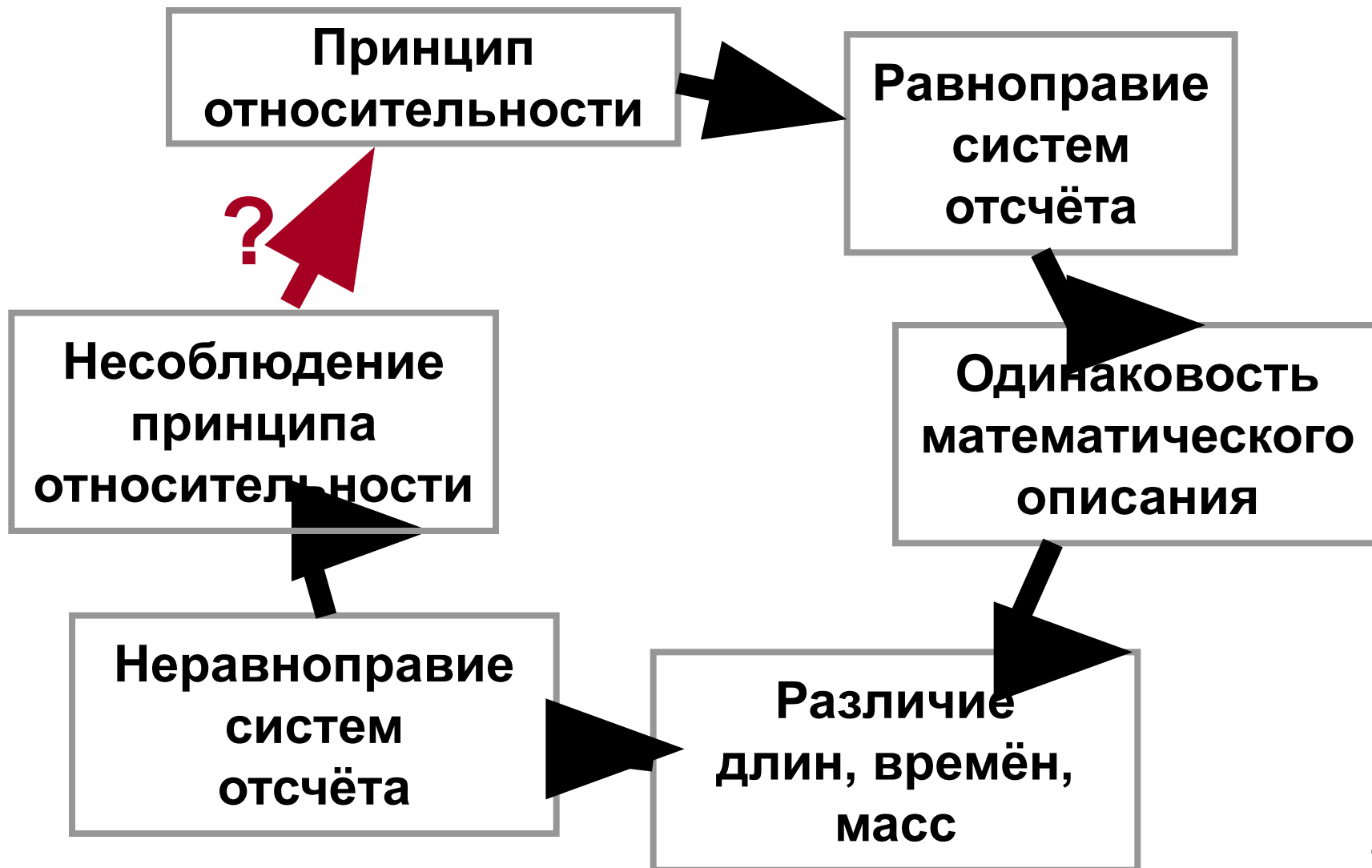
Толкование Пуанкаре принципа относительности



**Равноправие
инерциальных
систем
отсчёта**

**Одинаковость
математической
записи
физических законов**

Результаты применения принципа относительности



Исправленные результаты применения принципа относительности

Принцип относительности

Равноправие систем отсчёта

Соблюдение принципа относительности

Различие систем отсчёта из-за взаимного движения

~~Одинаковость математического описания~~

Равноправие систем отсчёта

Одинаковость длин, времён, масс

Различие математического описания

Возникновение скоростей, больших скорости света

