

**ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ  
И  
АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН**

# Альберт Эйнштейн (1879–1955)



Эйнштейн с первой  
женой Милевой Мариц



## Кратко об Эйнштейне

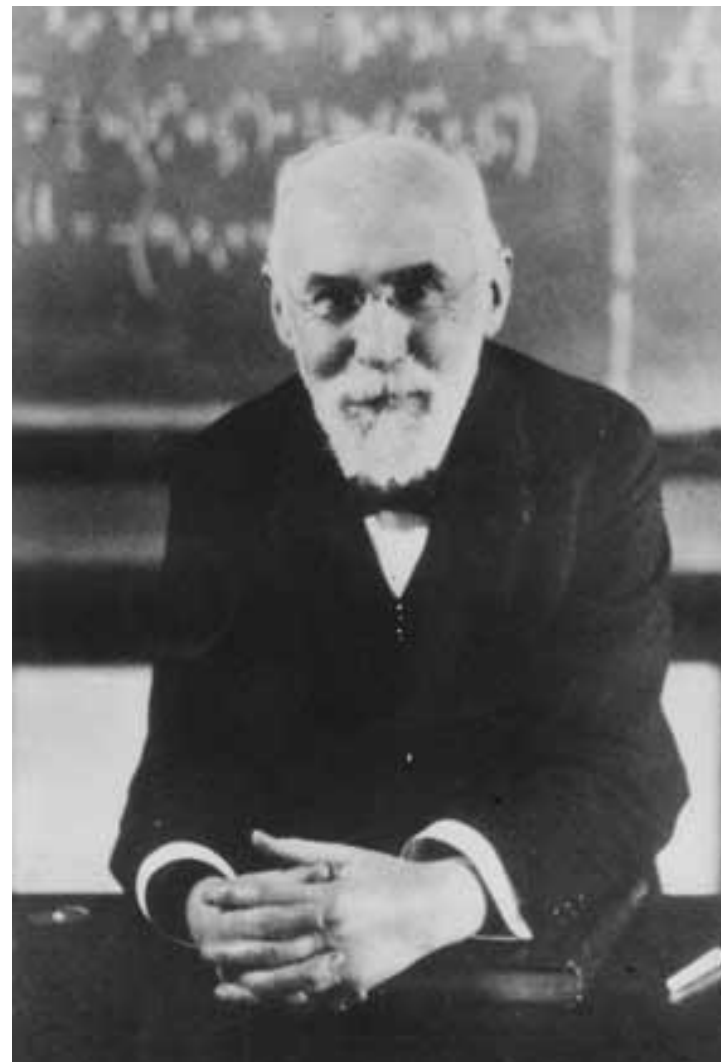
- Альберт Эйнштейн родился в 1879 году.
- В 1900 году окончил Цюрихский политехнический институт.
- В 1902 году Эйнштейн поступил на работу в патентное бюро в Берне.
- В **сентябре 1905** опубликована теория относительности.



**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

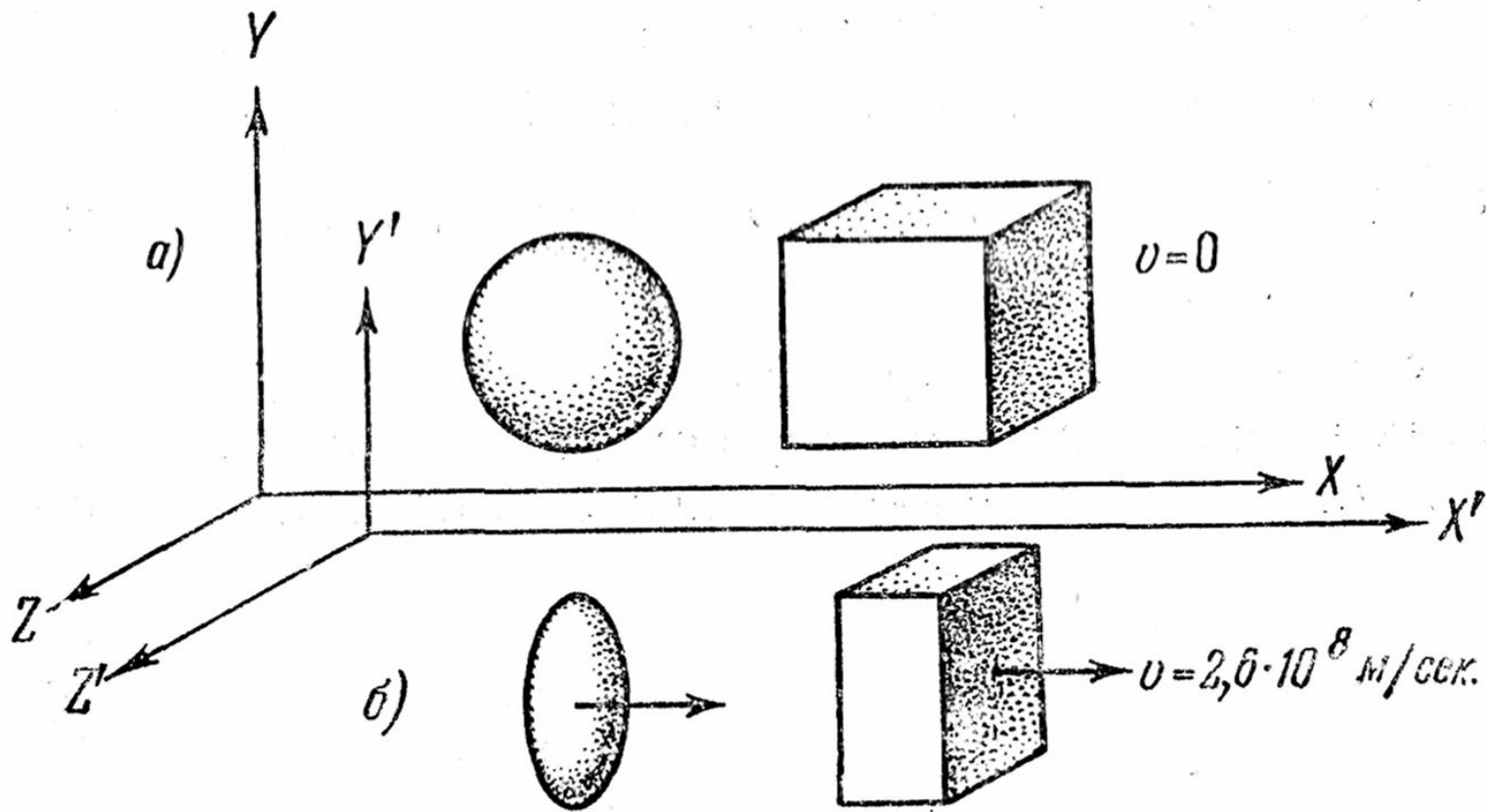
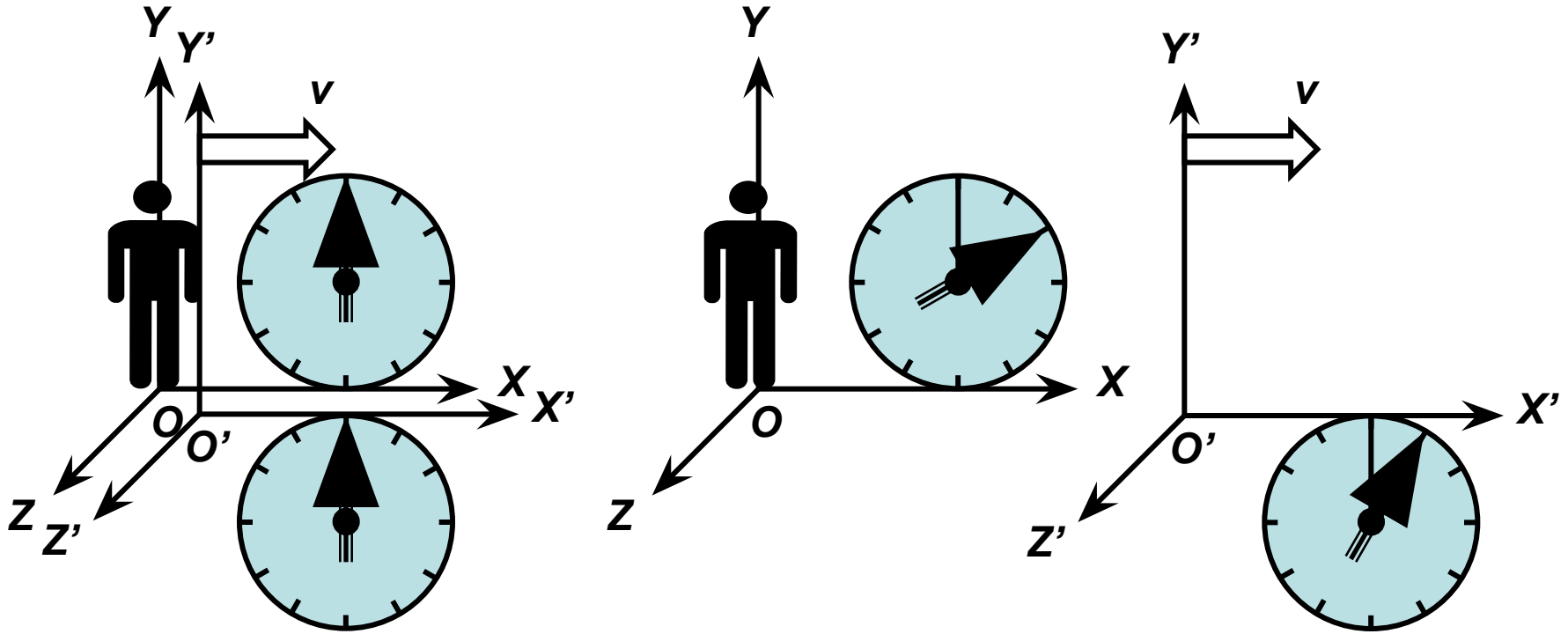
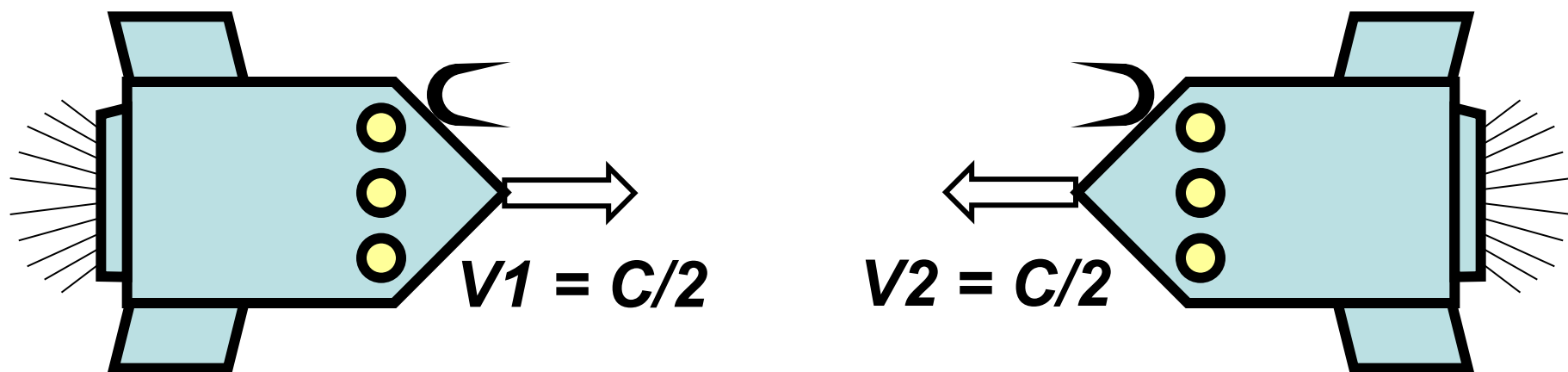


Рис. 1.133.

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



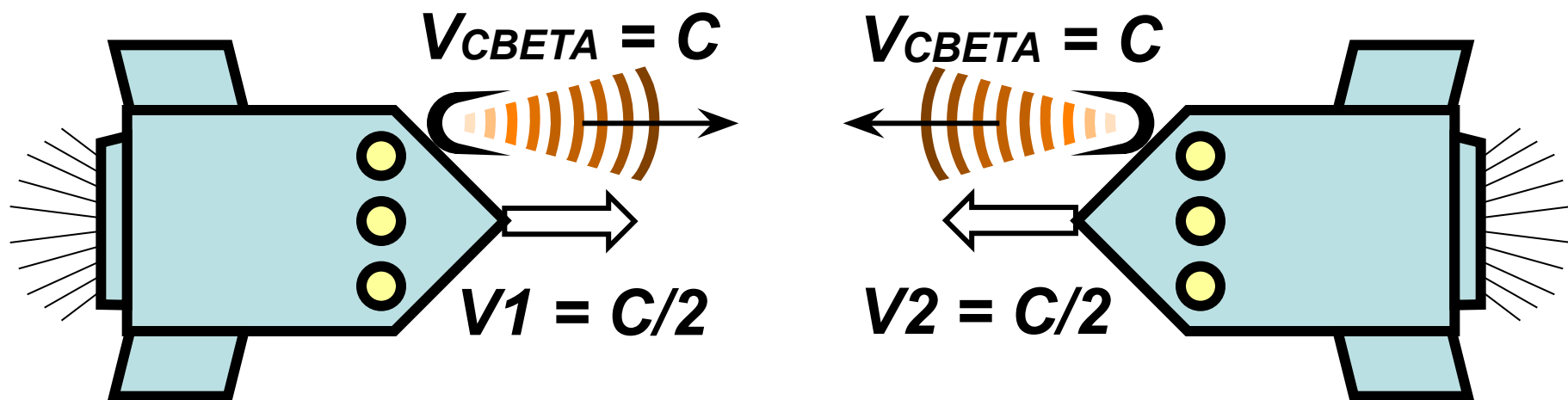
### 3. Движение со скоростью, превышающей скорость света, невозможно. (1)



$$V_{\text{СБЛИЖЕНИЯ РАКЕТ}} < V_1 + V_2$$



### 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

$$S' \rightarrow S$$

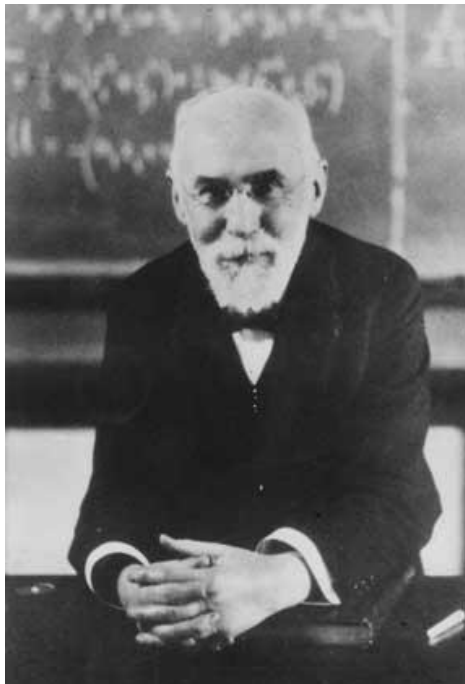
$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

$$y = y',$$

$$z = z',$$

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

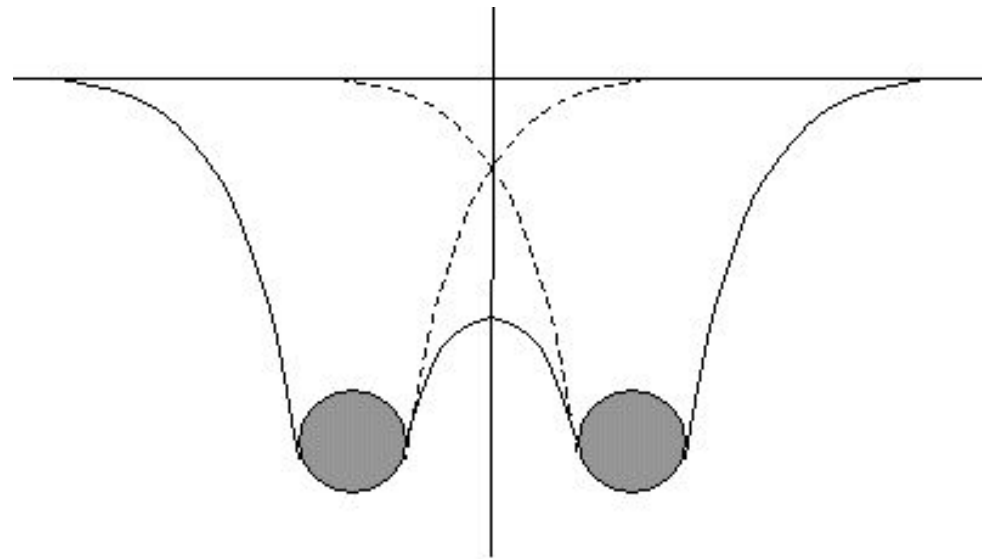
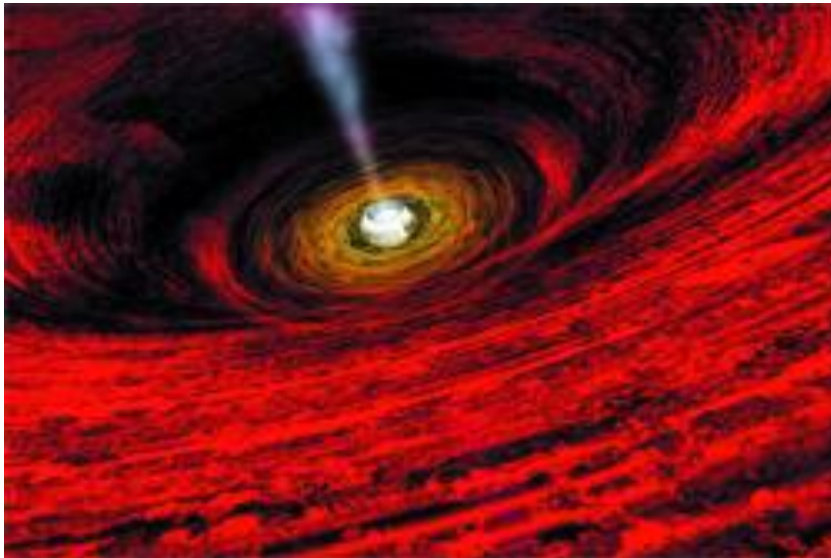
(26.12)



# 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

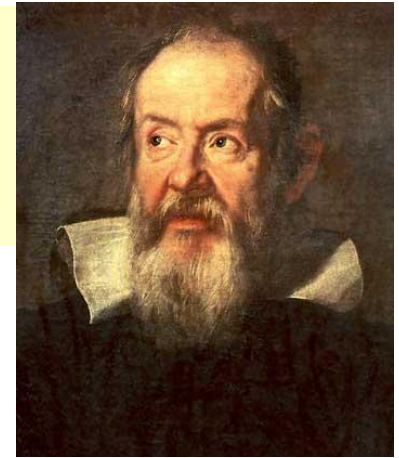
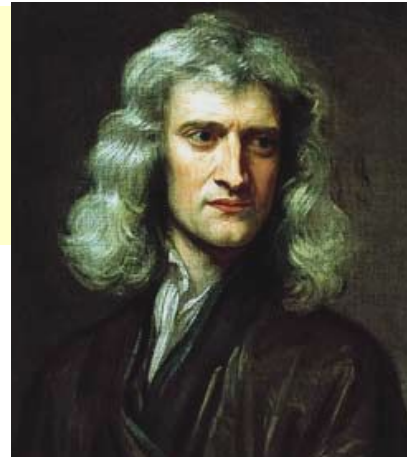
- Механика
- Свет
- Электричество
- Магнетизм
- Колебания
- Волны

## 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:**

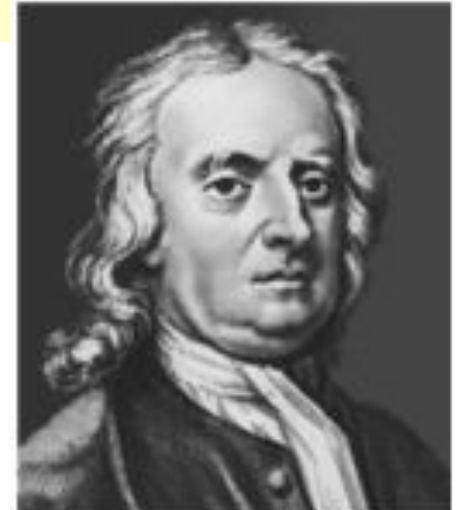
*«Скорость тела складывается из скорости системы отсчёта и скорости движения тела в ней»*

- **Принцип относительности Галилея:**

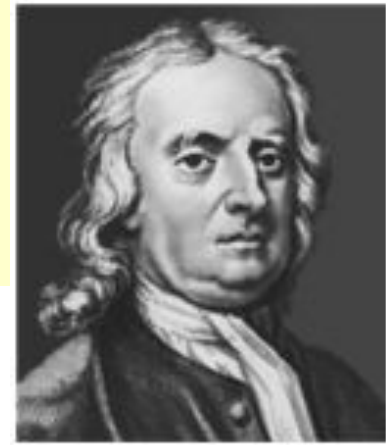
*«Все законы механики одинаковы в инерциальных системах отсчёта»*

## Два представления о свете, сложившиеся в физике в XVII веке

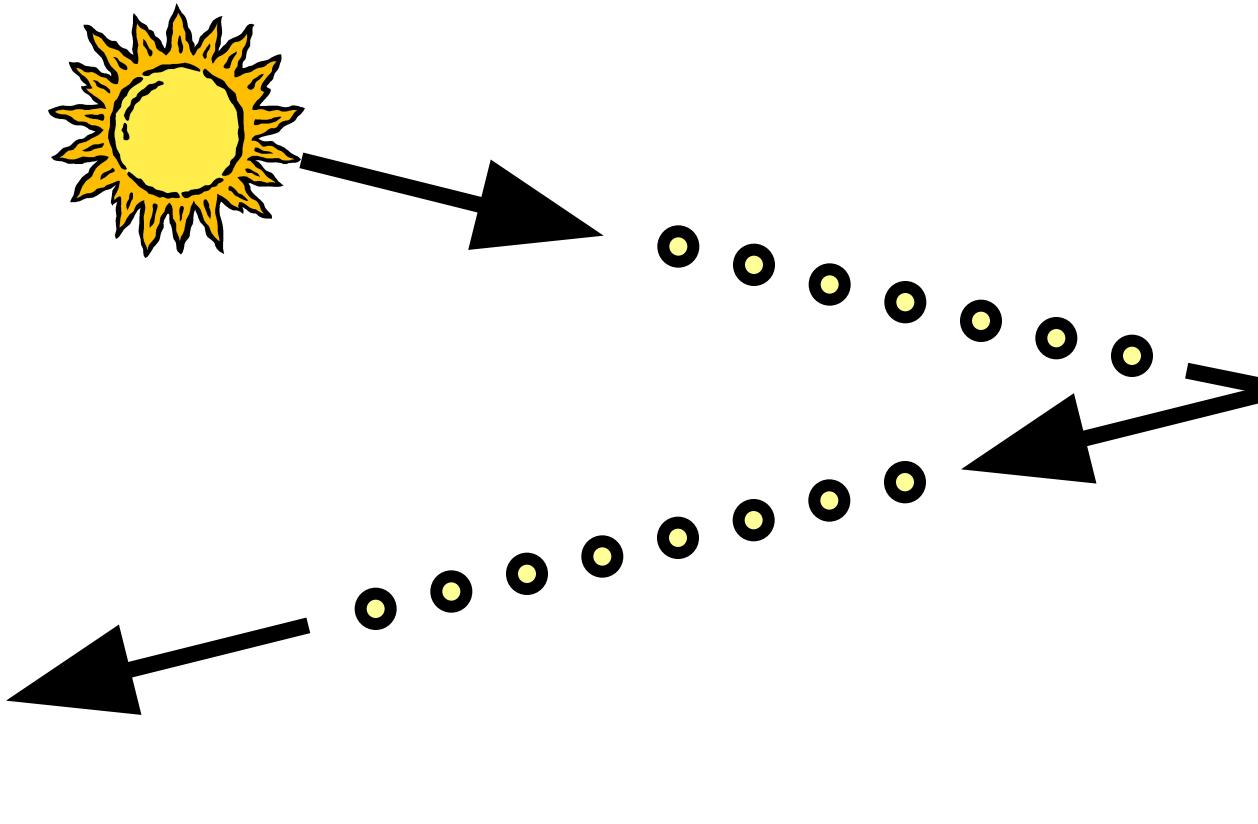
- **Ньютон (1643-1727):**  
*«Свет – это поток частиц в пустоте»*
- **Гюйгенс (1629-1695):**  
*«Свет – это волна в эфире»*



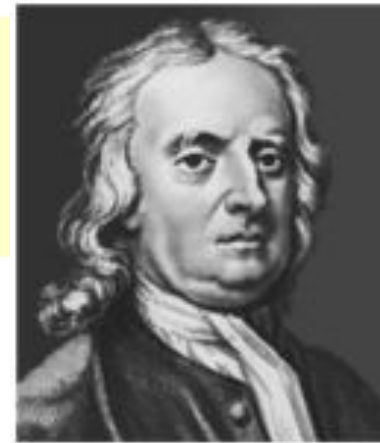
# НЬЮТОН: Отражение света – это отскокивание частиц света от препятствия



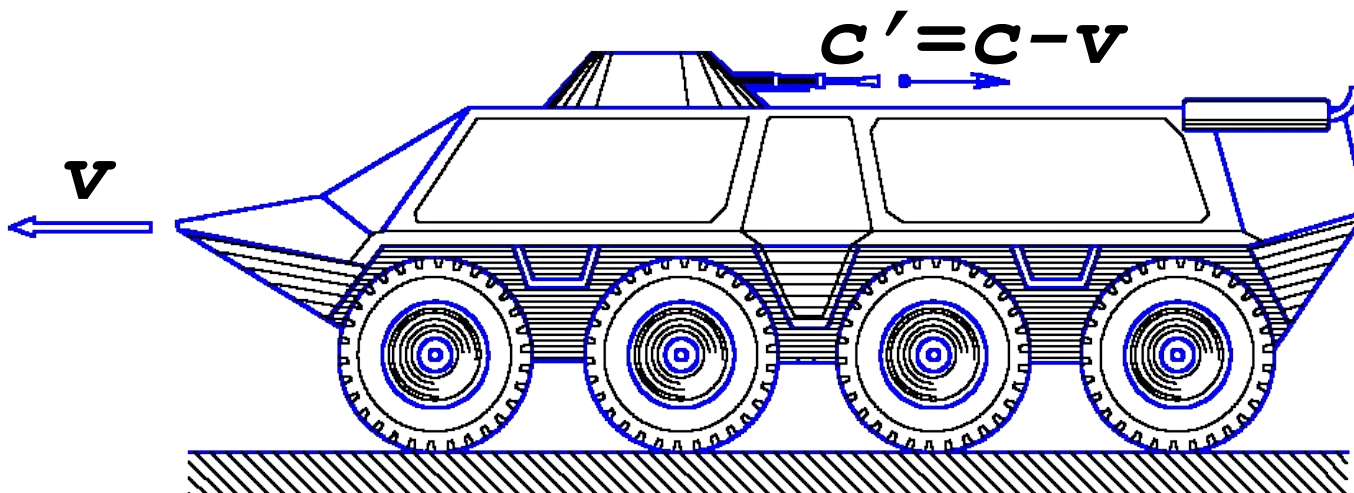
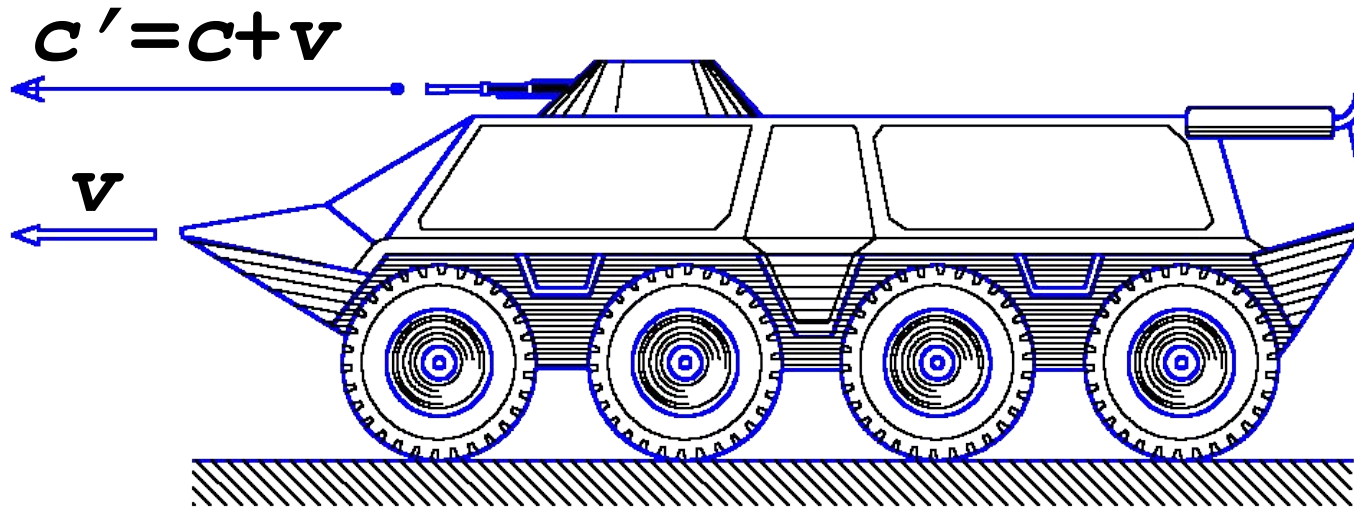
Исаак Ньютон



# Сложение скорости системы отсчёта со скоростью частиц света в ней



Исаак Ньютон



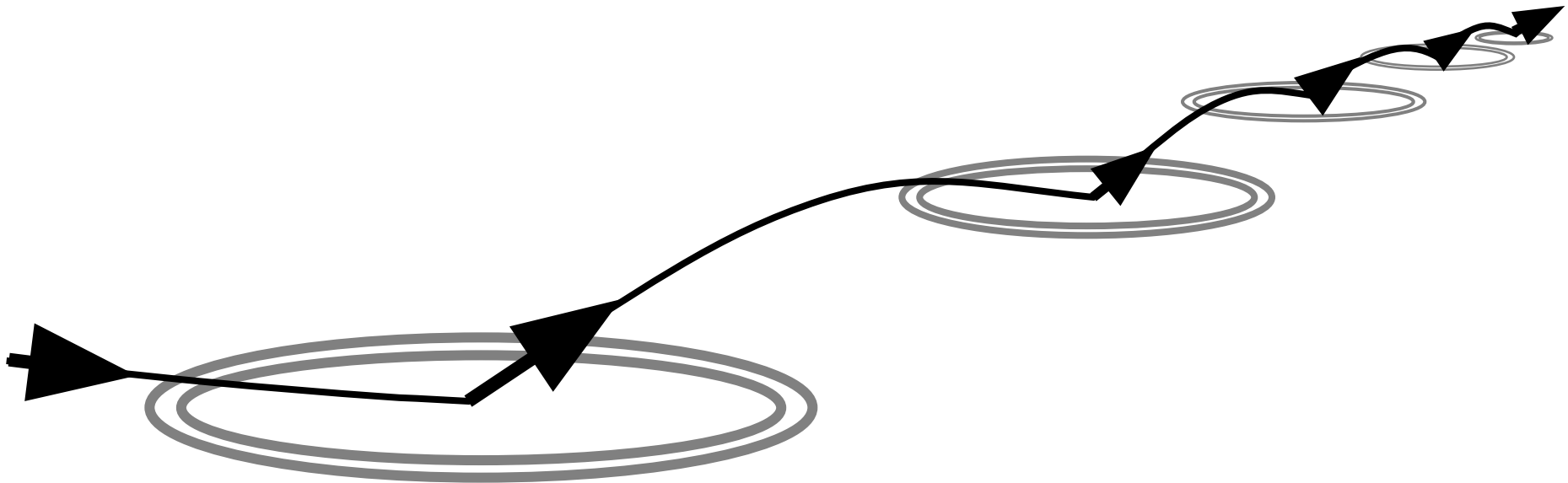
## ГЮЙГЕНС: Свет – это волна в эфире

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

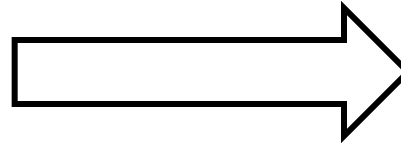


**Круги на воде от «блинчиков».**

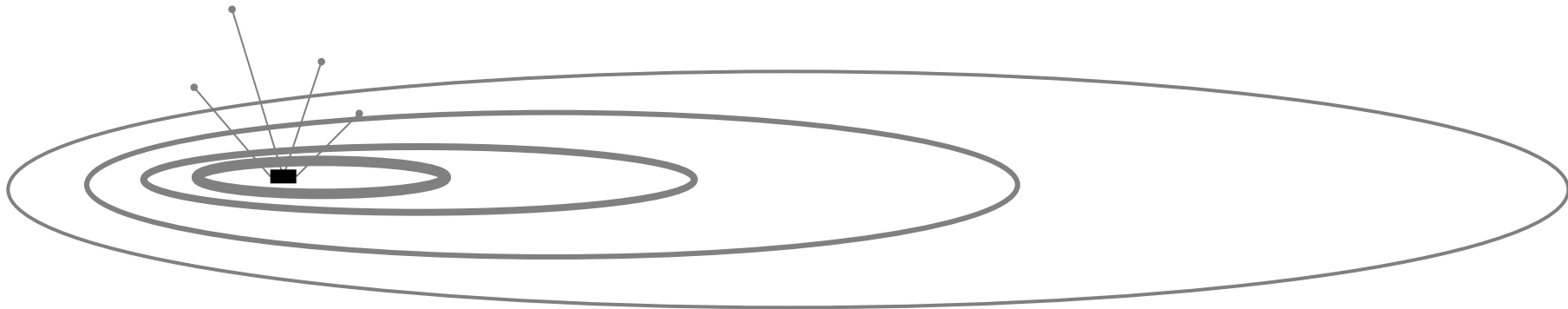
**Скорость распространения волны  
не зависит от скорости источника**



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

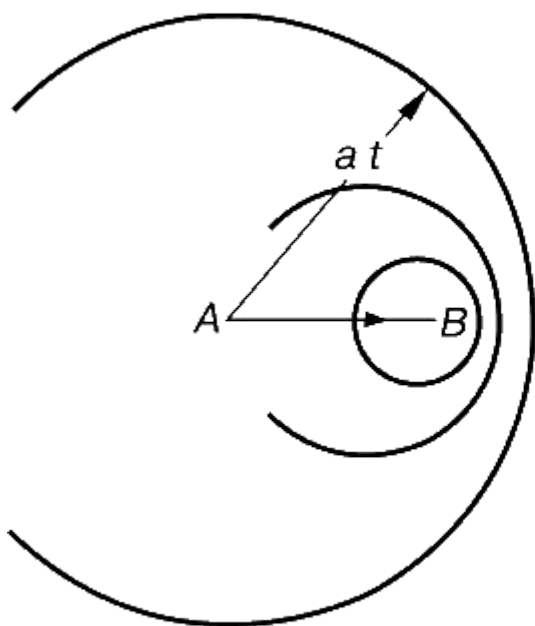


**НАПРАВЛЕНИЕ ТЕЧЕНИЯ РЕКИ**

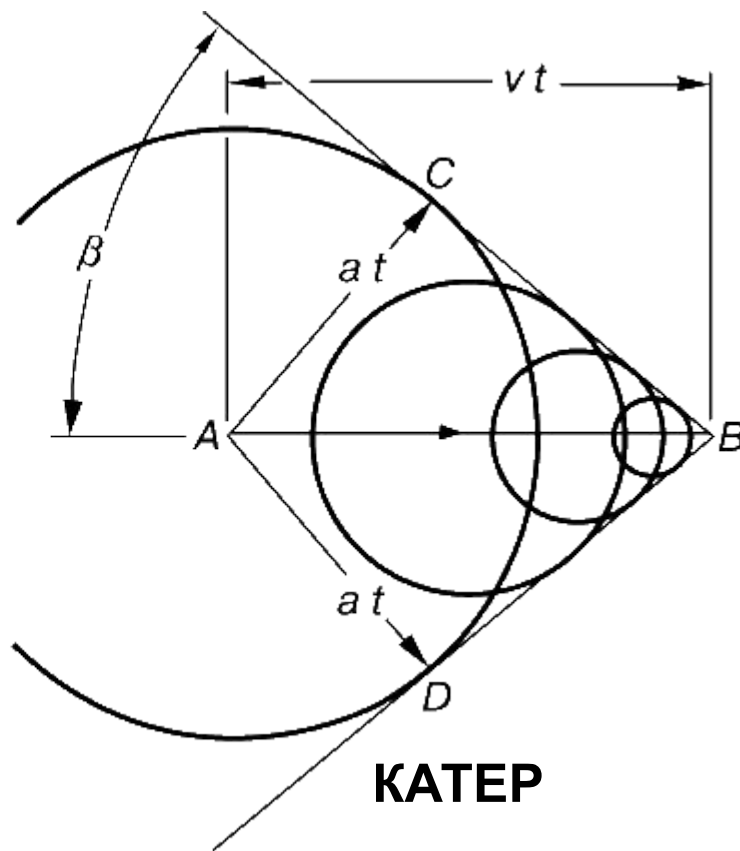


**Круги на озере, созданные  
перемещающимся источником.**

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



**ЛОДКА**



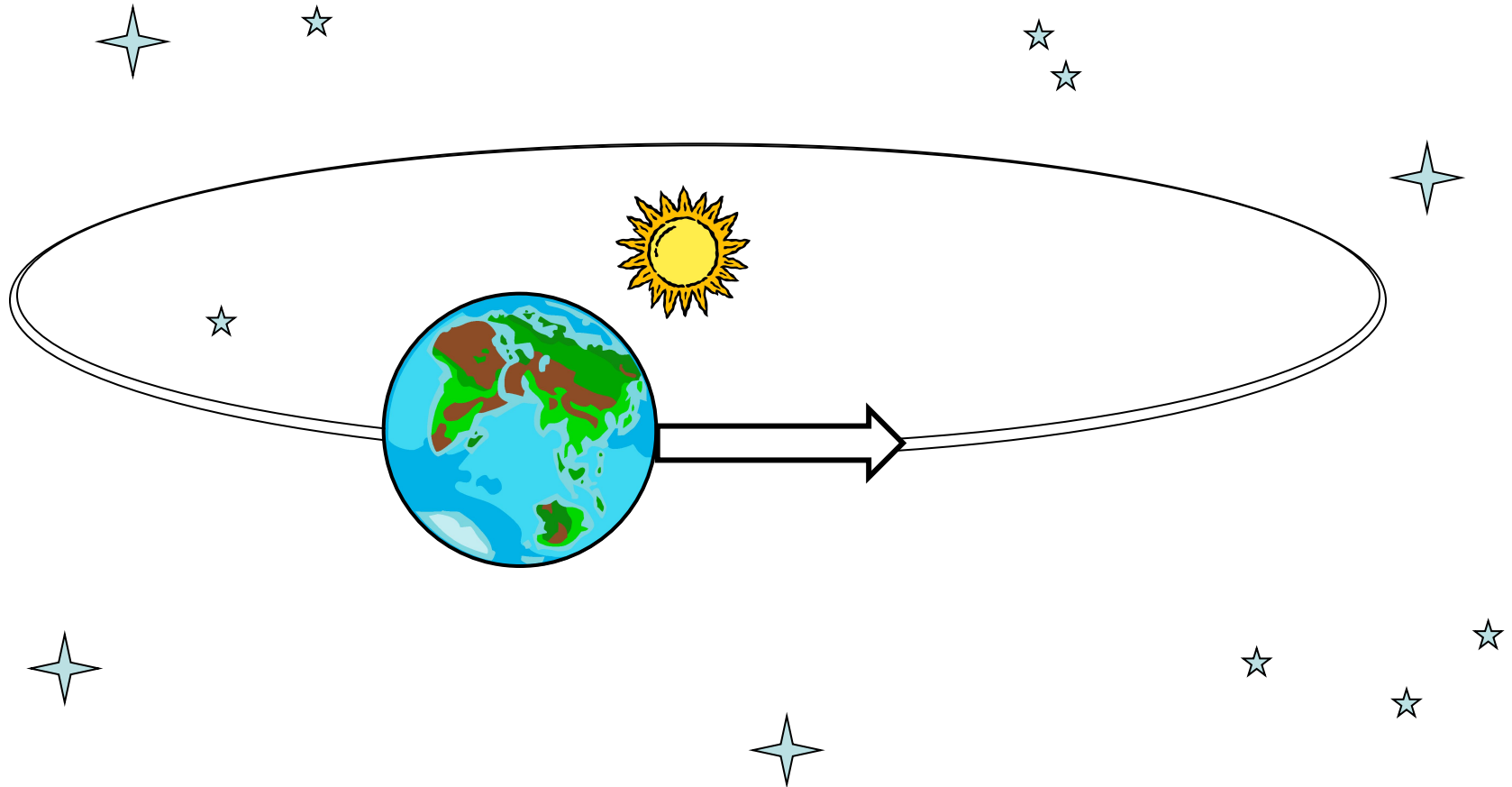
**КАТЕР**



## 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*

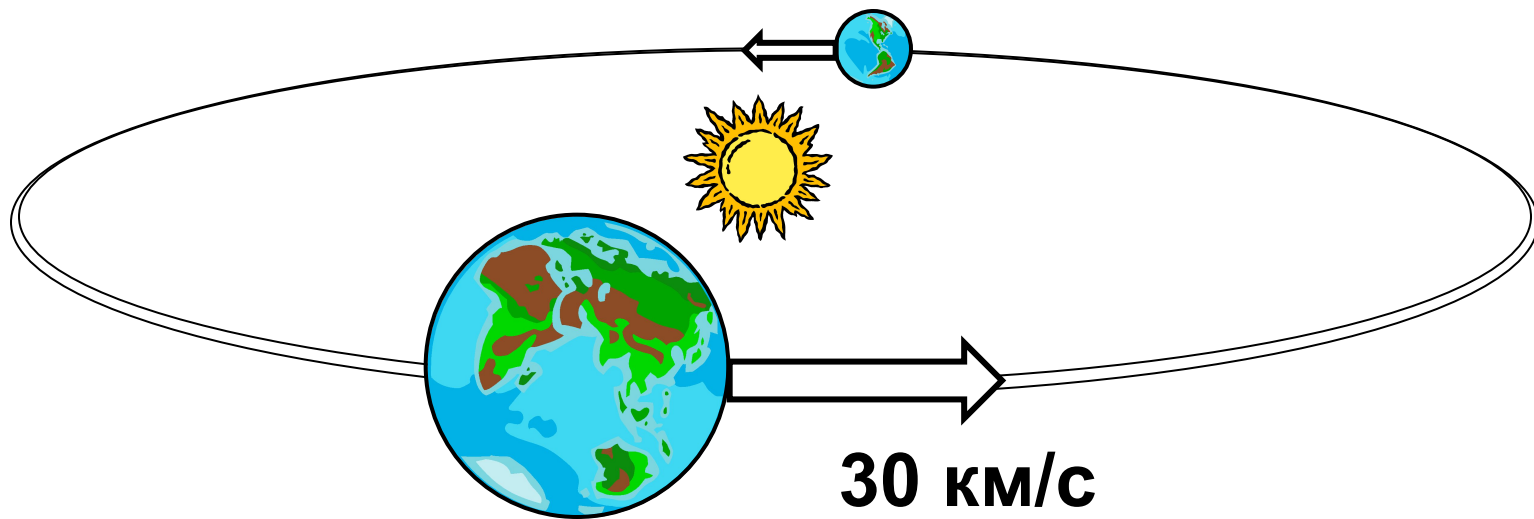
- **Способ:**

*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

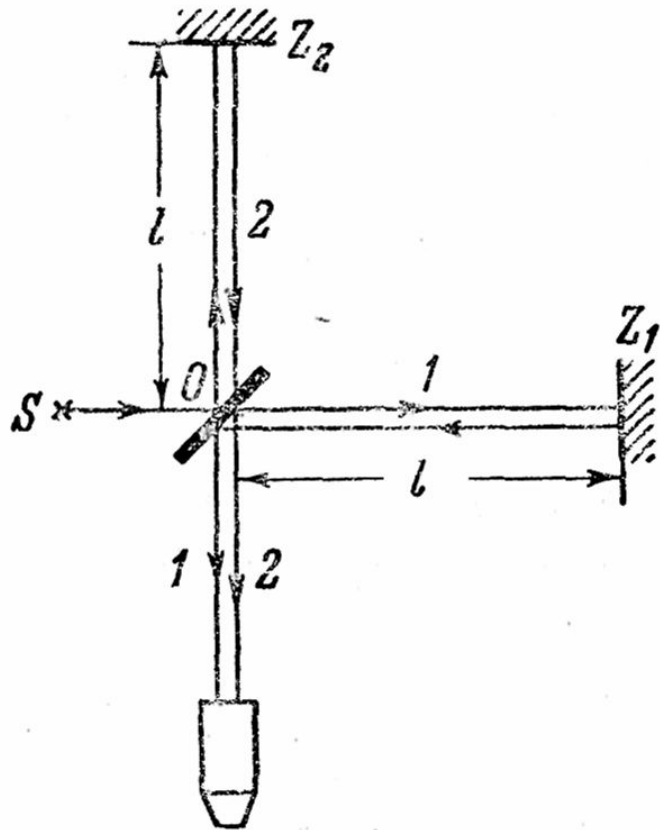
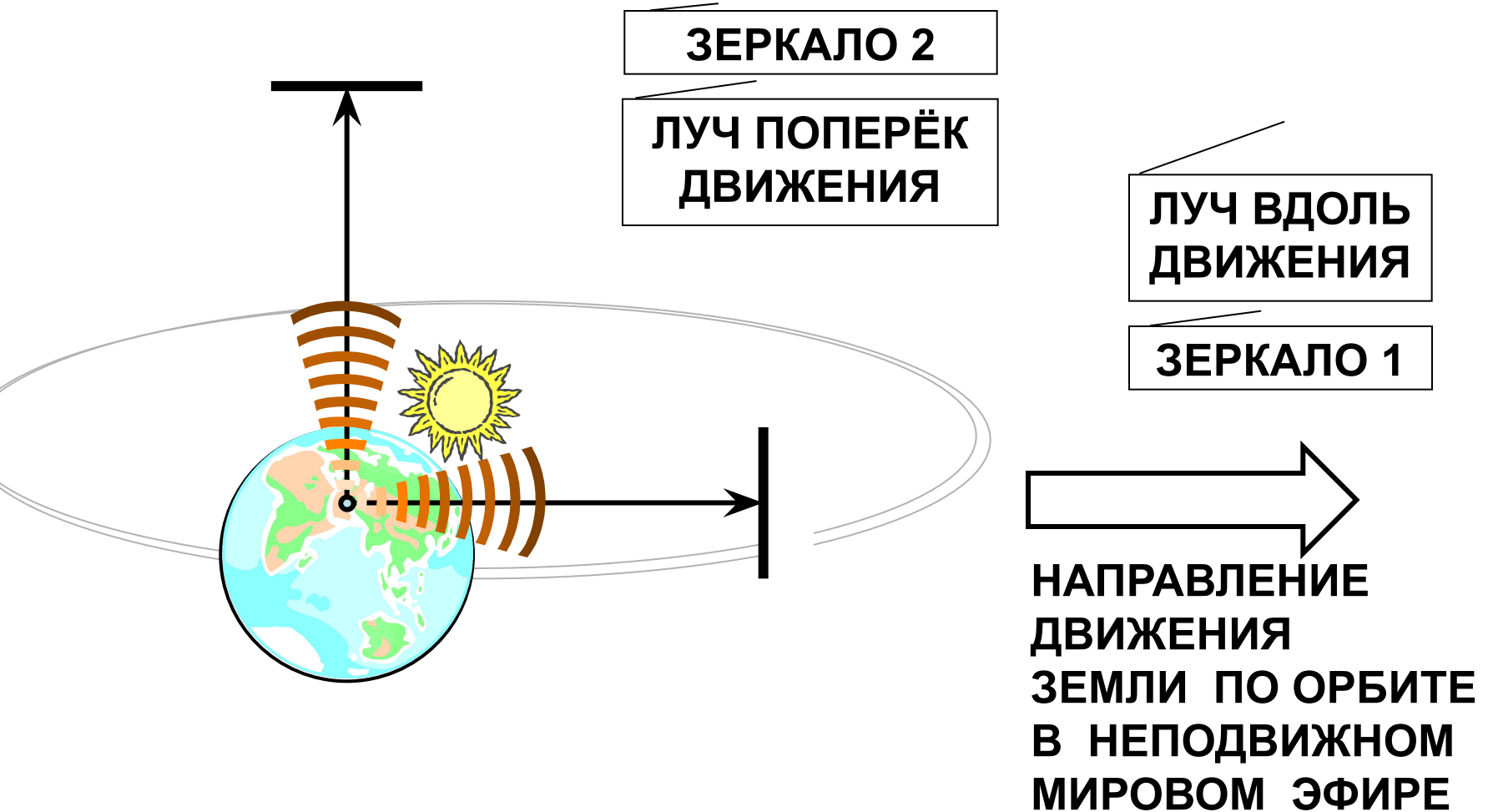


Рис. 1.129.

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

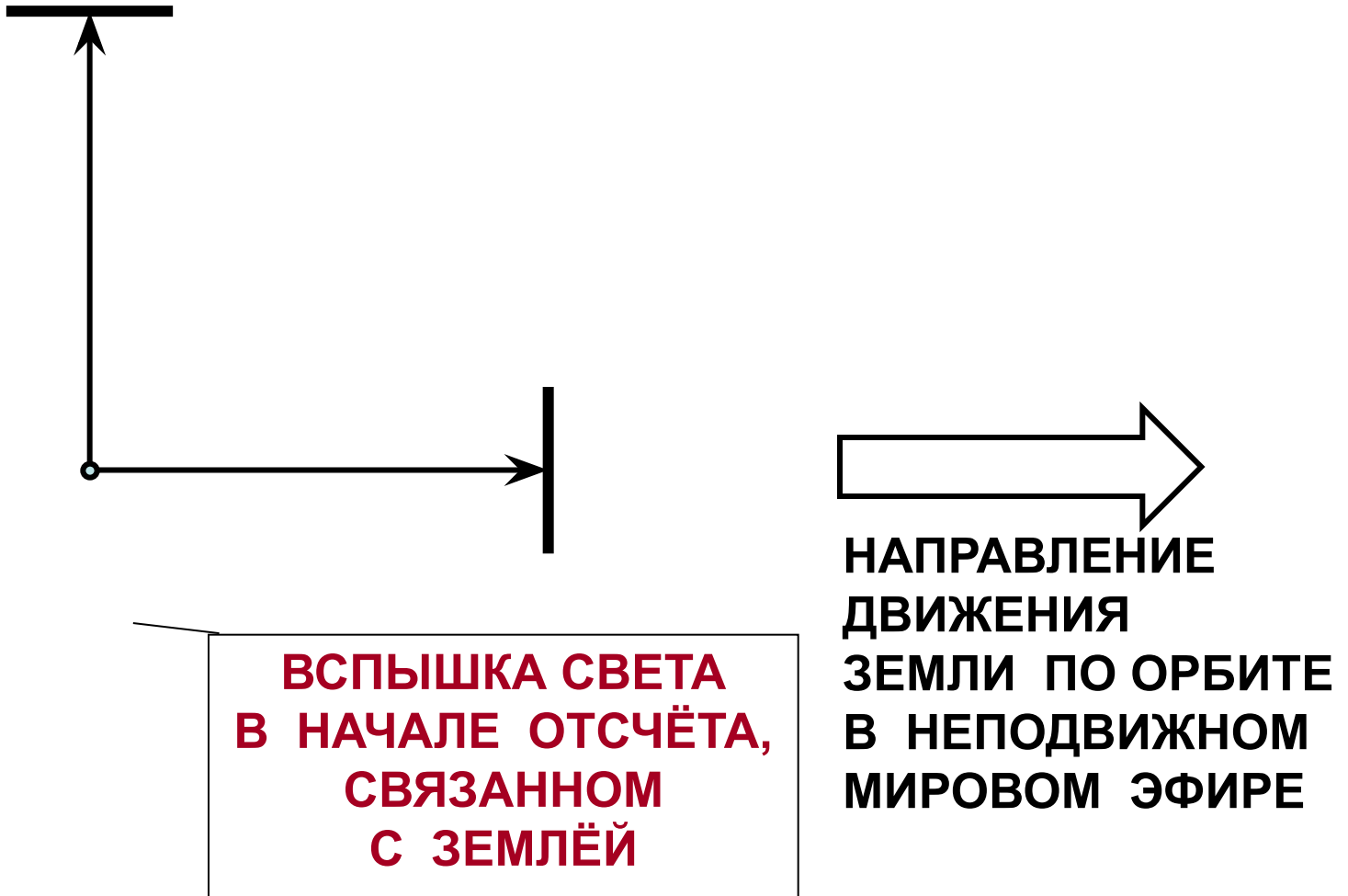
# Упрощённая схема установки Майкельсона по измерению разницы в задержках света вдоль и поперёк движения Земли по орбите



# Идея опыта Майкельсона

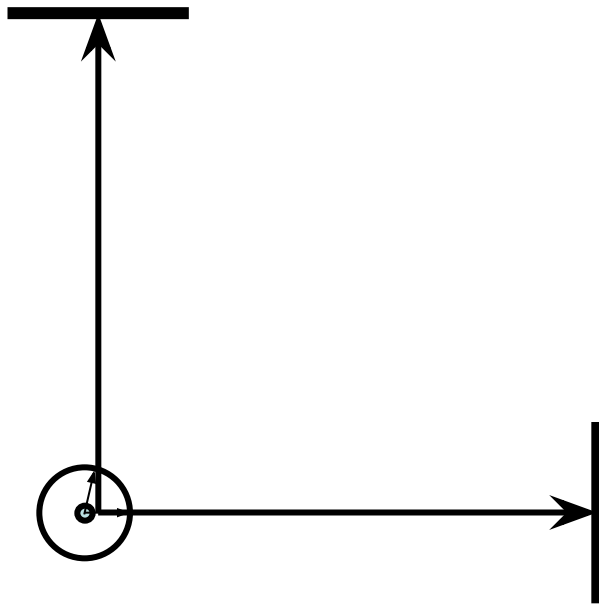
мультфильм

# Кадр 0





# Кадр 1

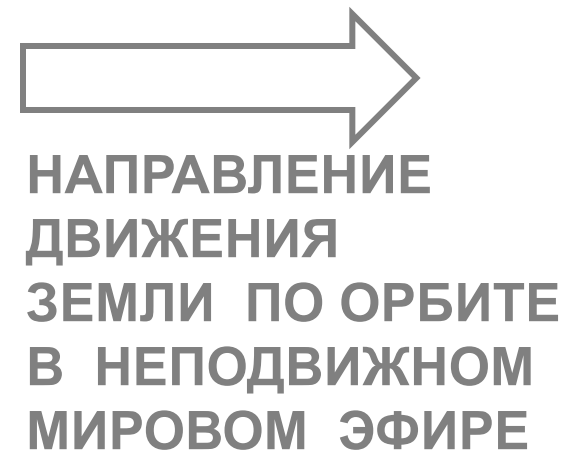
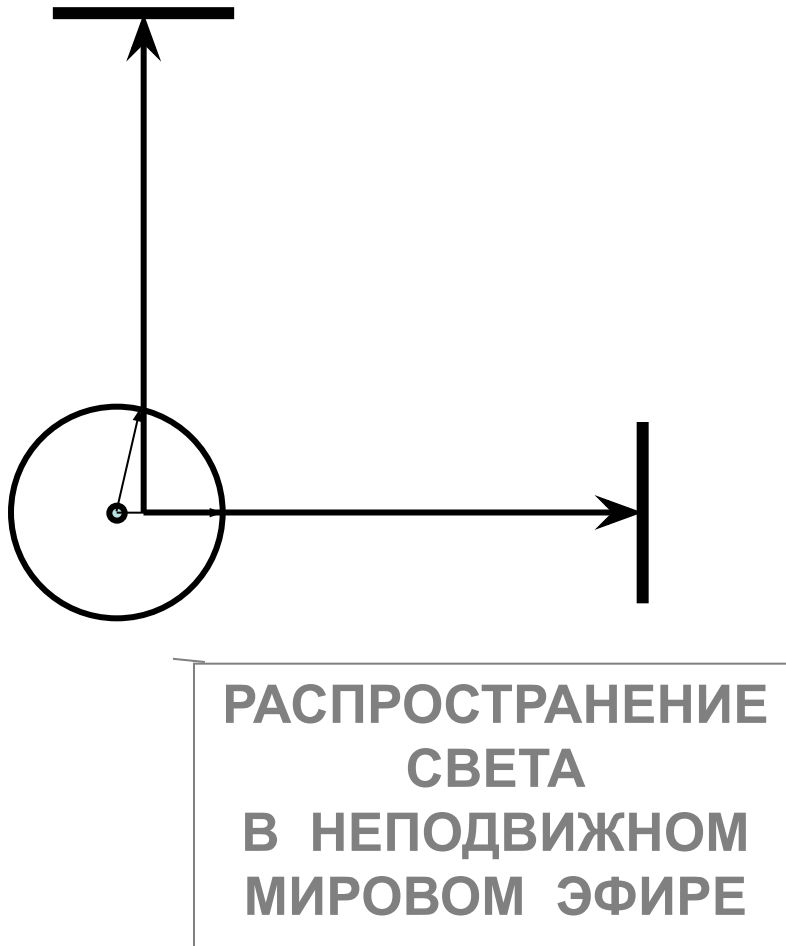


**РАСПРОСТРАНЕНИЕ  
СВЕТА  
В НЕПОДВИЖНОМ  
МИРОВОМ ЭФИРЕ**

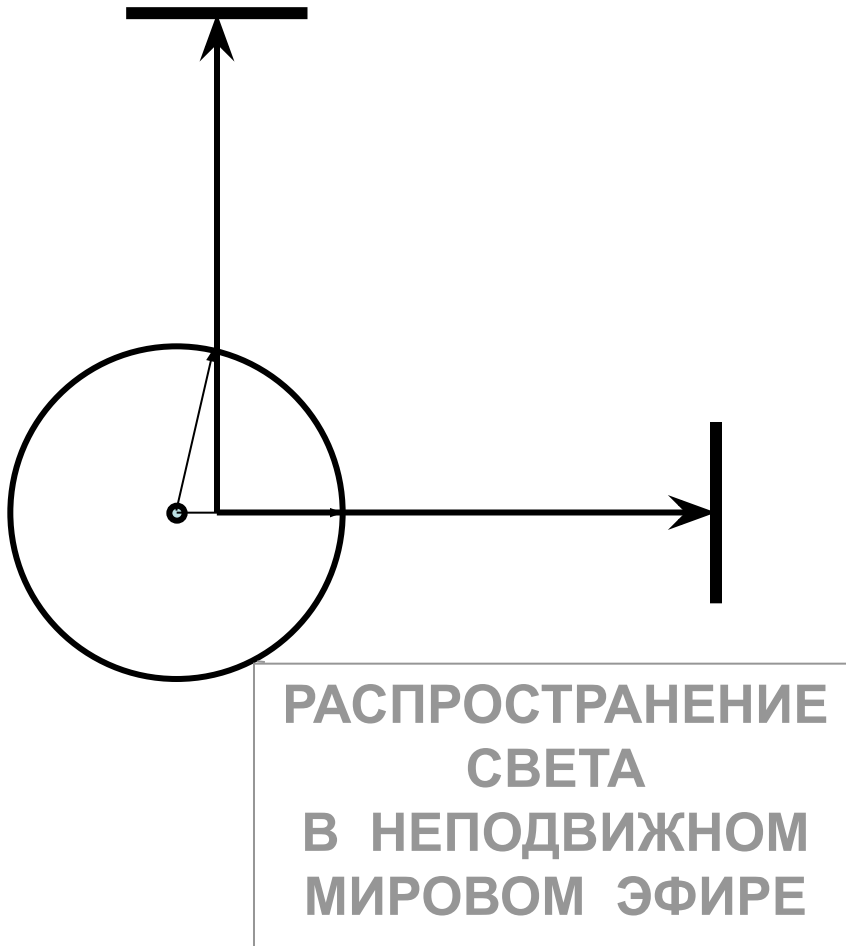


**НАПРАВЛЕНИЕ  
ДВИЖЕНИЯ  
ЗЕМЛИ ПО ОРБИТЕ  
В НЕПОДВИЖНОМ  
МИРОВОМ ЭФИРЕ**

## Кадр 2

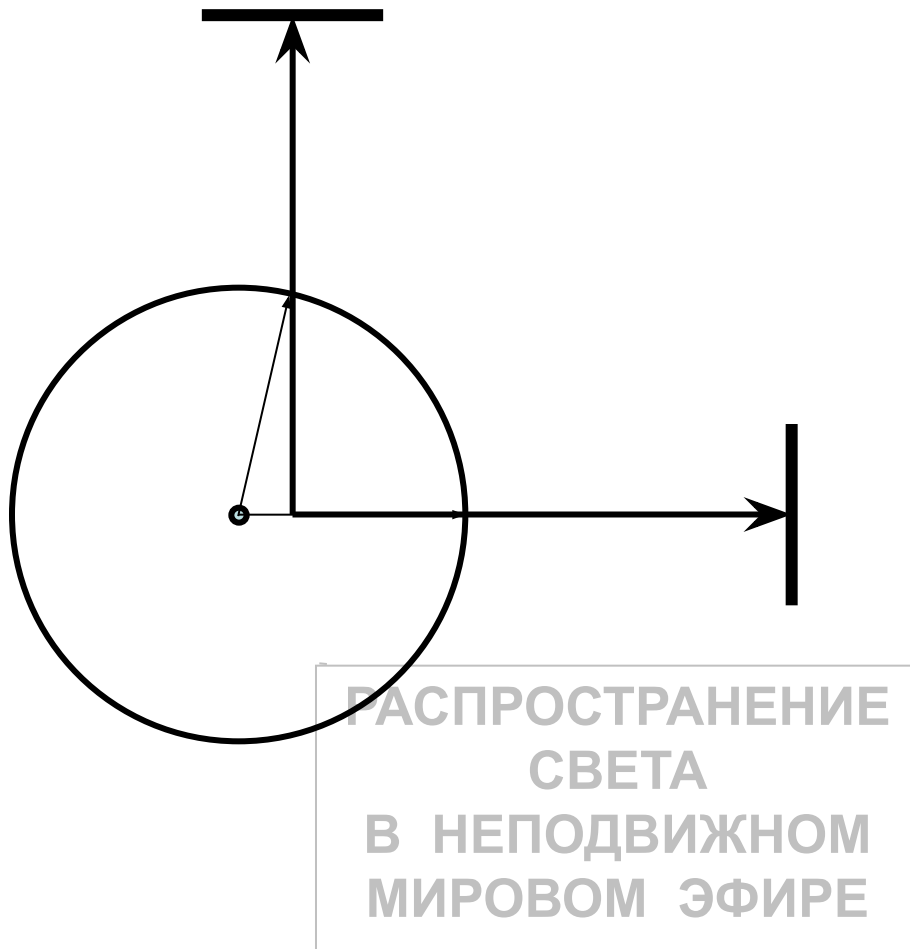


## Кадр 3



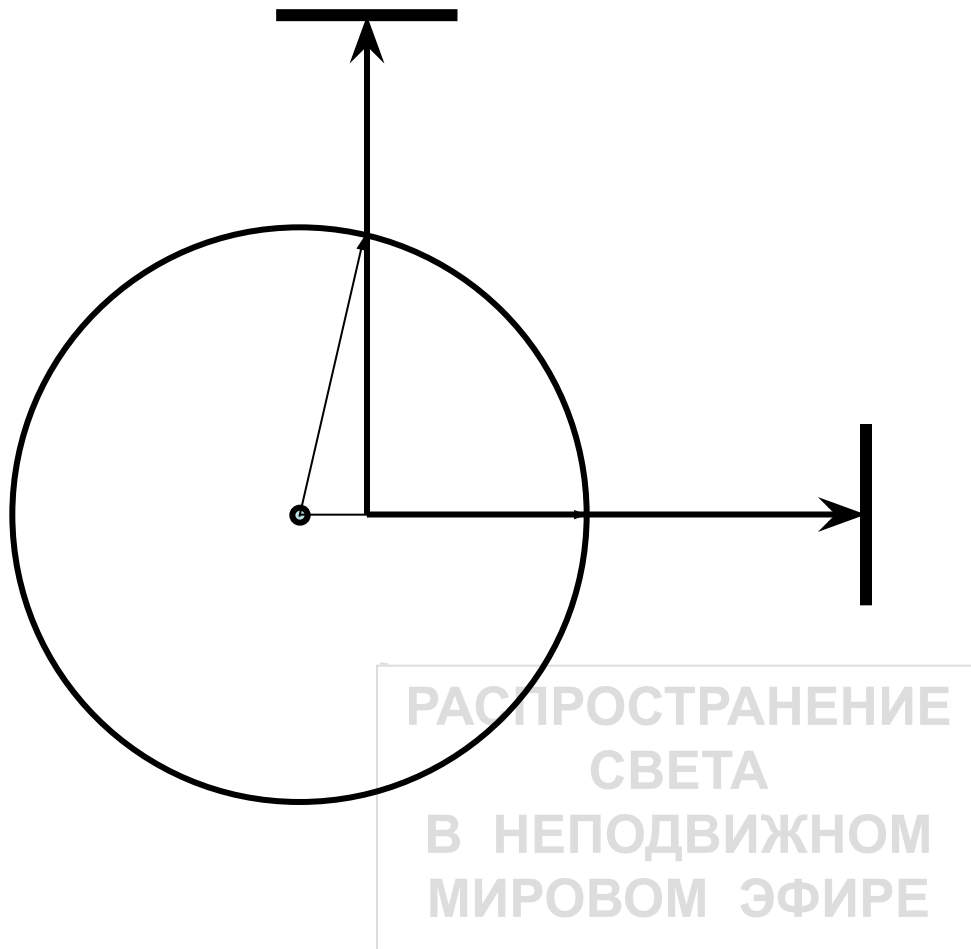
НАПРАВЛЕНИЕ  
ДВИЖЕНИЯ  
ЗЕМЛИ ПО ОРБИТЕ  
В НЕПОДВИЖНОМ  
МИРОВОМ ЭФИРЕ

# Кадр 4



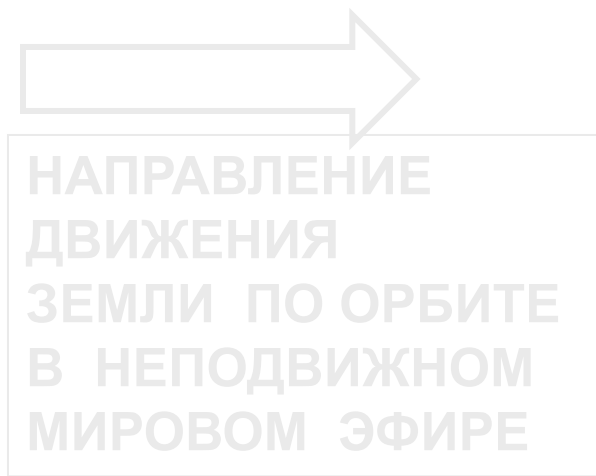
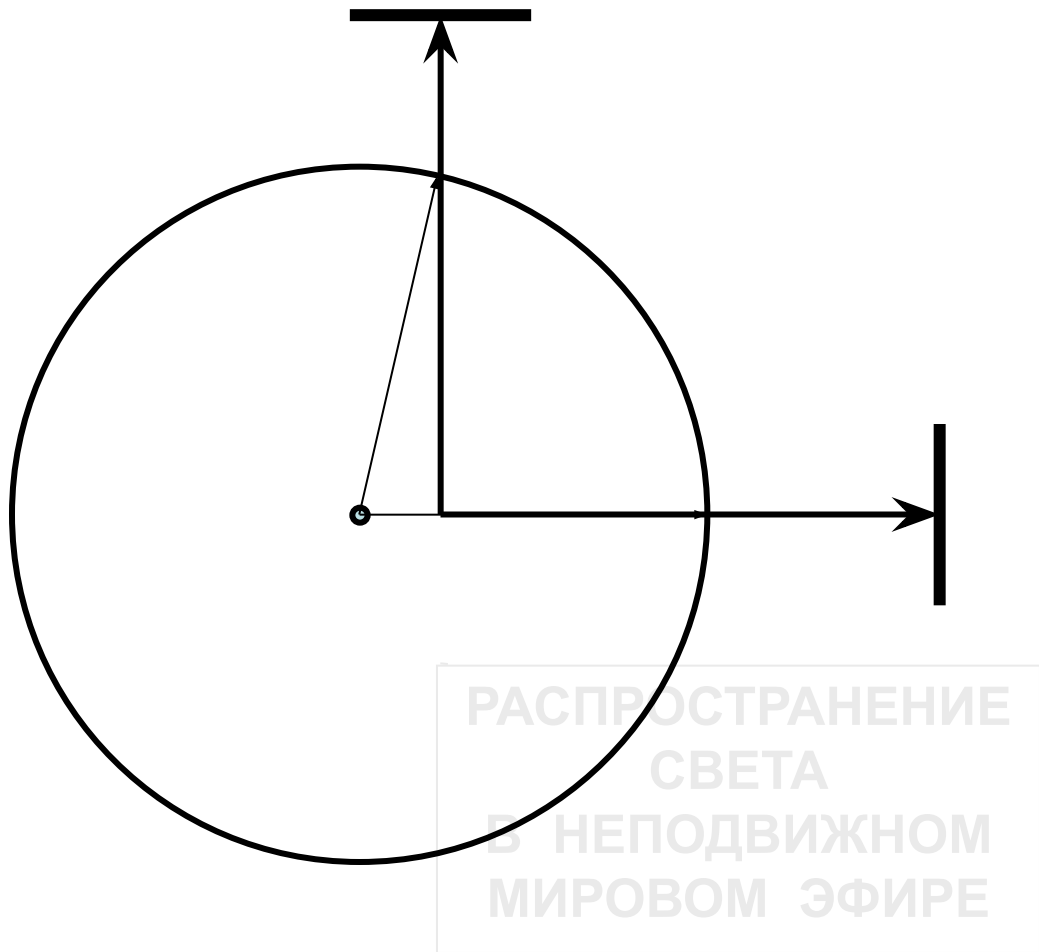
НАПРАВЛЕНИЕ  
ДВИЖЕНИЯ  
ЗЕМЛИ ПО ОРБИТЕ  
В НЕПОДВИЖНОМ  
МИРОВОМ ЭФИРЕ

# Кадр 5

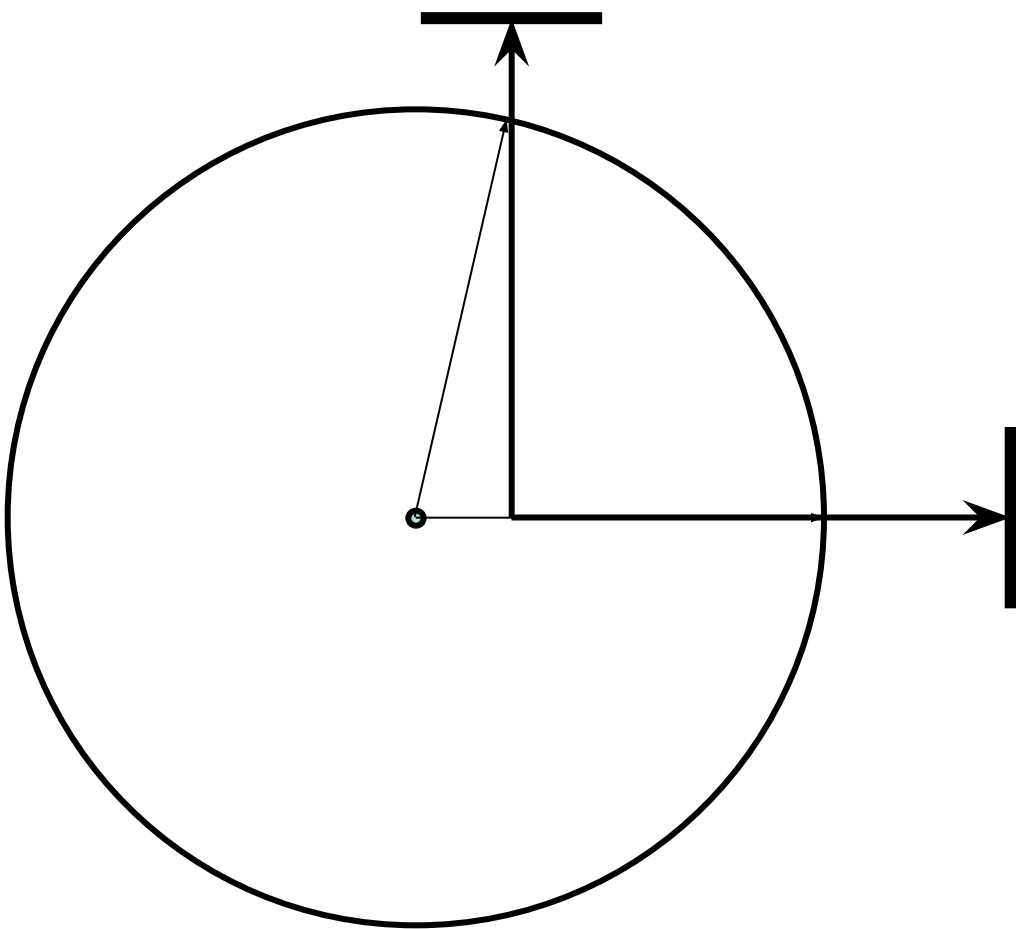


НАПРАВЛЕНИЕ  
ДВИЖЕНИЯ  
ЗЕМЛИ ПО ОРБИТЕ  
В НЕПОДВИЖНОМ  
МИРОВОМ ЭФИРЕ

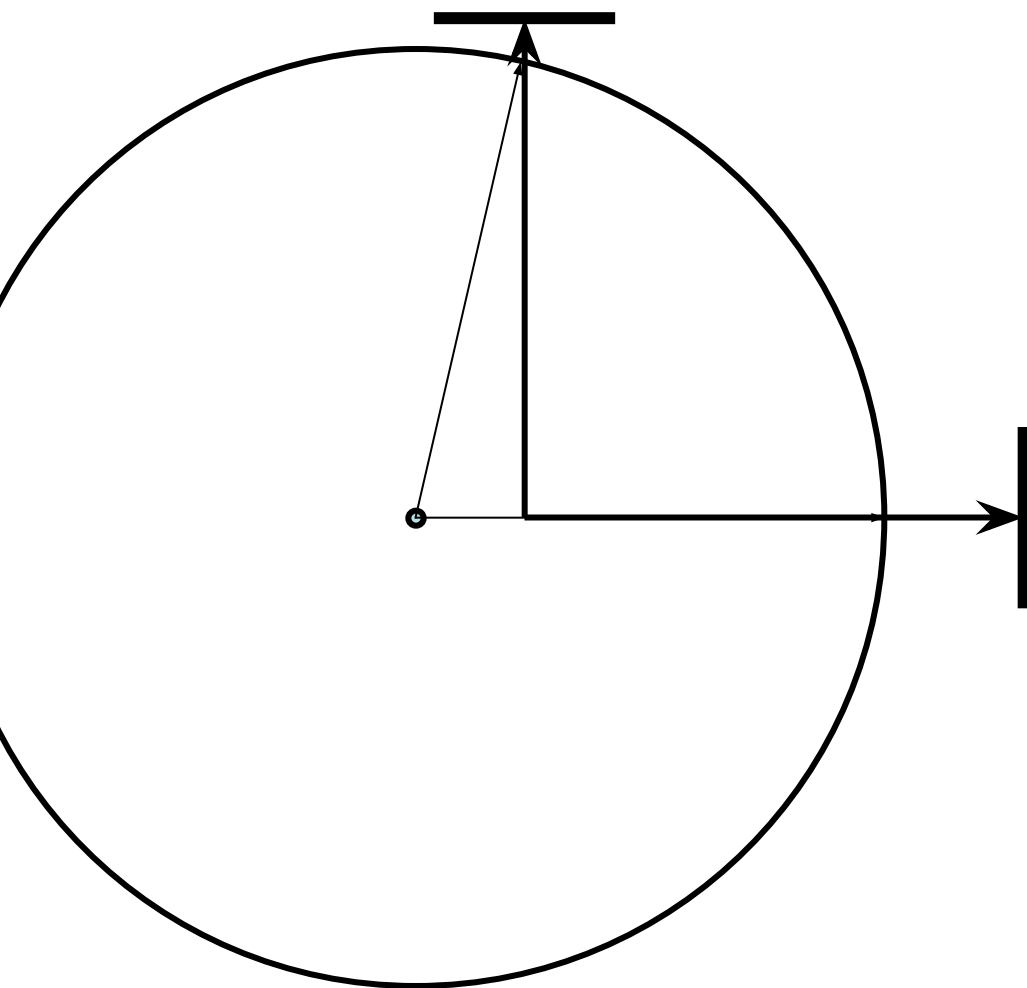
# Кадр 6



# Кадр 7



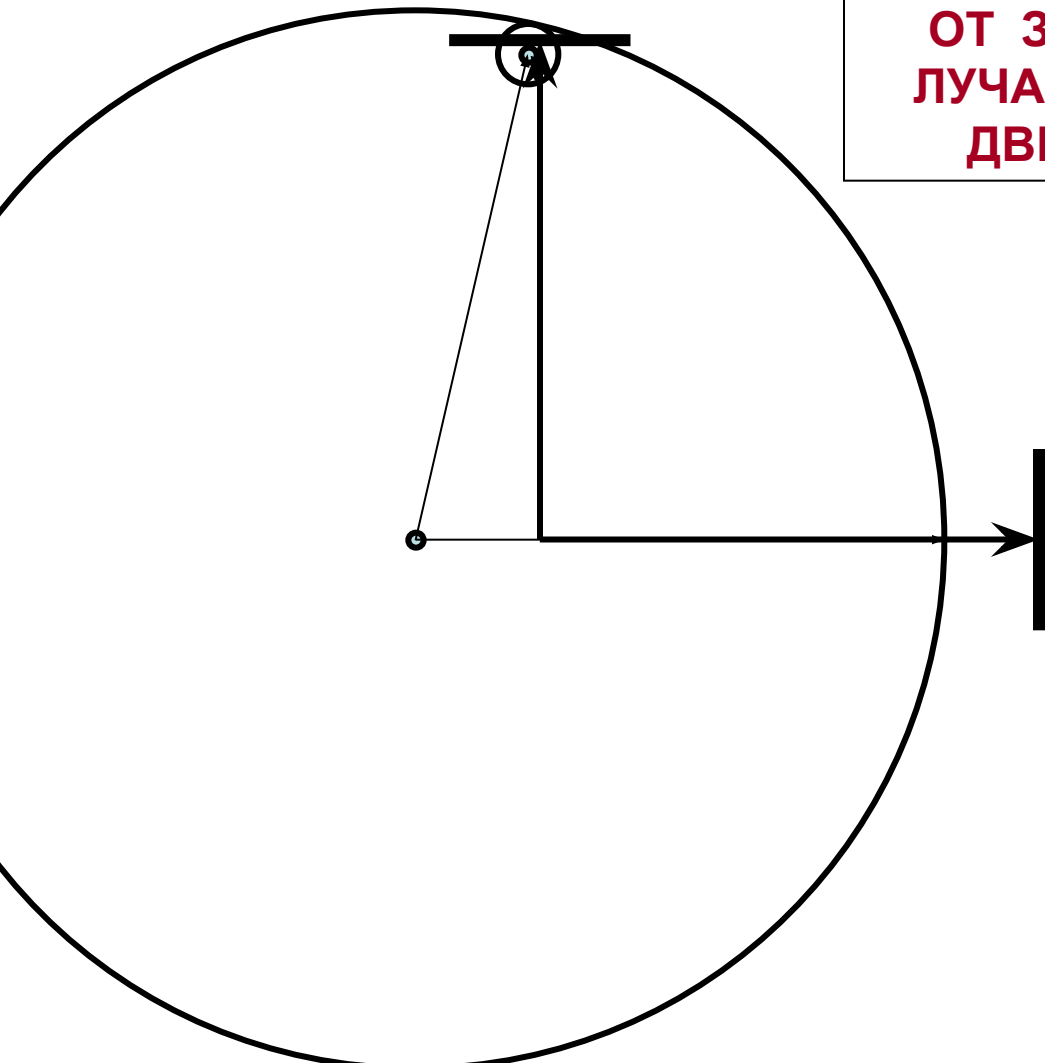
# Кадр 8



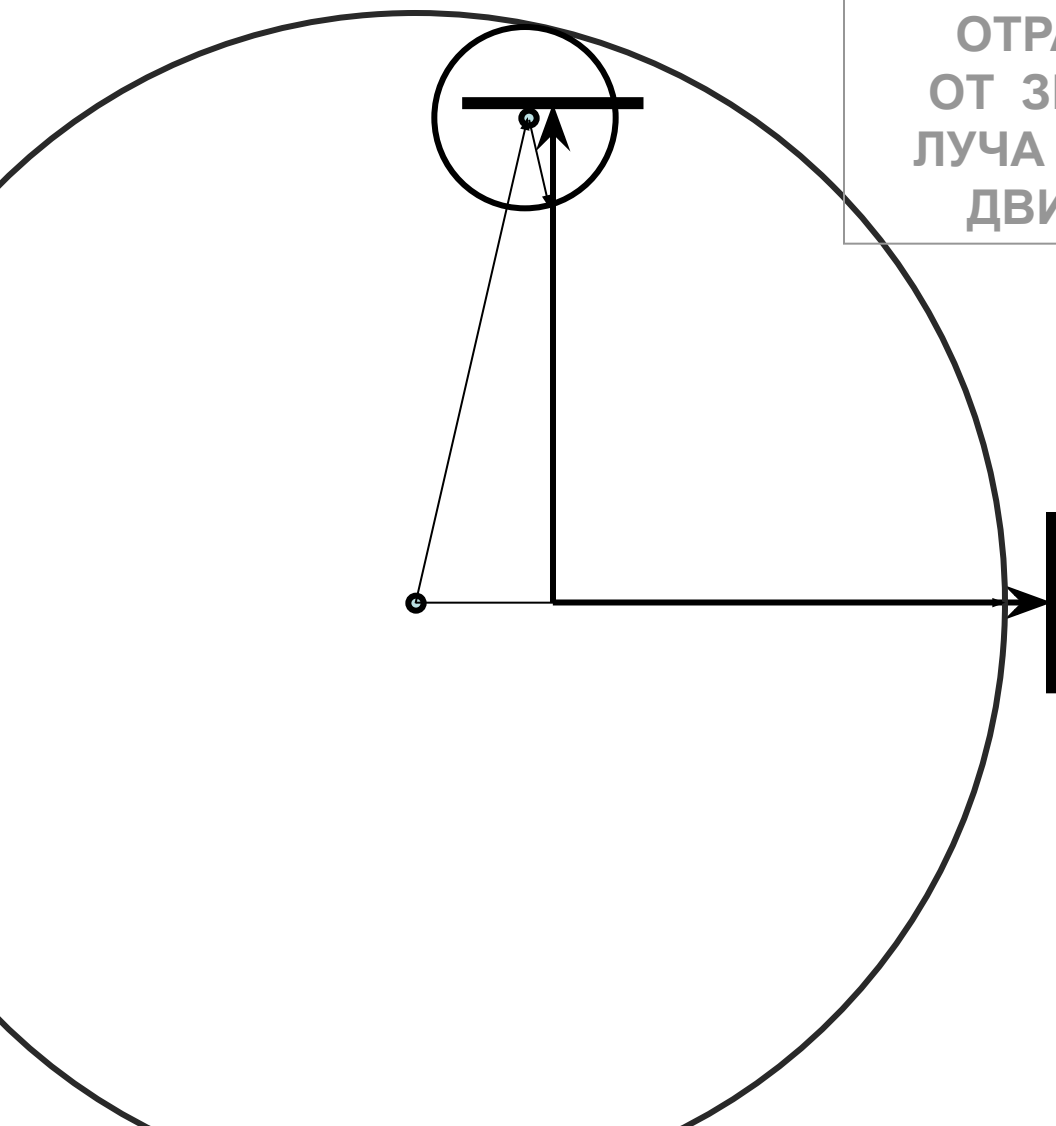


# Кадр 9

ОТРАЖЕНИЕ  
ОТ ЗЕРКАЛА 2  
ЛУЧА ПОПЕРЁК  
ДВИЖЕНИЯ

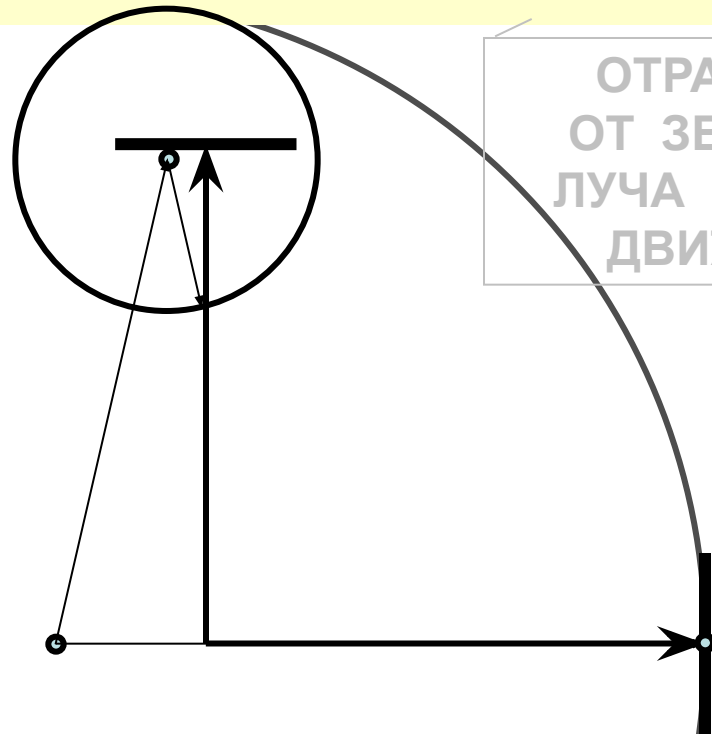


# Кадр 10



ОТРАЖЕНИЕ  
ОТ ЗЕРКАЛА 2  
ЛУЧА ПОПЕРЁК  
ДВИЖЕНИЯ

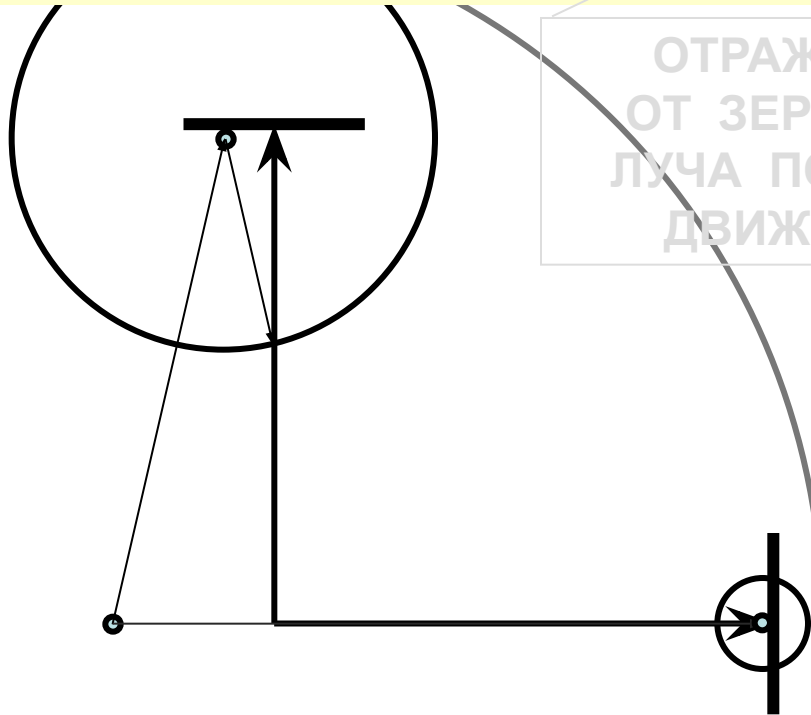
# Кадр 11



ОТРАЖЕНИЕ  
ОТ ЗЕРКАЛА 2  
ЛУЧА ПОПЕРЁК  
ДВИЖЕНИЯ

ОТРАЖЕНИЕ  
ОТ ЗЕРКАЛА 1  
ЛУЧА ВДОЛЬ  
ДВИЖЕНИЯ

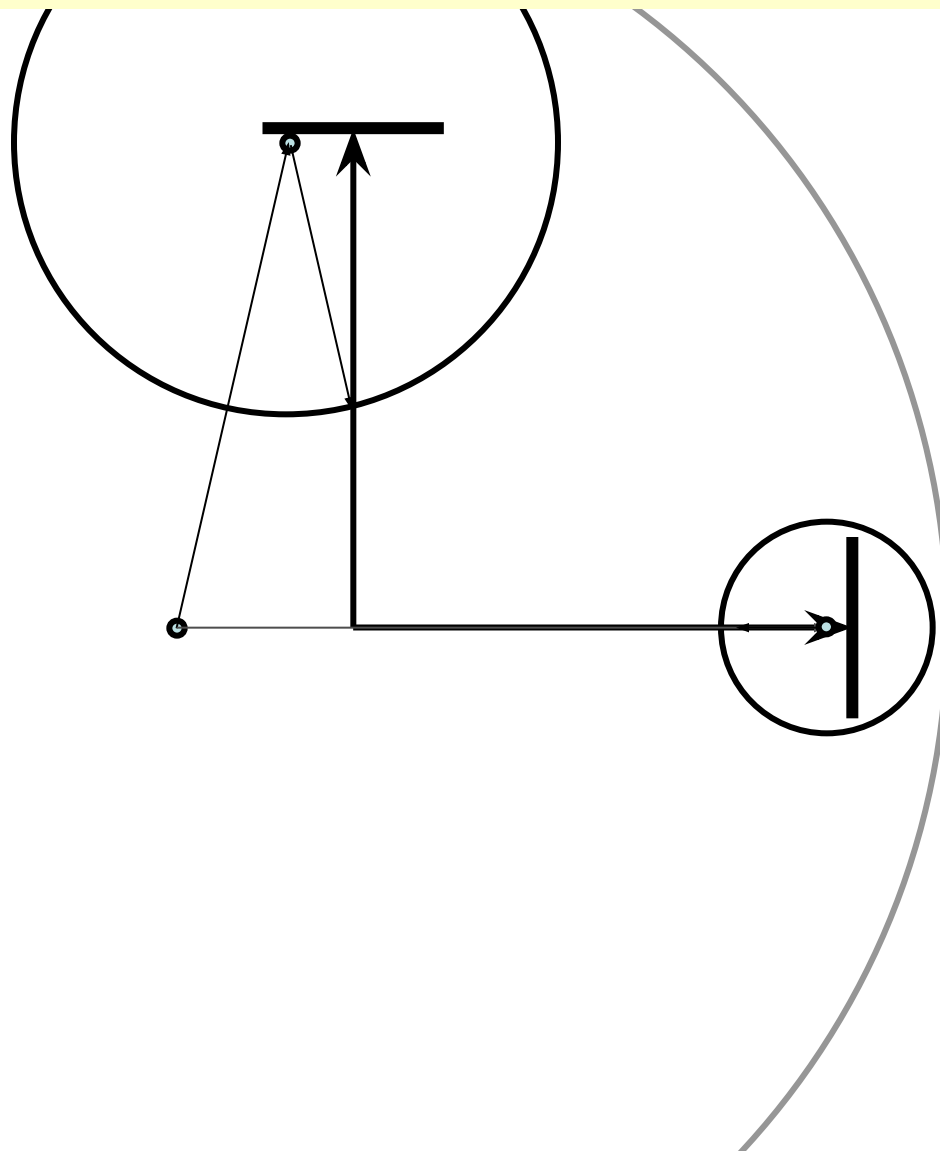
## Кадр 12



ОТРАЖЕНИЕ  
ОТ ЗЕРКАЛА 2  
ЛУЧА ПОПЕРЁК  
ДВИЖЕНИЯ

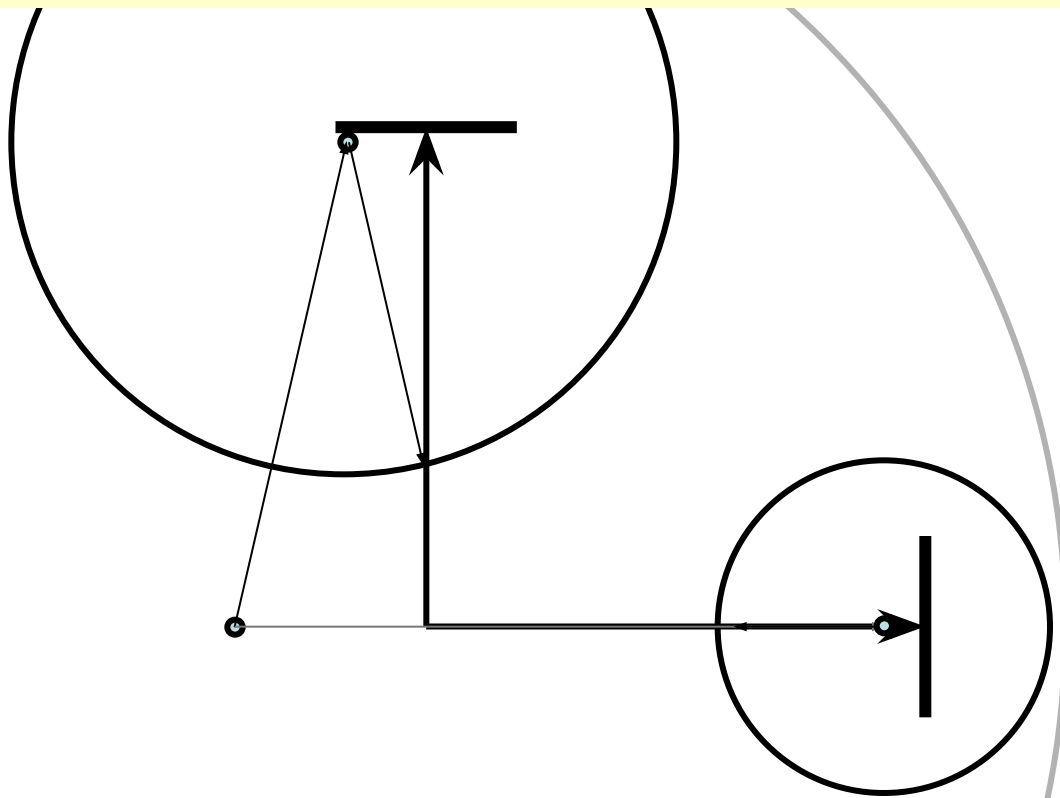
ОТРАЖЕНИЕ  
ОТ ЗЕРКАЛА 1  
ЛУЧА ВДОЛЬ  
ДВИЖЕНИЯ

## Кадр 13



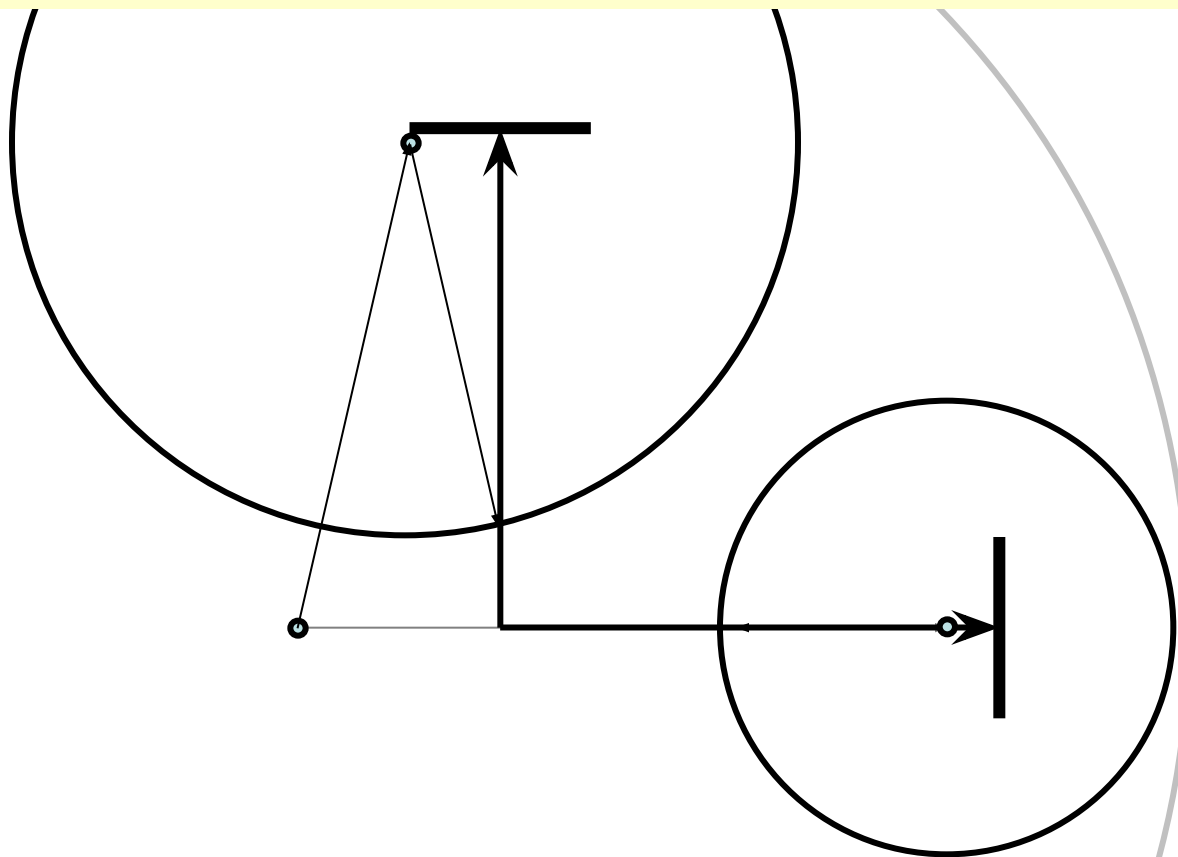
ОТРАЖЕНИЕ  
ОТ ЗЕРКАЛА 1  
ЛУЧА ВДОЛЬ  
ДВИЖЕНИЯ

# Кадр 14

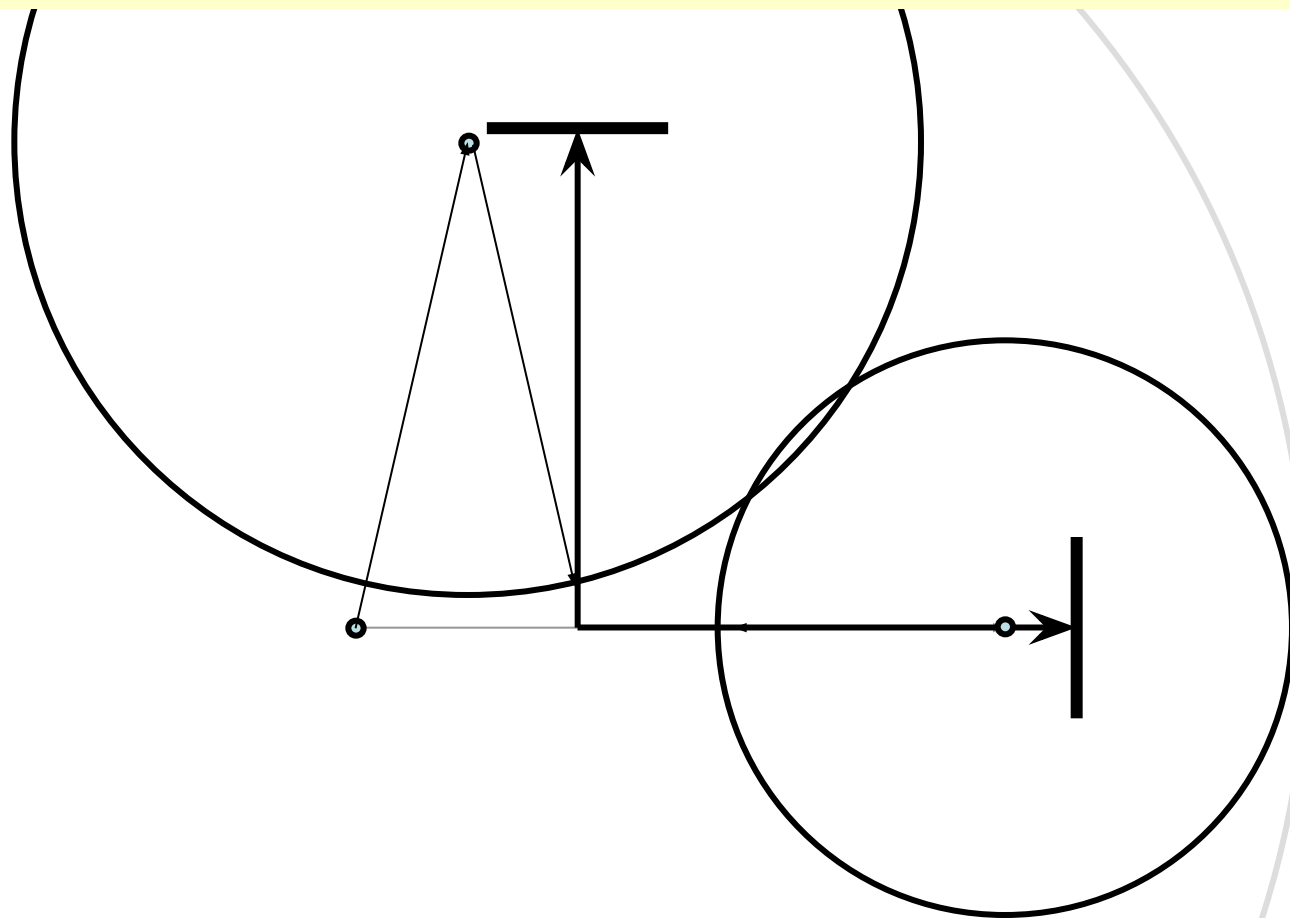


ОТРАЖЕНИЕ  
ОТ ЗЕРКАЛА 1  
ЛУЧА ВДОЛЬ  
ДВИЖЕНИЯ

# Кадр 15

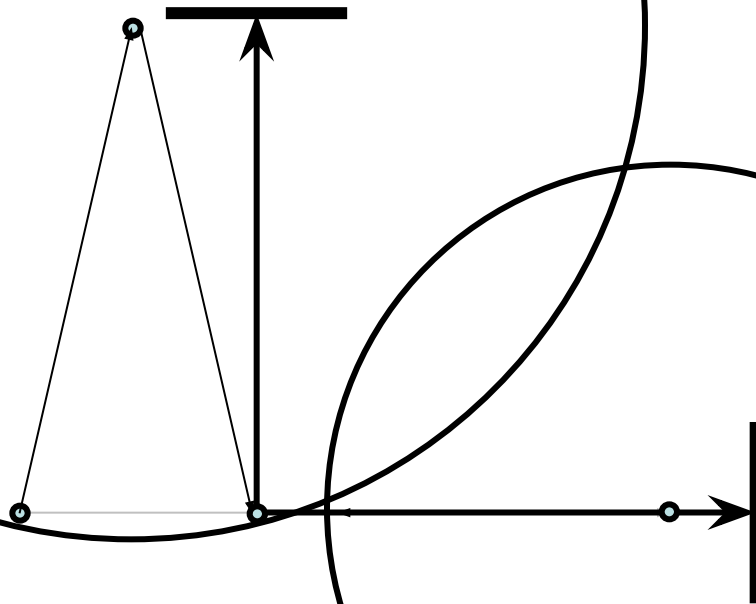


# Кадр 16





## Кадр 17



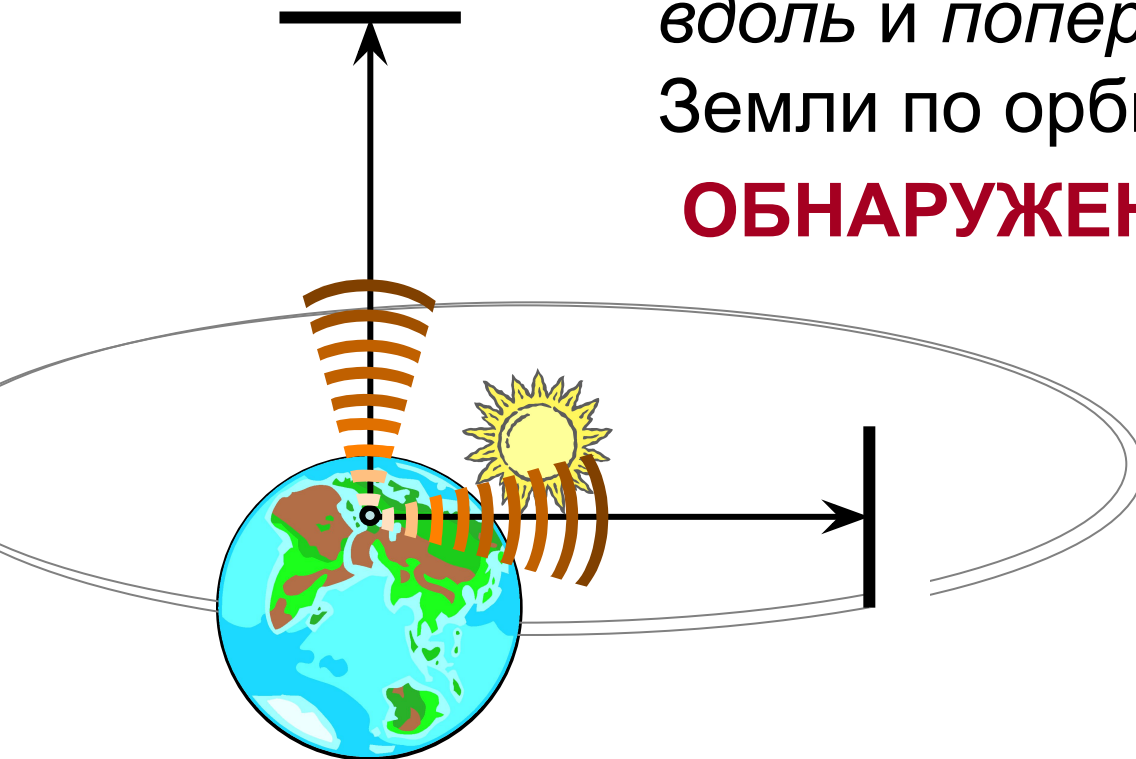
**ЛУЧ ПОПЕРЁК  
ДВИЖЕНИЯ  
ДОСТИГАЕТ  
НАЧАЛА ОТСЧЁТА!**



# 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

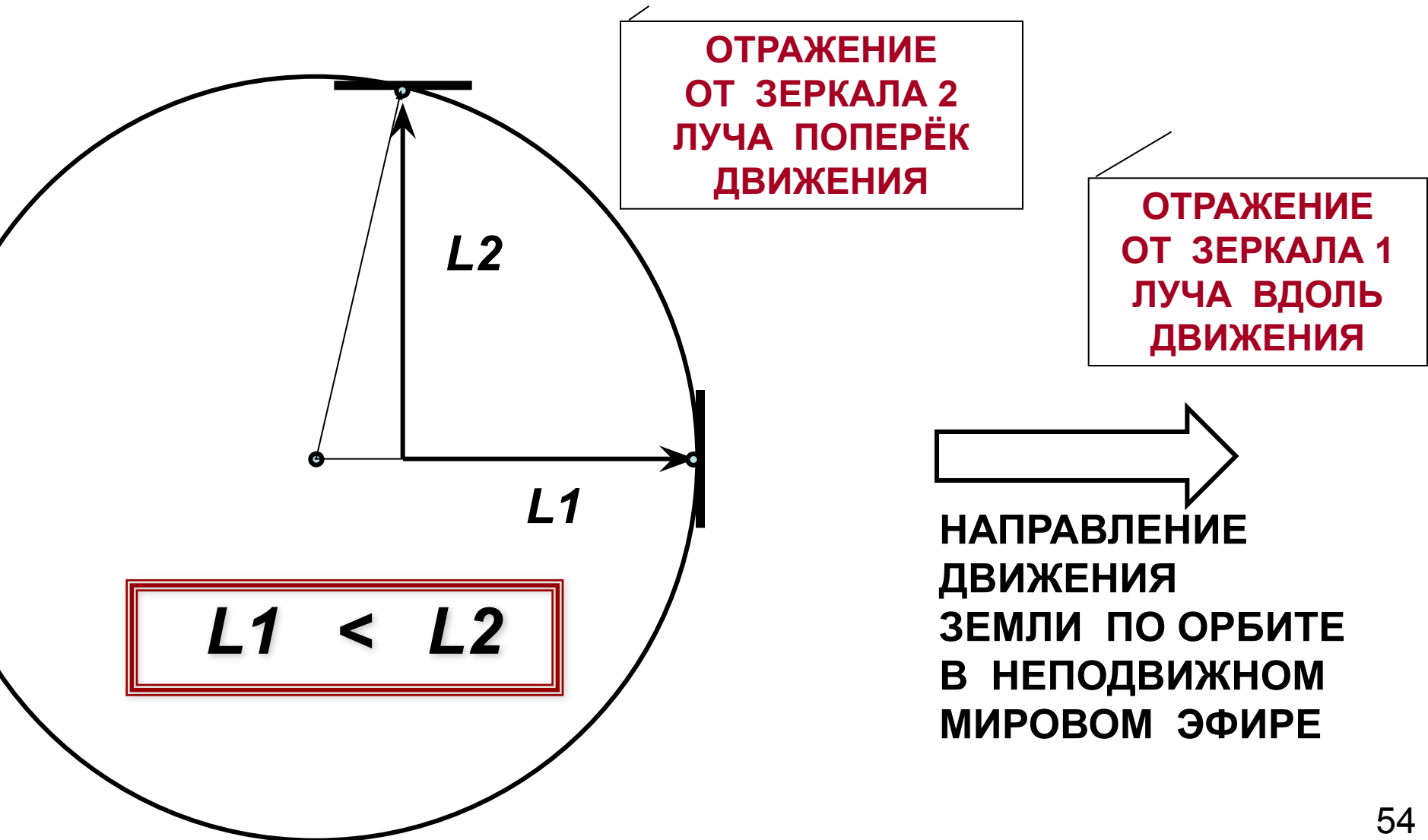
*Скорость движения Земли  
по орбите – **30 км/с***

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

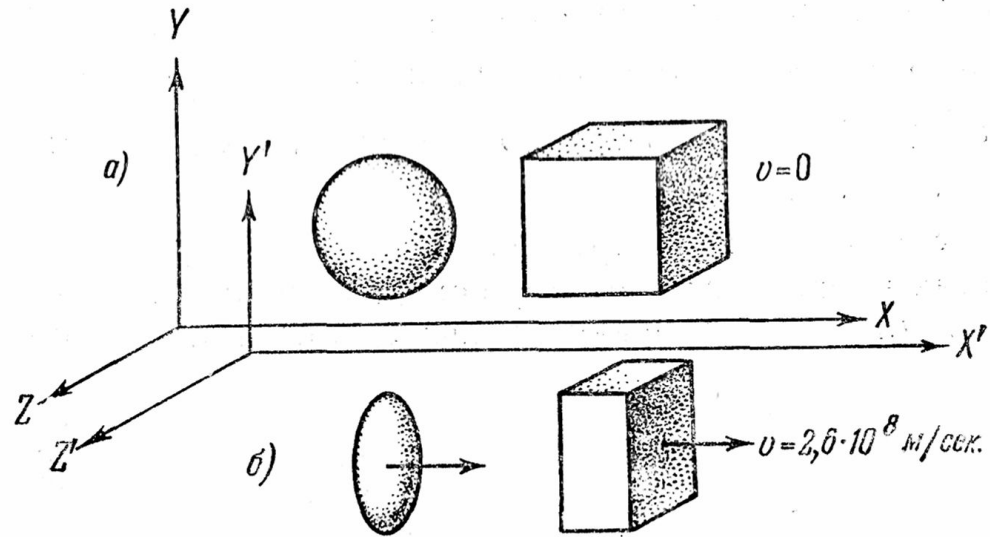


- Мировой эфир существует
- При движении происходит сокращение продольных размеров тел

# 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.)



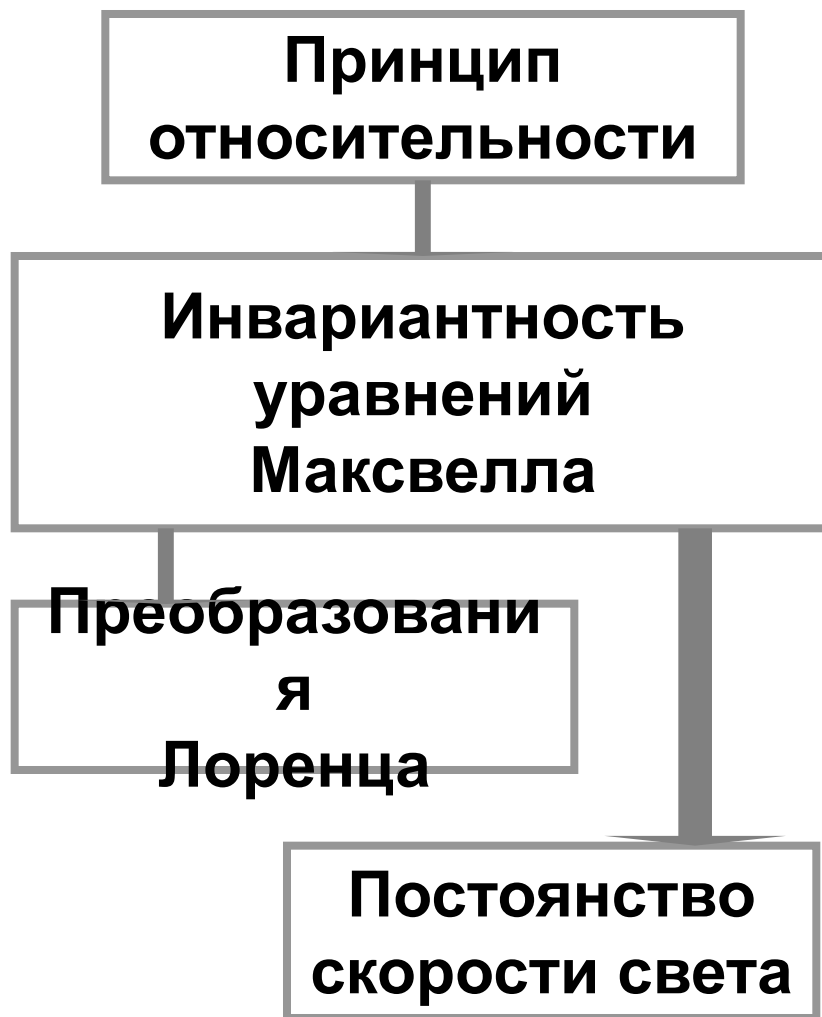
- Закон сохранения энергии
- Второе начало термодинамики
- Равенство действия противодействию
- Закон сохранения массы
- Принцип наименьшего действия
- **Принцип относительности**

## 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.

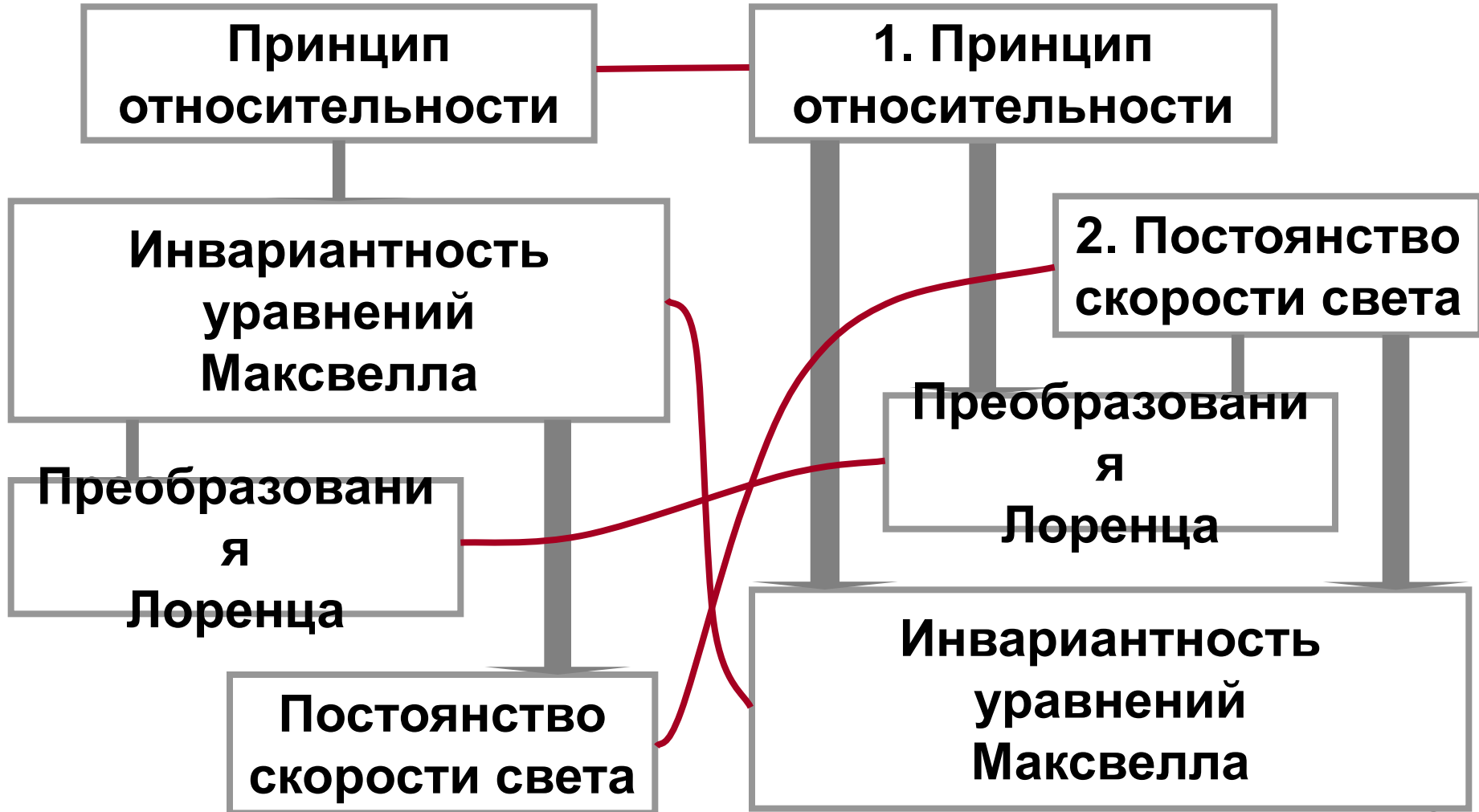
# Первая работа Эйнштейна по теории относительности

- 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.

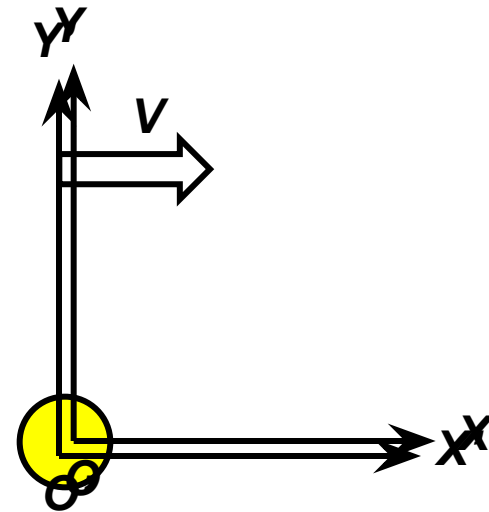
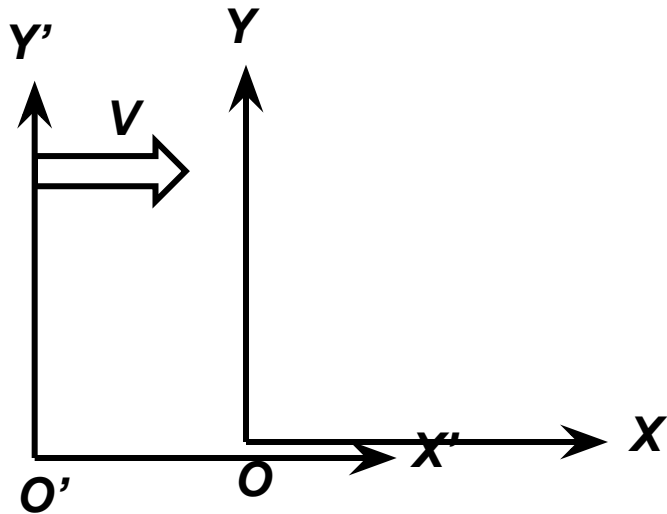
# Сравнение строения теорий относительности Пуанкаре (5 мая 1905 г.)



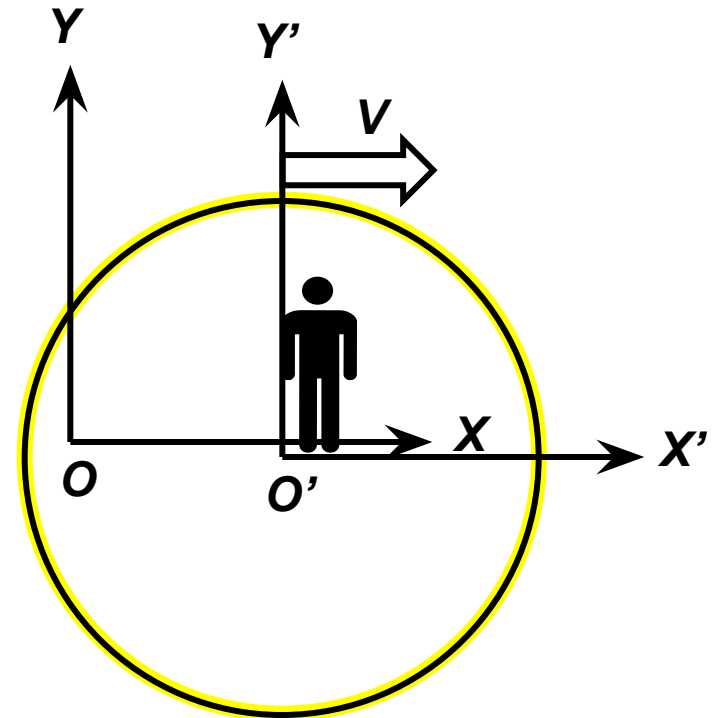
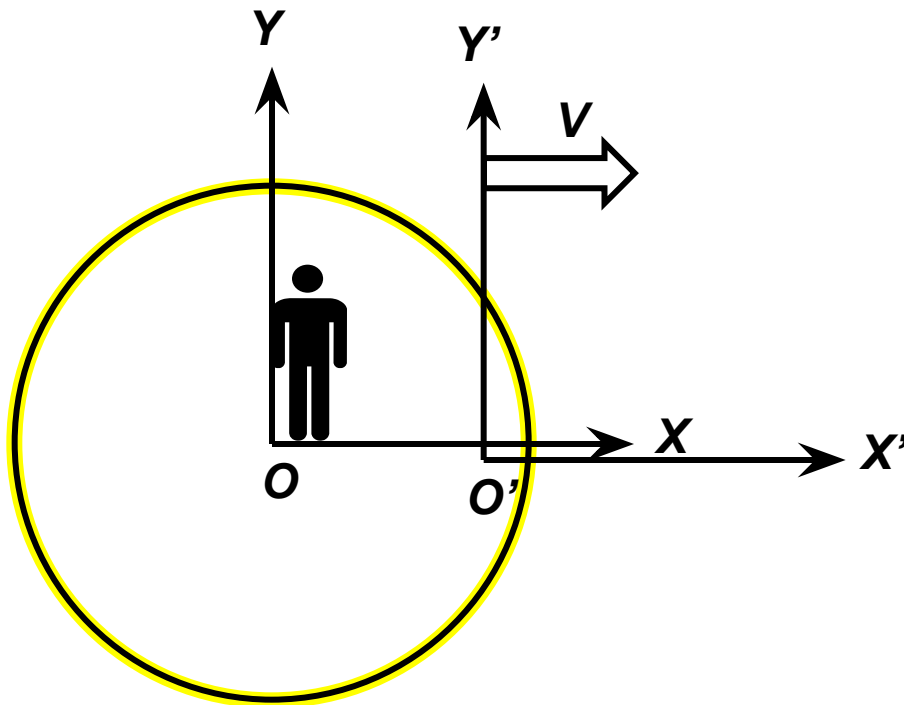
# Эйнштейна (30 июня 1905 г.)



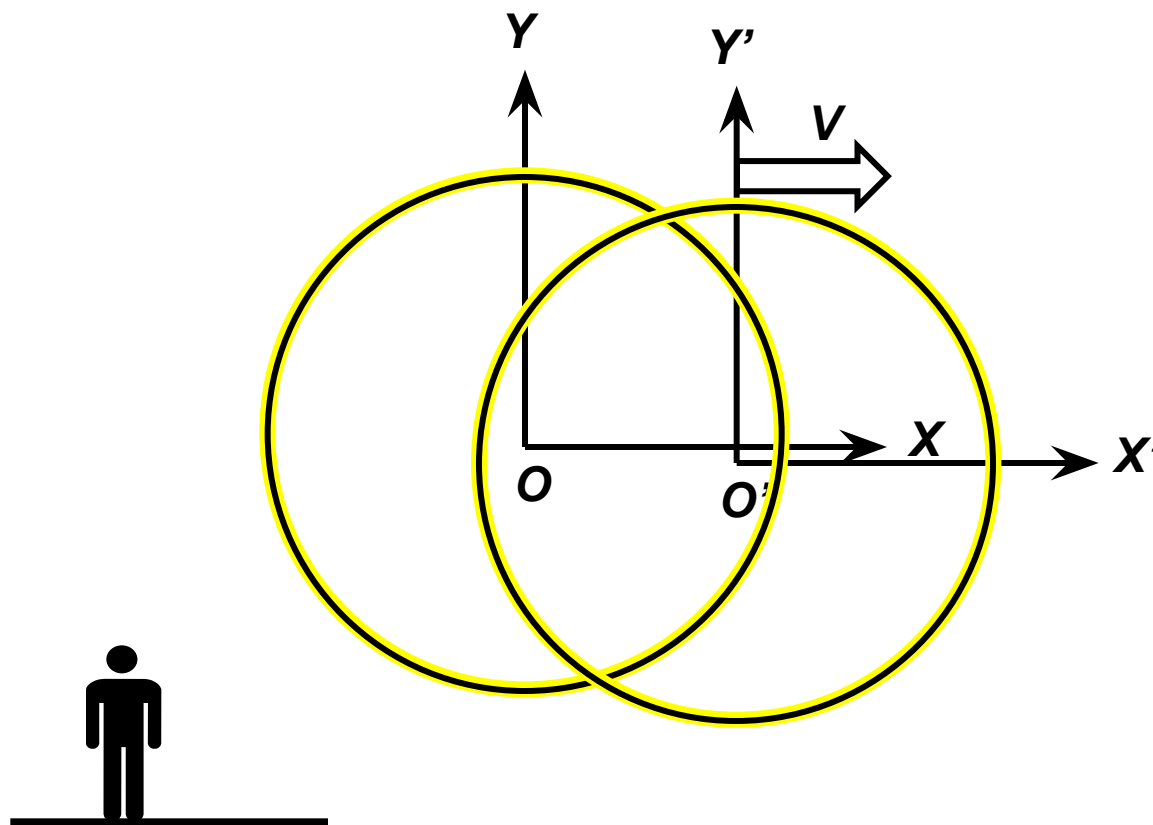
# Короткая вспышка света при совмещении начал систем отсчёта



# 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-

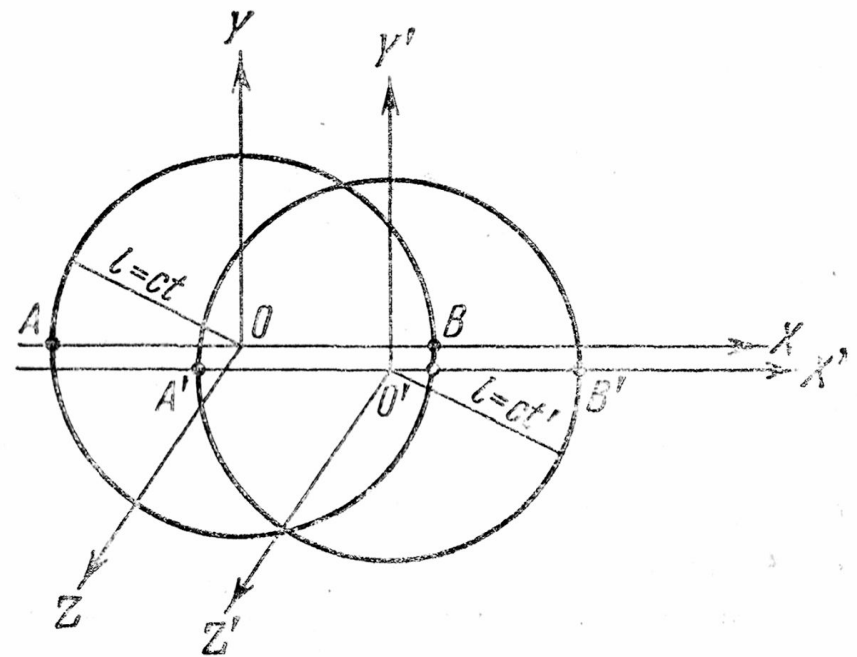


Рис. 1.131.

# 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<sup>1/16</sup>. 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.



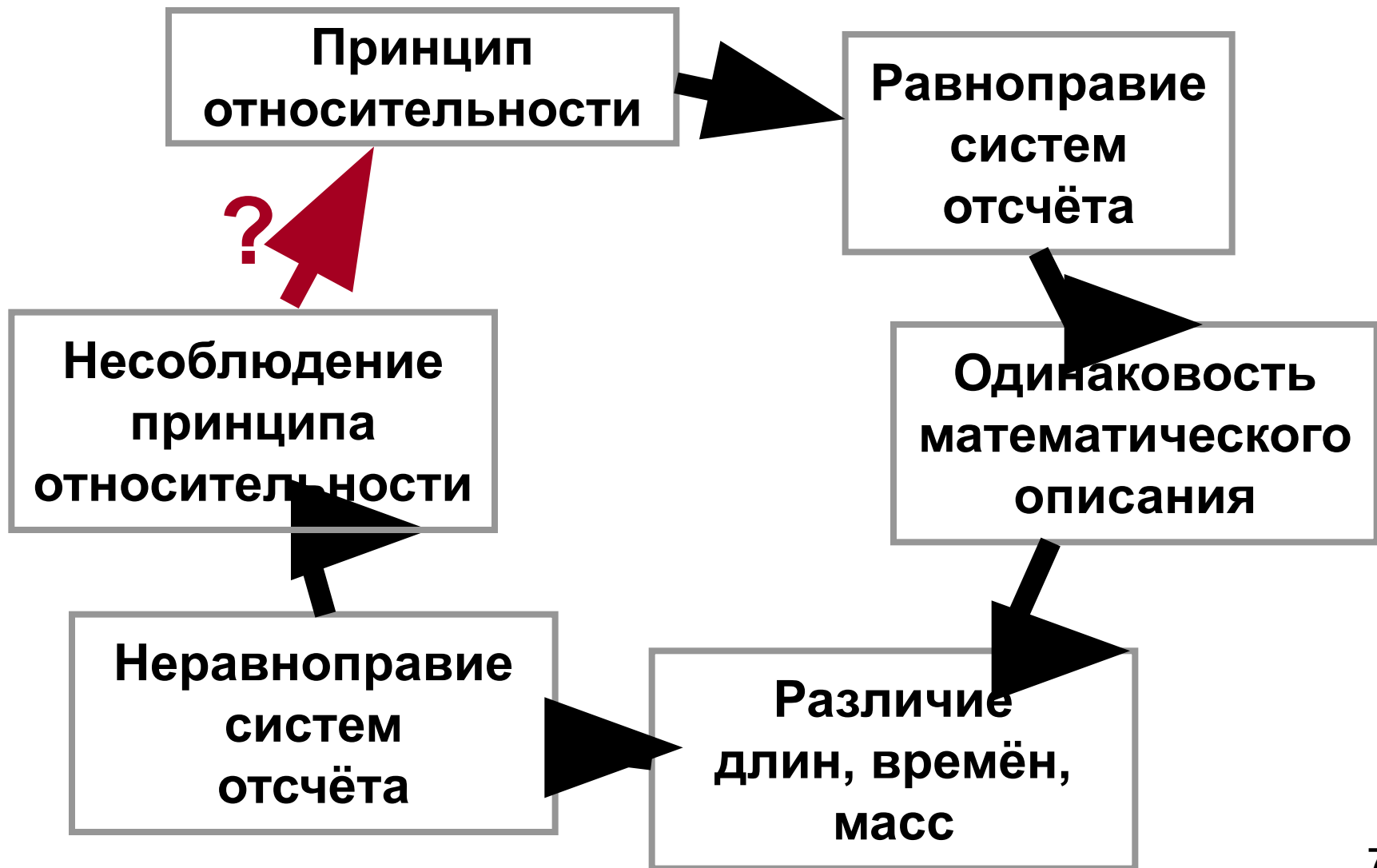
# Толкование Пуанкаре принципа относительности



**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

