2.2. Эксперименты по определению скорости света.

2.2.1. О природе и скорости света.

О природе света размышляли с древних времен. Древние мыслители считали, что свет это истечение “атомов“ от предметов в глаза наблюдателя (*Пифагор – около 580 – 500 лет до нашей эры*). Тогда же определили прямолинейность распространения света, считалось, что он распространяется с очень большими скоростями, практически мгновенно. В XVI-XVII веках Р. Декарт, Х. Гюйгенс, Р. Гук исходили из того, что распространение света – это распространение волн в среде (*Рене Декарт, французский физик, 1596-1650; Христиан Гюйгенс, голландский физик, 1629-1695; Роберт Гук, английский физик, 1635- 1703*). Исаак Ньютон выдвигал корпускулярную природу света, т.е. считал, что свет – это излучение телами определенных частиц и их распространение в пространстве (*Исаак Ньютон, английский физик, 1643 - 1727*).

В 1801 году Т. Юнг наблюдал интерференцию света, что послужило развитию экспериментов со светом по интерференции и дифракции (*Томас Юнг, английский физик, 1773-1829*). И в 1818 году О.Ж. Френель возродил волновую теорию распространения света (*Огюстен Жан Френель, французский физик, 1788-1827*). Д.К. Максвелл после установления общих законов электромагнитного поля пришел к выводу, что свет – это электромагнитные волны. Далее была выдвинута гипотеза ”мирового эфира”, состоящая в том, что свет это распространение электромагнитных волн в среде – ”эфире”. Знаменитые эксперименты по проверке существования мирового эфира проводились А.А. Майкельсоном и Э.У. Морли (1837-1923 г.г.), а по увлечению света движущейся средой – А.И. Физо. (*Альберт Абрахам Майкельсон, американский физик, 1852-1931, Нобелевская премия 1907 г. за создание прецизионные инструменты и выполненные с их помощью спектроскопические и метрологические исследования; Арман Ипполит Луи Физо, французский физик, 1819-1896*). В результате было показано, что мирового эфира (по крайней мере, в том понимании, как считали физики в то время – некоторая абсолютная неподвижная среда) не существует.

С обнаружением на эксперименте корпускулярных свойств и проявлений света (явление фотоэффекта, эффект Комптона и другие явления) была разработана квантовая природа света М.Планком и А.Эйнштейном, в рамках которой свет проявляет как волновые, так и корпускулярные свойства – так называемый, корпускулярно – волновой дуализм. (*Макс Карл Эрнст Людвиг Планк - немецкий физик-теоретик, 1858-1947, Нобелевская премия 1918 г. за открытие законов излучения, Артур Холли Комптон, американский физик, 1892–1962, Нобелевская премия 1927г. за эффект, названный его именем*).

Скорость света также пытались измерить различными способами, как в естественных, так и в лабораторных условиях. Часть из этих методов рассмотрена ниже в этом параграфе.

Скорость света c – это одна из основных мировых физических постоянных. Перечислим ряд основных фактов, касающихся скорости распространения света и установленных в результате многочисленных экспериментов:

1) Скорость света c является *предельной скоростью движения материальных тел*, постоянна в вакууме и *не зависит от частоты света*. Этот факт проверен в диапазоне длин электромагнитных волн λ от многих километров до очень коротких по длине волны γ- лучей:
$$c = 2.99792458\ 10^{10}\ см/с = 2.99792458\ 10^{8}\ м/с.$$
2) Свет имеет электромагнитную природу, распространяется в виде электромагнитных волн, фотонов. Скорость света c входит в уравнения системы уравнений Максвелла, описывающей электромагнитные явления.
3) Скорость света c входит во многие атомные и ядерные постоянные. Например, в постоянную тонкой структуры, которая определяет величину электромагнитного взаимодействия:
$$\frac{e^2}{\hbar c} = \alpha = \frac{1}{137.04},$$
в магнетон Бора, определяющий магнитный момент микрочастиц:
$$M_B = \frac{e\hbar}{2mc} = 9\cdot 10^{-21}\ эрг/Гс.$$

Поэтому экспериментальное определение скорости распространения световых сигналов всегда были важнейшими задачами фундаментальной физики.

2.2.2. Астрономические способы определения скорости света.

1). О.К. Ремер наблюдал затмение спутника Юпитера (J) – *Ио*, открытого еще Галилеем в 1610 году (он также открыл еще 3 спутника Юпитера) (1676 г., *Оле Кристенсен Ремер, голландский астроном, 1644-1710*). Радиус орбиты спутника Ио вокруг Юпитера равен $421600\ км$, диаметр спутника – $3470\ км$ (см рис.2.1 и

2.2). Время затмения составляло τ_0 = 1.77 суток = 152928 *с*. О.К. Ремер наблюдал нарушение периодичности затмений, и это явление Ремер связал с конечной скоростью распространения света. Радиус орбиты Юпитера вокруг Солнца R_J значительно больше радиуса орбиты Земли R_3, а период обращения примерно равен 12 лет. То есть за время полуоборота Земли (полгода), Юпитер переместится по орбите на некоторое расстояние и, если фиксировать время прихода светового сигнала с момента появления Ио из тени Юпитера, то свет должен пройти большее расстояние до Земли в случае 2, чем в случае 1 (см рис. 2.2). Пусть T_1 – момент времени, когда Ио выходит из тени Юпитера по часам на Земле, а t_1 – реальный момент времени, когда это происходит. Тогда имеем:

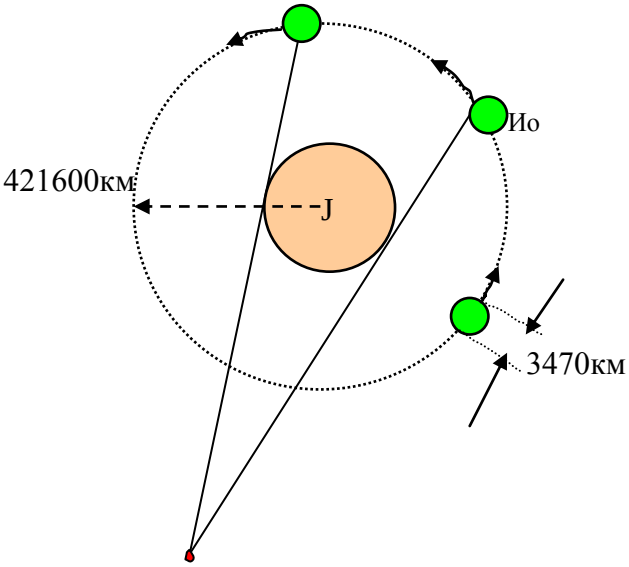

Рис. 2.1.

$$T_1 = t_1 + S_1/c \qquad (2.2.1)$$

где S_1 – расстояние, которое свет проходит до Земли. В следующий выход Ио мы имеем аналогично:

$$T_2 = t_2 + S_2/c \qquad (2.2.2)$$

где S_2 – новое расстояние, которое свет проходит до Земли. Истинный период обращения Ио вокруг Юпитера определяется разностью времен:

$$T_0 = t_2 - t_1 \qquad (2.2.3)$$

Конечно, за один промежуток времени, когда происходит одно затмение, трудно определять эти времена с большой точностью. Поэтому удобнее вести наблюдения за полгода, когда расстояние до Земли меняется на максимальную величину. При этом истинный период затмения можно определить как среднюю величину за полгода или год. После этого можно определить скорость света после двух последовательных измерений времени выхода Ио из тени:

$$c = \frac{S_2 - S_1}{T_{набл} - T_0} \qquad (2.2.4)$$

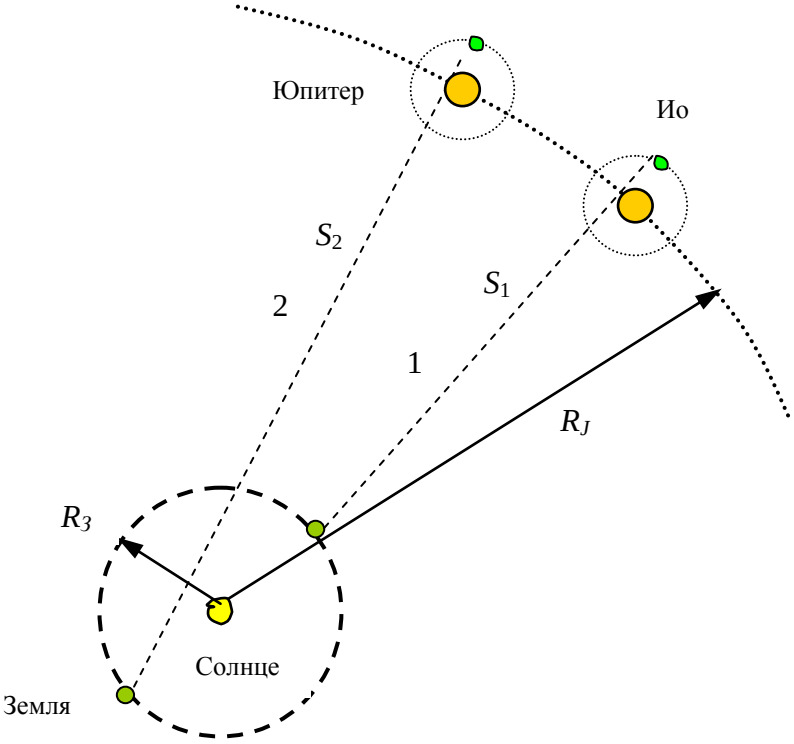

Рис. 2.2.

Величины S_1 и S_2 находятся из астрономических вычислений. Однако за одно затмение это расстояние меняется мало. Удобнее провести измерения за полгода (когда Земля перейдет на другую сторону своей орбиты) и получить суммарное время затмения:

$$t_1 = nT_0 + \frac{\Delta S}{c} = nT_0 + \frac{R_J + R_3}{c} - \frac{R_J - R_3}{c} \qquad (2.2.5)$$

где n – число затмений за эти полгода. Все остальные промежуточные времена распространения света да Земли сократились, поскольку расстояние меняется слабо за одно затмение. Отсюда Ремер получил скорость света, равную c = 214300 *км/с*.

2). Дж. Брэдли (1725 г.) для измерения скорости света использовал явление аберрации звезд, а именно отклонение видимого направления на звезду от истинного направления вследствие сложения скоростей. (Это явление аберрации напоминает падение капель дождя – если они падают вертикально, то на стекле движущейся машины они оставляют след под углом к вертикали). Отклонение направления падающего луча от истинного угла падения равно:

$$tg\alpha = \frac{v_\perp}{c} \qquad (2.2.6)$$

где $v_\perp$ – перпендикулярная составляющая скорости Земли по направлению к звезде. Существует годичная аберрация за счет скорости Земли вокруг Солнца и суточная аберрация за счет вращения Земли вокруг оси. Зная скорости $v_\perp$ и измеряя α, Брэдли получил значение скорости света, близкое к величине, полученной Ремером.

2.2.3. <u>Лабораторные способы измерения скорости света</u>.

1). Для измерения скорости света Арман Физо (1849г.) применил метод синхронного детектирования. Он использовал быстро вращающийся диск с N зубьями (рис. 2.3), представляющие собой непрозрачные сектора. Между этими секторами (зубьями) свет проходил от источника к отражающему зеркалу и обратно к наблюдателю. При этом угол между серединами секторов равен

$$\alpha = \frac{2\pi}{N} \qquad (2.2.7)$$

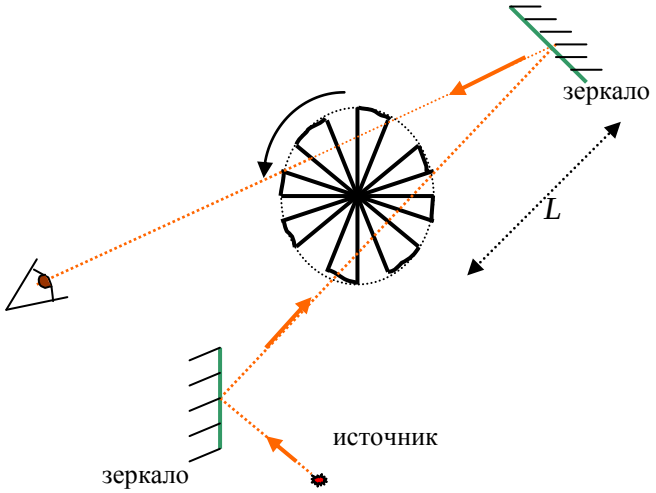

Рис. 2.3.

Угловая скорость вращения подбиралась так, чтобы свет после отражения от зеркала за диском попадал в глаза наблюдателю при прохождении через соседнее отверстие. За время движения света от диска до зеркала и обратно:

$$\tau = \frac{2L}{c} \qquad (2.2.8)$$

поворот диска составляет угол

$$\Delta\varphi = \omega\tau = \frac{2L\omega}{c} \qquad (2.2.9)$$

Зная расстояние L, угловую скорость диска ω и угол $\Delta\varphi$, при котором появляется свет, можно получить скорость света. Физо получил значение скорости, равное c = (315300±500) *км/с*.

2). Примерно такими же методами экспериментаторы получали уточненное значение скорости света c = (298000±500) *км/с* (1862 г.), затем c = (299796±4) *км/с* (А. Майкельсон в 1927 и 1932 г.г.). Позже Бергстранд получил следующее значение для скорости – c = (299793.1±0.3) *км/с*.

3). Отметим здесь один из наиболее точных способов измерения скорости света – метод объемного резонатора, основная идея которого состоит в образовании стоячей световой волны и вычислении числа полуволн на длине резонатора. Основные соотношения между скоростью света c, длиной волны λ, периодом T и частотой ν имеют вид:

$$c = \lambda\nu, \quad \lambda = Tc = \frac{2\pi}{\omega}c \quad \text{и} \quad c = \frac{\omega\lambda}{2\pi} \qquad (2.2.10)$$

Здесь также введена круговая частота $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$, которая есть не что иное, как угловая скорость вращения ω амплитуды, если колебания представить как проекцию вращательного движения на ось. В случае образования световой стоячей волны на длине резонатора укладывается целое число полуволн. Находя это число и пользуясь соотношениями (2.2.10), можно определить скорость света.

Последние достижения (1978 г.) дали для скорости света следующее значение c = 299792.458 *км/с* = (299792458 ± 1.2) *м/с*.

2.2.4. Опыты по распространению света в среде.

1). Опыт Армана Физо (1851). Физо рассматривал распространение света в движущейся среде. Для этого пропускал луч света через стоячую и текущую воду и с помощью явления интерференции света сравнивал интерференционные картины, по анализу которых можно было судить об изменении скорости распространения света (см схематичный рисунок 2.4). Два луча света, отразившись от полупрозрачного зеркала (луч 1) и пройдя его (луч 2) проходят дважды через трубу с водой и затем создают интерференционную картину на экране. Сначала измеряют в стоячей воде, а затем в текущей со скоростью

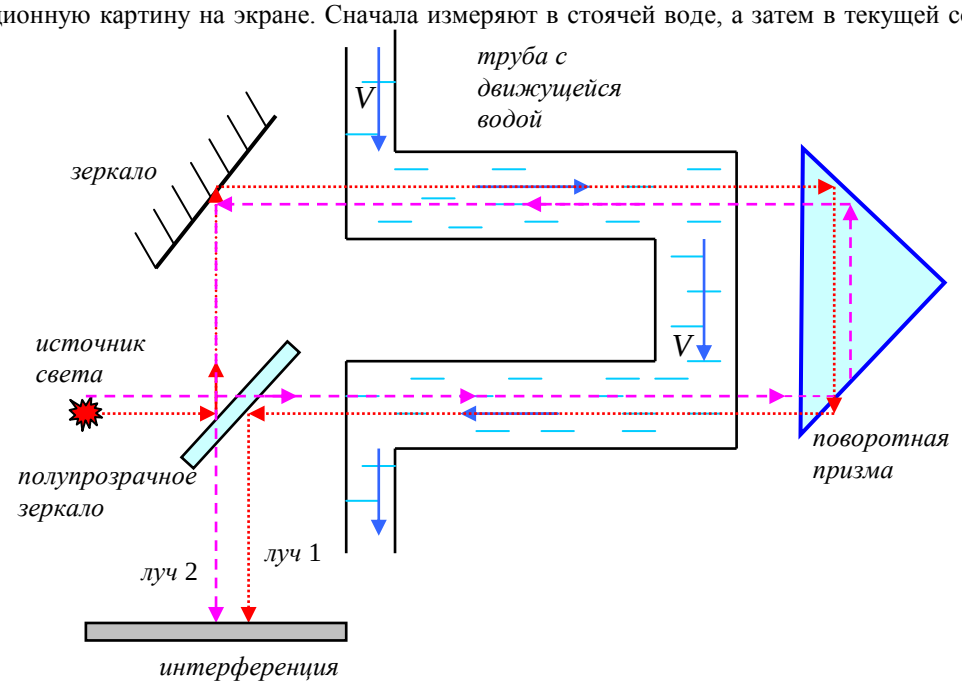

Рис.2.4.

V. При этом один луч (1) движется по течению, а второй (2) – против течения воды. Происходит смещение полос интерференции вследствие изменения разности хода двух лучей. Разность хода лучей измеряется и по ней находится изменение скоростей распространения света. Скорость света в неподвижной среде $\tilde{c}$ зависит от показателя преломления среды n:

$$\tilde{c} = \frac{c}{n} \tag{2.2.11}$$

По принципу относительности Галилея для наблюдателя, относительно которого свет движется в среде, скорость должна быть равна:

$$v = \frac{c}{n} \pm V \tag{2.2.12}$$

Экспериментально Физо установил, что имеется коэффициент при скорости воды V и поэтому формула выглядит следующим образом:

$$v = \frac{c}{n} \pm \alpha V\,, \tag{2.2.13}$$

где α – коэффициент увлечения света движущейся средой:

$$\alpha = \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \tag{2.2.14}$$

Таким образом, эксперимент Физо показал, что классическое правило сложения скоростей неприменимо при распространении света в движущейся среде, т.е. свет только частично увлекается движущейся средой. Опыт Физо сыграл важную роль при построении электродинамики движущихся сред. Он послужил обоснованием СТО, где коэффициент α получается из закона сложения скоростей (если ограничиться первым порядком точности по малой величине v/c). *Вывод, который следует из этого опыта, состоит в том, что классические (Галилеевские) преобразования неприменимы при распространении света*.

2). Опыты А. Майкельсона (1881 г.) и Майкельсона - Морли (1885-87 г.г.). Цель опытов состояла в измерении влияния скорости Земли на скорость света. В то время считалось, что свет – это колебания эфира, при этом опыт Физо показал, что свет частично увлекается средой. Вопрос, на который предстояло ответить, состоял в том, чтобы определить есть ли “эфирный ветер”, есть ли преимущественная ИСО?

Майкельсоном был создан новый специальный интерферометр, способный разделять луч света на два луча (рис.2.5). Эти лучи могли распространяться во взаимно перпендикулярных направлениях и в различных средах, а затем собирались в трубе интерферометра, где наблюдались полосы интерференции. Прибор ориентировался так, что одно из плеч интерферометра совпадало с направлением движения Земли, а затем он поворачивался на угол 90°, так что, либо луч 1, либо луч 2 был направлен вдоль скорости Земли $V_З$. Компенсатор вставлялся на пути одного из лучей, чтобы компенсировать набег фаз между лучами, получающийся при прохождения лучами полупрозрачного зеркала. При повороте должно было происходить смещение полос интерференции, поскольку менялась разность фаз между двумя лучами. Однако смещения полос обнаружено в эксперименте не было.

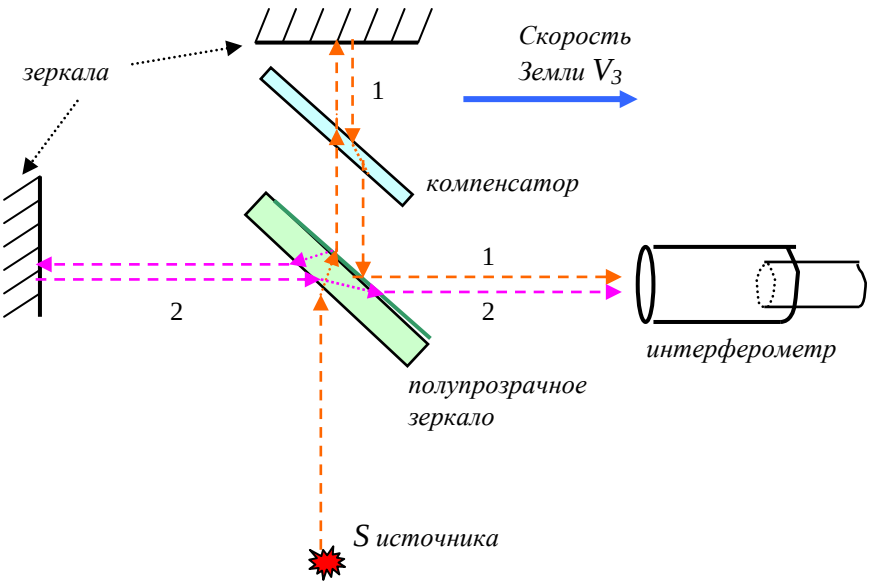

Рис. 2.5.

Время движения луча света (луч 2 на рисунке) вдоль направления скорости Земли равно:

$$t_2 = \frac{l}{c+V_З} + \frac{l}{c-V_З} = \frac{2l}{c}\frac{1}{1-V_З^2/c^2} \qquad (2.2.15)$$

где l – длина плеча интерферометра. Время движения луча света поперек скорости Земли равно:

$$t_1 = \frac{2l}{\sqrt{c^2-V_З^2}} = \frac{2l}{c}\frac{1}{\sqrt{1-V_З^2/c^2}} \qquad (2.2.16)$$

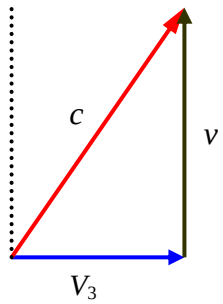

Рис. 2.6.

поскольку скорость распространения света относительно эфира находится из прямоугольного треугольника (рис.2.6): $v^2 = c^2 - V_З^2$.

Результат эксперимента Майкельсона показал: *эфирного ветра нет, скорость света во всех направлениях одинакова*.

Майкельсон и Морли усовершенствовали опыт: цементная плита плавала в ртути, прибор медленно вращался, использовалось многократное отражение от 16 зеркал, за счет чего увеличивалось плечо интерферометра до 11 *м*. Точность эксперимента увеличилась, однако вывод остался прежним.

3). В настоящее время благодаря использованию лазеров точность экспериментов увеличилась во много раз. Так, в 1964 г. Джасей, А. Джаван, Муррей, увеличили точность в 50 раз Таунс (*Али Джаван, американский физик, 1926*; *Чарльз Хард Таунс, американский физик, 1915, Нобелевская премия 1964 г. за фундаментальные исследования в области радиофизики, приведшие к созданию мазеров и лазеров*). Идея эксперимента та же, что у Майкельсона. Пучки света от двух лазеров (см рис. 2.7) были взаимно перпендикулярны и с помощью полупрозрачного зеркала направлялись затем на фотоэлектронный умножитель (ФЭУ считает кванты света).

Рассуждения состоят в следующем: если скорость света зависит от распространения относительно Земли, то частота лазера, на которой он генерирует излучение, должна изменяться при повороте относительно направления движения Земли. Это изменение должно быть пропорционально $\sim V_3^2/c^2$. Если бы частота излучения лазеров слегка изменялась при повороте на 90 градусов, то в фотоэлектронном умножителе возникли бы биения. Экспериментаторы этих биений не наблюдали и дали ограничение на скорость эфирного ветра, что он не превышает $30\ м/с$.

Итак, на основании полученных результатов вывод состоит в следующем: *скорость света в вакууме изотропна и это справедливо во всех ИСО*.

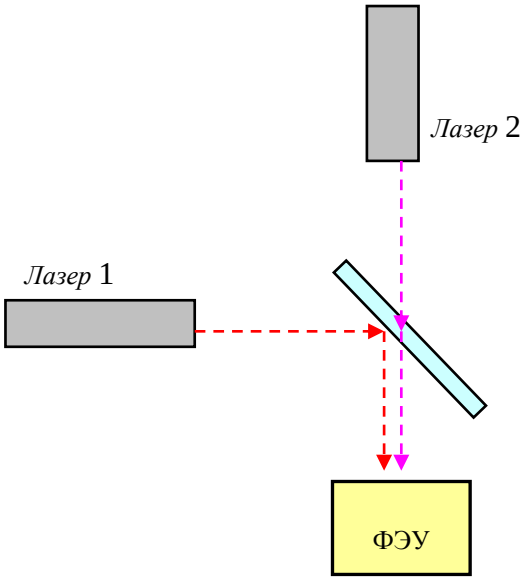

Рис. 2.7.

2.2.4. Максимальность скорости света.

Оказывается, что и *численное значение скорости света в вакууме одинаково во всех ИСО*. Этот вывод также был сделан на основании различных экспериментов. Кратко рассмотрим некоторые из них.

1). Эксперименты Кеннеди и Торндайка (1932 г.) и позже Д. Саде (1963 г., D.Sade, *Phys.Rev.Lett.* **10**, 271 (1963)). Д. Саде рассматривал распадающиеся электрон-позитронные пары, которые образовывались при столкновении движущихся позитронов со скоростями от 0 до $v \approx c/2$ с электронами мишени. В результате аннигиляции электрон-позитронной пары испускались γ кванты (см рис. 2.8). Саде измерял скорость

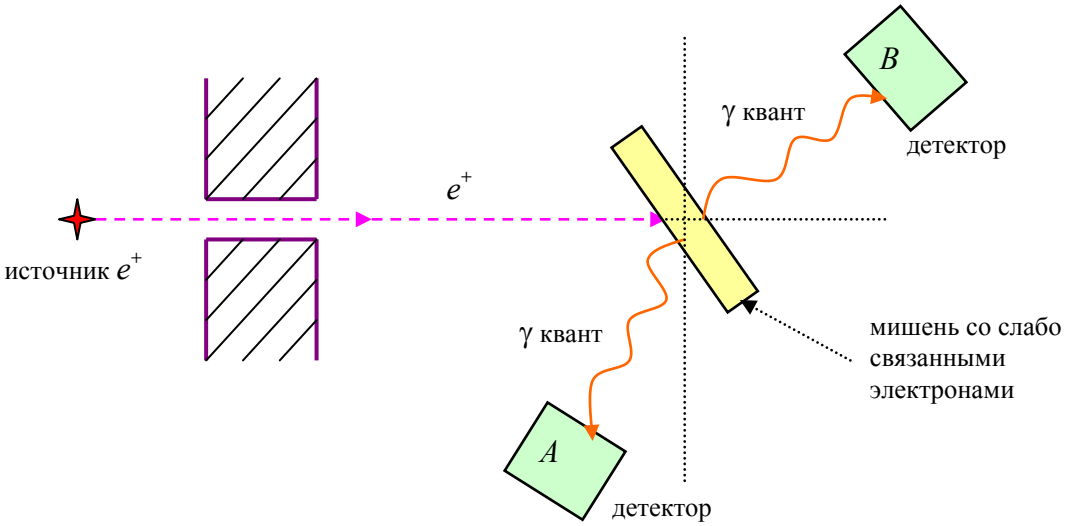

Рис. 2.8.

прихода испущенных γ квантов в пространственно разделенные детекторы. Он получил, что с точностью до 10% скорость квантов была одинакова и равнялась c, независимо от того, с какой скоростью двигался позитрон и электрон-позитронная пара до распада.

Выводы многочисленных экспериментов: *скорость света не зависит от взаимного движения источника или приемника*.

2). Опыт Бертоцци (*1964г., Bertocci, J.Am.Phys.Soc. 1964*) – экспериментальная проверка максимальности скорости света для материальных тел. Установка (см рис.2.9) состояла из вакуумной трубы, внутри которой находился источник электронов (испускание электронов происходило за счет явления термоэмиссии), сетки ускоряющих потенциалов и измерительная система. Электроны ускорялись, при этом полная разность потенциалов равна сумме ускоряющих потенциалов. Затем при прохождении рубежа 1, т. е. при прохождении электроном сетки, электрический сигнал подавался на осциллограф, а второй сигнал на него подавался при попадании электрона в коллектор 2. По разности времен прихода сигналов на

осциллограф Δt измерялась скорость электронов как $v = L/\Delta t$, где L – расстояние между фиксирующими электродами. Коллектор, сделанный из алюминия, собирал пройденные электроны, при этом еще измерялась температура с помощью термопары, а по нагреву мишени определялась полная кинетическая энергия, полученная при сборе электронов. Таким образом, полная энергия электронов равна:

$$E = N_e K = N_e e\varphi \qquad (2.2.17)$$

где N_e – число электронов, K – кинетическая энергия каждого электрона, φ – полная разность потенциалов, пройденная электроном. На эксперименте измерялось число пройденных электронов, и отсюда находилась

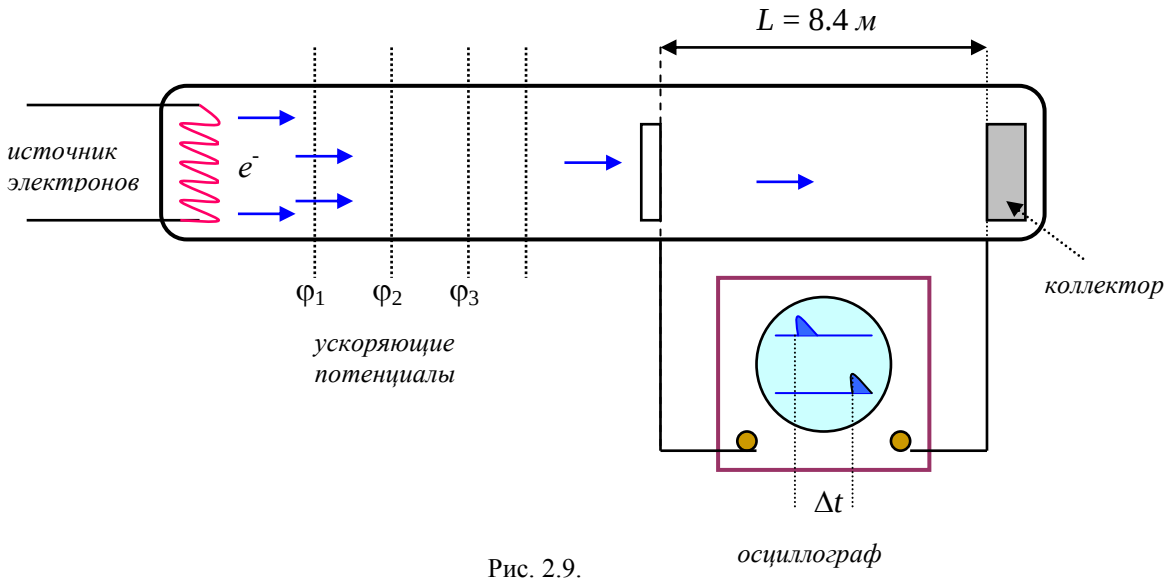

Рис. 2.9.

кинетическая энергия электрона. Строился график квадрата скорости от кинетической энергии электрона. По классической механике должна быть прямая зависимость кинетической энергии от квадрата скорости: $K = \frac{m}{2}v^2$ (см рис. 2.10).

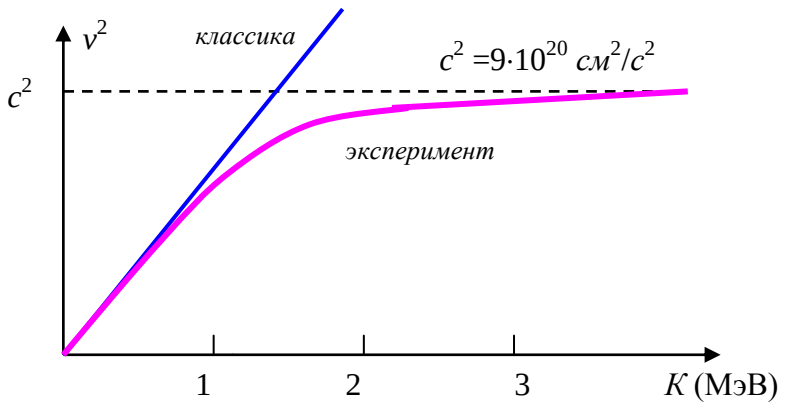

Рис. 2.10.

Эксперимент показал, что зависимость квадрата скорости от кинетической энергии имеет другой вид: кинетическая энергия растет, а скорость ограничена и приближается к своему максимальному значению, равному скорости света.

Итак, было показано, что скорость света – есть *максимально возможная скорость для материальных тел*.