

Скорость фотонов в вакууме, в среде

Д. Грибков

Трудно представить себе абсолютную пустоту — полный вакуум, не содержащий чего бы то ни было. Человеческое сознание стремится заполнить его хоть чем-то материальным, и на протяжении долгих веков человеческой истории считалось, что мировое пространство заполнено эфиром. Идея состояла в том, что межзвездное пространство заполнено какой-то невидимой и неосязаемой тонкой субстанцией. Когда была получена система уравнений Максвелла, предсказывающая, что свет распространяется в пространстве с конечной скоростью, даже сам автор этой теории полагал, что электромагнитные волны распространяются в среде, подобно тому, как акустические волны распространяются в воздухе, а морские — в воде. В первой половине XIX столетия ученые даже тщательно проработали теоретическую модель эфира и механику распространения света, включая всевозможные рычаги и оси, якобы способствующие распространению колебательных световых волн в эфире.

В 1887 году два американских физика — Альберт Майкельсон и Генри Морли — решили совместно провести эксперимент, призванный раз и навсегда доказать скептикам, что *светоносный эфир* реально существует, наполняет Вселенную и служит средой, в которой распространяются свет и прочие электромагнитные волны. Майкельсон обладал непререкаемым авторитетом как конструктор оптических приборов, а Морли славился как неутомимый и непогрешимый физик-экспериментатор. Придуманый ими опыт проще описать, чем провести практически.

Майкельсон и Морли использовали *интерферометр* (рис. 1) — оптический измерительный прибор, в котором луч света расщепляется надвое полупрозрачным зеркалом (стеклянная пластина посеребрена с одной стороны ровно настолько, чтобы частично пропускать поступающие на нее световые лучи, а частично отражать их; аналогичная технология сегодня используется в зеркальных фотоаппаратах). В итоге луч расщеп-

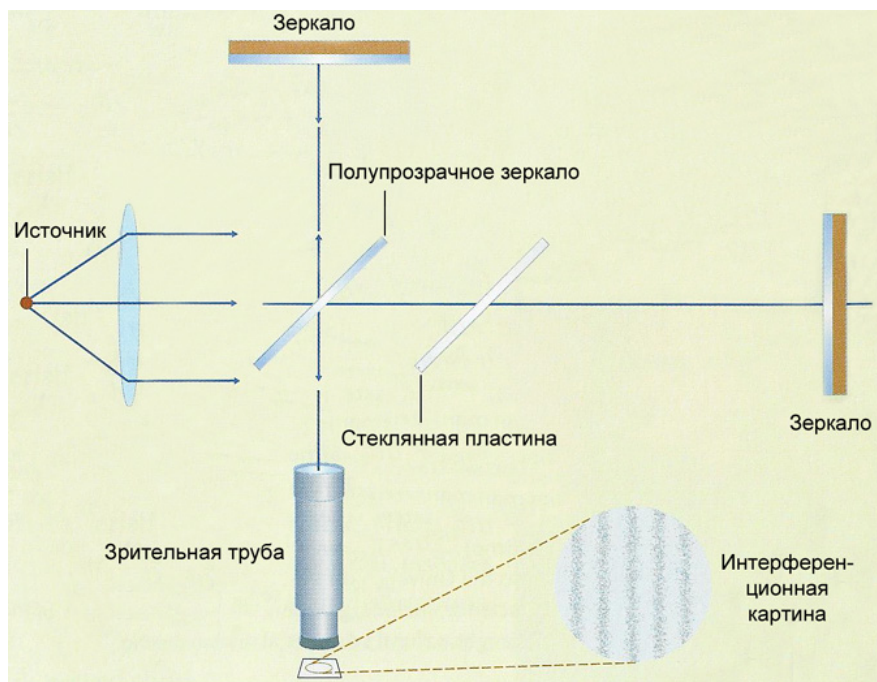


Рис. 1. Схема интерферометра Майкельсона

ляется и два получившихся *когерентных* луча расходятся под прямым углом друг к другу, после чего отражаются от двух равноудаленных от полупрозрачного зеркала зеркал-отражателей и возвращаются на полупрозрачное зеркало, результирующий пучок света от которого позволяет наблюдать интерференционную картину и выявлять малейшую *десинхронизацию* двух лучей.

Опыт Майкельсона–Морли был принципиально направлен на то, чтобы подтвердить (или опровергнуть) существование мирового эфира посредством выявления «эфирного ветра» (или факта его отсутствия). Действительно, двигаясь по орбите вокруг Солнца, Земля совершает движение относительно гипотетического эфира полгода в одном направлении, а следующие полгода в другом (рис. 2). Следовательно, полгода «эфирный ветер» должен обдувать Землю и, как следствие, смещать показания интерферометра в одну сторону, полгода — в другую. Итак, наблюдая в течение года за своей установкой, Майкельсон и Морли не обнаружили никаких смещений в интерференционной картине: полный эфирный

штиль! (Современные эксперименты подобного рода, проведенные с максимальной возможной точностью, включая эксперименты с лазерными интерферометрами, дали аналогичные результаты). Итак: эфирного ветра, а, стало быть, и эфира не существует.

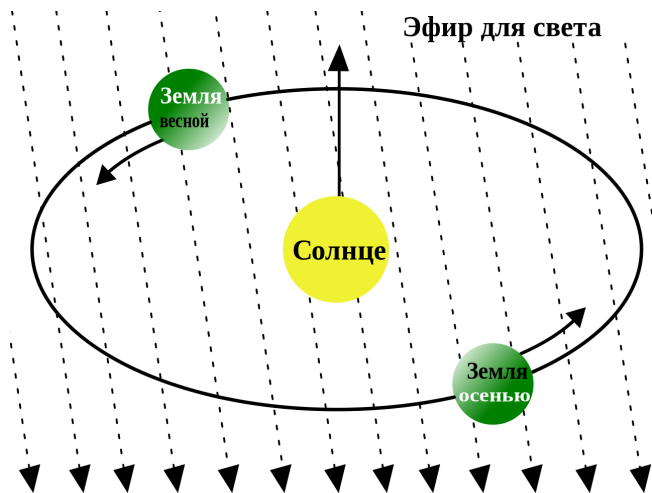


Рис. 2. Идея смещения света эфирным ветром

В отсутствие эфирного ветра и эфира, как такового, стал очевиден неразрешимый конфликт между классической механикой Ньютона (подразумевающей некую абсолютную систему отсчета) и уравнениями Максвелла (согласно которым скорость света имеет предельное значение, не зависящее от выбора системы отсчета), что и привело в итоге к появлению теории относительности. Опыт Майкельсона–Морли окончательно показал, что «абсолютной системы отсчета» в природе не существует.

Двадцатипятилетний Альберт Эйнштейн высказывал совсем новый, иной взгляд на природу пространства и времени, который шел в разрез с тогдашними представлениями, и в особенности грубо нарушал принцип относительности Галилея. Согласно Эйнштейну, опыт Майкельсона не дал положительных результатов по той причине, что пространство и время имеют такие свойства, что скорость света есть абсолютная величина. То есть, в какой бы системе отсчета не находился наблюдатель, скорость света относительно него всегда одна 300 000 км/сек. Из этого следовала невозможность применения сложения скоростей по отношению к свету: с какой бы скоростью не двигался источник света, скорость света не будет меняться (складываться или вычитаться).

Ученые античности в своем большинстве полагали, что свет движется с бесконечной скоростью, и первая оценка скорости света была получена аж в 1676 году. Датский астроном Олаф Рёмер наблюдал за Юпитером и его спутниками (рис. 3). В момент, когда Земля и Юпитер оказались с противоположных сторон Солнца, затмение спутника Юпитера Ио запаздывало на 22 минуты, по сравнению с рассчитанным временем. Единственное решение, которое нашел Олаф Рёмер — скорость света предельна. По этой причине информация о наблюдаемом событии запаздывает на 22 минуты, так как на прохождение расстояния от спутника Ио до телескопа астронома требуется некоторое время. Согласно подсчетам Рёмера скорость света составила 220 000 км/с.

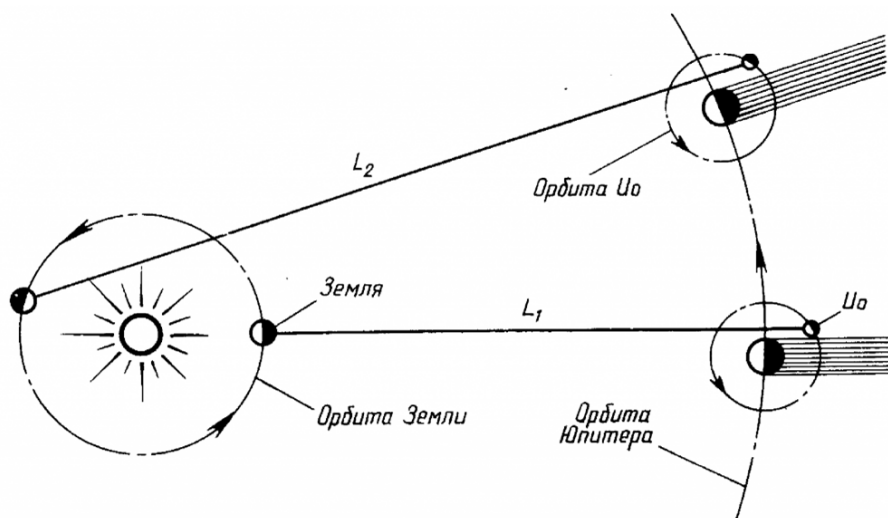


Рис. 3. Схема наблюдения спутника Юпитера Ио

В 1727 году английский астроном Джеймс Брэдли открыл явление абберации света. Суть данного явления состоит в том, что при движении Земли вокруг Солнца, а также во время собственного вращения Земли наблюдается смещение звезд в ночном небе. Так как наблюдатель землянин и сама Земля постоянно меняют свое направление движения относительно наблюдаемой звезды, свет, излучаемый звездой, проходит различное расстояние и падает под разным углом к наблюдателю с течением времени (рис. 4). Ограниченность скорости света приводит к тому, что звезды на небосводе описывают эллипс в течение года. Данный эксперимент позволил Джеймсу Брэдли оценить скорость света — 308 000 км/с.

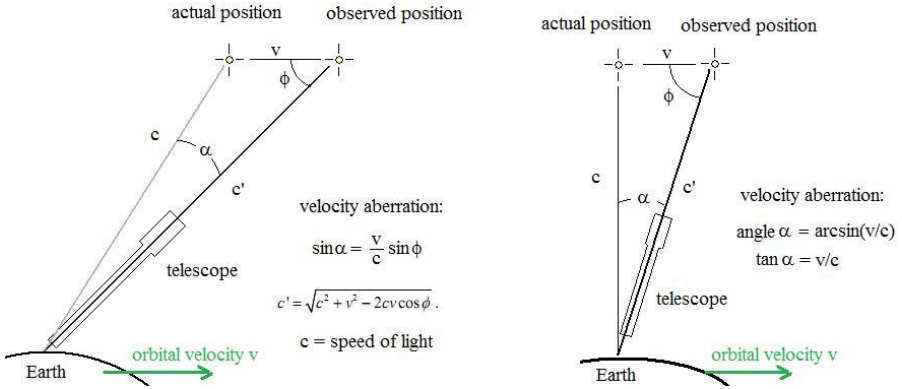


Рис. 4. Схема движения света от звезд к Земле

В 1849 году французским физиком Луи Физо был поставлен лабораторный опыт по измерению скорости света. Физик установил зеркало в Париже на расстоянии 8633 метров от источника, однако согласно расчетам Рёмера свет пройдет данное расстояние за стотысячные доли секунды. Подобная точность часов тогда была недостижима. Тогда Физо использовал зубчатое колесо, которое вращалось на пути от источника к зеркалу и от зеркала к наблюдателю, зубцы которого периодически закрывали свет. В случае, когда световой луч от источника к зеркалу проходил между зубцами, а на обратном пути попадал в зубец, физик увеличивал скорость вращения колеса вдвое (рис. 5). С увеличением скорости вращения колеса свет практически перестал пропадать, пока скорость вращения не дошла до 12,67 оборотов в секунду. В этот момент свет снова исчез. Подобное наблюдение означало, что свет постоянно «натякался» на зубцы и не успевал «проскочить» между ними. Зная скорость вращения колеса, количество зубцов и удвоенное расстояние от источника к зеркалу, Физо высчитал скорость света, которая оказалась равной 315 000 км/сек.

Спустя год другой французский физик Леон Фуко провел похожий эксперимент, в котором вместо зубчатого колеса использовал вращающееся зеркало. Полученное ним значение скорости света в воздухе равнялось 298 000 км/с. Спустя столетие метод Физо был усовершенствован настолько, что аналогичный эксперимент, поставленный в 1950 году Э. Бергштрандом дал значение скорости равное 299 793,1 км/с. Данное

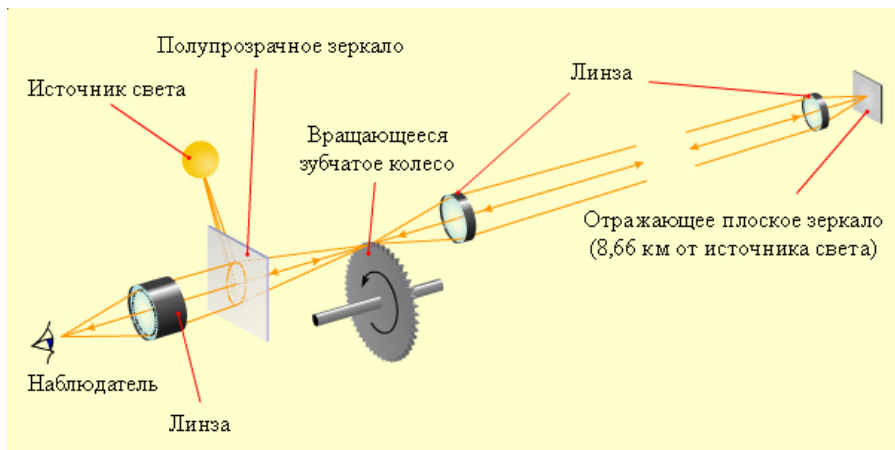


Рис. 5. Схема опыта Луи Физо

число всего на 1 км/с расходится с нынешним значением скорости света.

С возникновением лазеров и повышением точности измерительных приборов удалось снизить погрешность измерения вплоть до 1 м/с. Так в 1972 году американские ученые использовали лазер для своих опытов. Измерив частоту и длину волны лазерного луча, им удалось получить значение — 299 792 458 м/с. Примечательно, что дальнейшее увеличение точности измерения скорости света в вакууме было нереализуемо в не в силу технического несовершенства инструментов, а из-за погрешности самого эталона метра. По этой причине в 1983 году XVII Генеральная конференция по мерам и весам определила метр как расстояние, которое преодолевает свет в вакууме за время, равное $1/299\,792\,458$ секунды.

В любой прозрачной среде свет распространяется медленнее, чем в вакууме. Его скорость v зависит от показателя преломления среды n : $v = c/n$. Показатель преломления воздуха — 1,0003, воды — 1,33, различных сортов стекла — от 1,5 до 1,8. Одно из самых больших значений показателя преломления среди прозрачных веществ имеет алмаз — 2,42. Таким образом, скорость света в обычных веществах уменьшится не более чем в 2,5 раза.

В начале 1999 года группа физиков из Роуландовского института научных исследований при Гарвардском университете (штат Массачусетс, США) и из Стэнфордского университета (штат Калифорния) исследовала макроскопический квантовый эффект — так называемую самоиндуцированную прозрачность, пропуская лазерные импульсы через непрозрач-

ную в обычных условиях среду. Этой средой были атомы натрия, находящиеся в особом состоянии, называемом бозе-эйнштейновским конденсатом. При облучении лазерным импульсом он приобретает оптические свойства, которые уменьшают групповую скорость импульса в 20 миллионов раз по сравнению со скоростью в вакууме. Экспериментаторам удалось довести скорость света до 17 м/с!

Самоиндуцированная прозрачность — это один из эффектов нелинейной оптики — оптики мощных световых полей. Он заключается в том, что очень короткий и мощный световой импульс проходит без ослабления через среду, которая поглощает непрерывное излучение или длинные импульсы: непрозрачная среда становится для него прозрачной. Самоиндуцированная прозрачность наблюдается в разреженных газах при длительности импульса порядка 10^{-7} – 10^{-8} с и в конденсированных средах — менее 10^{-11} с. При этом возникает запаздывание импульса — его групповая скорость сильно уменьшается. Впервые этот эффект был продемонстрирован Мак-Коллом и Ханом в 1967 году на рубине при температуре 4 К. В 1970 году в парах рублидия были получены задержки, соответствующие скоростям импульса, на три порядка (в 1000 раз) меньшим скорости света в вакууме.

Уникальный эксперимент 1999 года осуществили Лен Вестергард Хэу, Захари Даттон, Сайрус Берузи (Роуландовский институт) и Стив Харрис (Стэнфордский университет). Они охладили плотное, удерживаемое магнитным полем облако атомов натрия до перехода их в основное состояние — на уровень с наименьшей энергией. При этом выделяли только те атомы, у которых магнитный дипольный момент был направлен противоположно направлению магнитного поля. Затем исследователи охладили облако до температуры менее 435 нК (нанокельвинов, т. е. 0,000000435 К, почти до абсолютного нуля).

После этого конденсат осветили «связующим пучком» линейно поляризованного лазерного света с частотой, соответствующей энергии его слабого возбуждения. Атомы перешли на более высокий энергетический уровень и перестали поглощать свет. В результате конденсат стал прозрачным для идущего следом лазерного излучения. И вот здесь появились очень странные и необычные эффекты. Измерения показали, что при определенных условиях импульс, проходящий через бозе-эйнштейновский конденсат, испытывает задержку, соответствующую замедлению света более чем на семь порядков — в 20 миллионов раз. Скорость светового импульса замедлилась до 17 м/с, а его длина уменьшилась в несколько раз — до 43 микрометров. Руководитель эксперимента Лене Вестергаард Хау назвала это достижение результатом на грани возможного, но вскоре пошла еще дальше. В 2001 году ее группа на короткое время сначала полно-

стью заморозила свет внутри такого же конденсата, а потом высвободила его для дальнейшего движения. Задержка составила лишь одну миллисекунду, но спустя восемь лет гарвардские физики смогли задержать свет дольше, чем на секунду.

Литература

1. Экспериментальные основания теории относительности // С. И. Вавилов. Собрание сочинений. Т. 4. — М.: Изд-во АН СССР, 1956.
2. Ландсберг Г. С. Оптика. — М.: Физматлит, 2003. — С. 384—389. — 848 с.
3. Замедленный свет // А. Голубев. «Наука и жизнь», №2, 2000.
4. Медленный свет // «Популярная механика», №12, 2012.
5. Сацункевич И. С. Экспериментальные корни специальной теории относительности. — 2-е изд. — М.: УРСС, 2003. — С. 128—130. — 176 с.