

Л. Купер

Физика для всех

Том 2. Современная физика

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
Л11

Л. Купер

Л11 Физика для всех: Том 2. Современная физика / Л. Купер – М.: Книга по Требованию, 2024. – 391 с.

ISBN 978-5-458-34313-8

Книга одного из видных американских физиков, лауреата Нобелевской премии Леона Купера содержит популярное изложение всей физики: от механики Галилея — Ньютона до квантовой механики и теории элементарных частиц. Автор не ограничивается простым рассмотрением тех или иных разделов физики, а анализирует основы физических явлений, выясняет связь между ними. Л. Купер блестяще владеет пером популяризатора, так что даже сложные вещи он преподносит просто, живо и увлекательно. В том 1, вышедший в свет в 1973 г., вошли «классические» разделы физики: механика, оптика, электричество, молекулярная физика и термодинамика, излагаемые с позиций современной науки. Настоящий, том 2 охватывает следующие вопросы: теорию относительности, элементы квантовой механики, строение атома и атомного ядра, физику элементарных частиц и другие проблемы физики последних лет.

ISBN 978-5-458-34313-8

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

АБСОЛЮТНОЕ ДВИЖЕНИЕ, АБСОЛЮТНЫЙ ПОКОЙ НЕПОДВИЖНЫЙ ЦЕНТР ВСЕЛЕННОЙ

Лукреций писал:

Всю, самое по себе, составляют природу две вещи:
Это, во-первых, тела, во-вторых же, пустое пространство,
Где пребывают они и где двигаться могут различно [1].

Есть ли граница у этого пустого пространства?

Кроме того, коль признать, что пространство
Вселенной конечно,
То если б кто-нибудь вдруг, разбежавшись
в стремительном беге,
Крайних пределов достиг и оттуда, напрягши все силы,
Бросил с размаху копье, то — как ты считаешь? —
оно бы
Вдаль полетело, стремясь неуклонно к намеченной цели,
Или же что-нибудь там на пути ему помешало?
То иль другое признать придется тебе неизбежно,
Но ни одно не дает тебе выхода, и согласиться
Должен ты, что без конца распростерто пространство
Вселенной [2].

Позднее Джордано Бруно не раз повторял, пока его не «утихомирили» на костре: «Пусть эта поверхность будет какой-угодно; но я всегда спрашиваю: что находится за ней?» ¹⁾ [4]. Этот аргумент легко понять, и его невозможно опровергнуть. Если пространство ограничено, то спрашивается, что же находится за его пределами? ²⁾

Бесконечно пространство или нет; является ли оно просто соотношением между материальными телами или существует независимо от них само по себе; является ли пространство вмещилищем материи, которое можно наблюдать и в отсутствие материальных тел; одина-

¹⁾ Он также писал, выдвигая некоторые пророческие мысли:

Впредь я уверенно расправляю крылья в пространстве,
Я не боюсь ни хрустальной, ни стеклянной преграды,
Я разрезаю небеса и устремляюсь в бесконечность.
Я подымаюсь от своего земного шара к другим мирам
И проникаю все глубже сквозь вечное пространство,
И те области его, которые видны другим издалика,
Я оставляю далеко позади [3].

²⁾ Предположим, однако, что пространство подобно поверхности сферы. Брошенное копье будет всегда лететь к цели; ничто не встанет на его пути, хотя Вселенная и не будет бесконечной.

ково ли пространство от точки к точке или же в нем существуют выделенные направления; является ли оно нейтральным или оно управляет телами, находящимися в нем; известны ли нам его свойства интуитивно, без внешнего воздействия на наш мозг, или эти свойства получены нами из опыта, — вот те вопросы, которые в то или иное время ставились относительно сущности, именуемой «пространством».

Пространство Галилея и Ньютона является евклидовым бесконечным пространством, однородным (его свойства не меняются от точки к точке), изотропным (одинаковым во всех направлениях), частично заполненным, частично пустым; в нем нет выделенных точек и направлений; оно являетсяместилищем, пустотой¹⁾, где находится материя.

«Абсолютное пространство,— писал Ньютон,— по самой своей сущности безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным» [5]. Именно такой взгляд на абсолютное пространство естественно приводит к первому закону движения. В отсутствие сил тело, движущееся в пустоте, в которой нет ни центра, ни выделенного направления, перемещается с постоянной скоростью по прямой линии. Почему, собственно, оно должно двигаться иначе? Этот вопрос, однако, таит в себе предпосылки и рождения и гибели идеи абсолютного пространства. Ибо можно спросить: относительно чего происходит равномерное движение тела? Тело, движущееся равномерно относительно Солнца, перемещается неравномерно относительно Земли. Предположение об абсолютном пространстве дает возможность найти удобную площадку для наблюдения всех явлений: ведь гораздо спокойнее оставаться при мысли, что абсолютное пространство существует независимо от нас.

Ньютон писал:

«Однако совершенно невозможно ни видеть, ни как-нибудь иначе различить при помощи наших органов чувств отдельные части этого пространства одну от другой, и вместо них приходится обращаться к измерениям, доступным чувствам. По положениям и расстояниям предметов от какого-либо тела, принимаемого за неподвижное, определяем места вообще, затем и о всех движениях судим по отношению к этим местам, рассматривая тела лишь как переносящиеся по ним. Таким образом вместо абсолютных мест и движений пользуются относительными; в делах житейских это не представляет неудобства» [6].

¹⁾ На первый взгляд представление о пространстве как о пустоте, в которой находится материя, выглядит сходным с нашими представлениями. Однако современный вакуум не является столь абсолютным, как вакуум, отвергнутый в древности. Вакуум древности был не только пустым, но в нем не могли распространяться никакие возмущения, кроме как движения реальных частиц (ибо как могло распространяться возмущение через ничто?). Поэтому открытие Посидония, что движение Луны связано с земными приливами, было расценено как опровержение идеи пустоты.

Здесь, однако, имеется некая неопределенность, которую признавал Ньютон и которая стала впоследствии источником одной из увлекательнейших проблем в истории физики. Представим, что первый закон движения выполняется с точки зрения наблюдателя, находящегося на какой-то площадке. Если на тело не действуют силы, то это тело, наблюдаемое с данной площадки, будет равномерно перемещаться по прямой линии с постоянной скоростью. Легко видеть, что если такая площадка существует, то существует и бесчисленное множество других площадок, обладающих аналогичными свойствами: этими свойствами обладают все площадки, движущиеся равномерно относительно первой. Для удобства рассуждений назовем первую площадку «неподвижным центром Вселенной». Это понятие, возможно, является фиктивным, однако оно столь наглядно, что мы не хотели бы отказываться от него преждевременно. «Центр системы мира,— писал Ньютон,— находится в покое. Это признается всеми, ибо одни принимают находящимися в этом центре и покоящимися Землю, другие — Солнце» [7]. Тем не менее для динамики Ньютона и для любых наблюдений в рамках ньютоновской системы абсолютно безразлично, находится ли центр Вселенной в покое или движется равномерно.

Представим, что этот центр мира покоится в центре абсолютного, постоянного и однородного пространства. С точки зрения наблюдателя, находящегося в центре мира, первый закон движения должен выполняться. Представим теперь другую площадку для наблюдения (позже мы назовем все эти площадки «системами отсчета»), которая равномерно перемещается относительно центра Вселенной. С помощью элементарных операций сложения или вычитания нетрудно доказать, что тело, движущееся равномерно относительно центра Вселенной, будет равномерно перемещаться и относительно второй площадки, но с другой скоростью. С точки зрения наблюдателя, находящегося на второй площадке, все законы динамики Ньютона остаются столь же справедливыми. Другими словами, абсолютно невозможно различить площадку, движущуюся равномерно относительно центра Вселенной, и сам центр. Следовательно, положение центра Вселенной необходимо постулировать. Его нельзя установить в рамках системы Ньютона. Если существует площадка, для которой законы Ньютона выполняются, то эти законы останутся справедливыми и для всех других площадок, которые движутся равномерно относительно первой ¹⁾.

Непосредственно ощутимое следствие первого закона движения состоит в том, что, находясь в движущемся закрытом помещении, мы не в состоянии понять, каково наше истинное, или абсолютное, движение. Как часто, путешествуя в поезде и видя в окно проходящий мимо другой состав, мы не могли понять, движемся ли мы сами или перемещается другой поезд. К сожалению, железнодорожные покрытия в нашей стране разрушаются столь быстро, что для следующего поколения подобные наблюдения уже не будут достаточно убедительными.

¹⁾ Все такие площадки называются *инерциальными системами отсчета*.

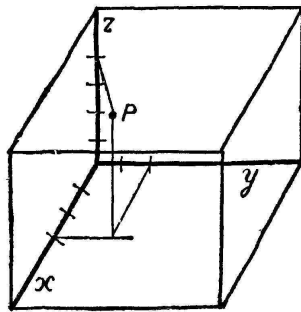
Чтобы движение было незаметным, не должно быть никаких качаний и вибраций, т. е. оно должно быть равномерным. Возможно, что подобные наблюдения удобнее проводить на борту корабля, плывущего по спокойному морю, находясь подальше от машинного отделения, или в самолете, летящем в спокойной атмосфере. Через окно мы увидим проходящие мимо облака или текущую морскую воду. Однако мы не в состоянии определить, кто движется — мы или облака. Земля перемещается по своей орбите со скоростью около 30 км/с; Солнце движется относительно центра нашей Галактики; Галактика сама в целом перемещается. Однако, если отвлечься от слабых эффектов, которые мы объясняем вращением, мы абсолютно не замечаем всех этих движений; мы могли бы даже поворачиваться относительно оси, проходящей через неподвижный центр Вселенной, и тоже не заметили бы этого.

СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА

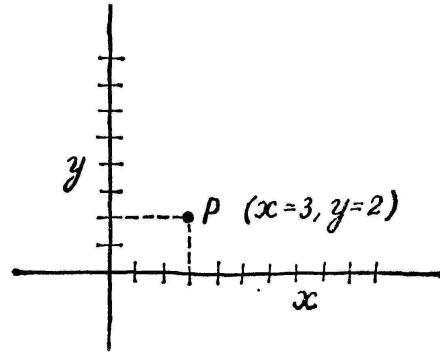
Введем теперь одно очень полезное представление. Допустим, что тело занимает определенное положение в пространстве. Каким образом можно зафиксировать это положение? Часто мы отмечаем положение тела, исходя из положения другого объекта; например, мы говорим: «две мили от Таймс-сквер» или «полмили от Эйфелевой башни, если идти в направлении Сень». Нас мало интересует абсолютное положение предмета. Положим, ваш друг сломал ногу в Альпах. В то время Земля находилась в определенной точке своей орбиты, Солнце — в какой-то точке своего пути через Галактику и т. д. Тем не менее врачи не интересовали все эти подробности. Его интересовал лишь тот факт, что перелом произошел в пяти сантиметрах выше лодыжки в кости, называемой большой берцовой. Одно из свойств нашего мира проявилось здесь в том, что ваш друг может перемещаться вместе со своим переломом, причем положение последнего относительно лодыжки и колена будет оставаться неизменным. В данном случае в качестве удобной системы отсчета может служить нога человека. Тогда перелом будет расположен в пяти сантиметрах над лодыжкой.

Остров Манхэттен в Нью-Йорке является очень удобной территорией для определения местоположения, поскольку большинство его улиц образует прямоугольную сетку. Даже незнакомый с городом человек легко найдет место, которое ему указали как «угол 6-й авеню и 42-й стрит». Конечно, это указывает не область в абсолютном пространстве, а некое место относительно других улиц и зданий Манхэттена, а следовательно, поскольку Земля жесткая, — относительно других мест на Земле. Наше пространство трехмерно; однако, поскольку наши действия обычно ограничены земной поверхностью, для нас указание «угол 6-й авеню и 42-й стрит» является вполне достаточным. При этом подразумевается, что встреча состоится на улице. Последнее, конечно, не обязательно. Она может состояться и на четвертом этаже здания, расположенного на углу 6-й авеню и 42-й стрит.

Эта исключительно простая идея ¹⁾ формально обобщается с помощью понятия системы координат. Три пространственных измерения представляются в виде взаимно перпендикулярных осей x , y и z (фиг. 1). Положение точки определяется тогда, например, так: «три единицы вдоль x , две — вдоль y и четыре — вдоль z » либо набором из трех



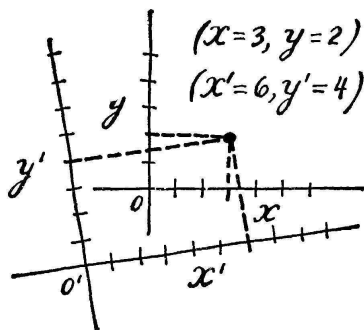
Фиг. 1.



Фиг. 2.

чисел, соответствующих значениям x , y и z [так, $(3, 2, 4)$ означает, что $x=3$, $y=2$, $z=4$]. Это все равно что сказать: «6-я авеню вдоль x , 42-я стрит вдоль y и 4-й этаж вдоль z ».

Часто изображают лишь два измерения, поскольку во многих задачах то, что можно показать для трех измерений, легко демонстрируется для двух. Типичная двумерная система координат изображена на фиг. 2. Две взаимно перпендикулярные оси характеризуют положение точек на плоскости. Точка, отмеченная на фиг. 2, имеет координаты $x=3$ и $y=2$. Если кто-нибудь скажет: «Встретимся в точке $x=3$ и $y=2$ », то такое утверждение будет иметь однозначный смысл, если второй человек знает, что оно относится к данной системе координат.



Фиг. 3.

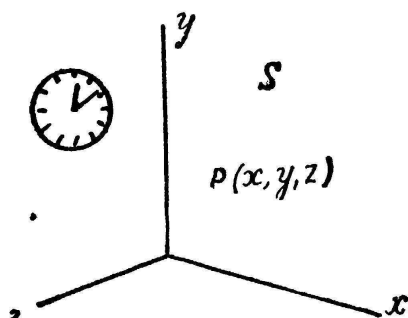
Далее, абсолютно очевидно, что та же самая точка будет иметь другие номера авеню и стрит, если рассматривать ее относительно улиц другого города или в другой

координатной системе (фиг. 3). В новой системе, оси которой (или авеню и стриты) обозначены через x' и y' , эта точка имеет координаты $x'=6$ и $y'=4$. Координаты физической точки P зависят от той сетки, относительно которой эта точка рассматривается.

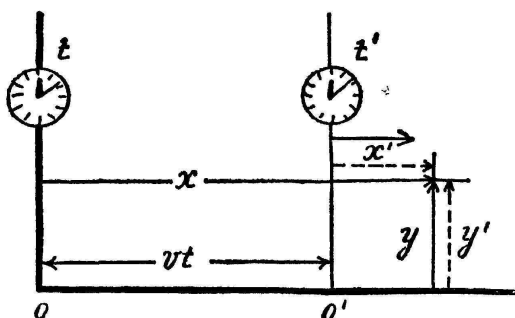
¹⁾ Впервые эта идея была выдвинута Декартом в его объединении алгебры и геометрии (аналитической геометрии). С каждой точкой трехмерного пространства ему удалось связать три числа (x, y, z) , а с каждой тройкой чисел — точку в пространстве. Тогда все геометрические объекты и теоремы представляются как алгебраические объекты и алгебраические соотношения (см. приложение).

Иногда желательно зафиксировать так называемое событие, или точку в пространстве и времени. Для этого надо иметь три пространственных и временное измерения (фиг. 4).

Вскоре нам потребуются координатные системы, равномерно движущиеся друг относительно друга (для удобства системы координат будут называться либо «неподвижными», либо «движущимися»). Представим, что в момент $t=0$ оси x и y двух координатных систем



Фиг. 4. Событие расположено в точке пространства $P(x, y, z)$ и в тот момент времени, когда оно происходит.



Фиг. 5.

совпадали, а движение происходит вдоль оси x (фиг. 5). Через временной интервал t начало «движущейся системы координат» O' будет находиться на расстоянии vt от начала «неподвижной системы» O . Таким образом, событие, происходящее в пространственно-временной точке P , имеет координаты (x, y, t) в «неподвижной системе отсчета» и координаты (x', y', t') в «движущейся системе», причем в соответствии с обычными правилами ¹⁾:

$$\begin{aligned} x' &= x - vt, \\ y' &= y, \\ t' &= t. \end{aligned}$$

СВЕТОНОСНЫЙ ЭФИР

В рамках ньютоновской системы невозможно ни установить абсолютный центр Вселенной, ни убедиться в том, что этот центр неподвижен. Идея абсолютного и неподвижного пространства, возможно, наглядна и удобна, однако такое пространство оказывается принципиально ненаблюдаемым. Между тем уравнения электричества, магнетизма и распространения света, полученные Максвеллом, не остаются неизменными при переходе от одной инерциальной системы к другой.

¹⁾ Эти правила называются преобразованиями Галилея для пространственных и временных координат точки при переходе из движущейся (штрихованные x', y', t') координатной системы к неподвижной (нештрихованные x, y, t).

Это означает по крайней мере то, что можно найти систему отсчета, которая покоится относительно «световой среды» (эфира), а следовательно, является выделенной.

Все материальные волны, т. е. волны, с помощью которых нам удалось создать абстрактное понятие волны, представляют собой возмущения, распространяющиеся в какой-нибудь среде. Человеку девятнадцатого века было трудно согласиться с мыслью, что свет, или электромагнитная волна, может быть некой абстрактной сущностью, распространяющейся через ничто. В статье, опубликованной в «Британской энциклопедии», Максвелл писал:

«Доказательства в пользу существования светоносного эфира получили прочную опору, когда были открыты новые явления света и других излучений; и свойства этой среды, выведенные на основании явлений света, оказались совершенно такими же, какие требуются для объяснения электромагнитных явлений... С какими бы трудностями в наших попытках выработать состоятельное представление о строении эфира ни приходилось нам сталкиваться, но несомненно, что межпланетное и межзвездное пространства не суть пространства пустые, но заняты материальной субстанцией, или телом, самым обширным и, нужно думать, самым однородным, какое только нам известно» [8].

Дебаты, касающиеся светоносного эфира и нашего к нему отношения, непрерывно ширились, и к концу девятнадцатого века они достигли, если можно так выразиться, лихорадочной стадии. Причина была не только в том, что чувствовалась (как чувствовал и Максвелл) потребность в какой-то среде, через которую распространяются электромагнитные и световые волны. Пока хотели понять, нужен ли эфир или же можно обойтись без него, и пока он служил в качестве наглядной модели или помогал механической интерпретации распространения света, ажиотаж не возникал. Интерес к эфиру чрезвычайно возрос к концу девятнадцатого века, когда стало ясно, что созданная Максвеллом электромагнитная теория, оказавшаяся поразительно успешной, свидетельствует как будто о том, что эфир можно наблюдать.

Суть многих опытов, проведенных во второй половине девятнадцатого века, сводилась к следующему. Согласно теории электромагнитных волн Максвелла, свет распространяется со скоростью $c = 3 \times 10^{10}$ см/с. Спрашивается, относительно чего свет движется с такой скоростью? Когда в обыденной жизни нам приходится определять скорость, мы относим ее к какой-нибудь системе отсчета. Скорости самолета относительно воздуха и земли различны. Если самолет летит по ветру, скорость которого 100 км/ч, а его собственная скорость относительно воздуха 500 км/ч, значит, относительно земли самолет летит со скоростью 600 км/ч. То же можно сказать и о скорости корабля, плывущего по течению, о скорости крысы, бегущей по ленте транспортера, и т. д. Относительно чего же тогда движется свет со скоростью c ?

Ответ на этот вопрос фактически не содержится ни в теории Максвелла, ни в теории Юнга и Френеля. По-видимому, если свет — волна и если волна распространяется в среде, то свет движется со скоростью s относительно среды. Следовательно, если электромагнитные волны действительно тождественны свету, то свет, или электромагнитные волны, распространяется со скоростью s относительно светоносного эфира.

Из этого рассуждения вытекают различные интересные следствия. Предположим, например, что мы сами перемещаемся относительно эфира. Спрашивается, повлияет ли наше движение относительно эфира (относительно которого свет распространяется со скоростью s) на наши наблюдения оптических явлений? К концу девятнадцатого столетия подобный вопрос задавался неоднократно. И всякий раз никакого влияния обнаружить не удавалось; создавалось впечатление, будто Земля неподвижна относительно эфира. Максвелл пророчески заметил:

«Весь вопрос о состоянии светоносной среды возле Земли и об ее отношении к обыкновенной материи еще далеко не решен опытом» [9].

29

ОПЫТ МАЙКЕЛЬСОНА—МОРЛИ

В 1887 г. Майкельсон предложил простой и прямой способ измерения абсолютного движения Земли относительно эфира. Согласно житейским представлениям, если скорость света через эфир равна s , то с точки зрения наблюдателя, движущегося относительно эфира, скорость света должна отличаться от s . Поскольку Земля движется относительно Солнца со скоростью, равной примерно 30 км/с, разумно предположить, что Земля по крайней мере в какой-то период года перемещается со скоростью порядка 30 км/с относительно эфира. (В противном случае пришлось бы считать, что Земля покоится, а вся остальная Вселенная вращается вокруг нее; не правда ли, неожиданное и забавное возвращение к точке зрения Птолемея?) Отвлекаясь от сложностей, связанных со всевозможными техническими деталями, можно сказать, что суть опыта Майкельсона состояла в измерении временного интервала, в течение которого световой импульс проходил заданное расстояние между двумя точками; в результате Майкельсон мог определить скорость светового импульса.

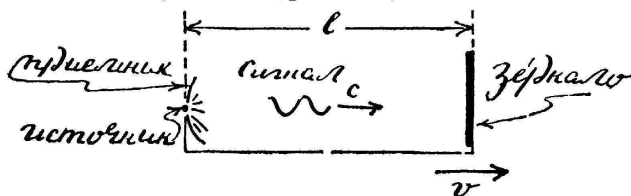
Кажется, что нет ничего проще этой задачи. Однако нетрудно убедиться в том, что осуществление подобного измерения почти невозможно. Как это часто бывает, легко понять, что следует делать, но

очень трудно это осуществить. Время, за которое свет распространяется от одной точки на поверхности Земли к другой, слишком мало, чтобы заметить отклонения, связанные с возможным движением Земли относительно эфира. Заслуга Майкельсона и присоединившегося к нему позже Морли состояла именно в том, что им удалось, проявив исключительную изобретательность и используя новейшие технические достижения, создать такую установку, с помощью которой можно было бы уверенно выделить столь небольшую по сравнению со скоростью света (300 000 км/с) величину, как 30 км/с.

Если бы скорость света относительно светонесущей среды складывалась со скоростью наблюдателя относительно этой среды в соответствии с общепринятыми тогда представлениями, то время, за которое световой импульс совершает замкнутый путь (от источника к отражателю и назад до источника), зависело бы от скорости прибора относительно светонесущей среды и от взаимного расположения векторов скорости прибора и светового импульса. Технический фокус, придуманный Майкельсоном для обнаружения малейших расхождений во временах распространения световых импульсов, вызванных движением прибора относительно эфира, основывался на использовании явления интерференции. Чтобы лучше разобраться в том, что было сделано Майкельсоном, вычислим, используя общепринятые тогда правила ¹⁾, время, за которое распространяющийся в среде световой импульс проходит от источника до отражателя и обратно. (При этом придется слегка повозиться с алгебраическими выкладками, но с этим надо примириться, так как без алгебры трудно будет разобраться в теории относительности.)

Параллельное распространение

Вычислим сначала время, за которое импульс ²⁾ распространяется от источника до отражателя и обратно в случае, когда направление движения прибора параллельно направлению распространения светового импульса (фиг. 7).



Фиг. 7. Источник излучает один сигнал, который отражается от зеркала, находящегося на расстоянии l , и возвращается в приемник.

Если прибор покоится относительно световой среды, то импульс, порожденный источником, достигает отражателя через время l/c и

¹⁾ Преобразования Галилея от движущейся к неподвижной системе отсчета.

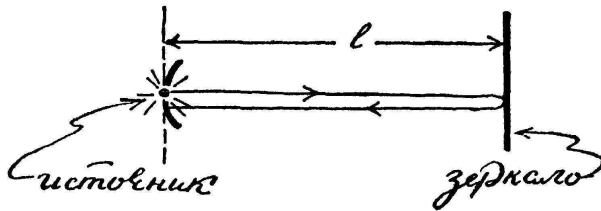
²⁾ Мы рассматриваем импульс для наглядности; можно было бы рассмотреть движение какой-либо части (например, отрезка в одну длину волны) периодической монохроматической волны, как показано на фиг. 6.



Фиг. 6.

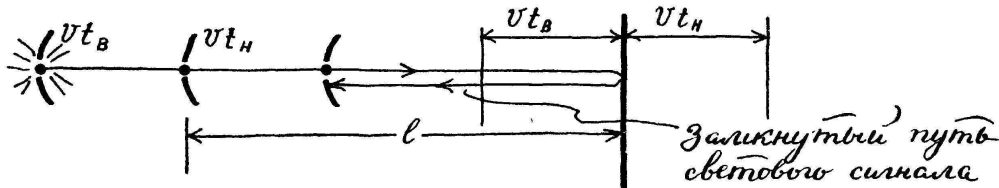
возвращается обратно к источнику через время $2l/c$, т. е. полное время, за которое импульс совершает замкнутый путь, просто равно полной длине пути, деленной на скорость импульса (фиг. 8).

Спрашивается, через какое время импульс, вышедший из источника, достигнет отражателя, если прибор движется относительно эфира со скоростью v ? Когда импульс пройдет расстояние l , отражатель за



Ф и г. 8. Прибор неподвижен относительно эфира. Время полного пути сигнала $T = 2l/c$.

это время отодвинется на некоторое расстояние. Следовательно, импульс должен двигаться дальше, чтобы в конце концов достигнуть отражателя. Если отражатель движется быстрее импульса (v больше c), последний никогда не догонит отражателя. Если же отражатель движется медленнее импульса, то импульс в конце концов достигнет отражателя, но за более продолжительное время.



Ф и г. 9. Прибор движется. Отражатель «убегает» от сигнала, $t_b = l/(c - v)$; приемник движется навстречу сигналу, $t_n = l/(c + v)$.

Обозначим через t_b время, за которое импульс распространяется вперед от источника до отражателя. За время t_b отражатель проходит расстояние vt_b , т. е., помимо расстояния l , световой импульс должен пройти еще путь vt_b , чтобы догнать отражателя. Следовательно, полный путь импульса равен $l + vt_b$ (фиг. 9). Поскольку импульс движется со скоростью c ,

$$ct_b = l + vt_b, \quad (29.1)$$

или

$$t_b = \frac{l}{c - v}. \quad (29.2)$$

Отразившись, импульс распространяется в обратную сторону. Теперь источник движется навстречу импульсу, тем самым сокращая ему путь. Обозначим через t_n время движения импульса назад; за это время приемник приблизится к импульсу на расстояние vt_n , так что полный обратный путь импульса окажется равным $l - vt_n$ (фиг. 9.). В результате получим

$$ct_n = l - vt_n, \quad (29.3)$$