Введение

В развитии научного знания об окружающем мире можно выделить несколько основных этапов:

1. Наблюдение видимых с Земли космических тел и формирование представлений о строении вселенной.
2. Становление классической механики, объясняющей законы движения Земных предметов.
3. Распространение законов классической механики на все тела во вселенной.
4. Попытки разрешения противоречий между наблюдаемыми явлениями и законами классической механики.
5. Создание теории относительности как расширения классической механики.
6. Попытки создания Теории Всего Сущего

1. Формирование представлений о строении вселенной.

В древности среди всех окружающих человека предметов земля занимала особое положение – она представлялась неподвижным центром вселенной вокруг которого вращались все остальные небесные тела. Существованию такой картины мира способствовали

1) повседневный опыт, который со всей очевидностью указывал на неподвижность Земли.
2) положение о главенствующей роли человечества в мире. Движущаяся Земля переставала быть неподвижным центром Вселенной, и как результат этого человечество оказывалось свергнутым со своего центрального места в сложившейся системе представлений.

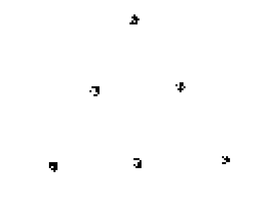


рис.1

Впервые предположение о движущейся Земле, было высказано в записях представителя пифагорейской школы Филолая (V век до нашей эры). Согласно Филолаю, сферическая Земля движется по круговой орбите, совершая один оборот в сутки, причем так, что к центру мироздания повернута всегда одна и та же сторона. При этом он этом исходил из учения о гармонии небесных сфер. Земля, как и окружающий ее небосвод должны быть гармоничными, совершенными телами. Наиболее совершенным телом считался шар, у которого отсутствовали углы и неровности, наиболее совершенным движением - круговое. Для пифагорейцев основой всего сущего были числа. Особенно они чтили число 10, сумму первых четырех натуральных чисел 1, 2, 3 и 4, которые графически представлялись с помощью точек магического треугольника (рис. 1) — символа, на котором приносилась клятва пифагорейцев. Система мира Филолая включала в себя 9 объектов: Землю с Луной, Солнце, и пять планет которые вращались вокруг центрального огня, являющегося центром мироздания и неподвижный небосвод. Число 9 никак не ассоциировалось с магическим треугольником из десяти точек. Поэтому Филолай предположил, что существует Противоземля, которая движется так, чтобы всегда находиться между Центральным Огнем и Землей, заслоняя ее от прямого воздействия огня (рис. 2).

Система Филолая возникла в то далекое время, когда наука только-только зарождалась. И как бы причудливо эта система мира ни выглядела, она, несомненно, заслуживает нашего внимания и уважения. Земля у Филолая движется довольно странным образом, *но она все же движется!*

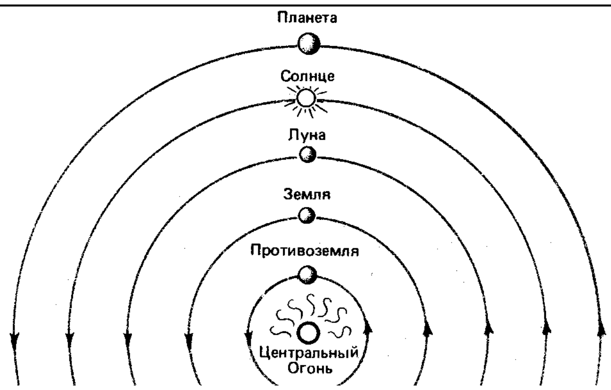


рис. 2

В III веке до нашей эры — более точная дата неизвестна — греческий математик Аристарх с острова Самое, родины самого Пифагора, выдвинул идею, что не Земля, а Солнце является неподвижным центром Вселенной. Земля же обращается вокруг Солнца, совершая один полный оборот за год, и при этом еще вращается вокруг своей оси, делая один оборот в сутки.

Пророческие идеи Аристарха не нашли отклика у его современников. Это было частично обусловлено следующими причинами. Во-первых, в IV веке до нашей эры древнегреческий философ Аристотель обратил внимание на то, что предметы, брошенные вертикально вверх, падают обратно на земную

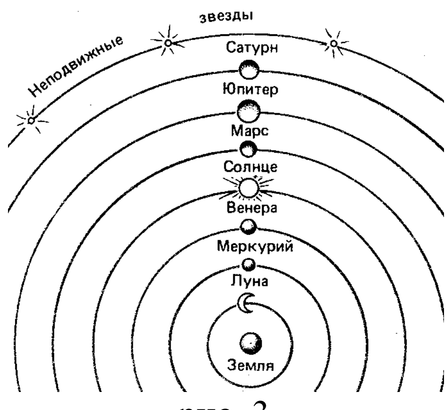


рис. 3

поверхность в том же самом месте, откуда их бросили. Если Земля движется, спрашивал он, то не должны были бы подброшенные вверх предметы за время своего полета вверх и вниз оказаться «позади» точки, из которой они были брошены? Во-вторых, во II веке до нашей эры александрийский астроном Птолемей показал, что если Земля ежесуточно совершает один оборот вокруг своей оси, то ее поверхность должна при таком вращении двигаться со скоростью порядка 2000 километров в час. Такие скорости, казалось бы, должны приводить к невероятной силе ураганным ветрам и пылевым бурям, которые бы топили корабли, уничтожали леса, крушили города и опустошали Землю.

Такого рода доводы весьма убедительны, а для людей, заранее настроенных верить в неподвижность Земли, они должны казаться и неопровержимыми.

Гипотезе о неподвижности и о круговых орбитах планет земли мешал то факт, что хотя все планеты перемещались в восточном направлении, в движении каждой из них был ряд стадий, на протяжении которых они смещались на фоне неподвижных звезд к западу. Такое движение было объяснено в сочинении Птолемея «Альмагест», где он объяснял эти движения тем, что планеты движутся по эпициклам, то есть по окружностям, центры которых сами движутся по другим окружностям. В результате этого было достигнуто хорошее согласие с наблюдениями, так что представление о неподвижной Земле получило серьезное подкрепление и система Птолемея (рис. 3) просуществовала многие века.

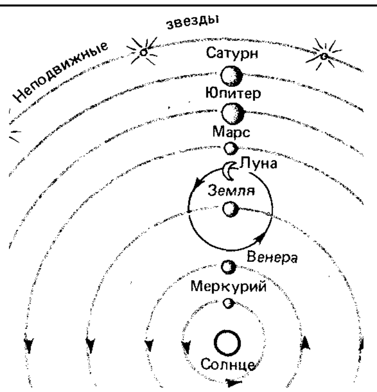


рис.4

Следующее существенное развитие астрономии произошло в XVI веке благодаря исследованиям пяти человек.

Начало новому этапу развития астрогомии положил Николай Коперник (1473, польский г. Торуни). Вопреки официальному мнению Римской церкви о покоящейся Земле в центре Вселенной. Коперник заявил и математически обосновал, что не Земля, а Солнце является неподвижным центром мироздания и что сферическая Земля, вращаясь вокруг своей оси и совершая один оборот в сутки, обращается вокруг Солнца с периодом в один год. Это в точности совпадает с идеями Аристарха.

Система Коперника (рис. 4) имеет явные преимущества перед системой мира Птолемея. Например, движение каждой из пяти планет включает в себя вращение, на которое требуется ровно один год. С точки зрения Птолемея, это всего лишь пятикратное совпадение, необъяснимая случайность. В системе же Коперника это стало пятикратным отражением факта годичного обращения Земли вокруг Солнца. Кроме того, система Коперника позволяла рассчитать относительные расстояния различных планет от Солнца.

И все же, в системе Коперника Земля лишилась своей центральной роли не полностью. Неподвижное Солнце располагалось не центре земной орбиты, а было несколько смещено, так что точкой, вокруг которой вращались планеты, было не Солнце, а пустой, бестелесный центр орбиты Земли. Более того, система мира Коперника, так же как и у Птолемея для описания орбит планет требовала введения эпициклов.

Вторым в пятерке был датский астроном Тихо Браге (1546—1601). Его заслуга состоит в сборе обширных данных о движении небесных тел. С помощью щедрой поддержки власть имущих Тихо Браге построил астрономическую обсерваторию (а затем и работал в ней), которая, хотя и не имела телескопа (их тогда просто не было) для своего времени самой точной из всех имеющихся.

Третьим был Иоганн Кеплер работавший вместе с Тихо и получивший от него результаты всех астрономических наблюдений. При вычислении движения Марса Кеплер предположил, что он движется по круговой орбите, центр которой несколько смещен по отношению к Солнцу. Из данных, полученных Тихо Браге, Кеплер попытался получить размер орбиты и положение ее центра. После более 70 попыток он нашел круговую орбиту, отвечающую наблюдательным данным с точностью порядка 8 минут дуги (это составляет примерно четверть ширины видимого с Земли диска Луны). Для того времени это была хорошая точность, но Кеплер знал что Браге ошибиться не мог. Подхватив идею английского физика и врача Уильяма Гильберта, Кеплер предположил, что движение планет происходит под действием силы притяжения Солнца, которое и является центром орбит планет. Руководствуясь этой гипотезой, Кеплер после продолжительных вычислений (только на Марс он потратил шесть лет), установил три закона движения планет, которые используют и в наши дни

1) планеты движутся по эллиптическим орбитам, в одном из фокусов которых находится Солнце;
2) прямая, проведенная от Солнца к заданной планете, за равные промежутки времени охватывает равные площади (рис. 5) (планета движется с постоянной секторальной скоростью);
3) если разделить квадрат времени полного оборота планеты вокруг солнца на куб среднего расстояния от планеты до солнца, то получившееся число будет одинаково для всех планет. T и a — время и среднее расстояние. Такую формулировку третий закон Кеплера будет иметь только в том случае, если массы рассматриваемых планет пренебрежимо малы по сравнению с массой Солнца M. Если это не так (как, например, в случае Юпитера), то третий закон Кеплера следует писать в виде $T_1^2(M+m_1)/T_2^2(M+m_2)=a_1^3/a_2^3$, где m—масса планеты.

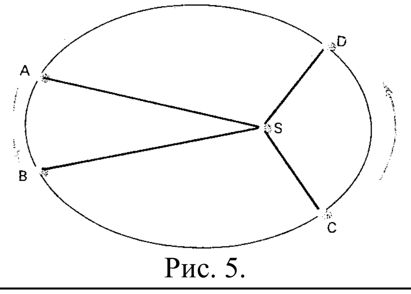


Рис. 5.

Согласно второму закону Кеплера, если площади фигур *SAB* и *SCD* равны, то планета проходит путь от А до В за то же время, что и путь из С в *D*. Таким образом, скорость планеты при движении по орбите не остается постоянной: чем она ближе к Солнцу, тем больше ее скорость.

Своими законами Кеплер совершил переворот в астрономии. Канули в Лету круги и эпициклы, нарушавшие гармонию небес Птолемея и Коперника. Их место заняли удивительно простые и геометрически совершенные тени окружностей.

Рассмотрим доказательство 2 закона. Будем считать солнце и планеты точечными массами, которые движутся под действием силы, направленной вдоль линии соединяющей, солнце и планеты. В этом случае справедлива теорема об изменении кинетического момента для материальной точки.

$$\overline{K} = \overline{r} \times m\overline{\upsilon}\,;\ \frac{d\overline{K}}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\overline{r} \times m\overline{\upsilon}\right) = \frac{d\overline{r}}{dt} \times m\overline{\upsilon} + \overline{r} \times \frac{dm\overline{\upsilon}}{dt}$$

Первое слагаемое в последней сумме равно нулю из-за коллинеарности векторов $\frac{d\overline{r}}{dt}$ и $m\overline{\upsilon}$. В рассматриваемой задаче второе слагаемое так же будет равно нулю, поскольку $\frac{dm\overline{\upsilon}}{dt} = \overline{F} \parallel \overline{r}$ по условию. 2 закон Ньютон сформулировал гораздо позже, но его физический смысл был известен ранее. Таким образом, получаем, что при движении планеты вокруг солнца $\frac{d\overline{K}}{dt} = 0 \Rightarrow \overline{K} = \mathrm{const}$.

С вектор К можно представить в виде $\overline{K} = \overline{r} \times m\frac{d\overline{r}}{dt}$, что имеет геометрическую интерпретацию площади параллелограмма, образованного векторами $\overline{r}$ и $m\frac{d\overline{r}}{dt}$ (рис 5а).

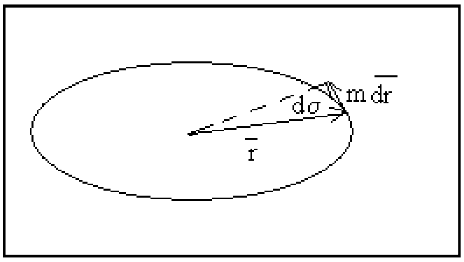


Рис. 5а

Рассматривая вместо дифференциалов малые конечные приращения выражение для $\overline{K}$ можно переписать в виде $\overline{K} \approx \frac{\overline{r} \times m\Delta\overline{r}}{\Delta t}$.

Поскольку произведение конечной и малой величины дает малую величину последнее выражение можно переписать $\overline{K} \sim \frac{2\Delta\sigma}{\Delta t}$, где $\Delta\sigma = \overline{r} \times m\Delta\overline{r}$ величина, пропорциональная изменению величины секторальной площади, ометаемой радиусом вектором. Тогда, в пределе при $\Delta t \to 0$ отношение $\frac{2\Delta\sigma}{\Delta t}$ даст величину, имеющую физический смысл скорость изменения секторальной площади или секторальной скорости. Поскольку $\overline{K} = \mathrm{const}$ и $\overline{K} \sim \frac{2\Delta\sigma}{\Delta t}$ то секторальная скорость точки будет величиной постоянной.

2. Становление законов классической механики

Четвертым в пятерке первооткрывателей был великий итальянец — Галилео Галилей. Родился он в Пизе в 1564 году. Галилей был на семь лет старше Кеплера, но пережил его более чем на десятилетие. Они никогда не встречались. Оба считали, что Земля движется, но, как ни странно, Галилей, оставаясь коперниканцем, так и не стал последователем Кеплера. Умер он в1642 году, в тот год когда родился Ньютон.

Результаты своих научных исследований Галлилей, уже в пожилом возрасте 1637 году, опубликовал в книге «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей наук». В частности Галилей аналитически доказал и затем экспериментально подтвердил, что легкие тела падают так же быстро как и тяжелые, если пренебречь влиянием воздуха.

Допустим, что тяжелый камень падает быстрее легкого. Тогда должно возникнуть следующее противоречие. Представим камень *А* состоящим из двух кусков *В* и *С,* имеющих одинаковые массы. Так как *В* и *С* легче, чем *А,* они должны падать с одинаковой скоростью, но медленнее, чем *А*. Тогда *В* и С сообща тоже должны падать медленнее, нежели *А*. Но *В* и С вместе составляют камень *А*. Следовательно, камень *А* должен падать медленнее самого себя, что невозможно.

Существует легенда, что он производил очень эффектные опыты, сбрасывая с наклонной Пизанской башни две сферы совершенно различной массы, чтобы люди сами могли бы убедиться, что сферы в процессе падения все время остаются рядом и падают на землю одновременно.

Необходимо отметить, что в этих рассуждениях впервые использовались идеализированные объекты для описания реальных предметов и процессов. Абстрагирование: отброшены все характеристики камня кроме массы, отброшены характеристики процесса падения (неважно куда, с какой скоростью и сколько времени камни падают), пренебрежение силой сопротивления воздуха и архимедовой силой). В данном случае реальные объекты и процесс сначала идеализируется, исследуются, а затем результаты исследования применяются снова к реальным объектам и процессам.

Поскольку свободно брошенные тела падают слишком быстро, Галилей для «ослабления» гравитационного влияния пускал шары по слегка наклоненным брускам, посередине которых был выдолблен продольный желоб. Галилей предположил, что остается постоянным темп изменения скорости со временем, и доказал что в этом случае путь, пройденный шаром от начальной точки покоя, пропорционален квадрату затраченного времени.

$$\upsilon \sim k*t;\ s \sim \upsilon*t \sim k*t^2.$$

При экспериментальной проверке своего предположения Галилея основная проблема заключалась в достаточно точном измерении промежутков времени. Тогда ведь не было современных секундомеров, а удары пульса — плохая им замена. Галилей для измерения одинаковых промежутков времени, использовал сосудом заполненным водой с узким горлышком в нижней части. В начале эксперимента отверстие в горлышке открывалось, а в конце закрывалось. Собирая всю воду, вытекшую из сосуда на каждом данном этапе, и тщательно взвешивая ее, Галилей измерял время, затраченное на этот этап. Разумеется, он измерял время не в стандартных единицах, но это, конечно же, не помешало ему проверить что за двойной промежуток времени шар пройдет в четыре раза больший путь и т. д.

Кроме того, он вывел теоретическую формулу, связывающую ускорение шара с углом наклона бруска. Причем когда она была проверена экспериментально при разных малых углах наклона, Галилей выдвинул предположение, что она справедлива и для свободно падающих тел. Он рассматривал падающие тела как некие аналоги шаров, катящихся по чему-то вертикальному. Хотя Галилей ошибался, игнорируя вращение, сопутствующее качению, тем не менее пришел к правильному выводу о том, что свободные тела, подброшенные вверх, должны падать вблизи поверхности Земли с постоянным ускорением, одинаковым для всех этих тел вне зависимости от их массы и материала, из которого они изготовлены (если пренебречь сопротивлением воздуха и некоторыми другими факторами).

Для оценки погрешности в расчетах Галилея рассмотрим задачу о цилиндре, скатывающемуся по наклонной плоскости без проскальзывания. Введем систему координат, где ось X направлена в сторону движения цилиндра, а ось Z – вдоль оси цилиндра. Движущийся цилиндр совершает плоскопараллельное движение, которое можно представить как поступательное движение полюса и вращательное движение тела вокруг полюса. Принимая за полюс точку на оси цилиндра, получим следующие уравнения, описывающие его движение (рис. 5б):

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \sum F_{ix} = -F_{тр} + mg \cdot \sin\alpha, \\ J\ddot{\varphi} &= \sum M_{iz} = F_{тр} \cdot R, \end{aligned} \qquad (1)$$

где J - осевой момент инерции.

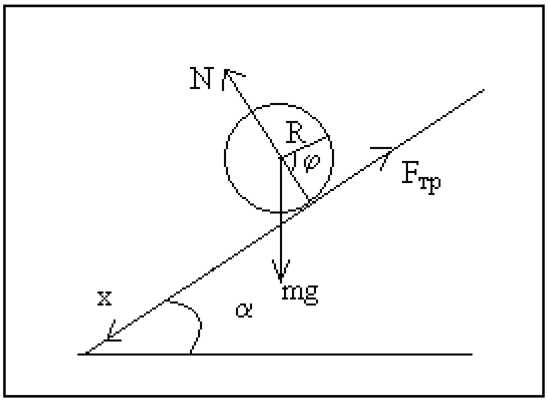


Рис. 5б

Условие отсутствие скольжения математически представляет собой пропорциональность перемещения центра цилиндра и изменения угла его поворота:

$$x = R \cdot \varphi$$

Выразим из второго уравнения системы (1) $F_{тр}$ и подставим его в первое уравнение, с учетом того, что $\ddot{\varphi} = \frac{\ddot{x}}{R}$, тогда получим

$$\ddot{x} = -\frac{J\ddot{x}}{R^2} + mg \cdot \sin\alpha$$

или

$$\ddot{x} = \frac{mg \cdot \sin\alpha}{\frac{J}{R^2} + 1}.$$

С учетом того, что для цилиндра J можно представить в виде $J = m\rho^2$, где ρ - радиус инерции, $\rho = R/\sqrt{2}$ окончательно получаем:

$$\ddot{x} = \frac{mg \cdot \sin\alpha}{\sqrt{2} + 1}.$$

Случай $\rho = 0$ соответствует скольжению цилиндра без вращения. При $\alpha = \pi/2$, получаем, что отношение ускорений падающего тела и катящегося по вертикальной стенке будет равно $\sqrt{2} + 1$. (При ответе на экзамене провести более подробный вывод формул)

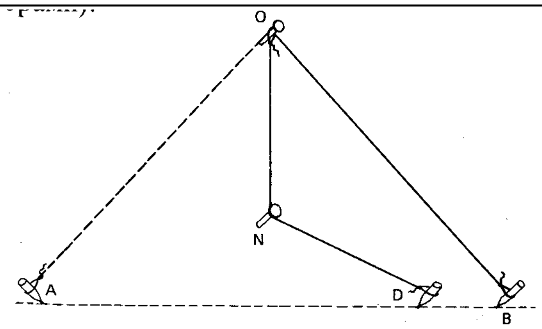


рис.6

Галилей доказал так же, что скорость катящегося по наклонной плоскости шара, стартовавшего из состояния покоя, зависит исключительно от вертикальной составляющей пройденного пути. Для доказательства Галилей провел следующий опыт (рис. 6). Он сделал маятник, подвешенный на тонкой нити к гвоздю, вбитому в стену в точке O.

Отпуская груз в точке A, Галилей обнаружил, что при качании маятника он всегда доходил до точки, находящейся на той же высоте, что и точка A, по какой бы траектории не шел (расстояния по горизонтали разные, по высоте одинаковые). Это могло служить экспериментальным основанием для вывода о том, что соответствующее явление будет иметь место и в случае катящихся шаров. По какому бы желобу ни катился шар, по прямому или по искривленному, он всегда будет возвращаться на ту же высоту, с которой был отпущен.

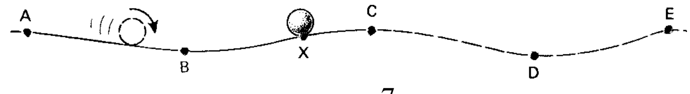


рис. 7

Галилей привел еще один чисто логический аргумент в поддержку этого вывода. Пренебрежем всеми силами сопротивления, включая сопротивление воздуха, и предположим, что шар (рис. 7), стартовавший из состояния покоя в точке A, после того как он скатился вниз вдоль AB и поднимется вдоль BC, приходит в точку C с отличной от нуля скоростью. Теперь позволим шару продолжать катиться вдоль все новых и новых копий кривой ABC, таких, как CDE. В конце каждого нового этапа движения скорость шара должна была бы нарастать, но это означало бы существование вечного двигателя, что Галилей верно считал невозможным. Таким образом, шар, стартовавший из состояния покоя в точке A, не мог бы иметь отличную от нуля скорость в момент достижения точки C (разумеется, если точки A и C находятся на одном уровне). Теперь предположим, что шар, стартовавший из состояния

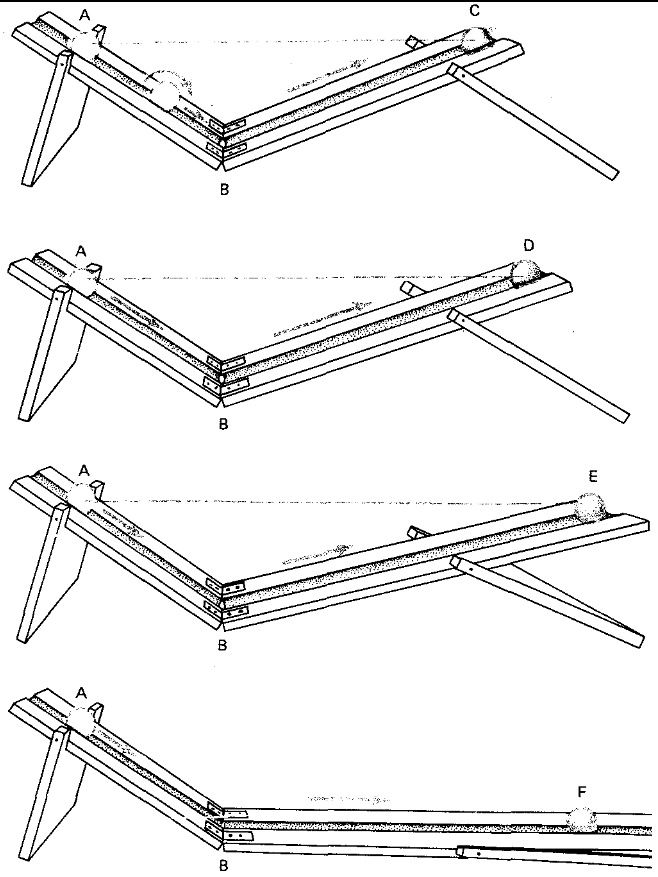


рис.8

покоя в точке A, не докатывается до точки *C* и достегает лишь точки *X.*

Как полагал Галилей, движение влево должно быть зеркальным отражением соответствующего движения вправо, и поэтому согласно вышеприведенному примеру шар, стартовавший из состояния покоя в точке *X,* не может в точке A иметь скорость, отличную от нуля. Но тогда шар, стартовавший из точки C (расположенный выше точки X), должен при своем движении приобрести столь большую скорость, что прибудет в точку A, не исчерпав ее полностью. A это, как было показано в предыдущем примере, неверно, и поэтому неверным было предположение, что шар, стартующий из состояния покоя в точке A, достигнет при своем движении только точку X. Следовательно, в отсутствие сопротивления воздуха и тому подобных тормозящих сил, шар, стартовавший из состояния покоя в точке A, достигнет именно точки C и в момент времени, когда его скорость будет равна нулю. Причем приведенное доказательство остается в силе как для искривленных, так и для прямолинейных желобов.

Он применил этот вывод (каждый раз пренебрегая трением и другими тормозящими воздействиями) к анализу ситуации, изображенной на рис. 8, где точки A, C, D, E и т. д. находятся на одной и той же высоте над точкой B.

В предельном случае, когда правый желоб становится горизонтальным, высота шара становится, следовательно, перестает изменяться его горизонтальная скорость.

В результате Галилей пришел к выводу о том, что естественное движение свободной частицы является равномерным и прямолинейным. К аналогичному выводу, исходя из совершенно других соображений, пришел французский философ Рене Декарт.

Это заключение изменило все основные представления в механике, опиравшиеся на повседневный опыт. Раннее опираясь на этот опыт, Аристотель и многие его последователи утверждали, что движущееся свободное тела, должно было бы прийти в состояние покоя.

Когда мы видим что-то движущееся равномерно (например, равномерно движущийся поезд.), то обычно задаемся вопросом: «А что за сила удерживает это тело в движении?» И такой вопрос кажется естественным и очевидным. Ну а как быть со стрелой, выпущенной из лука? Движение ее или любого другого снаряда в этом смысле озадачивает. Что заставляет двигаться стрелу, когда она покидает лук? Последователи Аристотеля давали весьма хитроумный ответ: начальный толчок тетивы продолжает передаваться стреле воздухом.

Если встать на позиции Галилея, то выяснится, что когда тело находится в состоянии равномерного и прямолинейного движения, то вовсе нет нужды выяснять, что удерживает его в движении, как нет смысла в объяснении или каком-то оправдании такого движения. Наоборот, объяснение требуется как раз тогда, когда тело замедляется, а затем и вовсе останавливается. В этом случае причиной отклонения движения тела от естественного равномерного и прямолинейного является некоторая сила, возможно, сила трения.

Правда подход, с помощью которого Галилей сделал свое открытие, ведет к выводам, прямо противоположным его убеждениям. Вспомним, что, согласно Галилею, при отсутствии сопротивления воздуха и сил трения свободный шар, катящийся по горизонтальному желобу, будет безостановочно двигаться с постоянной скоростью. Но «горизонтальный» означает «расположенный всюду на одной и той же высоте». А на сферической Земле линия, проведенная на постоянной высоте, не может быть прямой и иметь бесконечную длину — она должна опоясывать Землю, то есть она должна быть окружностью. Поэтому можно было бы сказать, что Галилей доказал следующее. Естественным движением свободной частицы является не равномерное и прямолинейное движение, а равномерное движение по окружности, концентрической со сферической поверхностью Земли. Галилей так и не узнал, какую шутку сыграла с ним судьба.

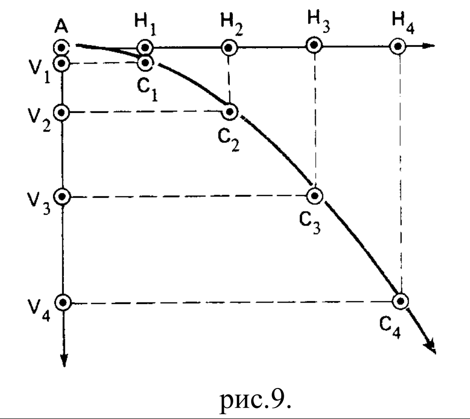


рис.9.

Помимо опытов с шарами, Галилей занимался приложением своих открытий к теории полета пушечных ядер, движение которых до этого никто не мог правильно объяснить. Даже образованные люди считали, что несущееся со свистом ядро продолжает свой полет только до тех пор, пока не будет исчерпана его скорость, а затем падает вертикально на земную поверхность. Галилей заявил, что полет ядра представляет собой комбинацию движений по горизонтали и вертикали, каждое из которых им было уже изучено (рис.9). Причем горизонтальное движение должно быть равномерным, поскольку в горизонтальном направлении на ядро не действуют никакие силы (υ=const, x~t), а вертикальное — происходить с направленным вниз постоянным ускорением(u=kt, $y\sim t^2$). В комбинации эти движения приводят к траектории, имеющей форму параболы.

x=x(t) ; y=y(t) – закон движения тела, y=y(x) – траектория тела.

Пятым в пятерке первооткрывателей был Исаак Ньютон, который родился в год смерти Галилея. Родился он 25 декабря 1642 года в местечке Вулсторп, близ английского города Грантэ-ма. Эта дата установлена совершенно точно, но тем не менее она требует пояснения. Однако это вызвано метаморфозами времени отнюдь не релятивистского характера. Дело в том, что протестантская Англия не очень-то торопилась сменить юлианский календарь на современный григорианский, а по григорианскому календарю, который уже тогда использовался в странах материковой Европы и даже в Шотландии, Ньютон родился не в 1642, то есть в год смерти Галилея, а 5 января 1643 года.

Как-то в письме к одному из коллег Ньютон сказал о себе словами старого афоризма: «Если я видел дальше, то лишь потому, что стоял на плечах гигантов». В письме шла речь о его работах по оптике, но эти слова следует понимать шире. Ньютон развил достижения Галилея и Кеплера, и даже превзошел их.

Занятия юного Ньютона в школе вряд ли можно считать успешными. Некоторое время он вообще был самым последним в классе. К счастью, один мальчик, который в то время был ровно на класс впереди Исаака Ньютона, довольно больно ударил его в живот. «К счастью» потому, что после победы, одержанной в последовавшей драке, Ньютон решил превзойти своего противника еще и интеллектуально. И он здорово в этом преуспел, став в выпускных классах первым учеником в школе.

В 1661 году Ньютон уже был в Кембридже. Но в 1665 году страшная чума обрушилась сначала на Лондон, а вскоре докатилась и до Кембриджа, что заставило Ньютона провести два зловещих года в тихом и безопасном Вулсторпе. Именно тогда Ньютон начал создавать исчисление бесконечно малых, уяснил природу цвета и, как он утверждал, открыл математический закон, позволяющий найти величину гравитационного взаимодействия между телами. В 1667 году Ньютон вернулся в Кембридж, а двумя годами позже его учитель Исаак Барроу, занимавший недавно созданную лукасовскую кафедру математики, сделал нечто из ряда вон выходящее. Отдавая должное ньютоновскому гению, он отказался от кафедры, чтобы на его место мог быть назначен двадцатишестилетний Ньютон.

Через много лет, в 1684 году, Кембридж посетил английский ученый Эдмунд Галлей, получивший широкую известность благодаря комете, носящей его имя. Он захотел узнать мнение Ньютона по поводу одного научного спора и очень быстро понял, что Ньютон продвинулся далеко вперед в понимании динамики и движения планет. И, несмотря на тягу Ньютона скрывать полученные результаты, Галлей все же убедил великого физика опубликовать свои исследования.

Отрешившись от всего, что происходило вокруг него, почти без сна и лишь изредка прикасаясь к еде, Ньютон начал работать с невероятной интенсивностью. Ему понадобилось всего 18 месяцев, чтобы завершить большую часть одной из самых выдающихся книг в истории науки: «Математические начала натуральной философии», которую сейчас обычно называют просто «Начала». Это сочинение было напечатано в 1687 году.

Когда книга была закончена, Ньютон выглядел совершенно измотанным и больным. В 1696 году, получив назначение на пост смотрителя монетного двора, он отказался от своего кембриджского затворничества и решил вести в Лондоне более светский образ жизни, присущий известному человеку. Три года спустя Ньютон стал уже начальником монетного двора и занимал этот пост всю оставшуюся жизнь. Умер Ньютон в 1727 году в возрасте 84 лет и похоронен в Вестминстерском аббатстве.

Предание гласит, что как-то раз, во времена эпидемии чумы 1665—1666 годов, молодой Ньютон, сидя в тиши своего садика в Вулсторпе вдруг обратил внимание на падающее яблоко и глубоко задумался: «Ведь влияние силы тяготения, увлекающее яблоко к земле, несомненно, простирается до высот, много больших, чем высота яблони. Значит, оно присутствует даже над вершинами высоких гор и, конечно же, там внезапно не исчезает. А что если оно достигает Луны? Тогда обращающуюся вокруг Земли Луну и падающее яблоко можно было бы считать одинаково находящимися в плену тяготения Земли. Да и Солнце могло бы держать «в узде» все свое планетное семейство с помощью своей силы притяжения, имеющей ту же природу».

Результаты своих научных открытий Ньютон опубликовал в труде «Математические начала натуральной философии» или просто «Начала»

В этой книге Ньютон, воспользовавшись важной подсказкой своего коллеги Роберта Гука, развил учение Галилея о полете пушечных ядер. Предположим для простоты, что сопротивлением воздуха можно пренебречь. Предположим также, что используемая пушка большой мощности, и стрельба ведется в горизонтальном направлении (рис. 10).

Чем больше начальная скорость ядра, тем дальше оно должно падать, с другой стороны, земная поверхность должна постоянно уходить из-под ядра. При очень больших начальных скоростях ядро, обогнув Землю, может вновь достичь точки выстрела на той же высоте и продолжить движение по той же траектории, несмотря на то, что оно все время с ускорением падает на сферическую Землю. Таким образом, на первый взгляд получается парадокс: с одной стороны ядро двигается на одной высоте и согласно Галилею с постоянной скоростью, с другой стороны ядро является свободно падающим телом и двигается с ускорением, направленным к центру земли.

На самом деле высказывания о том, что ядро падает на землю, и ядро находится на постоянной высоте, не противоречат друг другу. Как известно скорость имеет не только величину, но и направление. Например, у тела, движущегося по окружности с постоянной величиной скорости, непрерывно меняется ее направление. А раз скорость (ее направление) меняется со временем, то у тела, по определению, есть ускорение, причем в данном случае ускорение всегда направлено к центру окружности как предельное направление вектора dv при стремлении его длины к нулю.

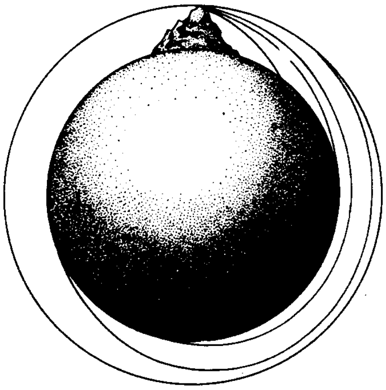


рис. 10.

Получим формулу для величины скорости и ускорения точки при ее движении по окружности с постоянной скоростью. Рассмотрим радиус вектор точки P, который в полярной системе координат характеризуется длиной и углом наклона φ относительно главной оси. при движении точки по окружности длина вектора постоянна и его можно представить как скалярную функцию угла φ: $r = r(\varphi)$. Для сохранения размерностей вместо угла φ сопоставляют длину дуги окружности для которой φ - центральный угол s=rφ. Полная производная по времени от радиуса – вектора точки P есть ее скорость $\upsilon = \frac{dr}{dt} = \frac{dr}{ds}\frac{ds}{dt} = r\frac{d\varphi}{dt} = \omega r$. Из рис. 11 видно, что при dt→0; dφ→0; dr→ds. Производная от центрального угла по времени называется угловой скоростью ω, которая характеризует быстроту вращения и измеряется рад/с или просто 1/с.

Рассмотрим вектор скорости υ и υ’. При dt→0 вектора можно считать исходящими из одной точки и dυ=υdφ (угол между υ и υ’ так же равен φ), тогда

$W_n = \frac{d\upsilon}{dt} = \upsilon\frac{d\varphi}{dt} = \upsilon\omega = r\omega^2 = \frac{\upsilon^2}{r}$. Индекс n означает, что данное ускорение направлено по радиусу к центру и является нормальной составляющей полного вектора ускорения.

Для того, чтобы тело в своем движении оставалось все время на одной высоте, необходимо, что бы центробежная сила уравновешивала силу тяжести:

$F_ц = m\omega^2 r = F_т = mg \rightarrow \omega = \sqrt{g/r}$ или $\upsilon = \sqrt{gr}$ это, так называемая первая космическая скорость.

Другим важным открытием Ньютона был закон изменения силы притяжения в зависимости от расстояния до земли. Ньютон показал, что сила тяготения спадает обратно пропорционально квадрату расстояния.

Рассмотрим планету, обращающуюся вокруг Солнца по круговой орбите. Массу солнца будем считать сосредоточенной в ее центре. Обозначим через R радиус ее орбиты, а через T - период, то есть время, необходимое для совершения полного оборота вокруг Солнца. Согласно 3 закону Кеплера

$$T^2 \sim R^3 \qquad (2)$$

Скорость планеты υ пропорциональна отношению радиуса орбиты к периоду, то есть

$$\upsilon = \omega R[м/с] \sim R / T . \qquad (3)$$

Период T связан с угловой скоростью формулой $\omega = 2\pi/T$.

Пусть период вращения равен 2с, то есть тело совершает один оборот за 2 секунды или вращается с частотой 2π радиан за 2 секунды или π радиан в секунду. Понятия частота вращения и угловая скорость являются синонимами, т.к. обозначают один и тот же процесс и имеют одинаковую размерность, то есть в данном случае $\omega = \pi$. Следовательно, $T = \omega/2\pi$ и при подстановке этого выражения в (3) получаем уже известную формулу $\upsilon \sim \omega R$

Как было доказано ранее, ускорение, с которым планета «падает» на Солнце, равно $a = \upsilon^2/R$. Ньютон утверждал, что ускорение пропорционально силе тяготения (II закон a=kF), с которой Солнце действует на планету. Обозначим эту силу через F. Тогда $F \sim \upsilon^2/R$ или, принимая во внимание (2), $F \sim R / T^2$.

Отсюда при учете (3) следует, что $F \sim 1/R^2$

Для проверки открытого закона Ньютон, зная ускорение, с которым падает яблоко, и, зная закон уменьшения силы тяготения с расстоянием, вычислил ускорение, с которым должна падать Луна, если ее на орбите удерживает притяжение Земли. Но Ньютон мог также найти это ускорение и непосредственно, исходя из известного расстояния от Земли до Луны и из того факта, что полный оборот вокруг Земли Луна совершает за один месяц. По словам Ньютона, эти два результата «весьма хорошо соответствуют друг другу» (эта фраза взята из воспоминаний, написанных им почти 50 лет спустя).

$$ma = k\frac{mM}{R^2} = mg\big|_{R=R_0} \Rightarrow k = g\frac{R_0^2}{M}$$

$$a = \frac{2\pi}{T^2} = g\frac{R_0^2}{M}\frac{M}{R^2}$$

Методика измерения расстояния от земли до луны. Радиус земной орбиты можно найти непосредственно. Зная расстояния АВ, АА’, А’В’, можно, приняв точку С за начало координат вычислить уравнение окружности проходящей через точки ВСВ’, и, соответственно, ее радиус. Однако, этот же радиус можно определить измеряя кривизну земной тени на луне. Зная угловую величину земного радиуса, можно вычислить расстояние от земли до луны.

Рис12

Кроме этого, в своем сочинении Ньютон сформулировал три закона движения, а затем на основании этих законов и на законе всемирного тяготения установил, что на Земле и во Вселенной царят одни и те же физические законы.

Первый закон движения, часто называемый законом инерции, гласит, что каждое тело сохраняет состояние либо покоя, либо равномерного и прямолинейного движения до тех пор, пока внешние силы не вынудят его изменить это состояние. Понятия «покой» и «равномерное движение» подразумевают наличие некоторых эталонов, относительно которых можно их определять. В реальном мире таких эталонов не существует, т.к. все тела, включая звезды и планеты, движутся по некоторым кривым. Для преодоления проблемы Ньютон искусственно ввел в рассмотрение универсальное абсолютное пространство, которое, по определению, всегда и всюду одинаково и неподвижно, и абсолютное время, которое «само по себе и по самой своей сущности, безотносительно к чему-либо внешнему, протекает равномерно и иначе называется длительностью». Абсолютное пространство позволяло, как минимум, рассуждать либо о состоянии покоя некоторого тела, либо о движении по отношению к этому пространству, причем в состоянии либо абсолютного покоя, либо абсолютного движения.

Абсолютное время позволяло отмерять равные промежутки времени и рассуждать о равномерности движения, за равные промежутки времени тело проходит равные расстояния.

Утверждение, что абсолютное время течет равномерно, — это тавтология. Ибо как еще можно было бы проверить равномерность течения абсолютного времени, если не по отношению ко все тому же абсолютному времени, и может ли оно в этом случае вообще течь как-то иначе?

С помощью абсолютного пространства и абсолютного времени Ньютон сумел показать, что в космосе и на земле действуют одни и те же физические законы. Теперь 1 закон Ньютона можно переформулировать. Этот закон утверждает, что в отсутствии силы частица будет постоянно находиться либо в состоянии абсолютного покоя по отношению к абсолютному пространству, либо в состоянии движения вдоль прямой, фиксированной в абсолютном пространстве. Причем двигаться частица будет со скоростью, которая остается постоянной по мере течения абсолютного времени.

Второй его закон говорит о влиянии силы на движение частицы. Его часто формулируют в виде одной фразы: «Сила равна массе, умноженной на ускорение»: F=ma. Из этого закона следует, что чем больше масса тела, на которое действует любая наперед заданная сила, тем меньше ускорение, вызываемое этой силой, и наоборот. Выражение ma можно рассматривать как силу инерции, а F – как внешнюю силу.

Наконец, третий закон Ньютона гласит, что сила, с которой одно тело действует на другое, равна по величине, но противоположна по направлению силе, с которой второе тело действует на первое.

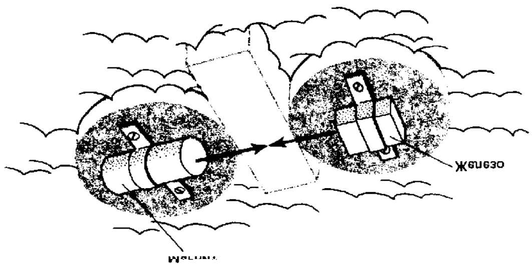


рис. 11.

Для доказательства этого закона Ньютон провел следующий опыт. Он расположил на поверхности воды три поплавка. На одном поплавке Ньютон размещал магнит, а на другом кусочек железа. Третий поплавок использовался в качестве перегородки между первыми двумя (рис. 11). Если сила, действующая со стороны магнита, мощнее, то вся система должна была бы перемещаться в его сторону; если же мощнее сила, действующая со стороны железа, то система должна была бы двигаться в сторону поплавка с куском железа. Поскольку система оставалась в покое по отношению к воде, Ньютон сделал вывод, что сила, с которой магнит притягивает железо, уравновешивается силой, с которой железо притягивает магнит.

Из законов движения Ньютон вывел принцип относительности «Законы движения тел, находящихся в данном пространстве, одинаковы вне зависимости от того, покоится это пространство или движется в одном направлении равномерно и прямолинейно, без каких бы то ни было движений по окружности». Слово «пространство» здесь относится не к абсолютному пространству, а к пространству внутри лаборатории.

Кроме того, Ньютон показал, что если сила тяготения меняется обратно пропорционально квадрату расстояния от Солнца, то траектория движущегося свободного тела может быть только коническим сечением, в одном из фокусов которого расположено Солнце.

Исходя из всех этих открытий, можно сформулировать закон всемирного тяготения (сам Ньютон полностью этого не сделал): каждая частица во Вселенной притягивает всякую другую частицу во Вселенной благодаря взаимодействию, мгновенно распространяющемуся на любые расстояния. Если масса одной частицы m, а другой M и если расстояние между ними равно r, то они притягиваются друг к другу с силой, пропорциональной величине $F \sim mM/r^2$, причем эта сила радиальная, то есть она действует вдоль прямой, соединяющей частицы.

Эта формула объясняет полученный Галилеем закон падения тел. Ньютон приписал массе двоякую роль: с одной стороны, она должна быть мерой гравитационного взаимодействия (гравитационная масса) mg, а с другой — мерой инерции тела (инертная масса)ma. Рассмотрим тела массы m и $2m$. Удвоение массы означает следующее. Во-первых, Земля притягивает тело в два раза сильнее, а во-вторых, у этого тела в два раза возрастает инерция, то есть его «нежелание» быть ускоренным силой тяготения. В результате первое тело будет иметь то же самое ускорение, что и второе.

В теории Ньютона были и свои недостатки. Первым недостатком было то что закон всемирного тяготения и законы движения планет получены в предположении, что гравитационное взаимодействие передается мгновенно на любые расстояния.

Вот что об этом писал сам Ньютон: «То, что тяготение должно быть врожденным, обязательным и неотъемлемым свойством материи, причем таким, что одно тело может действовать на другое на расстоянии через пустоту без посредства чего-то такого, что могло бы переносить это воздействие от одного к другому, представляется мне таким заблуждением, что, по моему убеждению, не найдется человека, обладающего способностями к философским рассуждениям, который мог бы в него впасть».

Вторая проблема касается абсолютного пространства. В XIX веке австрийский философ и физик Эрнст Мах указал на противоречия концепции абсолютного пространства с третьим законом Ньютона.

Пусть на тело действует некоторая сила, при этом неизбежно возникает ответная сила инерции как сопротивление ускорению относительно абсолютного пространства и может рассматриваться, согласно теории Ньютона, как влияние этого пространства на тело. Тогда, согласно третьему закону Ньютона, должно возникнуть и обратное воздействие тела на абсолютное пространство. Но ведь по самому определению абсолютное пространство совершенно не зависит (то есть не подвержено влиянию) от всего того, что в нем происходит.

Отвергая концепцию абсолютного пространства, а вместе с ней и абсолютного движения. Мах заявил, что инерция частицы есть результат некоего взаимодействия между этой частицей и всем остальным веществом во Вселенной и, в частности, наиболее удаленным (к нему Мах относил вещество «неподвижных» звезд).

Наиболее противоречивым из всех законов, открытых Ньютоном являлся принцип относительности.

В несколько иной формулировке ньютонов принцип относительности гласит, что внутри лаборатории, движущейся без вращения, равномерно и прямолинейно по отношению к абсолютному пространству, никакими механическими экспериментами невозможно обнаружить ее движение: все механические процессы внутри лаборатории протекают так же, как если бы она покоилась.

Противоречивость заключается в том, что, введя абсолютное пространство, Ньютон тем самым дал ту основу, с помощью которой можно было бы провести четкую границу между покоем и движением. Но согласно же принципам механики Ньютона покой и равномерное движение относительны, и это противоречит «абсолютности», налагаемой на них абсолютным пространством и абсолютным временем. Другими словами, нет способов проверить, как движется наше пространство относительно абсолютного пространства.

Для решения этой задачи нужна была «точка отсчета», которая либо покоилась относительно абсолютного пространства, либо двигалась равномерно и прямолинейно. В поисках этой точки Ньютон рассмотрел движения планет вокруг Солнца. Он отмечал, что раз Солнце притягивает планеты, то планеты, в свою очередь, должны притягивать Солнце, сдвигая его то в одну, то в другую сторону. В то же время, игнорируя звезды, он доказал, что в Солнечной системе есть точка — ее центр инерции, которая остается неускоренной. Большую часть времени эта точка находится внутри Солнца и никогда не уходит далеко от него. Так как эта точка не ускорена, то она может либо покоиться, либо двигаться равномерно и прямолинейно.

Ньютон дополнил свои законы гипотезой: *центр мира (инерции) неподвижен.* Пытаясь обосновать эту гипотезу, Ньютон обращает внимание на то, что признавалось тогда всеми (хотя одни помещали в неподвижный центр мира Солнце, а другие — Землю). Но он уже знал, что ни Солнце, ни Земля не могут покоиться, ибо их движения являются ускоренными. Единственным кандидатом на роль центра мира для теории Ньютона оставался центр инерции Солнечной системы, который должен был либо покоиться, либо двигаться, но равномерно и прямолинейно.

Все эти доводы позволили выделить неподвижную точку, а этого оказалось достаточно, чтобы концепции абсолютного пространства и абсолютного движения были применимы в любой другой точке. Но то, что Ньютон для этого пошел на дополнение своих законов специальной гипотезой, указывает на его беспокойство по поводу своего принципа относительности, неразрывно связанного с этими законами.

3. Развитие оптики и электромагнетизма

Природа и структура света.

Среди окружающих нас предметов и явлений есть один феномен, который совершенно не похож на остальные. Это луч света.

В античном представлении движение света понималось как движение солнечных лучей по поверхности земли или других тел при этом считалось, что реально существует только тьма, а свет является лишь временным проявлением борьбы Солнца с тьмой. Прошло много времени, прежде чем свет стали считать самостоятельным объектом, который лишь связывает источник с освещаемым предметом. Возник вопрос: Движется ли свет и как можно рассматривать его движение.

Постепенно сформировалось две точки зрения на движение света:

1) Свет это субстанция, которая мгновенно покрывает любые расстояния, не затрачивая на это даже незначительного промежутка времени. (Кеплер и более ранние ученые).
2) Свет это нечто, быстро, но все же постепенно перемещающееся от точки к точке. (Впервые заявил и попытался доказать Галилей)

Опыты по определению скорости света.

Галилей измерял скорость света с помощью двух помощников которые находились на расстоянии полутора километров и по очереди открывали фонари. Скорость света получалась как расстояние деленное на время.

Для определения времени реакции помощников на световой сигнал, Галилей провел с ними, множество предварительных тренировок на малых расстояниях. Поэтому, во время опытов, Галилей уже знал, сколько времени в зафиксированной задержке сигнала должно приходиться на реакцию наблюдателей, а это давало возможность найти чистое время распространения света.

В результате эксперимента Галилей пришел к выводу, что свет можно считать распространяющимся мгновенно (в крайнем случае его скорость должна быть невероятно большой).

В связи с этим довольно интересно одно из замечаний Галилея. Он заявлял, что если бы удалось повторить этот эксперимент, но с двумя наблюдателями, разделенными в два, а то и в три раза большим расстоянием, и оказалось бы, что и при расстоянии (туда и обратно) 9 километров никакого заметного эффекта тоже не обнаруживается, то с полным основанием можно было бы утверждать, что свет распространяется мгновенно. (Аналог математической индукции).

Впервые относительно точно измерил скорость света датский математик и астроном Оле Ремер в 70-х годах XVII века, исследуя затмения одного из спутников Юпитера – Ио. Спутники Юпитера, как и наша Луна, светятся не собственным светом — они отражают солнечный свет. Когда Юпитер оказывается на пути солнечных лучей к его спутникам, они затмеваются.

Он обнаружил, что в затмениях Ио имеется определенная нерегулярность: разность времени этих затмений доходила до 22 минут. Чем ближе Земля была к Юпитеру, тем раньше наступали затмения и наоборот. Ремер предположил, что это происходит потому, что свету требуется как раз около 22 минут, чтобы покрыть расстояние, равное диаметру орбиты Земли (рис.12). С учетом имевшихся в то время оценок диаметра земной орбиты, скорость света должна была быть порядка 214 000 километров в секунду.

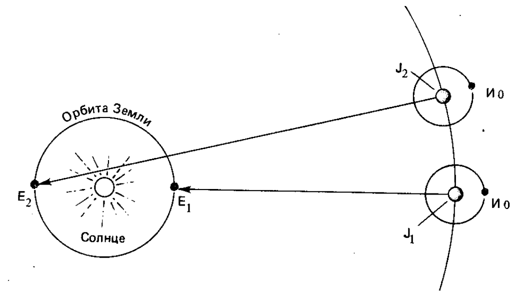


рис.12

Современные исследования показали, что Ремер ошибался на 5 минут в определении разности времени наступления затмений. R=300 млн. км. Разность 17 мин.

Можно было по пальцам пересчитать людей, готовых поверить в то, что свет, если он не распространяется мгновенно (то есть фактически недвижим), может двигаться со столь огромной скоростью, и одним из них был Ньютон. Ремер высказал свое предположение в 1675 году, но прошло более 50 лет, прежде чем это открытие подтвердилось, с совершенно другой стороны.

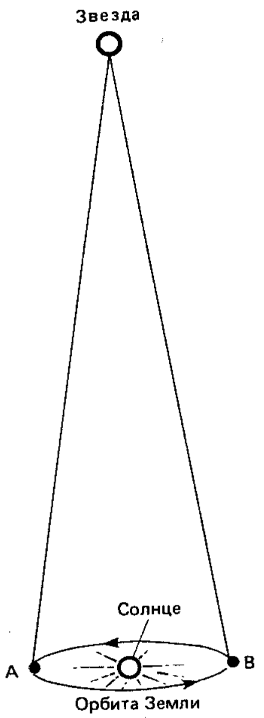


рис. 13

В XVII веке сначала француз Жан Пикар, а затем и другие астрономы, имевшие в своем распоряжении телескопы, обнаружили непонятные годичные движения звезд. Это движение в течение ряда лет в начале XVIII века исследовал английский астроном Джеймс Брадлей.

При наблюдениях в телескоп создавалось впечатление, что все звезды одновременно движутся вдоль очень малых замкнутых контуров, имеющих форму эллипса, и затрачивают на полный оборот ровно один год. Все контуры были параллельны плоскости земной орбиты, и у всех был одинаков угловой размер большой оси, составляющей около 40 секунд дуги. (примерно под таким углом мы видим на расстоянии вытянутой руки не очень тонкий волос).

Брадлей понимал, что это скорее видимость, нежели реальность: не являясь центром Вселенной, Земля, конечно же не могла командовать небесами. В качестве одной из возможных причин этого движения могло быть явление параллакса.

Рассмотрим видимые положения звезды, наблюдаемой с Земли, когда она находится в точках A и B своей орбиты (рис. 13). Проведенные от Земли к звезде прямые имеют соответственно правый и левый наклоны, так что, когда Земля находится в точке A, звезда выглядит смещенной вправо, а когда Земля приходит в точку B, то звезда кажется смещенной влево.

Однако смещения, наблюдавшиеся Брадлеем, имели непредвиденное направление, в то время как параллактические смещения звезд должны происходить только перпендикулярно движению Земли по орбите. Это связано с тем, что наклонные прямые (рис. 13), определяющие смещения звезды, расположены в плоскости страницы, под прямыми углами к мгновенным направлениям движения Земли, перпендикулярным к плоскости страницы. Смещения же, наблюдавшиеся Брадлеем, имели в каждый данный момент времени направления, совпадавшие с движением земли по орбите. Следовательно, они никакого отношения к параллаксу не имели. (Параллакс звезд впервые наблюдался только в 1938 году, когда прошло более столетия после исследований Брадлея.)

Объяснение таким движениям звезд Брадлей нашел в сентябре 1728 года, Явление получило название аберрации света.

Для объяснения аберрации, рассмотрим свет, приходящий от звезды, сияющей прямо над головой и падающей на Землю вертикально. Предположим для простоты, что Солнце покоится, и движение Земли состоит только из ее орбитального движения. Это предположение вполне допустимо, поскольку довольно равномерное движение Солнца лишь

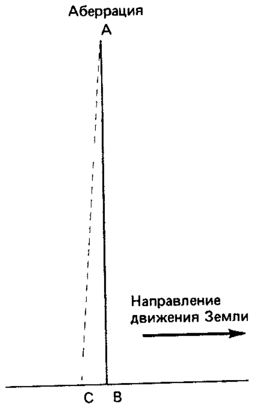


рис.14

сдвигало бы центры эллипсов, которым движутся звезды. Суточным вращением Земли вокруг своей оси тоже можно пренебречь, поскольку его вклад в наблюдаемый сдвиг звезд чрезвычайно мал по сравнению с вкладом орбитального движения.

Рассмотрим на рис. 14 вертикаль АВ, проходящую через точку В, лежащую на поверхности Земли. Если бы Земля не двигалась, то падающий вертикально вниз и прошедший через точку А. свет упал бы на Землю в точке В. Но при Земле, движущейся по орбите, точка В за короткий промежуток времени, требуемого свету, чтобы долететь от точки А до Земли, продвинется немного вперед, так что свет упадет на Землю в точке С, лежащей чуть позади В. Аналогом аберрации могут служить дождевые капли, падающие наклонно, если смотреть из окна движущегося автомобиля. Наклон (тангенс угла наклона) прямой СА, измеряемый отношением длины отрезка АВ к длине отрезка СВ, равен отношению скорости света к орбитальной скорости Земли. Это отношение составляет примерно 10 000, сразу становится ясно, что длина отрезка СВ на чертеже сильно преувеличена.

Поскольку Земля движется по криволинейной орбите, направление ее движения непрерывно меняется. В результате создается впечатление, что звезда «вычерчивает» на небесной сфере миниатюрную копию орбиты Земли.

Благодаря тому, что величина аберрации зависит от отношения орбитальной скорости Земли к скорости света, Брадлей сумел узнать, как быстро распространяется свет. С помощью открытой Брадлеем аберрации время за которое свет преодолевает диаметр земной орбиты оказывается равным 8 минутам и 13 секундам (303 000 километров в секунду), что прекрасно согласуется с более поздними оценками Ремера. Современное значение (299 792 километра в секунду).

Параллельно с определением скорости света возник вопрос о его структуре. Сформировались две точки зрения.

1) Ньютон считал, что свет состоит из частиц, подтверждением чему, по его мнению, являются резкие тени, отбрасываемые освещенными предметами.(корпускулярная теория)
2) Современник Ньютона, голландский физик Христиан Гюйгенс, полагал, что свет — это некая разновидность волн (волновая теория).

Сначала предпочтение было отдано корпускулярной теории света из-за ее простоты.

Только 1800 году Томас Юнг, выдвинул предположение, что свет состоит из волн. В доказательство он привел пример опытов, когда один луч света падает на другой, и при определенных условиях в результате может получиться темнота. Это одно из группы явлений, названных Юнгом интерференцией света.

Интерференция – наложение друг на друга различных волн.

Пример интерференции.

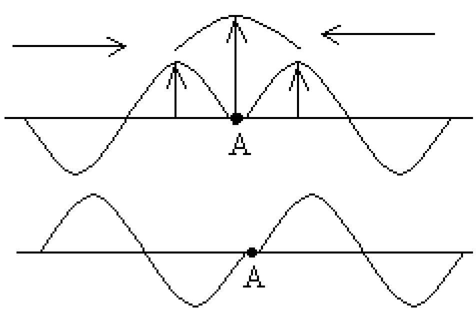


рис.15

Рассмотрим две волны вышедшие из двух разных точек навстречу друг другу. В тех точках, где встречаются два гребня высота волны (колебания) возрастает, а в тех точках, где гребень встречается с впадиной, колебаний вообще нет.

Если рассмотреть теперь световые волны, прошедшие через две щели в экране, то окажется, что получившийся узор из светлых и темных областей аналогичен картине, возникающей в результате взаимодействия волн на воде. Такие световые узоры называются интерференционными полосами.

Сначала идея Юнга подверглась насмешкам. Но через четверть века она взяла верх над корпускулярной теорией света. Это стало возможным, в частности, благодаря исследованиям французского ученого Огюстена Френеля, начатым им в 1815 году.

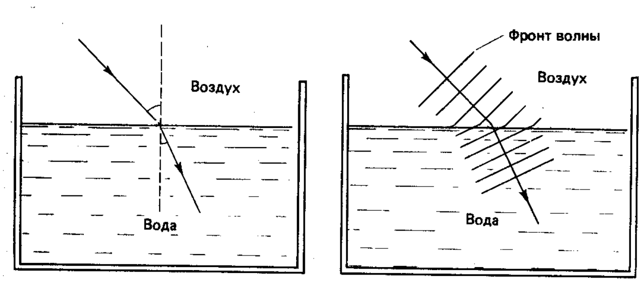


Рис. 16

Опыт Френеля для доказательства волновой природы света.

Когда луч света переходит из воздуха в воду, он преломляется (рис. 16). Ньютон дал подробное объяснение этому явлению, постулируя существование некоторого притяжения, испытываемого частицами света, когда они вплотную приближаются к поверхности воды — вещества более плотного, чем воздух, Поскольку такая сила притяжения ускоряет частицы, скорость света в воде должна быть больше, чем в воздухе. Волновая теория тоже позволяет дать детальное объяснение преломлению света, но совершенно другим способом, исходя из законов Гюйгенса. В этой теории предполагается, что световые волны при попадании в воду замедляются, в результате чего, и происходит изменение направления распространения света.

Согласно принципу Гюйгенса каждая точка волнового поля, пришедшая в колебание, становится сама источником вторичных волн. Результирующая волна, распространяющаяся дальше, возникает вследствие наложения и интерференции всех волн от этих вторичных элементарных источников.

Назовем волновой поверхностью геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе. Тогда фронт волны так же является волновой поверхностью. С помощью принципа Гюйгенса можно найти вид фронта волны через малый промежуток времени Δt, для этого нужно провести из каждой точки, являющейся вторичным источником волн провести в направлении распространения сферическую волну радиуса $r = \upsilon\Delta t$. Новый фронт волны получается как огибающая этих вторичных волн. Из этого следует, что плоская волна при своем распространении остается плоской. Докажем, что если угол световых лучей с горизонталью в воде меньше чем в воздухе, то скорость света при переходе через границу раздела сред уменьшается. Пусть имеется две среды, скорость света в первой среде обозначим υ_1, а скорость во второй среде через υ_2 Рассмотрим участок АВ фронта волны в первой среде (рис.17).

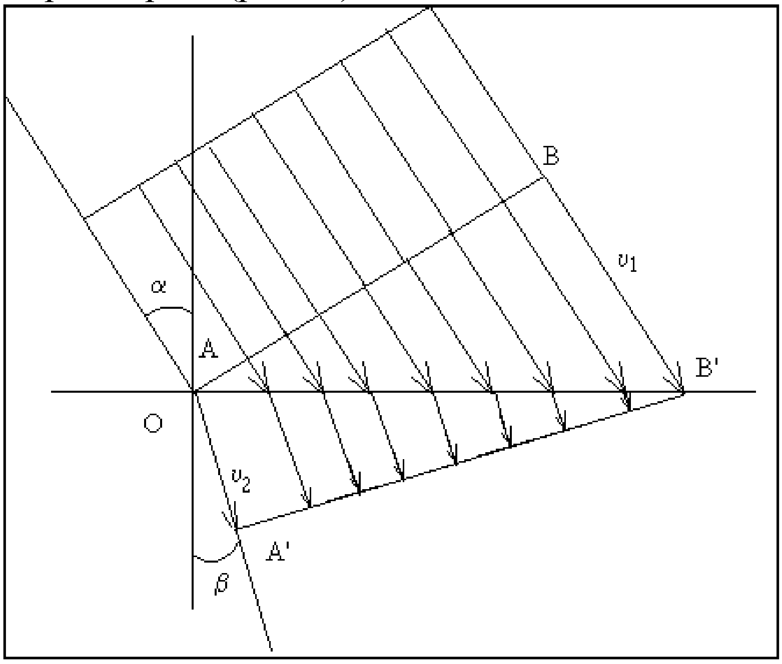


Рис. 17

Проведем из точек А и В перпендикуляры ВВ' и АА' к фронтам падающей (АВ) и прошедшей (А'В') волн соответственно. Угол α называется углом падения. Угол β называется углом преломления. Треугольники АА'В' и АВВ' являются прямоугольными и имеют общую гипотенузу. Поэтому

$$AB' = \frac{\upsilon_1 \Delta t}{\sin\alpha} = \frac{\upsilon_2 \Delta t}{\sin\beta}; \quad \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{\upsilon_1}{\upsilon_2} = \mathrm{const}$$

из последнего соотношения видно, что поскольку $\alpha > \beta \Rightarrow \upsilon_1 > \upsilon_2$

Таким образом, скорость света в воде согласно волновой теории должна быть меньше, чем в воздухе. В 1850 году Фуко удалось осуществить эксперимент по сравнению скоростей света в воде и воздухе. Оказалось, что в воде она меньше, и как раз на величину, предсказанную волновой теорией.

Поскольку роль волн оказалась очень важной в оптических процессах рассмотрим характеристики волнового движения.

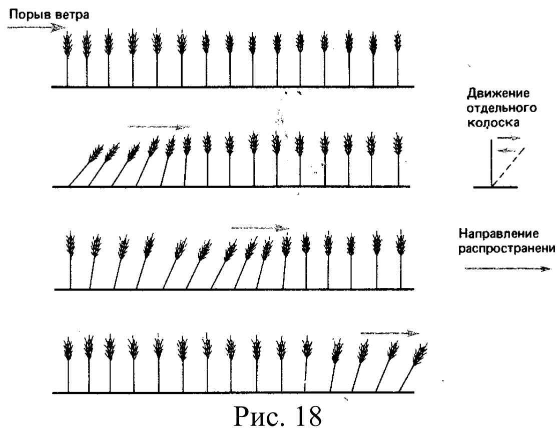


Рис. 18

Существует два типа волн: 1 - продольные 2 - поперечные. Продольные волны можно наблюдать, когда над полем пшеницы дует ветер. По мере движения воздух колоски один за другим совершают колебательное движение вперед – назад, т.е. в направлении движения волны или в продольном направлении (рис. 18). Так же примером продольных волн можно считать звуковые волны, когда области повышенного давления и плотности распространяются по воздуху. Поперечные волны можно наблюдать на поверхности воды, когда волна идет горизонтально, а частицы колеблются вверх – вниз, т.е. в поперечном направлении. При этом важно отметить, что при волновом движении не происходит переноса колеблющегося вещества. Волны передают на расстояние энергию и информацию.

Поначалу Юнг и Френель, как и Гюйгенс во времена Ньютона, световые волны считали похожими на звуковые, то есть продольными. Но явление поляризации доказало, что световые волны являются поперечными. Явление поляризации заключается в следующем. Если держать две поляроидные пластинки одну за другой, так чтобы поляризационные полосы были параллельны, то свет через них будет проходить совершенно беспрепятственно. Если же, повернуть одну пластинку на 90° по отношению к другой в собственной плоскости, то пара скрещенных таким образом поляроидов будет препятствовать прохождению света.

Однако у волновой теории был существенный недостаток. Наличие волн подразумевает существование среды, в которой они распространяются. Поскольку для света такой среды — носителя световых волн известно не было, ученые ее постулировали и назвали световым эфиром или просто эфиром. Этот эфир должен был заполнять все видимое в телескоп пространство. Ведь если мы видим объект, то, значит, должен существовать всюду непрерывный эфир, переносящий световые волны от объекта к нашему глазу. Поскольку в жидкостях и газах распространяются только продольные волны, а световые волны являются поперечными эфир должен вести себя как граница двух сред с различной плотностью. Кроме того, эфир должен характеризоваться чрезвычайно большим коэффициентом жесткости, так как иначе в нем не могли бы распространяться волны, обладающие столь чудовищно большой скоростью, как скорость света. С другой стороны эфир не должен оказывать никакого воздействия на движение планет, поскольку даже очень слабый тормозящий эффект, обусловленный присутствием эфира, очень скоро накопившись, дал бы о себе знать. Подобное свойство присуще идеальной жидкости. Такие свойства эфира являются противоречивыми. Однако волновая теория света казалась слишком успешной, чтобы отказаться от нее.

Вернемся к явлению аберрации и рассмотрим ее с точки зрения волновой теории. Для существования аберрации необходимо, что эфир мог свободно проходить через вещество. Чтобы убедиться в этом, допустим, что Земля способна увлекать за собой эфир, находящийся в ее непосредственной окрестности, т.е. скорость эфира вблизи поверхности земли равна скорости земли. Но в этом случае не наблюдалось бы никакой аберрации, поскольку величина аберрации определяется разностью скоростей света и Земли в направлении ее движения. Но пограничный слой эфира, увлекаемый Землей, захватывал бы с собой и световые волны, так что к разности скоростей света и Земли, имевшей место при отсутствии увлечения эфира, теперь снова прибавилась бы скорость Земли, и тем самым аберрация бы исключалась. Таким образом, именно существование аберрации света заставляет предполагать, что эфир свободно проходит через вещество, что так же согласуется отсутствием сопротивления эфира движению планет. Вспомним, теперь что Ньютон ввел абсолютное пространство и абсолютное время, чтобы иметь возможность рассуждать об абсолютном покое и абсолютном движении. А если эфир не только заполняет все пространство, но еще не подвержен влиянию движущихся через него тел, за исключением, разумеется, световых волн, то его вполне можно было бы считать покоящимся в абсолютном пространстве и даже рассматривать как некое физическое воплощение этого пространства.

Следовательно, выясняя, как мы движемся по отношению к эфиру, можно было бы определить наше абсолютное движение. С этой новой точки зрения ньютонов принцип относительности применим лишь в механических экспериментах (возможность определить скорость системы с точностью до константы). Из оптических же экспериментов получалась столь желанная абсолютность, которую Ньютон постулировал с самого начала. После этого открытия ученые попытались определить абсолютную скорость движения земли (относительно эфира).

Само собой разумеется, что ученые тут же начали ставить эксперименты по измерению абсолютного движения Земли — ее движения по отношению к эфиру. Раньше, когда обсуждалось движение бусинки, нанизанной на прямую (и, возможно, движущуюся) проволочку, уже отмечалось, что не существует никаких верстовых столбов или каких-либо иных отметок, «вмонтированных» в пространство, по отношению к которым можно было бы распознать покой. Нет подобных отметок и в эфире. Но для наших целей эфир должен иметь преимущество перед пространством: он является носителем световых волн. Как мы увидим, можно было вполне ожидать, что эти волны в состоянии сыграть роль меток, движущихся, но все же меток, позволяющих распознавать состояние абсолютного покоя и измерять абсолютное движение.

Это можно сделать следующим способом. Рассмотрим лодку на озере, берега которого скрыты туманом. Для определения скорости лодки можно положить на воду поплавок, отождествить его с неподвижной водой и измерить скорость относительно этого поплавка. Однако в эфир «положить» ничего нельзя, к тому же он не оказывает влияние на движущиеся тела и поэтому реальный аналог поплавка никогда не остановится. Для определения абсолютной скорости Земли, необходимо воспользоваться тем фактом, что скорость распространения волн не зависит от скорости источника этих волн. Если бросить с носа и кормы лодки два камня, то при падении они создадут две волны, движущиеся с одинаковой, неизвестной пока, скоростью с (рис. 20). Одна волна будет набегать на лодку, а вторая – догонять ее. Если измерить скорости волн с движущейся лодки, то скорость набегающей волны будет $\upsilon_1=c+\upsilon$, а скорость догоняющей волны $\upsilon_2=c-\upsilon$, где υ - скорость лодки относительно воды. Таким образом $\upsilon=(\upsilon_1-\upsilon_2)/2$; $c=(\upsilon_1+\upsilon_2)/2$

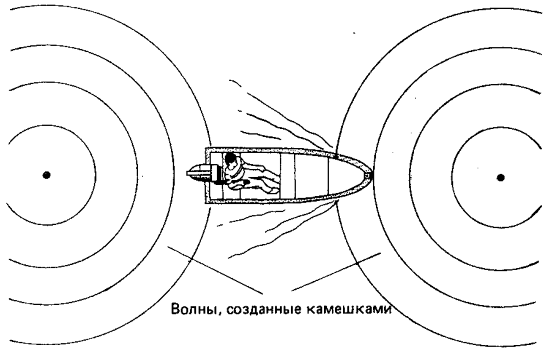


рис. 20

В случае движения в эфире аналогом камней могли бы послужить две фотовспышки или какие-нибудь другие источники света. Поскольку направление нашего движения сквозь эфир неизвестно, то нужно было бы провести измерения скоростей во многих направлениях. А затем на основании полученных результатов найти то единственное направление, в котором скорость υ будет наибольшей — именно это значение и будет скоростью нашего движения относительно эфира.

Такой эксперимент по измерению скорости Земли был поставлен в самом начале 1818 года французским ученым Франсуа Араго. Такого рода эксперименты получили название экспериментов «первого порядка», поскольку их чувствительности хватало (лишь на то, чтобы обнаружить эффекты порядка 1 величины отношения v/c в первой степени, где v — скорость лаборатории, а c — скорость света. Если за v принять орбитальную скорость Земли, то v/c будет примерно равно 1/10000.

Идея эксперимента Араго заключалась в следующем. Отклонение луча света стеклянной призмой, помимо прочего, зависит и от показателя преломления стекла, который, согласно волновой теории света, равен отношению скоростей света в вакууме и в стекле. Предположим, что в нашем распоряжении есть стеклянная призма, которая находится в состоянии покоя относительно эфира, и пусть для простоты скорость света вне призмы равна 3 условным единицам, а внутри — 2 таким единицам, так что показатель преломления стекла равен 3/2. Теперь предположим, что призма относительно эфира движется вправо со скоростью равной 1 условной единице. Тогда свет, приходящий справа, будет иметь скорость 3 + 1 (вне призмы) и 2+1 (внутри нее). Тогда показатель преломления будет равен уже не 3/2, а (3 + 1)/(2 + 1), то есть 4/3. Для света, пришедшего с других направлений, показатель преломления, конечно, будет иным. Таким образом, естественно ожидать, что величина отклонения светового луча призмой на Земле, зависит от скорости Земли относительно эфира.

Эксперимент не дал никаких результатов. Араго рассказал об этом своему другу Френею и тот дал следующее необычное объяснение. Френель предположил, что стекло, из которого изготовлена призма (и вообще любой прозрачный материал), все время увлекает с собой некоторое дополнительное количество эфира. Причем количество эфира, увлекаемое единицей объема вещества, зависит от показателя преломления этого вещества. Так что внутри призмы должно было оказаться больше эфира, нежели в соответствующем объеме свободного пространства. В этом случае увлекаемый стеклом эфир движется вместе с призмой. Но даже если бы он целиком перемещался вместе с призмой, то все равно, ни призма, ни захваченный ею эфир не оказывали бы ни малейшего влияния на вездесущий и всюду покоящийся эфир, заполняющий весь мир. Френель утверждал, что скорость света должна складываться из его обычной скорости в неподвижном стекле и из некоторой дополнительной скорости, зависящей от того, насколько сильно эфир увлекается стеклом, и даже вывел формулу для вычисления скорости света в движущемся стекле и других прозрачных средах.

Эта гипотеза объясняла нулевой результат эксперимента Араго и некоторые эффекты, связанные с аберрацией света. Рассмотрим два телескопа, один из которых заполнен водой. Свет от звезды, попав в телескоп с водой, должен замедлить свой ход, поэтому аберрация звезд в этом телескопе должна увеличиться, по сравнению с телескопом без воды. Однако Френель с помощью своей новой формулы показал, что такой аберрационный эксперимент первого порядка не должен был зарегистрировать никакого влияния воды на величину аберрации. Много позже, в 1871 году, это предсказание было проверено и подтверждено английским астрономом Дж. Эри.

Несмотря на все свои достижения, на правильность формулы для скорости света в движущихся телах, гипотеза Френеля была совершенно не верна. Согласно этой гипотезе количество увлекаемого эфира зависит от показателя преломления. Однако сам показатель преломления зависит, помимо прочего, от цвета света, проходящего через рассматриваемую прозрачную среду. Так, при красном свете количество увлекаемого средой эфира должно было отличаться от количества эфира, увлекаемого той же средой, но при пропускании через нее синего света. С другой стороны, если предлагаемый подход имел хоть какой-нибудь смысл, то количество увлекаемого эфира не могло меняться таким образом. Количество увлекаемого эфира всегда должно быть вполне определенным — ведь белый свет содержит все цвета радуги. На самом деле Френель оказался заложником классической механики, в рамках которой уже нельзя было объяснить изучаемые им явления.

Электромагнетизм.

Электромагнетизм, как научное направление появился только в начале XIX века. До этого времени явления электричества и магнетизма существовали раздельно, хотя имели много общего. Например, одноименные полюса магнита отталкиваются, а разноименные притягиваются, точно также как элементарные электрические заряды. Сила взаимодействия между полюсами магнита, как и между электрическими зарядами является радиальной, и изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния между полюсами. Такие силы называются «дальнодействующими» в отличие от сил, которые убывают по экспотенциальному закону и называются «близкодействующими» как, например сила взаимодействия молекул в газе.

При наличии столь сходных черт не удивительно, что ученые упорно пытались найти связь между электричеством и магнетизмом. Но создавалось впечатление, что никакой такой связи не существует: если электрический заряд и магнитный полюс по отношению друг к другу покоятся, то между ними не наблюдается никакого взаимодействия. Как ни странно, но сама природа давала весьма прозрачные намеки на существование взаимосвязи между электричеством и магнетизмом: например, молния может намагничивать куски железа и оказывает влияние на магнитную стрелку.

И, тем не менее, эта взаимосвязь оставалась неуловимой вплоть до 1820 года. Именно тогда было установлено, что электрические заряды могут довольно свободно двигаться в металлах и других веществах — так называемых проводниках (хотя большинство проводников и являются твердыми телами); направленное движение электрических зарядов назвали электрическим током.

В 1820 году датский физик Ганс Христиан Эрстед, (всю жизнь друживший с великим сказочником Гансом Христианом Андерсеном), установил, что текущий по проволоке электрический ток может отклонять стрелку компаса. Однако в этом воздействии электричества на магнит решающим оказалось не просто наличие зарядов в проволоке, а их движение, то есть это воздействие является нестатическим. Кроме того в отличии от известных ранее сил магнитного электрического и гравитационного взаимодействия, вновь открытая сила действовала перпендикулярно направлению электротока.

Пусть на рис. 21 центральный кружок С изображает прямой проводник с электрическим током, направленным от нас перпендикулярно плоскости чертежа. Тогда магнитные стрелки, помещенные в точки *P, Q, R* и *S,* повернутся так, что северный полюс стрелки в *P* будет, как показано на рисунке, «смотреть» вправо, стрелки в *Q* — вниз, стрелки в *R* — влево, а стрелки в *S* — вверх.

Обратное явление — электрический ток, возникающий под действием движущегося магнита, — которое было названо электромагнитной индукцией, было открыто английским физиком-экспериментатором Майклом Фарадеем в 1831 году. Чуть раньше и независимо от него это явление обнаружил американский экспериментатор Джозеф Генри. [однако публикация Фарадея по этому поводу была первой. —Прим.ред.]. Не очень отстал от них русский физик Э. Х. Ленц.

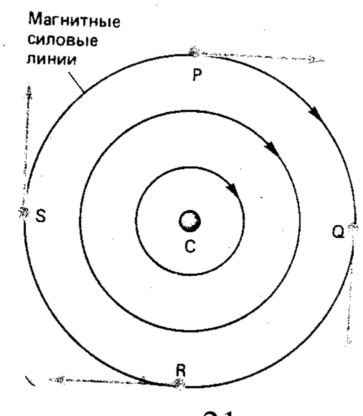


рис 21.

Фарадей заслуживает особого внимания. Как отметил Эйнштейн, исследования Фарадея сыграли для Максвелла ту же роль, что для Ньютона работы Галилея. Сын кузнеца Майкл Фарадей относится к числу величайших физиков-экспериментаторов. Он родился в 1791 году и с 13 лет до 21 года работал переплетчиком книг. К науке Фарадей приобщился самостоятельно, с упоением читая поступавшие в переплетную мастерскую научные книги. Хозяином мастерской, где работал Фарадей, был очень чуткий и проницательный человек, пристрастивший его к посещению популярных научных лекций, которые устраивал президент Лондонского королевского института.

Конспект этих лекций, разумеется, в прекрасном кожаном переплете, Фарадей, по настоянию своего хозяина, посылает лектору. Благодаря этому конспекту он впервые получил работу, связанную с наукой. Начав с лаборанта Лондонского королевского института, он, в конце концов, стал его директором. Его исследования, многочисленные и обширные, заложили основы всей современной электро- и радиотехники, хотя напрасно искать в них какие-то математические выкладки, помимо редких арифметических расчетов, да и те, в общем-то, были ни к чему, так как их вполне можно было заменить рассуждениями, выраженными в исключительно словесной форме.

Отсутствие у Фарадея математических способностей может показаться серьезным недостатком, но не будем торопиться с выводами. Этот недостаток вынуждал его размышлять об электромагнитных явлениях с помощью наглядных образов, что не замедлило сказаться, хотя лишенные математического обрамления его теории поначалу выглядели наивными.

Возьмем, например, простой случай притяжения маленькой магнитной стрелки к подковообразному магниту. Для физика, сведущего в математике, здесь самое главное магнитные материалы и закон обратного квадрата для силы взаимодействия между магнитными полюсами. Для Фарадея же все это не имело особого значения. Все эти магниты, стрелки, хотя их можно было, что называется, потрогать, сами по себе были для него чем-то незаконченным, мертвым. Подковообразный магнит, например, рисовался ему окруженным множеством невидимых и пронизывающих все пространство щупалец, с помощью которых полюса этого магнита и притягивают к себе магнитную стрелку, и действуют на другие объекты, восприимчивые к магнитным силам. Причем эти щупальца можно было бы увидеть с помощью железных опилок, хотя, по мнению Фарадея, они существуют безотносительно к тому, есть ли в данном месте опилки или нет.

Фарадей называл их силовыми линиями, и для него они были наипервейшей магнитной реальностью. Окружающее магнит пространство не было пусто: оно заполнено этими магнитными щупальцами, всегда натянутыми, всегда теснящими своих соседей и в совокупности являющими собой то, что он назвал магнитным полем. Точно так же он считал, что с электрическими зарядами связаны электрические силовые линии. Именно они были для него первичными электрическими реальностями, образуя то, что он назвал электрическим полем.

Заключена ли в силовых линиях хоть какая-нибудь реальность или это лишь мысленный образ, позволивший далекому от математики Фарадею уловить в своих экспериментах некий смутный порядок?

В сравнении с формулами, что так ловко и к месту умеют писать физики, разбирающиеся в математике, все эти щупальца выглядели чем-то до наивности простым и неточным. Но, как ни странно, оказалось, что в них заложено богатое математическое содержание, которым четверть века спустя или чуть позднее (к счастью, Фарадей дожил до этого дня) блестяще воспользовался Максвелл. Если отвлечься от некоторых моментов, требующих расчетов, то не трудно на простом примере разобраться как с помощью картины силовых линий, похожих на щупальца, можно было бы получить точные математические результаты.

Отсутствие у Фарадея математического образования вынуждало его при рассуждениях оперировать наглядными образами. Например, магнитное поле представлялось ему множеством щупалец, непрерывно заполняющих пространство около магнита. Он называл их силовыми линиями. Рассмотрим, как с помощью таких наглядных представлений можно, чисто теоретически, вывести закон изменения магнитной силы с расстоянием.

Предположим, что усилие, вызываемое силовой линией, не зависит от ее длины. И еще, допустим (а здесь как раз и появляется математический аспект), что силовые линии такие тонкие, так многочисленны и так плотно упакованы, что между ними не остается никаких зазоров, хотя они и сохраняют свою индивидуальность. Теперь рассмотрим единственный электрический заряд вместе с его силовыми линиями-щупальцами, выходящими из заряда радиально во всех направлениях. Совершенно очевидно, что все силовые линии будут пересекать любую воображаемую сферическую поверхность $s = 4\pi r^2$ с центром в это заряде.

Начнем со сферы единичного радиуса. Если на некотором участке этой сферы расположена тонкая пленка с небольшим электрическим зарядом, то на нее будет действовать определенное количество силовых линий, причем полная сила, действующая на эту пленку со стороны центрального заряда, равна сумме индивидуальных усилий всех действующих на нее силовых линий. Удвоим радиус сферы, и площадь ее поверхности возрастет в четыре раза, а значит, силовые линии будут пересекать ее реже. Через единицу поверхности сферы теперь будет проходить в четыре раза меньше линий, чем раньше, и, следовательно, сила, действующая на ту же заряженную пленку (но расположенную на большей сфере), будет тоже в четыре раза меньше.

Силовые линии оказываются эффективными и в других ситуациях.

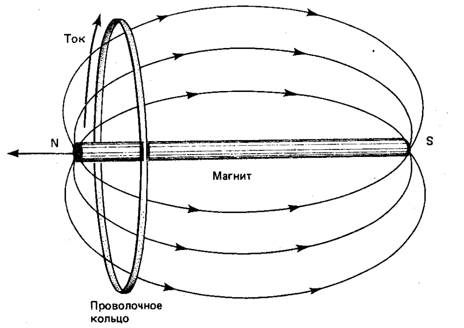


рис. 22

Например, в случае электромагнитной индукции. По существу, закон электромагнитной индукции Фарадея гласит, что для индуцирования электрического тока в замкнутом проводящем контуре необходимо, чтобы изменялось количество магнитных силовых линий, пронизывающих этот контур (рис. 22). Причем совершенно не важно, по какой причине изменяется число пронизывающих контур силовых линий: из-за движения магнита, из-за увеличения или уменьшения создаваемого им магнитного поля, из-за движения или деформации самого контура, а возможно, и в результате любой комбинации таких причин. Причем сила тока индукции пропорциональна скорости изменения числа силовых линий, пронизывающих рассматриваемый контур.

Объяснение Фарадеем явлений электромагнетизма имело столь же большое значение как и открытие в свое время Галилеем закона движения свободного тела. Когда во времена Галилея люди задавались вопросом «Что удерживает тела в движении?», Галилей доказал, что на самом деле следует интересоваться причиной, по которой тела изменяют состояние своего движения. И когда все сосредоточили основное внимание на реальных магнитах, магнитных стрелках и тому подобных элементах магнитных систем, Фарадей призывал задуматься над богатым, но скрытым от глаза содержимым окружающего магниты пространства, то есть электромагнитным полем. И точно так же, как Ньютон развил основные идеи Галилея, идеи Фарадея обобщил и развил Максвелл.

Максвелл родился в 1831 году в Эдинбурге, когда Фарадею было 40 лет. Так что, когда Максвелл приступил к математическому анализу его открытий и идей, Фарадей был уже пожилым человеком.

На первый штурм проблем электромагнетизма Максвелла вдохновила работа Томсона (Кельвина) в которой он провел аналогию между электрическими силами и тепловым потоком в твердом теле. Максвелл решил нащупать математическое сходство между электрическими силовыми линиями и линиями тока в идеальной и бесконечно протяженной жидкости.

Для этого Максвелл предположил, что внутри жидкость изливается из источника, который он отождествил с электрическим положительным зарядом, и уходит в небытие, в сток, отождествленный с зарядом противоположного знака. В такой модели притяжение и отталкивание электрических зарядов объяснялись с помощью создаваемых в жидкости давлений. Такую же конструкцию Максвелл предложил и для объяснения магнитных явлений. Однако такая модель не объясняла электромагнитную индукцию. Тогда он просто декларировал, что его линии тока ведут себя как раз так, чтобы к ним было применимо правило Фарадея о силовых линиях, пронизывающих замкнутый проводящий контур. Несмотря на все недостатки, оказалось, что новый математический подход, построенный Максвеллом на столь причудливом фундаменте, пригоден для описания огромного количества электромагнитных явлений.

По этому вопросу он весьма откровенно высказался в статье, содержащей изложение его работы: «Я не считаю, что здесь содержится хоть какой-то намек на правильную физическую теорию; главная заслуга предлагаемого подхода как временного орудия исследования именно в том и состоит, что он *ничего не объясняет*» (выделено самим Максвеллом).

Важно обратить внимание на то, что и у Максвелла, и в ранней работе Томсона присутствует материальная среда — аналог фарадеевского поля. Фарадей считал поле, то есть силовые линии, пронизывающие все пространство, первичной реальностью. Так что любая теория, в которой высказывается приверженность точке зрения Фарадея, должна быть теорией всепроникающего поля (аналог эфира).

После создания своей математической модели Максвелл занялся поисками ее механической интерпретации.

В свое время Эрстед выдвинул предположение, что электрический ток окружен неким магнитным вихрем, оказывающим влияние на магнитные стрелки. Ампер же после тщательного анализа проблемы пришел к выводу, что магнетизм — это вторичный эффект, создаваемый круговыми электрическими токами.

Максвелл, следуя представлениям Фарадея и Томсона, считал магнетизм неразрывно связанным с некими вращениями, которые, в рамках механической модели эфира, представлялись в виде маленьких «молекулярных вихрей», или просто быстро вращающихся капелек жидкости. Предполагалось, что оси вращения этих вихрей располагаются вдоль магнитных силовых линий: если бы оказалось, что эти оси направлены в противоположные стороны, то силовые линии в конечном итоге развернули бы их так, чтобы все они имели одинаковые направления. Таким образом, основные положения теории Максвелла отличались от представлений Эрстеда, согласно которому вихри были большими и крутились вокруг электрических токов.

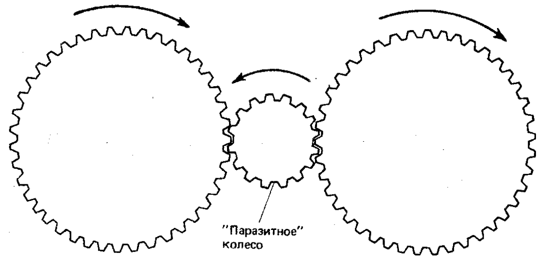


рис. 23

В процессе разработки своей вихревой модели у Максвелла возникли проблемы с трением. Дело в том, что в однородном магнитном поле все молекулярные вихри должны вращаться в одном направлении. В этом случае края двух соседних вихрей в точке соприкосновения будут двигаться в противоположных направлениях. Для исключения трения, вызванного контактом соседних вихрей, Максвеллу пришлось ввести специальные сферические частицы, расположенные между двумя соседними вихрями. Эти частицы выступали как «паразитные колеса», широко известные в механике (рис 23).

Кроме того, Максвелл отвел этим частицам еще одну центральную и совершенно новую роль, заявив, что «их поступательное движение создает электрический ток» и что эти «паразитные» шестеренки «играют роль носителей электричества». В случае однородного магнитного поля все магнитные вихри вращаются в одну сторону и, следовательно, сферические частицы неподвижны (рис. 24 верх). В случае неоднородности магнитного поля, вызванной присутствием замкнутого контура, «слои» вихрей будут вращаться в разные стороны, что приведет к появлению тока (рис.24 низ). Верно и обратное. Электрический ток раскручивает магнитные вихри, создавая магнитное поле. Причем магнитные линии сверху и снизу электротока направлены в разные стороны (к нам и от нас).

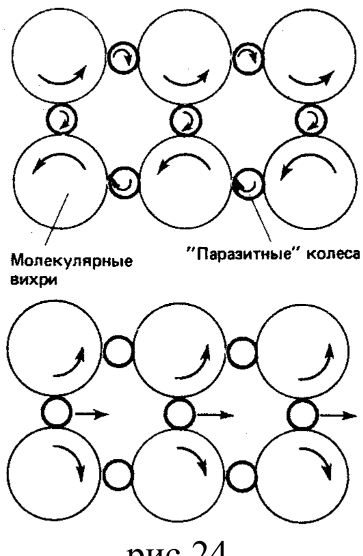


рис 24.

Максвелл не скрывал своего отношения к «воображаемой системе молекулярных вихрей». Он писал в статье, где была изложена его теория: «Концепция частицы, движение которой обусловлено идеальным роликовым контактом с вихрем, может показаться довольно сложной и неуклюжей. Но я вовсе не выдвигаю ее в качестве модели истинных связей, существующих в природе, и даже в качестве положения, которое я с готовностью назвал бы электрической гипотезой. И тем не менее это все же модель — модель связи, мыслимой чисто механически и легко поддающейся анализу и, как мне кажется, позволяющей обнаружить реальные механические взаимосвязи между известными электромагнитными явлениями; так что я осмелюсь утверждать, что всякий, понимающий предварительный и временный характер этой гипотезы, найдет ее скорее полезной, нежели препятствующей в его поисках правильной интерпретации этих явлений».

С помощью своей модели Максвелл получил систему уравнений, описывающих электромагнитное поле, которые позволяют объяснить все основные свойства известных в то время электромагнитных явлений. Построив свои уравнения поля, Максвелл положил их в основу разработанной им теории.

Дифференциальная форма

Уравнения Максвелла представляют собой в векторной записи систему из четырех уравнений, сводящуюся в компонентном представлении к восьми (два векторных уравнения содержат по три компоненты каждое плюс два скалярных[28]) линейных дифференциальных уравнений в частных производных 1-го порядка для 12 компонент четырёх векторных функций ($\mathbf{D}, \mathbf{E}, \mathbf{H}, \mathbf{B}$):

Название	СГС	СИ	Примерное словесное выражение
Закон Гаусса	$\nabla \cdot \mathbf{D} = 4\pi\rho$	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$	Электрический заряд является источником электрической индукции.
Закон Гаусса для магнитного поля	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	Не существует магнитных зарядов.[~ 1]
Закон индукции Фарадея	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	Изменение магнитной индукции порождает вихревое электрическое поле.[~ 1]
Теорема о циркуляции магнитного поля	$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c}\mathbf{j} + \frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	Электрический ток и изменение электрической индукции порождают вихревое магнитное поле

Жирным шрифтом в дальнейшем обозначаются векторные величины, курсивом — скалярные.

Введённые обозначения:

- ρ — плотность стороннего электрического заряда (в единицах СИ — Кл/м³);
- $\mathbf{j}$ — плотность электрического тока (плотность тока проводимости) (в единицах СИ — А/м²); в простейшем случае - случае тока, порождаемого одним типом носителей заряда, она выражается просто как $\mathbf{j} = \mathbf{u}\rho_1$, где $\mathbf{u}$ — (средняя) скорость движения этих носителей в окрестности данной точки, ρ_1 - плотность заряда этого типа носителей (она в общем случае не совпадает с ρ)[29]; в общем случае это выражение надо усреднить по разным типам носителей;
- c — скорость света в вакууме (299 792 458 м/с);
- $\mathbf{E}$ — напряжённость электрического поля (в единицах СИ — В/м);
- $\mathbf{H}$ — напряжённость магнитного поля (в единицах СИ — А/м);
- $\mathbf{D}$ — электрическая индукция (в единицах СИ — Кл/м²);
- $\mathbf{B}$ — магнитная индукция (в единицах СИ — Тл = Вб/м² = кг•с$^{-2}$•А$^{-1}$);
- ∇ — дифференциальный оператор набла, при этом:
  $\nabla \times \mathbf{E} \equiv \operatorname{rot} \mathbf{E}$ означает ротор вектора,
  $\nabla \cdot \mathbf{E} \equiv \operatorname{div} \mathbf{E}$ означает дивергенцию вектора.

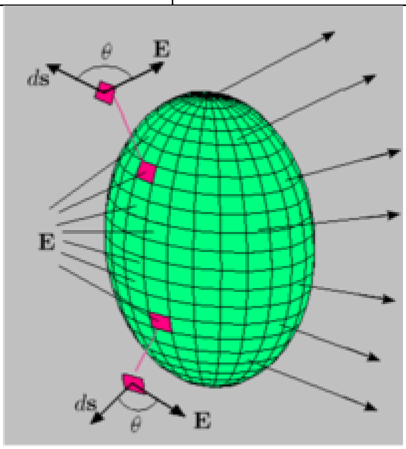
Приведённые выше уравнения Максвелла не составляют ещё полной системы уравнений электромагнитного поля, поскольку они не содержат свойств среды, в которой возбуждено электромагнитное поле. Соотношения, связывающие величины $\mathbf{E}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{D}$, $\mathbf{H}$ и $\mathbf{j}$ и учитывающие индивидуальные свойства среды, называются материальными уравнениями.

[править] Интегральная форма

При помощи формул Остроградского—Гаусса и Стокса дифференциальным уравнениям Максвелла можно придать форму интегральных уравнений:

Название	**СГС**	**СИ**	**Примерное словесное выражение**
Закон Гаусса	$\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = 4\pi Q$	$\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = Q$	Поток электрической индукции через замкнутую поверхность *s* пропорционален величине свободного заряда, находящегося в объёме *v*, который окружает поверхность *s*.
Закон Гаусса для магнитного поля	$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$	$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$	Поток магнитной индукции через замкнутую поверхность равен нулю (магнитные заряды не существуют).
Закон индукции Фарадея	$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{1}{c}\frac{d}{dt}\int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$	$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt}\int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$	Изменение потока магнитной индукции, проходящего через незамкнутую поверхность *s*, взятое с обратным знаком, пропорционально циркуляции электрического поля на замкнутом контуре *l*, который является границей поверхности *s*.
Теорема о циркуляции магнитного поля	$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \frac{4\pi}{c}I + \frac{1}{c}\frac{d}{dt}\int_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s}$	$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I + \frac{d}{dt}\int_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s}$	Полный электрический ток свободных зарядов и изменение потока электрической

			индукции через незамкнутую поверхность *s*, пропорциональны циркуляции магнитного поля на замкнутом контуре *l*, который является границей поверхности *s*.



Поток электрического поля через замкнутую поверхность

Введённые обозначения:

- s— двумерная замкнутая в случае теоремы Гаусса поверхность, ограничивающая объём v, и открытая поверхность в случае законов Фарадея и Ампера — Максвелла (её границей является замкнутый контур l).
- $Q = \int_v \rho\, dv$ — электрический заряд, заключённый в объёме v, ограниченном поверхностью s(в единицах СИ — Кл);
- $I = \int_s \mathbf{j} \cdot d\mathbf{s}$ — электрический ток, проходящий через поверхность s(в единицах СИ — А).

При интегрировании по замкнутой поверхности вектор элемента площади $d\mathbf{s}$ направлен из объёма наружу. Ориентация $d\mathbf{s}$при интегрировании по незамкнутой поверхности определяется направлением правого винта, «вкручивающегося» при повороте в направлении обхода контурного интеграла по $d\mathbf{l}$.

Словесное описание законов Максвелла, например, закона Фарадея, несёт отпечаток традиции, поскольку вначале при контролируемом изменении магнитного потока регистрировалось возникновение электрического поля (точнее электродвижущей силы). В общем случае в уравнениях Максвелла (как в дифференциальной, так и в интегральной форме) векторные функции

$\mathbf{E}, \mathbf{B}, \mathbf{D}, \mathbf{H}$ являются равноправными неизвестными величинами, определяемыми в результате решения уравнений.

Одним из решающих шагов было введение Максвеллом в его уравнения так называемого тока смещения. Рассмотрим вещество, скажем, стекло, которое не проводит электрический ток, то есть сила притяжения молекул удерживает заряженные частицы от движения. Если стекло поместить в электрическое поле, то заряды слегка сместятся из своего первоначального положения. Кратковременные движения, приводящие к смещениям электрических зарядов, представляют собой непродолжительный, но направленный поток электричества, то есть электрический ток, который и получил название тока смещения. По меткому замечанию Максвелла, «те смещения — это еще не ток в полном смысле этого слова, но это начало зарождения тока». Меняя внешнее электрическое поле, можно было бы непрерывно изменять смещение электрических зарядов, а значит, и создавать переменный ток смещения произвольной длительности.

Видные ученые — современники Максвелла, включая его наставника и друга Томсона, с большим трудом воспринимали его смелые идеи. Особое беспокойство доставлял ток смещения: поскольку стекло играло во всем вышесказанном ключевую роль, было весьма не просто принять утверждение Максвелла, что токи смещения могли бы существовать и в пустом (в смысле вещества) пространстве, заполненном одним эфиром. Не помогло даже то, что Максвелл наделил свой эфир различными физическими свойствами, но вряд ли можно было серьезно возражать против декларированной Максвеллом способности эфира проводить токи смещения. Создается впечатление, что наибольшее беспокойство у современников Максвелла вызывала роль тока смещения как настоящего тока. Например, в связи с тем, что полный ток (обычный ток + ток смещения) всегда течет по замкнутым контурам, у ученых возникал вопрос: «Каким образом теория Максвелла могла бы объяснить локальные скопления электрических зарядов?»

Было такое ощущение, что ток смещения не сообразуется с остальными максвелловскими концепциями электрического заряда и тока. Оценить в общих чертах все сложности, связанные с идеями Максвелла, позволяют следующие слова немецкого физика-экспериментатора и теоретика Генриха Герца (особенно если учесть, что Максвелл был для него кумиром): «К сожалению, слово «электричество» в работе Максвелла явно имеет двойной смысл... Если при знакомстве с объяснениями Максвеллом тех или иных явлений каждый раз интерпретировать смысл слова «электричество» подходящим к данному случаю образом, то почти все поначалу так поражающие противоречия могут быть исключены. Хотя должен признать, что лично я не преуспел в этом деле в полной мере или хотя бы в той степени, чтобы обрести внутреннее удовлетворение».

Вспомним, что сам Максвелл вовсе не настаивал на реальности и абсолютной непогрешимости своей молекулярно-вихревой модели электромагнитного эфира и перестал ею пользоваться, как только она привела его к уравнениям электромагнитного поля. Нечто похожее произошло и с мысленной конструкцией, предназначенной для объяснения такого нового понятия, как ток смещения. Когда появилась теория относительности, стало ясно, что без члена, описывающего ток смещения, уравнения Максвелла противоречили бы специальной теории относительности. Включение этого члена приводит уравнение Максвелла в полное соответствие с этой теорией. Так что конструкция, придуманная для объяснения тока смещения, несмотря на все связанные с ней проблемы, выполнила свою задачу и могла быть отброшена.

Максвелл, разумеется, не мог знать о всех этих событиях, которые произойдут много позднее. Он нашел нечто более значительное, чем думал, ибо полученные им уравнения превосходно вписались в релятивистскую теорию пространства и времени, пришедшую на смену ньютоновой, хотя все свои работы Максвелл, как до него и Френель, выполнил на основе последней. Так что ничего удивительного, что в рамках ньютоновых представлений об абсолютном пространстве и абсолютном времени теория и уравнения Максвелла были не очень-то понятными и подчас приводили его современников в замешательство.

Благодаря введению тока смещения уравнения Максвелла могут быть записаны в такой форме, когда символы, относящиеся к электричеству и магнетизму, входят в них почти совершенно одинаково, порождая формальную симметрию. С этой симметрией между электричеством и магнетизмом неразрывно связан один примечательный математический результат, суть которого состоит в том, что должны существовать электромагнитные волны, причем эти волны должны быть поперечными.

Что касается скорости распространения этих волн, то из уравнений Максвелла следует, что она должна быть равна отношению электростатической и электромагнитной единиц измерения электрического заряда. $\upsilon = q_{ст} / q_{мг}$

Первая, $q_{ст}$ определяется силой взаимодействия двух точечных покоящихся зарядов, а вторая, $q_{мг}$ силой взаимодействия двух электрических токов, то есть движущихся зарядов. В пределах погрешности эксперимента эта скорость оказалась равной величине скорости света.

Величина этого отношения была получена из классического эксперимента Вебера и Кольрауша. И что примечательно, ни свет, ни волны никакого существенного отношения к эксперименту Вебера — Кольрауша не имели. По этому поводу хорошо сказал сам Максвелл: «В этом эксперименте свет использовался исключительно для того, чтобы видеть приборы». Тот факт, что эксперимент Вебера — Кольрауша давал скорость света, многие посчитали просто

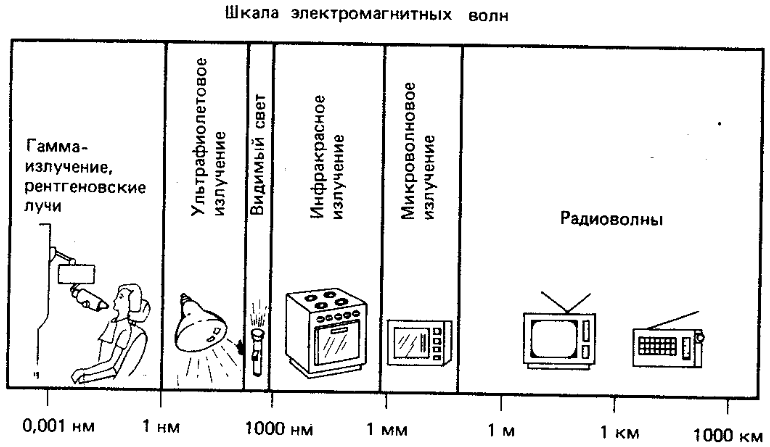


рис. 25.

совпадением.

Максвелл, исходя из этого, заявил, что свет имеет электромагнитную природу. Согласно теории Максвелла электричество и магнетизм столь тесно и симметрично взаимосвязаны, что могут рассматриваться просто как разные проявления одной единой сущности. То есть свет это уже не что-то отдельное, а всего лишь специфическое проявление электромагнетизма (рси.25). В результате Максвелл идентифицировал электромагнитный эфир со световым — носителем световых волн.

Теория Максвелла превосходно объединила в единое целое оптику и электромагнетизм, но страсти бушевали вокруг нее еще не один год. Максвелл умер в 1879 году, 49 лет от роду — слишком рано, чтобы испытать радость признания своей теории. Лишь почти через девять лет после смерти Максвелла был осуществлен прямой эксперимент, неопровержимо подтвердивший его теорию. Выполнил его уже знакомый нам Генрих Герц, который создал генератор невидимых электромагнитных волн и показал, что они ведут себя в полном соответствии с предсказаниями Максвелла. И только после этого теория Максвелла заняла подобающее ей место в науке.

Кроме того, Максвелла совершенно вне всякой связи с уравнениями электромагнитного поля интересовал вопрос о движении Земли через эфир. Он высказал предположение, что скорость этого движения можно было бы найти, измеряя времена затмений спутников Юпитера. Ремер, как мы помним, уже пытался использовать эти затмения для определения скорости света. Максвелл же нашел им иное применение.

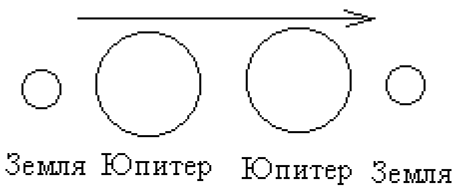


рис. 26 а рис. 26 б

Предположим для простоты, что Солнечная система движется по отношению к эфиру вправо. В случае, когда Земля и Юпитер расположатся, как на рис. 25 а, световой сигнал, несущий на Землю весть о затмении, будет лететь к Земле, движущейся к нему навстречу, а потому прибудет раньше ожидаемого момента. Однако когда Земля и Юпитер расположатся, как на рис. 26 б, сигнал о затмении будет лететь вслед за удаляющейся от него Землей, а значит, прибудет позднее ожидаемого момента времени. Так что, наблюдая с Земли за изменениями ритма затмений, можно было бы определить скорость Солнечной системы, а с ней и Земли по отношению к эфиру.

В 1879 году американский астроном Д. П. Тодд, составивший детальнейшие таблицы затмений спутников Юпитера, послал один экземпляр Максвеллу, который в ответ написал подробное письмо с выражением благодарности. Несколько месяцев спустя Максвелл умер. Тогда Тодд, поняв, что письмо Максвелла теперь приобретает особое историческое значение, направил его в Лондонское королевское общество. Оно было опубликовано в трудах этого общества, а затем перепечатано в широко известном как тогда, так и сейчас английском научном журнале «Нэйчур» («Природа»). Благодаря публикации письмо попало на глаза и привлекло внимание американского физика Альберта Майкельсона.

В своем письме Максвелл отмечал, что теоретически существует влияние движения Земли на лабораторные эксперименты по измерению скорости света, распространяющегося туда и обратно вдоль прямой, но на практике этот эффект невозможно было бы использовать для измерения скорости движения Земли относительно эфира, ибо, как писал сам Максвелл, он «слишком слаб, чтобы его можно было наблюдать». Точку зрения Максвелла нетрудно понять, если учесть, что для определения этим методом орбитальной скорости Земли необходимо уметь измерять интервалы времени порядка одной миллионной миллиардной доли секунды. Но при этом не учитывались изобретательность и смелость Майкельсона - экспериментатора. Он объявил этот эффект «легко измеримым» и немедленно засел за планирование эксперимента, который позволил бы это сделать.

Майкельсон, родившийся в 1852 году в Польше, эмигрировал в США еще ребенком вместе со своими родными. Здесь он стал лейтенантом ВВС США, а затем инструктором военно-морского училища, где со временем превратился в классного физика и крупного специалиста в области экспериментального исследования света. В 1880 году Майкельсон поехал на некоторое время в Берлин, где изобрел прибор, обладавший исключительной чувствительностью (сейчас такие приборы называются интерферометрами). С его помощью он рассчитывал выполнить упоминавшийся Максвеллом эксперимент и тем самым измерить абсолютную скорость Земли.

При создании интерферометра Майкельсона учитывалось, что, во-первых, свет распространяется с чрезвычайно огромной скоростью, а во-вторых, длина волны видимого света очень мала — около 1/20000 сантиметра. Как уже говорилось, в предложенном Максвеллом эксперименте требовалось измерять интервалы времени порядка одной миллионной миллиардной доли секунды. Такой невероятно малый интервал времени было бы невозможно измерить непосредственно, и Майкельсон решил вместо этого измерить расстояние, проходимое светом за это время. Такое расстояние приблизительно равно длине волны видимого света. В интерферометре Майкельсона в результате наложения двух лучей света возникала интерференционная картина из светлых и темных полос, которая фактически и позволяла измерять столь малые расстояния, используя в качестве масштаба длину волны видимого света.

Такая высокая чувствительность имеет и свои негативные стороны. Когда Майкельсон разместил свою аппаратуру в лаборатории Физического института в Берлине, оказалось, что никаких измерений там проводить нельзя, так как вызванные уличным движением вибрации до неузнаваемости искажали искомую интерференционную картину. Поэтому он поехал в город поменьше, в Потсдам, и установил аппаратуру в тихой подземной комнате, построенной в основании башни для телескопа. И все равно, стоило кому-нибудь пройти по тротуару, расположенному в 100 метрах от башни, и установку нужно было настраивать заново.

Максвелл умер не успев осуществить этот эксперимент, однако его идеей заинтересовался Альберт Майкельсон. Хотя Максвелл считал, что для эксперимента не существует пока достаточно точных приборов Майкелсон разработал установку способную измерять даже ничтожное изменение скорости света на основе волновой интерференции. Идея опыта Майкельсона заключался в следующем:

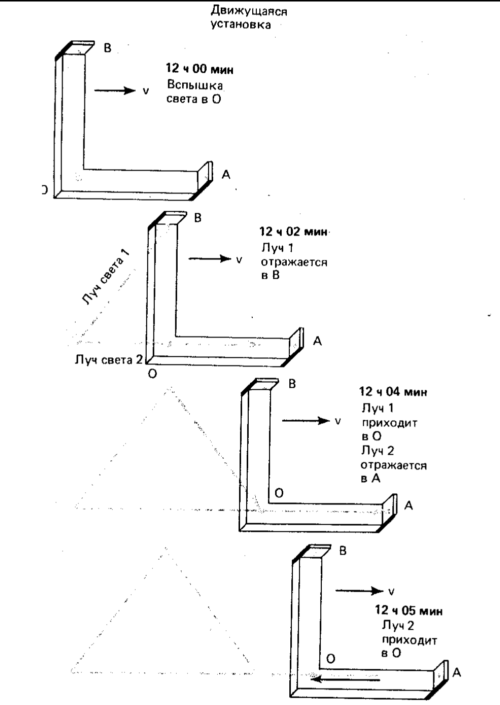


рис. 27

Пусть плечи интерферометра ОА и 0В (рис. 27) имеют одинаковые длины и расположены под прямым углом друг к другу. Если эфирного ветра нет, то свету чтобы из точки О долететь до зеркал в точках А и В и вернуться обратно нужно одинаковое время,. Теперь предположим, что Земля движется по отношению к эфиру вправо. В этом случае чтобы свет попал на движущееся зеркало А, нужно нацелить луч не перпендикулярно к плечу ОА, а немного вперед (это очень похоже на явление аберрации). Но время прохождения света отрезка ОА увеличивается, а это означает, что времена движения света вдоль плеч интерферометра теперь будут разными. Измеряя эту разницу во времени можно определить скорость Земли относительно эфира. Однако подобная установка дает возможность определить только линию движения Земли, но не направление, поскольку в одном случае будет

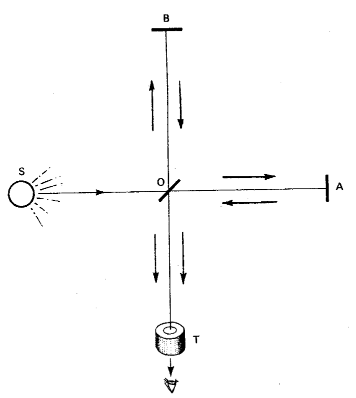


рис. 28

затрачено больше время на путь от О до А, а если установку развернуть на 180^0, то увеличится время на путь АО.

Что касается подробностей устройства экспериментальной установки, то она состояла из полупрозрачного зеркала, расположенного в точке О, я двух обычных зеркал в точках А я В (рис. 28). В эксперименте луч света от источника S расщеплялся полупрозрачным зеркалом О на два: один проходил сквозь это зеркало и после отражения от зеркала А возвращался обратно, а второй луч отражался от полупрозрачного зеркала, долетал до зеркала В и возвращался обратно. Если эти лучи проходили одинаковые расстояния, то световые волны возвращались, так сказать, «в ногу» и возникала интерференционная картина, представлявшая собой яркую центральную полосу, окруженную с обеих сторон чередующимися темными и светлыми полосами. Эта картина должна была наблюдаться через трубу, расположенную в точке Т**.** Если путь одного из лучей стал бы длиннее, чем у другого, то вся интерференционная картина сдвинулась бы в сторону. Это проще всего понять, если рассмотреть специальный случай, когда путь одного луча на полволны длиннее другого. Теперь на месте бывшей яркой полосы, куда оба луча приходили «в ногу», будет темная полоса, ибо световые волны придут сюда совершенно «не в ногу»: когда у одного луча в этой точке будет гребень, у другого будет впадина, и наоборот, так что они уничтожат друг друга. По той же причине на месте темной полосы теперь будет светлая. Таким образом, в нашем специальном случае интерференционная картина сдвинется на половину расстояния между двумя ближайшими светлыми полосами.

Однако в эксперименте не было обнаружено никаких признаков того, что Земля движется по отношению к эфиру. Эксперимент Майкельсона—Морли был экспериментом второго порядка, то есть позволял зарегистрировать эффекты порядка не υ/c, а $(\upsilon/c)^2$, то есть много меньшие чем те, на которых была основана теория Френеля.

Майкельсон опубликовал отчет об эксперименте 1881 года, где с уверенностью утверждал, что из этого эксперимента не следует никаких указаний на движение Земли относительно эфира. Однако оказалось, что он допустил в своих расчетах ошибку и был вынужден пересмотреть величину ожидаемого влияния орбитального движения Земли на показания интерферометра. Правильное значение составляло лишь половину ошибочно полученной величины, так что эксперимент оказался бездоказательным. Но идея эксперимента была верна и не оставляла никаких сомнений, что при небольшом увеличении чувствительности можно будет надежно установить абсолютное движение Земли, если оно, конечно, существует.

В 1887 году Майкельсон совместно с присоединившимся к нему химиком Эдвардом Морли провели в школе прикладных наук Кейза в Кливленде (штат Огайо) повторный эксперимент, в котором аппаратура была значительно чувствительнее по сравнению с предыдущим, и поэтому отсутствие в этот раз влияния движения Земли на показания интерферометра было всеми признано безоговорочно. Хотя существование аберрации света вроде бы указывало на то, что эфир должен был свободно проходить сквозь вещество. Следовательно, когда мы вместе с Землей движемся сквозь эфир, нас должен «обдувать» эфирный ветер, от которого ничем нельзя заслониться. Всевозможные эксперименты первого порядка не смогли зарегистрировать этот эфирный ветер, но это можно было объяснить с помощью идеи Френеля о существовании наряду со свободным эфиром еще и эфира, увлекаемого веществом.

Признание отрицательного результата эксперимента Майкельсона — Морли породило новую проблему. Согласно теории аберрации света должен был бы существовать эфирный ветер, тогда как из эксперимента Майкельсона—Морли следовало, что его на самом деле нет.

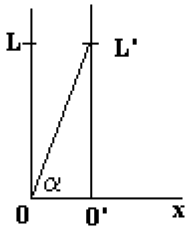
Общая теория относительности.
Преобразование Лоренца.

В 1902 году, через пятнадцать лет после эксперимента, проведенного совместно с Морли, Майкельсон писал: «Этот эксперимент интересен мне лишь в плане чисто историческом, да и то потому, что он *был* поставлен в связи с проблемой движения через эфир, для решения которой был придуман интерферометр. По-видимому, следует признать, что вызванное этой проблемой изобретение интерферометра вполне компенсирует тот факт, что эксперимент дал отрицательный результат»

Можно понять причину разочарования Майкельсона. Он рассчитывал первым обнаружить движение Земли относительно эфира, но единственное, чего он добился, как это ему представлялось, — всего лишь доказать, что эфир не проходит свободно сквозь вещество, а переносится вместе с ним.

Вскоре после эксперимента Майкельсона - Морли ирландский физик Джордж Фитцджеральд высказал в своих лекциях предположение, что отрицательный результат этого эксперимента можно было бы понять, если бы оказалось, что движение объекта через эфир ведет к сокращению длины объекта в направлении его движения в $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ раз, где v — скорость его движения относительно эфира, а c — скорость света. Если ℓ - длина неподвижного тела, а ℓ' – длина движущегося тела, то $\ell' = \frac{\ell\sqrt{c^2-\upsilon^2}}{c}$. Для доказательства этого утверждения вычислим время прохождения луча света вдоль плеч интерефмометра с учетом движения через эфир и потребуем, чтобы они были равны.

Рассмотрим плечо перпендикулярное движению



Расстояние 0’-0=vt* где t* - время необходимое лучу света, чтобы пройти расстояние L=0L’ в подвижной системе координат. Длина отрезка $0L' = \sqrt{L^2 + (vt^*)^2} = ct^*$, откуда $t^* = \frac{L}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{L'}{c}$. Соответственно, время на путь от источника до зеркала и обратно будет в два раза большим t’=2t*.

Рассмотрим плечо параллельное движению через эфир, время прохождения луча вдоль этого плеча до зеркала и обратно будет разным:

t_1: $ct_1 = L + vt_1$ => $t_1 = L/(c-v)$; t_2: $ct_2 = L - vt_2$ => $t_2 = L/(c+v)$; откуда общее время

$$t'' = t_1 + t_2 = \frac{c}{c^2 - v^2}2L = \frac{2L''}{c}.$$

Поскольку скорость света постоянна, то за одинаковые промежутки времени он должен проходить одинаковые расстояния. То есть если t’=t”, тогда L’=L”. Чтобы эти расстояния совпали введем коэффициент сжатия α, тогда приравнивая L’и L” получаем

$$\alpha L'' = \alpha\frac{c^2}{c^2 - v^2}L = \frac{c}{\sqrt{c^2 - v^2}}L = L'$$

Очевидно, что если среднее равенство выполняется то $\alpha = \frac{\sqrt{c^2 - v^2}}{c}$. То есть для объяснения результатов эксперимента Майкельсона – Морли необходимо принять, что при движении через эфир длина L” должна измениться в α раз, что совпадает с начальным утверждением.

Для обычных скоростей, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни, это сокращение будет пренебрежимо малым. Даже Земля, которая довольно быстро движется по своей орбите вокруг Солнца, и та сократится в направлении своего движения всего на 6 сантиметров или что-то около этого, то есть на длину травинки. Но для скоростей, близких к скорости света, это сокращение будет значительным, ну а при движении со скоростью света все длины в направлении движения должны были бы сократиться до нуля. Такое сокращение длин точно и полностью компенсировало бы эффект второго порядка, поиски которого и стимулировали проведение эксперимента Майкельсона—Морли. Но к величайшему огорчению Фитцжеральда, большинство его коллег подсмеивались над идеей сокращения длины.

Вскоре этой проблемой заинтересовался Лоренц. Он был тогда крупнейшим в мире специалистом по электромагнитной теории Максвелла. Он исследовал вопрос, какие изменения претерпели бы уравнения Максвелла при переходе к лаборатории, которая равномерно движется относительно эфира.

Рассмотрим две системы координат неподвижную x,y,z, и подвижную x’.y’,z’, которая движется равномерно в положительном направлении оси x со скоростью v (рис.29). Будем также считать, что в начальный момент времени эти системы совпадали.

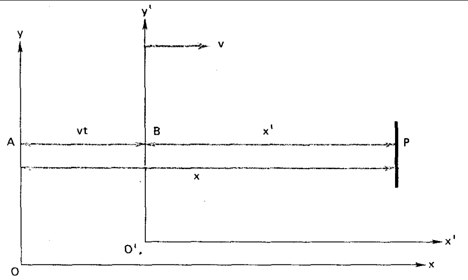


рис. 29

При переходе от одной системы координат к другой выполняются соотношения, которые называется преобразованиями Галилея:

x'=x-vt, y'=y, z'=z, или, что эквивалентно,

x=x'+vt, y=y', z=z'. При этом предполагается, что t’=t. Предположим далее, что наблюдатель в неподвижной системе отсчета установил закон движения некоторой частицы x=y. Тогда в подвижно системе отсчета это уравнение после применения преобразований Галилея преобразуется к виду x'+ vt=y'.

Помимо штрихов, соотношение $x'+vt=y'$ отличается от «закона» $x=y$ наличием члена *vt,* содержащего величину *v,* а это означает, что оно зависит от относительной скорости движения двух систем отсчета.

Поскольку *v* не входит в нештрихованное уравнение, то нештрихованная система отсчета оказывается в некотором смысле привилегированной, и ее обычно считали покоящейся в абсолютном пространстве или в эфире. Тогда штрихованная система отсчета равномерно движется относительно абсолютного пространства или эфира.

Допустим, что наблюдатель, находящийся в подвижной системе отсчета, выполняет эксперимент по измерению координат x' и y' свободной частицы в некоторый момент времени *t.* Предположим, наблюдатель нашел, что при t=1 частица находится в точке с координатами x'=4 и y'=10. Тогда, подставляя эти значения в штрихованное уравнение, наблюдатель, находящийся в штрихованной системе отсчета, получит равенство 4+v=10, из которого следует, что v=6. Таким образом, измеряя исключительно штрихованные величины, наблюдатель, находящийся в штрихованной системе отсчета, может найти абсолютную скорость подвижной системы.

Рассмотрим теперь законы Ньютона. Их можно записать с помощью координат x, y, z и t, принадлежащих нештрихованной системе отсчета, которую мы будем считать покоящейся в абсолютном пространстве. Если воспользоваться преобразованиями Галилея, чтобы найти вид уравнений (а значит, и физические законы) в равномерно движущейся системе отсчета, то окажется, что штрихованные уравнения в точности такие же, как и нештрихованные (т.к. при дифференцировании t пропадает).

Поскольку v в штрихованные уравнения не входит, никакие экспериментальные измерения штрихованных величин не позволят найти значение величины v.

С точки зрения пассажира плавно летящего самолета, нет ничего удивительного в том, что в равномерно движущейся штрихованной системе отсчета совершенно отсутствуют какие-либо указания на ее движение со скоростью *v.* В этом и состоит математическая формулировка принципа относительности, полученная Ньютоном из его законов.

Если уравнения, выражающие законы Ньютона, являются основой механики, то уравнения Максвелла являют собой основу законов электромагнетизма. Если подвергнуть их преобразованиям Галилея, то окажется, что штрихованные уравнения содержат v в виде комбинаций как первого v/c, так и второго $(v/c)^2$ порядков. Тогда наблюдатель, находящийся в движущейся системе отсчета, оказывается в состоянии найти v, выполняя электромагнитные (включая и оптические) эксперименты.

Иначе говоря, он способен обнаружить эфирный ветер, возникающий при его движении через эфир. Однако, как нам уже известно, все эксперименты первого порядка, предпринятые с целью регистрации эфирного ветра, потерпели неудачу.

Лоренц внес изменения в преобразования Галилея, заменив равенство t' = t более сложным соотношением $t'=t-vx/c^2$ (второе слагаемое также имеет размерность времени). Так как в первую часть этого соотношения входит координата x, то новая величина *t'* зависит от местоположения. Поэтому и чтобы отличать его от «истинного» универсального времени *t,* Лоренц назвал *t'* «местным» временем. Затем он показал, что уравнения Максвелла, после преобразований по новым формулам, сохраняют форму, и остаются слагаемые, содержащие v лишь в виде комбинаций v^2/c^2.

Поскольку в преобразованных уравнениях Максвелла отсутствуют члены (v/c), невозможно с помощью электромагнитных экспериментов первого порядка определить скорость движущейся системы отсчета относительно неподвижной.

Таким образом, для объяснения отрицательных результатов экспериментов первого порядка, поставленных с целью обнаружить эфирный ветер, использовалась гипотеза Френеля, а для объяснения результатов экспериментов второго порядка (Майкельсона—Морли), использовалась гипотеза о сокращении длин объектов в направлении их движения. Такой «лоскутный» подход критиковал выдающийся французский математик, физик-теоретик Анри Пуанкаре, который считал, что существует общее объяснение всем неудачам в экспериментах. Эта критика оказала серьезное влияние на Лоренца

В 1904 г., в статье «Электромагнитные явления в системах, движущихся с произвольной скоростью, меньшей скорости света» Лоренц предложил общий подход, объясняющий неудачи экспериментов 1 и 2 рода с помощью следующих преобразований:

$$x' = \beta(x - vt), y' = y, z' = z, t' = \beta(t - vx / c^2)\text{, } \textbf{\textit{где}}\ \beta = 1/\sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

Рассмотрим вывод этих преобразований.

Пусть имеются две системы координат: неподвижная S(x,y,z) и подвижная S'(x',y','z'), оси которых совпадают в начальный момент времени. Для определенности пусть подвижная система координат движется вдоль оси x неподвижной со скоростью v_0. Рассмотрим световую сферическую волну, которая начиная с начального момента времени распространяется из начала неподвижной системы координат. Уравнение фронта этой волны в неподвижной системе координат будет иметь вид:

$$x^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$$

а в подвижной системе

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - R'^2 = 0$$

Приравнивая правые части уравнений, получаем:

$$x^2 + y^2 + z^2 - R = x'^2 + y'^2 + z'^2 - R' \qquad (1)$$

Дано соотношение получено в предположении что время во всех системах отсчета течет одинаково, то есть выполняется условие:

$$t = t'$$

Радиус волны увеличивается по закону $R = ct$,поэтому соотношение (1) можно переписать в виде:

$$x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 - (ct)'^2 \qquad (2)$$

Между координатами подвижной и неподвижной системы, согласно преобразованиям Галилея существует следующая зависимость:

$$x' = x; y' = y; z' = z - \upsilon_0 t; t = t'.$$

Подставляя выражение для штрихованных координат в правую часть (2) получаем.

$$x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2 = x^2 + y^2 + (z - \upsilon_0 t)^2 - (ct)'^2 \qquad (3)$$

Для того чтобы равенство сохранилось необходимо принять, что $t \neq t'$, то есть время течет по-разному в разных системах отсчета и тогда выполняются равенства

$$R = ct,\ R' = ct'.$$

Для симметрии записи представим минус перед последним слагаемым как квадрат мнимой единицы. Тогда получим

$$x^2 + y^2 + z^2 + (ict)^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 + (ict)'^2 = const.$$

Последнее равенство означает линейность преобразований метрических координат относительно координат и времени.

Общий вид линейного преобразования представлен выражением

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \tag{4}$$

Лоренц предложил, временную координату, поскольку она имеет размерность длины, преобразовывать по таким же формулам, что и пространственные координаты, т.е.

$$\mathrm{ict}' = \mathrm{b}_{41}\mathrm{x} + \mathrm{b}_{42}\mathrm{y} + \mathrm{b}_{43}\mathrm{z} + \mathrm{b}_{41}\mathrm{t}$$

В последнем равенстве в левой части стоит выражение, которое имеет только мнимую часть. Тогда коэффициенты b_{4i} так же должны быть мнимыми. Что бы не вводить в действительную матрицу преобразования строку с мнимыми коэффициентами проведем замену

$$a_{4k} = \frac{b_{4k}}{ic}$$

и в результате получим

$$t' = a_{41}x + a_{42}y + a_{43}z + a_{41}t.$$

Добавляя дополнительную строку в матрицу закона (4), получаем

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ t' \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{pmatrix} \tag{5}$$

Таким образом, время в преобразованиях Лоренца подчиняется тем же законам, что и пространственные координаты.

Рассмотрим частный случай преобразования Лоренца при поступательном движении подвижной системы координат вдоль оси z. В этом случае выполняются соотношения $x' = x; y' = y'$, т. е. в материце А выражения (5) в первых двух строках на главной диагонали расположены единицы и оставшимися ненулевыми компонентами будут коэффициенты связывающие z и t.

$$\begin{cases} z' = a_{33}z + a_{34}ict \\ ict' = a_{43}z + a_{44}ict \end{cases} \tag{6}$$

Из алгебры известно, что система (6) описывает поворот подвижной системы координат в плоскости z,t (рис. 30)

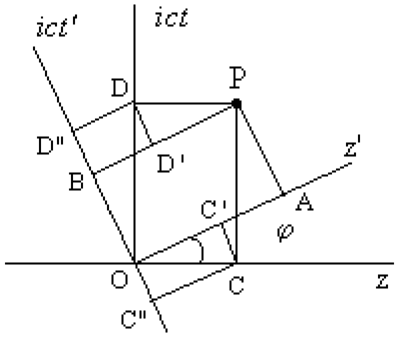


Рис. 30

Согласно рис. 30

z'_P=OA=OC'+C'A, $OC' = OC\cos\varphi = z_P\cos\varphi$, $C'A = PC\sin\varphi = (ict)_P\sin\varphi$

$(ict)'_P$=BO=D"O-D"B=D"O-OC", поскольку треугольники DD'P и OCC" равны.

$D''O = DO\sin\varphi = (ict)_P\cos\varphi$, $OC'' = CC' = OC\sin\varphi = z_P\cos\varphi$.

Окончательно получаем

$$\begin{cases} z' = z\cos\varphi + ict\sin\varphi \\ ict' = -z\sin\varphi + ict\cos\varphi \end{cases} \tag{7}$$

Таким образом, коэффициенты матрицы преобразования определены с точностью до угла φ. Для определения этого угла рассмотрим точку, находящуюся в начале подвижной системы координат. Для нее выполняется условие

$$z' = 0 \Rightarrow z = \upsilon_0 t$$

Подставляя это условие в первое уравнение системы (7), получаем

$$0 = \upsilon_0 t\cos\varphi + ict\sin\varphi.$$

Сокращая на t, получим выражения для $tg(\varphi)$: $tg(\varphi) = -\frac{\upsilon}{ic} = \frac{\upsilon i}{c}$.

Воспользуемся связью между тригонометрическими функциями

$$\cos(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{1+tg^2(\varphi)}} = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}};\ \sin(\varphi) = \left(\frac{\upsilon i}{c}\right)\frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}}.$$

Подставляя полученные выражения в (7) приходим к окончательному виду преобразований Лоренца для одномерного прямолинейного движения подвижной системы координат.

$$z' = \frac{z + ict(\upsilon i/c)}{\sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}} = \frac{z - \upsilon t}{\sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}};\ ict' = \frac{-z(\upsilon i/c) + ict}{\sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}} \Rightarrow t' = \frac{t - z(\upsilon/c^2)}{\sqrt{1-\left(\frac{\upsilon}{c}\right)^2}}.$$

В 1905 году Анри Пуанкаре называть их преобразованиями Лоренца. Ограничение на скорость было введено, в основном, из-за того, что при скорости света длины сокращаются до нуля.

Если к уравнениям максвелла применить эти преобразования, определяющие переход от неподвижной системы координат к подвижной, то окажется, что в новых переменных отсутствуют не только слагаемые порядка v/c как в преобразованиях Галилея, но и $(v/c)^2$ и более высоких порядков. Таким образом, любые механические и электромагнитные эксперименты, не позволяют определить равномерное движение земли относительно эфира.

Рассмотрим результаты эксперимента Майкельсона – Морли с учетом преобразований Лоренца.

В лаборатории, покоящейся относительно эфира, он должен давать отрицательный результат. Другими словами, в такой лаборатории два луча, совершив в интерферометре Майкельсона свои «путешествия» туда в обратно, должны были бы вернуться в исходную точку в один и тот же момент «истинного» времени. В движущейся лаборатории эксперимент дал бы те же результаты, если пользоваться «местным» временем и сокращением длин.

Однако при равномерном движении одинаковым промежуткам «местного» времени соответствуют одинаковые промежутки «истинного» времени.

Пример луч света вылетает из точки 0

Замер 1 $x_{под}=L$, $t_и=L/(c-v)$, $t_м=t_и-vL/c^2$.

Замер 2 $x_{под}=2L$, $t_и{*}= 2L/(c-v)=2t_и$, $t_м{*}=2t_и-v2L/c^2=2t_м$

Таким образом, даже в равномерно движущейся лаборатории обоим лучам на их «путешествия» туда и обратно понадобятся одинаковые промежутки «истинного» времени, то есть не будет обнаружено движение Земли относительно эфира. Подобный способ рассуждений применим к любому эксперименту, в котором «местные» времена сравниваются в фиксированных точках лаборатории.

С учетом отрицательных результатов проведенных экспериментов и интерпретацию, данную им Лоренцем, возникает соблазн распространить на область электромагнитных явлений ньютонов принцип относительности, который использовался для описания только относительности механического движения.

Однако все не так просто, поскольку для объяснения невозможности обнаружить скорость подвижной системы внутри нее в механических экспериментах используют преобразования Галилея, а в электромагнитных - преобразования Лоренца.

И вот теперь в нашем повествовании появляется Альберт Эйнштейн. Он родился 14 марта 1879 года (именно в этот год не стало Максвелла) в Германии, в небольшом городе Ульме. В раннем детстве он не отличался ничем таким, чего можно было бы ожидать от человека, принадлежащего к числу величайших ученых в истории науки. Когда ему минуло три года, он все еще не умел разговаривать. Позже ему претили царившие в немецких школах порядки и методы обучения — необходимость соблюдения жесточайшей дисциплины и зубрежка. И учитель как-то сказал Альберту, что ничего путного из него не получится. В конце концов, Эйнштейн бросил школу и решил поступать в цюрихское Федеральное высшее политехническое училище, но провалился на вступительных экзаменах. Когда же он, наконец, поступил, то начал частенько пропускать занятия, чем вызывал серьезное недовольство преподавателей, причем с некоторыми из них он просто конфликтовал. К счастью, Эйнштейн крепко подружился со своим однокашником Марселем Гроссманом, ибо если бы не его конспекты лекций, кто знает, смог ли бы Эйнштейн вообще закончить это училище.

Необходимость зубрежки в период сдачи курсовых экзаменов была ему столь отвратительна, что Эйнштейн почти целый год после этого не мог себя заставить снова заняться размышлениями о научных проблемах. После окончания училища он не смог получить академическую должность, так что ему пришлось некоторое время перебиваться частными уроками и преподаванием математики в техникуме города Винтертура. Лишь в 1902 году Эйнштейн, с помощью Гроссмана, получил место технического эксперта третьего класса в Швейцарском патентном бюро.

Но этот портрет Эйнштейна, конечно же, неполный и односторонний. Например, можно было бы отметить, что в пятилетнем возрасте он получил в подарок от отца карманный компас. Вид магнитной стрелки, совершенно изолированной от внешнего мира корпусом и стеклом компаса и без какой бы то ни было видимой причины все время указывающей на север, привел его в состояние такого восторга и изумления, которое сохранилось на всю оставшуюся жизнь. Позже. в двенадцать лет, потрясающее впечатление на Альберта произвел случайно попавший ему в руки учебник геометрии. Вполне вероятно, что знакомство с множеством замечательных теорем, выведенных из небольшого числа простых аксиом, послужило ему впоследствии указанием на необходимость построения научных теорий на основе простых и универсальных принципов, играющих роль, аналогичную аксиомам в геометрии.

Эйнштейн упорно пропускал занятия в Федеральном высшем политехническом училище, предпочитая самостоятельное изучение наук и проведение экспериментов в лабораториях училища. Так что в некотором смысле он был самоучкой. В период работы в патентном бюро Эйнштейн продолжал с увлечением заниматься наукой. Величайшего расцвета его гений достиг в 1905 году. Вспомним, нечто подобное уже было в истории науки: в годы страшной чумы, обручившейся на Англию, Ньютон, укрывшись от нее в тиши Вулсторпа, погрузился в свои размышления об устройстве мира. Первые же статьи Эйнштейна, опубликованные в 1905 году, были одними из наиболее смелых его работ. Они, как и другие его статьи тех лет, были опубликованы в известном немецком научном журнале «Аннален дер Физик». Когда в 1921 году Эйнштейну была присуждена Нобелевская премия по физике, то единственным пунктом его работы, удостоенным особого внимания, была формула, выведенная в первой же его статье 1905 года. Но эта статья не имела никакого ношения к теории относительности.

Эйнштейна заинтересовала статься немецкого физика Макса Планка, который столкнулся с трудностями объяснения новых экспериментальных данных, касающихся излучения сильно нагретых тел. Чтобы объяснить результаты этих экспериментов, он выдвинул предположение, что энергия поглощается и излучается веществом не непрерывно, а дискретными (отдельными) порциями, которые Планк назвал квантами.

Понять всю необычность и революционность этого шага нам поможет аналогия с детскими качелями. Идея Планка в некотором смысле аналогична утверждению, что размах может быть равен 1 метру, 2 метрам, 3 метрам и так далее, но ни в коем случае не промежуточным значениям.

Единственным человеком, воспринявшим эту гипотезу всерьез, был патентный эксперт Альберт Эйнштейн. Полностью сознавая неопровержимость свидетельств в защиту волновой теории света, Эйнштейн привел убедительные доводы в пользу того, что свет, тем не менее, должен рассматриваться как нечто, состоящее из частиц. Прошло около двадцати лет, прежде чем эта удивительная идея получила всеобщее признание ученых.

Во второй работе Эйнштейна, опубликованной в 1905 году, был предложен новый способ определения размеров молекул. Третья касалась поведения пылинок и подобных им образований в жидкости. Если, как утверждает молекулярная кинетическая теория, жидкость состоит из хаотически движущихся молекул, то бомбардировка ими частичек пыли должна вынуждать эти пылинки совершать непрерывные беспорядочные и зигзагообразные движения. Такое движение обнаружил в 1827 году шотландский ботаник Роберт Броун. Когда же формула Эйнштейна, описывающая броуновское движение, была в 1908 году проверена и подтверждена экспериментально французским ученым Жаном Перри, многие ведущие ученые, которые тогда все еще сомневались в реальности атомов, были наконец вынуждены признать, что атомы на самом деле существуют.

В1905 году, в журнале «Аннален дер Физик» была опубликованы 4 работы Эйнштена, последняя из которых называлась «К электродинамике движущихся тел». В ней было изложено как раз то, что теперь называют специальной теорией относительности.

Почти одновременно направил в печать свою объемистую статью Анри Пуанкаре. Причем в ней содержались не только многие математические результаты, изложенные в эйнштейновской работе, но и ряд других математических выводов, которые у Эйнштейна отсутствуют. И все же приоритет в создании теории относительности приписывают Эйнштейну.

Надо сказать, что Лоренц и Пуанкаре опирались в своих рассуждениях на теорию электромагнетизма, и их результаты следует рассматривать как продукт этой теории.

Эйнштейн вывел в ней преобразования Лоренца, исходя из двух своих фундаментальных принципов, и таким образом показал, что именно преобразования Лоренца, а не преобразования Галилея описывают универсальные взаимосвязи, отражающие особенности пространства и времени, и поэтому преобразования Лоренца применимы не только в электродинамике, но и во всей физике вообще. Первый принцип, который он назвал принципом относительности гласит: неускоренное движение лаборатории никак не влияет на что бы то ни было происходящее внутри нее. В отличие от Ньютона, Эйнштейн распространил принцип относительности не только на механические, но и на все другие явления, включая электромагнитные и оптические. По-другому принцип относительности гласит: законы физики одинаковы во всех неускоренных системах отсчета.

Второй из двух сформулированных в статье Эйнштейна принципов утверждает, что распространение света не зависит от движения его источника. То есть, будучи однажды испущены, световые волны уже никак не связаны со своим источником и существуют сами по себе, распространяясь со скоростью, определяемой упругими свойствами эфира.

По поводу второго принципа можно высказать множество разных суждений и замечаний. Так, например, если свет состоит из частиц, как предположил Эйнштейн в своей первой статье, то этот принцип выглядит совершенно абсурдно, поскольку скорость частицы зависит от движения испустившего ее объекта. К тому же если считать, что свет состоит из частиц, подчиняющихся законам Ньютона, а тем самым и ньютоновому принципу относительности, то этого вполне достаточно, чтобы объяснить отрицательный результат эксперимента Майкельсона—Морли, не апеллируя к сокращениям длин, «местному» времени и преобразованиям Лоренца.

Идея световых волн в эфире послужила Эйнштейну лишь отправной точкой, так как уже в самом начале своей статьи он заявил: «Введение светового эфира является излишним». Такой вывод, конечно,— продукт экстраординарной интуиции. Разве не достойна удивления способность Эйнштейна найти пару фундаментальных принципов, каждый из которых выглядит совершенно безобидно, но вместе образующих взрывчатую смесь, способную поколебать самые основы науки?

Рассмотрим следствия этих принципов.

Следствие 1. Предел скорости.

Пример 1. Рассмотрим две ракеты около некоторой звезды. Предположим, что одна приближается к ней со скоростью 0,2 скорости света, а вторая неподвижна. Пусть теперь в этих ракетах выполнены одинаковые эксперименты по измерению скорости света. После включения источника света в передней части ракеты замеряется время прохождения световых волн до задней части. Они должны дать одинаковые результаты.

Согласно второму принципу Эйнштейна световые волны пойдут с одинаковой скоростью как от звезды, так и от источников в ракетах. Поэтому в движущейся ракете эксперимент должен показать 1.2с, но это запрещает 1 принцип Эйнштейна. Поскольку выполнены одинаковые эксперименты, и ракета летит не ускорено результаты экспериментов должны совпадать.

Можем рассмотреть эту ситуацию с другой точки зрения. Если бы удалось установить, что скорость набегающих волн равна 1.2с, то скорость догоняющих волн должна быть равна 0.8с, а следовательно можно определить скорость движения ракеты в эфире, что запрещает отрицательный результат эксперимента Макельсона – Морли.

Пример 2. Разность скоростей двух ракет не может быть больше скорости света.

Пусть ракеты А и В в начальный момент времени находились на одной линии и с обеих ракет в перед были посланы световые волны. Пусть $\upsilon_A > \upsilon_B$, $\upsilon_A, \upsilon_B = const$. Поскольку выполнены одинаковые эксперименты скорость света относительно обеих ракет будет одинакова, следовательно даже ракета с большей скоростью не сможет догнать световую волну, т.е. $\upsilon_A < \upsilon_B < c \Rightarrow \upsilon_B - \upsilon_A < c$.

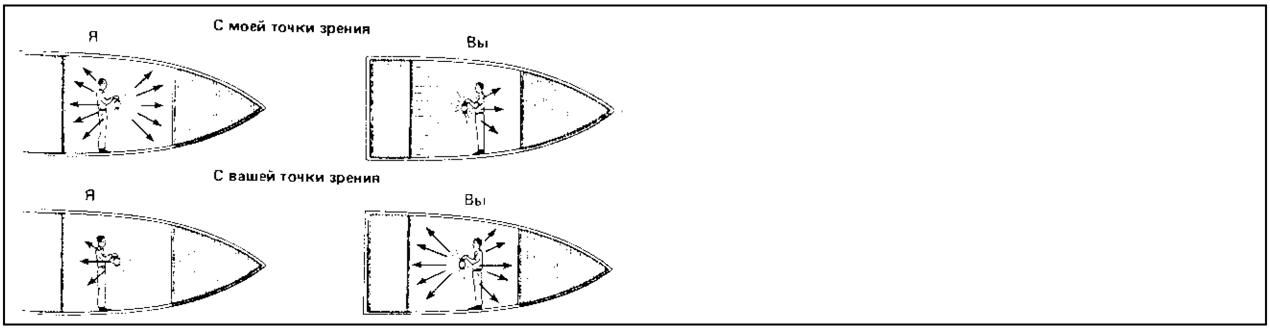
В теории относительности скорость света является предельной величиной. Причем свет здесь рассматривается как носитель взаимодействия между двумя телами.

Переформулируя утверждение о скорости света получим: «Никакое тело не может двигаться быстрее чем распространяется воздействие этого тела на окружающее пространство» Если бы удалось установить, что существует взаимодействие, которое передается быстрее света (гравитация), то предельной была бы скорость этого взаимодействия.

Косвенные возражения – сверхзвуковые полеты возможны, хотя они описываются другими уравнениями, нежели дозвуковые (звук – чисто волна, свет поток квантов – другие законы существования).

Следствие 2. Относительность одновременности (времени).

Рассмотрим две ракеты с наблюдателями, одна из которых движется со скоростью v, а другая неподвижна. В начальный момент времени (когда ракеты поравнялись) в центрах ракет включили источники света. Достижение световых волн передней стенки движущейся ракеты назовем событием А, а задней стенки – событием Б. Поскольку свет относительно источника распространяется во все стороны с одинаковой скорость с (сл.1 прим.1), то с точки зрения наблюдателя в движущейся ракете события А и Б одновременны. Рассмотрим теперь неподвижного наблюдателя. С его точки зрения свет от источника в подвижной ракете так же распространяется во все стороны со скоростью с. Следовательно, лучи света достигнут передней и задней стенок ракеты в разные промежутки времени, поскольку скорость волны движущейся относительно подвижной ракеты вперед - c-v, назад c+v. То есть события А и Б не одновременны. Такой же парадокс возникнет, если рассматривать тот же эксперимент в неподвижной ракете глазами подвижного наблюдателя.

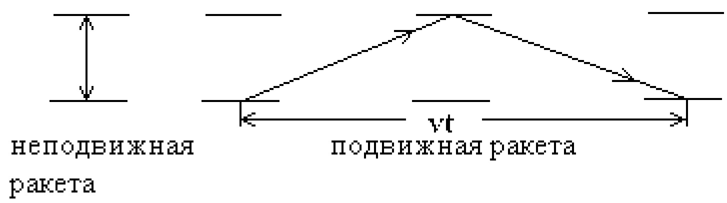


Принцип относительности утверждает, что оба наблюдателя равноправны. Нельзя считать, что один является некоторым эталоном. Отсюда следует вывод, что если два наблюдателя движутся относительно друг друга равномерно, то пространственно разделенные события, одновременные для одного из них, в общем случае не одновременны для другого, и наоборот.

Обратите внимание на то, как относительность одновременности разрушает ньютоновы представления. Оперируя понятием абсолютного времени можно было бы раз и навсегда решить, одновременны или нет произошли те или иные события, даже если они пространственно разделены: они одновременны если произошли в один и тот же момент абсолютное времени. В теории же относительности, принимая во внимание относительность одновременности, можно сказать, что относительно само время.

Относительность одновременности не просто низвергает ньютоновы принципы, она опрокидывает все наши повседневные представления о смысле и поведении времени и приводит, казалось бы, к неправдоподобным ситуациям, с некоторыми из которых, но далеко не со всеми, мы уже столкнулись.

Следствие 3. Замедление времени.

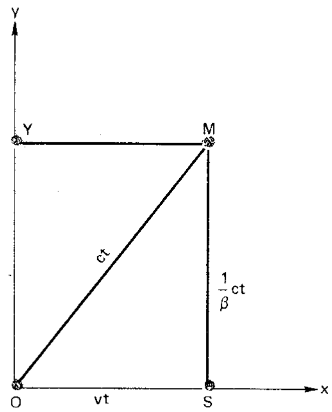


Рассмотрим два параллельных зеркала установленных друг против друга, между которыми «бегает» световая волна. Эту конструкцию можно рассматривать как световые часы, поскольку времена прохождения волны между зеркалами «туда» и «обратно» будут одинаковыми. Событию «Тик» соответствует касание луча одного зеркала, а событию «Так» – другого. Пусть одни такие часы расположены в движущейся ракете, а другие в неподвижной так, что световые волны двигаются перпендикулярно движению ракеты.

С точки зрения неподвижного наблюдателя световые волны на движущейся ракете будут не вертикальными, а падающими на зеркала под некоторым углом. То есть расстояния проходимое светом между зеркалами будет больше чем в неподвижной ракете. Но свет по отношению к обоим наблюдателям движется с одной и той же скоростью с. Следовательно между «Тик» и «Так» будут большие промежутки времени и можно сказать, что часы в движущейся ракете будут отставать с точки зрения неподвижного наблюдателя. Причем коэффициент отставания будет $\beta = \frac{c}{\sqrt{c^2 - v^2}} > 1$.

Допустим, что ракеты движутся относительно друг друга со скоростью, 4c/5. Тогда, принимая во внимание, что + можно сказать, что пока в неподвижной ракете часы «тикали» пять раз в подвижной - всего три раза. Коэффициент замедления β имеет смысл отношению расстояний необходимых свету для прохождения между подвижными и неподвижными зеркалами. Между неподвижными зеркалами свет проходит расстояние OY, а между подвижными (с точки зрения неподвижного наблюдателя) – OM. Поскольку скорость света постоянна, время затраченное на путь OM будет больше. Из постоянства скорости следует что отношение времен будет равно отношению расстояний, которые связаны как катет и гипотенуза в прямоугольном треугольнике (рис.). Отсюда вытекает формула для β.

Поскольку наблюдатели равноправны, то и подвижный наблюдатель отметит замедление времени неподвижной ракете.



Эффект замедления времени никак не связан с устройством световых часов. Чтобы удостовериться в этом, допустим, что кварцевые часы стоят рядом со световыми в подвижной ракете и отсчитывают одинаковые промежутки времени. С точки зрения подвижного наблюдателя показания часов совпадут при любой скорости. Значит, и с точки зрения неподвижного наблюдателя показания часов также совпадут, и, следовательно, их ход замедлится одинаково. То есть явление замедление времени существует безотносительно к конструкции часов или само по себе и является свойством самого времени.

Можно обратить внимание на следующий факт. Поскольку скорость света постоянна во всех системах отсчета, то можно записать соотношение c=s/t=s'/t', где штрихами обозначены расстояние и время измеряемое в подвижной системе отсчета (ракете). Известно, что t' замедляется относительно t в β раз, то есть t=βt'. Следовательно, чтобы получить туже скорость, необходимо, чтобы и расстояние s' в движущейся системе сократилось в β раз –s=βs'.

При этом необходимо помнить, что слова «замедляется» или «уменьшается» обозначают увеличение единиц измерения. Как было указано при v=4c/5 3 секунды в движущейся ракете равны 5 секундам в неподвижной. Так же 3 метра в движущейся ракете равны 5 метрам в неподвижной.

Это возвращает нас к сокращению Фитцджеральда—Лоренца, ведь даже величина сокращения та же самая. Но есть и существенное отличие. Полученное сокращение длин, так же как и замедление времени является взаимным для обоих наблюдателей, тогда как у Фитцджеральда, Лоренца или Пуанкаре, оно возникает вследствие движения относительно эфира. Причем эти ученые совершенно обошли молчанием замедление хода времени, а это показывает, что, хотя они оперировали теми же формулами, что и Эйнштейн, идея о взаимном отставании часов была совершенно чужда их представлениям.

Докажем теперь, что полученной сокращение длин будет наблюдаться только в направлении оси движения.

Предположим, что луч света движется из точки O вдоль оси y. В подвижной системе координат на преодоление мерного отрезка - расстояния OY'=y' вдоль оси y этому лучу требуется время t' и выполняется равенство y'=ct'. В неподвижной же системе, тот же луч идет вдоль наклонной линии OM со скоростью c (рис.) и выполняются соотношения OM=ct. Синус угла между OM и осью x равен sin(δ)=$SM/OM = \sqrt{1-v^2/c^2} = 1/\beta$. Расстояние SM - длина мерного отрезка в неподвижной системе координат, пройденное лучом равно SM=OMsin(δ)=(1/β)ct=y. Кроме того, существует замедление времени t=βt'. Собирая все формулы воедино, получаем y'=ct'=c(1/β)=(1/β)ct=y.

Замечательное подтверждение специальной теории относительности обнаружилось из результатов наблюдений за мюонами — элементарными частицами, которые образуются (в результате взаимодействия космических лучей) в верхних слоях атмосферы Земли и движутся к ней с около световыми скоростями. Затем эти частицы распадаются, причем время «жизни» мюона (от рождения до распада), полученное из экспериментов на земле столь мало, что мюоны теоретически не должны достигать земли, хотя на практике это все же происходит.

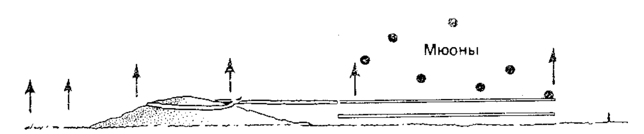


Рис. «Точка зрения» мюонов. Мюоны движутся столь быстро, что высота горы для них в 15 раз меньше, чем для наблюдателя, стоящего на Земле

Рассмотрим это явление с точки зрения теории относительности. Для наблюдателя, стоящего на земле из-за большой скорости движения замедляется время существования частицы, т.е. замедляются часы «установленные на мюоне» и таким образом увеличивается время их жизни, что позволяет ему пролететь большее расстояние и достичь земли. С точки зрения наблюдателя двигающегося вместе с мюоном сокращаются все расстояния в направлении движения, в том числе и расстояние до земли, что и позволяет некоторым частицам достигать ее.

Мюонный эксперимент многогранен. Он подтверждает целых три предсказания теории относительности: замедление хода времени, сокращение длин и сходное релятивистское поведение часов всех типов. Заметьте, что он, кроме того, продемонстрировал применимость теории относительности к явлению распада мюонов, не относящемуся по своей сути ни к механике, ни к электромагнетизму.

Обратите внимание, что мы получили серьезнейшие релятивистские результаты непосредственно из двух постулатов Эйнштейна и лишь при минимальном использовании математики. И то, что мы сумели продвинуться столь далеко, почти не прибегая к математическим выкладкам, есть следствие потрясающей мощи и простоты этих постулатов.

Связь массы тела с его энергией.

Рассмотрим утверждение, согласно которому ни один материальный объект не может двигаться быстрее света.

Обсудим его сначала с ньютоновых позиций. Второй закон Ньютона гласит: «сила равна массе, умноженной на ускорение». Допустим, что к небольшому объекту (скажем, камню), который вначале покоился (относительно нас), приложена постоянная сила. Тогда согласно ньютоновой механике камень приобретет постоянное ускорение, т.е. его скорость будет возрастать в постоянном темпе. И если действие силы будет продолжаться, то наступит момент, когда камень станет двигаться быстрее света. Поскольку согласно теории относительности это невозможно, то возникает вопрос, что тут неверно.

В теории относительности при формулировке 2 закона Ньютона необходимо пользоваться относительной массой, которая вычисляется по формуле

$$m = m_0 / \sqrt{c^2 - v^2}$$

где m_0 - масса неподвижного камня, v – его скорость. Таким образом предел, скорости камня можно вычислить $a=F/m; v' = f\sqrt{c^2 - v^2} / m_0$ - дифференциальное уравнение.

$\frac{dv}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{f}{m_0}dt$; $\arcsin\frac{v}{c} = \frac{f}{m_0}t$ $v = c \cdot \sin(\frac{f}{m_0}t)$ кроме того необходимо помнить о замедлении времени, которое не позволит скорости принять отрицательные значения.

А что можно сказать об энергии, сообщенной камню приложенной к нему силой?

При увеличении скорости камня растет не только его относительная масса, но и энергия (например кинетическая) поэтому можно рассматривать связь между относительно массой и энергией, которая и подтверждается знаменитой формулой Эйнштейна $E=mc^2$.

В своей работе 1905 года он, исходя из уравнений электромагнитного поля, всего лишь показал, что если тело излучает в виде света энергию *L* то оно должно потерять массу в количестве Lc^2. Обнаружив, что это справедливо для энергии в форме света, он заявил, что сам по себе факт существования энергии именно в форме света, «очевидно, не имеет никакого значения». Благодаря такому смелому приему он вновь превратил частный случай в универсальный закон. Если энергию вместо *L* обозначить через *E,* то выведенное Эйнштейном соотношение примет вид $E/c^2=m$, что можно переписать в уже знакомой форме $E=mc^2$. Но это еще не все, ибо в 1905 году такое равенство полагалось читать только слева направо, то есть предполагалось, что именно энергия эквивалентна массе, но не наоборот.

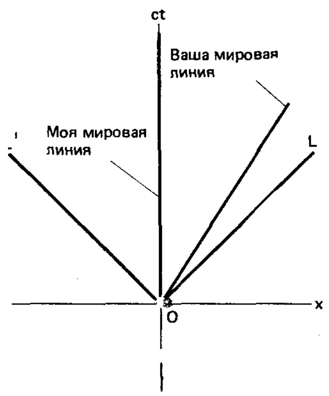
В 1907 году Эйнштейн завершил эту работу. Он рассмотрел объект, приобретающий дополнительную массу за счет поглощения излучения, и пришел к выводу, что неразумно делать различие между той массой, которая у него уже была, и дополнительной массой привнесенной излучением. Но поскольку последняя связана с энергией соотношением эквивалентности то, заявил Эйнштейн, с энергией связана и исходная масса. Таким образом, даже масса покоя оказалась эквивалентной энергии, а это означает, что каждый обладающий массой объект (даже такие, как песчинка или пушинка) в соответствии с формулой $E=mc^2$ является вместилищем сравнительно огромного количества энергии. Например, наперсток свинца содержит столько же энергии, сколько выделяется при сгорании 100 000 тонн угля. Такая страшна вещь, как ядерное оружие, обязана своей фантаста ческой разрушительной силой энергии, «заключенной» в массе.

В 1907 году профессору Геттингенского университета в Германии Герману Минковскому удалось показать, что математический аппарат теории относительности хорошо вписывается структуру так называемого четырехмерного пространства – времени. В этом пространстве для вычисления расстояний (интервалов) между двумя пространственно – временными событиями, одно из которых находится в начале координат, используется формула, вытекающая из преобразований Лоренца.

$s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - (ct)^2$ - величина остающаяся постоянной при преобразованиях Лоренца. В нашем обычном пространстве похожую роль играет обыкновенный радиус вектор некоторой точки, который не меняется при поворотах осей координат. Из всей сказанного можно сделать вывод, что преобразования Лоренца есть некоторый аналог преобразованиям, описывающими повороты системы координат. Таким образом, уменьшение длины мерного отрезка в направлении его движения можно рассматривать как поворот связанной с ним системы координат на некоторый угол относительно неподвижного наблюдателя (системы координат). Этот поворот будет взаимным для обеих систем как и сокращение длин.

Пример использования пространственно – временного интервала.

Рассмотрим две ракеты одна из которых неподвижна, а другая движется со скоростью 1000 км/с. В движущейся ракете на шахматной доске переставляется пешка е2—е4. Этот ход включает в себя два события — подъем королевской пешки с клетки е2 и размещение ее на клетке е4. Для подвижного наблюдателя эти два события разделены примерно 6 сантиметрами в пространстве и секундой во времени. Для неподвижного наблюдателя эти же события разделены 1000 километрами в пространстве и (поскольку ваши часы, по моим наблюдениям, отстают) примерно 1,0000056 секунды во времени. Как и следовало ожидать, мнения наблюдателей расходятся и по поводу пространственных интервалов и по поводу временных. Но, несмотря на это, если каждый из них подсчитает величину четырехмерного интервала между двумя событиями, исходя только из собственных измерений расстояний и промежутков времени, то получатся одни и те же значения.



Поскольку невозможно представить все четыре измерения, обычно отбрасывают два из трех пространственных измерений, рассматривая лишь ту область пространства, где *y* и *z* равны нулю (то есть ось *x),* что позволяет вместо четырехмерного исследовать двухмерное пространство-время с координатами x,t. Удобно вместо временной координаты t пользоваться координатой ct, дающей расстояние, пройденное светом за время t, так что теперь x и ct — это расстояния.

На диаграмме Миновского наблюдатель, находящийся в точке x=0 будет изображаться не точкой, а прямой линией, поскольку его координата ct непрерывно возрастает. Этот отрезок называется мировой линией для данного наблюдателя (рис). |

Если же наблюдатель движется вдоль оси x с некоторой постоянной скоростью v, то его мировая линия будет наклонной линией, тангенс наклона которой будет характеризовать отношение скоростей света и наблюдателя. Особое место на этой диаграмме принадлежит мировым линиям, наклоненным под углом 45^0, которые являются линиями световых сигналов распространяющихся в обе стороны оси x. Для любых событий, лежащих на этих линиях 4х мерный интервал от начала координат будет равен нулю. В этом случае x=ct и

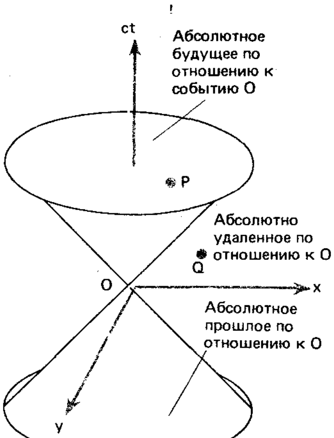
$$s^2=(ct)^2-(ct)^2=0$$

Расстояние от любой точки на этих линиях до начала координат равно нулю, хотя это и противоречит чертежу.

Этот пример характеризует искажения, которые вносит упрощенное представление 4х мерного пространства – времени.

Для тел конечной массы, двигающихся быстрее света, 4х мерный интервал s^2 оказывается отрицательным. В таких случаях будем рассматривать его модуль, отбрасывая знак

Рассмотрим отрезок *OP* прямой мировой линии неускоренного наблюдателя. Если этот наблюдатель все время остается в точке, где *x, y* и *z* равны нулю, то его мировая линия лежит на оси ct и формула для s^2 приводится к виду $s^2=c^2t^2$, или $s=ct$. Таким образом, если забыть о *c,* то интервал *s* между событиями *O* и *P* определяет течение времени между этими событиями, измеренного часами, которые связаны с наблюдателем, а значит позволяет узнать, как сильно постарел этот наблюдатель при переходе из точки O в точку P. Все эти рассуждения верны и для ускоренного наблюдателя и для событий не находящихся в начале координат. По этой причине четырехмерный интервал, деленный на *c,* называется собственным временем наблюдателя.



Рассмотрим теперь мир Минковского, когда равна нулю одна лишь координата z, то есть когда имеются два пространственных и одно временное измерение четырехмерного пространства-времени. В этом случае мировые линии *OL* и *OL'* «разворачиваются» в конус, поверхность которого образована бесчисленным множеством мировых линий, проходящих через событие *O* и составляющих с осью *ct* угол в 45°. Он называется световым конусом, и может быть разбит на две части — конус будущего и конус прошлого.

Всегда есть наблюдатель, мировая линия которого лежит на оси *ct.* Чем больше скорость частицы по отношению к такому наблюдателю, тем дальше она может улететь от него за данное время, а значит, тем больше угол, который мировая линия этой частицы составляет с осью *ct.* Поскольку ни одна частица не может двигаться быстрее света, то и ни одна частица не может за данное время переместиться дальше, чем свет, а следовательно, мировые линии любых физических частиц, проходящие через событие *O,* могут лежать только внутри или на световом конусе (рис. 65). Любое событие, подобно *P* лежащее внутри или на световом конусе будущего, может быть достигнуто из события *O* без превышения светового барьера, и все наблюдатели будут единодушны в том; "что *P* произошло позднее события *O.* По этой причине вся область внутри и на световом конусе будущего называется абсолютным будущим по отношению к событию *O.* По аналогичной причине вся область внутри и на конусе прошлого называется абсолютным прошлым по отношению к событию *O.*

Событие вне светового конуса (например, событие Q) не может быть достигнуто из события *O* никаким объектом, движущимся со скоростью, меньшей или равной скорости света. Таким образом, событие *Q* не может быть вызвано событием *O,* и поскольку причина всегда должна предшествовать следствию, то это вполне увязывается с тем фактом, что для одних наблюдателей событие *Q* происходит позже, чем *O,* тогда как для других (расположенных около Q) оно происходит раньше, чем *O.* Область вне светового конуса называется абсолютно удаленной по отношению к событию *O.*

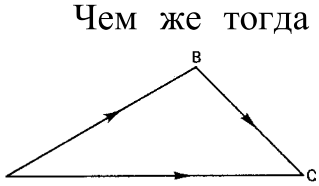
Ньютоновы пространство и время можно рассматривать как частный случай пространства-времени Минковского, если принять, что скорость света равна бесконечности. При этом световой конус уплощается так, что область абсолютно удаленного исчезает вовсе, а остаются лишь области абсолютного будущего и абсолютного прошлого, разделенные мгновенным абсолютным настоящим, что находится в полном соответствии с абсолютным временем Ньютона.

Как уже было показано, преобразования Лоренца подобны повороту осей координат. С взаимным отставанием часов можно разобраться аналогичным образом. Рассмотрим знаменитую релятивистскую задачу — так называемый парадокс близнецов. Один из близнецов остается у себя дома на Земле, а другой отправляется в космическое путешествие со скоростью, близкой к скорости света. Вернувшись через два года и встретившись со своим братом-домоседом, он обнаруживает, что тот постарел на пятьдесят лет.

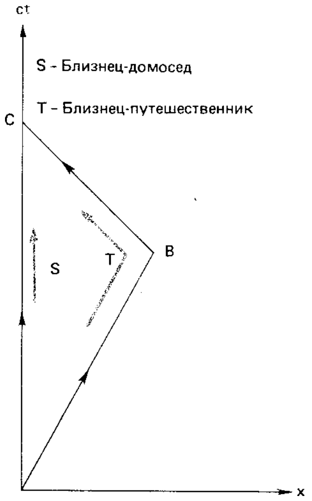
Объяснять это явление замедлением времени не очень удобно, поскольку это замедление взаимно. С точки зрения брата – путешественника должен быстрее стареть брат- домосед, а с точки зрения последнего – путешественник. На самом деле братьев нельзя считать абсолютно равноправными, поскольку путешественнику придется изменять направление движение, что бы вернуться назад. В этот момент на него будет действовать некоторая сила, о которой ничего не знает его брат на земле.

А теперь рассмотрим ту же проблему, но с пространственно-временной точки зрения. Здесь, прежде всего, следует обратить внимание на то, что близнец-путешественник вовсе не стареет медленнее, чем его брат. Оба они стареют совершенно одинаково. Если бы мы столкнулись с близнецами, стареющими в разном темпе, то вовсе не было бы никакой нужды посылать одного из них в далекое путешествие, ибо они и так старели бы по-разному, даже сидя рядом друг с другом.

Чем же тогда объяснить, что близнец-путешественник оказался при



встрече моложе своего брата-домоседа? Прежде чем дать ответ на этот вопрос, рассмотрим наводящий пример. Пусть один водитель" решил ехать из пункта *А* в пункт С напрямую, тогда как второй поехал сначала из пункта А в пункт *B,* а затем из пункта *B* в пункт С (рис. 68). Тогда при сравнении своих счетчиков километража они обнаружат, что хотя и тот, и другой стартовали в пункте *A* и прибыли в пункт *C,* тем не менее они преодолели разные расстояния. И никто из них не будет при этом нисколько ни удивлен и ни обескуражен.



А теперь давайте начертим мировые линии близнецов на диаграмме Минковского (рис. 69). Они выходят из события А, соответствующего старту космического корабля, и заканчиваются в событии С, которое соответствует приземлению корабля и встрече близнеца-домоседа с братом-путешественником. «Счетчиками» в данном случае являются сами близнецы либо их часы, отстукивающие собственное время, а значит, и возраст каждого из них. *АС* — это мировая линия близнеца-домоседа, а *ABC*— мировая линия близнеца-путешественника. Видно, что собственное время для АС отличается от собственного времени для *ABC.*

Однако кое-что здесь может показаться странным. Исходя из того, что мировая линия *ABC* длиннее, чем *АС,* вроде следовало бы ожидать, что в момент встречи путешественник будет скорее старше, чем моложе, своего брата. Все дело здесь в том, что при попытках начертить диаграмму Минковского на простом листе бумаги мы, как уже отмечалось, обязательно привносим искажения, о которых не следует забывать. Вспомним, например, что чем больше скорость путешественника (угол наклона АВ ближе к 45^0) тем меньше 4х мерный интервал, а собственные времена вдоль мировых линий, лежащих на самом световом конусе, вообще равны нулю. В данном же случае оказывается, что при достаточно большой скорости в реальном пространстве-времени интервал АВС на самом деле короче, чем *АС.*

Рассмотренное нами предсказание специальной теории относительности было подтверждено экспериментально, правда, при несколько более общих обстоятельствах — при наличии тяготения. В общих чертах идея эксперимента заключалась в следующем: одни исключительно точные атомные часы оставляли на Земле, а вторые, идентичные первым, размещали на борту реактивного самолета, совершавшего кругосветный полет. Когда атомный хронометр - путешественник «встретился» со своим близнецом-домоседом, то оказалось, что они «отстукали» меньше времени, причем на величину, в точности согласующуюся с предсказаниями теории относительности.

Хорошей иллюстрацией характерных особенностей большой науки является следующий случай с одним экспериментом. Мы уже видели, как Эйнштейн построил свою специальную теорию относительности, опираясь всего лишь на два поразительно простых и смелых постулата. В 1905 году он получил релятивистские уравнения, описывающие движение электрона электромагнитном поле. Причем его выводы совпадали с результатами исследований Лоренца, выполненных в 1904 году.

В 1906 году немецкий экспериментатор Вальтер Кауфманн опубликовал незадолго до этого полученные результаты своего эксперимента, разработанного и поставленного специально для проверки предсказаний, сделанных и Эйнштейном, и Лоренцем. Прямо в самом начале своей статьи Кауфманн заявил, что его «результаты измерений не согласуются с основными положениями теории Эйнштейна—Лоренца». Далее было сказано, что из его результатов следует предпочтительность двух других теорий. Лоренц, потрясённый столь недвусмысленным приговором, вынесенным экспериментом, уже решил было отказаться от своих добытых нелегким трудом уравнений. Эйнштейн же совершенно спокойно возразил: «По-моему, обе другие теории имеют довольно мало шансов *оказаться* верными, ибо лежащие в их основе предположения, касающиеся масс движущихся электронов, не поддаются объяснению в рамках теорий, охватывающих значительно больший комплекс явлений».

Отсюда видно, что Эйнштейн придавал большее значение стройности и красоте теории, нежели результатам эксперимента. А что касается результатов Кауфманна, то, как выяснилось впоследствии, они были ошибочными, и проведенные позднее более тщательные эксперименты оказались в полном согласии со следствиями уравнений Лоренца—Эйнштейна.

В том далеком 1905 году, когда Эйнштейн предложил вниманию физиков свою специальную теорию относительности, эксперименты с частицами, обладающими экстремально высокими скоростями, были исключительной редкостью. Сегодня же такими экспериментами никого не удивишь. Они позволили

подвергнуть выводы теории относительности всесторонней и очень серьезной проверке, которую она с честью выдержала. И что самое замечательное, теория Эйнштейна стала необходимым инструментом всей современной экспериментальной физики, которая с ее помощью добилась многочисленных и подчас поразительных побед.

И все же наибольшего успеха она достигла не в стенах лабораторий, а в трудах теоретиков. Пример теории относительности вдохновил многих физиков-теоретиков на новые смелые начинания. Выдающийся английский физик-теоретик Поль Дирак построил квантовую релятивистскую теорию движения электрона, получившую заслуженное признание как за красоту, так и за великолепное согласие с экспериментом. Для Эйнштейна же специальная теория относительности была прежде всего необходимой и важной ступенью на пути к его общей теории относительности.

В заключение этой главы вспомним еще раз удивительную судьбу, выпавшую на долю ньютонова принципа относительности. Для явлений, относящихся к компетенции ньютоновой механики, этот принцип был непосредственным следствием знаменитых законов Ньютона, несмотря даже на то, что сами эти законы формулировались исходя из представления об абсолютном пространстве. Однако с появлением волновой теории света и идеи эфира этот принцип, казалось бы, был обречен, хотя по-прежнему оставался справедливым для чисто механических явлений (в оптике же он был неприменимым).

Неожиданные неудачи оптических да и других экспериментов, с помощью которых пытались обнаружить хоть какие-то проявления равномерного движения относительно эфира, привели Пуанкаре и Эйнштейна к мысли о необходимости введения принципа относительности в качестве фундаментального физического закона. И тут Эйнштейн, дополнив этот принцип своим вторым постулатом и отказавшись от абсолютной одновременности, получает преобразования Лоренца не просто как частный математический способ описания относительного движения в электродинамике, но как универсальный метод описания, пригодный во всех областях физики.

Однако если уравнения Максвелла идеально вписывались в разрабатываемую релятивистскую теорию, то с законами Ньютона дело обстояло сложнее. Если к уравнениям второго закона Ньютона применить преобразования Лоренца, то в преобразованные уравнения обязательно войдет член, содержащий относительную скорость v, из чего следует, что эти уравнения не удовлетворяют эйнштейнову принципу относительности. Но при условии, что преобразования Лоренца справедливы для любого раздела физики, нельзя ведь отдельно для законов Ньютона возвращаться к преобразованиям Галилея. Нельзя здесь отступаться и от эйнштейнова принципа относительности — фундаментального постулата теории относительности.

Итак, логика релятивизма вынуждает нас привести законы ньютоновой механики в соответствие с принципом относительности, опирающимся не на ньютоновы, а на релятивистские представления о пространстве и времени — другими словами, привести эти законы в соответствие с преобразованиями Лоренца, пришедшими на смену преобразованиям Галилея. Неизбежным следствием выполнения этой программы, помимо грочего, являются возрастание относительной массы 'ела при увеличении его скорости и соотношение -•квивалентности между массой и энергией, математическим выражением которого является знаменитое уравнение Эйнштейна $E=mc^2$. И что важнее всего, приходит новое понимание свойств и поведения пространства и времени.

Единственным явлением, не поддавшимся теории относительности, оказался ньютонов закон всемирного тяготения с его мгновенным действием на расстоянии. Ведь теория относительности ставит запрет на скорости больше скорости света, и этот запрет распространяется на любые формы материи. Поскольку же основной характеристикой материи является масса, а она, как нам теперь известно, неразрывно связана с энергией, то можно сказать, что этот запрет распространяется и на любые формы энергии.

Если бы тяготение и в самом деле могло мгновенно передаваться на любые расстояния, то тем самым была бы полностью подорвана вся та основа, на которой зиждется теория относительности, ибо взмаха руки было бы достаточно для изменения силы тяготения — ведь при взмахе смещается масса руки и не только рядом с вами, но моментально и в любой другой точке Вселенной. С помощью таких мгновенно распространяющихся сигналов можно было бы в один и тот же момент времени, то есть одновременно, синхронизировать все часы и повсюду во Вселенной, что позволило бы сделать одновременность абсолютной, а это противоречит выводам теории относительности.