

Часть 1

Специальная теория относительности

§1. Классические представления о пространстве, времени и движении. Метризация пространства и синхронизация часов в классической физике

К концу XIX в. физическая наука, казалось, достигла предела: огромное количество явлений и процессов смогла она объяснить на основе законов механики, термодинамики и макроскопической электродинамики. Только две “маленькие тучки”, по выражению знаменитого английского физика Дж. Томсона, “стояли на горизонте”, не укладывавшись в рамки указанных выше разделов физики. Это были:

1) трудности, возникшие при изучении законов, которым подчиняется излучение нагретых тел;

2) проблема электромагнитного (светоносного) эфира.

В конце XIX и в начале XX вв. при разрешении этих проблем были созданы квантовая физика и специальная теория относительности. Ниже мы познакомимся со второй из них, со специальной теорией относительности (СТО).

Но прежде выясним, в чем состояли трудности классической физики при рассмотрении проблемы электромагнитного эфира? Все окружающие нас предметы находятся, и все процессы, происходящие с ними или в них, протекают в пространстве и во времени. Наиболее полно эти понятия определяет философия, согласно которой пространство и время — это формы существования материи, атрибуты ее движения. Все тела имеют объем, размеры. Они так или иначе расположены относительно друг друга. Это и означает, что материальные тела существуют в пространстве. Всякий процесс имеет длительность, одно явление происходит раньше другого. Это и означает, что материя существует во времени. Нет тел, которые не были бы протяженны,

не имели бы размеров. Нет процессов, которые бы не длились в течение какого-либо, пусть очень малого, но конечного промежутка времени. Это означает, что материя не может существовать вне пространства и времени.

С другой стороны, пространство и время не есть нечто самостоятельно существующие, независимо наряду с материальными объектами. Они неотделимы от материальных объектов и явлений.

Несмотря на очевидность и реальность пространства и времени, — это очень сложные понятия, и осмысление их содержания на всем протяжении развития науки сталкивалось с определенными трудностями.

Еще в древности люди задумывались о размере Вселенной, о конечности ее существования во времени. Их представления о пространстве и времени складывались из личного, весьма ограниченного опыта. Так, небо в понимании древних представлялось в виде полусферы, на которой закреплены небесные светила. Земля представлялась плоской, покоящейся на спинах трех китов (или слонов), которые, в свою очередь, стояли на гигантской черепахе, плавающей в безбрежном “море-океане”. Человек видел перед собою линию горизонта и считал, что до нее можно дойти.

Не умея объяснить, каким образом возникла Земля и они сами, люди пришли к мысли о существовании сверхъестественной силы — Бога. А так как все вокруг имело не только начало, но рано или поздно прекращало свое существование, то делался вывод, что сотворенный Богом мир когда-нибудь прекратит свое существование. Так возникло представление о конечности Бытия.

Первые научные представления о пространстве и времени были сформулированы великим английским физиком И. Ньютоном в его книге “Математические начала натуральной философии” (1687 г.): пространство и время существуют объективно, однако они существуют безотносительно к тем телам, которые находятся и движутся в пространстве и во времени. Пространство у Ньютона является “вместилищем”, “ящиком”, и движение в этом пространстве носит абсолютный характер, т. е. положение тела

можно определить однозначно, однозначно определяется движение тела относительно стенок “ящика” — абсолютного пространства.

Время по Ньютону—это лишь простая длительность событий, оно течет “безотносительно к чему бы то ни было”. Поэтому это время называется абсолютным. Но абсолютное пространство и абсолютное время недоступны человеческому восприятию, — так утверждал Ньютон. В обыденной жизни мы обнаруживаем лишь относительное пространство и относительное время. Мы можем лишь определить объем, занимаемый телом, его расположение по отношению к другим телам. Промежутки времени, измеряемые при помощи часов (периодически действующих механизмов, сооруженных человеком или природой: песочные или водяные часы в древности, дневной или годовой цикл движения Земли и т. д.) дают нам лишь отрезок абсолютного времени. Именно поэтому Ньютон назвал эти обыденные проявления пространства и времени — относительными.

Признавая объективное существование пространства и времени, Ньютон исходит из материалистических представлений; отрывая же их друг от друга и от материальных тел, Ньютон отходит от этих позиций и, в конечном счете, приходит к божественному происхождению мира. Возможно, что некоторым читателям с высоты их сегодняшних знаний эти представления Ньютона покажутся наивными. Но они были общепризнанными в течение более 200 лет и всецело поддерживались религией. Только с возникновением СТО изменились научные представления о свойствах пространства, времени и движении. О становлении этих новых, современных представлений и будет идти речь на следующих страницах этой книги. Но сначала поговорим о других важных вещах, непосредственно связанных с обсуждаемым вопросом.

При изучении физических процессов необходимы приборы, метризованная система координат и синхронизованный набор часов. Все это в совокупности называется системой отсчета (СО). Первоначально в это понятие включали следующие элементы:

1) *тело отсчета*; 2) *систему координат*, начало которой совмещено с телом отсчета; 3) *масштабы*; 4) *часы*. В современной физике понятие “СО” расширилось до представления о

физической лаборатории, включающей все необходимые условия и приборы для наблюдения и изучения физических явлений. Различают так называемые инерциальные и неинерциальные системы отсчета. Характерным признаком инерциальных систем отсчета (ИСО) является то, что в них справедливы классические законы механики — законы Ньютона (соответственно в неинерциальных системах отсчета (НИСО) эти законы не выполняются). Все ИСО (а их бесчисленное множество) могут двигаться относительно друг друга равномерно и прямолинейно, и согласно классическому принципу относительности — принципу относительности Галилея — все ИСО равноправны. Это означает, что при рассмотрении какого-либо явления можно использовать любую ИСО, все они эквивалентны. Равноправие ИСО дает определенный выбор СО, в которой целесообразно (для более простого математического описания и для более ясного физического понимания) рассматривать какую-либо задачу. Но именно из-за равноправия этих ИСО получаемые в них результаты будут объективны, реальны, хотя количественно могут иметь разные значения. Например, движение пассажира в поезде можно описать как в ИСО “Поезд”, так и в любой другой ИСО, например “Земля”, относительно которой ИСО “Поезд” движется прямолинейно и равномерно. Естественно, что скорости движения пассажира в этих ИСО разные, но обе они “настоящие”, обе реальные.

Чтобы определить местоположение материального объекта в пространстве, необходимо в каждой ИСО приписать каждой точке определенное числовое значение — координату. Для этого необходимо “метризовать” пространство, т.е., используя масштабную линейку, определить местоположение этой точки относительно начала координат. По классическим представлениям свойства масштаба не изменяются от его переноса. Поэтому все ИСО можно метризовать, пользуясь одним и тем же масштабом, перенося его из одной ИСО в другую. Предполагается также, что масштабы не деформируются в процессе переноса, т.е. являются абсолютно твердыми. Это предположение тотчас же приводит нас к утверждению, что существует возможность мгновенно передать сигнал (информацию) вдоль масштаба, ударив, например, по его торцу и мгновенно получив сдвиг другого конца. Такое предположение

лежит в основе так называемого принципа дальнего действия — принципа классической физики, утверждающего, что существует сигнал, распространяющийся с бесконечно большой скоростью. Считается, что свойства материала стержня и окружающей среды совершенно не влияют на величину этой скорости.

В каждой ИСО должны быть часы, ход которых, естественно, одинаков. Но чтобы отрегулировать ход часов и установить одинаковое положение стрелок в один и тот же момент времени, можно поступить двумя, по классическим представлениям, одинаковыми способами: 1) свести часы в одно место (например, сделать это на часовом заводе), синхронизировать их ход и развести по рабочим местам (считается, что передвижение часов не влияет на их ход); 2) так как в принципе существует бесконечно быстрый сигнал, то из “центра” (например, из начала координат СО) можно послать условный сигнал и на всех часах одновременно будут установлены одинаковые положения стрелок (практически все мы так и поступаем, сверяя ход своих часов по сигналу, который посылается радиостанцией, как бы далеко она не была расположена).

Выше было сказано, что классическая физика основывается на принципе дальнего действия, т.е. возможности передачи сигнала (действия, информации) мгновенно на любое расстояние. Промежуточная среда при этом не оказывает никакого влияния на скорость передачи действия. Это положение важно для последующего изложения, поэтому покажем справедливость его, анализируя ряд известных читателю примеров. По классической теореме сложения скоростей (вывод ее дан в § 2)

$$u = u' + v ,$$

где v — относительная скорость движения одной ИСО относительно другой, u и u' — скорости одного и того же объекта в рассматриваемых ИСО, следует, что величина u ничем не ограничена и в принципе может быть и бесконечно большой.

Второй закон классической механики

$$\mathbf{r} \quad \mathbf{F} \\ a = \frac{\quad}{m}$$

утверждает, что тело получает ускорение (тотчас же), как только на него начинает действовать сила, причем источник силы может находиться на любом расстоянии от ускоряемого тела. Эта же идея содержится и в третьем законе Ньютона (противодействие появляется тотчас же, как только возникает действие) и в законе всемирного тяготения (сила тяготения изменяется тотчас же, как только изменяется расстояние между тяготеющими телами). Ниже мы пересмотрим этот основополагающий принцип классической физики.

§ 2. Принцип относительности Галилея. Формулы Галилея. Абсолютные и относительные величины в классической физике. Инвариантность законов классической механики

В основе классической физики, ведущей свое начало от Галилея и Ньютона, лежит принцип относительности (принцип относительности Галилея), утверждающий равноправие всех ИСО. Сущность его выражена Галилеем в “Диалогах о 2-х системах мира” (1632 г.) такими рассуждениями: “Запритесь с кем-нибудь из друзей в кают-компани под палубой большого корабля, взяв с собой мух, бабочек и других небольших летающих животных. Возьмите и большой сосуд с водой, в котором плавают рыбы. Подвесьте бутылку, из которой капля за каплей вытекает вода в широкий сосуд внизу. Пока ваше судно стоит на месте, внимательно наблюдайте, как насекомые летают по помещению с одинаковыми скоростями во все стороны. Рыбы плавают как угодно, не предпочитая какого-либо направления. Капли падают в сосуд под бутылку. Если же вы бросите что-нибудь вашему другу, то вы приложите одинаковое усилие, в каком бы направлении ни бросали, если расстояния одинаковы. Прыгая обеими ногами сразу, вы будете пролетать одинаковые расстояния в любом направлении. Тщательно пронаблюдав все это (хотя вы и не сомневались, что все будет происходить именно так, пока корабль стоит на месте), отдайте команду, чтобы корабль начал двигаться с любой скоростью, лишь бы его движение было равномерным и не подвергалось каким бы то

ни было возмущениям. Ни в одном из указанных процессов вы не обнаружите ни малейших изменений и не сможете ни по одному из них узнать, движется ли ваш корабль или стоит на месте”.

Все упоминаемые Галилеем явления являются механическими. Поэтому, обобщая вывод Галилея, можно утверждать, что во всех ИСО **все механические явления** при одинаковых условиях протекают одинаково. Другими словами, **законы механики одинаковы** (говорят, инвариантны) **во всех ИСО**. Поскольку, наблюдая механические явления, происходящие внутри ИСО, нельзя установить, движется эта ИСО или покоится, то принцип относительности Галилея тем самым утверждает относительность механического движения и покоя.

Из инвариантности законов механики в различных ИСО следует важный вывод о познаваемости мира. В данном случае это утверждение надо понимать так: изучив механические процессы в какой-либо ИСО, можно утверждать, что и в других ИСО, где бы они не находились, эти процессы при таких же условиях будут протекать аналогично. Принцип относительности Галилея отрицает возможность обнаружить абсолютное движение, существование которого лежит в основе ньютоновских представлений о пространстве, времени и движении. Впоследствии мы увидим, что невозможность обнаружить абсолютное движение и покой наблюдением механических процессов, послужила мощным импульсом для развития физики, поиска других способов обнаружения абсолютного движения и покоя.

Более широкое содержание принципа относительности Галилея раскрывается с помощью формул, которые получили название формул преобразования координат и времени Галилея при переходе от одной ИСО к другой. Как было сказано выше, принцип относительности Галилея утверждает, что механические процессы протекают одинаково при одинаковых условиях во всех ИСО. Поэтому достаточно воспроизвести их в одной из ИСО. Но если эти процессы наблюдаются из другой ИСО, то, очевидно, условия наблюдения изменяются. Поэтому изменятся и количественные характеристики наблюдаемых явлений. Формулы Галилея, которые мы получим ниже, позволяют связать между собой простран-

ственные и временные характеристики механических процессов при измерении их из двух различных ИСО.

Рассмотрим две ИСО L и L' , одну из них условно будем считать неподвижной (ИСО L), другую L' — движущейся слева направо относительно первой со скоростью \vec{v} (рис.1). Направление движения ИСО L' примем за положительное направление оси Ox (оси $O'X'$), направление других осей координат указано на рис.1. Примем условно (в силу однородности, одинаковости хода времени) за нулевой момент времени тот момент, когда начала ИСО L и L' совпадали (не будем забывать, что инерциальные СО всегда находятся в движении, равномерном и прямолинейном!), это упростит наши расчеты.

Через некоторый промежуток времени t , когда начала ИСО точки O и O' разойдутся на расстояние OO' , в некоторой точке плоскости xOy возникнет событие M . Его координаты в ИСО L : x и y . Соответственно, в ИСО L' (это видно из рис.1) координаты события M будут x' и y' . Воспользуемся рис.1 и найдем связь между не штрихованными и штрихованными координатами события M :

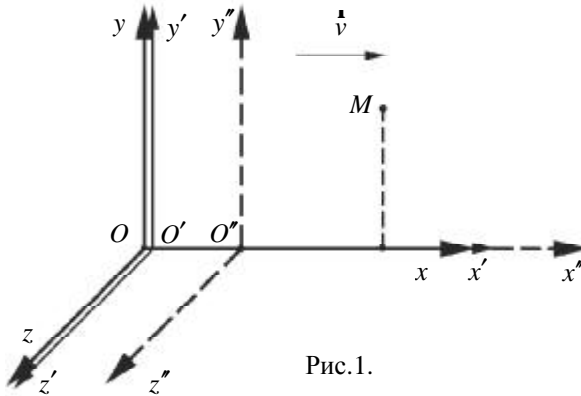


Рис.1.

$$\begin{aligned}
 x' &= x - OO' = x - vt, \\
 y' &= y, \\
 z' &= z
 \end{aligned}
 \tag{2.1-2.3}$$

Кроме того, исходя из абсолютности промежутков времени во всех ИСО (о чем говорилось в § 1), можно написать, что

$$t' = t. \tag{2.4}$$

Соотношения (2.1) — (2.4) называются формулами преобразования координат и времени в классической физике или формулами преобразования Галилея. Ниже мы покажем, что в этих формулах содержатся основные представления классической физики о свойствах пространства, времени и движения.

Из формулы (2.1) непосредственно следует, что координата (пространственная характеристика) события изменяется при переходе от одной ИСО к другой, т.е. координата события является относительной величиной. С другой стороны, формула (2.4) зафиксировала фундаментальное положение классической физики: время — абсолютная характеристика события. Определяя длительность процесса с помощью равенства $\Delta t = t_2 - t_1$, получаем, что длительность процесса также является величиной абсолютной. Если два события произошли в один и тот же момент времени $t_2 = t_1$, то из равенства (2.4) следует, что это соотношение сохраняется в любой другой ИСО. Отсюда следует утверждение, что одновременность абсолютна: то, что одновременно в одной ИСО, одновременно и в другой.

Наш интерес к выяснению, какие величины являются абсолютными, а какие — относительными, имеет очень глубокий смысл: не может быть построена физическая теория без абсолютных (в её рамках) физических величин, без таких, которые сохранялись бы при рассмотрении явлений в любой ИСО. Иначе такая физическая теория не давала бы нам объективных знаний о свойствах и строении окружающего нас мира.

Получим еще ряд следствий, используя формулы преобразования координат и времени Галилея.

Абсолютность длины в классической физике.

Пусть одномерный стержень располагается в подвижной ИСО L' вдоль оси $O'x'$. Для определения длины неподвижного стержня необходимо засечь координаты его концов. Так как стержень неподвижен, то сделать это не представляет труда. Сложнее определить координаты концов тела, если оно движется. Поэтому введем следующее правило: координаты концов движущегося стержня необходимо засечь в один и тот же момент времени, т.е. одновременно. Координаты концов движущегося в ИСО L связаны с координатами его концов, измеренными в ИСО L' , с помощью формулы (2.1). Напишем ее для координат начала и конца стержня:

$$\begin{aligned}x_1 &= x_1 - vt_1, \\x_2 &= x_2 - vt_2.\end{aligned}\tag{2.5}$$

Согласно правилу, сформулированному выше

$$t_1 = t_2.\tag{2.6}$$

Составим разность выражений (2.5), с учетом равенства (2.6).

Вводя обозначения $x_2 - x_1 = l$ и $x_2' - x_1' = l'$, где l и l' — длина стержня в ИСО L и L' , получаем:

$$l' = l,\tag{2.7}$$

что и устанавливает абсолютность длины тела.

В какой бы ИСО мы не измеряли длину тела, численное значение ее всегда будет одно и то же. Таково одно из следствий формул Галилея. Повседневный опыт и “здравый” смысл находятся в согласии с этим результатом.

Теорема сложения скоростей (ТСС) в классической физике.

Эта теорема устанавливает связь между значениями скоростей одного и того же тела, полученными в двух ИСО. Будем вести речь о средней скорости, что упростит наши расчеты. Пусть за промежутки времени $\Delta t = t_2 - t_1$ координаты тела изменились от x_1 до x_2 в ИСО L и от x_1' до x_2' в ИСО L' (мы рассматриваем тело в виде материальной точки, так что его положение на оси Ox (соответственно

$O'x'$) определяется одной координатой). Штрихованные и не штрихованные координаты связаны между собой формулой (2.1):

$$\begin{aligned}x_1' &= x_1 - vt_1, \\x_2' &= x_2 - vt_2.\end{aligned}\tag{2.8}$$

Составим разность этих выражений и одновременно разделим обе стороны полученного равенства на время движения

$$\begin{aligned}\Delta t &= t_2 - t_1 = t_2' - t_1' = \Delta t': \\ \frac{x_2' - x_1'}{t_2' - t_1'} &= \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} - v.\end{aligned}\tag{2.9}$$

Введем обозначения, используя определение средней скорости:

$$\frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = u_x \quad \text{и} \quad \frac{x_2' - x_1'}{t_2' - t_1'} = u_x' .\tag{2.10}$$

Тогда равенство (2.9) запишется так:

$$u_x' = u_x - v ,\tag{2.11}$$

что и выражает теорему сложения скоростей одномерного движения. Переходя к бесконечно малым промежуткам времени и изменениям координат, получим точно такое же выражение для мгновенных скоростей движущегося тела. Таким образом, скорость тела в классической физике является величиной относительной, т.е. имеет разное числовое значение в один и тот же момент времени в разных ИСО.

Абсолютность относительной скорости движения одного тела по отношению к другому телу.

Под относительной скоростью данного тела по отношению к другому телу мы будем понимать разность $u_2 - u_1$, где u_2 и u_1 определяются в одной и той же ИСО, в которой движутся данные тела. Например, вдоль шоссе в одном направлении движутся две автомашины со скоростями u_1 и u_2 соответственно. Относительной скоростью первой автомашины относительно

второй будет величина $u_2 - u_1$, а относительной скоростью второй автомашины относительно первой является разность $u_1 - u_2$.

Установим, изменяется ли эта величина, если определять ее для тех же тел в другой ИСО? Для этого составим формулу ТСС для каждого тела:

$$\text{для первого тела } u_1' = u_1 - v, \quad (2.12)$$

$$\text{для второго тела } u_2' = u_2 - v. \quad (2.13)$$

Исходя из определения относительной скорости, получаем:

$$u_2' - u_1' = u_2 - u_1. \quad (2.14)$$

Равенство (2.14) утверждает, что относительная скорость для двух тел является величиной абсолютной, инвариантной. Этот вывод вскоре нам потребуется при анализе классических законов движения.

Абсолютность ускорения тела.

Пусть за некоторый промежуток времени скорость тела изменяется от u_1 до u_2 . Определим изменение скорости этого тела за тот же промежуток времени в ИСО L' , для чего воспользуемся формулой ТСС:

$$u_1' = u_1 - v \quad \text{и} \quad u_2' = u_2 - v. \quad (2.15)$$

(Внимание! Хотя математические записи в этой задаче совпадают с записями в предыдущей задаче, но там речь шла о скоростях 2-х разных тел в один и тот же момент времени, здесь же — о скоростях одного и того же тела в разные моменты времени.)

Составим разность выражений (2.15) и разделим обе стороны равенства на промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$, в течение которого произошло изменение скорости. Согласно определению ускорения получаем, что среднее ускорение

$$a' = a. \quad (2.16)$$

является инвариантной, абсолютной величиной. Рассматривая изменение скорости за бесконечно малый промежуток времени, получим, что и мгновенное ускорение тела есть ве-

личина инвариантная, т.е. имеет одно и то же численное значение во всех ИСО.

Инвариантность формулы 2-го закона Ньютона

Запишем формулу 2-го закона Ньютона в следующем скалярном виде

$$a = \frac{F}{m}, \tag{2.17}$$

имея в виду одномерный характер рассматриваемого движения. Как известно, основной задачей механики является установление закона движения $x = x(t)$ по заданным силам и начальным условиям. Но если мы имеем возможность пользоваться любой ИСО, то возникает вопрос: а будет ли закон Ньютона таким же и в другой ИСО, будет ли уравнение закона сохранять свой вид и в новых переменных (в обозначениях ИСО L')? Чтобы получить ответ на заданный вопрос, необходимо проанализировать каждую величину, входящую в формулу закона, на предмет ее абсолютности, инвариантности. Выше было указано, что ускорение есть величина инвариантная. В рамках классической физики справедлив закон сохранения массы, установленный Ломоносовым и Лавуазье. Следовательно, масса является инвариантной величиной. Остается проанализировать те силы, которые рассматриваются в классической механике: сила трения

$$\mathbf{F}_{тр} = -a\mathbf{v}_{отн},$$

сила упругости

$$\mathbf{F}_{упр} = -k\Delta\mathbf{x}$$

и сила гравитационного взаимодействия

$$F_{тяг} = g \frac{mM}{r^2},$$

где a, k, g — постоянные коэффициенты, а $\mathbf{v}_{отн} = \mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_1, \Delta\mathbf{x} = \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1$, r — соответственно относительная скорость движения одного тела относительно другого, величина деформации и расстояние между тяготеющими телами. Но

все эти величины, как было показано выше, являются абсолютными, инвариантными величинами. Следовательно и формула 2-го закона механики сохраняет свой вид, и величины, входящие в нее, не изменяют своего численного значения при переходе от одной ИСО к другой при помощи формул Галилея.

Таким образом, 2-й закон механики является абсолютным, инвариантным законом, т.е. он справедлив в любой ИСО. Но это же утверждает и принцип относительности Галилея: во всех ИСО механические явления при одинаковых условиях протекают одинаково. У принципа относительности есть и другая, так называемая отрицательная формулировка: нельзя, ставя внутри ИСО механические опыты, установить, движется или покоится данная ИСО. Другими словами, равномерное, прямолинейное движение и покой относительны, нет возможности, наблюдая механические явления, обнаружить абсолютный покой и движение. Этот вывод отрицает существование абсолютного пространства и времени и связанного с ними абсолютного движения и покоя, точнее, отрицает возможность обнаружить абсолютное пространство и время, наблюдая лишь механические явления.

Но по ньютоновским представлениям такие абсолютные пространство и время должны существовать. И физики решили искать их, используя другие, немеханические процессы, например, оптические. Начался новый этап развития физики, который и привел в конце концов к возникновению специальной теории относительности, к революции в физической науке.

§ 3. Решение задач с выбором различных систем отсчета

Принцип относительности — один из основных принципов современной физики, позволяющий увидеть единство физики как науки о природе. Для выявления глубокого физического и философского содержания этого принципа необходимо в первую очередь понять роль и широко использовать систему отсчета, выступающей как физическая лаборатория.

В силу равноправия всех ИСО, исследователю предоставляется возможность выбора любой ИСО. Однако только интуиция, при-

обретаемая при многократных тренировках при решении задач, подскажет ту ИСО, в которой наиболее просто физически и математически предстанет изучаемый процесс. В дальнейшем мы постоянно будем работать с различными ИСО, поэтому будет естественным, если на ряде примеров покажем возможности в выборе ИСО при решении нескольких кинематических задач.

Будем следовать следующему плану решения: после анализа условия задачи и краткой записи, выбираем ту ИСО, в которой, как нам кажется (ведь все ИСО равноправны!), решение будет физически более ясным и математически более рациональным; в выбранной ИСО строим чертеж (рисунок или схему), проводим аналитическое решение; в конечное выражение для искомой величины подставляем численные значения с наименованиями. После проверки размерности ответа, находим его численное значение и, при надобности, анализируем ответ. Такой план, в принципе, пригоден для решения задач по всем разделам физики.

Задача № 1.

Лодочник, проплывая под мостом против течения, потерял запасное весло. Через некоторое время он обнаружил пропажу, развернул лодку и через час в трех километрах ниже моста догнал весло. Определить скорость воды.

Найти $v_в$

$$t = 1ч$$

Дано

$$l = 3км$$

Решение. I вариант.

В большинстве задач, как и в данной, условие формулируется в СО “Земля”. Это методически не оправдано, так как в определенной степени “абсолютизирует”, выделяет в сознании эту СО. Но последуем за автором задачи и выберем эту систему отсчета в качестве рабочей СО. Итак, задача будет решаться в ИСО “Земля”. Сделаем в этой ИСО чертеж, соответствующий условию задачи (рис.2).

Введем вспомогательное время t' , которое лодочник потратит для прохождения пути ОА, в конце которого он обнаруживает пропажу весла. Можно составить следующие три равенства, учитывающие,

согласно ТСС, что скорость лодки при движении против течения равна $(v - v_e)$, при движении по течению $(v + v_e)$, где v — скорость лодки в стоячей воде, v_e — скорость течения воды:

$$OB = v_e(t + t') \text{ — путь весла,}$$

$$OA = (v - v_e)t' \text{ — путь лодки до поворота,}$$

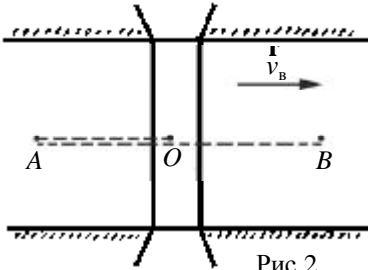


Рис.2

$AB = (v + v_e)t$ — путь лодки от поворота до встречи с веслом.

Из чертежа видно, что

$$AB = OA + OB, \text{ или}$$

$$(v + v_e)t = (v - v_e)t' + v_e(t + t').$$

После раскрытия скобок и сокращения подобных членов с разными знаками, получаем, что

$$t = t'.$$

Таким образом, полное время движения весла (вместе с водой) равно

$$T = t + t' = 2t.$$

За это время весло проплыло со скоростью воды расстояние

$$l = v_e T,$$

откуда

$$v_e = \frac{l}{T} = \frac{3 \text{ км}}{2 \text{ ч}} = 1,5 \text{ км/ч.}$$

Несмотря на кажущуюся простоту решения, чрезвычайно трудным моментом его является введение вспомогательного времени t' , числовое значение которого не дано в условии задачи и не известно, как его найти. Рассмотрим другой вариант решения задачи, выбрав другую ИСО.

II вариант

Поставим перед собой вопрос: нет ли такой ИСО, в которой задача решалась бы более физично, без введения вспомогательного времени t' , с большим осмыслением физических

понятий, встречающихся в задаче? Например, если взять ИСО “Вода” (мы будем давать название ИСО по тому объекту, с которым можно связать тело отсчета данной ИСО), то в этой СО вода неподвижна, неподвижно и весло, и лишь лодка удаляется и приближается к веслу. Причем, это движение лодки происходит в стоячей (!) воде. Поэтому потребуется одно и то же время для удаления и приближения к веслу. А так как длительность (время) в классической физике является абсолютной величиной, то и в ИСО “Вода” на возвращение лодки к веслу (как и в ИСО “Земля”) потребуется 1 час. Всего же лодка в движении будет два часа (1 час “туда” и 1 час “обратно”). Столько же времени плыло весло вместе с водой относительно берега и при этом проплыло (со скоростью воды) 3 км. Следовательно, скорость весла (и воды) равна

$$v_e = \frac{l}{2t} = \frac{3\text{км}}{2\text{ч}} = 1,5 \text{ км/ч}$$

При решении задачи по второму варианту выбора ИСО нам пришлось исходить из таких важных для классической физики представлений, как абсолютность времени, длины и относительность скорости, инвариантность самого события, утвердиться в равноправии ИСО и существенно упростить математические расчеты. Нет сомнения, что тот читатель, который **ищет в задачах физику**, выберет 2-ой вариант решения.

Задача №2.

Начальные положения и векторы скоростей двух кораблей (самолетов, людей и т.д.) заданы графически. Корабли движутся равномерно. Каким будет наименьшее расстояние между ними?

Найти:

$$l_{\min}$$

Решение.

Дано:

$$v_1, \vec{v}_1$$

$$v_2, \vec{v}_2$$

Предоставляем читателю самостоятельно решить эту задачу в ИСО “Берег”. При этом придется воспользоваться так называемой “теоремой косинусов”, введя вспомогательное время движения. Затем минимизируя корни получающегося квадратного уравнения, найдем искомое расстояние. Решение

очень сложное, больше математическое, чем физическое. Поэтому воспользуемся возможностью выбора другой равноправной (по результатам) ИСО.

Свяжем начало другой ИСО с одним из кораблей, например, с первым. Тогда в ИСО “1-й корабль” этот корабль будет неподвижным, а второй будет двигаться со скоростью $\vec{v} = v_2 - v_1$, которая определяется по ТСС. В ИСО “1-й корабль” второй корабль будет двигаться по прямой ВД (рис.3). Теперь не представляет труда определить кратчайшее расстояние между кораблями: оно равно длине перпендикуляра АС, опущенного из местоположения 1-го корабля (т. А) на направление движения 2-го корабля. А так как длина в классической физике является величиной абсолютной, то и в ИСО “Берег” это расстояние между кораблями будет наименьшим. Если чертеж построен в определенном масштабе, то такое решение может дать не только качественный, но и количественный ответ.

Задача №3

Два велосипедиста едут навстречу друг другу. Один, имея скорость 18 км/ч, поднимается в гору с ускорением -20 см/с^2 , другой, имея скорость 5,4 км/ч, спускается с горы с ускорением $0,2 \text{ м/с}^2$. Через сколько времени они встретятся, и какое расстояние проедет каждый до встречи, если между ними в начальный момент было 130 м?

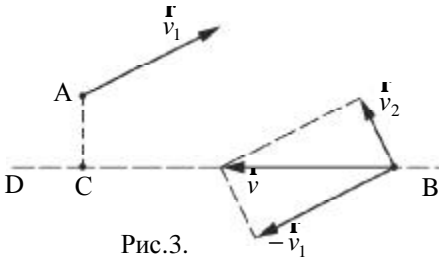


Рис.3.

Найти t, l_1, l_2

Решение

$$a_1 = -20 \text{ см/с}^2,$$

$$a_2 = 0,2 \text{ м/с}^2,$$

Дано $v_1 = 18 \text{ км/ч},$

$$v_2 = 5,4 \text{ км/ч},$$

$$l = 130 \text{ м}$$

“Стандартное” решение можно провести в ИСО “Земля”. Нужно составить уравнения движения для каждого велосипедиста, учесть, что $l = l_1 + l_2$, и решить квадратное уравнение относительно t , затем рассчитать l_1 и l_2 .

Но физически интереснее рассмотреть решение в СО “1-й велосипедист”. И хотя сам 1-й велосипедист движется ускоренно в ИСО “Земля”, но в своей СО он неподвижен. Второй же велосипедист в этой СО движется равномерно, так как по условию задачи его ускорение равно и одно направленно с ускорением 1-го велосипедиста в СО “Земля”. Таким образом, благодаря выбору СО, удалось более сложное равнопеременное движение велосипедистов свести к несравненно более простому равномерному движению. В СО “1-й велосипедист” второй велосипедист движется со скоростью $(v_1 + v_2)$, что следует из ТСС. Велосипедистов разделяет расстояние в 130 м (длина — инвариантная величина!). Этот путь 2-й велосипедист пройдет за время:

$$t = \frac{l}{v_1 + v_2}.$$

Но время в классической физике — инвариант, следовательно, столько же времени оба велосипедиста будут двигаться до встречи и в СО “Земля”. Мы нашли основной ответ задачи, не решая квадратного уравнения. А теперь, зная время движения любого велосипедиста, можно определить пройденный ими путь, используя уравнение движения велосипедистов в СО “Земля”. Например, для 1-го велосипедиста

$$l_1 = v_1 t - \frac{a_1 t^2}{2}.$$

Элементарный расчет дает следующие числовые данные:

$$t = 20 \text{ с}, \quad l_1 = 60 \text{ м}, \quad l_2 = 70 \text{ м}.$$

Обратим внимание на то, что к подобной задаче сводятся движения тел, имеющих одно и то же ускорение, например, задача

о свободном движении 2-х тел в поле тяжести Земли. При этом не обязательно, чтобы тела двигались навстречу друг другу, как в данной задаче.

Задача №4

Как быстрее и с наименьшей затратой энергии переправиться на лодке через реку?

Найти	$\angle \alpha$	Решение
Дано	$v_{\text{лодки}}$ $v_{\text{воды}}$	

Снова (как и в предыдущей задаче) предоставим читателю решить эту задачу в “стандартной” СО — “Земля”. Мы же выберем в качестве ИСО систему отсчета “Вода”. В этой ИСО движение лодки будет происходить в стоячей воде и нам не нужно учитывать влияние течения воды. Очевидно, что в ИСО “Вода” продольную ось лодки надо направить перпендикулярно берегам, тогда путь лодки от берега к берегу будет наикратчайшим (рис.4).

Таким образом, мы определили главное: чтобы путь лодки был наикратчайшим, нужно, чтобы она перемещалась перпендикулярно берегам. И это остается в силе при переходе к любой другой ИСО, в том числе и к ИСО “Земля”. Но следует обратить внимание на то, что траектория движения лодки в различных ИСО будет разная. Дело в том, что траектория тела обусловлена начальными условиями. Поэтому она имеет относительный характер. Так, в ИСО “Вода” траектория лодки располагается перпендикулярно берегам, в ИСО “Земля” траектория лодки составит острый угол с перпендикуляром к берегам, что обусловлено сносом лодки течением воды. Однако и та и другая траектории лодки – реальные, настоящие, но относятся к разным СО.

Разобранные нами задачи убеждают, как важно правильно выбрать систему отсчета, и что это вообще нужно делать всегда

при решении любой физической задачи. Удачно выбранная ИСО позволяет глубже вскрыть физическое содержание вопроса, во многих случаях упростить математическое описание наблюдаемой картины. Процесс осмысления условия задачи при выборе ИСО приучает анализировать, и тем самым формируется научное представление об окружающей действительности. Для дальнейшего изложения очень важно понимать, что относительность описания физических явлений и свойств материальных тел не находится в противоречии с объективностью и, следовательно, с реальностью этих явлений и свойств, сами явления происходят в любой ИСО, так как они инвариантны, с возможностью познания закономерностей материального мира.

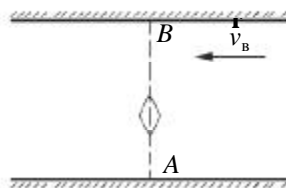


Рис.4.

§ 4. Принцип относительности и классическая электродинамика. Эфир. Опыты по обнаружению эфира

Инвариантность 2-го закона Ньютона относительно формул преобразования Галилея является иным выражением классического принципа относительности, равноправия всех ИСО. Отсюда следует, что, наблюдая механические явления, невозможно выделить одну ИСО из бесконечного числа этих систем отсчета. Тем самым отрицается возможность обнаружить абсолютный покой или абсолютное движение, представления о которых лежат в основе учения Ньютона о свойствах пространства, времени и движения.

В поисках абсолютной системы отсчета ученые обратились к исследованию других, не механических явлений, в частности к исследованию оптических процессов, которые, как оказалось, не сводимы к чисто механическим движениям. Не останавливаясь на истории развития оптики, укажем лишь на то, что к началу XIX в. утвердилась волновая теория света. Этому способствовало обнаружение таких явлений как интерференция, дифракция и поляризация света, которые могут быть объяснены все вместе только исходя из волновой природы света.

Волновая теория света строилась по аналогии с теорией упругих колебаний. Но для распространения механических колебаний, например, звуковых волн, необходима вещественная среда. Аналогично и в волновой теории предполагалось, что все мировое пространство, все прозрачные тела заполнены особой светоносной материей, получившей название “эфир”. Заполняя все мировое пространство, эфир мог бы служить телом отсчета в той особой, выделенной, абсолютной системе отсчета. Движение относительно эфира имело бы абсолютный характер, покой был бы абсолютным. Таким образом, изучение оптических явлений, в случае обнаружения эфира, позволило бы утвердить классическое учение о пространстве, времени и движении.

Одним из первых оптических явлений, осмысленных с рассматриваемой точки зрения, было явление абберации света, открытое английским астрономом Брадлеем (1725 г.). Им было

обнаружено, что при наблюдении далеких звезд в течение первой половины года зрительную трубу необходимо наклонять под определенным углом к вертикали в данном месте Земли. В следующую половину периода, вследствие изменения направления движения Земли вокруг Солнца, ось трубы надо направить в противоположную сторону от вертикали.

Вскроем причину этого явления, названного аберрацией, применив метод аналогии. В безветренную погоду капли дождя падают отвесно, и, чтобы дождевые капли не попали на одежду, ручку зонта необходимо держать вертикально. Но если подует ветер (или мы пойдём, что эквивалентно с точки зрения принципа относительности), то стержень зонта необходимо наклонить навстречу ветру (по направлению нашего движения). Если ветер изменит направление (или мы повернем назад), то стержень зонта нужно также наклонить в противоположную сторону. И чем больше скорость ветра (нашего движения), тем на больший угол нужно отклонять ручку зонта от вертикали. Очевидно, что угол наклона ручки определяется не только скоростью нашего движения, но и скоростью падения капель дождя. Точно так же при наблюдении аберрации угол наклона зрительной трубы относительно вертикальной линии определяется как скоростью движения Земли вокруг Солнца, так и скоростью распространения света.

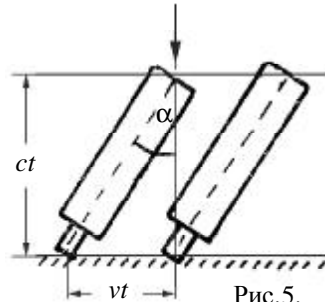


Рис.5.

Именно это понял Брэдлей. Если исходить из гипотезы светоносного эфира, то явление аберрации можно объяснить, предполагая, что эфир должен быть абсолютно неподвижным в мировом пространстве. На рис. 5 схематически изображается процесс распространения света в абсолютно неподвижном эфире, что приводит к необходимости наклонять ось зрительной трубы к вертикали.

Элементарные расчеты позволяют определить этот угол наклона: за время t Земля пройдет расстояние vt , двигаясь по

орбите вокруг Солнца, фронт световой волны переместится от объектива до окуляра на расстояние ct . Для определения угла наклона оси трубы можно составить следующее соотношение:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{vt}{ct} = \frac{v}{c}. \quad (4.1)$$

Астрономические наблюдения хорошо подтверждают эту формулу.

В 1818 г. французский физик Френель дал теоретическое описание опыта, в котором рассматривалось распространение света в движущейся среде. В опыте ставилась задача: выяснить, как ведет себя эфир в движущейся среде. Расчеты показывали, что эфир должен частично увлекаться движущейся средой, а поэтому в формулу теоремы сложения скоростей необходимо ввести поправку, формула принимала вид:

$$u' = u - kv. \quad (4.2)$$

В 1851 г. французский физик Физо осуществил эксперимент, идею которого предложил Френель. Опыт дал хорошее совпадение с теоретическими расчетами. Суть опыта состояла в следующем (рис.6). Луч света от источника S попадает на

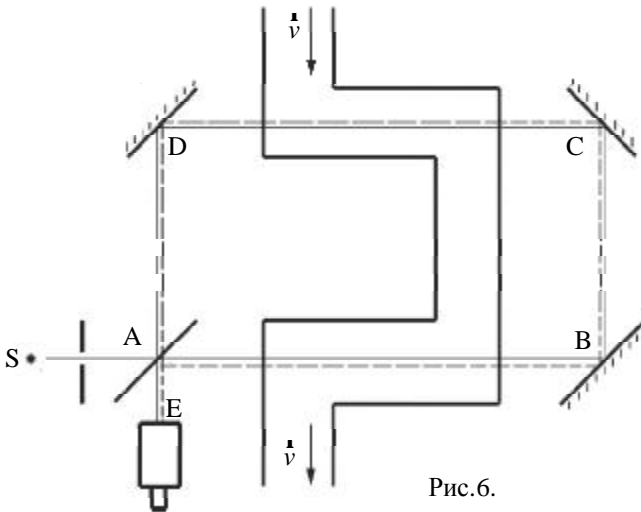


Рис.6.

полупрозрачную пластинку А и разделяется на два луча. Одна часть луча идет по пути ABCDE, другая — по пути ADCBAE. В приборе E лучи сходятся и интерферируют.

У обоих лучей условия распространения совершенно одинаковы до тех пор, пока жидкость в трубе неподвижна; если же привести в движение жидкость, то один луч будет идти по направлению тока жидкости, другой — навстречу, условия для движения лучей изменятся, возникнет оптическая разность хода, которая зависит от скорости движения жидкости. В результате изменится интерференционная картина, и по ее изменению можно судить об увлечении эфира движущейся средой. Опыт подтвердил формулу (4.2), где коэффициент k (коэффициент увлечения Френеля) оказался равным

$$k = 1 - \frac{1}{n^2},$$

n — показатель преломления движущейся среды.

Итак, опыт Физо для своего объяснения требовал, чтобы эфир частично увлекался движущейся средой.

Проблема эфира обростала вопросами. По своему смыслу эфир должен представлять собой наилегчайшее вещество с ничтожной плотностью, чтобы не оказывать сопротивления движению тел, в том числе планетам и звездам. С другой стороны, было установлено, что световые волны являются поперечными волнами. Но такие волны могут существовать только в твердых телах, а учитывая гигантскую скорость света, нужно было считать, что плотность эфира (его упругость) также должна быть чрезвычайно большой. С другой стороны, в опыте Брадлея эфир ведет себя так, как если бы он был абсолютно неподвижным в мировом пространстве, в опыте же Физо он увлекается движущейся средой.

Но напомним, зачем эфир был нужен классической физике. Он действительно был необходим классической физике не только как светоносная среда, но и как среда, с которой можно было бы связать абсолютную систему отсчета, относительно которой в духе Ньютона движение и покой имели бы абсолютный характер.

Если учесть, что в явлении аберрации и в опыте Физо точность расчетов была первого порядка относительно величины $\frac{v}{c}$, то естественно возникает желание поставить опыт с точностью до второго порядка этой величины. Ученые надеялись, что тогда удастся обнаружить более тонкие эффекты проявления эфира и тем самым зафиксировать его существование однозначно.

Идею соответствующего опыта предложил английский физик Дж. Максвелл, а осуществил его в 1881 г. американский физик А. Майкельсон (позже этот ученый неоднократно повторял эксперимент, увеличивая точность измерений, но всегда получал один и тот же результат).

Суть опыта состояла в следующем: световой луч разделялся на две части при помощи полупрозрачной пластинки О (рис.7), которые далее распространялись во взаимно перпендикулярных направлениях, а затем с помощью зеркал Z_1 и Z_2 сводились вместе и интерферировали.

Если бы существовал “эфирный ветер”, то при поворотах всей экспериментальной установки на разные углы должна была бы изменяться интерференционная картина (из-за изменения условий распространения лучей, что особенно очевидно, если угол поворота установки равен 90° и тот луч, который первоначально располагался в направлении движения Земли вокруг Солнца, оказывался в поперечном положении). Однако, этого не происходило (говорят об отрицательном результате в опыте Майкельсона), интерференционная картина не изменялась, как если бы никакого эфирного “ветра” не было. Чтобы спасти столь нужный классической физике эфир, была выдвинута гипотеза, что эфирного ветра нет потому, что эфир полностью увлекается Землей (как воздушная оболочка вокруг Земли).

Дадим элементарное математическое описание опыта Майкельсона. Выберем СО “Земля” (рис.7). Расположим первоначально плечо l_1 вдоль направления движения Земли. Скорость света в неподвижном эфире обозначим через c . При движении 1-го луча вдоль OZ_1 из-за эфирного ветра согласно ТСС скорость

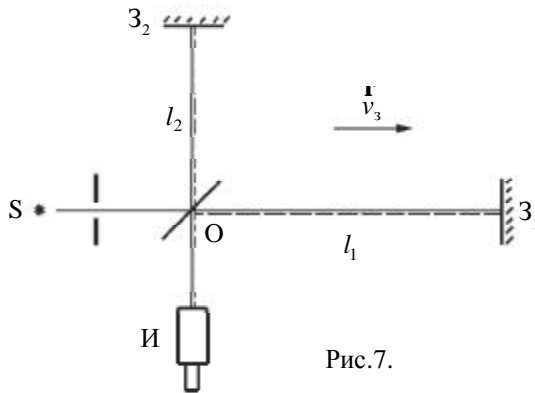


Рис.7.

света относительно прибора будет $(c - v)$ и для прохождения пути OZ_1 1-му лучу потребуется время

$$t_1 = \frac{l_1}{c - v}.$$

После отражения от зеркала Z_1 до возвращения к полупрозрачной пластине O 1-й луч затратит время

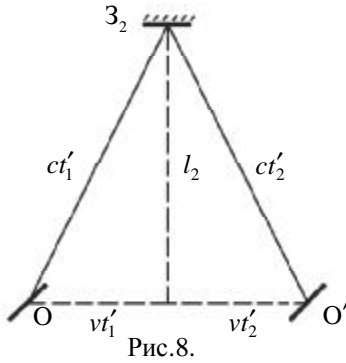
$$t_2 = \frac{l_1}{c + v},$$

где учтено, что эфирный ветер будет сносить световую волну к полупрозрачной пластине O и согласно ТСС результирующая скорость будет $(c + v)$.

Полное время движения 1-го луча “туда” и “обратно” равно:

$$t_1 + t_2 = \frac{l_1}{c - v} + \frac{l_1}{c + v} = \frac{2l_1 c}{c^2 - v^2} = \frac{2l_1}{c} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1}. \quad (4.3)$$

Для нахождения времени движения 2-го луча перейдем в ИСО “Звезды” (рис.8). Мы имеем право это сделать ввиду равноправия ИСО (принцип относительности Галилея). Кроме того, нам нужно определить время движения 2-го луча, а эта величина в классической физике является инвариантом. Физически же переход обусловлен тем, что в ИСО “Земля” скорость света в направлении



OZ_2 не равна c . В ИСО “Звезды” это затруднение с определением скорости 2-го луча устраняется, так как в этой ИСО эфир неподвижен (это исходная гипотеза относительно поведения эфира в мировом пространстве) и луч 2 действительно имеет скорость c .

Как видно из рис.8., на основании теоремы Пифагора можно составить следующее равенство:

$$v^2 t_1'^2 + l_2^2 = c^2 t_1'^2,$$

откуда для времени движения второго луча к зеркалу Z_2 получаем:

$$t_1' = \frac{l_2}{c} \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (4.4)$$

В силу симметрии рис.8 можно утверждать, что время возвращения 2-го луча к полупрозрачной пластине O от зеркала Z_2 равно времени прихода луча из точки O к зеркалу Z_2 : $t_2' = t_1'$. Таким образом, полное время движения 2-го луча, причем в любой ИСО (в силу инвариантности временных промежутков) равно:

$$t_1' + t_2' = \frac{2l_2}{c} \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (4.5)$$

Определим разность времен хода 1-го и 2-го лучей до встречи у полупрозрачной пластины:

$$\Delta t = (t_1 + t_2) - (t_1' + t_2') = \frac{2l_1}{c} \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-1} - \frac{2l_2}{c} \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (4.6)$$

После поворота прибора на 90^0 , плечи l_1 и l_2 меняются местами и, повторяя предыдущие выкладки, получаем для разности хода лучей в этом положении экспериментальной установки:

$$\Delta t' = \frac{2l_1}{c} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}} - \frac{2l_2}{c} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1}. \quad (4.7)$$

Как видно из выражений (4.6) и (4.7), вывод которых основан на гипотезе абсолютно неподвижного в мировом пространстве эфира, величины Δt и $\Delta t'$ не равны друг другу, а это означает, что интерференционная картина на втором этапе опыта (после поворота установки на 90^0) должна отличаться от первоначальной. Однако в опыте Майкельсона и в его более точных повторениях вплоть до последнего времени никакого изменения интерференционной картины не наблюдалось.

Помимо упомянутой выше гипотезы, выдвинутой для объяснения отрицательного результата в опыте Майкельсона, о полном увлечении эфира движущимся телом (в данном случае Землей), были предложены и другие. Например, гипотеза о сокращении движущихся тел в направлении их движения (гипотеза Лоренца-Фицджеральда). И хотя она “спасала” эфир и объясняла отрицательный результат в опыте Майкельсона, но приходила в противоречие с принципом относительности Галилея, так как позволяла обнаружить абсолютно покоящееся тело, в котором нет никаких сокращений, и, следовательно, внутренних деформаций, по которым можно было бы судить, движется данное тело или покоится (абсолютно).

Другая гипотеза пыталась учесть влияние движения источника света на скорость распространения света (это так называемая “баллистическая” гипотеза Ритца, использующая аналогию движения света и движение снарядов, испущенных движущимся орудием). Но наблюдение двойных звезд, движущихся около общего центра масс, измерение скорости солнечных лучей, вышедших с диаметрально противоположных точек солнечного диска при наблюдении полного солнечного

затмения (опыты советского ученого Бонч-Бруевича, 1956 г.), показали, что скорость распространения света не зависит от скорости источника света и наблюдателя. Выдвигались и другие гипотезы по объяснению отрицательного результата в опыте Майкельсона, но все они были внутренне противоречивы.

В физике эфира сложилась драматическая ситуация: мало того, что эфир обладал несовместимыми собственными свойствами (должен был иметь чрезвычайно малую плотность, чтобы не тормозить движение небесных тел, обладать гигантской упругостью подобно сверхтвердым телам, чтобы можно было объяснить огромную скорость распространения электромагнитных волн в вакууме), в трех рассмотренных выше опытах (а вообще говоря, их было значительно больше) он вел себя противоречиво. Или он должен был быть абсолютно неподвижным в мировом пространстве (только такая модель объясняла явление аберрации), или должен был частично увлекаться движущейся средой (как в опыте Физо), или полностью увлекаться движущимся телом (чтобы согласоваться с опытом Майкельсона).

Выход из этой драматической для классической физики ситуации был найден молодым немецким ученым А. Эйнштейном в 1905 году. Он понял, что все противоречия, связанные с эфиром, не случайны, а связаны с невозможностью обнаружить абсолютный покой и движение не только наблюдая механические, но и оптические, т.е. электромагнитные явления. Но при этом Эйнштейну пришлось высказать ряд революционных положений и отказаться от многих общепринятых истин классической физики.