



Глава 4

Основы специальной теории относительности

Чтоб этот довод рухнул также вдруг,
Тебе бы опыт сделать не мешало;
Ведь он для вас — источник всех наук.

Данте



Роль скорости распространения света в вакууме настолько важна в физике и технике, а современные методы ее измерения настолько надежны, что в 1983 г. было принято решение считать значение этой скорости точным. Оно равно $c = 299\,792\,458 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Результаты экспериментов показывают, что с такой скоростью распространяется в вакууме не только видимый свет, но и любое электромагнитное излучение — от радиоволн до гамма-излучения.



Развитие науки и техники позволило физикам уже на рубеже XIX — XX вв. провести достаточно точные измерения скорости света. Как оказалось, скорость света в вакууме не зависит ни от скорости движения приемника света, ни от скорости источника, излучающего свет.

Эти удивительные экспериментальные результаты привели физиков к пересмотру представлений о свойствах пространства и времени. Была создана **специальная теория относительности (СТО)** — раздел физики, в котором изучаются свойства пространства и времени, а также законы движения тел при скоростях, сравнимых со скоростью света.

Специальная теория относительности называется также *релятивистской теорией* (от лат. *relativus* — относительный). Явления, происходящие при скоростях, сравнимых со скоростью света, характеризующие их величины (скорость, энергия, импульс и т. д.) и законы этих явлений тоже называются *релятивистскими*.

В повседневной жизни и практически во всех технологиях мы не встречаемся с релятивистскими скоростями. Зачем же изучать теорию относительности? Для этого имеется целый ряд причин.

Во-первых, основную информацию об окружающем мире мы получаем с помощью зрения, непосредственно воспринимая световое излучение. Таким образом, «самый релятивистский» объект природы — свет играет важнейшую роль в жизни каждого человека.

Во-вторых, как показывает весь накопленный опыт, скорость света в вакууме имеет фундаментальное, выделенное значение: ни один сигнал не может распространяться, ни одна частица не может двигаться быстрее света.

В-третьих, релятивистская теория необходима для объяснения явлений в атомной и ядерной физике, в физике элементарных частиц. Без использования законов СТО невозможно создание ускорителей элементарных частиц, обеспечение современной технологии GPS.

В-четвертых, релятивистская теория играет важную роль в изучении Вселенной. Обнаружены галактики, движущиеся с огромными скоростями. Без релятивистской теории нельзя объяснить свойства таких астрономических объектов, как «черные дыры», нейтронные звезды, пульсары.

§ 24. Принцип относительности Галилея и электромагнитные явления. Экспериментальные предпосылки специальной теории относительности

- После разработки высокоточных методов измерения скорости света появилась возможность проверить на эксперименте: увеличится ли скорость света, если его источник движется навстречу приемнику света? Уменьшится ли скорость света, если они будут удаляться друг от друга? Иными словами, можно ли, двигаясь навстречу свету, увеличить его относительную скорость, а убегая — уменьшить? И что же показали подобные эксперименты?



Инерциальной системой отсчета (ИСО) называется система, в которой при отсутствии воздействий на тело его скорость остается постоянной.

Принцип относительности Галилея: во всех ИСО все механические явления при одинаковых начальных условиях происходят одинаковым образом.

Классический закон сложения скоростей: $\vec{v}_1 = \vec{v}_2 + \vec{V}$, где $\vec{v}_1$ — скорость движения тела относительно ИСО-1, $\vec{v}_2$ — относительно ИСО-2, $\vec{V}$ — скорость ИСО-2 относительно ИСО-1.

Создание специальной теории относительности исторически связано с развитием электродинамики — науки об электрических и магнитных явлениях. За два столетия, которые отделяли физику Галилея и



Ньютона от физики Максвелла и Герца, в ней накопилось огромное количество новых научных фактов. В то же время представление о мироздании базировалось на **механической** картине мира, основанной на механике Галилея — Ньютона (*классической механике*).

Как известно, в классической механике такие понятия, как координата, скорость, траектория тела, являются *относительными* — они изменяются при переходе от одной ИСО к другой. В то же время некоторые понятия и величины в классической физике считались *абсолютными*. Например, как само собой разумеющееся принималось положение об *абсолютности времени* (ход времени одинаков во всех ИСО) и *абсолютности одновременности* (события одновременные в некоторой ИСО, одновременны и в любой другой ИСО). Очевидным следствием этих представлений является классический закон сложения скоростей. Согласно этому закону при переходе к ИСО, которая движется со скоростью $\vec{V}$ навстречу телу, модуль скорости тела становится больше на величину, равную V . Это означает, что в механике Галилея — Ньютона не существует максимально возможной (*предельной*) скорости.

Такие представления согласовывались как с повседневным опытом, так и с результатами экспериментов в механике, акустике, гидродинамике и т. д.

Однако электромагнитные процессы происходят со скоростями, сравнимыми со скоростью света, т. е. гораздо большими, чем скорости движения тел, с которыми имела дело механика. В связи с этим возникают вопросы: будет ли справедлив принцип относительности Галилея (важнейший принцип классической механики) для электромагнитных явлений? Зависит ли скорость света в вакууме от движения источника и (или) приемника излучения, как это должно быть по классической теории? Существует ли в природе предельная скорость? Для ответа на эти вопросы были необходимы новые эксперименты.

Рассматривая проблему распространения электромагнитных волн (света), полезно обратиться к хорошо изученным закономерностям поведения звуковых волн. Они могут распространяться только в упругой среде — газообразной, жидкой или твердой. Естественным образом принять в качестве гипотезы, что и для распространения света необходима некоторая среда. Ее назвали *мировым эфиром*. При таком подходе решающим становится вопрос о скорости света, измеренной наблюдателем, который движется относительно эфира.



Вернемся к аналогии со звуком. Пусть скорость звука в покоящейся среде равна $v_{зв}$. Опыт показывает, что, как и ожидалось, при измерении

скорости звука прибором, который движется относительно этой среды со скоростью $\vec{V}$ навстречу звуку, получается величина, равная $v_{\text{зв}} + V$.

А что получится в случае распространения электромагнитных волн? Зависит ли скорость света от движения лаборатории, в которой проводятся измерения этой скорости?

В качестве такой быстро движущейся лаборатории ($V \approx 30 \frac{\text{км}}{\text{с}}$) было предложено использовать Землю. Если считать, что Земля, обращаясь вокруг Солнца, движется сквозь неподвижный эфир, то в лаборатории, находящейся на Земле, следует ожидать появления так называемого «эфирного ветра» (подобно тому, как возникает встречный поток воздуха при езде на мотоцикле в безветренную погоду). Как повлияет «эфирный ветер» на скорость света в системе отсчета «Земля»?

В 1887 г. американские физики А. Майкельсон и Р. Морли провели эксперимент, точность измерений в котором была достаточной для обнаружения влияния «эфирного ветра».

Разберем схему их экспериментальной установки, получившей название *интерферометр Майкельсона* (рис. 167). Он состоял из оптического устройства, расположенного на массивной каменной платформе, плавающей в бассейне с ртутью. Такая конструкция практически исключала влияние механических колебаний платформы на оптические процессы.

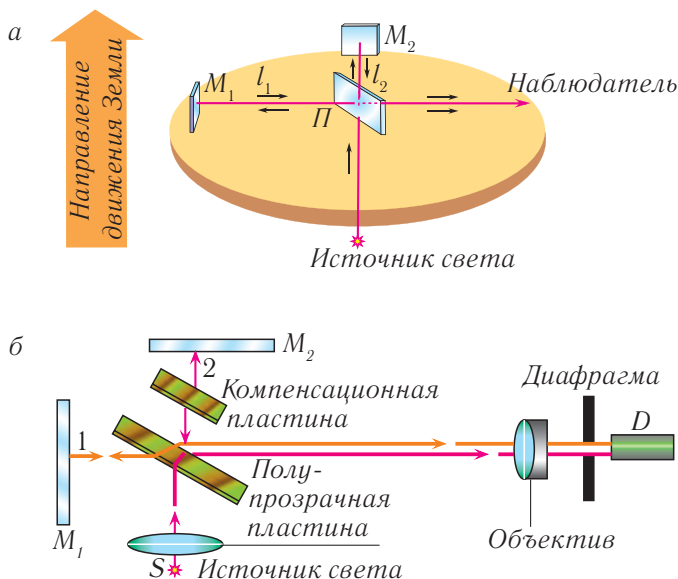


Рис. 167. Опыт Майкельсона — Морли: а — вид установки; б — схема опыта

Свет от источника S с помощью полупрозрачной пластины Π делился на два взаимно перпендикулярных луча 1 и 2 (см. рис. 167). Лучи отражались от зеркал M_1 и M_2 , а затем сводились вместе и попадали на детектор D . В результате сложения этих лучей получалась интерференционная картина (чередующиеся темные и светлые полосы, наблюдавшиеся с помощью детектора).

Ожидалось, что эта картина будет существенно зависеть от ориентации интерферометра по отношению к направлению движения Земли ($\vec{V}_{\text{инт}}$) относительно «неподвижного» эфира (см. рис. 167). Действительно, если первый из пучков направлен вдоль скорости $\vec{V}_{\text{инт}}$, а второй — перпендикулярно ей, то «эфирный ветер» будет неодинаковым для этих лучей. Соответственно, будут различными и времена прохождения света для лучей 1 и 2 от источника S до приемника D , т. е. появится дополнительная «разность хода» интерферирующих световых волн.

При повороте платформы на 90° лучи «менялись местами» и, соответственно, должна была измениться разность хода. Как показывали расчеты, это привело бы к смещению интерференционной картины на 0,4 ширины интерференционной полосы. Однако ожидаемое смещение не было обнаружено, хотя интерферометр Майкельсона позволял наблюдать сдвиг интерференционной картины даже на 0,01 полосы.

Эксперименты повторялись в разное время суток и в разные времена года (т. е. при различных направлениях скорости интерферометра относительно эфира). Однако смещения интерференционной картины так и не было обнаружено. Это было настолько же невероятно, как если при езде на мотоцикле вы не почувствовали бы встречного воздушного потока.

Результаты эксперимента Майкельсона — Морли и многих других экспериментов по измерению скорости света привели к выводу о независимости скорости света в вакууме как от движения приемника, так и от движения источника излучения. Представления о существовании мирового эфира оказались несостоятельными.

Данный факт был одной из величайших загадок физики конца XIX — начала XX в. Обнаружилось явное противоречие между результатами экспериментов и классическими представлениями. Так, при переходе от одной ИСО к другой, согласно классическому закону сложения скоростей, к скорости света должна векторно прибавляться скорость движения этих ИСО друг относительно друга. Однако результаты экспериментов упрямо утверждали, что скорость света в вакууме постоянна и во всех ИСО одинакова.



Это был вызов механической картине мира, которая складывалась веками.

Выдающиеся ученые того времени (А. Пуанкаре, Г. А. Лоренц и др.) выдвинули целый ряд полезных идей для объяснения этого противоречия. Однако решающий шаг был сделан в 1905 г. 25-летним физиком Альбертом Эйнштейном, работавшим тогда техническим экспертом Федерального патентного бюро в Берне (Швейцария). Им была выдвинута новая теория пространства и времени, получившая название **специальная теория относительности**. Эта революционная теория позволила не только объяснить результат эксперимента Майкельсона — Морли, но и положила начало новому этапу развития физики.



1. Сформулируйте принцип относительности Галилея.
2. Какие величины в механике Ньютона считались относительными, а какие — абсолютными?
3. Сформулируйте закон сложения скоростей в классической механике.
4. Опишите эксперимент Майкельсона — Морли.
5. В чем состоит противоречие между классическим законом сложения скоростей и данными экспериментов по измерению скорости света?
6. Какую роль сыграл эксперимент Майкельсона — Морли в развитии физики?



§ 25. Постулаты специальной теории относительности

- Отрицательный результат опыта Майкельсона — Морли поставил ученых в затруднительное положение, поскольку совершенно не укладывался в сложившиеся веками классические (ньютоновские) представления о свойствах пространства и времени. Это был «вызов века», разрешение которого привело к рождению новых, релятивистских представлений о связи пространства и времени.



Фундаментальное утверждение, лежащее в основе теории и принимаемое без доказательства, называется постулатом (аксиомой). В физике постулат, как правило, является обобщением экспериментальных фактов.

Как отмечалось в предыдущем параграфе, физика столкнулась с противоречием между постоянством скорости света в вакууме и классическим законом сложения скоростей. Проиллюстрируем эту проблему на простом примере: автомобиль движется со скоростью $\vec{V}$ навстречу лучу прожектора. Согласно классическому закону сложения скоростей

в системе отсчета «автомобиль» скорость света должна быть равной $c + V$. Однако результаты экспериментов решительно утверждают: во всех ИСО скорость света в вакууме равна c .

Для преодоления указанного противоречия пришлось глубоко проанализировать и пересмотреть классические представления о пространстве и времени, в результате чего была создана специальная теория относительности.



В основу данной теории Эйнштейн положил два *постулата*, являющихся обобщением экспериментальных фактов.

Первый постулат СТО (постулат относительности): *во всех инерциальных системах отсчета все физические явления при одинаковых начальных условиях происходят одинаковым образом.*

Данный постулат представляет собой обобщение классического принципа относительности на все физические явления. Из него следует, что никакими экспериментами, проведенными внутри ИСО, невозможно установить, покоится она или движется.

Представим себе вагон, движущийся равномерно и прямолинейно без толчков и покачиваний. Можно ли установить факт движения вагона с помощью экспериментов (механических, электромагнитных и любых других), *проводимых внутри вагона* (т. е. без наблюдения событий, происходящих вне его)? Весь накопленный в физике опыт показывает, что это невозможно в полном соответствии с первым постулатом СТО.



Второй постулат СТО (постулат постоянства скорости света): *во всех инерциальных системах отсчета скорость света в вакууме одинакова и не зависит ни от скорости источника, ни от скорости приемника излучения.*



Как уже говорилось, этот постулат полностью соответствует результатам многократно проводившихся экспериментов, но противоречит классическому закону сложения скоростей.

Эйнштейн разрешил это противоречие, проведя глубокий анализ представлений о времени и пространстве.

В основе этого анализа лежит понятие *события*. Под событием понимают некоторое явление, происходящее в определенной точке пространства в определенный момент времени. Понятие «событие» является идеализацией реального явления, происходящего очень быстро в очень малой области пространства. Примером события может служить вспышка света, выстрел орудия, соударение двух частиц, пересечение спортсменом линии финиша и т. д. Для характеристики времени и места события в определенной ИСО достаточно указать три его координаты и момент времени.

События, произошедшие в один и тот же момент времени, называются *одновременными*. Как уже говорилось, в классической физике принималось положение об *абсолютности одновременности*: «если два события произошли одновременно в некоторой ИСО, то они одновременны и в любой другой ИСО».

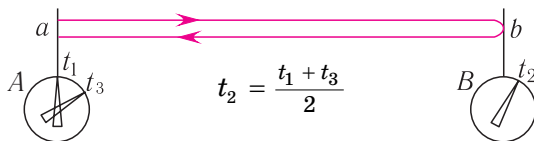


Рис. 168. Синхронизация часов

Для проверки этого нужно иметь синхронизованные часы (рис. 168).

Эйнштейн обратил внимание на то, что *абсолютность одновременности* вовсе не очевидна. События, *одновременные* в одной ИСО, могут оказаться *не одновременными* в другой ИСО, если она движется относительно первой.

Таким образом, *одновременность событий* — понятие *относительное* (рис. 169). Отметим, однако, что одновременные события, произошедшие в одном и том же месте, одновременны в любой ИСО. Их одновременность абсолютна.

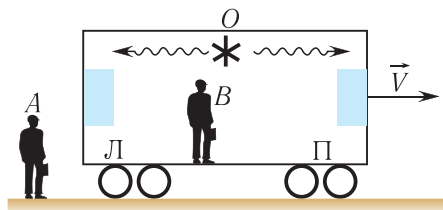


Рис. 169. Относительность одновременности

► Наряду с относительностью одновременности из постулатов СТО следует существование и других релятивистских эффектов.

Эффект замедления времени. Часы, движущиеся со скоростью v относительно данной ИСО, идут медленнее неподвижных часов. При этом промежуток времени τ , измеренный движущимися часами, меньше промежутка времени Δt , измеренного часами, неподвижными относительно этой ИСО, согласно соотношению $\tau = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.

Промежуток τ называют собственным временем, Δt — лабораторным временем, а данный эффект — релятивистским замедлением времени.

Эффект сокращения длины. Линейный размер движущегося со скоростью

тела сокращается в направлении его движения $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, где l — длина тела в ИСО, относительно которой оно движется, а l_0 — длина тела в ИСО, в которой оно покоится. Поперечные размеры тела при движении не изменяются.



1. Какие системы отсчета называются инерциальными?
2. Как формулируется первый постулат СТО?

3. Какие эксперименты подтверждают справедливость первого постулата СТО?
4. Чем отличается принцип относительности Галилея от первого постулата СТО?
5. Как формулируется второй постулат СТО? Какие эксперименты его подтверждают?



§25-1

§ 26. Элементы релятивистской динамики. Взаимосвязь массы и энергии

■ Изменение представлений о свойствах пространства и времени повлекло за собой появление новых взглядов на связь энергии тела с его массой. В чем суть знаменитой формулы Эйнштейна $E_0 = mc^2$? Где она находит свое применение?



В классической механике импульс тела определяется как произведение его массы на скорость: $\vec{p} = m\vec{v}$. Изменение импульса тела равно импульсу результирующей всех сил, приложенных к нему: $\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t$.



Необходимость изменения динамики очевидна хотя бы из того, что согласно законам Ньютона любое тело можно в принципе разогнать до любой скорости. Приложим к покоящемуся телу массой m постоянную силу $\vec{F}$. Используя второй закон Ньютона, найдем, что к моменту времени t тело приобретет скорость $v = \frac{F}{m}t$. Следовательно, в рамках классической механики при $t > \frac{mc}{F}$ скорость тела v превзошла бы скорость света c , что противоречит результатам экспериментов и основным положениям СТО. Зависимость скорости v тела от времени t в релятивистском случае приведена на рисунке 170.

Какие же соотношения динамики оказалось необходимым изменить при переходе от механики Ньютона к СТО, а какие остались неизменными?

Сохранили свой вид законы изменения импульса и энергии тела:

$$\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t; \Delta E = A, \quad (1)$$

где A — работа, совершенная силой $\vec{F}$.

Изменились соотношения, выражающие зависимость импульса и энергии тела от его скорости:

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$



Важнейшим отличием СТО от классической механики является то, что энергия тела не обращается в нуль, даже когда оно покоится ($\vec{v} = 0$). В этом случае **энергия покоя** E_0 тела пропорциональна его массе:

$$E_0 = mc^2. \quad (2)$$

Таким образом, в покое-щемся теле таится огромный запас энергии. Трудно переоценить практическое значение этой несложной формулы, поскольку именно она указала на взаимосвязь энергии и массы вещества. Человечество узнало о возможности получения энергии из вещества. На этой формуле основана вся энергетика, в которой энергия покоя топлива переходит в другие виды энергии.

Из равенства (2) следует, что изменение энергии покоя тела на ΔE_0 связано с изменением его массы на Δm , где:

$$\Delta m = \frac{\Delta E_0}{c^2}. \quad (3)$$

Утверждение о том, что *энергия покоя пропорциональна массе, а изменение энергии покоя связано с изменением массы*, называют **законом взаимосвязи массы и энергии**.

Трудно переоценить практическое значение этого закона для современной энергетике. Из него следует, что тело массой $m = 1,0$ г обладает энергией покоя:

$$E_0 = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot (3,0 \cdot 10^8)^2 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} = 9,0 \cdot 10^{13} \text{ Дж} = 2,5 \cdot 10^7 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Эта энергия эквивалентна энергии, выделяющейся при сгорании 2000 тонн нефти. Так, благодаря прогрессу физики в 1905 г. человечество узнало о практически «неисчерпаемых» запасах энергии, содержащихся в любом веществе.

Формула (3) применима ко всем явлениям, в которых изменяется внутренняя энергия вещества. При процессах, происходящих на атомно-

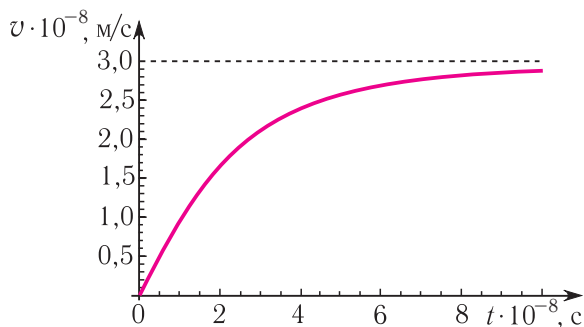


Рис. 170. Зависимость скорости релятивистской частицы от времени

молекулярном уровне, изменения массы крайне малы. Так, при полном превращении льда в воду относительное изменение массы $\frac{\Delta m}{m} = 3,7 \cdot 10^{-12}$, при нагревании на $\Delta t = 200^\circ\text{C}$ железного бруска $\frac{\Delta m}{m} = 1,0 \cdot 10^{-12}$. При химических реакциях относительное изменение массы несколько выше. Например, при сгорании метана в кислороде $\frac{\Delta m}{m} = 0,9 \cdot 10^{-10}$. Для ядерных реакций ситуация существенно иная. Для них характерны величины $\frac{\Delta m}{m} = 10^{-3}$, в десятки миллионов раз бóльшие, чем для химических реакций.



► Согласно принципу соответствия любая новая физическая теория, претендующая на более глубокое описание физических явлений, должна включать в себя классическую (ньютоновскую) теорию как предельный случай. Специальная теория относительности полностью удовлетворяет принципу соответствия. При скоростях $v \ll c$ законы релятивистской механики переходят в законы механики Ньютона.



1. Каким соотношением связаны между собой масса тела и энергия покоя?
2. Сформулируйте закон взаимосвязи массы и энергии покоя.



Упражнение 18

1. Какая энергия E выделится при полном превращении вещества массой $m = 1,0$ мг в излучение?
2. Определите массу m частицы, если ее энергия покоя $E_0 = 8,2 \cdot 10^{-14}$ Дж.
3. Какой массе Δm вещества соответствует энергия покоя, равная энергии, потребляемой электролампой мощностью $P = 100$ Вт в течение промежутка времени $\tau = 1,0$ год?
4. Определите массу Δm , теряемую Солнцем за год, если на поверхность Земли площадью $S = 1,0$ см² каждую секунду попадает $E = 0,14$ Дж энергии излучения. Расстояние от Земли до Солнца $R = 1,5 \cdot 10^8$ км.



САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 4

Специальная теория относительности (СТО) основывается на двух постулатах (принципах).

Первый постулат (постулат относительности): все законы физики, описывающие любые физические явления, должны иметь одинаковый вид во всех ИСО.

Второй постулат (постулат постоянства скорости света): во всех ИСО скорость света в вакууме одинакова и не зависит ни от скорости движения источника, ни от скорости приемника излучения.

Скорость света в вакууме является предельной скоростью движения материальных объектов и распространения сигналов.

Энергия покоя E_0 тела пропорциональна его массе:

$$E_0 = mc^2.$$

Закон взаимосвязи изменений массы и энергии покоя:

$$\Delta m = \frac{\Delta E_0}{c^2}.$$

Задания для самостоятельных исследований

Подготовьте интерактивную презентацию (флаер, плакат, реферат) о деятельности выдающихся физиков (А. Эйнштейн, Г. А. Лоренц, А. Пуанкаре, А. Майкельсон).

