

континентах и в различное время года. В результате этих опытов скорость движения Земли относительно эфира следует считать равной нулю с возможной ошибкой менее  $10^3$  см/сек, т. е. менее одной тысячной от скорости орбитального движения Земли вокруг Солнца, так как с такой точностью равны между собой значения скорости света по направлению движения Земли и против него.

## 10.6. Инвариантность величины $c$

Результат опытов Майкельсона и Морли показывает, что нельзя обнаружить существование эфира. Это означает, что величина эффекта Доплера при распространении света должна зависеть только от относительной скорости двух систем отсчета, а не от абсолютной скорости по отношению к какому-то неподвижному эфиру \*). Этот результат означает также, что величина скорости света не зависит от движения источника или наблюдателя. Последний вывод довольно хорошо доказан экспериментально, но точность этих экспериментов можно еще улучшить. Работа Саде, цитируемая в гл. 11, показывает, что скорость  $\gamma$ -лучей, испускаемых источником, который движется со скоростью порядка  $1/2c$ , остается постоянной с точностью  $\pm 10\%$  независимо от скорости движения источника.

На основании всех экспериментальных данных мы приходим к следующему выводу: *если фронт световой волны от точечного источника является сферическим в какой-либо одной инерциальной системе отсчета, то он будет сферическим и для наблюдателя в любой другой инерциальной системе отсчета.*

Мы отметили выше, что скорость распространения электромагнитных волн не зависит от частоты в интервале от  $10^8$  до  $10^{22}$  *гц*. Тщательные измерения показывают также, что величина  $c$  не зависит от интенсивности света и от наличия других электрических и магнитных полей. Все это относится только к электромагнитным волнам, распространяющимся в свободном от вещества пространстве.

## 10.7. Предельная скорость

Мы видели, что в свободном от вещества пространстве электромагнитные волны могут распространяться только со скоростью  $c$ . Может ли скорость чего-либо превосходить этот предел скорости  $c$ ?

Рассмотрим движение заряженных частиц в ускорителе. Можно ли так разогнать частицы, чтобы они двигались со скоростью, большей  $c$ ? До сих пор мы в этом курсе еще не встречались

---

\*) Заметьте, что в этом отношении распространение света отличается от распространения звука. При анализе эффекта Доплера для звука мы должны были знать скорость среды относительно источника и приемника. Опыты Майкельсона и Морли говорят нам, что, рассматривая распространение света в свободном от вещества пространстве, мы должны забыть об эфире.

непосредственно с утверждением, которое отрицало бы возможность ускорения заряженных частиц до произвольно высоких скоростей.

Следующий опыт \*) иллюстрирует утверждение, что нельзя ускорить частицу до скорости, превышающей  $c$ . В этом опыте электроны ускорялись последовательно все более сильными электростатическими полями в ускорителе Ван-де-Граафа, а затем они двигались с постоянной скоростью через пространство, свободное от поля (рис. 10.39). Время их полета на измеренном расстоянии  $AB$ ,

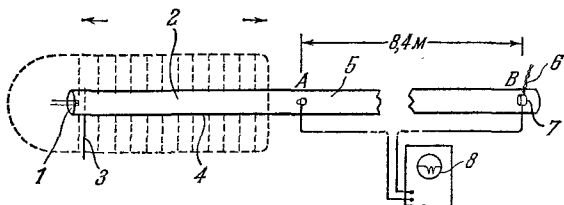


Рис. 10.39. Принципиальная схема опыта по определению предельной скорости. Электроны ускоряются однородным полем в левой части прибора, а время их пробега между  $A$  и  $B$  определяется с помощью осциллоскопа.

1 — горячий катод; 2 — однородное электрическое поле от ускорителя Ван-де-Граафа; 3 — сетка управления, действующая как затвор; 4 — трубка, находящаяся под вакуумом; 5 — электрическое поле отсутствует; 6 — термопара; 7 — алюминиевый диск; 8 — осциллоскоп показывает импульсы, поступающие из точек  $A$  и  $B$ .

следовательно, и их скорость измерялись непосредственно, а кинетическая энергия (переходящая в тепло при ударе о мишень в конце пути) измерялась с помощью калиброванной термопары.

В этом опыте с большой точностью была определена величина ускоряющего потенциала. Кинетическая энергия электрона равна

$$K = eEL = e\varphi,$$

где  $L$  — расстояние, на котором электрону сообщается ускорение, а  $\varphi = EL$  — разность электрических потенциалов на расстоянии  $L$ . Если  $\varphi = 10^6$  в, то электрон после ускорения приобрел энергию  $1 \cdot 10^6$  эв (1 Мэв). Но  $10^6$  в равно  $10^6/300$  ед. СГСЭ<sub>v</sub>, так что приобретенная электроном кинетическая энергия равна

$$\frac{(4,80 \cdot 10^{-10}) \cdot 10^6}{300} \text{ эрг} \approx 1,60 \cdot 10^{-6} \text{ эрг}. \quad (28)$$

Если через сечение пучка пролетают  $N$  электронов в секунду, то мощность, передаваемая алюминиевой мишени в конце их пути, должна быть равна  $1,60 \cdot 10^{-6} N$  эрг/сек. Это точно совпадает с непосредственным определением поглощенной мишенью мощности,

\*) Этот опыт был выполнен Бертоцци. См. *Am. J. Phys.* 32, 551, (1964).

производимым с помощью термопары. Таким образом, подтверждается, что электроны отдали мишени всю кинетическую энергию, полученную в ходе их ускорения. Далее, на основании нерелятивистской механики мы ожидали бы, что

$$K = \frac{1}{2} m v^2, \quad (29)$$

так что график зависимости  $v^2$  от кинетической энергии  $K$  должен был бы быть прямой линией. Однако для энергий, превышающих примерно  $10^5$  эв, линейное соотношение между  $v^2$  и  $K$  экспериментально не выполнялось. Вместо этого наблюдалось, что скорость частиц при больших энергиях приближается к предельной величине  $3 \cdot 10^{10}$  см/сек. Из экспериментальных результатов можно сделать следующий вывод: электроны получали от ускоряющего поля энергию, соответствующую теоретически рассчитанной, но их скорость не может увеличиваться бесконечно.

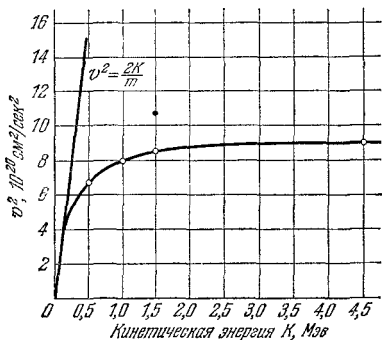


Рис. 10.40.

Многие другие эксперименты, как и описанный, свидетельствуют о том, что  $c$  — это верхний предел скорости частиц. Таким образом, мы твердо убеждаемся, что  $c$  — это максимальная скорость передачи сигнала как с помощью частиц, так и с помощью электромагнитных волн;  $c$  — это предельная скорость.

Теперь мы подготовлены к изучению основ специальной теории относительности, излагаемых в гл. II, так как из опыта мы знаем следующее:

1. Величина  $c$  инвариантна для инерциальных систем отсчета.
2.  $c$  — максимальная возможная скорость передачи сигнала.
3. Для распространения света имеют значение только относительные скорости инерциальных систем отсчета.

4. Принцип относительности Галилея не выполняется при больших относительных скоростях, потому что измерения длины и кинетической энергии в инерциальных системах отсчета должны соответствовать выводам 1 и 2.

5. При больших скоростях кинетическая энергия не пропорциональна  $v^2$ . На основании этого мы можем предполагать, что обнаружится изменение инертной массы в зависимости от скорости.

Мы рассказали только о небольшом числе опытов, подтверждающих специальную теорию относительности. Доказательства правильности этой теории, имеющиеся в настоящее время, следует считать весьма убедительными. Физики уверены в ее справедливости.

ности так же, как и в справедливости законов любой другой области физики. Наша ближайшая задача теперь состоит в том, чтобы точно сформулировать основные положения этой теории и усвоить некоторые следствия из нее.

## Задачи

1. *Эффект Доплера.* Космонавт хочет определить скорость, с которой его корабль приближается к Луне. Он посылает радиосигнал с частотой  $\nu = 5000$  Мгц и, сравнивая его частоту с частотой отраженного сигнала, получает разность в 86 гц. Рассчитать скорость космического корабля относительно Луны (для многих целей можно считать достаточно точным нерелятивистское уравнение эффекта Доплера).

О т в е т.  $2,6 \cdot 10^5$  см/сек.

2. *Красное смещение света от удаляющихся источников.* Спектральная линия, которая в лаборатории имеет длину волны 5000 Å, наблюдается в спектре света от удаленной галактики при длине волны 5200 Å.

а) Какова скорость удаления этой галактики?

О т в е т.  $1,2 \cdot 10^9$  см/сек.

б) Каково расстояние до этой галактики?

О т в е т.  $4 \cdot 10^{26}$  см.

3. *Скорость света.* В знаменитом опыте Майкельсона по измерению скорости света восьмигранная призма с зеркальными гранями, вращающаяся вокруг своей оси, отражала пучок света от удаленного источника, а затем — второй раз отражала его обратно к наблюдателю, находящемуся вблизи источника. Условия опыта требуют, чтобы время между этими двумя отражениями равнялось одной восьмой периода вращения призмы. Расстояние, проходимое пучком в одном направлении, было равно  $L = (35,410 \pm 0,003)$  км, а частота вращения призмы была определена как  $\nu = 529$  об/сек с точностью до  $3 \cdot 10^{-5}$  об/сек.

а) Рассчитать по этим данным скорость света (надо внести поправку порядка  $10^{-5}$  от этой величины, учитывающую влияние атмосферы).

б) Оценить общую точность измерения  $c$ , учитывая также, что угол между двумя соседними боковыми гранями призмы был равен  $135^\circ \pm 0,1''$ .

4. *Затмения Ио.* Один из спутников Юпитера, Ио, обращается вокруг него по орбите радиусом  $4,21 \cdot 10^{10}$  см со средним периодом обращения 42,5 ч. Ремер обнаружил, что этот период регулярно изменяется в течение года, причем периодичность этих изменений — около одного года. Максимальное отклонение периода обращения от средней величины было равно 15 сек и повторялось примерно через 6 месяцев. Движение Юпитера по орбите не учитывать.

а) Рассчитать расстояние, проходимое Землей за один период обращения Ио вокруг Юпитера.

О т в е т.  $4,5 \cdot 10^{11}$  см.

б) Когда период обращения Ио кажется наибольшим?

в) Использовать предыдущий результат вместе с названными данными для определения величины скорости света.

г) Определить накопившееся за последующие шесть месяцев время кажущегося запаздывания затмений Ио и доказать, что это как раз то время, за которое свет проходит диаметр орбиты Земли.

д) Если рассматривать систему Ио — Юпитер как источник света, модулированный с частотой  $1/42,5$  ч<sup>-1</sup>, то измерения наблюдаемого периода можно описывать как эффект Доплера. В соответствии с этим рассчитать величину скорости света.

5. *Параллакс звезд.* Существование параллакса звезд было предсказано Аристархом Самосским (200 лет до нашей эры) и было достоверно установлено Бесселем в 1838 г. Известно, что неудачная попытка определения параллакса принадлежит Бредли, открывшему вместо этого аберрацию света звезд. В течение года кажущееся положение звезды смещается вследствие аберрации между двумя крайними точками, отстоящими примерно на 40 дуговых секунд.

а) Каково было бы расстояние в парсеках до звезды с параллаксом  $20''$ ? Известно, что ближайшая звезда —  $\alpha$  Центавра находится на расстоянии около 1,3 парсека.

О т в е т. 0,05 парсека.

б) Доказать, что вызванное аберрацией кажущееся годовое движение звезд, расположенных вблизи эклиптики, совершается по линейному отрезку, угловое расстояние между концами которого равно  $40''$ .

6. *Вращение галактик.* В 1916 г., еще до того, как были определены огромные расстояния до туманностей (галактик), сообщалось, что спиральная туманность M101 вращается подобно твердому телу с периодом 85 000 лет. Наблюдаемый угловой диаметр ее равен  $22'$ .

Рассчитать, каково должно быть максимальное возможное расстояние до этой туманности, если указанный период определен правильно, а края туманности не могут двигаться быстрее, чем со скоростью  $c$ . [Последние измерения для звезд системы M101 показывают, что она находится на расстоянии  $8,5 \cdot 10^{24}$  см. По-видимому, в 1916 г. была определена завышенная величина скорости вращения.]

7. *Переменные звезды.* 200-дюймовый телескоп обсерватории Маунт Паломар дает возможность различать отдельные звезды в галактиках, находящихся на расстояниях около  $3 \cdot 10^{25}$  см. Один из методов измерения расстояний этого порядка величины основан на определении периода изменения яркости переменных звезд типа Цефеид. Звезда типа Цефеид — это гравитационно неустойчивая звезда, обнаруживающая периодические пульсации, при которых ее радиус может измениться примерно на 5—10%. Температура звезды изменяется с таким же периодом, как и ее радиус, так что наблюдатель обнаруживает периодические изменения ее яркости. Были измерены периоды продолжительностью всего несколько часов. В нашей Галактике находится Цефеиды с яркостью, в  $2 \cdot 10^4$  раза большей яркости Солнца, и периодом изменения яркости 50 суток.

а) Пользуясь соотношением между расстоянием и скоростью, определить скорость радиального движения галактики, находящейся на расстоянии  $3 \cdot 10^{25}$  см.

б) Каким бы должен был казущийся период изменения яркости этой Цефеиды, если бы она была в галактике, находящейся на указанном выше расстоянии?

8. *Новые звезды.* Астрономы иногда наблюдают «взрыв» звезды, при котором часть вещества из ее наружных слоев выбрасывается с большой скоростью. Такая звезда называется *новой звездой*. Недавно новая звезда, которая после взрыва была окружена оболочкой, наблюдалась визуально. Было найдено, что угловой диаметр оболочки увеличивается со скоростью  $0,3''$  в год. Спектр новой звезды представляет собой обычный звездный спектр с дополнительными широкими линиями испускания, ширина которых в единицах длин волн остается постоянной и равной около  $10 \text{ \AA}$  (в области длин волн  $5000 \text{ \AA}$ ), хотя интенсивность этих линий ослабевает. Их ширина истолковывается как мера смещения Доплера между излучением частей оболочки, приближающихся к нам и удаляющихся от нас. Определить расстояние до новой звезды, если эта оболочка оптически прозрачна (при этом предполагается, что мы получаем столько же света с дальнего полушария, сколько и с ближнего).

О т в е т.  $1,2 \cdot 10^{21}$  см.

9. *Скорости движения галактик.* Распределение измеренных радиальных скоростей движения галактик относительно Земли не является изотропным для всех известных галактик во Вселенной. Причины этой анизотропии: движение Солнца (т. е. его орбитальная скорость) относительно центра нашей Галактики и собственное движение нашей Галактики относительно локальной межгалактической системы отсчета. Примем во внимание все галактики, находящиеся на определенном расстоянии, например  $3,26 \cdot 10^7$  световых лет.

а) Какова средняя радиальная скорость этих галактик?

б) Где будет находиться среднее положение линии  $H_{\alpha}$  водорода (длина ее волны, измеренная в лаборатории,  $\lambda_{H_{\alpha}} = 6,563 \cdot 10^{-5}$  см) в спектрах галактик?

Для нашего примера мы найдем, что в определенном направлении скорости галактик на  $300 \text{ км/сек}$  больше средней величины, а точно в противоположном направлении они настолько же меньше.

в) Какова скорость Солнца в этой системе отсчета?

г) Обязательно ли она равна орбитальной скорости движения Солнца вокруг центра нашей Галактики?

д) Предполагая, что эта скорость равна орбитальной скорости, оценить величину массы нашей Галактики, принимая, что вся ее масса сосредоточена в ее центре и что орбита Солнца является круговой (расстояние до центра Галактики равно 3500 световым годам). Сравнить эту величину с приведенным выше значением  $8 \cdot 10^{44}$  г для массы Галактики и объяснить разницу.

О т в е т. а) Средняя скорость галактик, рассчитанная по соотношению между скоростью и расстоянием, равна 1000 км/сек.

б) Средняя длина волны линии  $H_{\alpha}$  будет равна  $6,584 \cdot 10^{-5}$  см.

в) 300 км/сек.

г) Нет, так как в нее может входить скорость движения Галактики как целого относительно этой системы отсчета.

д)  $4,5 \cdot 10^{43}$  г. Эта величина меньше обычно приводимой, потому что значительная часть массы нашей Галактики не находится в ее центре, — действительно, большая часть массы находится во внешней относительно Солнца части Галактики, где она не будет влиять на движение Солнца или не может быть обнаружена таким способом.

10. Вращение звезд. По наблюдениям за поверхностью Солнца видно, что оно медленно вращается, с периодом в 25 суток на экваторе. Однако некоторые звезды вращаются значительно быстрее. Как это можно определить, если звезды настолько удалены от нас, что мы их видим как светящиеся точки?

**Д о п о л н е н и е. Излучение гамма-лучей при отсутствии отдачи**

Атомное ядро, находящееся в возбужденном энергетическом состоянии, может испустить фотон гамма-излучения, совершая переход в основное, или невозбужденное, состояние. Может произойти также обратный процесс: ядро, находящееся в своем основном состоянии, поглощая фотон, переходит при этом в возбужденное состояние.

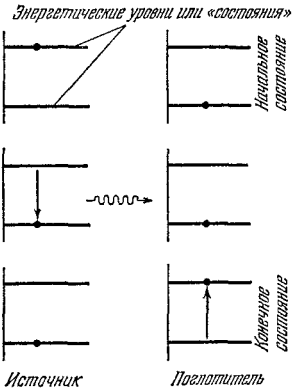


Рис. 10.41.

Предположим, что имеется источник излучения, содержащий возбужденные ядра атомов (рис. 10.41). С течением времени этот источник будет излучать фотоны. Предоставим этим фотонам падать на поглотитель, содержащий подобные же ядра в их основном состоянии. Эти ядра

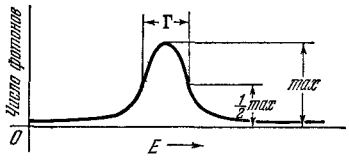


Рис. 10.42.

поглотят падающие фотоны и затем будут сами излучать фотоны. Явление поглощения и последующего излучения называется ядерной флуоресценцией. Как показано на рис. 10.42, величины энергии фотонов, излученных как источником, так и поглотителем, будут находиться в интервале, приблизительная ширина которого равна  $\Gamma$ .

Хорошим примером является ядро атома  $Fe^{57}$ . Оно образуется в возбужденном состоянии как продукт радиоактивного распада  $Co^{57}$ . Ядро  $Fe^{57}$  в возбужденном состоянии испускает фотон с энергией 14,4 кэв, переходя при этом в ядро  $Fe^{57}$  в основном состоянии.

Представим себе, что ядро атома  $Fe^{57}$  находится в возбужденном состоянии в вакууме и до испускания остается неподвижным. В момент испускания фотона