

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

530 12:531.18

НЕКОТОРЫЕ НОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В СВЯЗИ С ДОКАЗАТЕЛЬСТВОМ СПРАВЕДЛИВОСТИ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ *)*В.-Д. Шмидт-Отт*

Формулы специальной теории относительности принадлежат к основному аппарату современной физики. Они были установлены на базе старых, отчасти недостаточно точных экспериментов. За последние годы были выполнены некоторые прецизионные измерения в связи с доказательством специальной теории относительности. Эти результаты особенно интересны теоретикам, так как они указывают, в каких пределах может быть изменена существующая теория. Здесь дается обзор следующих экспериментов: 1) новый вариант опыта Майкельсона, поиски «эфирного ветра»; 2) доказательство постоянства скорости света, испускаемого движущимся источником; 3) замедление времени для движущихся мезонов; 4) точные измерения зависимости массы электрона от скорости при высокой энергии. Последнее интересно с точки зрения теории в связи с высказанным недавно предположением, что благодаря наличию собственной энергии формула для массы движущегося электрона может не выполняться.

I. НОВЫЙ ВАРИАНТ ОПЫТА МАЙКЕЛЬСОНА С ЭФФЕКТОМ МЕССБАУЭРА

В конце прошлого века господствовало мнение, что электромагнитные процессы распространяются в эфире, подобно тому как звук распространяется в воздухе. При этом можно было представить себе, что всякое тело либо покоится, либо движется относительно эфира, что, в частности, Земля при своем орбитальном движении несется сквозь эфир со скоростью $v = 30 \text{ км/сек}$. И ожидалось, что световой сигнал, распространяющийся в направлении движения Земли, сносится «эфирным ветром», как лодка, плывущая против течения.

Это было проверено Майкельсоном в 1881 г. в Потсдаме и, с большей точностью, Майкельсоном и Морли в 1887 г. в Кливленде с помощью знаменитого интерферометра. При этом не было установлено никакого влияния эфира на распространение света, а скорость «эфирного ветра» оказалась $v < 5 \text{ км/сек}$. В 20-е годы, в особенности благодаря опытам Миллера, результаты Майкельсона подвергались сомнениям. Это сделало желательными более точные измерения. Иоос¹ с помощью улучшенного интерферометра Майкельсона получил наиболее точное значение $v < 1,5 \text{ км/сек}$. Опыт с мазером в 1958 г.² позволил еще раз увеличить

*) W.-D. Schmidt-Ott, Einige neuere Messungen zur Prüfung der speziellen Relativitätstheorie, Naturwiss., Heft 23, 636 (1965). Перевод М. С. Маринова.

В последнее время в УФН были опубликованы две работы, посвященные вопросу об экспериментальной проверке специальной теории относительности: обзор^{22*} и статья^{23*}, в которой рассматривались в основном опыты при высоких энергиях. (Ред.)

точность. Для скорости «эфирного ветра» была установлена верхняя граница $v < 1/30$ км/сек.

Самое точное к настоящему времени измерение выполнили Чампней, Исаак и Хан³, используя эффект Мёссбауэра. Идея опыта состоит в том, что если существует «эфирный ветер», то он вызывает смещение частоты линии мёссбауэровского излучения.

Источником излучения является препарат Co^{57} , активностью 5 мкюри, излучающий рентгеновские лучи с энергией 14 кэв, которые регистрируются затем пропорциональным счетчиком. Перед счетчиком находится резонансный поглотитель, содержащий обогащенный изотоп Fe^{57} . Излучатель Q и поглощающая фольга A монтируются на центрифуге на равных расстояниях $\frac{1}{2}L$ от оси (рис. 1).

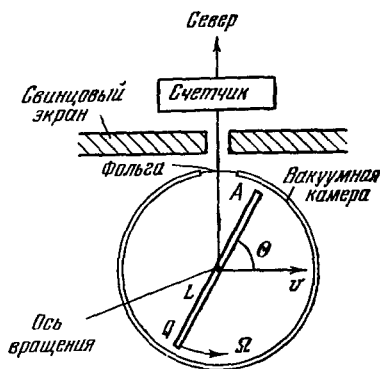


Рис. 1. Схема установки Чампней и др.³ для измерения скорости «эфирного ветра» с помощью эффекта Мёссбауэра.

Источник Q и поглощающая фольга A — на центрифуге, Ω — угловая скорость, v — скорость движения центрифуги по земной орбите, θ — угол между скоростью v и положением плеча центрифуги в данный момент времени

«эфирного ветра» в направлении плеча центрифуги и θ — угол между скоростью v и положением плеча центрифуги в данный момент. К моменту излучения максимума II центрифуга повернется на угол $\Delta\theta = \Omega/v$, где Ω — угловая скорость вращения. Плечо центрифуги станет под углом $\theta + \Delta\theta$ к «эфирному ветру». Поглощение максимума II произойдет, таким образом, в момент $t'_{II} = 1/v + L [c - v \cos(\theta + \Delta\theta)]^{-1}$. Частота сигналов на поглотителе определяется из равенства $1/v' = t'_{II} - t'_I$. В первом приближении сдвиг частоты определяется простым соотношением

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{L\Omega}{c^2} v \sin \theta.$$

Таким образом, сдвиг частоты пропорционален угловой скорости вращения центрифуги Ω . Например, для центрифуги с плечом 10 см и частотой вращения $\Omega = 2\pi \cdot 1000$ сек⁻¹ при $v = 30$ км/сек наблюдения в северном направлении ($\theta = 90^\circ$) зафиксирует красное смещение $\Delta\nu/\nu = 2 \cdot 10^{-10}$. Чувствительность аппаратуры значительно выше.

Чувствительность к сдвигу частоты определяется эффектом Мёссбауэра*). При этом особенно высокая точность достигается следующим искус-

*) Возбужденное атомное ядро, испуская γ -квант, уносящий энергию возбуждения, испытывает отдачу. Поэтому энергия кванта несколько меньше, чем энергия возбуждения ядра. Мёссбауэр в 1958 г. обнаружил, что при переходе с энергией 129 кэв в Ir^{191} при 80° К импульс отдачи от γ -кванта в некоторых случаях воспринимается не ядром, а всей кристаллической решеткой. Благодаря тому, что отдача

Центрифуга помещается в вакуум. Счетчик ставится в северном направлении и регистрирует во время вращения центрифуги только тогда, когда источник находится в южной точке, а поглотитель — непосредственно перед счетчиком. Так как центрифуга движется вместе с Землей со скоростью v по земной орбите, то «эфирный ветер» дует со скоростью $-v$ в противоположном направлении.

Влияние эфира на сигнал с частотой ν , испускаемый источником Q , можно выяснить, рассматривая два последовательных волновых максимума. Пусть максимум I испускается в момент $t_I = 0$, а максимум II — через период, т. е. в момент $t_{II} = 1/\nu$. Максимум I дойдет до поглотителя в момент $t'_I = L/(c - v \cos \theta)$, где L — длина пути; $-v \cos \theta$ — компонен-

ственным приемом. Излучающее ядро находится в медной фольге толщиной 8 мкм, а поглощающее ядро в фольге из нержавеющей стали толщиной 3,6 мкм. Ядра находятся в различных химических средах. Между линиями излучателя и поглотителя имеется сдвиг частот — так называемый химический сдвиг. Это можно показать, если снять источник Q и поглотитель A с центрифуги и включить их в обычную схему опыта Мёссбауэра. При этом источнику Q придается скорость u относительно поглотителя, и, следовательно, происходит доплеровское смещение частоты $\Delta\nu/\nu = u/c$. Счетчик регистрирует кванты, прошедшие сквозь резонансный поглотитель. Результат этого вспомогательного измерения показан на рис. 2, где изображена зависимость числа квантов от скорости источника u , т. е. от доплеровского сдвига частоты. Получилась резонансная кривая, минимум которой смещен несколько влево от значения $u = 0$ (химический сдвиг частоты), при $u = 0$ кривая имеет положительный наклон. В этой точке сдвиг частоты может быть легко зарегистрирован по изменению числа отсчетов, причем точность опыта определяется статистикой.

В опыте с центрифугой скорость источника относительно поглотителя $u = 0$. Таким образом, сдвиг частоты, обусловленный гипотетическим «эфирным ветром», может быть измерен с высокой точностью. Центрифуга вращалась попеременно: 1 час со скоростью 200 об/сек, 1 час — со скоростью 1230 об/сек, 1 час — 200 об/сек и т. д.

При этом каждый раз пропорциональным счетчиком велся подсчет числа квантов с энергией 14 кэв. При чувствительности $\Delta\nu/\nu = 10^{-14}$ в случае измерений в одинаковых временных интервалах не было установлено различия в числе отсчетов, в частности суточных колебаний числа квантов, которого следовало бы ожидать, исходя из представления об эфире как среде, относительно которой движется Земля. Для контроля было выполнено также измерение со счетчиком, поставленным в южном направлении. В результате опыта получено для скорости «эфирного ветра» $v = (1,6 \pm 2,8) \text{ м/сек}$, или $v < 5 \text{ м/сек}$.

Теперь можно со значительно большей определенностью, чем во времена Майкельсона, сказать, что не существует никакого носителя электромагнитных волн и, следовательно, никакой фиксированной системы отсчета для распространения света. Нулевой результат Майкельсона был отправным пунктом теории относительности.

воспринимается очень большой массой, энергия отдачи очень мала и квант уносит практически всю энергию возбуждения ядра. При поглощении яридиевым приемником импульс γ -кванта также может быть воспринят всем кристаллом. Другим примером испускания и поглощения γ -квантов без отдачи является переход с энергией 14 кэв в Fe^{57} . Линия 14 кэв очень узкая, ее относительная ширина $\Delta\nu/\nu = 10^{-12}$. Это в равной степени относится и к испусканию, и к поглощению. Таким образом, самые незначительные сдвиги частот между линиями испускания и поглощения могут быть зарегистрированы. Частота каждой спектральной линии может быть сдвинута с помощью эффекта Доплера. Если источник движется со скоростью u по отношению к поглотителю, то соответствующая разность частот определяется равенством $\Delta\nu/\nu = u/c$. Например, сдвиг частоты $\Delta\nu/\nu = 10^{-12}$ соответствует скорости $u = 0,3 \text{ мм/сек}$.

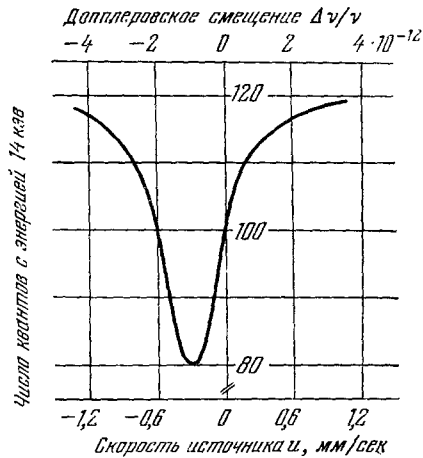


Рис. 2. Спектр поглощения, снятый с помощью обычного опыта Мёссбауэра.

Источник — Co^{57} в медной фольге, поглотитель — Fe^{57} в фольге из нержавеющей стали.

II. ПОСТОЯНСТВО СКОРОСТИ СВЕТА ПРИ ДВИЖУЩЕМСЯ ИСТОЧНИКЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

Этот второй постулат Эйнштейна был многократно проверен, например, путем спектроскопических наблюдений двойных звезд⁴. Источник света при этом приближается к Земле или удаляется от нее со скоростью около 100 км/сек, малой по сравнению со скоростью света c .

В настоящее время на Земле поставлены опыты с гораздо более быстрыми источниками излучения⁵⁻⁷, которые обладают тем преимуществом по сравнению с более ранними измерениями, что здесь время распространения излучения определяется непосредственно. Однако точность этих опытов не превосходит точности спектроскопических измерений.

В качестве движущегося источника излучения Садé использовал аннигиляцию позитронов на лету⁶. Когда позитрон попадает в вещество,

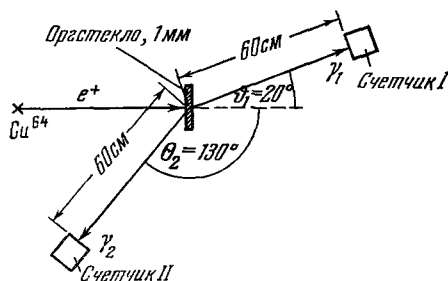


Рис. 3. Схема установки Садé⁶ для доказательства постоянства скорости света.

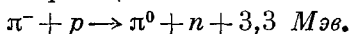
Аннигиляция позитронов на лету.

он быстро тормозится и, сталкиваясь с почти покоящимся электроном вещества, переходит в пару квантов с энергией 511 кэв, которые разлетаются под углом 180°. Для определенного процента позитронов аннигиляция происходит еще во время торможения, когда позитрон обладает заметной кинетической энергией. В системе центра инерции электрона и позитрона оба кванта разлетаются в противоположных направлениях, а в лабораторной системе кванты летят преимущественно вперед.

Рис. 3 показывает экспериментальную установку, в которой органическое стекло (пластинка толщиной 1 мм) облучалось позитронами из источника жестких β-лучей Cu^{64} . В этой пластинке происходила аннигиляция на лету. Для регистрации аннигиляционных квантов на расстоянии 60 см ставились сцинтилляционные счетчики в различных положениях, например под углами $\theta_1 = 20^\circ$ и $\theta_2 = 130^\circ$ к направлению позитронного пучка. Выбором углов θ_1 и θ_2 выделяются аннигилирующие позитроны с определенной энергией. Позитроны вылетают из источника с энергией 600 кэв и скоростью 0,89с. Центр инерции электрона и позитрона — источник излучения — имеет скорость 0,6с.

Если считать, что скорость источника складывается со скоростью света, то квант γ_1 имел бы скорость 1,6с, а квант γ_2 — скорость 0,6с. Времена пролета квантов до счетчиков были бы $1,3 \cdot 10^{-9}$ сек для γ_1 и $3,3 \times 10^{-9}$ сек для γ_2 . Разность времен пролета $2 \cdot 10^{-9}$ сек могла бы быть зафиксирована методом задержанных совпадений с помощью электроники. В этом эксперименте, в пределах разрешающей силы схемы совпадений, с точностью $0,2 \cdot 10^{-9}$ сек не было установлено различия времен пролета γ -квантов. Таким образом, постоянство скорости света установлено с 10%-ной точностью.

Подобное измерение на π^0 -мезонах было проведено Филиппасом и Фоксом⁷. Установка показана на рис. 4. Для генерации π^0 -мезонов пучок π^- -мезонов из циклотрона тормозился в мишени из жидкого водорода. При этом возможна реакция



Выделяемая в реакции энергия уносится нейтроном и π^0 -мезоном, причем мезон приобретает скорость 0,2с. π^0 -мезоны имеют среднее время

жизни $\tau = 1,8 \cdot 10^{-16}$ сек, они пролетают в среднем около 10^{-5} мм и распадаются на два γ -кванта. Наблюдаются распады, в которых квант γ_1 летит в направлении π^0 -мезона, а квант γ_2 — в противоположном направлении. Кванты регистрируются двумя сцинтилляционными счетчиками, расположенными на расстоянии 120 см. Если бы скорость движущегося источника излучения складывалась со скоростью света, то при направлении разлета квантов, изображенном на рис. 4, следовало бы ожидать максимальной разности времен пролета. В пределах разрешающей способности аппаратуры никакой разности обнаружено не было и постоянство скорости света было установлено с точностью около 8%.

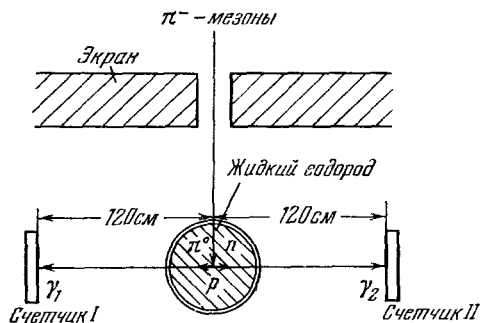


Рис. 4. Схема установки Филиппаса и Фокса ⁷ для доказательства постоянства скорости света.

Распад π^0 -мезонов на лету.

В противоположность этим результатам, по мнению Кантора, оптическим методом обнаружена зависимость скорости света от движения источника ^{8, 9}. В последнее время этот опыт был повторен, причем использовался очень похожий спектрометр, но его результаты не были подтверждены ¹⁰⁻¹².

III. ЗАМЕДЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ДЛЯ БЫСТРЫХ МЕЗОНОВ

Типично релятивистским эффектом является замедление времени, которое особенно отчетливо проявляется в увеличении времени жизни движущегося мезона. Так, например, у μ -мезонов, возникших в верхних слоях атмосферы и летящих к Земле со скоростью, близкой к скорости света, время жизни возрастает в 100—1000 раз.

В лаборатории замедленные времена для π -мезонов ¹³ и K -мезонов ¹⁴ измерялось методом, разработанным для измерения времен жизни возбужденных состояний атомов и ядер (рис. 5). Путем отклонения в магнитном поле из пучка π -мезонов выделялись мезоны с одинаковым импульсом. В данном случае наблюдались π^+ -мезоны с

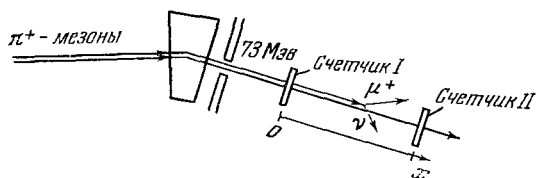


Рис. 5. Схема установки Дурбина и др. ¹³ для измерения времен жизни π -мезонов с энергией 73 Мэв.

Распад мезонов на отрезке x измеряется двумя сцинтилляционными счетчиками (счетчик I закреплен, II — подвижен).

энергией 73 Мэв и скоростью 0,75c. Мезоны пролетали с незначительной потерей энергии сквозь тонкий сцинтиллятор I, который регистрировал число прошедших мезонов N_0 . Измерялось число распадов на отрезке пути x .

В лабораторной системе отсчета мезоны имеют время жизни τ_L . Они распадаются по закону $N(t) = N_0 \exp(-t/\tau_L)$. Время t выражается через путь x , пройденный со скоростью v . Число мезонов на расстоянии x равно $N(x) = N_0 \exp(-x/v\tau_L)$. Это число регистрируется счетчиком II. При этом следует принять, что вероятность попадания μ -мезонов от распадов π в счетчик II пренебрежимо мала. Из убыли числа

мезонов на отрезке x определяется средний путь $v\tau_L$, на котором число мезонов убывает в e раз. Для π^+ -мезонов со скоростью $0,75c$ распадная длина равна $8,5$ м. При этом для времени жизни в лабораторной системе получено значение $\tau_L = 4 \cdot 10^{-8}$ сек, которое примерно в полтора раза больше, чем время жизни покоящегося π^+ -мезона, известное с хорошей точностью из других измерений. Релятивистское выражение для замедления времени $\tau_L = \tau (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ проверялось путем сравнения измеренного в этом опыте времени жизни τ_L с временем жизни покоящегося π -мезона τ . Опыты с π^+ -мезонами, а также с π^- -мезонами при энергии 73 Мэв подтвердили релятивистскую формулу с точностью до 8% ¹³, аналогичные измерения с K^+ - и K^- -мезонами при энергии 1000 Мэв подтвердили эту формулу с точностью до 5% ¹⁴.

Менее прямое доказательство получено также из эксперимента с вращающимся источником мёссбауэровского излучения ^{15, 16}. При этом точность, с которой подтверждается релятивистская формула для замедления времени, достигает 1% .

IV. ТОЧНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МАССЫ ЭЛЕКТРОНА ОТ СКОРОСТИ

Важным следствием теории относительности является зависимость массы от скорости:

$$m = m_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} = m_0 \left[1 + \left(\frac{p}{m_0 c}\right)^2\right]^{1/2}.$$

Это выражение было получено еще в 1904 г. Лоренцем на основе предположения о том, что масса электрона электромагнитного происхождения и что электрон сжимается в направлении движения. Первое экспериментальное доказательство зависимости массы от скорости, данное Кауфманом, еще не давало возможности исключить другую формулу, данную Абрагамом. Впервые релятивистская формула была проверена в 1909 г. Бухерером на электронах с энергией 200 кэв, с точностью в определении скорости до 10% . Более точное непосредственное определение зависимости массы от скорости выполнили М. Роджерс, Мак-Рейнольдс и Ф. Роджерс ¹⁷. Массовая формула подтверждена с точностью до 1% в опыте, в котором конверсионные электроны от RaВ с энергией < 300 кэв отклонялись в электрическом и магнитном полях. Обзор подобных экспериментов, выполненных до 1956 г., дали Фараго и Яноши ¹⁸.

Функционирование релятивистских ускорителей считается хорошим доказательством справедливости массовой формулы. Однако из-за стабилизации пучка и внутреннего рассеяния это доказательство имеет лишь ограниченную силу.

По-видимому, наилучшее не прямое доказательство зависимости массы от скорости обеспечивает тонкое расщепление спектральных линий. Измеренное расщепление в дейтерии ¹⁹ совпадает со значением, вычисленным с учетом радиационных поправок ^{18, 21}, с точностью до $0,01\%$. Кинетическая энергия электрона в атоме дейтерия — порядка электрон-вольта.

Было высказано теоретическое предположение ²⁰, что из-за собственной энергии электрона формула для его массы может выполняться не совсем точно. Поэтому желательно проверить массовую формулу при больших энергиях.

Мейер и его сотрудники ²¹ доказали массовую формулу для электронов с энергией $2,6$ и $3,1$ Мэв, т. е. с энергией, в $5-6$ раз превышающей энергию покоя электрона. При более ранних измерениях с отклонением в электрическом и магнитном полях точность была ограничена рассеян-

ными полями. Существенное преимущество нового измерения — отсутствие этой трудности: электрическое поле вместе с полем рассеяния промерено путем контрольного эксперимента с протонами.

Электроны или протоны с энергией 5,5 Мэв получались от ускорителя Ван-де-Граафа. Пучок частиц отклонялся в горизонтальной плоскости и пропусклся между полюсами магнита и сквозь цилиндрический конденсатор. Схема опыта показана на рис. 6. Частицы регистрировались кристаллом CsJ толщиной 0,5 мм.

Входной и выходной коллиматоры в магните имели ширину 70 мкм. Они находились в однородном поле, направленном перпендикулярно плоскости чертежа. Магнитное поле на краю магнита меняется пропорционально силе поля и вызывает дополнительное отклонение, так что в целом пучок отклонялся на 210° . В области однородного поля магнита частицы описывали дугу окружности радиуса 1 м, окружность фиксировалась тремя коллиматорами (см. рис. 6).

В дальнейшем частицы проходили сквозь цилиндрический конденсатор, если выполнялось условие, что отклоняющая сила электрического поля равна центробежной силе: $eE = P^2/mr_e$; E — напряженность электрического поля, m — масса, e — заряд, r_e — радиус траектории частицы в электрическом поле. Два коллиматора шириной 70 мкм, установленные на расстоянии 3,2 мм от входа и выхода частиц, вызывали наличие неоднородностей электрического поля, которые трудно учесть. Поэтому был проведен контрольный эксперимент с протонами.

Прежде всего электроны ускорялись, и магнитное B_e и электрическое E поля подбирались таким образом, чтобы электроны попадали в детектор. Затем менялась полярность напряжения на конденсаторе при неизменной величине напряжения. Напряжение поддерживалось постоянным с точностью лучшей, чем 10^{-4} , в течение дня. Теперь ускорялись протоны. Ускоряющее напряжение и магнитное поле B_p подбирались таким образом, чтобы протоны проходили сквозь конденсатор и регистрировались детектором. Частицы, проходящие магнит, имеют импульсы: $P_e = eB_e r_m$ — для электронов и $P_p = eB_p r_m$ — для протонов. Напряженности магнитного поля B_e и B_p измеряются с высокой точностью с помощью магнитного резонанса на протонах. Для частиц, прошедших конденсатор, имеет место равенство $P_e^2/m_e = P_p^2/m_p$. Таким образом, масса электрона выражается через отношение магнитных полей B_e и B_p и массу протона: $m_e = (B_e/B_p)^2 m_p$.

Таким образом, для каждой энергии электронов имеется такая энергия протонов, при которой эти частицы движутся по одинаковым траекториям при одинаковой величине напряженности электрического поля. Это

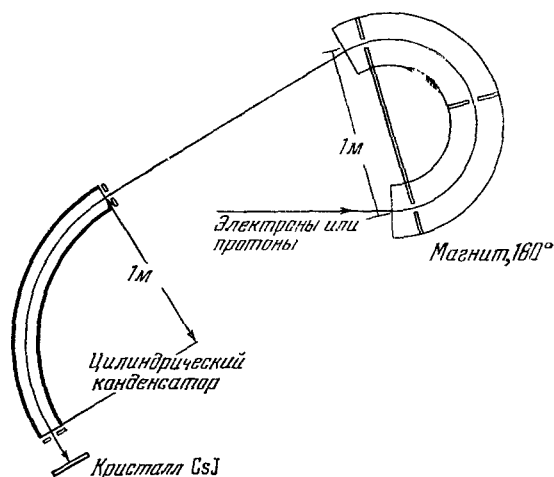


Рис. 6. Точное измерение зависимости массы от скорости 21 путем отклонения электронов с энергией около 3 Мэв в магнитном и электрическом полях.

Поля калибруются с помощью протонов.

имеет место, например, для релятивистских электронов с энергией $3 Mэв$ и протонов с энергией $1,7 Mэв$, которые практически являются нерелятивистскими. Соответствующие магнитные поля равны $0,02 \text{ в} \cdot \text{сек} \cdot \text{м}^{-2}$ для электронов и $0,37 \text{ в} \cdot \text{сек} \cdot \text{м}^{-2}$ для протонов. Исследовались электроны с энергией $2,67$; $2,81$ и $3,13 Mэв$; экспериментально измеренная масса электрона сравнивалась с формулой Лоренца $m_e = m_0 [1 + (P_e/mc)^2]^{1/2}$. При относительной погрешности $0,05\%$ было установлено согласие с релятивистской формулой, так что теперь формула Лоренца проверена непосредственно с той же точностью, что в спектроскопических измерениях.

Таким образом, все эксперименты, о которых шла речь в этом обзоре, подтверждают формулы специальной теории относительности в пределах экспериментальных ошибок.

2-й Физический институт
Гёттингенского университета

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. G. Joos, Ann. Phys. 7, 385 (1930).
2. J. P. Cedarholm, G. F. Bland, B. L. Havens, C. H. Townes, Phys. Rev. Lett. 1, 342 (1958).
3. D. C. Champeney, G. R. Isaak, A. M. Khan, Phys. Lett. 7, 241 (1963).
4. W. De Sitter, Phys. Z. 14, 429, 1267 (1913).
5. T. Alväger, A. Nilsson, J. Kjellman, Nature 197, 1191 (1963).
6. D. Sadeh, Phys. Rev. Lett. 10, 271 (1963).
7. T. A. Filippas, J. G. Fox, Phys. Rev. B135, 1071 (1964).
8. W. Kantor, J. Opt. Soc. Am. 52, 978 (1962).
9. V. Vysin, Phys. Lett. 8, 36 (1964).
10. J. F. James, R. S. Sternberg, Nature 197, 1192 (1963).
11. F. B. Rotz, Phys. Lett. 7, 252 (1963).
12. G. C. Babcock, T. G. Bergman, J. Opt. Soc. Am. 54, 147 (1964).
13. R. P. Durbin, H. H. Loar, W. W. Havens, Jr., Phys. Rev. 88, 179 (1952).
14. H. C. Burrowes, D. O. Caldwell, D. H. Frisch, D. A. Hill, D. M. Ritson, R. A. Schluter, Phys. Rev. Lett. 2, 117 (1959).
15. D. C. Champeney, G. R. Isaak, A. M. Khan, Nature 198, 1186 (1963).
16. W. Kundig, Phys. Rev. 129, 2371 (1963).
17. M. M. Rogers, A. W. McReynolds, F. T. Rogers, Jr., Phys. Rev. 57, 379 (1940).
18. P. S. Farago, L. Janossy, Nuovo Cimento 5, 1411 (1957).
19. E. S. Dayhoff, S. Triebwasser, W. E. Lamb, Jr., Phys. Rev. 89, 106 (1953).
20. E. Arnous, W. Heitler, Y. Takahashi, Nuovo Cimento 16, 671 (1960).
21. V. Meyer, W. Reichart, H. H. Staub, H. Winkler, F. Zamboni, W. Zych, Helv. Phys. Acta 36, 981 (1963).
- 22*. Г. М. Страховский, А. В. Успенский, УФН 86 (3), 341 (1965).
- 23*. Д. И. Блохинцев, УФН 82(2), 185 (1966).

ПРИЛОЖЕНИЕ

ИЗ ДИСКУССИИ ПО ДОКЛАДУ

В. ГАЙТЛЕРА «ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ ПОЛЯ» НА XII СОЛЬВЕЕВСКОМ КОНГРЕССЕ В 1961 Г. *)

Р. Фейнман. Если формула теории относительности неверна, то могут быть, по определению, введены две массы: масса покоя, или собственная энергия, и коэффициент при v^2 в разложении энергии при малых скоростях, или «кинетическая масса».

*) La théorie quantique des champs, ed. R. Stoops, Int. Publ., 1961, стр. 98—99. Перевод М. С. Маринова. В докладе Гайтлера обсуждалась перенормируемая нелокальная теория, нарушающая лоренц-инвариантность и приводящая к неправильной формуле для связи энергии с импульсом. В связи с этим возникло обсуждение экспериментальной ситуации.

Если гравитация действует на энергию, т. е. на массу покоя, а кинетическая масса определяет инерцию, то, как мы знаем из опыта Этвеша, различие между ними не более чем 10^{-8} . Поэтому электромагнитная часть массы протона, которая порядка 10^{-3} от полной массы, имеет правильный коэффициент при v^2 с точностью до 10^{-5} . Я указывал вчера, что если энергия электрона зависит от скорости по закону $m_0 [1 + (v^2/c^2)/2 + (av^4/c^4)]$, то опыт Лэмба показывает, что $a = 3/8$ с точностью до 10^{-6} , так что если 0,1% массы электромагнитного происхождения и меняется со скоростью по какому-то новому закону, то коэффициент при v^4 известен с точностью до 10^{-3} .

Г. Бете. Я хочу обратить внимание на два эксперимента, первый из которых, может быть, принципиально важен для обоснования современной теории поля с точки зрения, высказанной Гайтлером, а второй, возможно, не является таковым. Первый эксперимент состоит в непосредственном сравнении энергии покоя электрона с его кинетической массой. Кинетическая масса известна с абсолютной точностью, энергия покоя может быть измерена путем определения энергии, необходимой для рождения электрона и позитрона радиоактивным излучением. Эта энергия известна в некоторых случаях с точностью до нескольких десятитысячных, и потому это и есть точность, с которой установлено равенство массы покоя и кинетической массы. Еще более непосредственный и точный способ измерения энергии покоя состоит в измерении длины волны γ -излучения, возникающего при аннигиляции. Эти измерения были выполнены Дюмоном в Калифорнийском технологическом институте и также с точностью до нескольких единиц к 10 000. Второй эксперимент, о котором я хочу упомянуть, относится к высоким энергиям: можно измерить полную энергию частицы и мерить разность между скоростью частицы и скоростью света. Эта разность для синхротронов, дающих электроны с энергией 1 Гэв, что-то около единицы на 10^7 , и можно измерить эту разность очень точно, измеряя полную интенсивность света, испускаемого при синхротронном излучении. Эту разность можно измерить с точностью около 1% по интенсивности света; это было сделано при 300 Мэв, и имеется проект на 1 Гэв, но я уверен, что будет получен правильный результат. Это дало бы точность 10^{-9} в определении скорости частицы. Таким образом, с феноменальной точностью установлено, что скорость электрона действительно приближается к скорости света. Масса покоя быстрого электрона измеряется по разности $1 - \beta$ и потому известна для электронов с энергией 300 Мэв с точностью порядка 1%. Она, разумеется, равна обычной кинетической массе. Все упомянутые мною эксперименты относятся к свободным электронам.
