

12. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОСНОВ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ (1960—1965 гг.)¹

Из формулы

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\Delta\Phi}{c^2} = \frac{(R_1^2 - R_2^2)\omega^2}{2c^2}$$

следует, что если излучатель и поглотитель находятся на противоположных концах одного и того же диаметра и $R_1 = R_2$, то, несмотря на относительную скорость между ними, равную $2v$, смещение частоты не должно наблюдаться. Соответствующий опыт был поставлен Чемпни и Муном [116]. Система состояла из стального цилиндра длиной 8 см, укрепленного внутри трубчатого стального ротора. На концах цилиндра укреплялись источник и поглотитель. Скорость вращения равнялась 100 и 600 об/сек. В пределах ошибок измерений авторы пришли к выводу об отсутствии эффекта.

Опыт по проверке сдвига частоты в линейно ускоренной системе провел Бёммель [117]. Источник и поглотитель, расположенные на расстоянии d друг от друга, одновременно движутся с ускорением b вдоль оси, проходящей через их центры. Роль разности потенциалов играет величина bd , поэтому относительный сдвиг частот должен быть $\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{bd}{c^2}$.

Для получения наблюдаемого эффекта ускорение b должно быть порядка 10^8 см/сек², что при прямолинейном движении неосуществимо. Поэтому источник и поглотитель закреплялись на синхронно колеблющихся пьезоэлектрических вибраторах с частотой 10 Мгц. Обнаруженный сдвиг частот соответствовал значению, предсказанному теорией.

Наиболее точные опыты этого типа, очевидно, принадлежат Кюндигу [118]. Источник Co^{57} , внедренный в железо, располагался в центре ротора, поглотитель — железо, обогащенное Fe^{57} , — на расстоянии 9,3 см от него, счетчики были неподвижны. Скорость вращения доходила до 35 000 об/сек, что позволяло получить достаточно большое смещение. Для каждого значения скорости снималась полная линия резонансного поглощения, что позволило повысить точность измерений. Результаты подтверждают наличие релятивистского поперечного доплер-эффекта с точностью 1,1%.

Опыты с использованием эффекта Мессбауера позволили дать еще одно интересное подтверждение существования релятивистского квадратичного доплер-эффекта. Впервые на это обстоятельство обратили внимание Паунд и Ребка [119] и Джоузефсон [120]. При испускании γ -кванта ядро меняет массу на

¹ Глава написана А. М. Френком.

$\delta m_i = E/c^2$, где E — энергия кванта. В результате энергия твердого тела меняется на $\Delta H = \delta(P_i^2/2m_i)$.

Поскольку δm_i всегда отрицательно, энергия решетки возрастает, а следовательно, энергия кванта должна уменьшиться на

$$\delta E = -\Delta H.$$

Значит $\frac{\delta E}{E} = -\frac{1}{m_i c^2} \left(\frac{P_i^2}{2m_i} \right)$, а поскольку полная энергия гармонического осциллятора

$$U_i = 2 \frac{P_i^2}{2m_i}, \text{ то } \frac{\delta E}{E} = -\frac{U_i}{2m_i c^2} = -\frac{U}{2c^2},$$

где U — энергия решетки на единицу массы. Если источник и поглотитель будут находиться при одинаковых температурах, то сдвиг будет компенсирован; но наличие даже небольшой разности температур приведет к относительному сдвигу, который в расчете на 1° будет равняться

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\delta E}{E} \right) = -\frac{1}{2c^2} \frac{\partial U}{\partial T} = -\frac{c_p}{2c^2}.$$

Для железа при 300°K это отношение будет равняться $2,2 \cdot 10^{-15} \text{ град}^{-1}$. Такого порядка величина должна учитываться в прецизионных опытах по измерению гравитационного смещения. Именно это, не учтенное вначале влияние температур, приводило к сильной флуктуации результатов в опытах Паунда и Ребки.

Эту же формулу можно получить непосредственно, рассматривая явление как релятивистский доплер-эффект. Действительно,

$$v' = v \left(1 + \frac{v}{c} \cos \varphi + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \right).$$

Поскольку при хаотическом движении атомов в твердом теле частота изменения направления скорости будет порядка 10^{17} — 10^{18} сек^{-1} , то за время жизни ядерного уровня в изотопах, используемых при опытах с эффектом Мессбауера, это изменение будет происходить так много раз, что среднее значение $v \cos \varphi$ будет равно нулю, и линейный член из этой формулы выпадет. Тогда

$$\frac{\Delta \bar{v}}{v} = \frac{\bar{v}^2}{2c^2},$$

где \bar{v}^2 — средняя квадратичная скорость атомов. Учитывая, что $\frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} mU$, получим $\frac{\Delta v}{v} = \frac{U}{2c^2}$ и $\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\Delta v}{v} \right) = \frac{c_p}{2c^2}$, т. е. ту же формулу.

Проверка этой формулы проводилась Паундом и Ребка [87, стр. 305—309] с изотопом Fe^{57} и Бойлем, Банбэри, Эдварсом и Холлом [121] с изотопом Sn^{119m} . В обоих опытах экспериментальные и теоретические результаты количественно согласуются. Каган [121] указал, что вышеприведенные расчеты справедливы только для идеального одноатомного кристалла. Для многоатомных решеток и примесных ядер температурная зависимость красного смещения линии Мессбауера от параметров кристалла более сложная. Им было доказано, что температурный сдвиг линии сопровождается и ее уширением. Шервин [123] интерпретировал результаты опытов с использованием эффекта Мессбауера как экспериментальное доказательство правильной трактовки в теории относительности парадокса часов.

Эти опыты показывают, что чем больше среднеквадратичная скорость часов, тем медленнее они идут, и что замедление времени в пределах экспериментальной ошибки порядка 10% определяется только скоростью и не зависит от ускорения.

Как показал Меллер [124], опыты, подобные произведенным Чемпни и Муном, можно интерпретировать так же, как аналог опытов типа Майкельсона — Морли по обнаружению «эфирного ветра». Теория относительности дает для этого случая $v = v_0$, а классическая — $v = v_0 \left(1 + \frac{uv}{c^2}\right)$, где u — относительная скорость источника и поглотителя, а v — абсолютная скорость лаборатории в эфире. Проведенный специально с этой целью эксперимент дал для верхней границы «эфирного ветра» величину $(1,6 \pm 2,8)$ м/сек, что почти в 300 раз меньше, чем в самых точных повторениях классического варианта опытов Майкельсона — Морли. Как отмечает Меллер, здесь существенно еще то обстоятельство, что отрицательный результат опыта Чемпни, вполне соответствующий теории относительности, нельзя объяснить контракционной гипотезой, а следовательно, он противоречит теории Лоренца. Это же относится и к предложенному Рудерфером опыту первого порядка, по техническому исполнению напоминающему опыты Крэншоу и Чемпни. Дальнейшее усовершенствование техники измерений позволяет надеяться, что с помощью эффекта Мессбауера удастся доказать отсутствие «эфирного ветра» с точностью до 15 см/сек, что составляет всего $5 \cdot 10^{-6}$ орбитальной скорости Земли.

Выяснению возможностей проверки специальной теории относительности посвящена работа Бенневица, отрицающего правомерность трактовки результатов Крэншоу как подтверждение принципа эквивалентности.

Другие новые технические возможности повышения точности опытов типа Майкельсона — Морли появились благодаря высокой стабильности частоты квантовых генераторов. Меллер впервые обратил внимание на возможность использования мазеров,

работающих на пучке молекул аммиака. Пусть два таких генератора расположены на вращающейся рейке таким образом, чтобы их резонаторы были горизонтальны, а возбужденные молекулы аммиака двигались навстречу друг другу с тепловыми скоростями.

Частоты излучения с учетом доплеровского смещения могут быть выражены по теории неподвижного эфира формулой

$$\nu = \nu_0 \left[1 + \frac{e\mathbf{u}}{c} + \frac{(e\mathbf{u})^2}{c^2} + \frac{\mathbf{v}\mathbf{u}}{c^2} \right],$$

где e — единичный вектор в направлении излучения; \mathbf{u} — скорость молекул; \mathbf{v} — скорость установки в эфире; ν_0 — частота при $v=0$. Относительное смещение частоты обоих генераторов будет

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{2v\mathbf{u}}{c^2}.$$

При повороте всей установки на 180° эффект удваивается. Для $u=0,6$ км/сек $\nu=2,4 \cdot 10^{10}$ и $v=30$ км/сек, $\Delta\nu/\nu=8 \cdot 10^{-10}$, а смещение частоты $\Delta\nu=20$ гц.

В опытах Таунса и его сотрудников первоначальная разница в частотах генераторов (частота биений) была установлена в несколько десятков герц, причем оси мазеров были ориентированы в направлении запад — восток. После одной минуты непрерывных измерений установка поворачивалась на 180° и в новом положении частота биений вновь регистрировалась. В течение 20 мин проводилось 16 подобных измерений; такая процедура повторялась ежечасно на протяжении 12 час, за которые сама Земля поворачивалась на 180° . Первая серия опытов, выполненных в будний день, дала изменение измеряемого эффекта около $1/20$ гц за сутки. Вторая, выполненная в субботу, при незначительных местных помехах — $1/50$ гц, причем они никак не были связаны с ориентацией установки. Точность измерений соответствовала относительной стабильности генераторов 10^{-12} за минуту.

Таким образом, эффект оказался в 1000 раз меньше искомого, т. е. скорость «эфирного ветра» не превышает $1/30$ км/сек. Важно отметить, что эксперименты указанного типа с молекулярными генераторами — первого порядка относительно v/c , хотя в формулу входит $1/c^2$, а излучаемая частота независима от длины резонатора.

Правомерность такой интерпретации результатов опытов отвергалась на том основании, что искомый эффект всегда будет скомпенсирован, а поэтому отрицательный результат тривиален. Это возражение вызвало необходимость более тщательного обоснования теории. При этом выявилась правильность использованных Таунсом расчетов.

Таунсом был предложен еще один аналог опыта Майкельсона — Морли с использованием лазеров. Опыт был осуществлен под его руководством группой физиков Массачузетского технологического института.

Частота излучения лазера определяется формулой

$$\nu = \frac{\nu_m Q_m + \nu_c Q_c}{Q_m + Q_c},$$

где ν_m — частота перехода; ν_c — резонансная частота резонатора; $Q_m = \nu_m / 2\Delta\nu_m$; $Q_c = \nu_c / 2\Delta\nu_c$; $\Delta\nu_m$ — полуширина линии излучающего вещества при половинной мощности; $\Delta\nu_c$ — полуширина линии резонатора при тех же условиях. Если $Q_m \gg Q_c$, то частота ν будет определяться в основном частотой перехода ν_m , если $Q_m \gg Q_c$, — частотой резонатора ν_c . В последнем случае $\nu \approx \nu_c n c 2L$; здесь n — целое число; L — расстояние между пластинками резонатора. При оси резонатора лазера, параллельной скорости эфира, частота лазера $\nu'_c = \frac{nc}{2L} (1 - \beta^2)$; при перпендику-

лярной — $\nu''_c = \frac{nc}{2L} (1 - \beta^2)^{1/2}$; относительная разность частот будет

$$\frac{\nu''_c - \nu'_c}{\nu_c} = \frac{1}{2} \beta^2.$$

При повороте всей установки на 90° разность удваивается и будет составлять β^2 . При $v = 30$ км/сек и $\nu_c = 3 \cdot 10^{14}$ гц $\Delta\nu$ будет порядка $3 \cdot 10^6$ гц, что легко наблюдать. На точность эксперимента будет влиять сдвиг частот из-за спонтанного излучения и изменение L из-за тепловых флуктуаций. Важно изолировать установку от всех возможных механических вибраций.

Экспериментальная установка состояла из двух газовых лазеров (He — Ne), установленных перпендикулярно. Полупосеребренная разделительная пластинка направляла оба луча на фотомножитель, после чего биения регистрировались непрерывно. Влияние механических вибраций устранялось сложной системой подвески оборудования. Вся платформа с оборудованием подвешивалась четырьмя резиновыми канатами к металлической пластинке, которая в свою очередь висела на бериллиево-медной проволоке, прикрепленной к балке. Этим достигалась почти полная изоляция установки от здания, и воздушные акустические волны уже сказывались сильнее.

Вся установка вращалась мягким резиновым приводом на 90° примерно за 20 сек. Влияние местных помех (например, магнитострикции) исключалось проведением опытов в разное время суток. Записи проводились несколько минут через каждые полчаса в продолжении около 6 час. После тщательной обработки всех

данных оказалось, что полученное смещение частот составляет $3 \cdot 10^3$ гц, т. е. только $1/1000$ смещения, соответствующего скорости «эфирного ветра» при орбитальном движении Земли.

В заключение авторы отмечают, что поскольку в данном опыте частота в основном определяется длиной резонатора, это аналог опыта Майкельсона — Морли, тогда как опыт Таунса и Сидерхолма, где частота определяется частотой перехода, является аналогом скорее опытов Айвса — Стилуэлла. Комбинации двух пар квантовых генераторов, для одной из которых $Q_c < Q_m$, а для второй $Q_c > Q_m$, может стать основой для опыта типа Кеннеди — Торндайка, а следовательно, для получения полной системы экспериментального подтверждения специальной теории относительности.

Использование лазеров позволило провести со значительно большей точностью и вращательные опыты типа Саньяка, Харресса и Майкельсона — Гейля. Установка состояла из гелиево-неонового лазера с четырьмя резонаторами, образующими стороны квадрата, в углах которого располагались плоские зеркала. Через одно из зеркал излучение направлялось в резонаторы по часовой стрелке и против часовой стрелки. Оба излучения после прохождения через трубки попадали на катод фотоумножителя. При вращении всей установки наблюдались биения от 1 до 40 кгц, в зависимости от угловой скорости.

Так как разница оптических путей в опытах описываемого типа

$$\Delta P = \frac{4\omega S}{c},$$

где S — площадь квадрата, то относительное смещение частот

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{\Delta P}{P} = \frac{4\omega l^2}{c 4l} = \frac{\omega l}{c},$$

откуда

$$\Delta \nu = \frac{\omega l \nu}{c} = \frac{\omega l}{\lambda}.$$

Опыты показали, что частота биений действительно пропорциональна угловой скорости, причем в пределах ошибок измерений экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическими. Поскольку лазеры позволяют измерять относительную разность частот порядка 10^{-12} , точность измерений на несколько порядков выше, чем в опытах Саньяка и Майкельсона — Гейля.

Сохраняя три трубки заполненными активной средой и заполняя четвертую движущейся средой (кварц, CCl_4 , воздух), авторы использовали эту же установку для измерения френелевского коэффициента увлечения. Результаты также хорошо со-

гласуются с теорией. Безусловно, как и в классическом случае, эти опыты не могут решить вопроса о справедливости теории относительности, поскольку те же результаты предсказываются теорией неподвижного эфира. Но они свидетельствуют против полностью увлекаемого эфира.

В работе [157] лазер был использован для проверки неожиданных результатов опыта Кантора. Половина лазерного луча пропусклась через движущееся слюдяное окошечко, половина — через неподвижное. Измерения проводились в воздухе, вакууме. Исследовалась возможность влияния скорости окошечка, направления движения окошечка относительно направления распространения света, окружающей среды. Изменение скорости наблюдалось с помощью интерферометра Жамена. При скорости движения окошечка $62,8$ м/сек, по гипотезе Кантора, смещение должно составлять $1/3$ полосы. Опыт дал смещение меньше $1/20$ полосы. Поэтому, если записать зависимость скорости света от скорости источника в виде $c' = c + \alpha v$, то $\alpha = 0 \pm 1/7$, что подтверждает ошибочность выводов Кантора и справедливость второго постулата Эйнштейна.

Г. М. Страховский предложил схему установки для обнаружения «эфирного ветра» с помощью лазеров. Основная идея состоит в измерении разности фаз колебаний двух несинхронизированных молекулярных генераторов, удаленных на расстоянии L порядка нескольких метров. Разность фаз генераторов $\varphi = 2\pi \frac{L}{\lambda}$. При повороте всей установки на 180° эта разность фаз, по теории относительности не должна меняться, а по классической — $\Delta\varphi/\varphi = 2\beta$. При $\lambda = 1,25$ см $L = 12,5$ м, $\beta = 10^{-4}$, $\Delta\varphi = 0,4$. При стабильности частоты 10^{-12} и времени поворота около 10 сек эффект вполне наблюдаем. Это опыт первого порядка относительно v/c , причем в знаменателе скорость света фигурирует в первой степени. Аналогичный опыт, но с использованием газовых лазеров, предложен в 1962 г. [125].

За последние годы были предложены новые варианты использования лазеров в опытах первого и второго порядка относительно v/c [126—128], причем часть из них встретили возражения [129—130].

Возможность применения квантовых генераторов для исследования эффектов общей теории относительности подробно обсуждается в работе Н. Г. Басова и др.

Наряду с теми явлениями, которые были вновь открыты за последние годы, благодаря усовершенствованию техники эксперимента, новые данные в пользу специальной теории относительности продолжает поставлять ядерная физика. Совершенно естественно, что именно в мире элементарных частиц, где скорости приближаются к скорости света, релятивистские эффекты порядка v/c и v^2/c^2 [131] обнаруживаются значительно точнее.

Опыты Кауфмана, проведенные еще за несколько лет до появления теории относительности, положили начало целому ряду¹ опытов, где большая скорость электронов использовалась для изучения зависимости массы от скорости. Цель состояла в получении экспериментальных данных для выбора между формулами Абрагама и Эйнштейна — Лоренца. Сюда относятся опыты по прямому определению зависимости массы от скорости для электронов, получаемых при β -распаде, Бухерера (1908—1909), Неймана (1914), Триккера (1925), выполненных по методу Капицы, Списа и Цана (1938), Роджерсов и Рейнольда (1940). В опытах Триккера при v/c , достигающем величины 0,8, отклонение от данных, вычисленных по релятивистской формуле, не превышает 2%, у Цана и Списа при $v/c=0,745$ —1,5%, у Роджерсов и Рейнольда — 0,9%.

Вторую группу составляют опыты Гупки (1910), Гюи, Ратновского и Леванши (1921), где исследованию подвергались искусственно ускоряемые электроны в катодных лучах. Хотя здесь v/c достигало лишь величины 0,5, последние авторы считали, что их результаты в 56 раз ближе к данным Лоренца — Эйнштейна, чем Абрагама. Первые опыты с протонами, ускоренными на синхротроне, были проведены Гроувом и Фоксом [133]. Они определили равновесную орбиту протонов с энергией 385 Мэв и измеряли частоту на этой орбите. По их данным, результаты совпадают с вычисленными из теории относительности с точностью 0,1%, но дать их точную оценку трудно из-за сложности орбиты протонов внутри ускорителя.

К третьей группе принадлежат опыты по изучению тонкой структуры спектральных линий водорода, дейтерия и гелия. Из этой группы отметим опыты Глитшера (1917), а из более современных — данные Дюмонда и Козна (1953) [134], у которых расхождение с теорией не более 0,24%. Наконец, Чемпион (1932) проверил вытекающее из релятивистской формулы для массы следствие, что при упругом соударении двух частиц одинаковой массы угол разлета должен отличаться от 90°, и получил результаты, согласующиеся с теорией в пределах 2%.

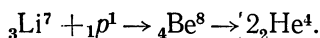
Интерпретация всех упоминаемых здесь опытов была предметом многолетней дискуссии, возобновленной сравнительно недавно (1957) Яноши и Фараго. Тщательно рассмотрев историю выполнения всех опытов, в которых изучалась зависимость массы от скорости, они приходят к выводу, что совокупность имеющихся здесь данных, хотя и не противоречит теории относительности, не позволяет делать достаточно точного выбора между релятивистской и нерелятивистской формулами, поскольку ошибки измерений близки к разнице между результатами, вычисленными по этим формулам.

¹ Библиография приведена в Rev. Mod. Phys., 1953, 25, 691.

Хотя некоторые из названных работ прямо противоречат такому утверждению — об этом говорят и сами авторы, — опыты продолжались. Зрелов, Тяпкин и Фараго [135] измеряли массу протонов, ускоренных на синхротроне до энергии порядка 660 Мэв. Сравнивалась масса $m_1 = p/v$, определенная по измеренным импульсу и скорости, с массой m_2 , вычисленной по релятивистской формуле. Эксперименты дали $p = (1296,5 \pm 2,33) \text{ Мэв}/c$ при $v/c = 0,8112 \pm 0,0005$, откуда $m_1 = (1598,2 \pm 3) \text{ Мэв}/c^2$. Для этих значений скорости $m_1 = (1604,3 \pm 1,9) \text{ Мэв}/c^2$, так что $\Delta m = 6,1 (1 \pm 0,6)$ и $\Delta m/m = 0,004 (1 \pm 0,6)$.

Группа швейцарских физиков [136] проверяла релятивистское соотношение между массой и импульсом для электронов со скоростями $\beta = 0,987 \div 0,990$. Так как $m/m_0 = \sqrt{1 + \frac{p^2}{m_0^2 c^2}}$, то отношение $\frac{m/m_0}{(1 + p^2/m_0^2 c^2)^{1/2}} = 1$. Среднее значение полученных результатов от-
 личается от единицы на $0,000037 \pm 0,000036$.

Физика ядра и элементарных частиц дала совершенно необозримое число подтверждений правильности релятивистского соотношения между массой и энергией $E = mc^2$. Поскольку существуют независимые от этого соотношения способы определения массы (например, масс-спектрографический) и энергии (например, по длине пробега) частиц, можно составить энергетический баланс ядерных реакций и полученные данные сравнить с вычисленными по дефекту массы. Первые измерения такого рода были выполнены Кокрофтом и Уолтоном (1931). Бомбардируя быстрыми протонами изотоп лития ${}^7_3\text{Li}$, они осуществили реакцию



Изменение суммарной массы покоя при этой реакции равно $0,01854 \text{ а. е. м.}$, что соответствует энергии в 17,25 Мэв. Измеренная по длине пробега кинетическая энергия α -частиц равнялась 8,6 Мэв, значит для обеих частиц — 17,2 Мэв, в полном согласии с вычислениями. В последующие годы этих данных становилось все больше. Приведем некоторые примеры. В реакции ${}^2D(d, p){}_1\text{H}^3$ соответствующие данные $3,98 \pm 0,02$ и 3,98; в реакции ${}^7_3\text{Li}(p, \alpha){}_2\text{He}^3$ — $3,72 \pm 0,08$ и 3,76; в реакции ${}^7_3\text{Li}(d, \alpha){}_2\text{He}^4$ — $22,07 \pm 0,07$ и 22,17. Точность этих данных была столь высока, что на их основе Браунбек (1937) счел возможным вычислять скорость света.

Хотя обсуждаемая формула служит для расчета ядерно-энергетических установок, последние не дают достаточно точных данных для количественных сопоставлений теории и эксперимента. Большую точность дают ядерные реакции синтеза (10^{-4}). В последние годы по энергетическому балансу ядерных реакций при высоких энергиях удалось очень точно измерить энергию

покоя нестабильных частиц: Λ^0 -гиперона — 1115,4 Мэв с погрешностью 0,01%, π^+ -мезона — 139,6 Мэв с погрешностью 0,04%, K^+ -мезона — 493,8 Мэв с погрешностью 0,04%, ω -резонанса — 782,8 Мэв с погрешностью 0,06%.

Собственно сейчас речь уже идет не о проверке законов релятивистской динамики, а поскольку в их точности убеждены, об их широком использовании для измерения таких величин, которые другими методами определить нельзя.

Обычно в качестве одного из наиболее точных подтверждений специальной теории относительности приводятся опыты по измерению времени жизни мезонов. Действительно, ретроспективно опыты Блэккетта, Росси с сотрудниками, Разетти и др., получивших для времени жизни μ -мезонов в полете $\tau = 30 \cdot 10^{-6}$ сек при $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx 15$, а в покое $\tau_0 = (2,15 \pm 0,07) \cdot 10^{-6}$ сек, хоро-

шо согласуются с релятивистской формулой для времени. Но для самих исследователей в те годы (1937—1942) вопрос стоял иначе: хорошее согласие экспериментальных данных с указанной формулой служило оправданием принятой методики измерений и свидетельствовало о правильности основных выводов относительно характера распада мезонов [137]. Так что уже тогда не ядерная физика работала на теорию относительности, а теория относительности служила рычагом для ядерных исследований.

Сила теории относительности сказалась и в исследовании целого ряда других явлений микромира, из которых отметим только некоторые. С точностью 10^{-3} была установлена линейная зависимость между энергией и импульсом квантов при комптоновском рассеянии и проверен измерением ионизационных потерь релятивистский эффект возрастания напряженности электрического поля в направлении, перпендикулярном движению заряженных частиц при увеличении их скорости. Точность 10^{-5} была достигнута для получаемого из релятивистского волнового уравнения Дирака соотношения между спиновым и магнитным моментом. По результатам измерения лэмбовского сдвига тонкой структуры уровней атомов водорода и дейтерия можно проверить коэффициент $3/8$ в релятивистской формуле для кинетической энергии:

$$T = m_0 c^2 \left(1 + \frac{1}{2} \beta^2 + \frac{3}{8} \beta^4 \right)$$

с точностью 10^{-6} .

Методы ядерной физики позволили провести ряд опытов и по проверке второго постулата специальной теории относительности — независимости скорости света от скорости источника. Именно этот постулат вызывал на протяжении многих лет ожесточенные нападки. Собственно, среди антирелятивистов обра-

зовалось два течения. Сторонники сохранения электродинамики Лоренца, а они составляли большинство, не возражали против этого постулата, поскольку он вытекал и из гипотезы неподвижного эфира, и не считали необходимым его проверить экспериментально. Адепты второго течения вслед за Ритцем требовали применения к свету галилеевского закона сложения скоростей, отвергая все доводы, приводимые против различных вариантов баллистической гипотезы, в том числе рассуждения де Ситтера о двойных звездах и опыты Томашека (повторение опыта Майкельсона — Морли с внеземным источником). Фокс пытался обосновать недоказательность всех этих результатов ссылкой на влияние неподвижной среды, окружающей все движущиеся источники и являющейся своеобразным ретранслятором света. Поскольку эта среда неподвижна, свет к наблюдателю всегда идет от неподвижных вторичных источников и никакие опыты не могут служить оправданием второго постулата. Выход может быть найден либо проведением опыта в вакууме, либо использованием слабо поглощаемых жестких γ -лучей.

Впервые опыт с γ -квантами тормозного излучения был выполнен еще в 1952 г., но там измерялась лишь скорость квантов и не ставилась задача проверки второго постулата, поэтому вопрос о скорости источника не выделялся и интерпретация опыта не совсем однозначна (при скорости электрона, близкой к c , скорость γ -кванта оказалась $2,97 \cdot 10^{10}$ см/сек $\pm 1\%$).

В опытах группы шведских физиков измерялось различие в скоростях γ -квантов, испускаемых движущимися и покоящимися ядрами. Возбужденные ядра C^{12} , получаемые в результате неупругого рассеяния α -частиц в реакции $C^{12}(\alpha, \alpha')^*C^{12}$, на уровне 4,43 Мэв обладают временем жизни $6,5 \cdot 10^{-14}$ сек и успевают испустить γ -квант до остановки. Ядра O^{16} , получаемые в подобной реакции $O^{16}(\alpha, \alpha')^*O^{16}$, на уровне 6,13 Мэв обладают временем жизни $1,2 \cdot 10^{-11}$ сек, а поэтому останавливаются до испускания γ -кванта. Измерения доплеровских смещений подтвердили, что средняя скорость ядра $^*C^{12}$ равна $(1,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-2} c$, а $^*O^{16}$ в среднем равна нулю.

Импульсы α -частиц из циклотрона направлялись на мишени, одна из которых содержала C^{12} , вторая — O^{16} . Мишени располагались на расстоянии 30 см и их можно было менять местами; приемник находился в 5 м от мишеней. Если τ_1 — промежуток времени между моментами поступления импульсов от обеих мишеней при одном их расположении и τ_2 — при обратном, то $\Delta\tau = 0$, если скорость квантов не зависит от скорости источника, и $\Delta\tau = 0,5 \cdot 10^{-9}$ сек, если скорости складываются. Опыт дал $\Delta\tau = (0,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-9}$ сек, т. е. в пределах ошибок измерений второй постулат подтверждается.

Саде пользовался γ -квантами, полученными при аннигиляции позитрона и электрона. В системе центра масс обеих частиц

полученные при аннигиляции два кванта разлетаются под углом 180° со скоростями, равными скорости света. В лабораторной системе этот угол меньше и зависит от энергии позитрона. При классическом законе сложения скоростей для одного кванта $v > c$, а для второго $v < c$. Используемая установка позволяла с помощью сцинтилляционных счетчиков определять разность времени меньше, чем $0,25 \cdot 10^{-9}$ сек. С точностью $\pm 10\%$ подтвердились предсказания теории относительности. Обработка данных в этом опыте вызвала возражения.

Для получения больших скоростей источника Россер [138] предложил воспользоваться γ -квантами, получаемыми при распаде π^0 -мезона. Опыт был осуществлен в 1964 г. на Женевском протонном синхротроне: π^0 -мезоны с энергией порядка 6 Гэв получались при бомбардировке бериллиевой мишени протонами с импульсом около 19 Гэв/с . Если принять некоторое влияние скорости источника на скорость γ -квантов, то можно написать $c' = c + kv$, где c' — скорость γ -квантов; c — скорость света от неподвижного источника; v — скорость источника. Измерения дали $c' = (2,9977 \pm 0,0004) \cdot 10^{10} \text{ см/сек}$, что ограничивает коэффициент k , равный нулю по второму постулату, величиной $(-3 \pm 13) \cdot 10^{-5}$.

В опыте π^0 -мезоны со скоростью порядка $0,2c$ получались торможением пучка отрицательных π -мезонов в жидком водороде при реакции $\pi + p \rightarrow \pi^0 + n$. Хотя эти опыты менее точны, они дали для k предел $0,5$ с точностью $99,9\%$ и $0,4$ с точностью 90% . В пределах ошибок измерения эти опыты полностью отвергают классический закон сложения скоростей. В ряде работ [139—142] разработаны предложения по использованию распада мезонов для проверки часов. Эти данные говорят о том, что в области хорошо известных явлений не имеет особого смысла ставить новые опыты, точность которых не превышала бы 10^{-4} . Однако после 1962 г. появилась новая широкая волна опытов. Это было вызвано стремлением строже обосновать некоторые основные утверждения специальной теории относительности как ведущего стержня современного естествознания (например, независимость скорости света от скорости источника) и появлением новых технических возможностей повышения точности эксперимента.

Некоторую роль в увеличении числа работ этого направления сыграло и опубликование Кантором [143] результатов опытов, якобы противоречащих общепринятой теории. Суть опыта Кантора состояла в следующем. На вращающемся диске, в противоположных концах диаметра, установлены две тонкие прозрачные пластинки, перпендикулярные плоскости диска. С помощью прозрачной пластинки и зеркал пучок белого света расщепляется на два когерентных пучка, которые затем пропускались через прозрачные пластинки так, что один проходил через них в направлении движения, а второй — в противоположном. Часть каждого пучка проходила над пластинками, поэтому в интерферо-

метре получались две интерференционные картины: одна соответствовала исходному неподвижному источнику, вторая — пластинкам, рассматриваемым в качестве движущихся источников. Если скорость света независима от скорости источника, то между обеими картинами никакого смещения полос не должно быть. Если же $c' = c + \rho v$, то при $\rho = 1$ сдвиг полос должен равняться 0,74. Кантор, считая, что увлечением света пластинками можно пренебречь, получил 0,5, откуда $\rho = 2/3$. По Кантору, этот результат, во всяком случае качественно, противоречит второму постулату теории относительности.

Дальнейшая история этих опытов весьма поучительна, ибо в основном повторяет историю [144] нашумевших в 20-х годах сенсационных опытов Миллера, якобы обнаружившего положительный результат при повторении опыта Майкельсона — Морли. Эти опыты вызвали тогда оживленную дискуссию, причем все высказанные мнения можно было отнести к трем группам. Откровенные противники теории относительности сочли их решающим доводом против теории Эйнштейна. Другие, поверившие в корректность опытов Миллера, пытались согласовать их результаты с теорией относительности.

Наиболее трезвые экспериментаторы (Кеннеди и Торндайк, Пиккар и Стаэль, Иллингворт, Иоос), введя различные усовершенствования в технику эксперимента, повторили опыты, показав полное соответствие результатов выводам теории относительности. Собственно, только в этом заключается положительное значение работ Миллера. В 1955 г. детальный анализ [145] выяснил, что в опытах Миллера сказался температурный эффект, обусловленный сильным увеличением длин плеч интерферометра.

С опытами Кантора произошла аналогичная история. Стронники возврата к дорелятивистским представлениям либо прямо [146], либо косвенно [147—149] сочли их опровержением теории относительности. Некоторые пытались исправить расчеты Кантора так, чтобы согласовать их результаты со специальной [150—152] или общей [153—154] теорией относительности. Наконец, был предпринят ряд новых опытов, ставивших целью проверку данных Кантора. Именно эти работы представляют наибольший интерес.

Джемс и Стернберг [155] осуществили оригинальный опыт. Если, как предполагал Кантор, $c' = c + \rho v$ и прозрачные тела передают часть своей скорости проходящему через них свету, то различные точки фронта световой волны, проходящей через вращающийся диск, должны обладать различной скоростью. Вследствие этого фронт волны должен повернуться на некоторый угол $\theta = \frac{\rho \omega x}{c}$, где ω — угловая скорость диска, x — расстояние телескопа наблюдателя от диска. В условиях опыта при $\rho = 1$, $\theta^0 = 20$

дуговых сек, при $\rho = 2/3$ (число, полученное Кантором) $\theta^0 = 13,3$ сек. В пределах ошибок измерения не было обнаружено никакого поворота; это означает, с учетом ошибок измерения, что во всяком случае $\rho < 0,025$.

Ротц [156] вводил движущуюся равномерно стеклянную пластинку на пути одного из трех когерентных лучей в интерферометре Цернике. Хотя точность прибора позволяла определить смещение полос порядка 0,005, никакого влияния движения стекла на скорость света обнаружено не было. Опыт Кантора был повторен и с лазерным лучом [157; 158, стр. 147—151]; результаты этих опытов не подтвердили первоначальные данные.

Наконец, Бабкок и Бергман [158, стр. 147—151] предприняли точное повторение опытов по схеме Кантора. При этом они ввели ряд усовершенствований, могущих увеличить искомый эффект (увеличение плеч интерферометра, применение реверсионного двигателя), устранить возможные возражения, связанные с влиянием воздуха (установка была помещена в вакуум), улучшить разрешающую способность и устранить некоторые источники ошибок. При $\rho = 1$ смещение полос должно равняться 2,9; при $\rho = 2/3$ — 1,9. Опыт дал смещение $0,0120 \pm 0,006$. Это означает, что $\rho < 0,006$.

Установка Бабкока и Бергмана помещалась в вакууме, тогда как Кантор проводил опыт в воздухе. Можно было думать, что различие в результатах обоих опытов как-то обусловлено влиянием воздуха на величину смещения полос. Это влияние проверялось [158a] в установке со специально приспособленным интерферометром Рэлея, дававшим возможность наблюдать смещения полос порядка 0,1. Хотя по классической теории смещение в условиях опыта должно было быть 0,44, ни визуальные, ни фотографические наблюдения не выявили никакого смещения. Малейшие течения теплого воздуха в комнате сразу же вызывали сильные возмущения, что и привело к выводу, что положительные результаты Кантора обусловлены температурными эффектами.

Если ко всему этому добавить, что результаты Кантора противоречат даже классическим опытам Физо и Зеемана по увлечению света движущимися телами [159], то становится совершенно ясно, что второй постулат специальной теории относительности несколько не был поколеблен; его экспериментальное обоснование не менее надежно, чем других положений этой теории. Кстати, здесь можно упомянуть, что еще в 1956 г. были опубликованы [160] вполне соответствующие теории относительности данные по прямой проверке этого постулата для света, идущего от краев Солнца. Хотя способ обработки данных вызвал возражения [161], автор приходит к выводу, что независимость скорости света от скорости источника в 10^{45} более вероятна, чем баллистическая гипотеза.

К этому же кругу идей примыкает работа Диккенса и Малина [161а], пытавшихся найти зависимость скорости света от скорости источника по методу, предложенному Динглером. Он состоит в сравнении постоянной аберрации для быстро разбегающихся внегалактических туманностей и близких звезд, радиальная скорость которых относительно Солнца ничтожна. Наблюдения проводились одновременно с 26-дюймовым рефрактором обсерватории Херстмонсо и 74-дюймовым рефлектором в Претории. В обоих случаях разница в аберрации не превышала ошибок измерения, откуда авторы заключили, что если красное смещение действительно обусловлено эффектом Допплера (а значит, скорость разбегания туманностей порядка 20 000 км/сек), то их наблюдения отрицают зависимость скорости света от скорости источника.

Из неоптических работ последних лет следует отметить опыты Бертози [161б], проверявшего зависимость скорости электронов от их кинетической энергии и наличие верхней границы для этой скорости. Пучок электронов из генератора Ван де-Граафа направлялся в линейный ускоритель (Массачусетского технологического института); выходящие электроны обладали кинетической энергией в интервале 0,5—15 Мэв. Поскольку проверялось одно из основных соотношений релятивизма, все величины определялись по возможности прямыми методами. Скорость определялась непосредственно по времени прохождения электроном заданного расстояния, а кинетическая энергия — калориметрическим путем, по нагреванию алюминиевого диска, в котором тормозились электроны. Строились кривые зависимости $\left(\frac{v}{c}\right)^2$ от $\frac{E_k}{m_0c^2}$ (E_k — кинетическая энергия, m_0 — собственная масса электрона). Классическая механика дает

$$\left(\frac{v}{c}\right)^2 = 2 \frac{E_k}{m_0c^2},$$

т. е., линейную зависимость, а релятивистская

$$\left(\frac{v}{c}\right)^2 = 1 - \frac{1}{\left(\frac{E_k}{m_0c^2} + 1\right)^2}.$$

Экспериментальные данные хорошо накладывались на релятивистскую кривую, и хотя точность эксперимента не очень велика (10%), он однозначно определяет существование верхнего предела для скорости электронов.

Исключительная согласованность результатов совокупности классических и современных опытов, подтверждающих как основы, так и следствия специальной теории относительности, фактически предопределяет результаты любых [162—166] новых опытов, не превышающих по точности уже известные, или не ис-

пользующих принципиально новых областей физических явлений. Прошедшая в 1961 г. с участием видных ученых конференция, созванная национальным управлением авиации и космонавтики США, пришла к выводу, что использование искусственных спутников Земли для постановки опытов по специальной теории относительности лишено смысла [167].

И тем не менее интерес к рассматриваемому вопросу сейчас необычайно велик, о чем свидетельствует его живое обсуждение на Сольевеевском конгрессе 1961 г. Но этот интерес обусловлен, конечно, не архаичными попытками вернуть мир к пространству Ньютона и времени Лоренца, а стремлением определить ту грань, за которой законы теории относительности нарушаются и начинается действие еще не познанных законов некоего «ультрарелятивистского» мира, из которых современная теория должна будет вытекать как предельный случай.

Той областью, которая может привести к открытию принципиально новых явлений, для которых проявится недостаточность наших современных представлений, нашего сегодняшнего научного языка, является теория элементарных частиц, физика высоких энергий, т. е. как раз та отрасль физики, которая на протяжении последних десятилетий внесла наибольший вклад в торжество теории относительности [168—170]. Сейчас очень трудно, почти невозможно предсказать что-либо о тех результатах, которые могут быть здесь получены. Диапазон энергий, поставляемых экспериментаторам работающими ускорителями, недостаточен для проникновения за барьер, скрывающий глубокую структуру материи. Расширив этот диапазон, мы вторгнемся в совершенно новую область познания, в которой, как показывает история физики, понадобятся, очевидно, представления и понятия, коренным образом отличающиеся от принятых сейчас. Такая точка зрения широко распространена, но отнюдь не обязательна. Может быть, предполагаемые изменения не будут столь радикальными и окажется возможным вести обычное описание событий вплоть до сколь угодно малых пространственных и временных интервалов на основе существующих физических объектов?

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Коперник Сборник статей к 400-летию со дня его смерти. М.—Л., 1947, стр. 208.
2. Kepler. Gesammelte Werke, Bd 1—7, 13—17. München, 1937—1955.
3. А. Эйнштейн Иоганн Кеплер. — В кн. «Физика и реальность». М., изд-во «Наука», 1965, стр. 106.
4. J. Kepler - Max Caspar. Neue Astronomie. München, 1929, p. 26.
5. А. Паннекук. История астрономии. Пер с англ. Н. И. Невской. М., изд-во «Наука», 1966, стр. 283.
6. Г. Галилей. Избранные труды, т. I. М., изд-во «Наука», 1964, стр. 294.
7. А. Эйнштейн. Механика Ньютона и ее влияние на формирование теоретической физики — В кн. «Физика и реальность». М., изд-во «Наука», 1965, стр. 14.

- 8 Н. А. Любимов История физики, ч. III. СПб., 1896, стр. 494—495.
- 9 Л. Розенфельд Ньютон и закон тяготения (в печати).
- 10 И. Ньютон Математические начала натуральной философии — Собрание трудов акад. А. Н. Крылова. М.—Л., 1956, стр. 80.
- 11 J. Vorelli. Theoria Mediceorum planetarum ex causis. physicis deducta, 1666; см. Ф. Розенбергер. История физики, ч. 2. М.—Л., 1933, стр. 174.
- 12 M. G. Evans. Newton and the cause of gravity.—Amer. J. Phys., 1958, **26**, N 9, 619—624.
- 13 Ф. Розенбергер. История физики, ч. II. М.—Л., ОНТИ, 1937, стр. 174.
- 14 Гук Роберт (Hooke, 1635—1703). *Lectioes Cutleriane*, 1697; *Posthumous works*, 1705.
- 15 Эдмунд Галлей (Halley, *Papers to commemorate the tercentenary of his birth.*—*J. Geophys. Reseach*, **61**, 1956, N 2); см. А. В. Михайлов. Выдающийся английский астроном и геофизик. К 300-летию со дня рождения Эдмунда Галлея.—*Природа*, 1956, № 11.
- 16 А. К. Клеро. Теория фигуры Земли, основанная на началах гидростатики. М.—Л., 1947.
- 17 Л. Эйлер. Основы динамики точки. Гостехиздат, 1938, стр. 409.
- 18 Я. Г. Дорфман. Физические воззрения Леонарда Эйлера.—В сб. «Леонард Эйлер». М., 1958, стр. 389.
- 19 L. Lesage. *Lucrèce Newtonien.*—*Nouveaux Mém. Acad. roy. sci.*, 1782, Berlin; *Traite de physique...* (1818).
- 20 C. R. Legay. 1869, **69**, 615.
- 21 H. Schramm. *Die allgemeine Bewegung der Materials Grundursache der Erscheinungen.* Wien, 1872; *Anziehungskraft als Wirkung der Bewegung.* Graz, 1873.
- 22 Изенкрате. Научное обозрение, 1894, № 5.
- 23 S. Oppenheim.—*Jahresber. kais. kgl. akad. Gymn. Wien*, 1894—1895, S. 3—28; F. Tisserand.—*Méc. cél.*, 1896, **4**, chap. 28; P. Dru de.—*Ann. Phys. Chem.*, 1897, **62**; Lehmann-Filhes.—*Astron. Nachr.*, 1885, **110**, 208; J. Hepperger.—*Wiener Ber.*, 1888, **97**, 337—362.
- 24 C. Seegers. *Diss. Gottingen*, 1864;—*Z. Math. Phys.*, 1870, 69—91; F. Tisserand, G. Holzmüller.—*C. r.*, 1872, **75**, 760.
- 25 F. Tisserand.—*C. r.*, 1890, **110**, 313.
- 26 А. Эйнштейн. Собрание научных трудов, т. 1. М., изд-во «Наука», 1965.
- 27 Д. Л. Иваненко. Основные идеи общей теории относительности.—В сб. «Очерки развития основных физических идей». М., Изд-во АН СССР, 1959, стр. 303.
- 28 А. Эйнштейн. Собрание научных трудов, т. 2. М., Изд-во «Наука», 1966, стр. 99.
- 29 Э. Мах. Механика. СПб., 1909, стр. 191.
- 30 В. J. Friedlander. 1896. **Absolute und relative Bewegung.**
- 31 Г. Хенль. К истории принципа Маха. См. Эйнштейновский сборник 1968 г. (в печати).
- 32 J. Lense, H. Thirring.—*Phys. Z.*, 1918, **19**, 156—163.
- 33 С. Вранс.—*Phys. Rev.*, 1962, **125**, 2194.
- 34 Р. Дикке. Многоликий Мах.—В сб. «Гравитация и относительность». М., изд-во «Мир», 1965, стр. 223—224.
- 35 А. Эйнштейн. Физика и реальность. Сборник статей. М., изд-во «Наука», 1965, стр. 141—142.
- 36 Дж. Уиллер. Принцип Маха как граничное условие для уравнений Эйнштейна.—В сб. «Гравитация и относительность». М., изд-во «Мир», 1965.
- 37 G. Cossoni, E. Salpeter. *A research for anisotropy.*—*Nuovo cimento*, 1958, **10**, N 4, 646—651.
- 38 В. Л. Гинзбург. Экспериментальная проверка общей теории относительности.—Сб. «Эйнштейн и развитие физико-математической мысли». М., 1962, стр. 130.
- 39 V. Beltran-Lopez, H. G. Robinson. *Microwave Zeeman spectrum of atomic chlorine.*—*Phys. Rev.*, 1961, **123**, N 1, 161—166.

40. J. M. S. Harvey, R. A. Kasper, K. R. Lea. Paramagnetic resonance absorption in bromine and chlorine.—*Proc. Phys.*, 1960, **76**, N 6, 979—984.
41. P. Kusch, V. W. Hughes. *Handbuch der Physik*, Bd. 37, T. 1. Berlin, 1959.
42. H. E. Radford, V. W. Hughes. Microwave Zeeman spectrum of atomic hydrogen.—*Phys. Rev.*, 1959, **114**, N 5, 1274—1279.
43. L. Essen, J. V. L. Parry, J. McSteele. Frequency variations of quartz oscillators and the earth's rotation in terms of the N. P. L. caesium standard.—*Proc. IEE*, 1960, **107**, N 33, 229—232.
44. G. Cocconi, E. Salpeter. Upper limit for the anisotropy of inertia from the Mössbauer effect.—*Phys. Rev. Lett.*, 1960, **4**, N 4, 176—177.
45. C. W. Sherwin, H. Franenfelder, E. L. Garvin, E. Lusker, S. Margulis, R. N. Peacock. Leach for the anisotropy of inertia using the Mössbauer effect.—*Phys. Rev. Lett.*, 1960.
46. V. W. Hughes, H. G. Robinson, V. Beltran-Lopez. Upper limit for the anisotropy of inertial mass from nuclear resonance experiments.—*Phys. Rev. Lett.*, 1960, **4**, N 7, 342—344; *Bull. Amer. Phys. Soc.*, 1961, **6**, 424.
47. R. W. A. Drewler. Search for anisotropy of inertial mass using a free precession technique.—*Philos. Mag.*, 1961, **6**, N 6, 683—687.
48. Дж. Вебер. Общая теория относительности и гравитационные волны. М., 1962, стр. 197.
49. R. H. Dicke. Experimental test of Mach's principle.—*Phys. Rev. Lett.*, 1961, **7**, N 9, 359—360.
50. S. T. Epstein. On the anisotropy of inertia.—*Nuovo cimento*, 1960, **16**, N 3, 587—588.
51. П. Ланжевэн. Избранные труды. Изд-во АН СССР, 1960, стр. 451—475.
52. J. Becquerel. Débats sur la relativité.—*Bull. sci. étudiants. Paris*, mars 1922, N 1, 18—29.
53. H. Bergson. Durée et simultanéité. A propos de la théorie de Einstein. Paris, 1^{re} éd., 1922.
54. Ch. Nordmann. Einstein expose et discute la théorie.—*Rev. deux mondes*, 1922, **9**, 129—166.
55. A. Metz. La temps d'Einstein et la philosophie.—*Rev. philos.*, janv.-fevr. 1924, 56—88.
56. E. Le Roy. Les paradoxes de la relativité sur le temps.—*Rev. philos.*, janv.-fevr., 1937, **123**, 10—47.; avril, 195—245.
57. Moeller. On homogeneous gravitational field in the general theory of relativity and the clock paradox.—*Kgl. danske vid. selskab. Mat. fys. medd.*, 1943, **20**, N 19, 3—25.
58. G. Thomson. The foreseeable future. Cambridge, 1955, p. 89.
59. H. Dingle, W. M. McCrea. Relativity and space travel.—*Nature*, 1956, **177**, N 4513, 782—785.
60. G. Builder. The resolution of the clock paradox.—*Austral. J. Phys.*, 1957, **10**, N 2, 246—262.
61. H. Dingle. The resolution of the clock paradox.—*Austral. J. Phys.*, 1957, **10**, N 3, 418—423.
62. G. Builder. The clock-retardation problems.—*Austral. J. Phys.* 1957, **10**, 424—428.
63. R. M. Frey, V. M. Brigham. Paradox of the twins.—*Amer. J. Phys.*, 1957, **25**, N 8, 553—555.
64. E. M. McMillan. The «clock-paradox» and space travel.—*Science*, **126**, N 3270, 381—384.
65. F. S. Crawford. Experimental verification of the clock-paradox of relativity.—*Nature*, 1957, **179**, N 4549, 35—36.
66. Rossi, Hilberry, Hoag.—*Phys. Rev.*, 1940, **57**, 461.
67. Blackett P. M.—*Proc. Roy. Soc.*, 1937, **A159**, 1.
68. Rasetti F.—*Phys. Rev.*, 1941, **60**, 198.
69. S. Singer. Relativity and space travel.—*Nature*, 1957, **179**, N 4567, 977.
70. W. Cochran. A suggested experiment on the clock paradox.—*Nature*, 1957, **179**, N 4567, 977—978.

71. W. Cochran. A suggested experiment on the clock paradox.—Proc. Cambridge Philos. Soc., 1957, 53, N 3, 646—650.
72. R. H. Romer. Twin paradox in special relativity.—Amer. J. Phys., 1959, 27, N 3, 131—135.
73. Д. В. Скобельцын. Парадокс близнецов в теории относительности. М., изд-во «Наука», 1966, стр. 47.
74. C. B. Leffert, T. M. Donahue. Clock paradox and the physics of discontinuous gravitational fields.—Amer. J. Phys., 1958, 26, N 8, 515—523.
75. W. F. Campbell. The clock paradox.—Canad. Aeronaut. J., 1958, 4, N 9, 316—319.
76. A. Schild. The clock paradox in relativity theory.—Amer. Math. Monthly, 1959, 66, N 1, 1—8.
77. Г. А. Чеботарев. Аналитические и численные методы небесной механики. М.—Л., изд-во «Наука», 1965, стр. 85.
78. У. М. Смарт. Небесная механика. Пер. с англ. М., изд-во «Мир», 1965, стр. 319.
79. J. Tharrats. Relativity advances of the perigee of artificial earth satellites.—X-th Internat. Astronaut. Congr. London, 1959, Wien, 1960, 2, 722—777; PMA, 1961, 2A, 551.
80. J. J. Gilvarry. Relativity advances of the perihelia of minor planets.—Publs. Astron. Soc. Pacif., 1953, 65, N 385, 173—178; Phys. Rev., 1953, 89, 1046; PMA, 1954, 2, 8388; D. Hofflit. Icarus and relativity.—Sky and Telescope, 1953, 12, N 9, 237.
81. В. Л. Гинзбург. Экспериментальная проверка общей теории относительности.—УФН, 1956, 59, вып. 1.
82. С. И. Вавилов. Экспериментальные основания теории относительности, 1928. Собрание соч., т. IV, М., Изд-во АН СССР, 1956, стр. 84.
83. F. Dyson, R. Wooley. Eclipses of the Sun and Moon. Oxford, 1937.
84. А. А. Михайлов. О наблюдении эффекта Эйнштейна.—Астроном. журнал, 1956, 33, № 6, стр. 914.
85. M. Subotowicz. Test of the general theory of relativity.—Nature, 1962, 196, N 4855, 628—630; РЖФ, 1963, 7Б79.
86. В. Л. Гинзбург. Использование искусственных спутников Земли для проверки общей теории относительности.—УФН, 1957, 63, № 1, 119—122.
87. Эффект Мессбауера. Сборник, М., 1962.
88. B. D. Josephson. Temperature-dependent shift of Y-rays emitted by a solid.—Phys. Rev. Lett., 1960, 4, N 7, 341.
89. Р. В. Паунд. О весе фотонов.—УФН, 1960, 72, № 4, 673—683.
90. T. E. Cranshaw, J. P. Schiffer.—Proc. Phys. Soc., 1964, 84, N 2, 245—256.
91. В. Л. Гинзбург—УФН, 1963, 81, № 4, 739—743.
92. Хей и др. В сб. «Эффект Мессбауера», М., 1962, стр. 415—417.
93. H. J. Naу. Mössbauer effect. N. Y., 1962, p. 225—228.
94. В. Паули. Теория относительности. М.—Л., ОГИЗ, 1947.
95. Дж. Андерсон. Принципы относительности и роль координат в физике.—В сб. «Гравитация и относительность». М., Изд-во «Мир», 1965, стр. 309.
96. В. А. Фок. О движении конечных масс в общей теории относительности.—ЖЭТФ, 1939, 9, вып. 4.
97. В. А. Фок. Система Коперника и система Птолемея в свете общей теории относительности.—В сб. «Николай Коперник». Изд-во АН СССР, 1947.
98. В. А. Фок. Уравнения движения системы тяжелых масс с учетом их внутренней структуры и вращения.—УФН, 1956, 59, № 1, 67—69.
99. Ф. И. Франкль. Некоторые принципиальные замечания к общей теории относительности.—УМН, 1954, 9, вып. 4.
100. В. А. Фок. О работе Ф. И. Франкля «Некоторые принципиальные замечания к общей теории относительности».—УМН, 1954, 9, вып. 4.
101. В. А. Фок. Современная теория пространства и времени.—Природа, 1953, № 12.

102. М. Ф. Широков. Общая теория относительности или теория тяготения.— ЖЭТФ, 1956, **30**, № 1, стр. 182.
103. Вопросы философии, 1966, № 8, стр. 15—22.
104. Х. Цзю, В. Гоффман. В сб. «Гравитация и относительность». М., Изд-во «Мир», 1965, стр. 19.
105. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Теория поля. М., Физматгиз, 1960, стр. 323.
106. Trautman. On the conservation theorems and co-ordinate systems in general relativity.— Bull. Acad. polon. sci., 1957, **5**, № 7, 721—727 (Англ., рез. русск.). Сl. III, РЖ Физика, 1958, № 11, 24424.
107. J. N. Goldberg. Conservation laws in general relativity.— Phys. Rev., 1958, **111**, № 1, 315—320.
108. N. Mizkijewitsch. Zu den Iwarianzeigenschaften der Lagrange-Funktionen der Felder.— Ann. Physik, 1958, **1**, № 6—8, 319—333.
109. P. G. Bergmann. Conservation laws in general relativity as the generators of coordinate transformations.— Phys. Rev., 1958, **112**, № 1, 287—289.
110. А. Комар. Covariant conservation laws in general relativity.— Phys. Rev., 1959, № 3, 934—936.
111. Д. Д. Иваненко, Н. В. Мицкевич. Об учете гравитационной энергии.— ЖЭТФ, 1959, **37**, № 3, 868—869.
112. В. А. Фок. Теория пространства, времени и тяготения. М., Физматгиз, 1961, стр. 444.
113. C. Møller. Further remarks on the localization of the energy in the general theory of relativity.— Ann. Phys. (USA), 1961, **12**, № 1, 118—133.
114. М. Ф. Широков. Об энергии и импульсе гравитационного поля.— В сб. «Проблемы гравитации». Тбилиси, 1965, стр. 18.
115. C. Pallegriani. The total energy-momentum vector of a closed system in general relativity.— Nuovo cimento, 1961, **22**, № 2, 427—428.
116. D. C. Champeney, P. В. Моон. Absence of Doppler shift for gamma-rays source and detector on circular orbit.— Proc. Phys. Soc., 1961, **77**, № 2, 350—352. Пер. в сб. «Эффект Мессбауера». М., 1962, стр. 436—440.
117. Н. Е. Бөmmel. Measurement of the frequency shift of gamma rays in accelerated systems using the Mössbauer effect.— «Mössbauer effect». N. Y., 1962, p. 229—232.
118. W. Kündig. Measurement of the transverse Doppler-effect in an accelerated system.— Phys. Rev., 1963, **129**, № 6, 2371—2375.
119. R. V. Pound, G. Rebka. В сб. «Эффект Мессбауера», М., 1962, стр. 305—309.
120. B. D. Josephson. В сб. «Эффект Мессбауера», М., 1962, стр. 310—312.
121. A. J. Boyle, D. S. Bunbury, C. Edwards, H. E. Hall. A thermal red shift of the recoilless-emission of Sn 119m.— Proc. Phys. Soc., 1960, **76**, N 487, 165—166.
122. Ю. К. Коган. К теории температурного красного смещения и уширения линии Мессбауера.— ЖЭТФ, 1964, **47**, № 1, 366—377.
123. C. W. Sherwin. Some recent experimental tests of the «clock paradox».— Phys. Rev., 1960, **120**, N 1, 17—21. Пер. В сб. «Эффект Мессбауера». М., 1962, стр. 423—435.
124. C. Møller. New experimental tests of the special principle of relativity.— Proc. Roy. Soc., 1962, **A270**, N 1342, 306—314.
125. Proc. IRE, 1962, **50**, N 9, 1967.
126. C. D. Cristescu, Giurgea M. Lasers and ether drift.— Phys. Lett., 1963, **5**, N 2, 128.
127. R. Gerhartz. Detection of the transverse Doppler-effect with laser light.— Proc. IEEE, 1964, **62**, N 2, 818.
128. A. Szöke. New ether drift experiment using lasers.— Phys. Lett., 1965, **18**, N 3, 267—268.
129. A. Metz. Une projet d'experience pour la verification de la theorie de la relativite.— CR, 1966, **AB262**, N 1, A 104—105.

130. D. Censor. Comment on the paper: «Detection of the transverse Doppler-effect with laser light» by R. Gerhartz.—Proc. IEEE, 1964, **52**, N 8, 897.
131. J. Shamis. Comment on: «Lasers and ether drift» by Cristescu G. D.—Phys. Lett., 1965, **18**, N 3, 272—278.
132. Phys. Lett., 1963, **5**, N 2, 128; Proc. IEEE, 1964, **62**, N 2, 818; Phys. Lett., 1965, **18**, N 3, 267—268; С. г., 1966, **AB262**, N 1, 104—105.
133. D. J. Grove, J. C. Fox.—Phys. Rev., 1953, **90**, 378.
134. W. M. Diamond, E. R. Cohen. Least-squares adjustment of the atomic constants, 1952.—Rev. Mod. Phys., 1953, **25**, N 3, 691—713.
135. В. П. Зрелов, А. А. Тяпкин, П. С. Фараго. Измерение массы протонов при энергии 660 Мэв.—ЖЭТФ, 1958, **34**, вып. 3, 555—558.
136. V. Meyer, W. Reichart, H. H. Stub, H. Winkler, F. Zamboni, Zych W. Experimentelle Untersuchung des Massen-Impulsrelation des Elektrons.—Helv. phys. acta, 1963, **36**, N 7, 981—982.
137. Е. Л. Фейнберг. Распад мезонов.—В сб. «Мезон», под ред. И. Е. Тамма М.—Л., 1947, стр. 80—113.
138. W. G. V. Rosser. Velocity of light by a moving source.—Nature, 1961, **190**, N 4772, 294.
139. E. Martinelli. W. K. H. Panofsky. The possibility of using accelerated-produced mesons to verify the «clock-paradox» prediction.—Phys. Rev., 1950, **77**, 467.
140. F. S. Crawford. Experimental verification of the «clock-paradox» of relativity.—Nature, 1957, **179**, N 4549, 35—36.
141. W. Cochran. A suggested experiment of the «clock-paradox».—Nature, 1957, **179**, N 4567, 977—978.
142. J. H. Fremlin. An alternative deduction from the Michelson-Morley experiment.—Proc. Phys. Soc., 1962, **80**, N 6, 1384—1385.
143. W. Kantor. Direct first order experiment on the propagation of light from the moving source.—JOSA, 1962, **52**, N 9, 978.
144. У. И. Франкфурт, А. М. Френк. Очерки развития оптики движущихся тел.—Труды ин-та естествознания и техники АН СССР, т. 43, История физико-математических наук, вып. 10. М., 1961, стр. 3—49.
145. R. S. Shankland, S. W. McCuskey, F. C. Leone, G. Kurti. New analysis of the interferometer observation of Dayton C. Miller.—Rev. Mod. Phys., 1955, **7**, N 2, 167—178.
146. J. Palacios. Optica de les cuerpes en movimiento. Comentarios al experimento de Kantor.—Rev. Real. acad. cienc. exact., fis. y natur., 1963, **57**, N 2, 237—291.
147. E. Herrera. La vitesse de la lumiere par rapport aux corps en mouvement.—Génié civil, 1963, **140**, N 12, 262—264.
148. P. Beckmann. The velocity of electromagnetic radiation in the light of Kantor's experiment.—Prace ustavu radiotechn. a elektron., 1963, N 28, 27.
149. P. Beckmann. A reexamination of the experiments on the velocity of light with moving sources.—Prace ustavu radiotechn. a elektron, 1963, N 30, 27.
150. D. Burcev. On Kantor's experiment.—Phys. Lett., 1962, **5**, N 1, 44; Z. L. Budrikis. On Burcev's explanation of Kantor's experiment.—Phys. Lett., 1963, **6**, N 3, 258—259.
151. D. R. White, R. A. Alpher. Comments on an experiment concerning Einstein's light velocity.—JOSA, 1963, **53**, N 6, 760.
152. A. Bierman, C. H. Kenschitsky, D. Pandres. Remark on the paper «Direct first order experiment on the propagation of light from a moving source» by Kantor.—JOSA, 1963, **53**, N 8, 1008.
153. V. Vysin. The possibility of an interpretation of Kantor's direct first order experiment on the propagation of light from a moving source.—Phys. Lett, 1964, **8**, N 1, 36—37.

154. J. M. Mrásek. Kantorova pokusu s teorii relativ.— Slaboproudý obzor, 1964, **25**, 166—167.
155. J. F. James, R. S. Sternberg. Change in velocity of light emitted by a moving source.— Nature, 1963, **197**, N 4873, 1192.
156. F. Rotz. New test of the velocity of light postulate.— Phys. Lett., 1963, **7**, N 4, 252—254.
157. R. O. Waddoups, W. F. Edwards, J. J. Merrill. Experimental investigation of the second postulate of special relativity.— JOSA, 1965, **55**, N 2, 142—143.
158. G. C. Babcock, T. G. Bergman. Determination of the constancy of the speed of light.— JOSA, 1964, **54**, N 2, 147—151.
- 158a. J. Zahajský, V. Kolesnikov. Optical Experiments to verify the second Postulate of the Special Theory of Relativity.— Nature, 1966, **212**, N 5067, 1227.
159. W. R. Haseltine. Seconde postulate of special relativity.— Amer. J. Sci., 1964, **32**, N 2, 173.
160. А. М. Бонч-Бруевич. Экспериментальная проверка независимости скорости света от скорости движения источника излучения относительно наблюдателя.— ДАН, 1956, 109, № 3, 481—484; А. М. Бонч-Бруевич, В. А. Молчанов. Новый оптический релятивистский опыт.— Оптика и спектр., 1956, **1**, № 2, 113—124; А. М. Бонч-Бруевич. К вопросу об обработке результатов прямого опыта по проверке независимости скорости света от скорости источника излучения.— Оптика и спектр., 1957, **2**, № 1, 141—142; А. М. Бонч-Бруевич. О прямом экспериментальном подтверждении второго постулата специальной теории относительности.— Оптика и спектр., 1960, **9**, № 1, 134.
161. А. Г. Баранов. Метод экспериментальной проверки независимости скорости света от скорости источника.— ЖЭТФ, 1961, **40**, № 3, 860—862.
- 161a. R. J. Dickens, S. R. C. Malin. A Test of the Ritz Theory of Light Propagation.— The Observatory, 1965, **85**, N 949, 260—262.
- 161b. W. Bertozzi. Speed and Kinetic Energy of Relativistic Electrons.— Amer. J. Phys., 1964, **32**, N 7, 551—555.
162. N. Engel. Vorschlag für einen verbesserten Michelson — Versuch.— Radex Rundschau, 1958, **5**, 212—223.
163. H. Dingle. A possible experimental test of Einstein's second postulate.— Nature, 1959, **183**, N 4677, 1761.
164. P. Rapiert. A proposed test for the existence of a Lorentzinvariant aether.— Proc. IRE, 1962, **50**, N 2, 229—230.
165. A. C. Schroeder. The measurement of the velocity of light.— Proc. IRE, 1962, **50**, N 10, 2112—2113.
166. E. F. Florman. Proposed use of earth satellite signals to measure propagation velocity of electromagnetic waves.— Appl. Phys. Lett., 1963, **3**, N 11, 193—195.
167. L. Schiff. A report on the NASA conference on experimental tests of the theory of relativity.— Phys. Today, 1961, **14**, N 11, 42, 44, 46, 48.
168. Nature of Matter. Purposes of High Energy Physics. Brookhaven Nat. Lab., 1965. Перевод всего сборника см. УФН, 1965, **86**, вып. 4, 591—719.
169. Теория относительности и физика высоких энергий. Беседы по актуальным вопросам науки. Новое в науке, жизни, технике. Серия IX, № 12, 1966.
170. Д. И. Блохинцев. Обоснованность теории относительности опытами в области физики высоких энергий.— УФН, 1966, **89**, вып. 2, 185—199.