

PACS numbers: 01.65. + g, 03.30. + p, 41.60. – m
DOI: 10.3367/UFNr.0181.2011121.1345

Эксперименты по прямой демонстрации независимости скорости света от скорости движения источника

(демонстрация справедливости второго постулата специальной теории относительности Эйнштейна)

Е.Б. Александров, П.А. Александров,
В.С. Запаский, В.Н. Корчуганов, А.И. Стирин

*Посвящается памяти С.И. Вавилова
и его докторанта А.М. Бонч-Бруевича*

1. Введение

Специальная теория относительности (СТО) — несомненно, самая знаменитая из физических теорий. Популярность СТО связана с простотой её основных принципов, поражающей воображение парадоксальностью выводов и её ключевым положением в физике XX века. СТО принесла небывалую славу Эйнштейну, и эта слава стала одной из причин неустанных попыток ревизии теории. В среде профессионалов споры вокруг СТО прекратились уже более полувека назад. Прочитав из Википедии: "вся совокупность экспериментальных данных в физике высоких энергий, ядерной физике, спектроскопии, астрофизике, электродинамике и других областях физики согласуется с теорией относительности в пределах точности эксперимента. Например, в квантовой электродинамике (объединение СТО, квантовой теории и уравнений Максвелла) значение аномального магнитного момента электрона совпадает с теоретическим предсказанием с точностью 10^{-9} ".

Но по сей день редколлегия физических журналов постоянно осаждают любителями, предлагающими варианты пересмотра СТО [1] (см. также [2]). Несмотря на существование бесчисленных свидетельств справедливости выводов СТО, не прекращаются попытки её опровержения или существенного пересмотра, которые мотивируются недостаточной убедительностью экспериментальных подтверждений её основ, в частности второго постулата, утверждающего постоянство скорости света для всех инерциальных систем отсчёта и её независимость от скорости источника. При этом чаще всего критике подвергаются ранние эксперименты по поиску "эфирного ветра" [3], которые традиционно рассматриваются как едва ли не единственное опытное доказательство справедливости СТО. Не проникая в серьёзную научную литературу, попытки пересмотра СТО переполняют средства массовой информации и Интернет, что не может не дезориентировать массового читателя, вклю-

чая школьников и студентов. Ситуация обострилась в годы празднования 100-летнего юбилея теории относительности (100 лет от даты публикации в 2005 г. исторической работы Эйнштейна [4], считающейся днём рождения СТО)¹. Вместе с тем недоверие в отношении СТО (со стороны не обременённого знаниями общественного мнения) существовало и 60 лет назад, когда С.И. Вавилов поручил своему докторанту А.М. Бонч-Бруевичу осуществить эксперимент по прямой проверке второго постулата СТО [10].

Постоянные нападки на СТО мотивируются разночтениями в оценке и трактовке результатов первых релятивистских экспериментов типа опытов Физо и Майкельсона. Например, один из последователей Майкельсона — Миллер [11] — до конца своих дней настаивал, что в этих опытах наблюдался некоторый сезонно-зависимый систематический эффект, который им трактовался как частичное увлечение "светоносного эфира" Землёй при её движении по орбите. После окончательного утверждения справедливости СТО эти эксперименты уже редко воспроизводились, при том что точность наблюдений такого рода долгое время оставалась довольно низкой.

Мало кто знает, что своё первое знаменитое отрицание существования "эфирного ветра" Майкельсон сделал [12] в 1881 г. на основании весьма шатких наблюдений: достигнутая точность измерений лишь немного превышала величину эффекта, ожидаемого на основе гипотезы о "неподвижном светоносном эфире". (Неудивительно, что Эйнштейн откровенно отказывался от этого опыта как экспериментального факта, вдохновившего его на создание СТО.) В дальнейших экспериментах были получены существенно более определённые результаты, однако обычно всё же наблюдалась некая систематическая составляющая скорости "эфирного ветра" — порядка 10% от скорости V орбитального движения Земли вокруг Солнца. Лишь к концу 20-х годов прошлого века удалось достичь достаточно определённого отрицательного результата — верхняя оценка скорости эфирного ветра была снижена до $\sim 3\%$ от V [3]. Дальнейшее уточнение этих результатов вскоре стало малоактуальным ввиду множества совершенно неоспоримых свидетельств справедливости СТО, накопленных по мере развития ядерной физики с её инструментарием ускорителей, само инженерное воплощение которых было бы невозможным без использования теории относительности. Это знание, однако, оставалось уделом профессионалов, в то время как популярные изложения СТО по-прежнему апеллировали к исторической традиции подтверждения теории лишь экспериментами Майкельсона. Именно этот разрыв понимания меры обоснованности СТО между профессионалами и широкой публикой подвиг президента Академии наук СССР С.И. Вави-

Е.Б. Александров. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, РФ
E-mail: ealexandrov@bk.ru

П.А. Александров, В.Н. Корчуганов, А.И. Стирин. Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, РФ
В.С. Запаский. Санкт-Петербургский государственный университет, С.-Петербург, РФ

¹ Из несметного множества критических выступлений ограничимся лишь двумя случайными ссылками — на обзорную статью Н. Носкова, разоблачающую "столетний релятивистский обман" [5] и на недавнее выступление Соколовых [6], возрождающих старинную "баллистическую" гипотезу Ритца [7]. Юбилей СТО своеобразно отметил Санкт-Петербургский политехнический университет, переиздавший в 2009 г. претенциозную монографию *Мифы теории относительности* [8] А.А. Денисова, чьи экстравагантные построения 20 лет назад были опровергнуты преподавателями этого же университета [9].

лова в середине прошлого века наметить проект демонстрации независимости скорости света от скорости источника в эксперименте "первого порядка": Вавилов планировал прямое измерение скорости света, испущенного быстро движущимся источником, в отличие от косвенных измерений в опыте Майкельсона, в котором ожидаемый эффект пропорционален квадрату отношения v/c скорости источника v к скорости света c .

К этому времени постулат о независимости скорости света прямо подтверждался только астрономическими наблюдениями двойных звёзд. По идее де Ситтера [13], в случае зависимости скорости света от скорости источника траектории движения двойных звёзд должны были бы качественно отличаться от наблюдаемых (согласующихся с небесной механикой). Однако этот аргумент де Ситтера встретил возражение (воспроизведённое в [6]), связанное с учётом роли межзвёздного газа, который в качестве преломляющей среды рассматривался как вторичный источник света. С этой точки зрения, свет, испущенный движущимся источником, теряет "память" о скорости первичного источника по мере распространения в межзвёздной среде. Поскольку данные об этой среде известны лишь с очень большими допущениями (как и абсолютные значения расстояний до звёзд), такая позиция позволяет подвергнуть сомнению большинство астрономических доказательств постоянства скорости света. (В частности, под такую же критику попала намного более поздняя работа [14], в которой в качестве радикального доказательства справедливости второго постулата выдвигался сам факт существования переменных звёзд: в случае линейной зависимости скорости света от скорости источника свет звезды переменной яркости с увеличением расстояния должен утрачивать модуляцию из-за теплового разброса лучевых скоростей элементарных излучателей, так что такие звёзды были бы просто неизвестны.)

С.И. Вавилов предложил своему докторанту А.М. Бонч-Бруевичу спроектировать установку, в которой источником света являлся бы пучок быстрых возбуждённых атомов. В процессе детальной проработки плана эксперимента оказалось, что нет шансов получить надёжный результат, поскольку при технике тех дней нельзя было рассчитывать на получение пучков с нужной скоростью и плотностью: ожидаемая в рамках баллистической гипотезы добавка к скорости света оказывалась на уровне нескольких процентов, а интенсивность излучения пучка оценивалась как слишком низкая. Опыт не был осуществлён. После безвременной смерти С.И. Вавилова в 1951 г. план эксперимента был пересмотрен по инициативе Г.С. Ландсберга, который предложил сравнивать скорости света, испускаемого двумя экваториальными краями вращающегося Солнца. А.М. Бонч-Бруевич полвека спустя писал [10]: "Это предложение лишало опыт его первоначальной красоты, но, по-видимому, было единственной возможностью довести его, хотя бы и в сильно деформированном виде, до конца". И действительно, результат этого опыта не мог рассматриваться как доказательство независимости скорости света от скорости источника, потому что свет Солнца перед измерением пропускаться через стеклянный объектив телескопа, что, по логике концепции переизлучения света преломляющей средой, приводило к уравновешиванию скоростей двух пучков света (не говоря уже о влиянии земной атмосферы).

С тех пор неоднократно предпринимались различные попытки экспериментального доказательства второго постулата СТО (см., например, монографии [15, 16] и недавние обстоятельные обзоры Г.Б. Малькина [17, 18]). Все авторы соответствующих работ приходили к выводу о справедливости постулата. Но это не прекращало критических выступлений, в которых выдвигались возражения против идей экспериментов или ставилась под сомнение их точность. Последнее связано, как правило, с малой достижимой скоростью движения источника излучения по сравнению со скоростью света. Возобновлением интереса к баллистической гипотезе был отмечен 1962 г., в котором были опубликованы результаты эксперимента В. Кантора, якобы обнаружившего изменение скорости света, прошедшего через движущуюся стеклянную пластинку [19]. Работа Кантора вызвала широкую дискуссию, но вскоре её результаты были оспорены на основе контрольных экспериментов. Тем не менее баллистическая гипотеза остаётся популярной среди критиков СТО. В 1980 г. Президиум Академии наук Украины поддержал постановку масштабных экспериментов М.И. Дуплищева по проверке гипотезы Ритца. Дуплищев, развивая концепцию Кантора, измерял скорость света, пропущенного через быстро движущуюся преломляющую среду, которая рассматривалась в качестве вторичного источника света. Автор пришёл к выводу о справедливости идеи сложения скорости света со скоростью источника, в согласии с "корпускулярной (баллистической) теорией Ньютона – Ритца", однако не добился публикации своих результатов в уважаемых журналах. В 2008 г. отчёт об этих экспериментах [20] его дочь издала на коммерческой основе.

Представляется, что пришло время вернуться к предложению С.И. Вавилова. Теперь его можно реализовать "в первоначальной красоте", потому что сегодня физика имеет в руках чрезвычайно яркий ультрарелятивистский источник. Это синхротронный излучатель, в котором источником света служит ступок электронов, движущийся по искривлённой траектории со скоростью, очень близкой к скорости света. В этих условиях легко измерить скорость испущенного света в безукоризненном лабораторном вакууме. По логике баллистической гипотезы эта скорость должна быть равна удвоенной скорости света от неподвижного источника! Это весьма грубый эффект, обнаружение которого (в случае его существования) не потребовало бы специальных ухищрений. Действительно, достаточно просто измерить время прохождения световым импульсом мерного отрезка в вакуумированном пространстве.

Откладывая пока обсуждение деталей и конкретных вариантов эксперимента, имеет смысл суммировать аргументы в пользу целесообразности самой постановки такого опыта. Разумеется, для профессиональных физиков нет никаких сомнений в ожидаемом результате. В этом смысле опыт бесполезен. Однако прямая демонстрация постоянства скорости света имеет большую дидактическую ценность, ограничивая почву для дальнейших спекуляций о недоказанности основ теории относительности. Физика в своём развитии постоянно возвращалась к воспроизведению и уточнению основополагающих экспериментов, осуществляемых с привлечением новых технических возможностей. В данном случае не ставится цель уточнить скорость света. Речь идёт о восполнении исторической недоработки в эксперимен-

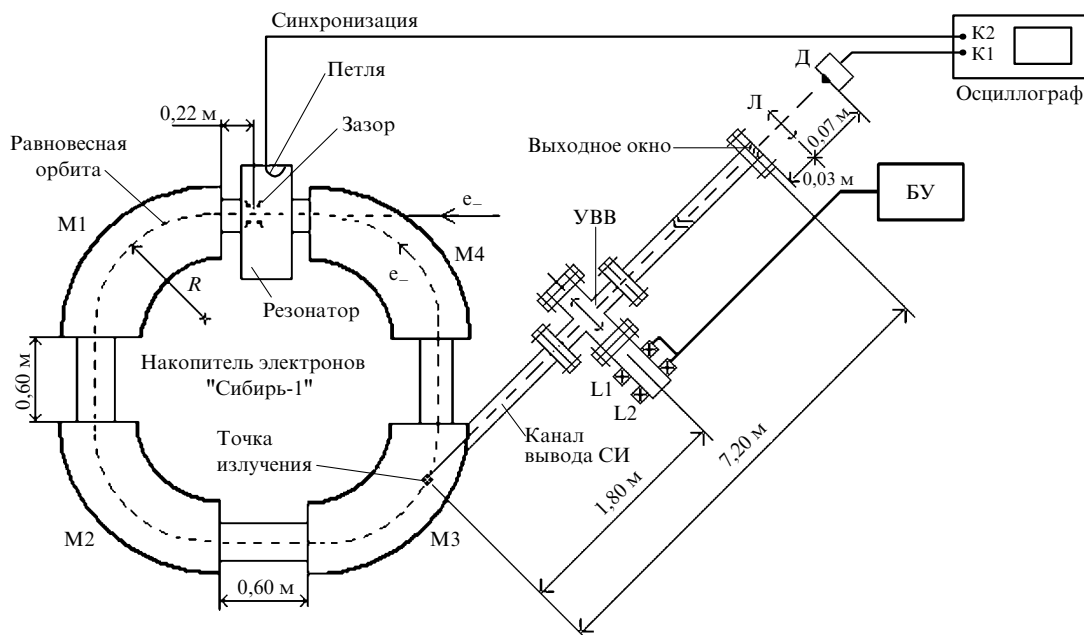


Рис. 1. Схема эксперимента. M1–M4 — поворотные магниты; УВВ — устройство ввода-вывода стеклянной пластинки; Л — собирающая линза; Д — детектор излучения; БУ — блок управления для УВВ; L1, L2 — катушки индуктивности.

тальном обосновании истоков СТО, что должно облегчить восприятие этой достаточно парадоксальной теории. Можно сказать, что речь идёт о демонстрационном опыте для будущих учебников физики.

2. Описание установки и схема эксперимента

В экспериментах в качестве импульсного источника света использовался источник синхротронного излучения (СИ) — накопитель электронов "Сибирь-1" в Курчатовском центре синхротронного излучения и нанотехнологий (КЦСИиНТ) Национального исследовательского центра "Курчатовский институт" (НИЦ КИ) [21]. Вид в плане накопителя "Сибирь-1" со схемой вывода СИ и эксперимента показан на рис. 1.

Магнитная система электронного накопителя "Сибирь-1", формирующая замкнутую орбиту электронов, состоит из четырёх поворотных 90-градусных магнитов (M1–M4), разделённых четырьмя прямолинейными промежутками длиной по 60 см. Индукция магнитного поля на равновесной орбите 1,5 Тл. Радиус равновесной орбиты электронов в поворотных магнитах $R = 1$ м. Номинальная энергия электронов в накопителе 450 МэВ. Синхротронное излучение, создаваемое релятивистскими электронами в поворотных магнитах, имеет широкий спектр — от инфракрасного и видимого диапазонов до рентгеновского диапазона с характеристической длиной волны 61,3 Å. СИ приводит к потерям энергии в 3,69 кэВ на оборот каждым электроном.

В промежутке 1 накопителя "Сибирь-1" находится высокочастотный резонатор, электрическое поле которого компенсирует радиационные потери электронного пучка на каждом обороте. Высокочастотная (ВЧ) мощность, подводимая к резонатору от ВЧ-генератора, создаёт на ускоряющем зазоре резонатора напряжение с амплитудой 15 кВ и частотой 34,53 МГц, равной частоте обращения электронного сгустка в накопителе. При этом распределение продольной плотности электронов в сгустке является гауссовым со стандартной полушириной 0,3 м.

Ось канала вывода СИ, являясь касательной к равновесной орбите в магните M3, проходит под углом 30° к оси прямолинейного промежутка 4, следующего за магнитом M3. То есть точка излучения — начало отсчёта длины пути СИ вдоль оси канала — находится на расстоянии $\pi R/3$ от входного торца магнита M3. Длина канала от точки излучения до выходного сапфирового окна 7,2 м.

В канале СИ на расстоянии 1,8 м от точки излучения установлено устройство ввода-вывода стеклянной пластинки на пучок СИ. Конструктивно оно представляет собой вакуумный узел (рис. 2), внутри которого находится подвижная пластина с отверстием диафрагмы и стеклянной пластинкой толщиной около 1 мм. Пластина установлена на небольшие колеса, и она может перемещаться по направляющим перпендикулярно оси канала СИ, фиксируясь в двух крайних положениях: в одном положении пучок СИ перекрывается стеклянной пластинкой.

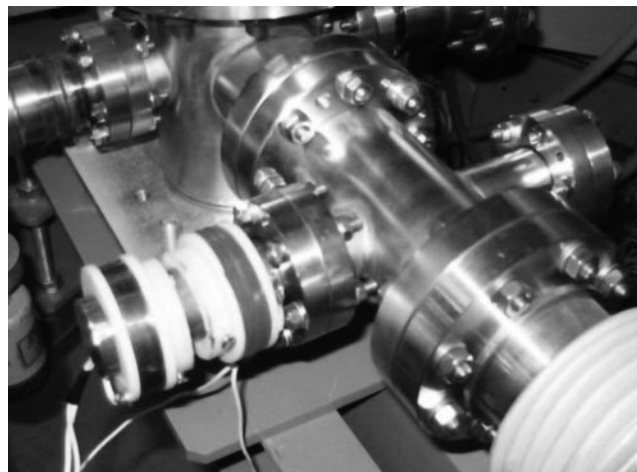


Рис. 2. Вакуумный узел устройства ввода-вывода стеклянной пластинки.

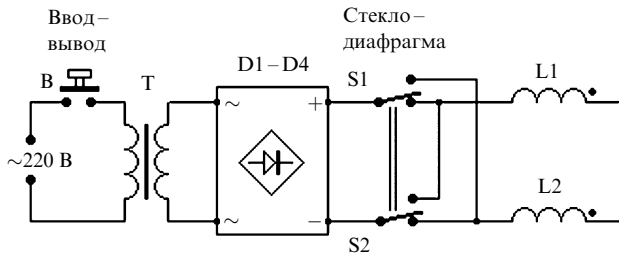


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема блока управления.

тинкой, а в другом — беспрепятственно проходит через диафрагму. На торце подвижной пластины закреплён постоянный магнит, а на трубу, внутри которой происходит перемещение, надеты две катушки индуктивности, включённые встречно. При подаче на катушки постоянного напряжения с той или иной полярностью от блока управления (рис. 3) за счёт втягивания постоянного магнита в максимум поля катушек пластина перемещается в том или ином направлении. Так осуществляется ввод стеклянной пластинки в зону пучка СИ или вывод её из этой зоны.

Эксперимент проводился по двум схемам. В эксперименте по первой схеме производилось сравнение времени распространения импульса СИ в вакууме на контрольном отрезке пути для двух случаев: 1) импульс СИ поступал на вход контрольного отрезка пути, проходя сквозь открытую диафрагму; 2) импульс СИ поступал на вход контрольного отрезка пути, проходя сквозь диафрагму, закрытую тонкой стеклянной пластинкой, прозрачной в спектральном диапазоне видимого света. В эксперименте по второй схеме осуществлялось прямое измерение скорости импульса СИ в вакууме: величина пути, пройденного светом, делилась на время прохождения этого пути.

Вакуумная труба канала оканчивается выходным фланцем с прозрачным для видимого света сапфировым окном, через которое видимая часть СИ выводится в воздух.

На расстоянии 3 см от выходного сапфирового окна (спектральный диапазон на пропускание $(0,17 - 5,5)$ мкм) толщиной 2,4 см установлена собирающая линза толщиной 1,4 см, фокусирующая изображение пучка СИ на чувствительной области детектора излучения, расположенной на расстоянии 7 см от линзы. В качестве детектора излучения используется кремниевый PIN-фотодиод "Hamamatsu S5972" (область спектральной чувствительности $(0,32 - 1)$ мкм, полоса частот 500 МГц, эффективная площадь чувствительной зоны $0,5 \text{ мм}^2$). Схема включения PIN-диода представлена на рис. 4.

При поступлении на вход PIN-диода светового импульса созданное фототоком в цепи диода напряжение на нагрузке в 50 Ом подаётся по радиочастотному кабелю на один из входов (50 Ом) двухканального осциллографа "Tektronix TDS3052C" (полоса частот 500 МГц). На другой вход (50 Ом) осциллографа подаётся непрерывный синусоидальный ВЧ-сигнал синхронизации с измерительной петли резонатора. Для исключения ошибки, связанной с фазовыми сдвигами сигналов, для транспортировки полезного сигнала с нагрузки PIN-диода и сигнала синхронизации используются кабели одного и того же типа (ПК-50) и одинаковой длины (8 м).

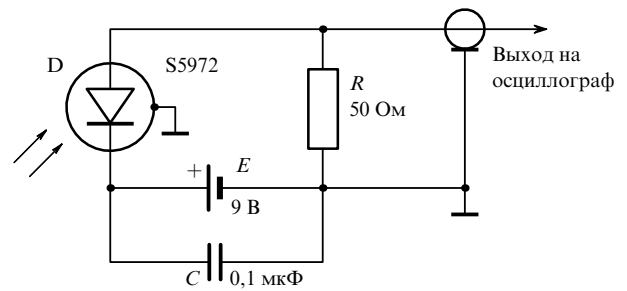


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема детектора излучения на PIN-диоде.

Таким образом, в идеальном случае наблюдатель увидит следующие друг за другом с частотой 34,53 МГц периодические импульсы СИ с зависимостью интенсивности от времени, близкой к гауссовой, со стандартной длительностью 1 нс, наложенные на синусоидальный сигнал с частотой 34,53 МГц.

3. Результаты эксперимента

Схема 1. На рисунках 5 и 6 представлены осциллограммы импульсов с PIN-диода и сигналов синхронизации с петли резонатора, полученные в результате эксперимента. Осциллограммы зарегистрированы при одном и том же токе электронного пучка в накопителе. Как видно, они идентичны с точки зрения фазовых соотношений между сигналами. То есть положение импульсов сигналов с PIN-диода сохранилось неизменным по отношению к сигналам синхронизации, вне зависимости от того, проходил ли свет беспрепятственно или через стеклянную пластинку.

Это означает, что скорость света, излучённого релятивистскими электронами в вакууме, равна скорости света, прошедшего в вакууме через стеклянную пластинку, т.е. не зависит от скорости источника, что опровергает баллистическую гипотезу В. Ритца.

Действительно, если бы скорость света, испущенного релятивистскими электронами в вакууме, равнялась $2c$, то путь в 7,2 м от точки излучения до выходного сапфирового окна свет прошёл бы за 12 нс.

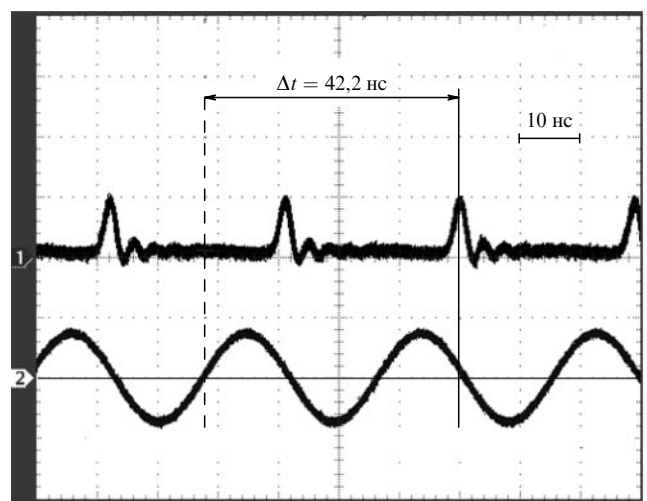


Рис. 5. Световой сигнал (канал 1) для случая прохождения света в вакууме на контрольном участке с открытой диафрагмой на входе и сигнал синхронизации (канал 2).

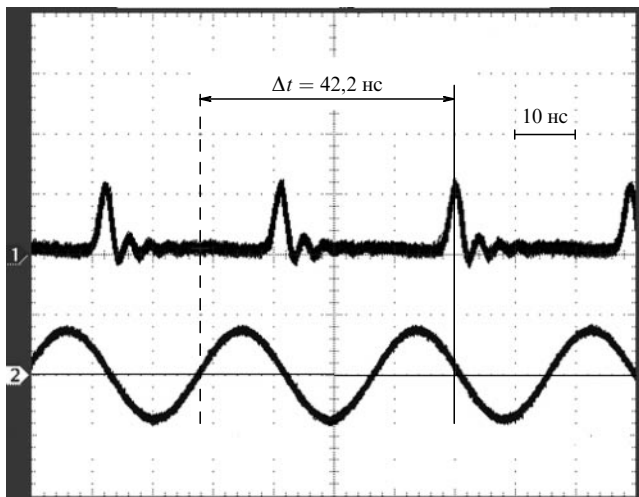


Рис. 6. Световой сигнал (канал 1) для случая прохождения света в вакууме на контрольном участке с диафрагмой на входе, закрытой стеклянной пластинкой, и сигнал синхронизации (канал 2).

С другой стороны, если на расстоянии 1,8 м от точки излучения на пути СИ поместить стеклянную пластинку, то эта пластинка становится источником вторичного излучения, распространяющегося вперёд со скоростью c . Тогда время прохождения светом расстояния в 7,2 м должно складываться из времени прохождения им пути от точки излучения до стеклянной пластинки (1,8 м) и времени прохождения им пути от стеклянной пластинки до выходного сапфирового окна (5,4 м). Следовательно, в сумме получили бы $3 \text{ нс} + 18 \text{ нс} = 21 \text{ нс}$.

Таким образом (если пренебречь малой задержкой света в стеклянной пластинке вследствие коэффициента преломления $n > 1$), на осциллограммах рис. 5 и 6 можно было бы зафиксировать фазовый сдвиг между оптическими сигналами, соответствующий разности моментов времени появления этих сигналов на входах,

$$21 \text{ нс} - 12 \text{ нс} = 9 \text{ нс}.$$

Отметим, что амплитуда светового сигнала на осциллограмме рис. 5 (диафрагма без стеклянной пластинки) немного меньше амплитуды светового сигнала на осциллограмме рис. 6 (диафрагма закрыта стеклянной пластинкой), что объясняется незначительным подрезанием пропускаемого светового потока по горизонтали боковой стенкой диафрагмы без стекла.

Схема 2. Теперь, опираясь на полученные в первой схеме эксперимента осциллограммы, можно оценить величину скорости света, излучаемого релятивистскими электронами в вакууме.

Длина l пути, пройденного световым импульсом от точки излучения до выходного сапфирового окна, равна 7,2 м. Для того чтобы вычислить скорость света, необходимо измерить время прохождения светом этого пути. Для этого нужно знать момент прохождения электронным сгустком точки излучения, находящейся на равновесной орбите накопителя внутри магнита МЗ (см. рис. 1). Используем напряжение с петли в высокочастотном резонаторе в качестве синхронизирующего сигнала. Эта петля в резонаторе ориентирована таким образом, что напряжение, снятое с неё, сдвинуто по фазе на 180° относительно напряжения на ускоряющем зазоре резонатора. Синхронные частицы проходят ускоряющий

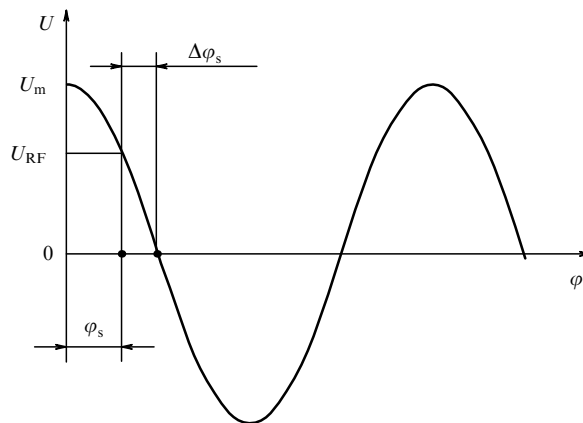


Рис. 7. Кривая изменения напряжения на резонаторе; φ_s — фаза синхронной частицы.

зазор в определённой фазе φ_s ускоряющего напряжения. Зная эту фазу и учитывая геометрию равновесной орбиты накопителя "Сибирь-1", можно рассчитать момент (фазу) прохождения электронным сгустком точки излучения.

На рисунке 7 показана кривая напряжения на ускоряющем зазоре резонатора. Условие устойчивости движения частиц в накопителях релятивистских электронов требует, чтобы электронный сгусток проходил зазор ВЧ-резонатора при уменьшающемся напряжении на нём. Другими словами, равновесная фаза φ_s соответствует спадающей ветви кривой высокочастотного напряжения резонатора.

Вычислить φ_s можно исходя из следующих соображений. При каждом пересечении зазора ВЧ-резонатора синхронная частица получает постоянное приращение энергии $\Delta W = 3,69 \text{ кэВ}$, которое компенсирует потери на СИ на одном обороте. В свою очередь

$$\Delta W = qU_{RF}, \tag{1}$$

где $q = 1$ — заряд электрона, U_{RF} — напряжение на зазоре резонатора в момент пролёта синхронной частицы. Известно, что

$$U_{RF} = TU_m \cos \varphi_s. \tag{2}$$

Здесь φ_s — фаза синхронной частицы, отсчитываемая от максимума напряжения, $T = 0,99$ — пролётный коэффициент, определяемый как результат усреднения ускоряющего ВЧ-напряжения в зазоре резонатора как по времени, так и по продольной координате. Отметим, что в случае однородной напряжённости ВЧ-поля в ускоряющем зазоре резонатора протяжённостью d имеем

$$U_{RF}(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi), \quad T = \frac{\sin \psi}{\psi},$$

где $\psi = \pi d / \lambda_{RF}$, λ_{RF} — длина волны ускоряющего напряжения, $U_m = 15 \text{ кВ}$ — амплитуда высокочастотного напряжения на резонаторе.

Из формулы (2) с учётом (1) находим

$$\varphi_s = \arccos \left(\frac{\Delta W}{qTU_m} \right). \tag{3}$$

Подставляя все известные величины в (3), получим

$$\varphi_s = \arccos\left(\frac{3,69}{0,99 \times 15}\right) = 75,61^\circ.$$

Отсюда, согласно рис. 7,

$$\Delta\varphi_s = 90 - 75,61 = 14,39^\circ,$$

или в единицах времени, с учётом того, что период высокочастотных колебаний (частота 34,53 МГц) равен 28,96 нс,

$$\Delta t_s = \frac{14,39^\circ \times 28,96 \text{ нс}}{360^\circ} \approx 1,16 \text{ нс}.$$

Рассчитаем время пролёта t_e электронным сгустком пути L от ускоряющего зазора в резонаторе до точки излучения в магните М3. Сначала исходя из геометрии накопителя "Сибирь-1" (см. рис. 1) находим путь L :

$$\begin{aligned} L &= 0,22 \text{ м} + \frac{\pi R}{2} + 0,6 \text{ м} + \frac{\pi R}{2} + 0,6 \text{ м} + \frac{\pi R}{3} = \\ &= 0,22 + 1,57 + 0,6 + 1,57 + 0,6 + 1,05 = 5,61 \text{ м}, \end{aligned}$$

здесь $R = 1 \text{ м}$.

Затем, с учётом того, что скорость ультрарелятивистских электронов практически равна скорости света ($c = 2,997924 \times 10^8 \text{ м с}^{-1}$), для времени t_e пролёта электронным сгустком пути L получаем

$$t_e = \frac{L}{c} = \frac{5,61 \text{ м}}{2,998 \times 10^8 \text{ м с}^{-1}} \approx 18,71 \times 10^{-9} \text{ с} = 18,7 \text{ нс}.$$

Обратимся теперь к приведённой на рис. 8 осциллограмме, которая повторяет осциллограмму рис. 5. В нашем случае фаза напряжения — сигнала синхронизации, снимаемого с измерительной петли в резонаторе, — сдвинута на 180° относительно фазы напряжения на ускоряющем зазоре (которая условно показана на рис. 8 штриховой кривой).

Суммируя полученный выше интервал времени $\Delta t_s = 1,16 \text{ нс}$ и измеренный осциллографом временной интервал $\Delta t \approx 42,20 \text{ нс}$ между установленными курсо-

рами (сплошная и штриховая вертикальные линии на осциллограммах), находим из осциллограммы рис. 8 задержку t_{sum} появления светового сигнала в детекторе относительно момента прохождения соответствующего электронного сгустка через ускоряющий зазор:

$$t_{\text{sum}} \approx 43,36 \text{ нс}.$$

Мы рассматриваем здесь световой импульс В, излучённый электронным сгустком, влетающим в ускоряющий зазор резонатора в фазе φ_s , световой же импульс А излучён электронным сгустком, который влетел в зазор раньше на один период обращения. Вычитая из этой задержки ранее подсчитанное время пролёта t_e электронным сгустком пути L , находим время t_d прохождения светом пути от точки излучения до детектора:

$$t_d = t_{\text{sum}} - t_e \approx 43,36 \text{ нс} - 18,71 \text{ нс} = 24,65 \text{ нс}.$$

Суммарная длина пути светового импульса, отсчитываемая от входа в сапфировое окно до детектора, равна 13,8 см: 2,4 см (сапфировое окно, коэффициент преломления сапфира $n = 1,765$) + 10 см (воздух, 3 см до линзы и 7 см после линзы) + 1,4 см (стекло линзы с коэффициентом преломления $n = 1,52$). Свет, имея скорость в вакууме 30 см нс⁻¹, с учётом коэффициентов преломления в сапфире и стекле, проходит этот путь за 0,55 нс. Задержкой формирования электрического сигнала в детекторе мы здесь пренебрегаем.

Исходя из последнего замечания находим t_{SR} — время прохождения светом пути от точки излучения до выходного сапфирового окна ($l = 7,2 \text{ м}$),

$$t_{\text{SR}} = 24,65 \text{ нс} - 0,55 \text{ нс} = 24,10 \text{ нс}.$$

И окончательно вычисляем скорость света, излучённого релятивистскими электронами в вакууме:

$$c_{\text{SR}} = \frac{l}{t_{\text{SR}}} = \frac{7,20 \text{ м}}{24,10 \times 10^{-9} \text{ с}} \approx 2,99 \times 10^8 \text{ м с}^{-1}.$$

Полученный результат отличается от справочных значений скорости света в вакууме не более чем на 0,5 %.

4. Замечания

В ходе экспериментов существенные усилия были затрачены на устранение наводки высокочастотного ускоряющего напряжения на канал регистрации оптического сигнала. Эта синхронная наводка содержала ряд гармоник основной частоты и первоначально сильно искажала полезный сигнал. От неё практически полностью удалось избавиться применением в сигнальном и синхронизирующем каналах кабелей с двойной экранирующей оплёткой. Степень подавления наводки демонстрирует рис. 9, повторяющий осциллограмму рис. 6 в условиях, когда фотодетектор закрыт чёрной бумагой.

Наблюдавшийся оптический сигнал по длительности хорошо соответствовал ожиданиям, а по форме обнаруживал паразитный "звон" на заднем фронте импульсов, связанный с колебательными процессами в электрических цепях фотодетектора. Это осложнение сигнала не повлияло на точность измерений. Представление о достижимой точности даёт рис. 10, демонстрирующий осциллограммы оптического сигнала и синхронизации

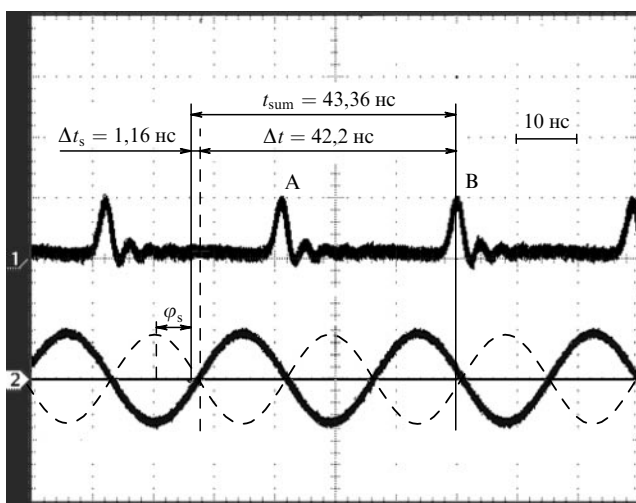


Рис. 8. Измерение задержки светового импульса в детекторе относительно фазы синхронной частицы в ускоряющем зазоре.

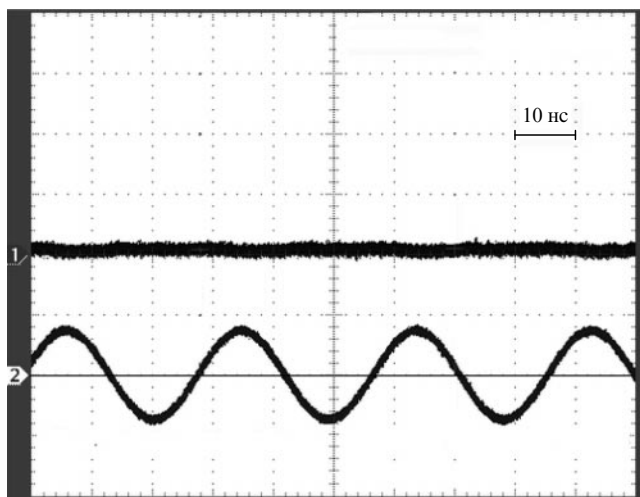


Рис. 9. Остаточный сигнал высокочастотной наводки (канал 1) и сигнал синхронизации (канал 2).

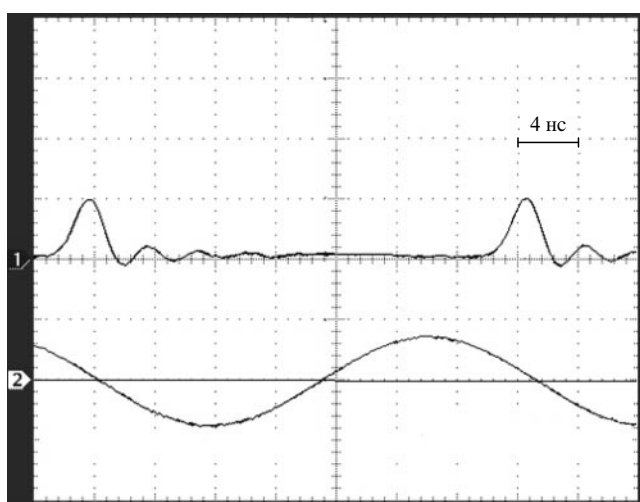


Рис. 10. Растянутый во времени сигнал с подавлением шума.

после цифрового усреднения. Временной масштаб растянут в 2,5 раза по отношению к предыдущим осциллограммам.

В сокращённом виде содержание настоящей статьи опубликовано в [22].

5. Заключение

В настоящей работе осуществлено — насколько нам известно, впервые — прямое измерение скорости света, испущенного ультрарелятивистским источником. Полученные результаты несовместимы с баллистической гипотезой Ритца, предполагающей сложение скорости света со скоростью источника. Показано, что введение стеклянной пластинки в пучок света не изменяет его скорости с точностью до нескольких долей процента, в то время как по логике гипотезы Ритца скорость света после прохождения неподвижного окна должна была уменьшиться вдвое. Измерение скорости светового импульса в вакууме привело к величине, совпадающей с табличным значением скорости света с точностью до 0,5%. Результаты измерений могут рассматриваться в качестве наиболее прямого доказательства справедливости второго постулата СТО.

Авторы выражают благодарность оперативному персоналу источника СИ ускорительно-накопительного комплекса "Сибирь" за помощь в проведении экспериментов, Квардакову В.В. за внимание к работе, директору НИЦ КИ Ковальчуку М.В. за предоставление возможности проведения экспериментов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-02-00538-а) с использованием оборудования Центра коллективного пользования КЦСИиНТ НИЦ "Курчатовский институт".

Список литературы

1. Александров Е "Была ли ошибка?" *Наука и жизнь* (12) 109 (1990)
2. Александров Е Б "О плюрализме мнений в точных науках и о критике теории относительности" *Оптика и спектроскоп.* **71** 555 (1991)
3. Joss G "Wiederholungen des Michelson-Versuchs" *Naturwissenschaften* **19** 784 (1931) [Пер. на русск. яз.: Иоос Г "Повторения опыта Майкельсона" *УФН* **12** 136 (1932)]
4. Einstein A *Ann. Physik* **17** 891 (1905)
5. Носков Н "Столетняя эфирная война" *Наука Казахстана* (21(105)) (1997); <http://n-t.ru/tp/ng/sev.htm>
6. Соколов В, Соколов Г "Сущность специальной теории относительности", <http://www.wbabin.net/sokolov/sokolov9r.pdf>
7. Ritz W *Ann. Chim. Phys.* **8** **13** 145 (1908)
8. Денисов А А *Мифы теории относительности* (СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2009)
9. Ипатова И П и др. «Чему учит книга "Мифы теории относительности"» *УФН* **160** (4) 97 (1990) [Ipatova I P et al. «What we can learn from "The Myths of Relativity Theory"» *Sov. Phys. Usp.* **33** 310 (1990)]
10. Бонч-Бруевич А М "Сергей Иванович Вавилов в моей жизни" *УФН* **171** 1087 (2001) [Bonch-Bruevich A M "Sergei Ivanovich Vavilov in my life" *Phys. Usp.* **44** 1033 (2001)]
11. Miller D C "Significance of the ether-drift experiments of 1925 at Mount Wilson" *Science* **63** 433 (1926); "Ether-drift experiments at Mount Wilson" *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **11** 306 (1925) [Пер. с англ. С И Вавилова: Миллер Д К "Эфирный ветер. Доклад, прочитанный в Вашингтонской Академии наук" *УФН* **5** 177 (1925); в сб. *Эфирный ветер* (Под ред. В А Ацюковского) (М.: Энергоатомиздат, 1993)]
12. Michelson A A "The relative motion of the Earth and the luminiferous ether" *Am. J. Sci.* **3** **22** 120 (1881)
13. de Sitter W "Ein astronomischer Beweis für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit" *Phys. Z.* **14** 429 (1913)
14. Александров Е Б "Об одном астрономическом доказательстве второго постулата СТО" *Астроном. журн.* **42** 676 (1965) [Aleksandrov E B "An astrophysical proof of the second postulate of Special Relativity" *Sov. Astron.* **9** 519 (1965)]
15. Франкфурт У И, Френк А М *Оптика движущихся тел* (М.: Наука, 1972) с. 113
16. Сацункевич И С *Экспериментальные корни специальной теории относительности* (М.: УРСС, 2003)
17. Малыкин Г Б "Классические оптические эксперименты и специальная теория относительности" *Оптика и спектроскоп.* **107** 624 (2009) [Malykin G B "Classical optical experiments and special relativity: A review" *Opt. Spectrosc.* **107** 592 (2009)]
18. Малыкин Г Б "Эффект Саньяка и баллистическая гипотеза Ритца" *Оптика и спектроскоп.* **109** 1018 (2010) [Malykin G B "Sagnac effect and Ritz ballistic hypothesis (Review)" *Opt. Spectrosc.* **109** 951 (2010)]
19. Kantor W "Direct first-order experiment on the propagation of light from a moving source" *J. Opt. Soc. Am.* **52** 978 (1962)
20. Дулищева О М, Шпирка И И (Сост.) *Результаты экспериментальных исследований М.И. Дулищева закономерностей явления излучения и распространения света в пространстве* (Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2008) с. 35
21. Filipchenko A V et al. "Realized parameters of KRSR storage rings" *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **448** 8 (2000)
22. Александров Е Б и др. *Письма в ЖЭТФ* **94** 374 (2011) [Aleksandrov E B et al. *JETP Lett.* **94** (5) (2011)]