

Художник В. Камаев

Теория относительности: прямой эксперимент с кривым пучком

Академик РАН

Е.Б.Александров

Немного истории

Нет более прославленной физической теории, чем СТО — специальная теория относительности. Годом ее рождения считается 1905 год — момент публикации статьи молодого амбициозного теоретика Альберта Эйнштейна под скучным академическим названием «К электродинамике движущихся тел». Началась эпоха рождения новой физики — вслед за СТО появилась квантовая механика, в создании которой

Эйнштейн также принял активное участие. В отличие от квантовой механики, знакомство с которой требует специальной математической подготовки, СТО представлялась понятной теорией, хотя и с сенсационными выводами.

Помню свое восхищение от первого знакомства со СТО. На упражнениях по курсу общей физики записал в 1957 году условие задачи, продиктованной преподавателем В.В.Батыгиным: «Летим на альфу Центавра. Расстояние — 4 световых года. Требуется узнать, какую скорость нужно набрать для того, чтобы полет для экипажа ракеты занял один месяц. Каковы затраты энергии при массе покоя ракеты 1 тонна?» Действительно, вчера запущен первый спутник, межзвездные перелеты не за горами! Фантастическая воз-

возможность сжатия многих лет земного времени в один месяц заточения в ракете окрыляла. Вопрос об энерготратах (чудовищных) и ускорениях (не совместимых с жизнью) не ставился...

СТО принесла небывалую славу Эйнштейну. Гений теоретической физики Лев Ландау предложил список рангов ученых по образцу звездных величин, в которой отсчет шел вниз от Эйнштейна. Но эта слава провоцировала и публичное раздражение. Элемент ревности присутствовал в реакции его коллег-физиков, которые осуждали Эйнштейна за то, что он не сослался на работы своих предшественников, в значительной мере подготовивших рождение СТО, — среди них наиболее известны имена Анри Пуанкаре, Хендрика Лоренца и Альберта Майкельсона. Можно сказать, что теория относительности носилась в воздухе, а Эйнштейн ее из этого воздуха сконденсировал.

Академик В.И. Арнольд рассказывал, что учитель Эйнштейна Герман Минковский рекомендовал своему ученику прочитать статью Пуанкаре «Об измерении времени». В статье, опубликованной в 1898 году в философском журнале «Revue de métaphysique et de morale», была качественно сформулирована идея теории относительности, и чтение ученику пошло впрок. Однако сообщество физиков никогда не сомневалось в ценности вклада Эйнштейна, в том числе и сам Пуанкаре, который оказался рецензентом последовавшей статьи Эйнштейна и дал на нее восторженный отзыв. Физики в целом довольно быстро приняли СТО в качестве фундаментального развития механики Галилея — Ньютона. Быстрому признанию СТО способствовало стремительное развитие ядерной физики с ее арсеналом ускорителей заряженных частиц: их работа невозможна без учета СТО, которая лежит в основе расчетов этих машин так же буднично, как теория сопротивления материалов в инженерном деле. Иначе обстояло дело с мнением широкой публики, знакомой со СТО по газетным сообщениям или в лучшем случае по популярным изложениям.

Объективное и субъективное

Сейчас среди профессионалов нет и тени сомнения в справедливости СТО — она является базой ядерной физики, квантовой электродинамики, космологии и других областей. Предсказания СТО выполняются с точностью лучше миллионной доли. Тем не менее и сегодня редакции журналов осаждают любители, опровергающие Эйнштейна. Их построения отвергаются рецензентами-профессионалами и не проникают в научную печать, однако переполняют Интернет и СМИ. Процесс обострился в 100-летний юбилей выхода знаменитой статьи Эйнштейна. Особый размах кампании ниспровержения Эйнштейна приобрела в России, поскольку она наложилась на системный кризис, когда резко упал престиж рациональной науки в пользу паранауки, оккультизма и эзотерики. Нападки на СТО агрессивны и направлены в адрес «официальной» (академической) науки, которая-де являет собой «заговор монополистов СТО» ради финансовой выгоды «академиков-релятивистов».

Среди причин неприятия СТО помимо невежественности, ревности к мировой славе и антисемитизма есть и объективная составляющая — недостаточная убедительность прямого экспериментального подтверждения базовых положений теории. Отклонения от классической механики в пользу СТО возникают в меру отношения v/c , где v — скорость объекта, а c — скорость света в вакууме. Это отношение даже для столь высоких скоростей макроскопических объектов, как скорость звука, имеет порядок 10^{-6} , поэтому релятивистские эффекты трудно обнаружить.

Исторически первым экспериментом, на который ссылаются все руководства по СТО как на обоснование теории, выступает эксперимент Майкельсона 1881 года, когда была



сделана попытка обнаружения эффекта увлечения света «светоносным эфиром». В этом эксперименте интерферометрически сравнивалось изменение фазы, которое приобретает свет, проходящий вдоль мерного участка по линии движения Земли в ее орбитальном полете вокруг Солнца, с набегом фаз при противоположном направлении движения света. Точнее можно сказать, что сравнивалась фаза колебаний света, распространявшегося поперек движения Земли и возвращенного зеркалом в исходную точку, с фазой света, распространявшегося вдоль движения и тоже возвращенного зеркалом в исходную точку. Поскольку «исходная точка», в которой производится сравнение фаз, движется в пространстве, расстояния, проходимые светом в разных направлениях по пути «туда» и «обратно», оказываются различными. Это должно приводить к разности фаз, поскольку на меньшем пути укладывается меньшее число длин волн.

Ожидалось найти разность фаз, пропорциональную $(v/c)^2$. Хотя в этом случае величина v/c не так уж мала (10^{-4}), но из-за квадратичности влияния эффект оказывается на грани обнаружения и легко маскируется флуктуациями. В первом опыте Майкельсона обнаруженное систематическое отклонение фаз получилось в несколько раз меньше вычисленного на основании теории эфира и лишь немного превышало случайный разброс показаний. Майкельсон объявил результат нулевым. Это означало, что «мирового эфира», то есть некоей неподвижной среды, в которой распространяется свет (аналогично воздуху, в котором распространяется звук), не существует.

Со временем точность росла, и к концу XIX века нулевой результат эксперимента Майкельсона стал рассматриваться в качестве одного из двух вызовов классической физике, о которых говорил лорд Кельвин как о двух облачках, затмевающих ясный горизонт науки. Вторым облаком была «ультрафиолетовая катастрофа» — несоответствие спектра теплового излучения теоретическим ожиданиям. Первое облачко породило СТО, второе — квантовую теорию.

Измерения по схеме Майкельсона продолжались до конца тридцатых годов XX века, когда они потеряли (в мире профессионалов) всякую актуальность ввиду большого количества подтверждений СТО, поставляемых ядерной физикой и мощной электроникой. Однако эти результаты практически не проникали в общественное сознание, питающееся популярными книжками, в которых единственным обоснованием СТО выступали опыты Майкельсона.

В то же время критики СТО не дремали. Среди множества экспериментов майкельсоновского типа, причем не всегда поставленных достаточно аккуратно, выискивались такие, в которых наблюдались сдвиги интерференционной картины. Но и отрицательный результат этих опытов не рассматривался как доказательство справедливости СТО: ставилось под сомнение толкование этих опытов. Большое внимание привлекла корпускулярно-баллистическая гипотеза Ньютона — Ритца, в которой на основе утвердившейся в начале XX века фотонной теории света последний рассматривался в качестве потока частиц, скорость движения которых складывается со скоростью источника, подобно тому как скорость снаряда складывается со скоростью движения пушки. Но тогда свет, приходящий на Землю от разных краев Солнца, должен иметь разную скорость. Да и свет, испущенный компонентой двойной звезды в момент, когда она летит по направлению к нам,

и в момент, когда она летит от нас, тоже должен иметь разную скорость. Но согласно СТО он должен иметь одинаковую скорость, и вот что об этом свидетельствует.

Второй постулат

В СТО наиболее странным и спорным всегда представлялся второй постулат, в соответствии с которым скорость света постоянна в любой инерциальной системе координат и не зависит от скорости источника света. Этот постулат лежит в основе принципа синхронизации часов, положенного Эйнштейном в основу СТО. Постулат не имел тогда другого экспериментального подтверждения, кроме отрицательного результата опыта Майкельсона, но это доказательство ставилось под сомнение гипотезой Ритца. Существовало, однако, и другое свидетельство постоянства скорости света. На него в 1913 году указал астроном де Ситтер, обратив внимание на тот факт, что наблюдаемая кинетика относительного движения двойных звезд в точности следует ньютоновской небесной механике. Если же допустить, что скорость света складывается со скоростью источника, то на больших расстояниях будут накапливаться значительные сдвиги времен прихода света от объекта, движущегося по лучу зрения, по сравнению с попятным движением. Это должно было привести к резким отклонениям наблюдаемой кинетики движения звезд по сравнению с ожидаемой.

Однако это возражение было парировано сторонниками гипотезы Ритца. Они привлекли к рассмотрению межзвездный газ, который рассматривался как вторичный источник света. С этой точки зрения свет, испущенный движущимся источником, теряет память о скорости первичного источника по мере распространения в межзвездной среде, которая выступает вторичным источником уже со своей локальной скоростью. Поскольку данные об этой среде известны лишь приблизительно, эта идея позволяет подвергнуть сомнению большинство астрономических доказательств постоянства скорости света. Упомянутые сомнения в справедливости второго постулата потеряли значение к сороковым годам прошлого века, поскольку СТО, как уже говорилось, была полностью подтверждена своими следствиями в физике высших энергий, где без нее нельзя сделать ни шагу.

Вдобавок вмешалось государство

Однако вскоре появилось новое, внаучное обстоятельство — вмешательство в науку государственной идеологии. Так бывало и раньше при столкновениях науки с догматами церкви. В XX веке гонения на теорию Эйнштейна возникли по идеологическим соображениям: в Германии СТО была осуждена как «неарийская наука», в СССР марксистская философия объявила СТО идеалистическим извращением.

До того предметом атаки советская философия избрала генетику, которую объявили «буржуазной лженаукой», созданной с целью оправдания преимуществ правящего класса и порабощения трудящихся. В 1948 году в СССР прошла сессия ВАСХНИЛ, организованная любимцем И.В.Сталина, «народным академиком» Т.Д.Лысенко, разгромившая «вейсманизм-морганизм», а заодно и передовую советскую генетику. Всемирно известный академик Н.И.Вавилов в 1943 году погиб в тюрьме, куда попал по несусветным обвинениям. Его смерть нанесла такой урон международному имиджу советской власти, что Сталин в «порядке спецоперации» решил поставить его брата-физика, тоже академика, С.И.Вавилова во главе Академии наук СССР. В этой роли С.И.Вавилов сидел в президиуме сессии ВАСХНИЛ 1948 года. Тогда он и узнал о планах наступления на «идеалистические извращения в области физики» — теорию относительности и квантовую механику и задумал контроперацию. Он решил заранее осуществить неоспоримый эксперимент по доказательству второго постулата СТО. Для

этого он пригласил молодого фронтовика А.М.Бонч-Бруевича, сына своего старого друга, члена-корреспондента М.А.Бонч-Бруевича, и предложил ему спланировать и осуществить прямой эксперимент по измерению скорости света от источника, движущегося со скоростью, сравнимой со скоростью света. Вавилов имел в виду установку, в которой источником света был пучок быстрых возбужденных атомов.

Однако в процессе проработки плана эксперимента оказалось, что при технике тех дней нельзя рассчитывать на пучки атомов нужной скорости и плотности: ожидаемая в рамках баллистической гипотезы добавка к скорости света оказывалась на уровне процентов, а интенсивность излучения пучка оценивалась слишком низкой. Опыт не был осуществлен.

После смерти С.И.Вавилова план эксперимента пересмотрели по инициативе академика Г.С.Ландсберга, который предложил сравнивать скорость света, испускаемого двумя экваториальными краями вращающегося Солнца. Опыт был доведен до конца, и он показал, что скорости света от двух краев Солнца равны. Однако сторонники баллистической гипотезы возразили: свет Солнца перед измерением пропущался через стеклянный объектив телескопа, что по логике концепции переизлучения света преломляющей средой приводило к уравниванию скоростей двух пучков света (не говоря о подобной же роли земной атмосферы).

Возвращаясь к теме запланированной Сталиным атаки марксистской философии на физику, которую пытался упредить С.И.Вавилов своей экспериментальной программой, замечу, что даже президент АН СССР не был полностью осведомлен о деталях секретнейшего атомного проекта, курировавшегося Л.П.Берией. Получив указание Сталина о развертывании наступления на «идеологические извращения в физике», Берия вызвал к себе на собеседование людей, ответственных за работы по атомной бомбе (это были И.В.Курчатов и А.П.Александров), и сообщил им о планах вождя. Руководители проекта не дрогнули и сказали, что кампания идеологической дискредитации основ новой физики (СТО и квантовой механики) неминуемо сорвет работы по созданию атомной бомбы. Берия донес этот ответ до Сталина. Как говорят, Сталин долго молча ходил по кабинету, покуривая трубку, а потом сказал: «Пусть наши ученые работают спокойно». И добродушно продолжил: «А расстрелять мы их всегда успеем!» Разоблачение идеалистических извращений в физике было отменено, хотя оно уже до того началось — я застал его следы, когда учился в Ленинградском политехническом институте (ЛПИ им. М.И.Калинина) в пятидесятых годах XX века.

С тех пор неоднократно предпринимались различные попытки экспериментального доказательства второго постулата СТО, и все авторы приходили к выводу о его справедливости. Но это не прекращало критических выступлений, в которых выдвигались возражения против идей экспериментов или ставилась под сомнение их точность, и баллистическая гипотеза оставалась популярной среди критиков СТО. Приведем в качестве типичного примера монографию В.И.Секерина, изданную в 2007 году. Авторская аннотация: «В книге приведены описания астрономических наблюдений и лабораторных экспериментов, подтверждающих соответствие скорости света классическому закону сложения скоростей и, следовательно, ложность постулата постоянства скорости света $c = \text{const}$, который является основой теории относительности (ТО). Таким образом, доказана несостоятельность ТО как физической теории, показаны история и истоки ее изобретения, раскрыта идеалистическая философская сущность и пагубность теории при ее изучении и применении в практических приложениях». Предисловие к книге написал к. ф.-м. н. В.Г.Жданов, который сообщает, что никогда не мог понять СТО и теперь, после чтения книги Секерина, ему полегчало. Славу Эйнштейна В.Г.Жданов относит к стараниям нью-йоркской еврейской общины: «В брошюре собраны малоизвестные данные о деятельности Эйнштейна не

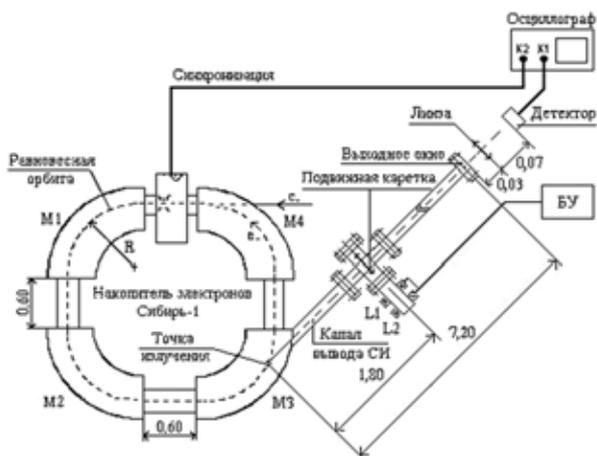
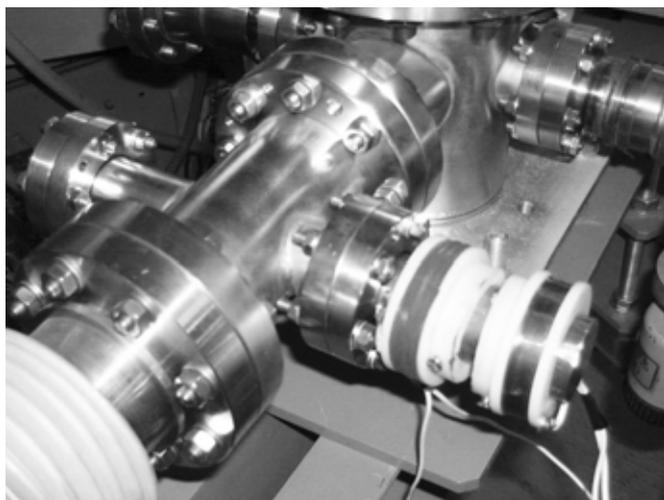


Схема эксперимента. M1—M4 — поворотные магниты, L1, L2 — катушки магнитного привода каретки, расстояния указаны в метрах



Экспериментальная установка. Белые кольца в правой нижней части — изоляция катушек L1, L2, которые управляют кареткой с пластинкой, перекрывающей путь излучения

только как ученого-физика, но и философа и политика. В свете этих данных становятся объяснимы действия нью-йоркской еврейской общины. Для привлечения к себе паствы в современных условиях необходимы свои современные боги. Вот и возводится в ранг святого мистик и сионист А.Эйнштейн». Завершает Жданов предисловие предупреждением: «До выхода в свет брошюры взгляды на теорию относительности можно рассматривать как заблуждение. Сейчас же продолжение преподавания теории относительности, особенно в школе, является умышленным обманом. А это — не смешно».

Эксперимент

Вот и нам показалось, что все это уже не смешно. И что надо наконец прекратить поток этих глупостей, прямо измерив скорость света, испущенного быстро движущимся источником. Ныне предложение Вавилова полувековой давности можно реализовать, поскольку физика получила в руки весьма яркий ультрарелятивистский источник. Это синхротронный излучатель, где источником света служит сгусток электронов, двигающийся по искривленной траектории со скоростью, очень близкой к скорости света. В таких условиях легко померить скорость испущенного света в вакууме. По баллистической гипотезе эта скорость должна быть равна удвоенной скорости света от неподвижного источника: весьма сильный эффект, обнаружение которого, в случае его существования, не по-

требовало бы специальных ухищрений. Действительно, достаточно просто измерить время прохождения световым импульсом мерного отрезка в вакуумированном пространстве.

Самым трудным моментом в постановке работы оказалось уговорить специалистов центра синхротронного излучения провести такой опыт, ввиду его очевидной (для них) никчемности. Пришлось знакомить специалистов с трудами Секерина и ему подобных. Сам же эксперимент не потребовал сколько-нибудь значительных затрат средств и времени и был осуществлен между делом — в перерывах основной загрузки синхротрона.

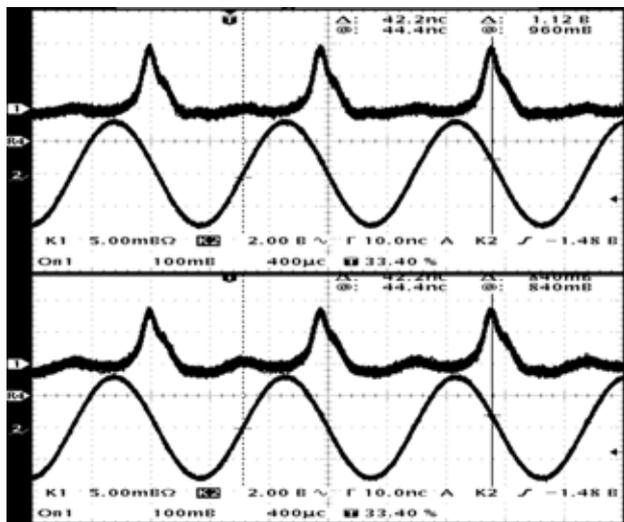
В эксперименте использовался малый накопитель электронов «Сибирь-1» Курчатовского центра синхротронного излучения. Схема накопителя представлена на рисунке. Магнитная система, формирующая замкнутую орбиту электронов, состоит из четырех поворотных 90-градусных магнитов (M1—M4), разделенных четырьмя прямолинейными промежутками длиной по 60 см. Радиус R равновесной орбиты электронов в поворотных магнитах равен 1 м. Номинальная энергия электронов составляет 450 МэВ, что характеризует пучок как ультрарелятивистский, поскольку энергия покоя электрона равна ~ 0,5 МэВ. При такой энергии скорость электрона отличается от скорости света меньше чем на одну миллионную долю.

Синхротронное излучение (СИ), создаваемое релятивистскими электронами в поворотных магнитах, имеет широкий спектр от инфракрасного и видимого до рентгеновского диапазона. Излучение приводит к потерям энергии, и для компенсации потерь в промежутке накопителя находится высокочастотный резонатор. Подводимая к нему мощность создает на ускоряющем зазоре резонатора напряжение с амплитудой 15 кВ и с частотой 34,53 МГц, равной частоте обращения электронного сгустка в накопителе. Распределение продольной плотности электронов в сгустке является гауссовым со стандартным размером 0,30 м.

Ось канала вывода СИ, будучи касательной к равновесной орбите в магните M3, идет под углом 30° к оси прямолинейного промежутка № 4. Длина канала от точки излучения до выходного сапфирового окна — 7,2 м. Камера накопителя и канала вывода СИ составляет один вакуумный объем. За выходным окном установлена собирающая линза, фокусирующая изображение пучка СИ на окно детектора излучения. Сигнал с нагрузки фотодиода подается на вход осциллографа.

Результат

Эксперимент был запланирован в двух версиях. Первая версия предусматривала оперативное перекрытие светового пучка в канале вывода СИ стеклянной пластинкой, закрепленной на подвижной каретке, — пластинку вводили в луч с помощью магнитного привода. По логике баллистической гипотезы преломляющая пластинка рассматривается в качестве вторичного и уже неподвижного источника света. Поэтому участок l канала вывода СИ от пластины до выходного окна свет должен проходить со скоростью с вместо 2с в отсутствие



Сравнение оптических сигналов до (вверху) и после (внизу) введения в луч стеклянной пластинки. Синусоида — синхронизирующий сигнал с резонатора, синхронный с пролетом электронного сгустка. Одно большое деление по горизонтали — 10 нс, малое — 2 нс, сдвиг в 1 нс был бы заметен. Ожидаемый сдвиг — 9 нс, сдвига нет

пластины. Длина участка l равна 5,4 м, так что перекрытие пучка СИ стеклянной пластиной должно было привести к задержке во времени оптических сигналов на 9,0 нс.

Вторая версия эксперимента предусматривала прямое измерение скорости импульса СИ путем деления участка $L=7,2$ м выводного канала до выходного сапфирового окна на время прохождения импульса. Это время измеряли с помощью осциллографа, используя сигнал синхронизации с учетом его расчетного фазового сдвига относительно момента прохождения электронного сгустка мимо окна выводного канала СИ.

В первой версии измерялся сдвиг оптических импульсов во времени при введении в луч СИ стеклянной пластинки. Сдвиг не был обнаружен с точностью около 0,05 нс. Во второй версии эксперимента была непосредственно измерена скорость импульса СИ, найденная равной 299 000 км/с, что всего лишь на 0,3% ниже табличной скорости света в вакууме.

В этой работе осуществлено — насколько нам известно, впервые — прямое измерение скорости света, испущенного релятивистским источником. Полученные результаты несовместимы с баллистической гипотезой Ритца, предполагающей галилеевское сложение скорости света со скоростью источника. Показано, что введение стеклянной пластинки в пучок света от ультрарелятивистского источника не меняет скорости света с точностью до долей процента, в то время как по логике гипотезы Ритца эта скорость после прохождения неподвижного окна должна была упасть вдвое. Этот эксперимент подтверждает ранее существовавшие астрономические свидетельства справедливости второго постулата СТО, которые систематически подвергались сомнению критиками СТО со ссылкой на преломляющее воздействие межзвездного газа. Дополнительно к этому прямое измерение скорости светового импульса СИ в вакууме привело к величине, хорошо совпада-

ющей с табличным значением. Результаты измерений могут рассматриваться в качестве наиболее прямого и окончательного доказательства справедливости второго постулата СТО.

Детективное примечание

Перед началом экспериментов авторы провели литературный поиск, чтобы проверить, существуют ли работы сходного типа. Такие работы нам обнаружить не удалось. Кроме того, мы опросили специалистов, работающих с синхротронным излучением в России (в Курчатовском центре синхротронного излучения и в Институте ядерной физики СО РАН) и за рубежом (США и Швейцария). Никто в этих центрах не слышал о проектах измерения скорости импульсов СИ. Однако после публикации наших результатов в октябре 2011 года мы получили по электронной почте ссылку на статью А.С.Мазманишвили «Двадцать пять лет баллистическому эксперименту с фотонами синхротронного излучения в электронном накопителе и измерению скорости света», опубликованную в неизвестном нам издании «Электромагнитные явления» (2001, № 1). Из этой статьи следовало, что приблизительно в 1975 году группа сотрудников УФТИ (с участием Мазманишвили) предприняла эксперимент по проверке корпускулярно-баллистической гипотезы с использованием синхротронного излучения. Вторым идеи эксперимента был покойный академик В.Л.Гинзбург. Методика измерений близка к нашей, хотя достигнутая точность оказалась на порядок ниже и полученные выводы носили качественный характер. Результаты эксперимента свидетельствовали в пользу СТО, но опубликованы они были лишь спустя 25 лет. Это объясняется, возможно, тем, что во главе группы экспериментаторов стоял убежденный противник теории Эйнштейна П.И.Филиппов, который ставил эксперимент с целью опровержения СТО. Публикация состоялась лишь после смерти Филиппова.

С точки зрения физиков-профессионалов, осуществленный эксперимент бесполезен, потому что его результат предопределен. Однако прямая демонстрация постоянства скорости света имеет большую дидактическую ценность, ограничивая почву для дальнейших спекуляций о недоказанности основ теории относительности. Физика в своем развитии постоянно возвращалась к воспроизведению и уточнению основополагающих экспериментов, осуществляемых с новыми техническими возможностями. Мы не ставили целью уточнить скорость света. Речь шла о восполнении исторической недоработки в экспериментальном обосновании истоков СТО и о том, чтобы облегчить восприятие этой теории. Можно сказать, что поставлен современный демонстрационный опыт для хорошего преподавания физики.

Что можно прочесть об экспериментальных доказательствах СТО

Е.Б.Александров, П.А.Александров, В.С.Запасский, В.Н.Корчуганов, А.И.Стирин. Эксперименты по прямой демонстрации независимости скорости света от скорости движения источника. «Успехи физических наук», 2012, № 12.

Е.Б.Александров. Об одном астрономическом доказательстве второго постулата СТО. «Астрономический журнал», 1965, т. 42, № 378.

У.И.Франкфурт, А.М.Френ. Оптика движущихся тел. М.: Наука, 1972.

И.С.Сацункевич. Экспериментальные корни специальной теории относительности. Москва, УРСС, 2003.

Г.Б.Малькин. Классические оптические эксперименты и специальная теория относительности. «Оптика и спектроскопия». 2009. Т. 107, № 4; Эффект Саньяка и баллистическая гипотеза Ритца. «Оптика и спектроскопия». 2010. Т. 109, № 6.