

Измерение скорости света, испущенного ультрарелятивистским источником

Е. Б. Александров^{▽1)}, П. А. Александров[°], В. С. Запасский[□], В. Н. Корчуганов[°], А. И. Стирин[°]

[▽] Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 С.-Петербург, Россия

[°] Научно-исследовательский центр “Курчатовский институт”, 123182 Москва, Россия

[□] Санкт-Петербургский государственный университет, 199034 Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 4 июля 2011 г.

После переработки 14 июля 2011 г.

Осуществлено прямое измерение скорости светового импульса от ультрарелятивистского электронного сгустка. Найденная скорость с точностью до 0.3% совпадает с табличным значением скорости света в вакууме. Полученный результат может рассматриваться в качестве наиболее прямого экспериментального подтверждения второго постулата специальной теории относительности А. Эйнштейна.

1. Введение. Утверждение о независимости скорости света от скорости источника было выдвинуто Альбертом Эйнштейном [1] в качестве второго постулата его знаменитой специальной теории относительности (СТО). Обоснованию этого постулата в течение последнего столетия было посвящено множество астрономических наблюдений и экспериментальных исследований, см., например, последние обзоры [2]. Многократно на протяжении этого времени постулат подвергался сомнениям со ссылками на недостаточную точность измерений, что, как правило, было связано с малой скоростью v движения источника по отношению к скорости света c . В настоящей работе мы прямо измерили скорость света от источника, движущегося с ультрарелятивистской скоростью, и нашли, что эта скорость, как и постулировал Эйнштейн, не отличается от табличной скорости света в вакууме.

2. Описание установки и план эксперимента. В основу эксперимента было положено использование синхротронного излучения (СИ) сгустка релятивистских электронов, движущихся со скоростью, очень близкой к скорости света c , по искривленной траектории в магнитном поле поворотного магнита накопителя электронов. В этих условиях легко померить скорость испущенного света в безукоризненном лабораторном вакууме.

В соответствии с наиболее популярной среди критиков СТО корпускулярно-баллистической гипотезой Ньютона–Ритца [3–5] скорость света, испускаемого сгустком электронов вперед по касательной к траектории, должна быть равна удвоенной скорости света от неподвижного источника. Это весьма грубый эффект, обнаружение которого (в случае его существо-

вания) не потребовало бы специальных ухищрений, имея в виду высокую интенсивность СИ.

Источником СИ служил накопитель электронов Сибирь-1 в Курчатовском центре синхротронного излучения НИЦ КИ [6]. Общая схема эксперимента показана на рис.1. Магнитная система электрон-

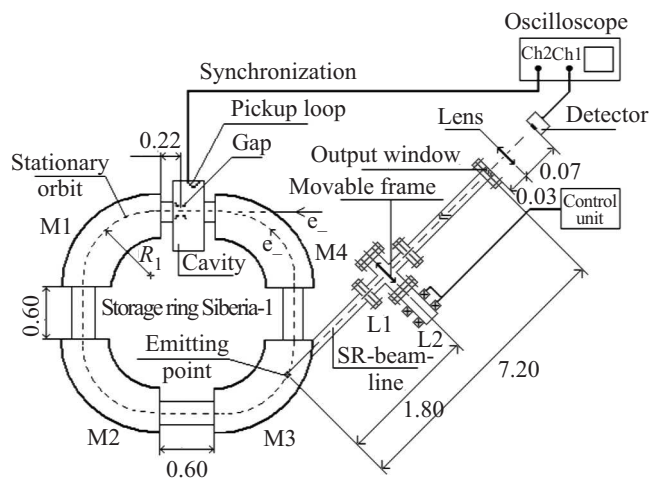


Рис. 1. Схема эксперимента: M1–M4 – поворотные магниты; L1, L2 – катушки магнитного привода каретки. Расстояния указаны в метрах

ного накопителя, 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. Индукция магнитного поля на равновесной орбите равна 1.5 Т при номинальной энергии электронов 450 МэВ. Синхротронное излучение, создаваемое релятивистскими электронами в по-

¹⁾ e-mail: ealexandrov@bk.ru

воротных магнитах, имеет широкий спектр от инфракрасного и видимого до рентгеновского диапазона с характеристической длиной волны 61.3 \AA . Оно приводит к потерям энергии в 3.69 кэВ на оборот каждым электроном. Для компенсации потерь в промежутке № 1 накопителя находится высокочастотный (ВЧ) резонатор. Подводя к нему ВЧ-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 $\sigma = 0.30 \text{ м}$.

Ось канала вывода СИ, являясь касательной к равновесной орбите в магните М3, идет под углом 30° к оси прямолинейного промежутка № 4, следующего за магнитом М3. То есть точка излучения (начало отсчета длины пути СИ вдоль оси канала) находится на расстоянии $\pi R/3$ от входного торца магнита М3. Длина канала от точки излучения до выходного сапфирового окна 7.2 м . Камера накопителя и канал вывода СИ составляют один вакуумный объем.

За выходным окном установлена собирающая линза, фокусирующая изображение пучка СИ на окно детектора излучения. В качестве детектора используется кремниевый фотодиод типа PIN Hamamatsu S5972 (область спектральной чувствительности $0.32\text{--}1 \text{ мкм}$, полоса частот 500 МГц , эффективная площадь чувствительной зоны 0.5 мм^2).

Напряжение, создаваемое фототоком диода на нагрузке (50 Ом), поступало на первый вход двухканального осциллографа Tektronix TDS 3052C (полоса 500 МГц). На второй вход осциллографа подавался непрерывный синусоидальный ВЧ-сигнал синхронизации с измерительной петли резонатора. Чтобы исключить ошибку, вызванную различными фазовыми сдвигами сигналов, их транспортировка осуществлялась по однотипным помехозащищенным (с двойным экраном) коаксиальным кабелям одинаковой длины.

На рис. 2 представлена фотография с экрана осциллографа. Скорость развертки соответствует 10 нс в большом делении. На рис. 3 приведена подобная осциллограмма, растянутая во времени в 2.5 раза и подвергнутая цифровому усреднению для подавления шумов. Рис. 3 дает представление о достижимой точности измерений.

Как видно, оптический сигнал по форме и длительности весьма близок к идеальной ожидавшейся картине – периодической последовательности гауссовых импульсов с шириной на полувысоте 2.35 нс (см. врезку на рис. 3, где на сигнал фототока наложен расчетный контур оптического импульса). Единст-

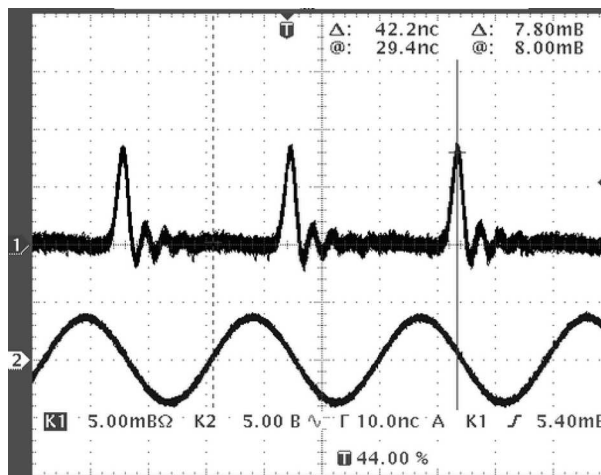


Рис. 2. Осциллограмма импульсов СИ (канал 1) и сигнал синхронизации (канал 2)

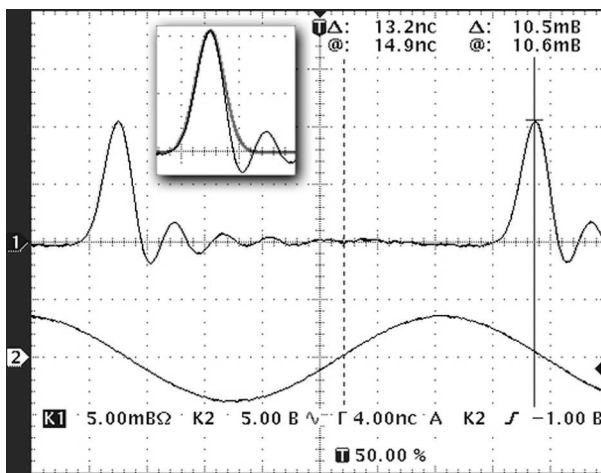


Рис. 3. Растянутая в 2.5 раза во времени и усредненная осциллограмма. На вставке на осциллограмму СИ наложен гауссов контур, соответствующий неискаженной форме импульса (жирная кривая)

венным отличием выступает “звон” на заднем фронте импульсов фототока, связанный с колебательными процессами в цепях фотодетектора. Эта помеха, однако, не мешает решению поставленной задачи.

Эксперимент был запланирован в двух версиях. *Первая версия* предусматривала оперативное перекрытие светового пучка в канале вывода СИ стеклянной пластинкой, закрепленной на подвижной каретке и вводимой в луч с помощью магнитного привода. По логике баллистической гипотезы преломляющая пластина 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 c (вместо $2c$

в отсутствие пластины). Длина участка l равна 5.4 м (см. рис. 1), так что перекрытие пучка СИ стеклянной пластиной должно было бы привести к задержке во времени оптических сигналов на 9.0 нс.

Вторая версия эксперимента предусматривала прямое измерение скорости импульса СИ путем деления длины участка $\Delta L = 7.2$ м выводного канала до выходного сапфирового окна на время τ прохождения импульса. Это время можно измерить с помощью осциллографа, используя сигнал синхронизации с учетом его расчетного фазового сдвига относительно момента прохождения электронного сгустка мимо окна выводного канала СИ.

3. Результаты эксперимента. 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. (Задержка, связанная с преломлением света в тонкой пластинке, пренебрежимо мала.)

Во *второй версии* эксперимента была непосредственно измерена скорость импульса СИ. Она оказалась равной $2.99 \cdot 10^{10}$ см/с, что всего лишь на $\sim 0.3\%$ ниже табличной скорости света в вакууме. Среднеквадратическая случайная ошибка измерения оценена величиной $\sim \pm 0.2\%$. Систематическая ошибка определяется точностью измерения длин траектории электронного пучка и луча СИ и не превышает $\pm 0.5\%$. Детали вычисления и измерения величины τ приведены в нашем предварительном сообщении [7].

4. Заключение. 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 бы упасть вдвое. Этот эксперимент верифицирует ранее существовавшие астрономические свидетельства справедливости второго постулата СТО (см., например, [8, 9]), которые систематически подвергались сомнению критиками СТО со ссылкой на преломляющее воздействие межзвездного газа. Дополнительно прямое измерение скорости

светового импульса СИ в вакууме привело к величине, совпадающей с табличным значением скорости света с точностью до 0.3%. Результаты измерений могут рассматриваться в качестве наиболее прямого (и окончательного) доказательства справедливости второго постулата СТО.

Идея нашего эксперимента восходит к С.И. Вавилову, который был озабочен защитой СТО ввиду ожидавшейся в конце 40-х годов прошлого века компании политической атаки на новую физику. Вавилов поручил своему докторанту А.М. Бонч-Бруевичу [10] подготовить и осуществить прямое измерение скорости света от быстрого атомного пучка. Из-за недостаточных технических возможностей того времени реализовать этот план не удалось (более подробно история вопроса изложена в [7]).

Авторы выражают благодарность оперативному персоналу источника СИ ускорительно-накопительного комплекса Сибирь за помощь в проведении экспериментов, чл.-корр. РАН 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 ЦКП КЦСИиНТ НИЦ "Курчатовский институт".

1. A. Einstein, Ann. der Phys. **17**, 891 (1905).
2. Г. Б. Малыкин, Опт. и спектр. **107**, 624 (2009); **109**, 1018 (2010).
3. W. Ritz, Ann. de Chim. et de Phys. Ser. 8, **13**, Février., 145 (1908).
4. W. Kantor, JOSA **52**, 978 (1962).
5. О. М. Дуплищева, И. И. Шпирка, *Результаты экспериментальных исследований М. И. Дуплищева закономерностей явления излучения и распространения света в Пространстве*, Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2008, 35 с.
6. A. Filipchenko, V. Korchuganov, Yu. Krylov et al., NIM, A **448**, 8 (2000).
7. Е. Б. Александров, П. А. Александров, В. С. Запасский и др., УФН **181**, № 12 (2011).
8. W. de Sitter, Phys. Zeit. **14**, 29 (1913).
9. Е. Б. Александров, *Астроном. журн.* **42**, 676 (1965).
10. А. М. Бонч-Бруевич, УФН **171**, 1087 (2001).