

Двадцать пять лет баллистическому эксперименту с фотонами синхротронного излучения в электронном накопителе и измерению скорости света

А.С. Мазманишвили
Харьковский государственный политехнический университет
Украина, 61002, Харьков, ул.Фрунзе 21
e-mail: mazmani@kpi.kharkov.ua

Содержание

1. Введение	124
2. Эксперимент с использованием двух фотоумножителей	125
3. Эксперимент с использованием электронно-оптического преобразователя	126
4. Эксперимент с изменением плотности остаточного газа в камере накопителя	128
5. Заключение	128
6. Послесловие	129

Abstract

This paper is written on the ballistic experiment description, which was the experimental testing of the second tenet of the special theory of relativity that postulates that the speed of light is independent from the emitted radiation velocity. This tenet was not known to have been supported by the decisive experiment earlier. The employed experimental techniques are described. Results of two experiments are given on the direct measurement of the relativistic electron-emitted synchrotron radiation photon propagation velocity in the storage ring and comparison of the synchrotron radiation photon times-of-flight under the conditions of the atmospheric pressure and high vacuum. The measurement results do not agree with the ballistic light propagation hypothesis, corresponding to the second tenet of the special theory of relativity.

1. Введение

Наряду со всеобщем признанием специальной теории относительности (СТО) и подтверждением в опытах её следствий, со времени основания СТО было достаточно количество предложенных и реализованных экспериментов по проверке постулатов, лежащих в основе теории [1-6 и др.]. Указанный рост количества этих экспериментов свидетельствует не только о возросшем желании проверить в опыте фундаментальные утверждения современной физики (что необходимо и из принципиальных соображений) и не только о появлении новых экспериментальных средств и методов, но, в первую очередь, о том, что ни один из проведенных ранее экспериментов не является решающим, т.е.

прямым по своему содержанию и способным выдержать любую критику относительно каких бы то ни было побочных эффектов и явлений.

В связи с неудачами провести решающие эксперименты были предложены всевозможные обходные пути, из которых наибольшее распространение получили:

- заменить постулаты Эйнштейна другими постулатами, легко проверяемыми на опыте, например, зависимостью $\Delta E = \Delta m c^2$ [7]; при этом игнорируется тот факт, что указанную зависимость можно легко вписать не только в СТО, но и в другие гипотезы [2];
- не расходовать силы на проверку постулатов, а удовлетвориться тем, что следствия из СТО подтверждаются практически во всех из-

вестных явлениях. Это предложение, пожалуй, наиболее распространено (см., например, [1]) несмотря на его нестрогость и на существование ряда спорно объясняемых, так называемых "парадоксов" СТО и некоторых физических явлений, пока не объяснимых с позиций этой теории, например, смещение периастра двойных звезд [2]. При этом все, конечно, понимают, что подлинно решающие эксперименты в этом вопросе необходимы и они будут в конце концов поставлены; тем более, что принципиальные затруднения ныне существуют только для проверки первого постулата СТО, а для проверки второго постулата возможны эксперименты, которые с полным правом могут считаться решающими.

Настоящая работа посвящена экспериментальной проверке второго постулата СТО о независимости скорости света от скорости источника излучения. В ней излагаются результаты экспериментов по измерению скорости распространения синхротронного излучения (СИ) релятивистских электронов с энергией 70 МэВ. В этом опыте используются, вероятно, наиболее наглядные и бесспорные процессы (излучение электронных пучков, движущихся со строго известными параметрами), а побочные явления, снижающие принципиальную "чистоту" эксперимента, исключены. К таким явлениям можно отнести:

- погашение скорости при переизлучении света на пути к приемнику [2,8,9];
- использование не до конца объясненных или гипотетических эффектов, например, некоторых видов распада элементарных частиц [4];
- использование, явное или неявное, самого второго постулата при логических заключениях.

Так, в принципиально правильном опыте по измерению скорости распространения фотонов с энергией в несколько электронвольт и 7 ГэВ, проведенном в Стенфордском ускорителе [5], эти побочные явления могли возникнуть, на наш взгляд, из-за чрезвычайно большой (более 1300 метров) длины пролета фотонов по трубе ускорителя. Это неизбежно должно было привести к тому, что в оптическом диапазоне на призму, выводящую излучение из трубы, по крайней мере, частично приходили не прямые фотоны, а переотраженные от стенок и структур трубы. Кроме того, здесь не исключено погашение скорости фотонов за счёт их переизлучения на остаточном газе в трубе (см. ниже численные оценки).

Поэтому в опыте, проведенном на накопителе Н-100 УФТИ [10], были предусмотрены специальные меры, исключаяющие возможность неоднозначного

толкования полученных результатов. Главными из этих мер были:

- а) обеспечение максимальной простоты и наглядности схемы;
- б) проведение опыта в нескольких (в трёх) вариантах;
- в) использование оптических систем небольшой длины;
- г) исключение возможности переизлучений и переотражений всех видов.

В работе была поставлена следующая задача:

используя синхротронное излучение релятивистских электронов в накопителе, непосредственно измерить значение v_f скорости распространения фотонов СИ: равняется ли оно $v_f = c$, как это принято в специальной теории относительности [11], или $v_f = c + v$, т.е. превышает c на v , как это следует из баллистической гипотезы Ритца [12,13]. Здесь v скорость движущегося источника релятивистских электронов. С этой целью в работе фиксировались временные интервалы (и их разность) через некоторые фиксированные пространственные промежутки пролета фотонных пучков, непосредственно испущенных электронами, и фотонных пучков, претерпевших переизлучение.

2. Эксперимент с использованием двух фотоумножителей

Опишем первый вариант баллистического эксперимента. Блок-схема эксперимента с использованием двух фотоумножителей приведена на рис. 1.

Как указывалось выше, опыт предусматривает использование двух фотонных каналов разной пролетной длины. Релятивистский электронный пучок, обращающийся по орбите в камере накопителя 1, испускает в магнитных квадрантах 2 фотоны синхротронного излучения. Поток фотонов СИ в этом эксперименте имел возможность распространяться по двум каналам.

По каналу I излучение электронного пучка следует внутри трубы длиной $L_1 = 580$ см [13], вакуумно соединенной с камерой накопителя тонкой стеклянной пластинкой, причем в этой трубе установлены диафрагмы малых радиусов с целью исключить излучение, отраженное от внутренних стенок. Достигнув выходного кварцевого стекла 4а,

поток фотонов СИ канала I переизлучается и падает в фотоумножитель 5a.

По каналу II фотоны СИ, испущенные электронным пучком в следующем квадранте накопителя (через интервал $L_2 = 205 \text{ см}$), попадают на поворотное зеркало 3, герметически отделенное от вакуумной камеры тонкой стеклянной пластинкой 4б. Далее фотоны канала II пролетают трубу длиной $L_3 = 210 \text{ см}$ (при атмосферном давлении) и проходят стекло. Претерпев на всех этих элементах переизлучения, фотоны СИ регистрируются вторым фотоумножителем 5б.

Сигналы с обоих фотоумножителей после усиления 10, подавались на вход стробоскопического осциллографа 6. В одном варианте запуск развертки осциллографа осуществлялся с помощью ВЧ-генератора 7 накопителя 8. В другом варианте осциллограф синхронизовался самими исследуемыми сигналами от фотоумножителей. Для идентификации временных интервалов и очередности следования сигналов использовалась линия задержки 9.

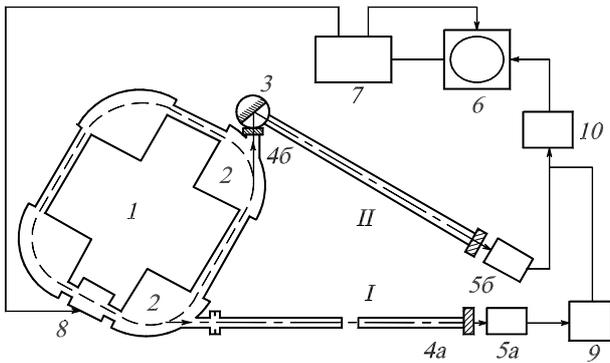


Рис. 1. Схема баллистического эксперимента с использованием двух фотоумножителей.

Из схемы этого опыта вытекает, что качественное отличие сигналов канала I и канала II заключается в неодинаковых длинах свободного пролета квантов СИ от места их испускания до мест переизлучения.

Временной интервал, затрачиваемый фотонами на пролет в канале I, равняется

$$\tau_I = L_1/v_f.$$

В то же время аналогичный интервал в канале II составляет

$$\tau_{II} = L_2/v + L_3/c = (L_2 + L_3)/c,$$

поскольку в случае релятивистского электрона, имеющего энергию 70 МэВ, имеем $1 - v/c = 2,5 \cdot 10^{-5}$, что лежит за пределами точности выполненных измерений.

Таким образом, расчетная разность временных интервалов пролета $\Delta\tau = \tau_I - \tau_{II}$ составляет:

- $\Delta\tau = -4,2 \text{ нс}$ (фотоны канала I приходят раньше) — в рамках баллистической гипотезы;
- $\Delta\tau = 5,5 \text{ нс}$ (фотоны канала I приходят позже) — в рамках специальной теории относительности.

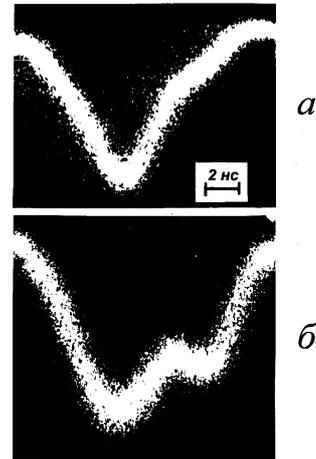


Рис. 2. Осциллограммы сигналов.

На рис. 2 приведены осциллограммы зарегистрированных сигналов. Текущее время на них возрастает слева направо. На верхней осциллограмме 2-а виден сигнал с фотоумножителя 5б (см. рис. 1), который фиксирует фотоны, прошедшие канал II. На нижней осциллограмме 2-б приведены сигналы с обоих фотоумножителей 5а и 5б, совместно наблюдаемые на осциллографе 6. Видно, что сигнал, приходящий по каналу II, — первый, и что сигнал I отстает на 5,5 нс. Предварительно отобранная пара фотоумножителей ФЭУ-36 использовалась в этом эксперименте в одинаковых условиях, допускающих повторение опыта с перестановкой их местами. Рабочий вакуум в камере накопителя составлял $1 \cdot 10^{-7} \text{ мм Нг}$.

Результаты измерений, проведенных в этом эксперименте, говорят в пользу СТО и не согласуются с баллистической гипотезой.

3. Эксперимент с использованием электронно-оптического преобразователя

Перейдем ко второму варианту баллистического эксперимента. В первом вышеописанном эксперименте фотоны СИ регистрировались с помощью двух детекторов-фотоумножителей. С целью одновременного наблюдения обоих сравниваемых световых пучков также был поставлен эксперимент с

использованием электронно-оптического преобразователя (ЭОП'а). Блок-схема опыта представлена на рис. 3.

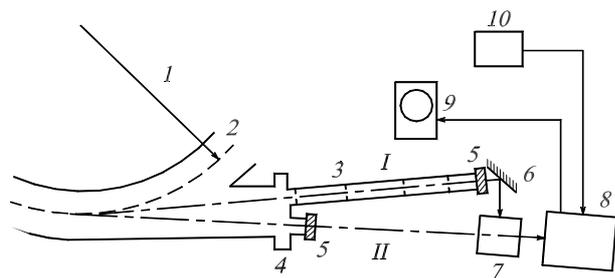


Рис. 3. Схема баллистического эксперимента с использованием электронно-оптического преобразователя.

Здесь также было предусмотрено использование двух фотонных каналов. Электронный пучок, обращающийся по орбите накопителя 1, в одном квадранте испускает по касательной к своей траектории 2 фотоны СИ, которые имеют возможность распространяться по двум каналам.

По каналу I фотонный пучок следует по трубе 3 длиной $L = 100$ см, вакуумно соединенной с камерой накопителя, причем внутри этой длинной трубы также установлены диафрагмы малого радиуса для устранения света, отраженного от её стенок. Достигнув кварцевого стекла 5, фотоны СИ переизлучаются и после поворота на зеркале 6 попадают на полупрозрачную отражающую призму 7.

По каналу II фотонный пучок, пройдя короткую трубу 4, сразу попадает на кварцевое стекло 5. После переизлучения на этом стекле пучок II, распространяясь в атмосфере, также достигает призмы 7 и вместе с первым пучком с помощью объектива фокусируется на фотокатоде ЭОП'а 8. ЭОП был синхронизирован от ВЧ-генератора накопителя 10, а видеосигналы регистрировались на осциллографе 9 [15]. Разность времен пролета $\Delta\tau = \tau_I - \tau_{II}$ в этом опыте (с учетом расстояния $l = 15$ см, между зеркалом 6 и призмой 7) составляет:

- $\Delta\tau = -1,16$ нс (фотоны канала I приходят раньше) — в рамках баллистической гипотезы;
- $\Delta\tau = l/c = 0,50$ нс (фотоны канала I приходят позже) — в рамках специальной теории относительности.

Качественное различие каналов I и II в этом эксперименте, как и в предыдущем, заключается в неодинаковой длине свободного пролета фотонов СИ от места их испускания до мест переизлучения. Поскольку база составляет $L = 100$ см, то разность временных интервалов пролета, следующая из баллистической гипотезы, должна равняться $L/2c = 1,66$ нс.

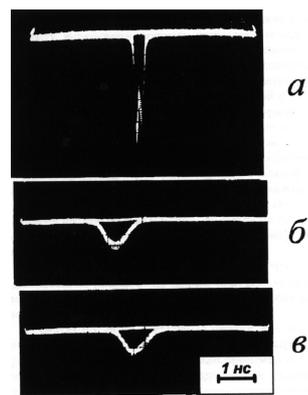


Рис. 4. Осциллограммы сигналов.

На рис. 4 представлены осциллограммы наблюдаемых сигналов.

На верхней осциллограмме рис. 4-а приведены сигналы от обоих каналов, регистрируемые ЭОП'ом в режиме без развертки; сигнал от канала II более интенсивен. Поскольку условие совмещения изображений на фотокатоде ЭОП'а требует длительной визуальной постановки зеркала 6 и призмы 7, в эксперименте ограничились их приближенным совмещением. Приборная разность хода, обусловленная этим несовмещением, как видно из осциллограммы рис. 4-а, составляет $\tau = 0,15$ нс. Разрешающая способность прибора не хуже $0,10$ нс.

На следующих двух осциллограммах рис. 4 приведены сигналы синхротронного излучения, испускаемого электронным пучком и регистрируемого в канале II (рис. 4-б) и в канале I (рис. 4-в). Из них видно, что сигнал II приходит раньше и что, с учетом времени задержки τ , фотонный пучок, приходящий по каналу I, отстает на $0,50$ нс. Этот дополнительный временной интервал он затрачивает на прохождение пути от зеркала до призмы (см. рис. 3). Калиброванная линия задержки в тракте развертки ЭОП'а была использована для установления очередности следования сигналов и контроля временных интервалов. Рабочий вакуум в камере накопителя составлял $1 \cdot 10^{-6}$ мм Нг.

На осциллограмме 5-а рис. 5 показан калибровочный сигнал от развертки теста — точечного источника света. Расстояние между максимумами составляет 6 нс. На осциллограмме 5-б приведен суммарный сигнал от обоих каналов. На рис. 5-в изображена форма сигнала для того случая, когда фотоны в вакууме распространялись бы до своего переизлучения со скоростью $v_f = c + v$.

Результаты измерений, проведенных в этом эксперименте, также, как и в предыдущем, говорят в пользу СТО и не согласуются с баллистической гипотезой.

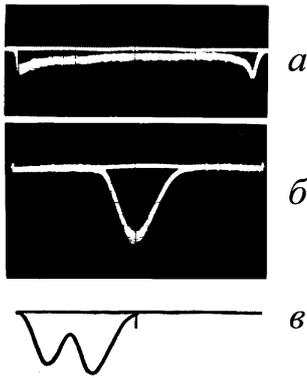


Рис. 5. Осциллограммы сигналов.

4. Эксперимент с изменением плотности остаточного газа в камере накопителя

В проведенных выше экспериментах на тех пространственных промежутках, которые использовались на время-пролетных измерениях, не было абсолютного вакуума. Естественным в этой связи является вопрос о переизлучении испущенных фотонов на атомах остаточного вакуума в камере накопителя. Более того, в случае значительного показателя переизлучения на участке, примыкающем к месту испускания фотонов, проведенные выше эксперименты лишились бы своего идеологического основания, поскольку по исходному предположению [2, 15] скорость распространения переизлученных фотонов считается известной и равной c .

Поэтому был поставлен следующий эксперимент. В камере накопителя изменялось давление от $2 \cdot 10^{-8}$ мм Hg до $8 \cdot 10^{-6}$ мм Hg. При этом с помощью ЭОП'а проводилось наблюдение за сигналом, образованным фотонным пучком в канале П (см. рис. 3). Если изменение числа материальных частиц в камере накопителя на два порядка обуславливает полное переизлучение, то согласно баллистической гипотезе видеосигнал должен был сместиться на $\Delta\tau = 0,83$ нс.

В результате наблюдений установлено, что видеосигнал не меняется по форме (при постоянном накопленном токе) и его положение во времени неизменно.

С целью получить численные оценки для такого эксперимента на ЭВМ был выполнен моделирующий расчет. В пренебрежении временем переизлучения фотонов, был промоделирован процесс пролёта светового пучка на условном расстоянии $L = 100$ см. Распределение пучка до влета в этот промежуток было выбрано гауссовым со средним квадратическим отклонением 1 нс.

Гистограммы, иллюстрирующие результат расчета, приведены на рис. 6 для случаев:

1. отсутствие переизлучения;

2. промежуточный случай;

3. погашение скорости фотонов у места их генерации.

Эти три случая соответствуют изменению числа N актов переизлучения (10^{-1} ; 1; 10) соответственно.

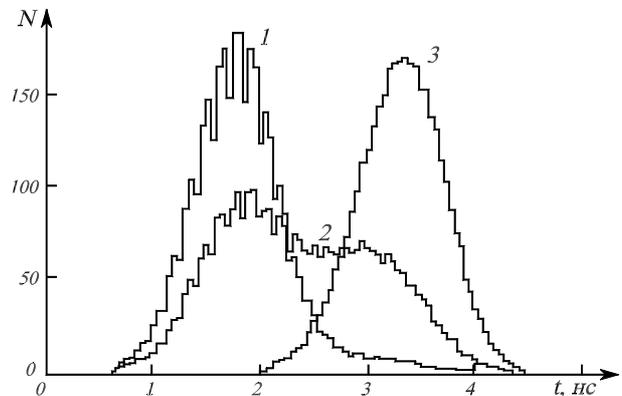


Рис. 6. Расчетные гистограммы временных импульсов, прошедших расстояние $L = 100$ см. 1 — $N = 0$; 2 — $N = 1$; 3 — $N = 10$.

С другой стороны, это число равно $N = n\sigma L$, где n — плотность атомов; σ — сечение переизлучения на этих атомах. Поскольку синхротронное излучение достаточно широкополосно, то здесь возможно воспользоваться численными оценками, полученными Биберманом в результате обработки данных, следующих из экспериментов Земанского и Бейтса [8] (в своей работе Л.М. Биберман называет величину σ "сечением тушения"), а именно $\sigma = 6 \cdot 10^{-16}$ см². Отсюда следует, что среднее число актов переизлучения в первом проведенном эксперименте не превышало $6 \cdot 10^{-3}$, а во втором эксперименте — не превышало $8 \cdot 10^{-3}$. С учетом проведенного эксперимента с изменением давления в камере накопителя (от восьмого порядка до шестого) для среднего числа актов переизлучения имеем $N \leq 6 \cdot 10^{-5}$.

В эксперименте [5] эта величина при длине пролётного промежутка $L = 1,3 \cdot 10^5$ см и давлении в вакуумной камере $5 \cdot 10^{-7}$ мм Hg ([16], стр. 888) составила $N = 2,4$; что достаточно (см. рис. 6) для полного переизлучения фотонов. Это побочное явление снижает достоверность заключения, приведенного в работе [6], о чем упоминалось во Введении.

5. Заключение

Положения теории относительности были сформулированы Эйнштейном около 90 лет назад. Практически сразу же после появления первой его статьи были начаты экспериментальные исследования с целью проверки эффектов, предсказываемых его теорией. Такого рода эксперименты вы-

полнялись сразу после Первой мировой войны [1, 17], внимание к ним и постановка их продолжается и по настоящее время.

Цель этой работы состояла в экспериментальной проверке второго постулата СТО о независимости скорости света от скорости источников излучения.

Основные выводы можно сформулировать следующим образом:

1. Выполнено прямое измерение скорости распространения фотонов СИ релятивистских электронов;
2. Проведенные опыты были выполнены при отсутствии явлений, снижающих принципиальную чистоту эксперимента;
3. Результаты измерений не согласуются с баллистической гипотезой распространения света;
4. Результаты измерений соответствуют второму постулату специальной теории относительности.

Физиков всегда будут волновать основы, заложенные в их теории [1, 3, 7, 11, 12, 17]. Хотя исходные предположения этой теории будут представляться безупречными, решающий эксперимент, *experimentum lucifera* и *experimentum crucis* — это наблюдаемый факт, результат которого их успокоит. Изложенный в настоящей работе эксперимент, по мнению его исполнителей, относится к решающим.

Основную часть работы по организации и проведению баллистического эксперимента выполнили А.С. Мазманишвили, Л.В. Репринцев, П.И. Гладких и П.И. Филиппов.

За разнообразного вида поддержку необходимо поблагодарить: В.П. Козина, И.Н. Лебедева, Ю.В. Черкасского — за помощь в подготовке и проведении экспериментов, Ю.Н. Григорьева, И.С. Гука, Н.Н. Насонова, Н.Н. Наугольного, А.П. Рекало, Ю.П. Степановского — за полезные и критические обсуждения, проведенные в ходе выполнения работ, И.А. Гришаева, Н.И. Мочешникова — за доброжелательное отношение к работе в целом, Д.И. Адейшвили — за искренний интерес и непредумышленные действия, разрушительно повлиявшие на первоначальную интерпретацию результатов.

6. Послесловие

Прошло немногим более двадцати пяти лет с того романтического времени, когда проводился баллистический эксперимент. По УФТИ тогда ползли вести и слухи об "опровержении" специальной теории относительности. В 3-е здание на накопитель

Н-100 стали приходить разные начальники и даже комиссии (сенсации ожидались). Потом все стихло — сенсации не произошли.

Сейчас я понимаю, что тогда жил счастливо. Я думал о решающем опыте, ставил баллистический эксперимент — измерение скорости распространения фотонов, испущенных релятивистскими электронами. Со мной были друзья. Знаю, что и Петр Иванович Гладких и Леонид Владиславович Репринцев с тоской вспоминают о том времени. И дело не просто в том, что мы были и моложе и веселее. Дело в том, что тогда накапливались рекордные (больше всех в мире) электронные токи в накопителе Н-100, регистрировалась интерференция одиночных фотонов синхротронного излучения и измерялась скорость распространения излучения релятивистских источников, разрабатывался проект накопителя-растяжителя на 2 ГэВ, исследовалась когерентность излучения релятивистских электронных пучков, изучалось и применялось синхротронное излучение этих пучков и многое другое. В общем, было дело, была физика, была работа. Увы, оказалось, что это великолепие хрупко и неустойчиво — пронёсся смерч, ураган, долговременный тайфун. Сейчас нет накопителя Н-100 (снят, разобран и уничтожен, шестиметровый медный резонатор исчез), закрыто само 3-е здание и давно выросли бурьяны у его входа, та *благородная физика* осталась лишь на бумаге и в памяти.

Петр Иванович являлся очень обаятельным и очень культурным человеком. Внешность его была шалашинская. Будучи полковником артиллерии и находясь на армейской службе в Москве, Петр Иванович живо и по существу интересовался физикой (в частности, он решил все задачи из известного сборника Р. Фейнмана и даже нашел в тексте этого сборника ошибки). Баллистический опыт как решающий эксперимент для СТО предлагался им в различные ведомства и в различных вариантах, одним из которых был космический (спутники, большие пролётные базы), другой — с использованием фотонов синхротронного излучения релятивистских электронов в накопителе.

Петр Иванович направлял письма со своими предложениями, обсуждал баллистическую тематику со многими физиками. Как он мне потом рассказывал, обратиться в УФТИ ему посоветовал В.Л. Гинзбург, от которого он узнал о состоянии электронного накопителя Н-100. Когда его письмо пришло в УФТИ (в дирекцию), мне было поручено подготовить ответ, что я и выполнил, ссылаясь при этом в тексте на "общеизвестные физические истины". На обороте листа с текстом была указана моя фамилия как его исполнителя. Следующее письмо Петра Ивановича было направлено уже непосредственно мне. Благодаря своей энергии и энтузиазму Петр Иванович оказался в УФТИ, уговорил меня подготовить то, что называется аванпроект.

Здесь обнаружилось, что такого рода опыт нужно проводить на малых и даже сверхмалых накопленных токах (при этом продольный размер пучка также минимален, т.е. точность временных измерений улучшается). В то время проблемой было накопить большие токи (амперы), ну а малые токи копились без особых затруднений.

Довольно быстро Петр Иванович нашел единомышленников — в результате баллистический опыт был спланирован, подготовлен и поставлен. Он очень надеялся, что измеренная скорость v_f фотонов СИ окажется равной $v + c$. И не потому, что хотел опровергнуть СТО (я ему повторял, что само существование действующего накопителя электронов подтверждает СТО), а в силу своего темперамента.

Вскоре после выполнения баллистического эксперимента Петр Иванович Филиппов скончался. Мне он подал пример благородного служения научной идее. Эта работа посвящается его памяти.

Принято к публикации
20 марта 2000 года.

Список литературы

- [1] Франкфурт У.И., Франк А.М. Оптика движущихся тел. - М.: Наука. - 1972. - 463 с.
- [2] Fox J.G. Evidence Against Emission Theory. // American Journal of Physics, -1965. - V. 33. - P. 1-17.
- [3] Васильев Б.В. Об экспериментальной проверке постулата изотропности скорости света. // Препринт ОИЯИ. - 1975. - N P13-9411.
- [4] Filippas T.A., Fox J.G. Velocity of Gamma Rays from a Moving Source. // Phys. Rev. - 1964. - V. 135, N B4. - P. 1173-1181.
- [5] Brown B.C., Masek G.E., Maung T., Miller E.S., Ruderman H., Vernon W. Experiment Comparison of the Velocity of eV (Visible) and GeV Electromagnetic Radiation. // Phys. Rev. Letters. - 1964. - V. 30, N 16. - P. 763-768.
- [6] Неменов Л.Л. Осцилляции интенсивности в пучках релятивистских позитрониев и их применение для проверки специальной теории относительности. // Ядерная Физика. - 1976. - Т. 24, N 2. - С. 319-328.
- [7] Брюллюэн Л. Новый взгляд на теорию относительности. - М.: Мир. - 1972. - 342 с.
- [8] Биберман Л.М. К теории диффузии резонансного излучения. // ЖЭТФ. - 1947. - Т. 17, N 5. - С. 416-429.
- [9] Fox J.G. Experimental Evidence for the Second Postulate of Special Relativity. // American Journal of Physics. - 1962. - V 30. - P. 11-26.
- [10] Григорьев Ю.Н., Гришаев И.А., Довбня А.Н., Зеленчер А.С., Ильин О.Г., Коба И.И., Козин В.П., Кононенко С.Г., Мочешников Н.И., Ракитянский А.А., Репринцев Л.В., Тарасенко А.С., Терехов Б.А., Ткаченко В.Д., Толстой А.Е., Файнзильберг С.Д., Шендерович А.М. Накопитель электронов с энергией 100 МэВ. // Атомная Энергия. - 1967. - Т. 23, N 6. - С. 531-535.
- [11] Эйнштейн А. Сущность теории относительности. - М.: Наука. - 1966. - 878 с. (В Собрании сочинений, Том II, стр. 5-82.)
- [12] Паули В. Теория относительности. - М.:—Л.: ОГИЗ. - 1947. - 196 с.
- [13] Гришаев И.А., Гук И.С., Козин В.П., Мазманшвили А.С., Махненко Л.А., Мочешников Н.И., Тарасенко А.С. Каналы вывода ВУФ излучения на накопителе Н-100. // Приборы и Техника Эксперимента. - 1976. - Т. 6, N 26. - С. 26-27.
- [14] Мочешников Н.И., Репринцев Л.В. Система и методы индикации пучка на накопителе ФТИ АН УССР. В книге "Труды Второго Совещания по ускорителям заряженных частиц". - М.: Наука. - 1972. - Т. 2. - С. 79.
- [15] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. (с. 79.) - М.: Наука. - 1970. - 708 с.
- [16] Neil R.B. The Stanford Two-Mile Accelerator. W.A. Benjamin Inc. N.Y., N.Y. - 1968. - 602 с.
- [17] Фридрихс В.К. Общий принцип относительности Эйнштейна. // УФН. - 1999. - Т. 169, N 12. - С. 1339-1350.