

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

К 110-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ П.А. ЧЕРЕНКОВА

Черенковские спектрометры полного поглощения

Е.И. Малиновский

Представлены достижения учёных Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по развитию методики применения черенковских счётчиков полного поглощения, по созданию детекторов различного назначения и их использованию в экспериментах на ускорителях.

Ключевые слова: электронные пучки, черенковское излучение, черенковские счётчики полного поглощения, энергетическое и пространственное разрешение

PACS numbers: 29.20. – с, 29.40.Ка, 41.60.Вq

DOI: 10.3367/UFNr.0185.2015051.0549

Содержание

1. Введение (549).
 2. Разработка методики спектрометров полного поглощения (549).
 3. Использование черенковских спектрометров в экспериментах на ускорителях (550).
 4. Заключение (552).
- Список литературы (552).

1. Введение

В начале своей научной деятельности (1932 г.) П.А. Черенков, исследуя по заданию его научного руководителя С.И. Вавилова процесс люминесценции растворов урановых солей, наблюдал явление свечения жидкостей под действием γ -лучей, которое по природе отличалось от люминесценции [1]. П.А. Черенковым были исследованы основные свойства открытого им эффекта, что послужило основой для выяснения природы явления (свечения вещества под действием заряженной частицы со сверхсветовой скоростью в среде) и создания теории явления в 1937 г. И.Е. Таммом и И.М. Франком [2].

Вскоре в США Г. Коллинз и В. Рейлинг [3] наблюдали явление на пучке релятивистских электронов и проверили соотношение $\cos \varphi = 1/n$. Следует отметить, что авторы статьи [3] для названия этого излучения впервые использовали термин "излучение Черенкова" (Cherenkov radiation), который стал общепринятым за рубежом (в нашей стране употребляется также термин "излучение Вавилова – Черенкова). Уже тогда П.А. Черенков высказал предложение об использовании открытого излучения для регистрации заряженных частиц — создания черенковских счётчиков. Конечно, для того времени идея каза-

лась слишком оптимистической. И.М. Франк вспоминал, что они вместе с П.А. Черенковым рассматривали (1934 г.) возможность исследования космических лучей по наблюдению излучения в атмосфере. Но оценки показали, что вклад черенковского излучения от космических частиц в свечение ночного неба ничтожно мал. И лишь после разработки промышленностью фотоумножителей идея создания детекторов релятивистских частиц на основе регистрации черенковского излучения стала реальностью.

2. Разработка методики спектрометров полного поглощения

В Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) начиная с 1950-х годов, когда энергии ускоренных частиц достигли нескольких сотен МэВ, начали разрабатываться различные методики, основанные на применении эффекта Черенкова в качестве физического процесса для регистрации электронов и фотонов высоких энергий. В настоящей статье внимание сосредоточено на результатах работ по созданию черенковских спектрометров полного поглощения (ЧСПП), которые успешно использовались при исследованиях в широком спектре экспериментов по физике высоких энергий на ускорителях: С25Р (ФИАН, Троицк, Московская область), У-70 (Институт физики высоких энергий (ИФВЭ), Протвино, Московская область) и HERA (Hadron-Electron Ring Accelerator) (Исследовательский центр ДЕЗИ (DESY), Гамбург, Германия). В ряде случаев выбор ЧСПП оказался решающим для получения положительных научных результатов. Отметим характерные особенности ЧСПП, определяющие их привлекательность для эксперимента:

— высокая эффективность регистрации электронов и фотонов, достигающая практически 100 %;

— возможность измерения энергий регистрируемых частиц. Энергетическое разрешение при этом лежит в диапазоне от 30 % до 2 % при энергиях от 100 МэВ до 50 ГэВ;

Е.И. Малиновский. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский просп. 53, 119991 Москва, Российская Федерация
E-mail: malinov@venus.lpi.troitsk.ru

Статья поступила 24 февраля 2015 г.

— линейная зависимость амплитуды сигнала на выходе спектрометра от энергии регистрируемых частиц;

— высокая селективность в отборе ливнеобразующих частиц;

— пороговые свойства при регистрации нерелятивистских частиц;

— значительно меньшие размеры и вес, чем у спектрометров аналогичного назначения других типов;

— высокая светосила прибора, практически совпадающая с его входной апертурой. Это позволяет создавать многоканальные годоскопические системы, состоящие из отдельных модулей;

— короткая продолжительность вспышки черенковского излучения (порядка нескольких наносекунд), позволяющая использовать спектрометры в схемах быстрой электроники и временной селекции.

Принцип работы черенковского спектрометра полного поглощения можно схематически представить в следующем виде. Энергия регистрируемой частицы (фотон с энергией E_0) благодаря развитию электромагнитного каскада в веществе радиатора распределяется между частицами ливня. Заряженные частицы ливня (электроны и позитроны) при энергии, превышающей порог излучения в веществе радиатора, испускают фотоны черенковского излучения. При соблюдении необходимых методических ухищрений (отсутствие утечки ливня, равномерность светосбора по всему объёму радиатора, линейность тракта регистрации и т.д.) наблюдается пропорциональность в цепочке: энергия регистрируемой частицы – суммарная длина пробега вторичных заряженных частиц – заряд на выходе фотоэлектронного умножителя.

Выбор материала радиатора для черенковского счётчика определяется требованиями конкретного эксперимента. В случае спектрометров полного поглощения, помимо естественного условия его прозрачности в пределах спектра черенковского излучения, необходимым является наличие полного поглощения энергии регистрируемых частиц и при проведении экспериментов на мощных ускорителях дополнительно требуется высокая радиационная стойкость материала радиатора. В середине XX в. отечественная промышленность выпускала свинцовые стёкла ТФ-1, содержащие порядка 50 % окиси свинца и имеющие при этом хорошую прозрачность в диапазоне длин волн света, совпадающем с областью максимума чувствительности фотоумножителей. Радиационная длина X_0 в таких стёклах порядка 2,5 см, а коэффициент преломления $n = 1,65$. Результаты работ по созданию в ФИАНе спектрометров различных конструкций с радиаторами из свинцового стекла ТФ-1 и тяжёлых кристаллов описаны в [4].

3. Использование черенковских спектрометров в экспериментах на ускорителях

В начале 1970-х годов начались исследования, целью которых было создание пучка электронов с энергией до 45 ГэВ на Серпуховском ускорителе для проведения исследований по физике электромагнитных взаимодействий. Необходимым требованием работ было измерение энергии электронов (максимальная энергия частиц в эксперименте возросла в несколько раз по сравнению с энергетическим диапазоном проводимых исследований на ускорителях) с высокой точностью и максимально

возможным подавлением фона адронов. В этой ситуации чрезвычайно актуальными оказались наработки по развитию методики спектрометров полного поглощения для регистрации электронов и фотонов с энергией в ГэВ-ной области. Точность измерения энергии обеспечивалась очень важной характеристикой детектора — его амплитудным разрешением $R = \Delta E/E$.

Основным контрольным элементом установки для вывода электронного пучка являлся составной черенковский спектрометр, представляющий собой комбинацию двух спектрометров: спектрометра с радиатором из стекла ТФ-1 диаметром 300 мм и толщиной 260 мм и стоящего перед ним спектрометра с радиатором из кристалла КРС-6 диаметром 150 мм и толщиной 110 мм. Материал монокристалла КРС-6, представляющий собой твёрдый раствор TiCl (80 %) и TlBr (20 %), обладает уникальными физическими характеристиками: плотность $\rho = 7,0 \text{ г см}^{-3}$, радиационная длина $X_0 = 0,94 \text{ см}$, показатель преломления $n = 2,2$, что, наряду с высокой прозрачностью, делает его весьма привлекательным для использования в качестве радиатора черенковских счётчиков. Такая схема размещения счётчиков позволила обеспечить полное поглощение энергии регистрируемых частиц в широком диапазоне энергий (до 45 ГэВ) и получить энергетическое разрешение на уровне нескольких процентов [5].

На рисунке 1 приведены энергетические спектры отдельных элементов и суммарный спектр составного спектрометра при энергии 31 ГэВ, энергетическое разрешение которого составило $\sigma \approx 2\%$. В то же время конструкция спектрометра с монорадиатором из стекла ТФ-1, достаточным для поглощения ливней с энергией $\sim 40 \text{ ГэВ}$ ($300 \times 520 \text{ мм}^2$), показала худшее энергетическое разрешение из-за поглощения черенковских фотонов веществом радиатора.

На созданном пучке электронов было проведено измерение полного поперечного сечения адронного поглощения фотонов на протоне и нейтроне [6], а также исследование фоторождения ρ^0 -мезонов с использованием системы мечения фотонов, в которой фотоны метились по энергии с помощью системы черенковских спектрометров полного поглощения с радиаторами из свинцового стекла высокой прозрачности [7]. Применение этих детекторов позволило подавить интенсивный

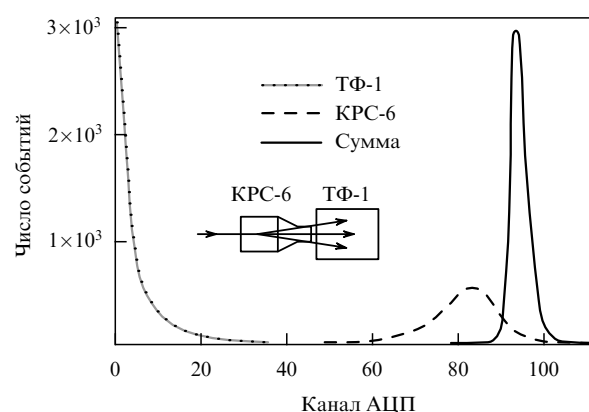


Рис. 1. Энергетические спектры, полученные элементами составного черенковского спектрометра на пучке электронов с энергией $E_e = 31 \text{ ГэВ}$ на ускорителе У-70 ИФВЭ. АЦП — аналого-цифровой преобразователь.

фон мюонов, затруднявший проведение измерений, и получить пучок меченых фотонов высокой интенсивности.

Область применения черенковских спектрометров с радиаторами из свинцового стекла, созданных в ФИАНе, была расширена их применением в составе широкоапертурного бесфильмового спектрометра универсального типа БИС-2, предназначенного для работы на нейтральном канале Серпуховского ускорителя¹. Исследования осуществлялись Международным научным сотрудничеством БИС (Объединённый институт ядерных исследований – Центральный институт физических исследований (Венгрия), Физический институт Чехословацкой академии наук, Институт ядерных исследований и ядерной энергетики Болгарской академии наук, Тбилисский государственный университет, ФИАН), которое ставило своей целью поиск новых частиц с ненулевым квантовым числом очарование.

Электромагнитный детектор установки БИС-2, задачей которого было определение энергии и угла вылета электрона из области мишени, представлял собой 140-канальный годоскоп, состоящий из модулей черенковских спектрометров с радиаторами из свинцового стекла размерами $100 \times 100 \times 350$ мм³, характеристики которых приведены в работе [8]. Основные параметры годоскопа подробно описаны в работе [9]. Если энергетическое разрешение спектрометра показало характерную зависимость для аналогичных детекторов $\sigma = 10/\sqrt{E_e}$, то на пространственное разрешение повлияли большие размеры входной грани модуля, что привело к существенной зависимости величины разрешения от расстояния между точкой попадания и центром соответствующего модуля:

область центра модуля (порядка 20×20 мм) — $\sigma \approx 9$ мм;
остальная зона входной грани — $\sigma \approx 5$ мм.

В 1992 г. были начаты исследования на ускорителе — коллайдере HERA (DESY), который обеспечивал столкновение пучков протонов с энергией 820 ГэВ и электронов с энергией 27 ГэВ. Сотрудниками ФИАНа, которые принимали участие в этой работе, была предложена методика измерения светимости ускорителя, основанная на регистрации процесса тормозного излучения, возникающего в ер-столкновениях. Регистрация тормозных фотонов и рассеянных электронов осуществлялась двумя годоскопами черенковских счётчиков полного поглощения [10]. Конструкция одного из годоскопов (фотонного, 5×5 модулей с радиаторами размерами $20 \times 20 \times 220$ мм³) представлена на рис. 2.

Электронный спектрометр состоял из 49 модулей с размерами радиаторов $22 \times 22 \times 220$ мм³. В качестве материала радиаторов этих счётчиков были использованы ранее хорошо изученные фиановской группой монокристаллы КРС-15, обладающие повышенной радиационной стойкостью. Исследование характеристик отдельных модулей и сборок 4×4 и 9×9 проводилось на пучках электронов синхротрона С-25Р (диапазон энергий 400 – 650 МэВ), в DESY (1,5 – 6 ГэВ) и на электронном пучке с энергией 28 ГэВ протонного синхротрона У-70 ИФВЭ в Протвино. Зависимость энергетического разрешения прибора от энергии регистрируемых частиц показана на рис. 3. Результаты расчёта и точность измерения координат точки попадания частиц с энергией

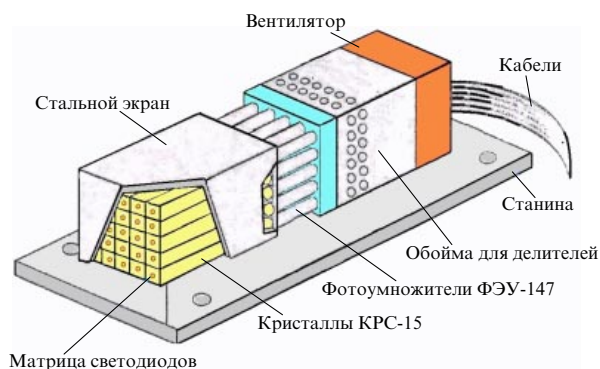


Рис. 2. Схема конструкции годоскопа черенковских модулей полного поглощения, использовавшегося в системе измерения светимости установки Н1 на коллайдере HERA.

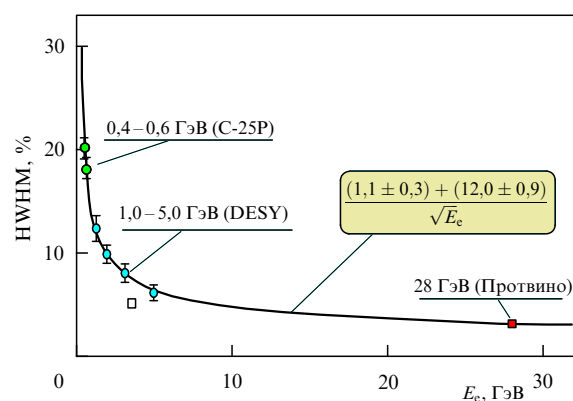


Рис. 3. Результаты измерения зависимости энергетического разрешения модуля черенковского спектрометра полного поглощения, использовавшегося в системе мониторинга светимости Н1Lumi, от энергии регистрируемых электронов в диапазоне от 0,5 до 28 ГэВ. HWHM (Half Width at Half Maximum) — полуширина на полувысоте.

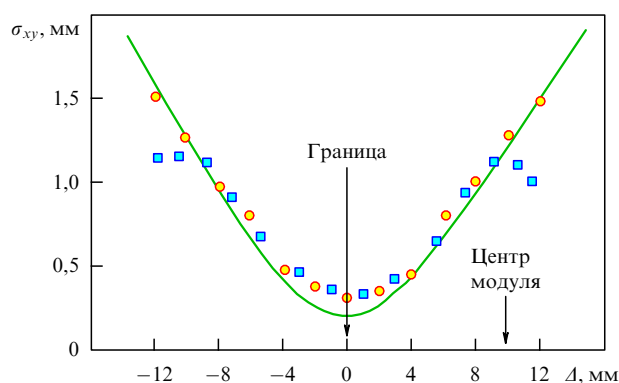


Рис. 4. Пространственное разрешение черенковского годоскопа из модулей КРС-15, полученное в измерениях на электронном пучке с энергией $E_e = 28$ ГэВ. Кривая — результат моделирования пространственного разрешения сборкой из двух модулей КРС-15 размером $22 \times 22 \times 200$ мм³. Кружками показаны экспериментальные данные для сборки из двух модулей, квадратами — экспериментальные данные для сборки из девяти модулей. L — расстояние от оси до границы между модулями.

электронов $E_e = 28$ ГэВ во входную грань прибора, которые приведены на рис. 4, показали возможность достижения пространственного разрешения черенковского годоскопа на уровне 0,5–0,7 мм.

¹ БИС — аббр. от бесфильмовый искровой спектрометр.

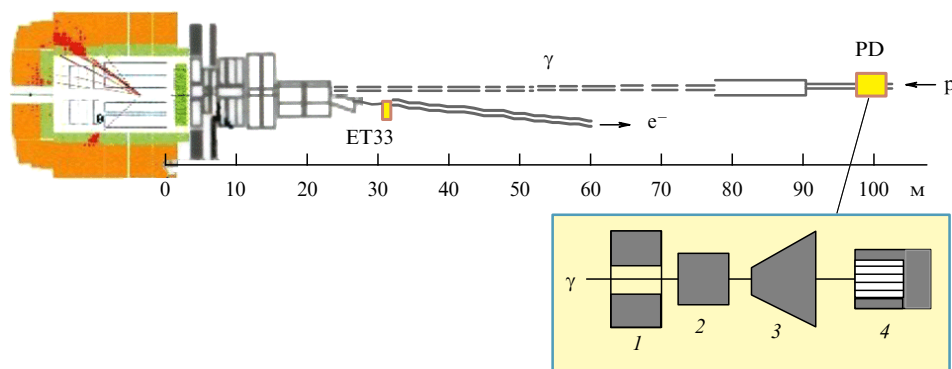


Рис. 5. Схема расположения детекторов монитора светимости H1 Lumi установки H1 на ускорителе HERA. ET33 — черенковский годоскоп для регистрации рассеянных электронов, PD — годоскоп для регистрации фотонов вместе с радиационной защитой (общей толщиной $3X_0$), состоящей из коллиматора 1, поглощающего фильтра 2 и антисовпадательного черенковского водяного счётчика 3.

К моменту запуска ускорителя HERA группой ФИАНа был смонтирован и отлажен комплекс аппаратуры монитора светимости детектора H1, схема которого показана на рис. 5. Счётчик ET33, предназначенный для регистрации электронов, представлял собой сборку из 49 черенковских модулей, а в состав фотонного детектора PD входила сборка из 25 модулей, перед которой размещалась система подавления радиационного фона от синхротронного излучения.

При создании указанных спектрометров повышенное внимание уделялось не только традиционным параметрам (энергетическому и пространственному разрешению, быстродействию), но и радиационной стойкости как радиаторов черенковского излучения, так и материалов и компонентов (на уровне 10^6 Гр), применяемых при конструировании спектрометров [11, 12]. Детальное описание работы монитора светимости детектора H1 на ускорителе HERA дано в [13]. Характеристики детекторов позволяли измерять величину светимости с точностью 1,5 % в процессе мониторинга и 1,2 % после введения поправок в процессе офлайн-обработки. За период 1993–2007 гг. сотрудничеством H1 опубликовано 140 работ, выполненных на ускорителе HERA при непосредственном участии группы ФИАНа.

4. Заключение

Сотрудниками отдела физики высоких энергий ФИАНа (ранее — лаборатории фотомезонных процессов) — подразделения, руководимого П.А. Черенковым, за вторую половину XX в. была выполнена серия уникальных работ по применению черенковского излучения для регистрации релятивистских частиц. Эти работы содер-

жали новейшие идеи как создания новой методики измерений в физике высоких энергий, так и её реализации в процессе создания различных конструкций черенковских счётчиков полного поглощения и их применения в исследованиях на пучках отечественных и зарубежных ускорителей. В ряде случаев были достигнуты рекордные параметры характеристик детекторов (энергетического и пространственного разрешения), а их использование в эксперименте оказалось решающим в получении положительных научных результатов.

Список литературы

1. Черенков П А *ДАН СССР* **2** 451 (1934); Cherenkov P A *C.R. Acad. Sci. USSR* **2** 451 (1934); Черенков П А *УФН* **93** 385 (1967)
2. Тамм И Е, Франк И М *ДАН СССР* **14** 107 (1937); Tamm I E, Frank I M *C.R. Acad. Sci. USSR* **14** 107 (1937); Тамм И Е, Франк И М *УФН* **93** 388 (1967)
3. Collins G B, Reiling V G *Phys. Rev.* **54** 499 (1938)
4. Белоусов А С и др. "Черенковские спектрометры полного поглощения", Препринт № 100 (М.: ФИАН, 1973)
5. Белоусов А С и др. *ПТЭ* (2) 33 (1973)
6. Белоусов А С и др. *Труды ФИАН* **143** 56 (1983)
7. Говорков Б Б и др. *ПТЭ* (4) 39 (1981)
8. Русаков С В и др. "Характеристики элемента черенковского калориметра для электронов, позитронов и гамма-квантов высоких энергий", Препринт № 148 (М.: ФИАН, 1976)
9. Арефьев В А и др. "Бесфильмовый спектрометр БИС-2 и его физические характеристики", Препринт № 1-80-644 (Дубна: ОИЯИ, 1980)
10. Андреев В Ф и др. "Детекторы электронов и фотонов монитора светимости установки H1", Препринт № 32 (М.: ФИАН, 1992)
11. Baranov P S et al. "Radiative resistance of material used in scintillation and Cherenkov counters", Preprint No. 53 (Moscow: LPI, 1996)
12. Baranov P S et al. "Radiation hardness of heavy monocrystals KRS, NBW, PWO", Preprint No. 53 (Moscow: LPI, 1999)
13. Abt I et al. (H1 Collab.) *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **386** 310 (1997)

Total absorption Cherenkov spectrometers

E.I. Malinowski

Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Leninskii prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation

E-mail: malinov@venus.lpi.troitsk.ru

A short review of works done with Cherenkov detectors in laboratories of Lebedev Physical Institute for 50 years is presented. The report consider some issues concerning the use of the total absorption Cherenkov counters on the basis lead glass and heavy crystals in experiments at accelerators.

Keywords: electron beams, Cherenkov radiation, total absorption Cherenkov counters, spatial and energy resolution

PACS numbers: **29.20**, – c, 29.40.Ka, 41.60.Bq

Bibliography — 13 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **185** (5) 549–552 (2015)

DOI: 10.3367/UFNr.0185.2015051.0549

Received 24 February 2015

Physics – Uspekhi **58** (5) (2015)