

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

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

Применение черенковских счётчиков в экспериментах на ускорителях для идентификации частиц

С.П. Денисов

Кратко рассмотрены основные свойства излучения Черенкова и различные типы черенковских счётчиков, используемых для идентификации релятивистских частиц в опытах на ускорителях. Приведены примеры применения черенковских счётчиков в конкретных экспериментах. Особое внимание уделено роли черенковских счётчиков в обнаружении антиядер, включая открытие антипротона.

Ключевые слова: частица, излучение, счётчик, установка, ускоритель, фотон, протон, антипротон, антитритий, антигелий

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

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201505h.0515

Содержание

1. Введение (515).
 2. Основные свойства черенковского излучения (515).
 3. Черенковские счётчики (516).
 4. Роль черенковских счётчиков в открытии антиядер (518).
 5. Применение черенковских счётчиков в других экспериментах (519).
 6. Заключение (520).
- Список литературы (520).

1. Введение

Идентификация долгоживущих заряженных частиц, т.е. определение их характеристик, прежде всего массы, — одна из важнейших и сложнейших задач экспериментальной физики высоких энергий (долгоживущими в настоящей статье считаются частицы, которые за время своей жизни пролетают расстояние, достаточное для их эффективной регистрации в экспериментальной установке). Массу частицы m можно определить, измерив её энергию E или импульс p и скорость $\beta = v/c$ или лоренц-фактор $\gamma = 1/(1 - \beta^2)^{1/2}$: $mc^2 = E/\gamma = \beta p/\gamma$. Энергия и импульс частицы измеряются с помощью магнитных спектрометров и калориметров, которые здесь не рассматриваются. Скорости частиц могут быть определены по времени

пролёта определённой базы между сцинтилляционными счётчиками. При последних достижениях в точности измерения времени с помощью сцинтилляционных детекторов (несколько десятков пикосекунд) и базах ~ 10 м удаётся идентифицировать частицы по массе при значениях лоренц-фактора до $\gamma \sim 10$. Но в современных экспериментах часто возникает необходимость идентификации частиц с лоренц-фактором в широком диапазоне, до 10^4 и более. В этих случаях на помощь приходят черенковские счётчики¹.

2. Основные свойства черенковского излучения

Как известно, черенковское излучение возникает при движении частицы в среде со скоростью, превышающей скорость распространения электромагнитного излучения. При этом излучение с частотой ω испускается под углом θ относительно направления движения частицы, который с точностью до малой ($\sim 10^{-6}$) квантовой поправки определяется формулой

$$\cos \theta = \frac{1}{n(\omega)\beta}, \quad (1)$$

где $n(\omega)$ — показатель преломления среды.

Энергия, излучённая на единице пути L в единичном интервале частот, выражается как

$$\frac{d^2 W}{d\omega dL} = \left(\frac{ze}{c}\right)^2 \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \omega, \quad \beta n > 1,$$

С.П. Денисов. Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт",
Государственный научный центр Российской Федерации "Институт физики высоких энергий",
пл. Науки 1, 142281 Протвино, Московская обл.,
Российская Федерация
E-mail: denisov@ihep.ru

Статья поступила 4 февраля 2015 г.

¹ Для идентификации ультрарелятивистских частиц с лоренц-фактором $\sim 10^3$ иногда используются детекторы переходного излучения, рассмотрение которых выходит за рамки настоящей статьи.

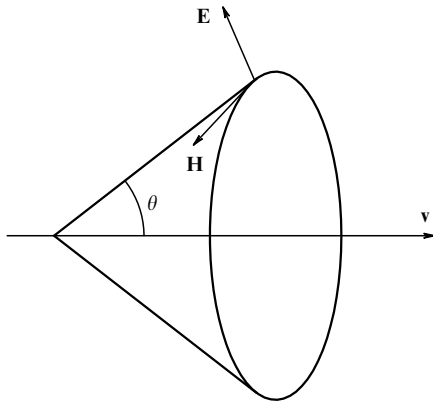


Рис. 1. К поляризации черенковского излучения.

где ze — заряд частицы. Если пренебречь дисперсией среды, то число фотонов N в интервале длин волн (λ_1, λ_2) определится формулой

$$N = 2\pi\alpha(ze)^2 L \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \sin^2 \theta, \quad \lambda_1 < \lambda_2, \quad (2)$$

где $\alpha = 1/137$ — постоянная тонкой структуры. Черенковское излучение поляризовано: электрический вектор направлен перпендикулярно поверхности конуса излучения, а магнитный — по касательной к этой поверхности (рис. 1).

3. Черенковские счётчики

Для определения скорости частиц с помощью черенковских детекторов используется, как правило, соотношение (1). Простейшим из этих детекторов является пороговый счётчик, регистрирующий все частицы со скоростью, превышающей пороговую величину $\beta_t > 1/n$. Понятно, что пороговые счётчики используются для регистрации самых лёгких частиц. Одно из возможных устройств порогового счётчика показано на рис. 2. Черенковский свет от пучка частиц, движущихся вдоль его оси справа налево, отклоняется плоским зеркалом на 90° и с помощью конического зеркала собирается на фотоэлектронный умножитель (ФЭУ). Радиатором в пороговом счётчике служат газы (воздух, фреон CF_4 и др.). Изменяя давление и тип газа, можно выбрать подходящее значение β_t .

Другим типом черенковских детекторов для измерения скорости частиц являются дифференциальные счётчики (рис. 3), которые регистрируют черенковский свет, излучённый в узком относительно оптической оси счётчика интервале $\Delta\theta$. Для светосбора в них обычно используются сферические зеркала, фокусирующие черенковский свет с частотой ω в кольцо радиусом

$$r(\omega) = 0,5R \tan \theta(\omega) \quad (3)$$

в фокальной плоскости зеркала, т.е. на расстоянии $0,5R$ от его центра (R — радиус зеркала). Вследствие зависимости угла излучения от частоты (хроматизм черенковского излучения) кольцо оказывается окрашенным: внешний радиус имеет синий оттенок, а внутренний — красный. Если частица движется параллельно оптической оси счётчика, то центр окружности лежит на ней. Если угловые координаты частицы относительно оси —

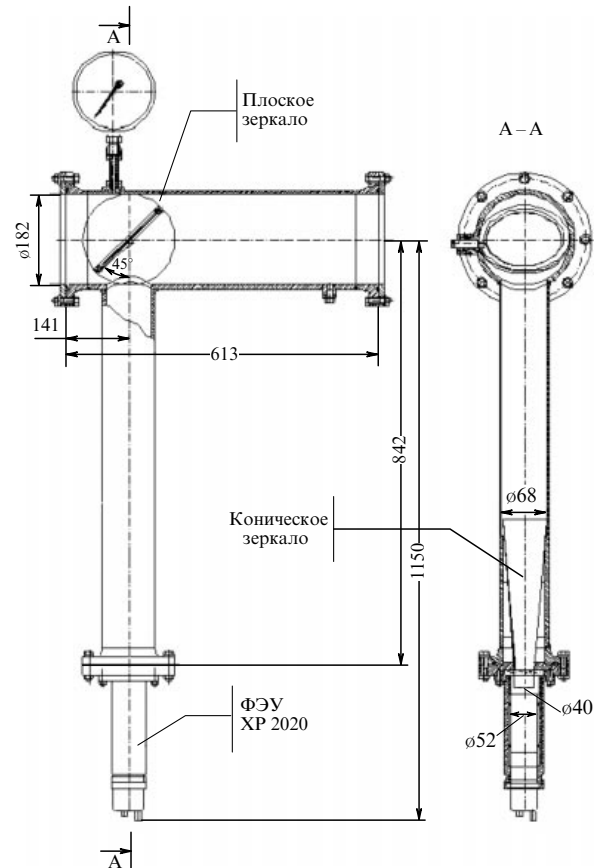


Рис. 2. Устройство порогового счётчика [1]. Размеры указаны в миллиметрах.

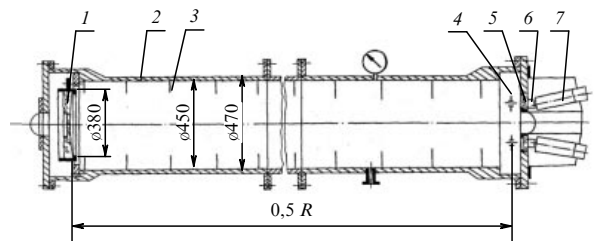


Рис. 3. Типичная конструкция дифференциального счётчика [2]: 1 — сферическое зеркало радиусом R , 2 — кожух, 3 — бленды, 4 — кольцевая диафрагма, 5 — кварцевое окно, 6 — кварцевая призма, 7 — ФЭУ. Размеры указаны в миллиметрах.

θ_p, φ_p , то полярные координаты r_0, φ_0 центра окружности в фокальной плоскости выражаются формулами

$$r_0 = 0,5R \tan \theta_p, \quad \varphi_0 = \varphi_p. \quad (4)$$

В фокальной плоскости располагается кольцевая диафрагма, средний радиус и ширина щели которой определяют среднюю скорость β и интервал скоростей $\Delta\beta$ регистрируемых частиц. Свет, прошедший диафрагму, через кварцевое окно и призмы попадает на фотоумножители, расположенные по кольцу. Бленды, укрепленные на кожухе счётчика, препятствуют попаданию фонового излучения на ФЭУ. Отметим, что в силу изохронности путей черенковских фотонов весь свет приходит на ФЭУ практически одновременно, независимо от места излучения.

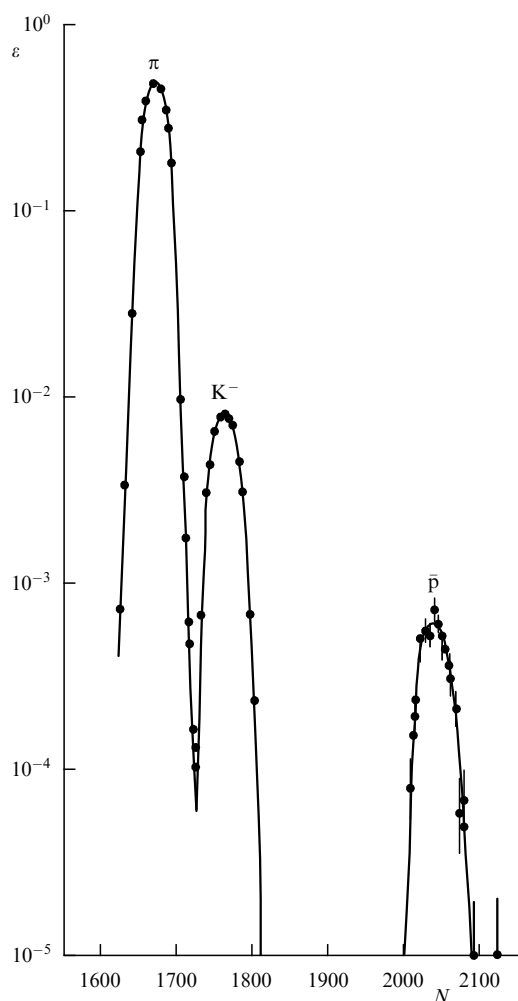


Рис. 4. Зависимость эффективности ε счёта отрицательных частиц в пучке с импульсом 45 ГэВ/с дифференциальным счётчиком [2] с радиусом зеркала $R = 10,3$ м. N — число полос интерферометра, пропорциональное давлению гелия в счётчике.

Из (1) следует, что разрешение дифференциального счётчика по скорости определяется формулой

$$\frac{\Delta\beta}{\beta} = \Delta\theta \tan \theta + \frac{\Delta n}{n}. \quad (5)$$

Как видно из (5), для получения высокого разрешения по скорости, необходимого для идентификации ультрарелятивистских частиц на современных ускорителях, надо использовать небольшие значения θ , т.е. работать с газовыми радиаторами. При этом одновременно могут быть достигнуты малые значения $\Delta n/n$ и появляется возможность легко варьировать величину показателя преломления радиатора счётчика, изменяя давление газа P ($n - 1 \sim P$). Заметим, что величина θ не может быть выбрана произвольно малой, так как от неё зависят интенсивность черенковского излучения (2) и, следовательно, эффективность регистрации частиц. Для уменьшения величины $\Delta n/n$ иногда перед диафрагмой устанавливают специальное коническое оптическое устройство [3], компенсирующее хроматизм черенковского излучения.

Рисунок 4 демонстрирует зависимость эффективности счёта отрицательных частиц в пучке с импульсом 45 ГэВ/с от давления гелия в дифференциальном счёт-

чике, показанном на рис. 3. Радиус зеркала составлял 10,3 м. Черенковский свет, излучённый под углом 23 мрад, регистрировался 12 ФЭУ XP 1023. Сигналы с трёх соседних ФЭУ подавались на логические сумматоры, импульсы с которых поступали на четырёхкратную схему совпадений. Разрешение счётчика по скорости $\Delta\beta$ (FWHM)/ β составляло $2,2 \times 10^{-5}$ (FWHM — Full Width at Half Maximum — полная ширина на половине высоты). Видно, что каоны и антипротоны, хотя их примесь в пучке составляла менее 1 % и 0,1 % соответственно, селективируются достаточно чисто благодаря высокому разрешению и низкому ($< 10^{-5}$) уровню фона.

Согласно (5), дифференциальные черенковские счётчики эффективно регистрируют частицы только в узком относительно оптической оси угловом интервале $\Delta\theta$, поэтому они применяются на ускорителях в основном для решения одной, но очень важной задачи — селекции частиц в хорошо сфокусированных пучках. Для измерения скоростей частиц в широком интервале углов используются счётчики типа RICH (Ring Imaging CHerenkov detector), по конструкции похожие на дифференциальные счётчики. Однако в счётчиках типа RICH отсутствует диафрагма, а в фокальной плоскости сферического зеркала располагаются детекторы, позволяющие определить координаты зарегистрированного ими фотона. Восстановив по координатам фотонов радиус и центр окружности кольца черенковского излучения, можно определить не только скорость, но и, согласно (4), угловые координаты траектории частицы. С помощью счётчиков RICH можно также одновременно регистрировать несколько частиц (см. ниже).

Одним из первых счётчиков типа RICH, по-видимому, был счётчик МСС² [4] с оригинальными годоскопическими фотоэлектронными умножителями (ГФЭУ) [5], разработанными в Институте физики высоких энергий (ИФВЭ). ГФЭУ имели протяжённый фотокатод, находящийся в скрещённых электрическом и магнитном полях, и координата фотона определялась с точностью, лучшей чем 1 мм, по времени дрейфа фотоэлектрона в этих полях. Счётчик МСС был создан для эксперимента по поиску ядер антитрития, и его использование позволило впервые надёжно зарегистрировать эти ядра. ГФЭУ применялись также в счётчике СКОЧ³ [6], в котором светосбор производился сферическим и коническим зеркалами и цилиндрическими линзами (рис. 5). Счётчики СКОЧ используются для идентификации частиц в спектрометре ФОДС (Фокусирующий двухплечевой спектрометр) на ускорителе ИФВЭ.

Другим примером счётчиков типа RICH могут служить разработанные и созданные в ИФВЭ счётчики, в которых фокальная плоскость сферического зеркала заполнялась малогабаритными ФЭУ-60 с диаметром фотокатода 10 мм. Один такой счётчик [7] с 736 ФЭУ был создан для установки "Сфинкс", представляющей собой универсальный широкоапертурный спектрометр, в ИФВЭ, а другой [8], содержащий 2848 ФЭУ, использовался в эксперименте SELEX (Segmented Large X baryon Spectrometer) в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (Фермилаб). Рисунок 6 иллюстрирует идентификацию вторичных частиц счётчиком RICH в

² МСС — аббр. от "Мажоритарная схема совпадений".

³ СКОЧ — Спектрометр колец черенковского излучения.

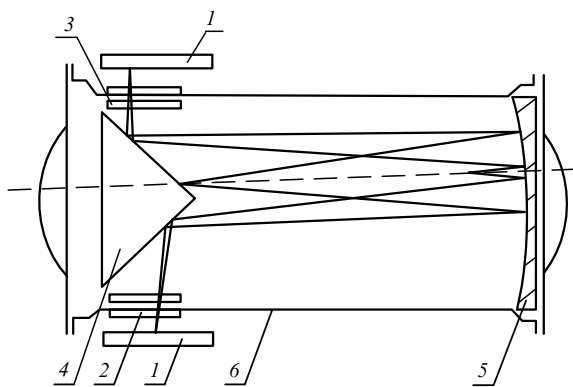


Рис. 5. Схема счётчика СКОЧ с ГФЭУ: 1 — ГФЭУ, 2 — стеклянное окно, 3 — цилиндрическая линза, 4 — коническое зеркало, 5 — сферическое зеркало, 6 — кожух.

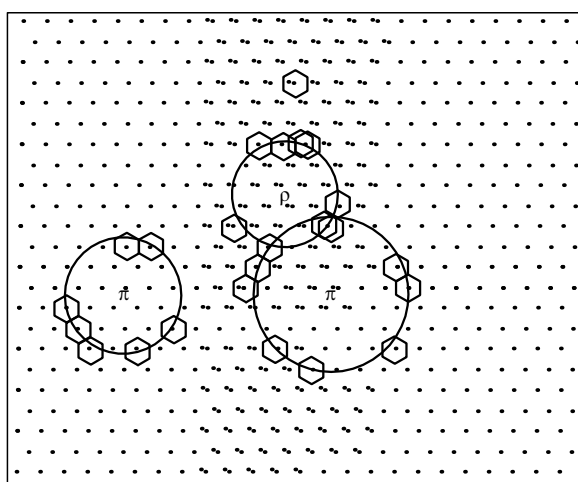


Рис. 6. Идентификация частиц с помощью черенковского счётчика с ФЭУ-60 в фокальной плоскости в одном из событий, зарегистрированных установкой "Сфинкс". Сработавшие ФЭУ показаны шестиугольниками.

одном из событий, зарегистрированных установкой "Сфинкс".

В счётчиках RICH также применяются дрейфовые камеры, заполненные газами с низким порогом фотоэффекта. Пример конструкции такой камеры [9] приведён на рис. 7. Один из самых больших детекторов [10] с дрейфовыми камерами, использовавшийся в эксперименте на спектрометре "Омега" для изучения фоторождения адронов на ускорителе SPS (Super Proton Synchrotron) в ЦЕРНе, показан на рис. 8.

4. Роль черенковских счётчиков в открытии антиядер

Одна из наиболее славных страниц в истории черенковских детекторов связана, по-видимому, с открытием антипротона. После предсказания Дираком существования электрона с положительным зарядом (антиэлектрона) [11] и открытия Андерсоном позитрона [12] встал вопрос о существовании антиядер, прежде всего антипротона. Положительный ответ относительно антипротона был дан Чемберленом, Сегре, Виганом и Иpsilonсом в элегантном и одновременно удивительно

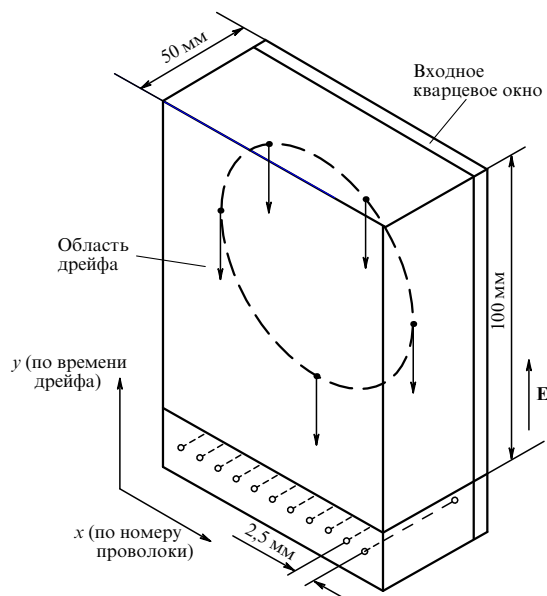


Рис. 7. Устройство дрейфовой камеры с кварцевым окном для регистрации черенковского излучения в счётчиках типа RICH. Координата y определяется по времени дрейфа фотоэлектрона, координата x — по номеру сработавшей анодной проволоки. Стрелками показаны направления дрейфа фотоэлектронов.

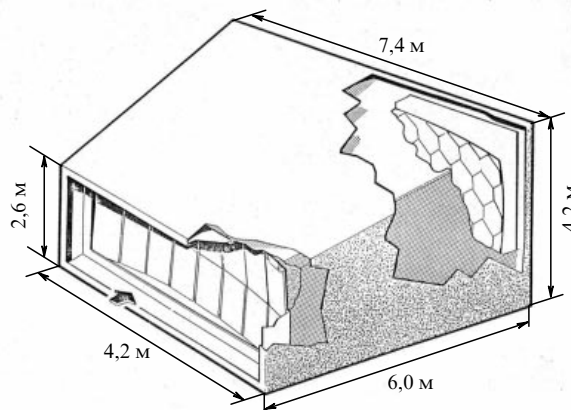


Рис. 8. Счётчик типа RICH для эксперимента WA69 на ускорителе SPS в ЦЕРНе.

простом (по сегодняшним меркам) эксперименте [13] на Бетатроне в США, за что первым двум в 1959 г. была присуждена Нобелевская премия.

В установке эксперимента [13] было всего пять детекторов — три сцинтилляционных и два черенковских счётчика (рис. 9). Пучок отрицательных частиц из внутренней медной мишени Т с начальной энергией 1,19 ГэВ (скорость антипротонов $\beta = 0,78$) дважды анализировался с помощью магнитов М1 и М2 по импульсу и фокусировался триплетами линз Q1 и Q2 на сцинтилляционные счётчики S1 и S2, которые использовались для определения средней скорости частиц по времени пролёта. Пороговый счётчик С1 с радиатором из $C_8F_{16}O$ ($n = 1,276$, $\beta_t = 0,79$) регистрировал частицы с массой, меньшей массы протона. Дифференциальный счётчик С2 [14] с кварцевым радиатором позволял определять скорости частиц с массой антипротона с точностью $\Delta\beta = \pm 0,014$. Для тестирования и определения характеристик всех элементов установки в канал выводились протоны с той же энергией, 1,19 ГэВ.

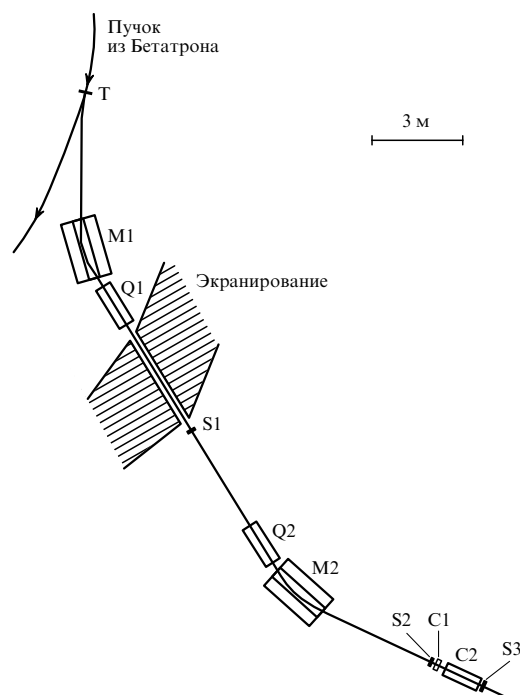


Рис. 9. Схема эксперимента [13], в котором был открыт антипротон: Т — медная мишень, M1, M2 — магниты, Q1, Q2 — триплеты квадрупольных линз, S1, S2, S3 — сцинтилляционные счётчики, C1 — пороговый черенковский счётчик, C2 — дифференциальный черенковский счётчик.

Всего за время эксперимента [13] было зарегистрировано 60 кандидатов в антипротоны при практически нулевом фоне, хотя доля антипротонов в пучке составляла всего $\sim 2,5 \times 10^{-5}$. Массы всех кандидатов с точностью 5 % совпали с массой протона, и это стало основным аргументом в пользу того, что наблюдались действительно антипротоны. Черенковские детекторы сыграли исключительно важную роль в этом эксперименте, обеспечив необходимое подавление фона (пороговый счётчик) и надёжную идентификацию антипротонов посредством измерения их скорости (дифференциальный счётчик).

Вслед за антипротонами были открыты антидейтроны [15] на ускорителе AGS (Alternating Gradient Synchrotron) в Брукхейвенской национальной лаборатории (Brookhaven National Laboratory, BNL), уже упоминавшиеся ядра антитрития (на 70-ГэВ-ном ускорителе ИФВЭ) и антигелия-3 [16] (также на ускорителе ИФВЭ). Остановимся подробнее на последнем эксперименте, поскольку в нём черенковские счётчики использовались не только для определения локальной скорости частиц, но и для ряда других целей.

Схема эксперимента [16] принципиально близка к показанной на рис. 9. Но установка была гораздо сложнее, поскольку ожидаемое отношение сигнал/фон было примерно на шесть порядков величины меньше, чем в опыте [13]. В установке использовались пять магнитов для импульсного анализа пучка частиц (начальный импульс составлял 10 ГэВ/с для частиц с $z = 1$ и 20 ГэВ/с для антигелия ($z = 2$)), десять спектрометрических сцинтилляционных счётчиков для измерения заряда по амплитуде сигнала, которая пропорциональна z^2 , три сцинтилляционных счётчика для измерения средней скорости частиц вдоль канала, три пороговых черенковских счёт-

чика и два дифференциальных, расположенных в начале и конце установки. Задача пороговых счётчиков заключалась в подавлении фона от частиц с массой, меньшей, чем у антигелия, кроме антидейтронов, скорость которых при импульсе 10 ГэВ/с была меньше скорости ядер антигелия-3 с импульсом 20 ГэВ/с. С этой задачей пороговые счётчики блестяще справились, обеспечив коэффициент режекции более 10^7 благодаря очень высокой эффективности — 99,9996 %.

Дифференциальные счётчики должны были решать сразу несколько задач:

- выделять частицы с локальными скоростями антигелия-3;
- измерять средние скорости частиц по времени пролёта установки;
- подавлять фон от антидейтронов, которых в пучке ожидалось на четыре порядка больше, чем ядер антигелия-3;
- определять заряд частиц по величине амплитуды сигнала, которая, как и в сцинтилляционных счётчиках, пропорциональна z^2 (см. соотношение (2)).

Благодаря хорошему разрешению по скорости, $\Delta\beta/\beta = 1,7 \times 10^{-3}$, высокому временному разрешению, $2\tau = 0,7$ нс, и низкому ($< 10^{-4}$) уровню фона все перечисленные задачи были успешно решены и возлагавшиеся на черенковские счётчики надежды полностью оправдались. Отметим, что периодически установка перестраивалась на пучки частиц с импульсом 13,3 ГэВ/с, что позволяло калибровать дифференциальные счётчики на антидейтронах и контролировать их стабильность, которая оказалась весьма высокой.

В результате анализа данных со всех детекторов было выделено пять событий прохождения через установку ядер антигелия-3 при практически нулевом уровне фона. Нисколько не умаляя роли сцинтилляционных счётчиков, всё-таки надо признать, что определяющую роль в успехе эксперимента сыграли черенковские детекторы.

Открытие ядер антигелия-3 окончательно показало, что антивещество должно существовать и, если Вселенная образовалась действительно в результате Большого взрыва, должны существовать и антимирры. Почему их до сих пор не удалось наблюдать — одна из самых удивительных загадок современной астрофизики.

В завершение обсуждения темы антиядер упомянем ещё работу [17] по изучению образования тяжёлых ядер и антиядер в pBe- и pAl-столкновениях на ускорителе SPS. Состав аппаратуры эксперимента был близок к использовавшемуся в описанном выше эксперименте в ИФВЭ [16]. В частности, в эксперименте [16] использовались три пороговых черенковских счётчика для режекции фона от лёгких частиц и два дифференциальных [18, 19] счётчика с компенсацией хроматизма черенковского излучения. Одним из результатов этого опыта явилось подтверждение существования ядер антигелия-3. Ядра антигелия-4 впервые были зарегистрированы в эксперименте STAR (Solenoidal Tracker at Relativistic Heavy Ion Collider) [20] на коллайдере тяжёлых ионов в Брукхейвенской национальной лаборатории.

5. Применение черенковских счётчиков в других экспериментах

Приведём ещё несколько примеров применения черенковских детекторов в опытах на ускорителях.

Благодаря надёжной идентификации K^+ -мезонов с помощью дифференциального счётчика, показанного на рис. 3, и порогового счётчика [21] с высокой эффективностью, в эксперименте [22] на ускорителе ИФВЭ впервые удалось обнаружить возрастание полных сечений K^+ -взаимодействий при увеличении энергии в области 20–60 ГэВ. Хотя доля K^+ -мезонов в пучке доходила до $\sim 1\%$, уровень фона под их пиком в зависимости эффективности от величины давления (показателя преломления) рабочего газа никогда не превышал 10^{-3} . Последующие исследования подтвердили это открытие и показали, что возрастание полных сечений с увеличением энергии является общим свойством всех адронных взаимодействий при высоких энергиях.

В 1974 г. на двухплечевом спектрометре BNL [23] проводились поиски новых частиц, распадающихся на лептонные пары e^+e^- и $\mu^+\mu^-$. Для идентификации электронов использовались пороговые черенковские счётчики, заполнявшиеся водородом. В спектре эффективных масс e^+e^- был обнаружен узкий пик с массой 3,1 ГэВ, названный J -частицей (современное название J/ψ -мезон), которая оказалась связанным состоянием новых c - и $\bar{c}$ -кварков. За это замечательное открытие руководителю эксперимента С. Тингу (совместно с Б. Рихтером) в 1976 г. была присуждена Нобелевская премия [24, 25].

Использование черенковских счётчиков способствовало также открытию b -кварка в эксперименте на ускорителе Фермилаб.

Черенковские детекторы находят широкое применение и для поиска разного рода экзотических частиц. Например, тахионы (гипотетические частицы, движущиеся со скоростью, большей скорости света c) должны излучать черенковский свет в вакууме. Однако их поиски с помощью черенковских счётчиков с очень низким давлением газа пока не дали положительных результатов. Интересное предложение по поиску монополя Дирака было сделано В.П. Зреловым (и осуществлено им на ускорителе ИФВЭ), который обратил внимание на две особенности черенковского излучения монополей:

— отношение энергий, излучённых монополем с магнитным зарядом g и обычной частицей с электрическим зарядом e , движущихся с одинаковой скоростью в среде с показателем преломления n , равно $n^2 g^2 / e^2$, т.е. составляет $\sim 10^4$ для монополя Дирака с зарядом $g = 68,5e$ при $n = 1,5$;

— поляризация излучения монополя отличается по направлению от поляризации света от заряженной частицы (см. рис. 1) на 90° .

Экспериментальная установка [26] для поиска монополя Дирака состояла из восьми детекторов фотонов, которые окружали кварцевый радиатор-мишень, расположенный внутри камеры ускорителя. Перед детекторами устанавливались поляроидные плёнки, пропускавшие свет с определённой поляризацией. Шесть плёнок

были ориентированы так, чтобы пропускать черенковский свет от монополей, а две — от обычных частиц. За время опыта через мишень-радиатор было пропущено $7,7 \times 10^{15}$ протонов, но ни одного кандидата в монополи обнаружено не было. Верхний предел сечения образования монополя оказался равным 10^{-40} см² на уровне достоверности 95 %.

6. Заключение

В настоящей статье приведена только небольшая часть примеров использования черенковских детекторов в экспериментах на ускорителях. Но и того, что представлено, достаточно, чтобы оценить их исключительно важную роль в исследованиях в физике частиц. Нет сомнений в том, что и в будущем черенковские счётчики останутся одним из основных инструментов физиков-экспериментаторов.

Автор благодарен Т.З. Гуровой и Д.А. Стояновой за помощь в подготовке доклада. Работа частично поддержана грантом РФФИ № 14-02-00303.

Список литературы

1. Denisov S P et al. *JINST* **5** P10012 (2010)
2. Denisov S P et al. *Nucl. Instrum. Meth.* **92** 77 (1971)
3. Duteil P et al. *Rev. Sci. Instrum.* **35** 1523 (1964)
4. Вишневецкий Н К и др. *ЯФ* **20** 694 (1974); Vishnevskii N K et al. *Sov. J. Nucl. Phys.* **20** 371 (1974)
5. Vishnevsky N K et al., in *Proc. of the Intern. Conf. on Instrumentation for HEP, Dubna, Russia, 1974*, p. 305
6. Ronzhin A I, Rykalin V I, Solyanik V I *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **248** 190 (1986)
7. Kozhevnikov A et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **433** 164 (1999)
8. Engelfried J et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **431** 53 (1999)
9. Dresselhaus D, Fohrmann R *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **236** 274 (1985)
10. Siebert H-W et al. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **343** 60 (1994)
11. Dirac P A M *Proc. R. Soc. Lond. A* **117** 610 (1928)
12. Anderson C D *Phys. Rev.* **43** 491 (1933)
13. Chamberlain O et al. *Phys. Rev.* **100** 947 (1955)
14. Wiegand C E *IRE Trans. Nucl. Sci.* **5** 77 (1958)
15. Dorfman D E et al. *Phys. Rev. Lett.* **14** 1003 (1965)
16. Antipov Yu M et al. *Nucl. Phys. B* **31** 235 (1971)
17. Bozzoli W et al. *Nucl. Phys. B* **144** 317 (1978)
18. Meunier R et al. *Nucl. Instrum. Meth.* **17** 1 (1962)
19. Benot M, Litt J, Meunier R *Nucl. Instrum. Meth.* **105** 431 (1972)
20. Abelev B I et al. (STAR Collab.) *Nature* **473** 353 (2011)
21. Denisov S P et al. *Nucl. Instrum. Meth.* **85** 101 (1970)
22. Denisov S P et al. *Phys. Lett. B* **36** 415 (1971)
23. Aubert J J et al. *Phys. Rev. Lett.* **33** 1404 (1974)
24. Тинг С *УФН* **125** 227 (1978); Ting S C C, in *Les Prix Nobel en 1976* (Stockholm: The Nobel Foundation, 1977) p. 76; *Rev. Mod. Phys.* **49** 235 (1977)
25. Рихтер Б *УФН* **125** 201 (1978); Richter B, in *Les Prix Nobel en 1976* (Stockholm: The Nobel Foundation, 1977) p. 42; *Rev. Mod. Phys.* **49** 251 (1977)
26. Zrelov V P et al. *Czech. J. Phys. B* **26** 1306 (1976)

Use of Cherenkov counters in experiments at accelerators for particle identification

S.P. Denisov. State Research Center of Russian Federation "Institute for High Energy", National Research Center "Kurchatov Institute", pl. Nauki 1, 142281 Protvino, Moscow region, Russian Federation. E-mail: denisov@ihep.ru

The key properties of Cherenkov radiation are briefly discussed, together with various types of Cherenkov counters used to identify relativistic particles in accelerator studies. Specific examples of the application of Cherenkov counters in experiments are discussed. Special attention is given to the role of Cherenkov counters in antinuclei observation, including the discovery of the antiproton.

Keywords: particle, radiation, counter, facility, accelerator, photon, proton, antiproton, antitritium, antihelium

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

Bibliography — 26 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **185** (5) 515–520 (2015)

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201505h.0515

Received 4 February 2015

Physics – Uspekhi **58** (5) (2015)