

ПРИРОДА

№ 7, 2004 г.

Денисов С. П.

Детекторы черенковского излучения

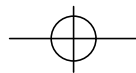
© “Природа”

Использование и распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции



Сетевая образовательная библиотека “VIVOS VOCO!”
(грант РФФИ 03-07-90415)

vivovoco.nns.ru
vivovoco.rsl.ru
www.ibmh.msk.su/vivovoco



Детекторы черенковского излучения

Член-корреспондент РАН С.П.Денисов
Институт физики высоких энергий
Протвино

В последние десятилетия было создано так много самых разных черенковских счетчиков, а область их применения настолько расширилась, что не стоит и пытаться охватить все в одной статье. Попробуем на конкретных примерах дать представление о том, сколь велико практическое значение эффекта излучения сверхсветовых частиц, открытого П.А.Черенковым 70 лет назад.

Свойства черенковского излучения

Свечение Черенкова возникает при движении заряженной частицы в среде со скоростью v , превышающей скорость c/n распространения света в этой среде (c — скорость света в вакууме, n — показатель преломления среды), т.е. при

$$\beta = \frac{v}{c} > \frac{1}{n}. \quad (1)$$

Излучение имеет узкую угловую направленность, обнаруженную Черенковым еще в первых опытах. В изотропных средах оно распространяется вдоль поверхности конуса под

углом θ к траектории частицы таким, что

$$\cos\theta = \frac{1}{\beta n}. \quad (2)$$

Интенсивность свечения была рассчитана И.Е.Таммом и И.М.Франком. Если на пути длиной l изменение β мало и в диапазоне длин волн $\lambda_1 + \lambda_2$ ($\lambda_2 > \lambda_1$) можно пренебречь дисперсией среды (т.е. зависимостью n от λ), то число фотонов, излученных в этом спектральном интервале, равно

$$N = 2\pi\alpha Z^2 l \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) = \\ = 2\pi\alpha Z^2 l \cdot \sin^2\theta \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right), \quad (3)$$

где $\alpha = 1/137$ — так называемая постоянная тонкой структуры и Z — заряд частицы в единицах заряда электрона.

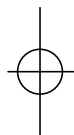
Чтобы представить масштаб эффекта, рассмотрим два примера. Пусть сначала ультрарелятивистская частица ($\beta \approx 1$) с $Z=1$ движется в воздухе, показатель преломления которого при давлении 1 атм и температуре 20°C равен 1.000273. Тогда угол θ составит 23 мрад или чуть больше 1°, и на пути 1 м частица излучит всего около 50 фотонов в интервале длин волн $0.3 < \lambda$ (мкм) < 0.7 , который соответствует области чувствительности обычных фо-

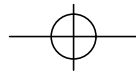
тоэлектронных умножителей (ФЭУ). В слегка расширенном диапазоне $0.2 < \lambda$ (мкм) < 0.7 (ФЭУ с кварцевыми окнами) число фотонов составит уже 90.

Теперь представим, что та же частица пересекает слой стекла с $n = 1.5$ и толщиной 1 см. В этом случае $\theta = 48^\circ$, и в стекле образуется около 500 фотонов в области λ от 0.3 до 0.7 мкм.

Получается, что свечение весьма слабое: не случайно Черенкову приходилось подолгу адаптироваться в темной комнате, чтобы его увидеть (глаз в то время был самым чувствительным «фотоэлементом»). Из-за малой интенсивности перспектива практического применения черенковского излучения открылась не сразу. Лишь с созданием ФЭУ, способных регистрировать очень слабые потоки света вплоть до отдельных фотонов, положение резко изменилось, и, начиная с 50-х годов прошлого столетия, началось бурное развитие детекторов частиц, основанных на эффекте Черенкова.

Остановимся на тех из них, которые предназначены для идентификации (определения масс) релятивистских частиц в экспериментах на ускорителях и для регистрации космического излучения. Далее, как это принято в физике высоких энергий, скорости частиц будут измерять-





ся в единицах скорости с распространения электромагнитных волн в вакууме, заряды — в единицах заряда e электрона, энергии E — в МэВ (10^6 эВ) и ГэВ (10^9 эВ), импульсы p — в МэВ/с и ГэВ/с, массы — в МэВ/с². Например, массы электрона, мюона, π^+ - и K^+ -мезона и протона равны соответственно 0.511, 106, 140, 494 и 938 МэВ/с².

Газовые черенковские счетчики

Основная задача черенковских счетчиков в экспериментах на современных ускорителях с энергиями в десятки и сотни ГэВ состоит в идентификации частиц, для чего измеряются их скорости β и затем по известным импульсам p определяются массы покоя $m = p \sqrt{1-\beta^2} / \beta c$. Скорость релятивистской частицы, энергия которой во много раз превышает mc^2 , можно с хорошей точностью вычислить по формуле:

$$\beta = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{mc}{p} \right)^2. \quad (4)$$

Из (4) следует, что, например, разница скоростей π^- - и K^- -ме-

зонов с одинаковым импульсом $p = 40$ ГэВ/с, доступным на протонном ускорителе Института физики высоких энергий (ИФВЭ) в г.Протвино, составляет всего $7 \cdot 10^{-5}$, и для их разделения необходимо измерять скорости с точностью $\Delta\beta \leq 10^{-5}$. Столь высокая точность может быть достигнута при помощи газовых черенковских счетчиков — пороговых, дифференциальных или типа RICH.

В пороговых черенковских счетчиках для идентификации частиц используется условие (1): излучают черенковский свет и, следовательно, могут быть зарегистрированы только те частицы, скорость которых превышает пороговую величину $\beta_c = 1/n$. Рис.1,а представляет оптическую схему одного из пороговых счетчиков, используемых в ИФВЭ, а рис.1,б показывает, как с его помощью можно, например, отделить π^+ -мезоны от K^+ -мезонов и протонов в пучке частиц с импульсом 35 ГэВ/с. Счетчик наполняется аргоном. При не очень больших давлениях P зависимость показателя преломления аргона от P можно выразить приближенной формулой: $n(P) = 1 + 3 \cdot 10^{-4} P$. Используя приведенные выше соотноше-

ния, нетрудно оценить пороговое значение давления $P_c \approx 1.7 \cdot 10^3 \cdot (mc/p)^2$, при превышении которого частица с массой m и импульсом p начнет излучать черенковский свет. При давлении аргона ниже порога для π^+ -мезонов срабатывающие счетчики в основном связаны с небольшой (~1%) примесью позитронов и μ^+ -мезонов в пучке, сцинтилляциями аргона под действием проходящих через счетчик частиц и шумами ФЭУ. Скорость счета при этом находится на уровне нескольких отсчетов/с. Как только давление перешагнет порог, соответствующий началу излучения пионов, скорость счета начинает быстро расти и постепенно выходит на плато, когда число черенковских фотонов становится достаточным для регистрации каждого пиона. Аналогичные скачки скорости счета наблюдаются при переходе давления через пороги излучения каонов и протонов. Из рис.1,б следует, что при давлении аргона 0.2 ± 0.3 атм. счетчик регистрирует почти все пионы и слабо чувствителен к каонам и протонам.

Очевидно, что при помощи одного порогового счетчика указанным способом можно

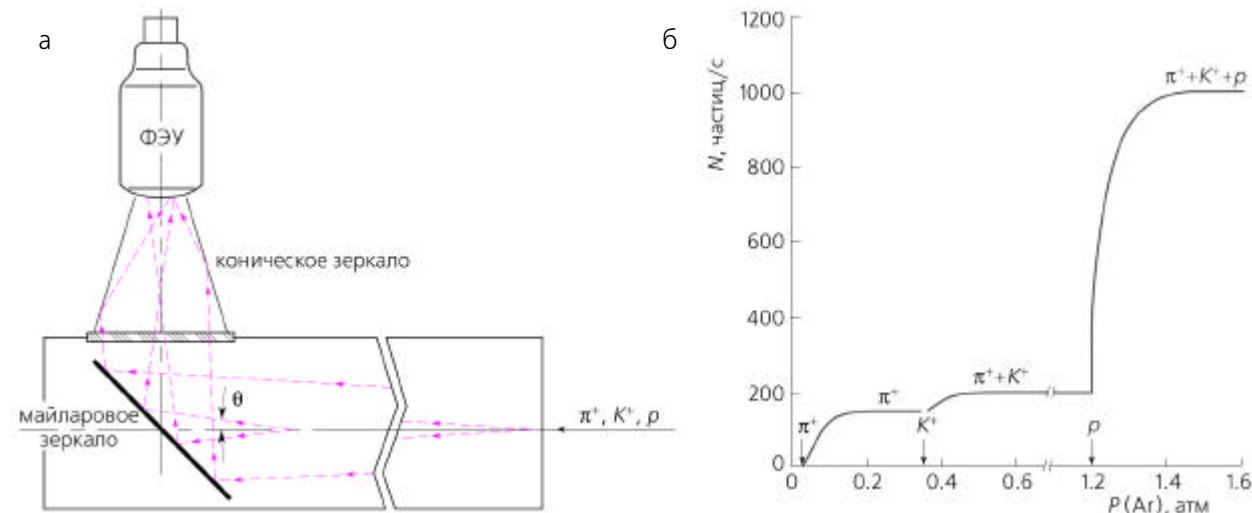
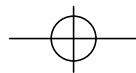


Рис.1. Схема порогового черенковского счетчика (а) и зависимость скорости счета частиц в пучке с импульсом 35 ГэВ/с от давления аргона в пороговом черенковском счетчике (б). Стрелками показаны пороговые значения давления.



ФИЗИКА

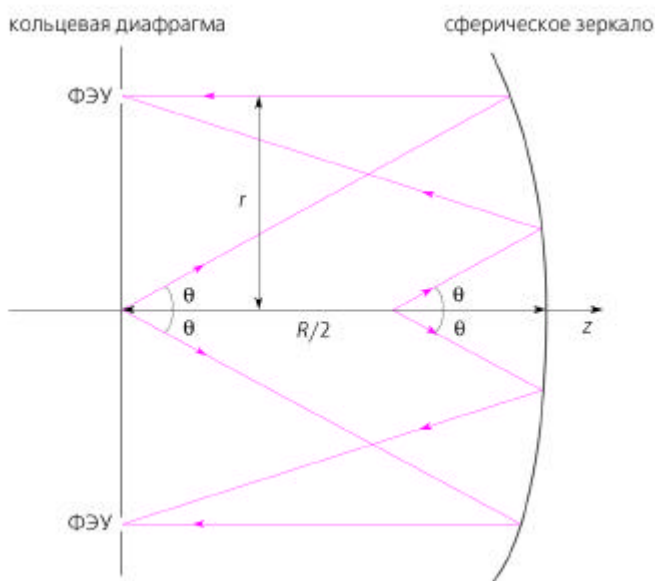


Рис.2. Схема дифференциального счетчика.

идентифицировать только самые легкие частицы. Представим читателю самому сообразить, как можно выделить в пучке, например, каоны, используя два пороговых счетчика. Но обычно для этой цели применяют дифференциальный счетчик.

Разделение частиц с разными массами по скоростям в дифференциальных черенковских счетчиках основано на связи (2) между скоростью β и углом θ . Черенковский свет, излученный под углом θ , собирается в фокальной плоскости сферического зеркала (рис.2) в кольцо ра-

$$r = \frac{R}{2} \operatorname{tg} \theta, \quad (5)$$

где R — радиус зеркала. Если в фокальной плоскости расположить кольцевую диафрагму и установить за ней ФЭУ, можно выделить частицы со скоростью β , определяемой формулами (2), (5) (значения r , R и n предполагаются известными).

Точность $\Delta\beta$ определения скорости ограничивается несколькими факторами, главный из которых — дисперсия газа

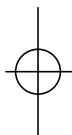
в счетчике, т.е. зависимость показателя преломления n и, следовательно, угла θ от длины волны света λ (рис.3). Этот эффект приводит к тому, что кольцо черенковского излучения в фокальной плоскости сферического зеркала (рис.2) окрашено во все цвета радуги, причем его внешний радиус имеет фиолетовый оттенок, а внутренний — красный (рис.4). Оказывается, что $\Delta\beta = \Delta n/n$, где Δn — изменение показателя преломления в интервале чувствительности счетчика (рис.3). Отношение $\Delta n/n$ зависит от сорта газа, примерно пропорционально его давлению и для современных приборов находится в пределах $(2+4) \cdot 10^{-5}$ в спектральном диапазоне от 0.2 до 0.7 мкм. Можно ли построить дифференциальный счетчик с лучшим разрешением? Да, можно.

Простой путь — сужение спектрального диапазона (рис.3) и/или уменьшение давления газа и, следовательно, угла излучения. Однако это невыгодно, так как оба варианта приводят к потере и без того малой интенсивности черенковского света (3). Ослабление свечения при

уменьшении угла излучения или «обрезании» спектрального диапазона можно, вообще говоря, компенсировать увеличением длины счетчика. Но тогда быстро растут не только продольные, но и поперечные размеры детектора, усложняется его конструкция и возрастает стоимость. Кроме того, размеры счетчика часто бывают ограничены условиями эксперимента. Более сложное, но и более эффективное решение проблемы — прибегнуть к специальной оптике, компенсирующей зависимость $\theta(\lambda)$. Впервые такое устройство (дублет конических призм из кристалла NaCl и плавленного кварца, установленный перед кольцевой диафрагмой) было применено в счетчике [1], который использовался для идентификации частиц в пучках ускорителей ЦЕРН и ИФВЭ. Компенсация дисперсии газа позволяет достигнуть разрешения $\Delta\beta/\beta \sim 10^{-6}$ при регистрации частиц в пучках с энергией сотни ГэВ.

Отметим, что все черенковские фотоны, независимо от места излучения, соберутся в фокальной плоскости одновременно. Благодаря этому черенковские счетчики обладают очень хорошим временным разрешением, которое определяется только свойствами ФЭУ и регистрирующей электроники.

На рис.5 показана зависимость скорости счета π^- , K^- -мезонов и антипротонов с импульсом 45 ГэВ/с от величины показателя преломления рабочего газа (CO_2) в дифференциальном счетчике с компенсацией дисперсии [2], разработанном в ИФВЭ. Видно, что при помощи счетчика можно надежно идентифицировать все три сорта частиц, хотя доля каонов в пучке составляет всего ~ 0.01 , а антипротонов еще в 10 раз меньше. Счетчик использовался во многих экспериментах на ускорителе ИФВЭ, в том числе для исследований закономерностей рождения частиц в сильных взаимодействиях, которые привели



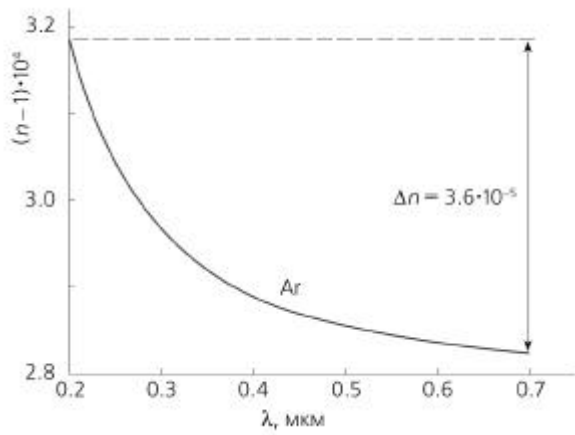
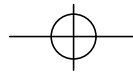


Рис.3. Зависимость показателя преломления аргона от длины волны.

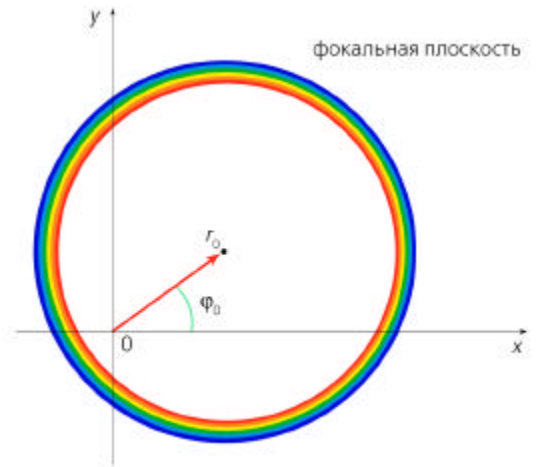


Рис.4. Положение кольца черенковского света в фокальной плоскости сферического зеркала (см.рис.2). Радужная окраска кольца связана с дисперсией газа.

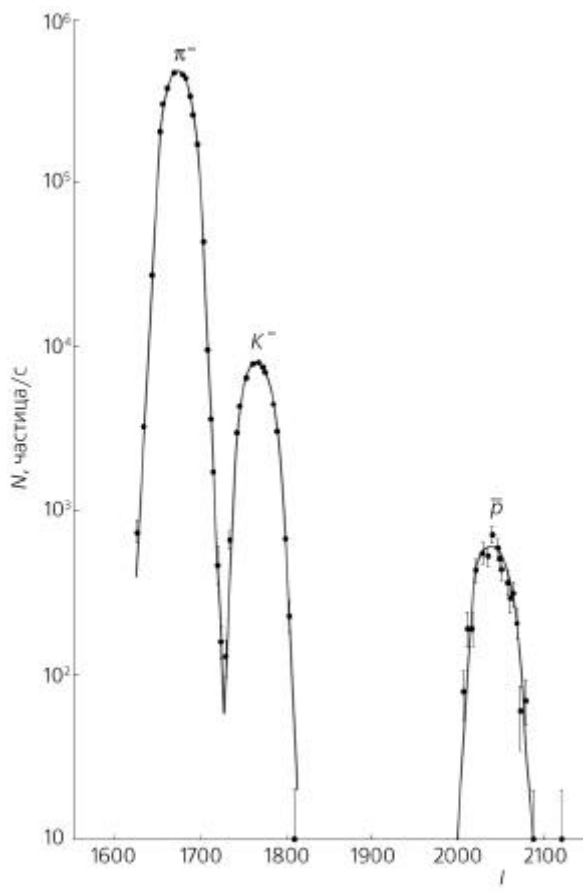


Рис.6. Кольца черенковского излучения от протона и двух пи-мезонов, зарегистрированные в детекторе RICH [4]. Точками показаны центры ФЭУ в матрице, шестиугольниками – сработавшие ФЭУ.

Рис.5. Идентификация пи-, К-мезонов и антипротонов в пучке отрицательных частиц с импульсом 45 ГэВ/с при помощи дифференциального счетчика [2] с компенсацией дисперсии, наполненного СО₂. I – число делений шкалы интерферометра, пропорциональное (n-1).

к открытию масштабной инвариантности в образовании адронов [3].

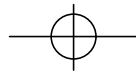
Основные недостатки дифференциальных счетчиков – сильное ограничение на разброс частиц по углам и способность регистрировать в данный

момент только одну частицу. Поэтому они применяются, в основном, для идентификации частиц в хорошо сформированных пучках. Когда необходимо регистрировать частицы в большом интервале углов и/или одновременно несколько

частиц, применяют детекторы типа RICH.

Если траектория заряженной частицы не параллельна оси счетчика Z (рис.2), а имеет относительно нее угловые координаты θ_p, ϕ_p , то кольцо, в которое соберется черенковский





ФИЗИКА

свет в фокальной плоскости сферического зеркала, сместится: его центр будет иметь полярные координаты $r_0 = R/2 \operatorname{tg} \theta_p$, $\varphi_0 = \varphi_p$ (рис.4). Таким образом, определив положение центра и радиус r кольца черенковского излучения, можно не только измерить скорость частицы, но и найти угловые координаты ее траектории, что и реализуется в счетчиках RICH (Ring Imaging Cherenkov). В них вместо кольцевой диафрагмы (рис.2) в фокальной плоскости помещаются приемники, способные эффективно регистрировать отдельные фотоны и измерять их координаты — например, ФЭУ с небольшим диаметром фотокатода. Один из первых счетчиков RICH, в котором для регистрации колец черенковского света использовалась матрица из 736 умножителей с диаметром фотокатода 10 мм, был создан в 1989 г. для экспериментов на ускорителе ИФВЭ [4]. На рис.6 показан случай, когда в матрице одновременно зарегистрированы три кольца. По радиусам колец были рассчитаны скорости соответствующих им частиц, и затем по известным импульсам, измеренным при помощи магнитного спектрометра, определены их массы покоя: две частицы оказались пионами и одна — протоном. Позднее в ИФВЭ был разработан и изготовлен 10-метровый счетчик RICH [5] с матрицей из 2848 ФЭУ для экспериментов в Национальной ускорительной лаборатории им.Ферми (ФНАЛ) в США. Счетчик заполнялся неоном при давлении 1 атм. Он позволял разделять пионы и каоны до энергий 185 ГэВ и пионы и протоны — до 320 ГэВ.

Регистрация колец черенковского излучения матрицей из большого числа ФЭУ имеет целый ряд достоинств, но вместе с тем делает RICH весьма дорогим прибором. Кроме того, точность определения координат фотона ограничена диаметром фотокатода ФЭУ. Дешевле вместо матрицы ФЭУ использо-

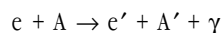
вать, например, дрейфовые проволочные камеры или газовые электронные умножители GEM [6], которые имеют очень хорошее координатное разрешение, но уступают ФЭУ по другим характеристикам, например, по временному разрешению.

Спектрометры полного поглощения

Измерение энергии и идентификация γ -квантов и электронов (позитронов) высокой энергии — важнейшие задачи в физике частиц. Это связано, в частности, с тем, что большинство частиц нестабильно, и многие из них через очень короткое время, не позволяющее зарегистрировать их непосредственно, распадаются в конечном счете на γ -кванты и электроны. В качестве примера можно привести распады π^0 - и η -мезонов на 2 γ -кванта или J/ψ -, ψ' -, Υ -частиц и переносчика слабого взаимодействия Z^0 -бозона на электрон и позитрон. Указанные частицы играют фундаментальную роль в микромире, и многие эксперименты в физике высоких энергий направлены на изучение их свойств и закономерностей образования.

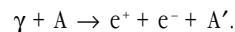
Единственный для γ -квантов и один из основных для электронов способ определения энергии в области больше нескольких ГэВ — метод полного поглощения электромагнитных ливней, создаваемых ими в веществе детектора. Рассмотрим, как возникают электромагнитные ливни.

Результатом взаимодействия ультрарелятивистских электронов и позитронов с атомными ядрами A среды чаще всего становится тормозное излучение фотонов:



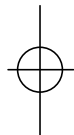
(штрих означает изменение энергии частицы). Аналогично, самым вероятным процессом

для γ -квантов с энергиями в десятки МэВ и выше оказывается образование электрон-позитронных пар:



Посмотрим, что случится при попадании, например, высокоэнергичного γ -кванта в очень толстый (≥ 40 см) слой оптического стекла, скажем, марки ТФ1 (тяжелый флинт). Пролетев в таком стекле примерно 2 см, γ -квант превратится в электрон и позитрон, которые, в свою очередь, на той же дистанции ~ 2 см потеряют около половины энергии на тормозное излучение. Тормозные фотоны, пролетев опять ~ 2 см, породят новые пары e^+e^- и т.д. Этот процесс лавинообразного размножения частиц и, следовательно, дробления их энергии будет продолжаться до тех пор, пока реакции тормозного излучения и рождения пар играют доминирующую роль. Затем, когда средние энергии частиц в ливне станут меньше так называемой критической энергии (для стекла ТФ1 она составляет ~ 20 МэВ), в дело вступят другие процессы (например, ионизационные потери энергии для электронов и позитронов), приводящие к уменьшению потока частиц. Образовавшиеся в веществе электроны, позитроны и γ -кванты и составляют электромагнитный ливень. Число частиц в ливне достигает максимума на глубине стекла $t = 1.5 \div 2.0$ см, а затем быстро уменьшается и при $t \geq 40$ см становится пренебрежимо малым. Легко сообразить, что ливень от первичного электрона или позитрона будет развиваться аналогично ливню от γ -кванта.

Естественно, ливневые электроны и позитроны излучают в стекле черенковский свет. Суммарная длина треков всех электронов и позитронов в ливне и, следовательно, число черенковских фотонов оказывается пропорциональным энергии первичной частицы. Таким образом, измерив при помощи фотоумножителя интенсив-



ность вспышки черенковского излучения в толстом блоке стекла, можно определить энергию частицы, вызвавшей ливень. Точность измерения энергии определяется формулой $\Delta E/E = 0.05\sqrt{E} + 0.01$, где E измеряется в ГэВ. При энергиях электронов и γ -квантов больше 25 ГэВ энергетическое разрешение становится лучше 2%.

Заметим, что для частиц с массой m интенсивность тормозного излучения $\sim 1/m^2$. Самая близкая по массе частица к электрону — мюон. Поскольку $m_\mu/m_e \approx 2 \cdot 10^2$, вероятность излучения тормозного γ -кванта мюоном почти в 40 000 раз меньше, чем для электрона, и он реально не вызовет развития электромагнитного ливня в стекле. И действительно, черенковский свет от мюона (обусловленный как излучением самого мюона, так и быстрыми электронами, выбитыми им из атомов в стекле) гораздо слабее, чем свет от электронов и γ -квантов высокой энергии. На этом основан принцип идентификации электронов и γ -квантов при помощи спектрометров полного поглощения.

В настоящее время широкое применение в экспериментах на ускорителях для регистрации электронов и γ -квантов нашли спектрометры полного поглощения типа ГАМС [7], разработанные в ИФВЭ под руководством Ю.Д.Прокошкина. Они представляют собой «стенки» из блоков особо прозрачного оптического стекла, как правило, марок Ф8 или ТФ1. Характерный размер блока $4 \times 4 \times 40$ см. Каждый блок «просматривается» своим ФЭУ. Наряду с энергией такие спектрометры позволяют измерять с высокой точностью координаты попадающих в детектор частиц (по распределению энергии ливня в поперечном направлении). Самый большой спектрометр ГАМС, созданный в ИФВЭ около 20 лет назад для экспериментов в ЦЕРН, содержит 4000 блоков стекла. Крупные спектрометры

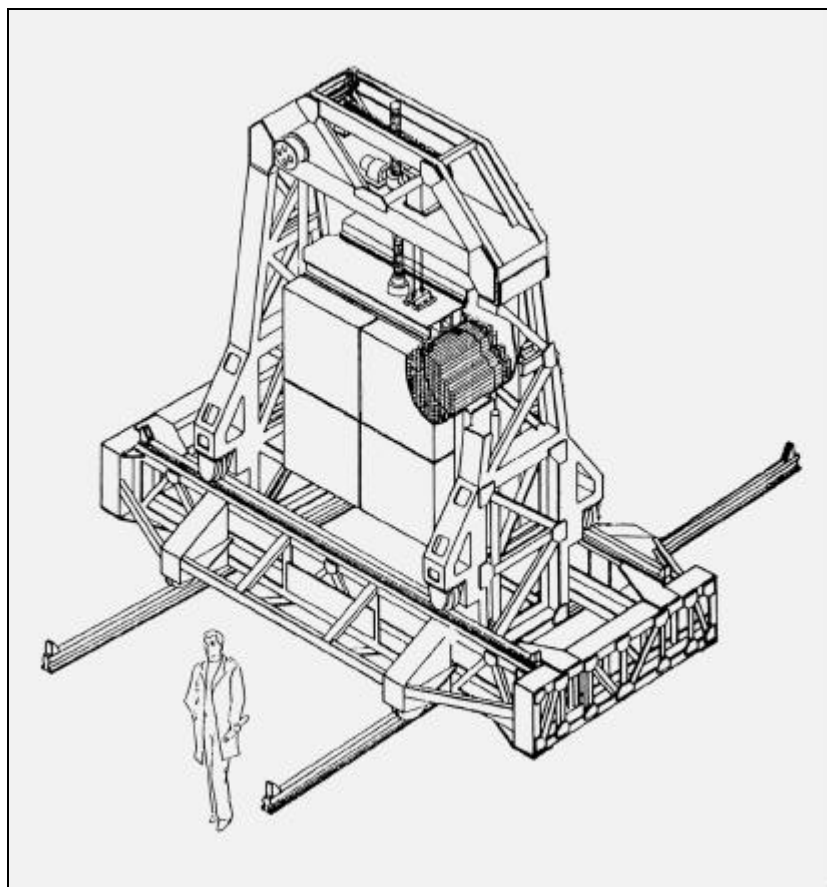


Рис.7. Общий вид детектора ГАМС-2000, используемого в экспериментах на ускорителе ИФВЭ.

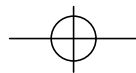
этого типа используются в ИФВЭ (рис.7), ФНАЛ и Брукхейвенской национальной лаборатории (США).

Регистрация космических частиц

Электромагнитные ливни могут развиваться не только в плотных средах, но и в газах, включая атмосферу Земли. Например, средний путь γ -кванта в воздухе до превращения в электрон и позитрон равен 390 м при давлении 1 атм. С точки зрения развития ливня атмосфера эквивалентна 50-сантиметровому блоку стекла ТФ1, и высокоэнергичные γ -кванты, попадающие в атмосферу из космоса, должны дать мощное черенков-

ское излучение. Источниками таких γ -квантов служат далекие звезды, и изучение энергетических спектров γ -квантов помогает лучше понять процессы, происходящие во Вселенной. Этим занимается молодая наука — гамма-астрономия.

Первые эксперименты по наблюдению черенковских вспышек от космических частиц были выполнены еще в 50-х годах прошлого столетия В.Голбрайтом и Дж.Джелли, а также Н.М.Нестеровой и А.Е.Чудаковым. Сейчас функционируют несколько крупных экспериментальных установок, на которых проводятся исследования в области гамма-астрономии. Черенковский свет в них регистрируется либо непосредственно ФЭУ с большими фотокатодами, либо детекторами, похо-



ФИЗИКА

жими на прожекторы. В фокусе прожекторных зеркал, имеющих диаметр до нескольких метров, располагаются чувствительные фотоприемники. Чтобы уменьшить фон от постороннего света и определить направление движения первичного γ -кванта, в одной установке используется ряд таких детекторов, расположенных на некотором расстоянии друг от друга, причем отбираются события, когда сигналы в детекторах появляются одновременно. Эксперимент, естественно, ведется только в безлунные ночи при прозрачной атмосфере.

Черенковское излучение сопровождает не только электромагнитные ливни, но и так называемые широкие атмосферные ливни, которые возникают при взаимодействии космических адронов высоких энергий с ядрами азота, кислорода и дру-

гих компонентов воздуха. При этом обильно рождаются π^0 -мезоны, которые быстро распадаются на два γ -кванта, вызывающих электромагнитные ливни. Благодаря регистрации черенковского излучения удается получать информацию о широком атмосферном ливне на всем пути его развития, тогда как другие методы позволяют исследовать характеристики ливня лишь на определенной глубине атмосферы.

Здесь нельзя не упомянуть космическую обсерваторию, носящую имя французского физика П.Оже, одного из пионеров исследования космических лучей. Обсерватория создается в Аргентине при сотрудничестве ученых из 19 стран. Ее основу составляют 1600 детекторов, расположенных через 1.5 км на площади 3000 км². Каждый детектор представляет собой ци-

линдр с основанием 10 м² и высотой 1.2 м, заполненный водой. Черенковский свет, излученный в воде заряженными частицами широкого атмосферного ливня, собирается на полусферический ФЭУ с диаметром фотокатода 23 см. Помимо черенковских счетчиков в установке имеются детекторы для регистрации флуоресценции воздуха, вызванной взаимодействием заряженных частиц с атомами азота. Обсерватория нацелена на изучение ливней с предельно высокими энергиями $\geq 10^{20}$ эВ.

Но есть один тип космических частиц, которые очень слабо взаимодействуют с веществом и их нельзя зарегистрировать по ливням в атмосфере — это нейтрино. Изучение космических нейтрино представляет особый интерес, так как может дать информацию о процессах,

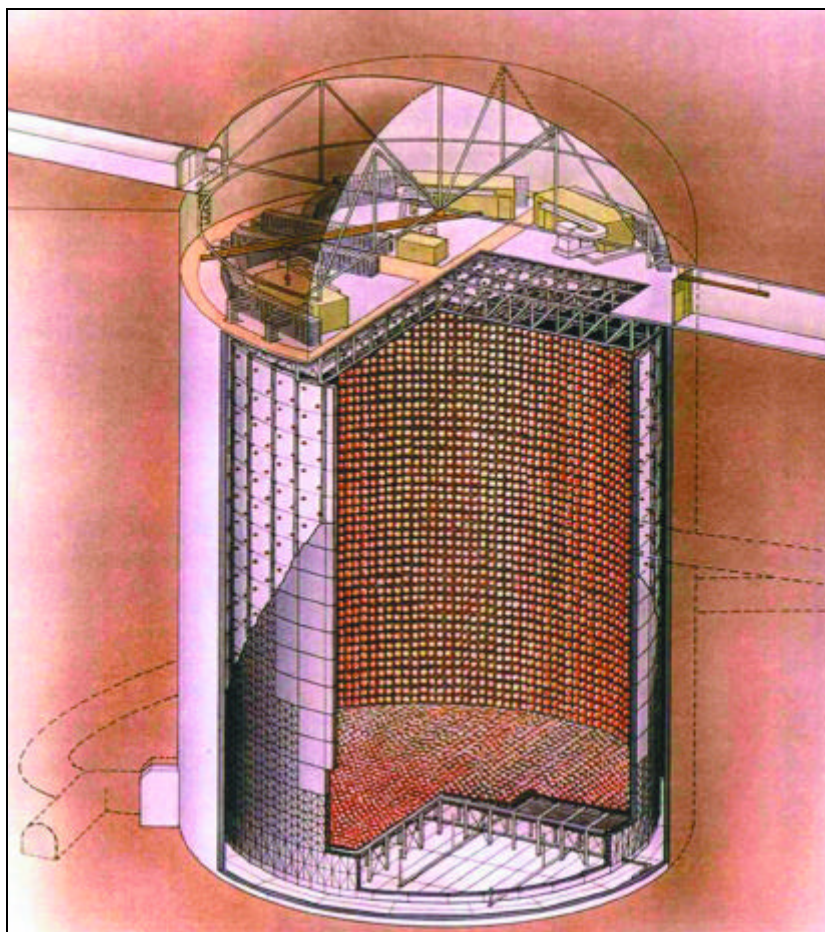
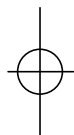


Рис.8. Общий вид установки SuperKamiokande. 50 000 т очень чистой воды находятся в цилиндрическом резервуаре высотой 41.4 м и радиусом основания 20 м. Возникающий в воде черенковский свет регистрируется при помощи

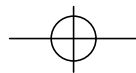
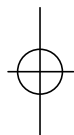
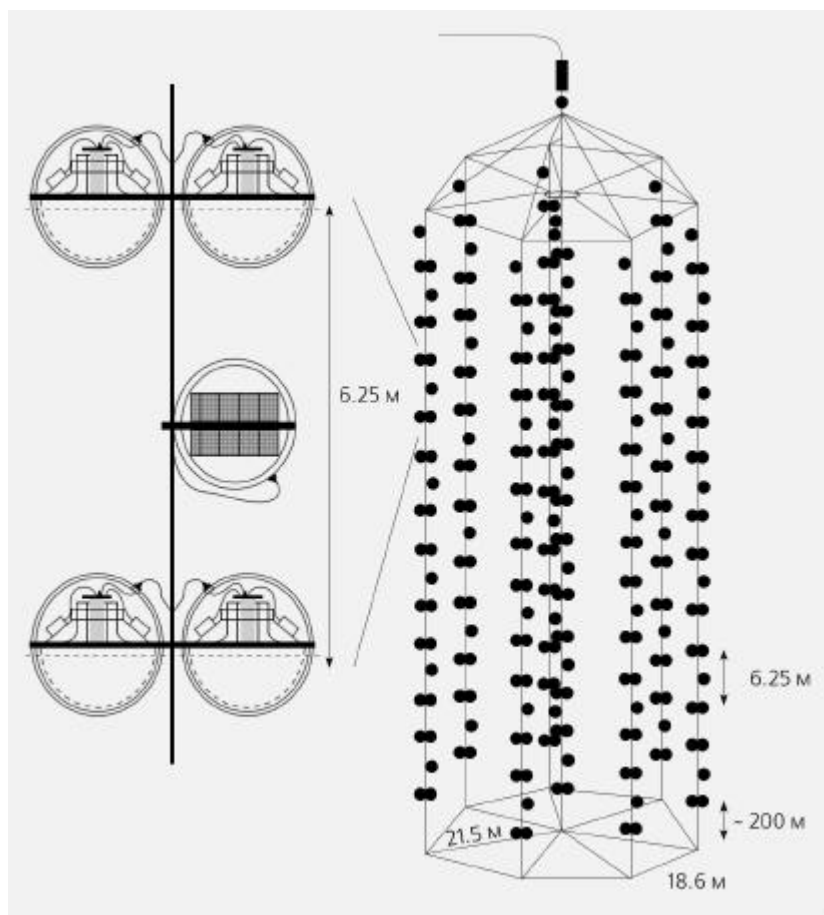


Рис.9. Схема расположения детекторов черенковского излучения Байкальского нейтринного телескопа.



происходящих в глубинах галактики и звезд, в частности внутри Солнца. Это сфера еще одной новой науки — нейтринной астрономии. Чтобы «уловить» данные частицы, приходится строить гигантские детекторы — весом в тысячи тонн и более — и помещать их глубоко под землей или под водой для снижения фона от всех других, менее проникающих, космических частиц. А регистрируется в данном случае все то же черенковское излучение — от вторичных заряженных частиц, возникших при взаимодействии нейтрино в воде (вода — самый дешевый, а иногда и бесплатный черенковский радиатор).

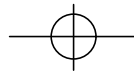
Крупнейший подземный водный детектор — SuperKamio-
kande [8] (рис.8). Он расположен в глубокой шахте под горой Камюка в 300 км от Токио. Основные направления исследо-

ваний связаны с регистрацией нейтрино: измерением потока нейтрино от Солнца и изучением энергетического спектра нейтрино, которые возникли при взаимодействии космических лучей в атмосфере. В частности, данные, полученные на этой установке вместе с результатами опытов на другой подземной установке SNO (Канада), использующей тяжелую воду (D_2O), позволили обнаружить осцилляции солнечных нейтрино [9]. К сожалению, в 2002 г. на японской установке произошла авария, в результате которой вышло из строя значительное число дорогостоящих ФЭУ. В настоящее время установка восстанавливается, и скоро исследования на ней будут продолжены.

Байкальский нейтринный телескоп [10] — первый глубоководный детектор космических частиц. Выбор озера Байкал



Рис.10. Монтаж гирлянды из ФЭУ в скважине, пробуренной в ледяном покрове Антарктиды.



ФИЗИКА

обусловлен большой глубиной (до 1.7 км) и прозрачностью воды. Кроме того, зимой оно покрывается толстым слоем льда, что упрощает монтаж установки. Черенковский свет от мюонов и взаимодействий нейтрино на больших глубинах регистрируется фотоумножителями, опускаемыми под воду на специальных тросах — стрингах (рис.9). Установка предназначена для исследования энергетических спектров нейтрино и мюонов, а также поиска новых частиц с необычными свойствами, которые могли бы прилететь из далеких миров. Сейчас строятся еще 3 глубоководных детектора — ANTARES, NESTOR и NEMO. Все они располагаются в Средиземном море у берегов Греции, Италии и Франции на глубинах от 2.4 до 4.1 км. Идея использования естественных водоемов для регистрации космических нейтрино была впервые сформулирована А.А.Марковым в 1960 г.

Кроме глубоководных существуют и наземные водные детекторы космических лучей. К ним относится, например, созданная в Московском инженерно-физическом институте уста-

новка НЕВОД, которая способна регистрировать все основные компоненты космических лучей, включая прошедшие сквозь Землю нейтрино.

Не только вода, но и лед используется в качестве радиаторов черенковского излучения космических частиц. В Антарктиде были обнаружены многокилометровые слои прозрачного льда, и этим воспользовались физики для создания на Южном полюсе комплекса AMANDA [11]. Черенковский свет, возникший во льду, регистрируется несколькими гирляндами из фотоумножителей, опущенных в глубокие отверстия (рис.10). По сравнению с водой лед обладает целым рядом преимуществ: он неподвижен, в нем нет светящихся микроорганизмов, создающих фон на больших глубинах естественных водоемов, радиоактивный фон льда очень мал, низкая температура способствует уменьшению шумов ФЭУ. Сейчас недалеко от детектора AMANDA строится еще более грандиозное сооружение под названием ICECUBE, в котором «просматриваемый» объем льда составит 1 км³. Главное направление работ на установках

AMANDA и ICECUBE — нейтринная астрономия.

* * *

Черенковские счетчики играют исключительно важную роль в физике частиц. Именно они были основным инструментом в экспериментах на ускорителях по обнаружению и исследованию образования антивещества, изучению закономерностей рождения и взаимодействия ядерно-активных частиц — адронов, поиску новых частиц и процессов в микромире. Трудно переоценить и значение черенковских детекторов для регистрации космических лучей. Использование в качестве радиаторов черенковского излучения земной атмосферы, искусственных и естественных водоемов и антарктических льдов позволило создать уникальные по своим возможностям установки для исследований в области гамма- и нейтринной астрономии. Результаты этих работ существенно расширили наши знания о процессах образования и свойствах космических частиц, в частности нейтрино. ■

Литература

1. Duteil P., Gilly L., Meunier R. et al. // Rev. Sci. Instrum. 1964. V.35. P.1523—1524.
2. Бушнин Ю.Б., Горин Ю.П., Денисов С.П. и др. // ПТЭ. 1971. №1. С.65—67.
3. Бинон Ф., Денисов С.П., Дютейль П. и др. // ЯФ. 1970. №11. С.636—639. Phys.Lett. 1969. B30. P.506—509.
4. Kozhevnikov A., Kubarovsky V., Molchanov V. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1999. V.A433. P.164—167.
5. Engelfried J., Filimonov I., Kilmer J. et al. // Nucl. Instr. Meth. V.A431. P.53—69.
6. Sauli F. // Nucl. Instr. Meth. 1997. V.A386. P.531—534.
7. Binon F., Buyanov V.M., Donskov S.V. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1986. V.A248. P.86—102.
8. Fukuda S., Fukuda Y., Hayakawa J. et al. (SuperKamiokande Collaboration) // Nucl. Instr. Meth. 2003. V.A501. P.418—462.
9. Копылов А.В. Солнечные нейтрино: новые результаты // Природа. 2004. №2. С.5—11.
10. Arpesella C., Bellotti E. and Bottiro F. // Nucl. Phys. (Proc. Suppl). 1994. V.B35. P.290—293.
11. Halzen F. // Nucl. Phys. (Proc. Suppl). 1995. V.B38. P.472—483.