

ЧЕРЕНКОВСКИЕ ДЕТЕКТОРЫ В ФИЗИКЕ ЧАСТИЦ

© 2004 г. Ю. К. Акимов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Поступила в редакцию 24.12.2003 г.

Рассматриваются наиболее яркие примеры применения детекторов черенковского излучения в современных физических экспериментах.

В 1934 г. Павел Алексеевич Черенков, аспирант С.И. Вавилова, обнаружил неизвестное ранее голубое свечение прозрачных жидкостей под действием γ -квантов. Анализируя исследованные П.А. Черенковым свойства этого излучения, С.И. Вавилов предположил, что открытое излучение связано с движением в среде заряженной частицы. Механизм нового эффекта — возникновение светового излучения при движении заряженной частицы со скоростью v , превышающей фазовую скорость света c/n в веществе с показателем преломления n — был выяснен в работе И.Е. Тамма и И.М. Франка (1937 г.), которая содержала и его количественную теорию. Это выдающееся открытие получило признание мирового физического сообщества, и в 1960 г. его авторы (П.А. Черенков, И.Е. Тамм, И.М. Франк) стали лауреатами Нобелевской премии.

С появлением фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), способных регистрировать слабые световые вспышки, характерные свойства излучения Черенкова–Вавилова послужили основой для создания высокоэффективных методов детектирования ядерных излучений. Наличие порога в излучении Черенкова–Вавилова позволило надежно разделять заряженные частицы по их скоростям. Замечательным свойством черенковского излучения оказалась его направленность: угол испускания световых фотонов строго коррелирован со скоростью частицы. В результате на некотором расстоянии от радиатора можно наблюдать световое кольцо, радиус которого несет информацию о скорости частицы. Достаточно толстые черенковские радиаторы явились основой для построения многих спектрометров полного поглощения электромагнитных каскадов.

В 1984 г. в Физическом институте АН СССР им. П.Н. Лебедева был проведен специальный международный семинар, посвященный 50-летию со дня открытия эффекта Черенкова–Вавилова, доклады на котором [1] свидетельствовали о больших успехах в конструировании различных типов

черенковских детекторов и их применении в экспериментах с космическими лучами и на ускорителях. Еще более впечатляющими оказались результаты разработок и применений черенковских детекторов в последующие годы.

Черенковские детекторы обеспечили возможность постановки и проведения многочисленных экспериментов различных физических направлений, диапазон которых чрезвычайно широк; ниже отражена лишь небольшая часть актуальнейших направлений. При этом отмечен также ряд исследований на ускорителях и в космосе, в которых для создания черенковских детекторов с высокими характеристиками использованы последние достижения в области радиаторов черенковского излучения и регистрирующих его фотоприемников.

ПОИСК ОСЦИЛЛЯЦИЙ НЕЙТРИНО

Черенковские детекторы занимают особое место в изучении свойств нейтрино. В первую очередь это относится к поиску нейтринных осцилляций, гипотезу о существовании которых выдвинул Б.М. Понтекорво в 1957 г. Наличие переходов нейтрино одного вида в другой означает нарушение постулированного закона сохранения лептонных чисел и массивность нейтрино [2]. Число переходов зависит от отношения расстояния R между точкой рождения и точкой детектирования нейтрино с определенным ароматом к энергии нейтрино E_ν . Амплитуда вакуумных осцилляций нейтрино зависит от углов смешивания массовых нейтринных состояний (в модели смешивания только двух нейтрино — от одного угла θ), а период — от разности квадратов их масс Δm^2 . Существованием осцилляций можно, в частности, объяснить проблему солнечных нейтрино: почему поток электронных нейтрино от Солнца, регистрируемый в известных Cl–Ar [3] и Ga–Ge [4, 5] радиохимических опытах, значительно ниже предсказываемого на основании стандартной солнечной модели. Для решения проблемы солнечных нейтрино был создан ряд новых

подземных установок с различными методиками регистрации (см. ссылки [1–12] в работе [6]). Важные результаты были получены в экспериментах на черенковских детекторах Kamiokande (2140 т воды, Япония) [7], Super-Kamiokande (50 тыс. т воды, 11 200 ФЭУ диаметром 50 см) [8] и особенно SNO (the Sudbury Neutrino Observatory — 1000 т тяжелой воды, Канада) [9]. В этих экспериментах измерялся поток борных нейтрино. В Kamiokande нейтрино регистрировались через упругое $\nu_e e$ -рассеяние и был обнаружен 49%-ный дефицит по сравнению с расчетным значением их потока. Выбор D₂O в SNO был обусловлен тем, что в этой прозрачной жидкости возможна регистрация нейтрино через реакции

$$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^- \quad (Q = -1.44 \text{ МэВ}), \quad (1)$$

$$\nu_x + d \rightarrow \nu_x + p + n \quad (Q = -2.2 \text{ МэВ}), \quad (2)$$

$$\nu_x + e \rightarrow \nu_x + e. \quad (3)$$

Первый процесс вовлекает только электронные нейтрино, а второй и третий — нейтрино любого типа. Таким образом, в детекторе SNO регистрируется отдельно как поток электронных нейтрино, так и суммарный поток активных нейтрино всех типов. Результатом эксперимента является доказательство существования нейтринных осцилляций и правильность предсказания потока нейтрино на основании стандартной солнечной модели.

Другим важнейшим результатом исследований на черенковском детекторе Kamiokande явилось обнаружение аномалии в отношении количества атмосферных мюонных и электронных нейтрино: мюонных нейтрино было зарегистрировано на 40% меньше, чем ожидалось из расчетов механизма их образования в атмосфере [10]. Кроме того, был проведен эксперимент на пучке ν_μ ($E_\nu \approx 1.3$ ГэВ), сформированном на ускорителе K2K, расположенном на расстоянии 250 км от Super-Kamiokande [11]. Регистрировались световые изображения от черенковского излучения, генерируемого мюонами и электронами. Различный характер световых изображений от электронов и мюонов позволил с достаточно высокой степенью надежности разделять эти частицы.

РЕГИСТРАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ

В результате взаимодействия с атмосферой падающих в нее первичных протонов и ядер очень высоких энергий образуются широкие атмосферные ливни (ШАЛ). Верхним пределом для энергии космических лучей считалось значение $E_l \approx 5 \times 10^{19}$ эВ, вытекавшее из сложившихся представлений о процессах рождения и ускорения частиц,

происходящих во Вселенной. Однако к началу 90-х годов было зарегистрировано несколько ШАЛ с энергиями $E > E_l$, что явилось астрофизической загадкой. Полагают, что источники космических лучей экстремальных энергий (КЛЭЭ) находятся за пределами нашей галактики. Межгалактические магнитные поля не достаточно сильны, чтобы значительно отклонять КЛЭЭ, это вселяет надежду найти источники их генерации по направлению осей ШАЛ, каждый из которых содержит миллиарды частиц и занимает площадь $S \sim 10 \text{ км}^2$. Однако КЛЭЭ попадают в земную атмосферу чрезвычайно редко — порядка одного события на 1 км^2 за 100 лет при $E > 10^{20}$ эВ, поэтому для достаточно эффективной регистрации КЛЭЭ требуются обсерватории огромной площади.

В частности, планируется во много раз расширить обсерваторию в штате Юта (США), в которой ШАЛ регистрируются по флюоресценции атмосферного азота, возбуждаемого заряженными частицами. Чтобы просматривать небо как в северном, так и южном полушарии Земли, другая обсерватория, площадью до $\sim 3000 \text{ км}^2$ в перспективе, создается в настоящее время в Аргентине [12]. Базовыми элементами этой обсерватории являются детекторы черенковского излучения. Его радиатором служит вода в баках объемом 11 м^3 , которые размещены на расстоянии 1.5 км друг от друга. В каждом баке свет регистрируется тремя большими ФЭУ ($\varnothing 22 \text{ см}$). По разнице во времени появления световых вспышек в разных баках может быть определен угол наклона оси ливня.

Черенковский свет в баках можно регистрировать круглосуточно, а флюоресценцию в воздухе — только при темном и безоблачном небе. В этом заключается важное преимущество черенковской методики перед флюоресцентной.

Для поиска КЛЭЭ прорабатывается также проект постановки эксперимента на Международной космической станции, с которой будет видна земная поверхность с $S \sim 150 \text{ тыс. км}^2$ [13]. Планируется регистрировать флюоресценцию и черенковское излучение в воздухе, значительная часть которого отражается от поверхности земли, моря и облаков.

НЕЙТРИННАЯ АСТРОНОМИЯ

Будучи нейтральными и слабо взаимодействующими частицами, нейтрино предоставляют превосходную возможность для поиска испускающих их объектов во Вселенной и изучения происходящих в ней явлений. Особый интерес при этом вызывают нейтрино сверхвысоких энергий, единственные из всех космических лучей, которые могут проходить через всю толщу Земли и образовывать в ней

мюоны, летящие для наблюдателей снизу вверх. Направления движения нейтрино и мюона коллинеарны в пределах угла $\alpha \approx 1.5/\sqrt{E_\nu}$ градусов, где энергия нейтрино выражена в ТэВ.

Свойство нейтрино — почти свободно проходить через вещество — является одновременно как положительным, так и отрицательным, поскольку оно создает большие трудности для детектирования нейтрино. Однако здесь на помощь приходит сама природа: огромные прозрачные водоемы, используемые в качестве радиаторов черенковского излучения и защиты от атмосферных космических лучей.

Первый такой детектор (нейтринный телескоп NT-200 [14]) был построен на оз. Байкал, в воду которого на глубину 1.1 км были погружены модули с ФЭУ ($\varnothing 37$ см) с типичным расстоянием ~ 6 м друг от друга. Геометрический объем этого телескопа к 1998 г. составлял $V \approx 10^5$ м³, а эффективный — от $2V$ до 6×10^6 м³ при регистрации нейтрино с энергией от 10 до 10^4 ТэВ. В работе [15] сообщалось о наблюдении этим телескопом ≥ 50 направленных вверх световых сигналов. Еще большего объема (до 1 км³ в перспективе) создаются черенковские нейтринные телескопы в Средиземном море у берегов Франции (ANTARES) [16] и Греции (NESTOR) [17].

Удивительным является черенковский детектор AMANDA, встроенный глубоко в исключительно прозрачный лед Антарктиды [18]. Длина поглощения света в нем в области максимальной чувствительности ФЭУ (~ 400 нм) составляет от 85 до 225 м. Модули с ФЭУ находятся на глубине от 1.5 до 1.9 км с шагом 10–20 м. К 1997 г. эффективная площадь детектора для регистрации мюонов, летящих снизу вверх, составляла 10^4 м². Анализ событий, зарегистрированных тогда в течение полугода, показал, что 153–188 из них были обусловлены такими мюонами. В настоящее время эффективная площадь детектора составляет $\sim 10^5$ м², ее планируется довести до 1 км² (проект IceCube).

Огромные массивы прозрачного льда Антарктиды оказались очень привлекательными для использования еще одного изумительного свойства черенковского излучения — эффекта Аскаряна, заключающегося в когерентной эмиссии радиоволн с частотой ~ 1 ГГц от нейтрино-индуцированных электромагнитных ливней [19]. Важно, что радиоэмиссия возрастает с энергией иницирующих ее частиц квадратично [20]. Существование эффекта Аскаряна было подтверждено недавно экспериментально [21]. Пучком фотонов с $E > 1$ ГэВ облучалась мишень из 3.5 т кварцевого песка, и с помощью антенн производился поиск радиоволн с

частотой от 0.3 до 6 ГГц. Были зарегистрированы четкие импульсы субнаносекундного радиочастотного диапазона, генерированные ливнями.

Лед Антарктиды настолько чист, что радиоволны могут передаваться на сотни и даже тысячи метров. В настоящее время на Южном полюсе действует прототип радиодетектора нейтрино сверхвысоких энергий RICE (Radio Ice Cherenkov Experiment) [22]. Антенны опущены глубоко в лед, в лунки, вместе с модулями фотодетектора AMANDA. Ведется обработка полученных экспериментальных данных, среди которых уже имеется несколько кандидатов в искомый эффект. В стадии подготовки находится другой черенковский радиодетектор — ANITA, который будет установлен на баллоне, запускаемом в 2006 г. [23]. Этот телескоп позволит просматривать огромный слой антарктического льда от горизонта до горизонта.

Интересно предложение использовать геологические залежи ультрачистой соли, которая в 2 раза тяжелее льда, поэтому в ней должны возникать от ливней более интенсивные черенковские радиоизлучения [24].

ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ НА УСКОРИТЕЛЯХ И В КОСМОСЕ

Черенковские детекторы стали незаменимым инструментом в многочисленных экспериментах с элементарными частицами и релятивистскими ионами. К числу важнейших достижений, полученных в том числе благодаря использованию черенковских детекторов для идентификации частиц, относятся, в частности, убедительные результаты о нарушении CP -инвариантности в B -мезонной системе, полученные в экспериментах на B -фабриках SLAC (США) и КЕК (Япония) (см., например, [25]). Это положило начало новой B -мезонной физике, фундаментальной задачей которой является объяснение соотношения в семействе кварков и между материей и антиматерией. Большая программа по B -мезонной физике предложена для исследований на ЛНС и Тэватроне, интенсивность B -мезонов на которых должна быть во много раз выше, чем на B -фабриках. В этих и других экспериментах [25] наибольшую эффективность по идентификации частиц обеспечивают так называемые РИЧ-детекторы (RICH — Ring Imaging Cherenkov), регистрирующие кольца от черенковского излучения.

Излучающей средой в РИЧ-детекторах являются преимущественно газы или аэрогель — наилегчайший твердый прозрачный материал, успешно заменяющий громоздкие газовые радиаторы при пороговых скоростях частиц ≤ 0.993 .

Структуру аэрогеля образуют сферические кластеры из кварца диаметром ~ 4 нм, формирующие

трехмерную сетку, поры которой заполнены воздухом (см., например, работу [26] и ссылки в ней). Размеры пор во много раз превышают размеры кластеров и могут регулироваться при изготовлении аэрогеля, в результате чего получают материал с коэффициентом преломления от 1.007 до 1.1.

Будучи твердым веществом, аэрогель позволяет конструировать компактные черенковские детекторы, что особенно важно для применения их в исследованиях на космических аппаратах. В частности, аэрогельный РИЧ-детектор является составной частью магнитного спектрометра эксперимента AMS, который планируется начать в 2004 г. на Международной космической станции Альфа [27]. В этом эксперименте поставлена фундаментальная задача — поиск антивещества и темной материи, что может быть осуществлено путем прецизионного измерения состава космических лучей.

В средах с малыми n интенсивность световой вспышки обычно оказывается очень слабой, поэтому возникает необходимость в достаточно эффективной регистрации даже единичных фотонов, причем зачастую в условиях большого уровня фона от сопутствующих процессов. Важным достоинством такого режима работы фотоприемников является то, что при этом автоматически осуществляется надежная энергетическая калибровка детектора.

Фотоприемники, особенно в РИЧ-детекторах, должны обеспечивать необходимую пространственную точность регистрации световых колец, что достигается путем использования относительно большого числа фоточувствительных каналов. Для этой цели промышленность предлагает многоканальные вакуумные фотоумножители (МФЭУ) с числом миниатюрных каналов ($\geq 2.5 \times 2.5$ мм) от 16 до 256 в одной колбе (диаметром ~ 5 см). До 2048 каналов получают в гибридном фотодиоде (ГФД), представляющем собой усилитель изображения, в котором фотоэлектроны ускоряются электрическим полем ~ 20 кВ, и каждый из них, попадая на кремниевый детектор, образует в нем $\sim 10^5$ электронно-дырочных пар. Современная технология позволяет расположить в той же самой вакуумной колбе (диаметром ~ 8 см) многоканальную регистрирующую микроэлектронику, причем в непосредственном контакте с позиционно-чувствительным кремниевым детектором.

Система из таких ГФД выбрана, в частности, в качестве фотоприемника в РИЧ-детекторе для экспериментов на ЛНС [28]. Однако при этом предусмотрен также и второй вариант — с использованием МФЭУ, стабильность работы которых лучше проверена временем.

Максимальную фоточувствительную площадь позволяют получать газовые позиционно-чувствительные приборы, наибольшая точность и быстродействие в которых достигается при использовании фотокатодов из CsI, чувствительных к свету с длиной волны < 220 нм. Так, в РИЧ-детекторе эксперимента COMPASS (ЦЕРН) площадь фотокатода, изготовленного из сегментированного CsI, составляет 5.3 м^2 [29].

Физические задачи, решаемые с помощью черенковских детекторов, чрезвычайно разнообразны. Черенковские детекторы обеспечивают самый эффективный способ поиска источников частиц экстремальных энергий и изучения природы их возникновения, что является актуальнейшей задачей современной астрофизики.

Использование прозрачных глубоких водоемов и огромных массивов льда в качестве радиаторов черенковского излучения и защиты от атмосферных космических лучей позволяет создавать уникальные телескопы для нейтринной астрономии.

Без черенковских детекторов невозможно было бы проводить идентификацию частиц в многочисленных экспериментах на ускорителях, а также на космических аппаратах. Возникающая при этом необходимость использовать быстродействующие многоканальные фотоприемники большой площади, способные регистрировать единичные фотоны, является определяющим фактором в развитии многих типов фоточувствительных приборов.

Обнаружение эффекта Черенкова—Вавилова явилось одним из крупнейших открытий 20-го века, без применения которого была бы невозможной постановка многих принципиально важных физических экспериментов. Имя автора этого открытия Павла Алексеевича Черенкова, лауреата Нобелевской премии, широко известно научной общественности всего мира и навсегда вошло в историю науки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Proceedings of the Seminar on Cherenkov Detectors, Nucl. Instrum. Methods A **248** (1986).
2. С. М. Биленький, Б. М. Понтекорво, УФН **123**, 181 (1977).
3. B. T. Cleveland *et al.*, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **38**, 47 (1995).
4. J. N. Abdurashitov *et al.*, astro-ph/0204245.
5. W. Hampel *et al.*, Phys. Lett. B **447**, 127 (1999).
6. V. Barger *et al.*, Phys. Rev. D **65**, 053016 (2002).
7. Y. Fukuda *et al.*, Phys. Rev. Lett. **77**, 1683 (1996).
8. Y. Fukuda *et al.*, Phys. Lett. B **539**, 179 (2002).
9. SNO Collab. (Q. R. Ahmad *et al.*), Phys. Rev. Lett. **89**, 011301 (2002).

10. Y. Fukuda *et al.*, Phys. Lett. B **433**, 9 (1998); Phys. Rev. Lett. **85**, 3999 (2000).
11. K2K Collab. (S.H. Ahn *et al.*), Phys. Lett. B **511**, 178 (2001).
12. <http://www.auger.org>
13. M. Pallavicini, Nucl. Instrum. Methods A **502**, 155 (2003).
14. I. A. Belolaptikov *et al.*, Astropart. Phys. **7**, 263 (1997).
15. B. K. Lubsandorzhev, Nucl. Instrum. Methods A **502**, 145 (2003).
16. G. D. Hallewell, Nucl. Instrum. Methods A **502**, 138 (2003).
17. S. E. Tzamarias, Nucl. Instrum. Methods A **502**, 150 (2003).
18. E. Andres *et al.*, Nature **401**, 441 (2001).
19. M. Markov and I. Zheleznykh, Nucl. Instrum. Method, A **248**, 242 (1986).
20. G. M. Frichter *et al.*, Phys. Rev. D **53**, 1684 (1996).
21. D. Saltzberg *et al.*, AIP Conf. Proc. **579**, 225 (2001).
22. I. Kravchenko *et al.*, Astropart. Phys. **19**, 15 (2003).
23. <http://www.ps.uci.edu/~anita>
24. M. Shiba, CERN Courier **41** (3), 20 (2001).
25. R. Forty, Nucl. Instrum. Methods A **502**, 275 (2003).
26. Ю. К. Акимов, ПТЭ, № 3, 5 (2003).
27. AMS Collab. (J. Alcaraz *et al.*), Phys. Lett. B **461** 387 (1999).
28. A. Braem *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **442**, 128 (2000).
29. E. Albrecht *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **502**, 112 (2003).

CHERENKOV DETECTORS IN THE PARTICLE PHYSICS

Yu. K. Akimov

The most striking examples of the applications of Cherenkov detectors in modern physical experiments are considered.