

УДК 539.1.07

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И УГЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДУЛЯ ВОДНОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО ДЕТЕКТОРА С ФОКУСИРОВКОЙ СВЕТА

Г. И. Мерзон, А. С. Русецкий

Измерена эффективность регистрации электронов с энергией 450 МэВ модулем водного черенковского детектора с фокусировкой света в зависимости от угла между осью детектора и направлением пучка. В качестве фокусирующего устройства использовался бочкообразный зеркальный отражатель параболического типа. Для улучшения угловых характеристик детектора применялись конические экраны – шторки. Показано, что применение шторок улучшает угловое разрешение прибора, не уменьшая его эффективность в чувствительной области.

Развитие методов регистрации частиц для исследования потоков мюонов [1] и нейтрино [2, 3] высоких энергий на больших расстояниях от ускорителя привело к появлению водных черенковских детекторов с фокусировкой света [4 – 10].

Из-за естественной расходимости таких пучков их регистрация требует применения детекторов большой площади, в качестве которых удобно использовать подводные черенковские счетчики. При этом использование фотоприемников (ФЭУ) с фокусирующими насадками позволит значительно повысить радиус круга "обзора" открытого черенковского детектора, в котором эффективность регистрации частиц (при однофотонном пороге) превышает 90%, и тем самым увеличить эффективную площадь черенковского детектора [9].

Фокусировка света заметно улучшает эффективность детектора и отношение сигнал/шум. В частности, для пучка, идущего параллельно оси детектора, который содержит ФЭУ диаметром d в фокальной плоскости зеркального рефлектора с диаметром

входного окна D [8 – 10], 1) амплитуда черенковского светового сигнала на фотокатоде ФЭУ увеличивается в $C(D/d)$ раз, где коэффициент $C \simeq 1$ зависит от формы рефлектора; 2) угловое разрешение детектора определяется соотношением $\Delta\theta \simeq 0,46d/D$; 3) наличие отражателя не влияет на скорость счета изотропного светового фона.

Недостатком глубоководных детекторов является жесткая привязка к определенному месту в океане или озере и необходимость использования специальных научных кораблей для их обслуживания.

Регистрацию "дальних" нейтрино на больших расстояниях от ускорителя при зондировании Земли нейтринным пучком не обязательно связывать только с глубоководными экспериментами в озерах и морях. Многие из этих задач могут быть решены с помощью стационарных или передвижных детекторов большой площади. Выбор возможностей здесь весьма широк, однако наиболее дешевыми вариантами остаются наземные (или подземные) водные черенковские детекторы. Такими детекторами могут быть а) фотоприемники в естественных водоемах, например, в небольших озерах с прозрачной водой, закрытых от дневного света [11]; б) фотоприемники в искусственных водоемах – бассейнах с очищенной проточной водой [12]; в) водные черенковские счетчики сотовой конструкции, состоящие из отдельных модулей.

Последний путь представляется предпочтительным, поскольку результаты, приведенные в [6], показывают, что применение даже сравнительно небольших параболических рефлекторов и ФЭУ позволяет создавать водные модули диаметром 4 – 5 м. Такие модули имеют весьма простую конструкцию, относительно хорошее угловое разрешение и могут эффективно регистрировать равновесные мюоны, сопровождающие нейтринный пучок. Объединение подобных модулей в годоскопы позволило бы получить дешевые детекторы с большой площадью регистрации ($S \simeq 10^2 - 10^3 \text{ м}^2$).

В ФИАН разработан макет модуля водного черенковского детектора с фокусировкой света площадью поперечного сечения около $0,65 \text{ м}^2$ (рис. 1). Модули имеют вид шестигранников, что позволяет состыковывать их в годоскопы практически без потери полезной площади. Каждый модуль предназначен для регистрации частиц, идущих вдоль его оси. Для снижения влияния посторонних частиц объем воды (около 300 л) ограничен двумя конусами с углом при вершине $2\theta_c = 82,6^\circ$ ($\theta_c \simeq 41,3^\circ$ – угол черенковского излучения в воде). Модуль имеет два фотоприемника с ФЭУ-110. Один из них, направленный навстречу пучку и снабженный бочкообразным параболическим рефлектором (диаметр рефлектора $D = 25 \text{ см}$, диаметр ФЭУ $d = 7 \text{ см}$, высота рефлектора $H = 26 \text{ см}$), дает сигнал совпадения, а другой, направленный по пучку, сигнал

антисовпадения и служит для устранения посторонних частиц. Конструкция модуля разборная. Его отдельные части сварены из листов нержавеющей стали толщиной 1,5 мм. В качестве герметизирующих прокладок используется резиновый шнур. Заливка и слив воды производится через отверстия, расположенные на передней стенке.

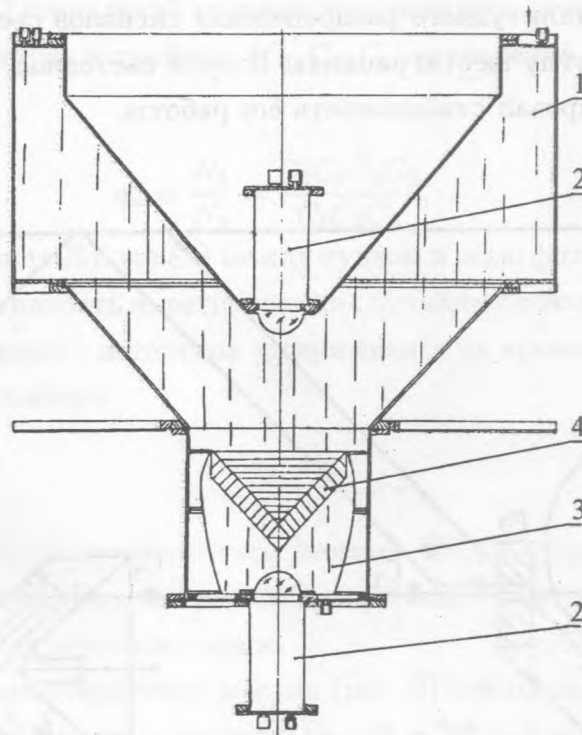


Рис. 1. Схематический разрез модуля водного черенковского детектора с фокусировкой света. 1 - водный объем; 2 - контейнеры с ФЭУ; 3 - параболический рефлектор; 4 - кольцевые конические экраны-шторки.

Для уменьшения постороннего фона и улучшения углового разрешения применялись конические экраны-шторки, пропускающие черенковский свет от частиц пучка, идущий под углами $41,3^\circ \pm \Delta\theta$, ($\Delta\theta$ - угловое расстояние между соседними экранами). Угловые характеристики водного черенковского детектора с фокусировкой света и коническими экранами были рассчитаны в [7]. Стенки детектора покрашены изнутри черной матовой краской.

В качестве радиатора излучения Вавилова-Черенкова использовалась обессоленная (деионизованная) вода, прозрачность которой существенно выше, чем у обычной или дистиллированной и приближается к прозрачности чистой морской воды [6]. Постепенное

ухудшение прозрачности воды потребовало ее периодической очистки перед каждым сеансом измерений путем пропускания через ионообменную колонку. Согласно измерениям [6] длина прозрачности воды из установки была равна 6 м для длины волны света 510 нм.

Контроль прозрачности воды осуществлялся по положению пика регистрируемого фотоприемником амплитудного распределения сигналов светодиода, помещенного в дальнем (от зеркала) углу шестигранника. Второй светодиод, расположенный у фотокатода ФЭУ, контролировал стабильность его работы.

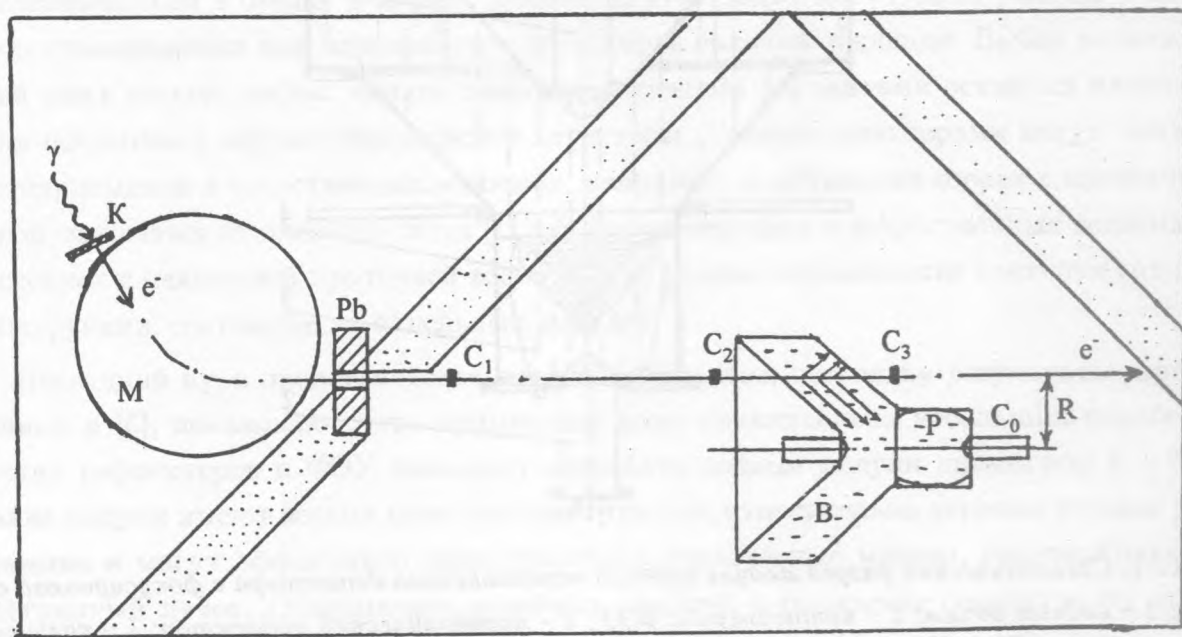


Рис. 2. Расположение водного черенковского детектора C_0 в пучке электронов ускорителя С-60 ФИАН. γ – пучок гамма-квантов; K – конвертор, e^- – пучок электронов; M – магнит; Pb – свинцовый коллиматор; C_1, C_2, C_3 – сцинтилляционные счетчики; B – водный радиатор; P – параболический рефлектор; R – расстояние между осью детектора и пучком.

Модуль черенковского детектора устанавливался в экспериментальном зале ускорителя С-60 ФИАН на платформе и экспонировался в пучке электронов с энергией 450 МэВ (рис. 2). Перемещение и поворот подвижной платформы с модулем позволяли изучить его пространственно-угловые характеристики. Внешний пучок электронов создавался за счет конверсии на латунной пластине толщиной 5 мм γ -квантов от внутренней

мишени. После магнитного анализа и коллимации пучок формировался сцинтилляционными счетчиками $C_1(10 \times 10 \times 1 \text{ см}^3)$ и $C_2, C_3(3 \times 3 \times 1 \text{ см}^3)$, включенными на совпадения. Временная растяжка пучка составляла 0,1 с, интенсивность $10 - 10^2$ электронов за сброс при длительности цикла 5 с.

В эксперименте измерялась эффективность η_u детектора, определяемая отношением четверных (C_0, C_1, C_2, C_3) совпадений сигнала черенковского детектора C_0 с сигналами сцинтилляционных счетчиков и тройных (C_1, C_2, C_3) совпадений при временном разрешении $\tau = 0,1 \text{ мкс}$,

$$\eta_u = \frac{N_4}{N_3} = \frac{C_0 C_1 C_2 C_3}{C_1 C_2 C_3}, \quad (1)$$

в зависимости от расстояния R и угла Θ между пучком и осью фотоприемника. Одновременно измерялась эффективность η_c регистрации случайных совпадений (C_0, C_1, C_2, C_3), когда сигнал от черенковского детектора задерживался на время $t_s = 0,2 \text{ мкс} > \tau$. Истинная эффективность детектора

$$\eta = \frac{\eta_u - \eta_c}{1 - \eta_c}, \quad (2)$$

и при $\eta_c \ll \eta_u$ близка к η_u . Высоковольтное питание ФЭУ выбиралось таким образом, чтобы амплитуда однофотоэлектронных сигналов была выше порога дискриминации (14 мВ) сигналов ФЭУ в логическом канале.

Измерения угловой характеристики модуля (рис. 3) показали, что в случае рефлектора без шторок она имеет большую ширину. При $\Theta \simeq 20^\circ$ наблюдается рост эффективности, обусловленный попаданием на ФЭУ прямого черенковского света. С увеличением угла эффективность падает, поскольку частицы, дающие неотраженный свет, не попадают в объем радиатора. Влияние прямого света устраняется постановкой конических кольцевых шторок внутри параболического рефлектора. Шторки позволяют также снизить эффективность регистрации электронов, идущих под углом $\Theta = 2\Theta_c \simeq 82,6^\circ$ к оси детектора. Уменьшение шага между соседними шторками с 10 мм до 5 мм улучшает угловое разрешение детектора в два раза (с $\Delta\Theta \simeq 24^\circ$ до $\Delta\Theta \simeq 12^\circ$) при небольшом снижении эффективности. Расположение шторок внутри рефлектора оказалось более выгодным, чем вне его. Результаты измерений угловых характеристик детектора совпадают с оценками, сделанными в [7].

Зависимость эффективности детектора от расстояния R между его осью и пучком (рис. 4) несколько иная, чем для прототипа [6]. Наблюдается некоторое снижение эффективности при прохождении пучка через центр и периферию детектора. Объяснение

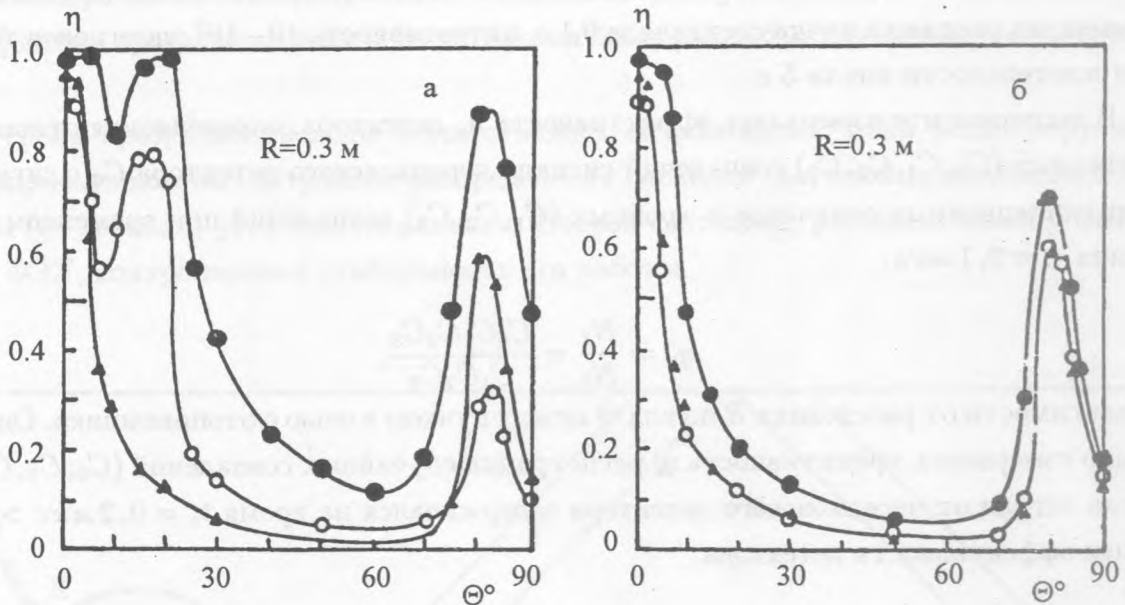


Рис. 3. Угловые характеристики $\eta(\Theta)$ модуля водного черенковского детектора с фокусировкой света ($R = 0,3$ м); Θ – угол между направлением пучка и осью детектора. а) ● – без шторок; ○ – шторки с шагом 0,5 см вне рефлектора; ▲ – шторки с шагом 0,5 см внутри рефлектора. б) Шторки внутри рефлектора: ● – шаг 1 см; ▲ – шаг 0,5 см; ○ – шаг 0,5 см при включенном счетчике антисовпадений.

этого, по-видимому, заключается в том, что в обоих случаях на пути пучка оказывается толстый слой вещества (стальной фланец толщиной 2 см), благодаря чему часть электронов, попавших в водный радиатор, теряет энергию и рассеивается, так что их черенковский свет не попадает на фотоприемник. Это обстоятельство не должно сказаться при регистрации релятивистских равновесных мюонов нейтринного пучка. Анализ амплитудных спектров показал, что снижение эффективности детектора является следствием уменьшения средней амплитуды сигналов, т.е. ослабления черенковского света, попавшего на фотоприемник.

Исследование влияния на характеристики детектора антисовпадательного фотоприемника показало нецелесообразность его применения: подавление посторонних частиц оказалось меньше, а снижение эффективности регистрации полезных событий больше, чем при применении шторок.

По результатам измерений можно сделать вывод, что водяной черенковский детек-

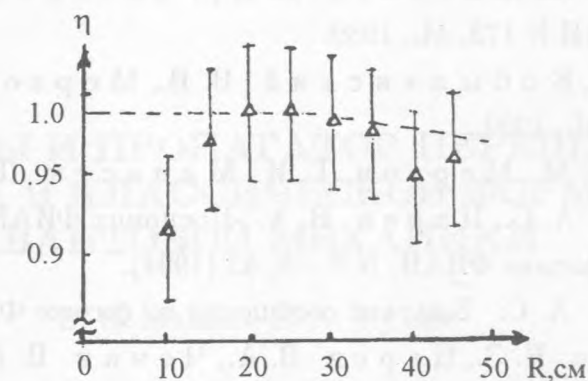


Рис. 4. Зависимость эффективности черенковского детектора η от расстояния R между осью детектора и пучком ($\Theta = 0$). Кривая — результат расчета эффективности для прототипа [6].

тор модульной конструкции с фокусировкой света и кольцевыми коническими экранами — шторками может служить в качестве наземного (подземного, подводного) детектора равновесных мюонов, сопровождающих пучок "дальних" нейтрино. Детектор дешев в изготовлении, обладает узкой угловой направленностью и высокой эффективностью регистрации, не чувствителен к фону медленных частиц. Модульная конструкция детектора позволяет собирать годоскопы площадью $10^2 - 10^3 \text{ м}^2$, что необходимо для регистрации "дальних" нейтрино на больших расстояниях от ускорителя. Альтернативой годоскопу может служить закрытый водный бассейн с погруженными в него фотоприемниками. Опыт эксплуатации водных черенковских детекторов с замкнутым объемом воды показывает необходимость применения в них высокопрозрачной денонизованной воды с ее периодической или постоянной очисткой в ионообменной колонке.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пустоветов В. П., Трубкин Ю. А., Федоров В. М. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 4, 58 (1982).
- [2] Березинский В. С., Зацепин Г. Т. УФН, **122**, 3 (1977).
- [3] Петрухин А. А. Исследование мюонов и нейтрино в больших водных объемах, Труды 1-й Всесоюзной конференции, Алма-Ата, 1983, с. 3.

- [4] Мерзон Г. И., Минасян Д. И., Русецкий А. С., Царев В. А. Препринт ФИАН N 173, М., 1989.
- [5] Абин А. А., Кобылянский В. В., Мерзон Г. И. и др. Препринт ФИАН N 159, М., 1990.
- [6] Гришин В. М., Мерзон Г. И., Минасян Д. И., Русецкий А. С., Царев В. А. Препринт ФИАН N 97, М., 1991; Краткие сообщения по физике ФИАН, N 7 – 8, 43 (1994).
- [7] Русецкий А. С. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 7, (1998).
- [8] Гогитидзе Н. З., Царев В. А., Чечин В. А. Препринт ФИАН N 94, М., 1984; Краткие сообщения по физике ФИАН, N 46, 23 (1984).
- [9] Гогитидзе Н. З., Царев В. А., Чечин В. А. Препринт ФИАН N 216, М., 1988.
- [10] Гогитидзе Н. З., Царев В. А., Чечин В. А. Препринт ФИАН N 260, М., 1988.
- [11] Мягких А. И., Харламов Ю. М. Океанология, **26**, 721 (1986).
- [12] Данильченко И. А., Петрухин А. А., Потапов Г. А. Исследование мюонов и нейтрино в больших водных объемах, Труды 1-й Всесоюзной конференции, Алма-Ата, 1983, с. 78.

Поступила в редакцию 28 апреля 1998 г.