

УДК 539.1.07

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВОДНЫХ ЧЕРЕНКОВСКИХ ДЕТЕКТОРОВ С ФОКУСИРОВКОЙ СВЕТА

В. М. Гришин, Г. И. Мерзон, Д. И. Минасян, А. С. Русецкий, В. А. Царев

Изучены характеристики черенковского детектора с фокусировкой света, способного эффективно регистрировать широкие направленные пучки релятивистских заряженных частиц в водной среде. Измерения подтвердили расчетные свойства детектора – его высокую эффективность и узкую угловую направленность. Реальный коэффициент светосбора оказался примерно вдвое ниже расчетного.

Методы глубоководной регистрации частиц интенсивно развиваются в связи с исследованиями мюонов и нейтрино очень высоких энергий под водой. Эти методы лежат в основе перспективных проектов, нацеленных на поиски монополя Дирака и других экзотических частиц, изучение осцилляций нейтрино в веществе Земли, зондирование ее ядра нейтринным пучком от ускорителей высокой энергии, а также на решение ряда прикладных задач геофизики и геодезии [1].

Пучки нейтрино, образованных ускорителем высокой энергии, детектируются по генерируемым ими равновесным мюонам. В силу расходимости этих пучков для их регистрации на далеком расстоянии от ускорителя требуется детектор большой площади, которым может служить фотоприемник (ФЭУ), погруженный в водную среду. Имея весьма скромные размеры, он способен просматривать значительный объем окружающей его водной толщи, которая служит радиатором черенковского света, создаваемого релятивистскими мюонами.

При движении релятивистской частицы в воде навстречу фотоприемнику, расположенному на расстоянии R от ее траектории, число m черенковских фотонов, падающих на плоский фотокатод диаметром d , дается соотношением [2]:

$$m(R) = (30d^2/R)\exp(-1,5R/\Lambda), \quad (1)$$

где d , R и Λ (длина поглощения света) измеряются в сантиметрах. Отсюда следует, что радиус обзора R_0 такого водного черенковского детектора, отвечающий эффективности регистрации частиц η , близкой к единице, примерно лишь на порядок больше диаметра фотокатода ФЭУ, т.е. при $d = 15$ см $R_0 \simeq 1,5$ м [2].

В случае регистрации широкого параллельного пучка частиц можно добиться увеличения R_0 , осуществляя фокусировку черенковского света [3]. Это позволяет умножить число фотонов, попадающих на фотокатод ФЭУ, повысить эффективность детектора, улучшить отношение сигнал/шум. Расчеты [3] показали, что при регистрации частиц, идущих параллельно оси детектора, фотоприемник которого находится в фокальной плоскости параболического зеркального отражателя с диаметром входного окна D , амплитуда светового сигнала на фотокатоде ФЭУ благодаря сбору отраженного света возрастает в CD/d раз, где $C \simeq 1$, а угловое разрешение детектора $\langle \Theta \rangle = 0,45d/D$. При этом наличие отражателя не сказывается на регистрации изотропного светового фона. Это позволяет повысить уровень дискриминации сигналов ФЭУ и облегчает подавление световых помех (которые имеют, преимущественно, однофотонную природу [4]) при глубоководном детектировании частиц в естественных водоемах.

Эффективность черенковского детектора при пороге электроники, отвечающем регистрации одного фотоэлектрона,

$$\eta(m) = 1 - P_0(m) = 1 - \exp(-qmKQ). \quad (2)$$

Здесь $P_0(m)$ – вероятность непопадания фотонов на фотокатод ФЭУ (с квантовой эффективностью q) при среднем их числе m , $K = CD/d \geq 1$ – коэффициент светосбора зеркального параболического рефлектора (в отсутствие последнего $K = 1$), $Q = [R/(R + D)]\exp(-1,5D/\Lambda)$ – поправочный коэффициент, учитывающий удлинение пути светового луча между входным окном рефлектора и его фокальной плоскостью. Имеется еще ряд факторов, уменьшающих светосбор: потери света при его отражении рефлектором (γ_1) и на границах раздела прозрачных сред, разделяющих ФЭУ и водный радиатор (γ_2), а также неидеальная геометрия отражателя, расходимость пучка, рассеяние частиц и т.п. (γ_3). Таким образом,

$$K = \gamma_1\gamma_2\gamma_3CD/d = \gamma CD/d = C'D/d. \quad (3)$$

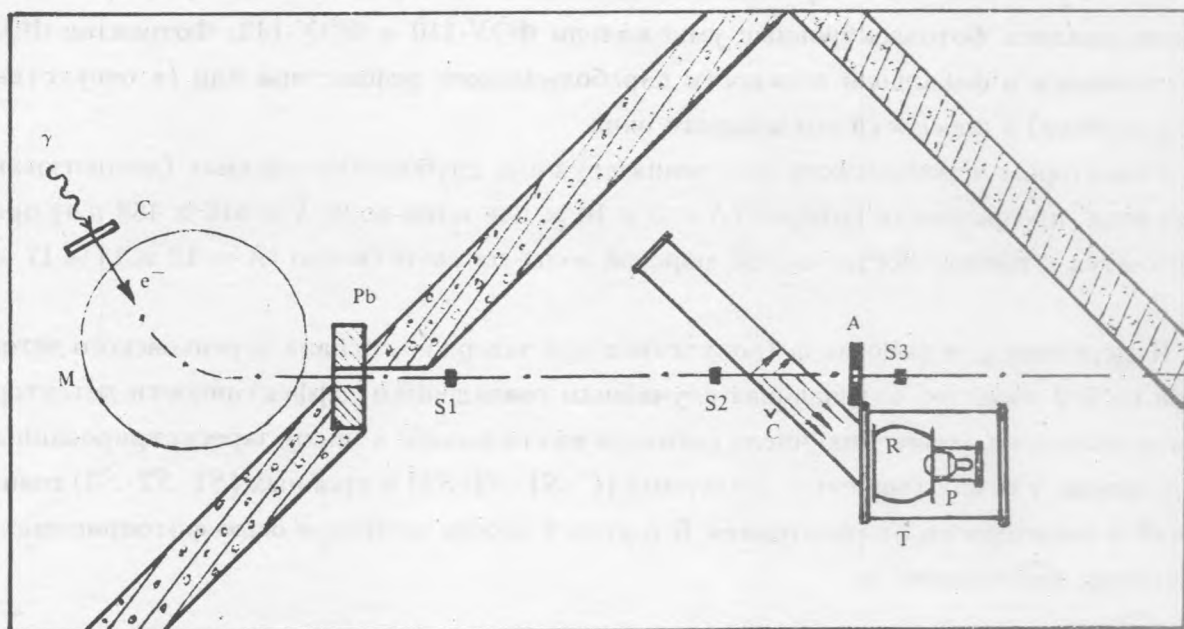


Рис. 1. Расположение водного черенковского детектора C в пучке электронов ускорителя $C-60$ ФИАН. γ - пучок гамма-квантов, C - конвертор, e^- - вторичный пучок электронов, Pb - свинцовый коллиматор, $S1$, $S2$, $S3$ - совпадетельные сцинтилляционные счетчики, A - антисовпадетельный счетчик, T - водяной бак, P - фотоприемник, R - бочкообразный параболический рефлектор. Штрих-пунктирная линия - ось пучка электронов. Стрелки показывают направление распространения черенковского света.

Свойства открытого водного черенковского детектора с фокусировкой света изучались на прототипе, который представляет собой бак, наполненный водой, с цилиндрическим рукавом длиной 3 м и диаметром 26 см (рис. 1). Продольная ось бака параллельна внешнему пучку электронов с энергией 450 МэВ синхротрона $C-60$ ФИАН. Угол между осями бака и рукава ($41,3^\circ$) равен углу черенковского излучения релятивистских электронов в воде. Детектор располагался на подвижной платформе, перемещение которой поперек пучка позволяло измерять $\eta(R)$. Применялся отражатель бочкообразной формы, имеющий наибольший фактор $C = 1,52$ [3]. Отражатель был изготовлен из плоского диска органического стекла методом горячего прессования сжатым газом в матрицу параболической формы с последующим нанесением и закреплением внешнего зеркального слоя Al толщиной около 1 мкм [5]. Фотоприемник с отражателем (или без него) мог как единое целое поворачиваться внутри бака вокруг вертикальной оси, что позволя-

ло менять угол падения θ черенковского света на детектор. В качестве фотоприемника использовались фотоэлектронные умножители ФЭУ-110 и ФЭУ-143. Фотокатод ФЭУ располагался в фокальной плоскости параболического рефлектора или (в отсутствие фокусировки) в плоскости его входного окна.

Радиатором черенковского излучения служила глубокообессоленная (деионизованная) вода, прозрачность которой ($\Lambda = 5$ и 10 м для длин волн $\lambda = 510$ и 488 нм) приближается к прозрачности чистой морской воды соответственно ($\Lambda = 12$ и $14 - 17$ м) [6].

Измеренная η_e и фоновая η_b (полученная при задержке сигнала черенковского детектора на $0,2$ мкс, т.е. отвечающая случайным совпадениям) эффективности детектора определялись по отношению числа сигналов на его выходе к числу зарегистрированных электронов, т.е. по отношению четверных ($C \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3$) и тройных ($S_1 \cdot S_2 \cdot S_3$) совпадений в зависимости от расстояния R и угла θ между пучком и осью фотоприемника. Истинная эффективность

$$\eta = (\eta_e - \eta_b)/(1 - \eta_b) \quad (4)$$

и при $\eta_b \ll 1$ близка к η_e . Наличие плато эффективности черенковского детектора по напряжению питания ФЭУ свидетельствует о практически полной регистрации малых сигналов, отвечающих однофотозлектронному режиму его работы.

Измеренная эффективность завышается случайными совпадениями ($\eta_b \simeq 1\%$), что учитывается в (3), и размножением части электронов в радиаторе. Оценки показали, что 79% электронов проходят детектор без образования пар: 29% электронов не излучают тормозной квант, а для 50% оставшихся последний не успевает конвертировать в e^+e^- -пару. Однако около 21% электронов все же генерируют e^+e^- -пару внутри радиатора. Чтобы исключить этот эффект, после радиатора помещался дополнительный антисовпадательный счетчик A с центральным отверстием для пучка. При этом измеренная эффективность детектора понизилась не более чем на 2-3%, что иллюстрирует меру вклада процесса размножения электронов.

Полученные значения $\eta(R)$ приведены на рис. 2. Плавные кривые – результаты расчета по формулам (1), (2) для $\Lambda = 6$ м, $q = 0,12$. При этом коэффициенты γ подбирались путем аппроксимации экспериментальных данных расчетными кривыми (2). Результаты приведены в таблице 1.

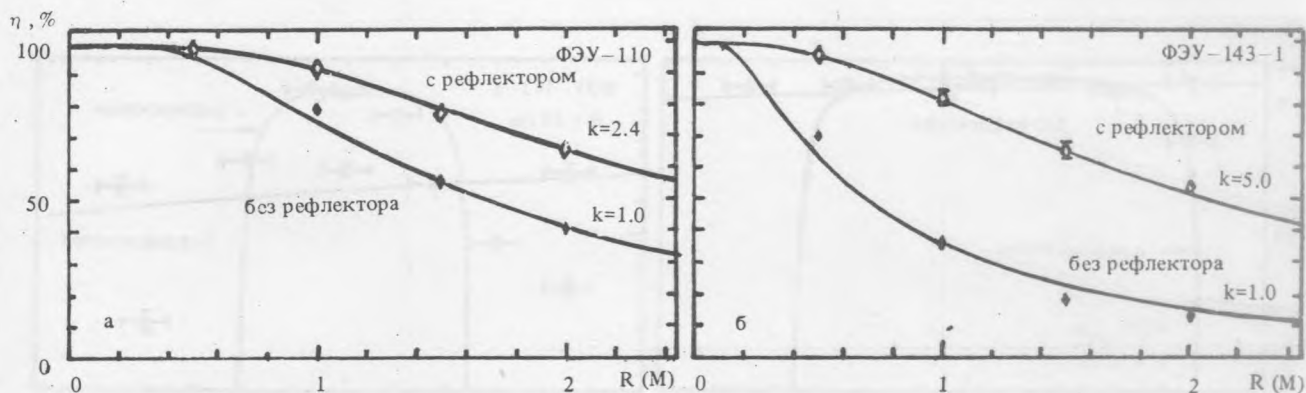


Рис. 2. Эффективность η водного черенковского детектора с фотоприемником на основе фотоэлектронного умножителя ФЭУ-110 (а) и ФЭУ-143-1 (б) как функция расстояния R от его оси до пучка электронов. \diamond - измерения с рефлектором, \blacklozenge - измерения без рефлектора, кривые - результаты расчета по формулам (1) и (2).

Т а б л и ц а 1

Результаты обработки экспериментальных данных

Фотоприемник	$d, \text{мм}$	q	C	D/d	$\Lambda, \text{м}$	γ	K	C'
ФЭУ-110	70	0,12	1,52	0,28	6,0	0,45	2,4	0,68
ФЭУ-143	40	0,12	1,52	0,16	6,0	0,53	5,0	0,80

Небольшое ($\sim 10\%$) различие полученных значений γ , по-видимому, объясняется тем, что формулы (1), (2) выведены в предположении $d/D \ll 1$, что не вполне отвечает условиям нашего эксперимента. Амплитудный анализ сигналов детектора с фокусировкой света показывает, что рост его эффективности прямо связан с увеличением числа фотонов на фотокатоде ФЭУ.

На рис. 3 представлены угловые характеристики детектора. (Положительные значения θ отвечают повороту оси детектора от пучка, отрицательные - к пучку электронов.) В целом, они согласуются с результатами расчетов [7, 8]. Отличие $\eta(\theta)$ от нуля при больших θ , по-видимому, объясняется многократными отражениями света от стенок рукава. Как и ожидалось, водный черенковский детектор без фокусировки света обладает более широкой угловой характеристикой при заметно меньшей эффективности.

Таким образом, испытания прототипа водного черенковского детектора с фокусировкой света зеркальным параболическим отражателем бочкообразной формы, проведенные в пучке электронов с энергией 450 МэВ, показали, что такой детектор обладает

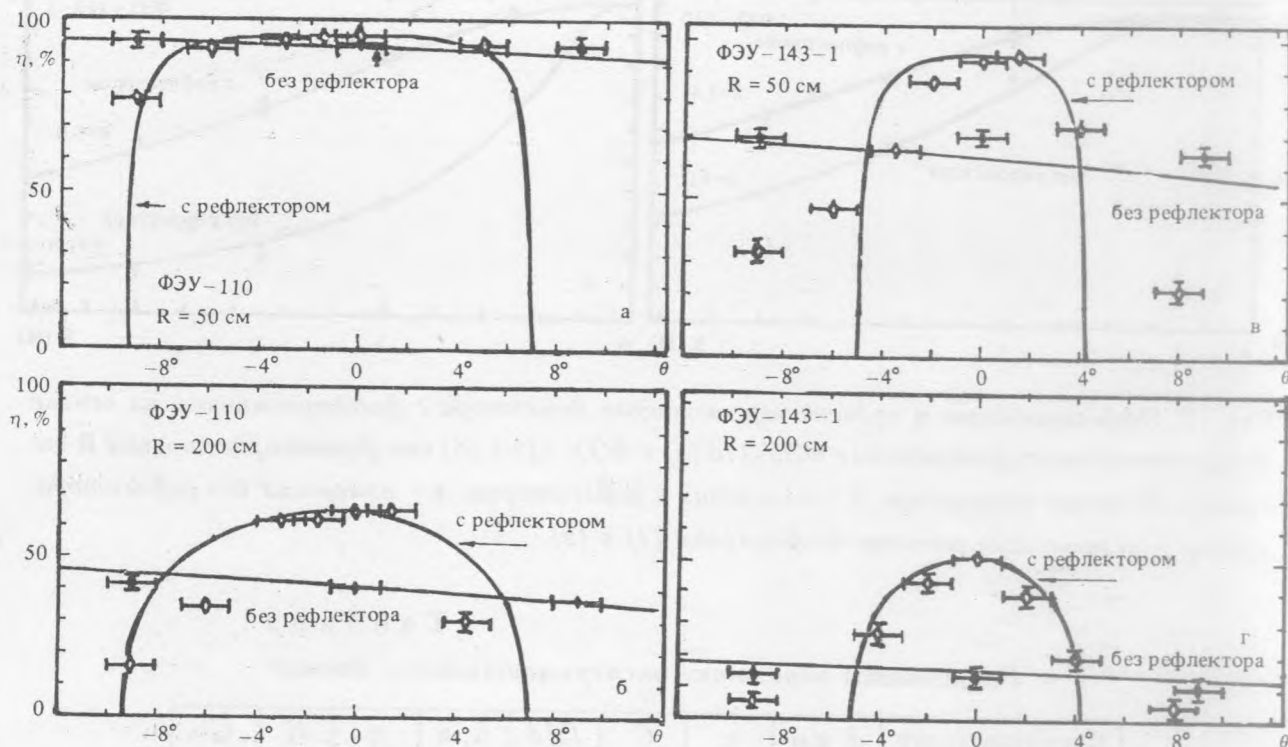


Рис. 3. Угловые характеристики водного черенковского детектора с фотоприемником на основе фотозлектронного умножителя ФЭУ-110 (а, б) и ФЭУ-143-1 (в, г). \diamond – измерения с рефлектором, \blacklozenge – измерения без рефлектора. $R = 0,5$ м (а, в); $R = 2,0$ м (б, г). Плавные кривые – результаты расчета [7, 8].

высокой эффективностью, а также узкой угловой направленностью, и подтвердили результаты выполненных ранее расчетов [3, 7, 8]. В то же время, реальный коэффициент светосбора оказался приблизительно в два раза ниже ожидаемого.

Авторы выражают свою искреннюю признательность руководству Лаборатории электронов высоких энергий ФИАН и персоналу ускорителя С-60 за предоставленные возможности проведения эксперимента. Авторы также благодарят Л. С. Перова за разработку части электронной аппаратуры.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Царев В. А., Чечин В. А. Нейтрино для геофизики. М., изд. "Знание", 1987.

- [2] Мерзон Г. И., Минасян Д. И., Русецкий А. С., Царев В. А. Препринт ФИАН N 173, М., 1989.
- [3] Гогитидзе Н. З., Царев В. А., Чечин В. А. Препринт ФИАН N 94, М., 1984; Препринт ФИАН N 216, М., 1988; Препринт ФИАН N 260, М., 1988.
- [4] Ильичев В. И., Кобылянский В. В., Мягких А. И. и др. Световой фон океана. Ред. В. И. Ильичев, А. А. Петрухин. М., Наука, 1990.
- [5] Гришин В. М., Мерзон Г. И., Минасян Д. И., Русецкий А. С., Царев В. А. Препринт ФИАН N 97, М., 1991.
- [6] Ерлов Н. Г. Оптическая океанография. М., Мир, 1975.
- [7] Царев В. А., Чечин В. А. Препринт ФИАН N 301, М., 1986.
- [8] Белоусов А. С., Гогитидзе Н. З., Усик А. П., Царев В. А. Препринт ФИАН N 25, М., 1991.

Поступила в редакцию 21 июня 1994 г.