

УДК 539.1.07

## ОБ УГЛОВОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОБИРАНИЯ ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕТА ОТРАЖАТЕЛЯМИ ПАРАБОЛОИДНОГО ТИПА

А. С. Русецкий

*Проанализирована угловая зависимость эффективности собирания черенковского света отражателями параболоидного типа, снабженными коническими экранами. Показано, что применение конических экранов препятствует регистрации неотраженного света и улучшает угловые характеристики детектора с отражателем.*

В работах [1, 2] была предложена оптическая система (ниже называемая системой параболоидного типа), увеличивающая светосбор от широкого пучка параллельно движущихся заряженных частиц (например, мюонов), излучающих черенковский свет в конденсированной среде. Такая система могла бы найти применение при регистрации частиц в больших водных объемах по их черенковскому излучению, например, в детекторе типа ДЮМАНД, или для регистрации "дальних" нейтрино при изучении нейтринных осцилляций или в геофизических задачах [3]. Было показано, что использование отражателя диаметром  $D$  должно увеличить световой поток на фотоприемнике (например, ФЭУ) в  $K = CD/d$  раз, где коэффициент  $C \cong 1 - 1,5$  зависит от формы отражателя,  $d$  – диаметр фотоприемника.

В работе [2] аналитически анализировались основные черты зависимости коэффициента усиления светосбора для параболоидной системы, показанной на рис. 1, от положения траектории частицы. Было показано, что коэффициент усиления  $K(\rho, \theta, \varphi)$  имеет соответствующие пределы по углам  $\theta$  и  $\varphi$ , где  $K(\rho, \theta, \varphi) > 0$  ( $\rho$  – расстояние от точки пересечения траектории частицы с плоскостью входного окна фотоприемника до его центра;  $\theta + \pi/2$  – полярный,  $\varphi$  – азимутальный углы). Это условие отвечает частицам,двигающимся по образующим конуса, с углом раствора, равным черенковскому углу  $\theta_c$  (рис. 2). Физический смысл такого результата очевиден: система чувствительна к тем

частицам, свет от которых падает на отражатель под углами к его оси, близкими к  $\theta_c$ , причем  $K > 0$  при  $|\theta| < \Delta\theta_1 = 0,46d/D$  [2].

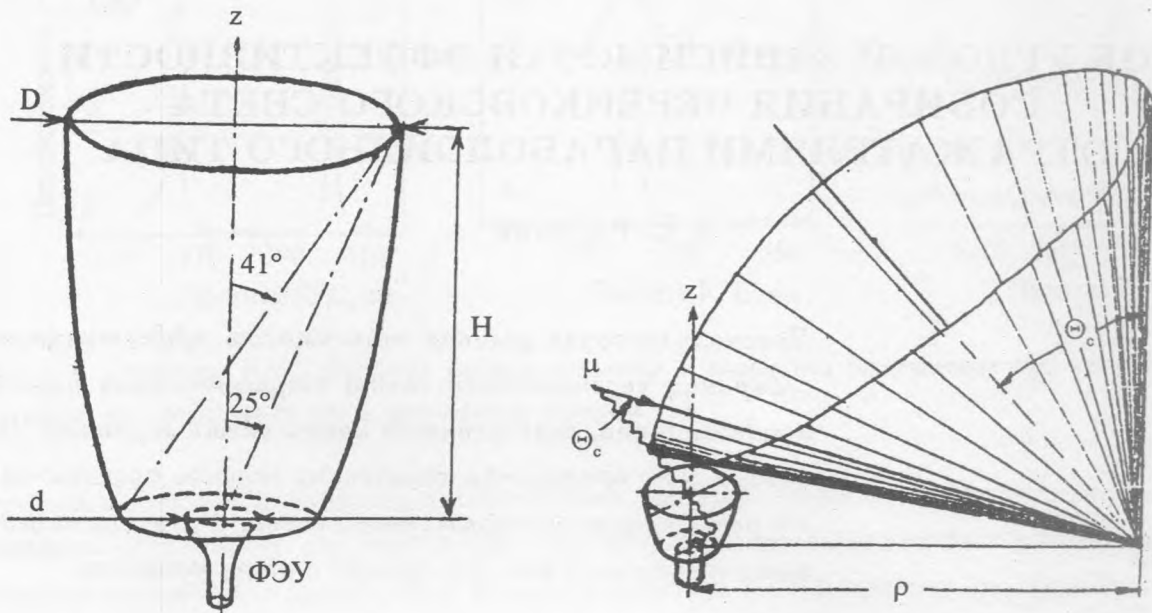


Рис. 1. Общий вид светособирающей системы с отражателем параболического типа [1].

Рис. 2. Положение относительно светособирающей системы конуса угловой направленности коэффициента усиления светосбора  $K(\rho, \theta, \varphi)$  для частицы (например, мюона) при данном  $\rho$  ( $\rho$  – расстояние от точки пересечения траектории частицы с плоскостью входного окна фотоприемника, до его центра,  $\theta + \pi/2$  – полярный,  $\varphi$  – азимутальный углы) [2].

Отсюда могут быть получены границы области чувствительности параболической системы к отраженным лучам по углам  $(\theta, \varphi)$ , задающим направление движения частицы (рис. 3). Эта область отвечает кольцу на плоскости  $(\theta, \varphi)$  с центром в точке  $(\theta_c, 0)$  с малым радиусом  $\theta_c - \Delta\theta_1$  и с большим радиусом  $\theta_c + \Delta\theta_1$ .

Однако в [2] не учитывался вклад света, попадающего на ФЭУ без отражения. Очевидно, что система будет работать как ФЭУ без отражателя при  $\theta = \theta_c$ , причем диапазон чувствительности в этом случае  $\pm\Delta\theta_2 = \pm\arctg(D/2H)$  ( $H$  – высота рефлектора). В рассматриваемом случае радиатор черенковского излучения – вода,  $\theta_c = 41,3^\circ$  – черенковский угол в воде,  $D = 25$  см,  $d = 7$  см,  $H = 26$  см,  $\Delta\theta_1 \cong 7,5^\circ$ ,  $\Delta\theta_2 \cong 25^\circ$ . Тогда

к области кольца на рис. 3 добавляется еще область круга с центром в точке  $(\theta_c, 0)$  и радиусом  $\Delta\theta_2$ .



Рис. 3. Области чувствительности светособирающей системы параболоидного типа ( $D = 20$  см;  $d = 7$  см;  $H = 26$  см;  $\theta_c = 41,3^\circ$ ) по углам  $\theta$  и  $\varphi$ , задающим направление движения частицы.

Зависимость от угла  $\theta$  вероятности  $\eta_c$  попадания в детектор черенковского света от частицы, проходящей на минимальном расстоянии  $R$  от фотоприемника ( $R = \rho$  для частиц, движущихся параллельно оси детектора), при данном угле  $\varphi = 0^\circ$  в воде ( $\theta_c = 41,3^\circ$ ) качественно показана на рис. 4а. Система с отражателем имеет три области чувствительности:

$$\theta_1 = 0^\circ \pm 7,5^\circ (\pm \Delta\theta_1), \theta_2 = 41,3^\circ \pm 25^\circ (\theta_c \pm \Delta\theta_2), \theta_3 = 82,6^\circ \pm 7,5^\circ (2\theta_c \pm \Delta\theta_1).$$

Вид функции, описывающей зависимость  $\eta_c(\theta)$  в области  $\theta_1$ , был вычислен в [2], а в [3] было найдено простое приближенное выражение для  $\eta_c(\theta)$ , учитывающее также эффект частичного затенения отражающей поверхности рефлектора при повороте "от света"

$$\eta_c(\theta) = (2/d)[(d/2)^2 - x^2]^{1/2}(1 - \delta(\theta)), \quad (1)$$

где  $x = D/(\text{ctg}\theta - 1)$ ,  $\delta(\theta) = (1/2)\text{tg}\theta_c\{\text{tg}\theta + [\cos\theta_c/\sin(\theta + \theta_c)][\cos\theta + \sin\theta(\text{tg}\theta_c + 2/\text{tg}\theta_c) - 1/\cos\theta]\}$ . В области  $\theta_3$  зависимость  $\eta_c(\theta)$  также определяется выражением (1), но с заменой  $\theta$  на  $2\theta_c - \theta$ .

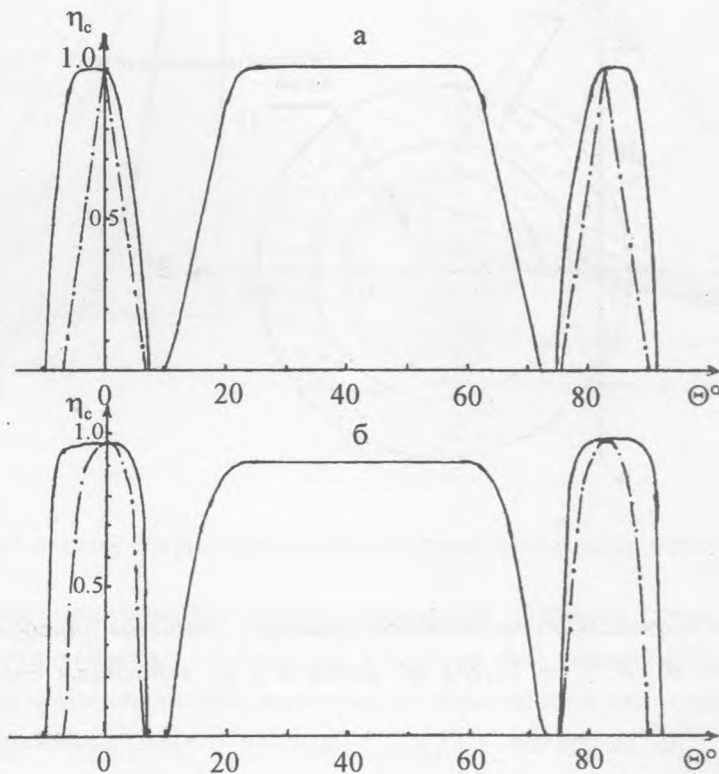


Рис. 4. Зависимости вероятности  $\eta_c$  прохождения черенковского света (а) и эффективности  $\eta$  регистрации частицы по черенковскому излучению (б) от угла  $\theta$  между траекторией частицы и осью детектора. Минимальное расстояние между центром фотоприемника и траекторией частицы  $R = 30$  см, длина поглощения света  $\Lambda = 6$  м. Сплошные линии – детектор с рефлектором ( $d = 7$  см;  $D = 25$  см;  $H = 26$  см); штрих-пунктир – детектор с рефлектором и коническими экранами ( $\Delta\theta_3 = 7^\circ$ ).

Когда на ФЭУ попадает неотраженный свет (область углов  $\theta_2$ ), зависимость  $\eta_c(\theta)$  можно оценить из следующих соображений (см. рис. 5). При  $D/d \gg 1$  вероятность  $\eta_c(\theta)$  примерно равняется отношению площади  $S$  сегмента, на который падает прямой свет, к площади всего фотоприемника

$$\eta_c(\theta) \cong S(\theta)/(\pi d^2/4). \tag{2}$$

Зависимость  $S(\theta)$  может быть получена путем простых геометрических преобразований:

$$S(\theta) = \frac{d^2}{8} \left\{ \frac{\pi}{90} \arccos[(2H/d)\text{tg}(\theta_c - \theta) - D/d] - \sin(2\arccos[(2H/d)\text{tg}(\theta_c - \theta) - D/d]) \right\}. \tag{3}$$

Подставив (3) в (2), получим:

$$\eta_c(\theta) = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{\pi}{90} B(\theta) - \sin(2B(\theta)) \right\}, \tag{4}$$

где  $B(\theta) = \arccos[(2H/d)\text{tg}(\theta_c - \theta) - D/d]$ . Для углов  $\theta > \theta_c$  нужно сделать замену  $\theta$  на  $2\theta_c - \theta$ .

Для решения задач, где требуется узкая угловая направленность детектора, предлагается дополнить светособирающую систему параболоидного типа кольцевыми экранами-шторками, представляющими собой сборку усеченных конусов, промежутки между которыми имеют угловой размер  $\Delta\theta_s$ , а угол при вершине равен  $2\theta_c$  (рис. 6). Экраны такого типа были впервые предложены в [5] как средство подавления изотропного светового фона, где было показано, что их применение позволяет примерно в  $1/\Delta\theta_s$  раз снизить загрузку фотоприемника фоновыми сигналами. Подобная система экранов представляет собой слоистый коллиматор, который пропускает на светоприемник черенковское излучение частиц, идущих приблизительно параллельно его оси с угловым разбросом примерно  $\pm\Delta\theta_s$ . Благодаря этому экранированный черенковский детектор с фокусировкой (ЭЧДФ) имеет острую угловую направленность.

Зависимость вероятности  $\eta_c$  попадания черенковского света на ЭЧДФ от угла  $\theta$  между осью детектора и направлением движения частицы имеет вид

$$\eta_c(\theta) = \begin{cases} 1 - |\theta|/\Delta\theta_s & \text{при } |\theta| < \Delta\theta_s \text{ и } |\theta - 2\theta_c| < \Delta\theta_s, \\ 0 & \text{при } |\theta| > \Delta\theta_s \text{ и } |\theta - 2\theta_c| > \Delta\theta_s. \end{cases} \tag{5}$$

Следует отметить, что ЭЧДФ будет также чувствителен к частицам, проходящим под углами  $\theta = 2\theta_c \pm \Delta\theta_s$ . Однако влияние неотраженного прямого света на фотоприемник будет в такой системе полностью устранено (рис. 4а).

Если ультрарелятивистская частица движется в воде, не испытывая рассеяния, параллельно оси направленного навстречу ей детектора на расстоянии  $R$  см от него, то

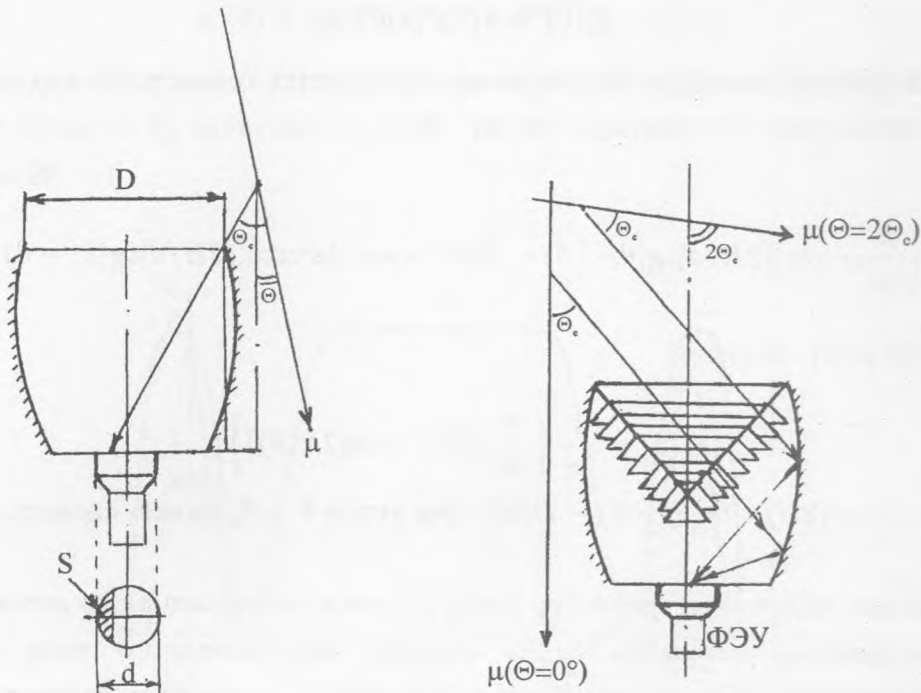


Рис. 5. Прохождение неотраженного света в систему параболоидного типа.  $D$  – диаметр рефлектора;  $d$  – диаметр ФЭУ;  $\theta_c$  – черенковский угол;  $\theta$  – угол между траекторией частицы и осью детектора;  $S$  – доля площади поверхности фотоприемника, на которую падает неотраженный свет.

Рис. 6. Схематический разрез светособирающей системы параболоидного типа, снабженной коническими экранами.

число  $m$  черенковских квантов, падающих на плоский фотокатод светоприемника диаметром  $d$  см, определяется выражением [4]:

$$m(R) \cong 500 \sin^2 \theta_c \text{ctg} \theta_c d [(\pi d^2 / 4) / (2\pi R d)] \exp[-R / (\Lambda \sin \theta_c)] \cong \tag{6}$$

$$\cong 30(d^2 / R) \exp[-1,5R / \Lambda],$$

где  $\Lambda$  – длина ослабления света в воде.

Зависимость эффективности черенковского детектора  $\eta$  от угла  $\theta$  при пороге электроники на уровне, отвечающем режиму регистрации отдельных фотоэлектронов, описывается выражением:

$$\eta(\theta) = 1 - \exp[-KqmQ\eta_c(\theta)]. \quad (7)$$

Здесь  $q \cong 0,1$  – квантовая эффективность ФЭУ,  $K > 1$  – коэффициент усиления светосбора:  $K = 1$  для ФЭУ без рефлектора,  $K = 1,5$  для ФЭУ с рефлектором,  $Q = L/(L + 1,5D) \exp(-1,5D)$  – поправочный фактор, учитывающий, что при одинаковых расстояниях  $R$  свет проходит больший путь ( $L = (R + D)/\sin \theta_c$ ) в случае ФЭУ с рефлектором, и меньший ( $L = R/\sin \theta_c$ ) для ФЭУ без рефлектора,  $\eta_c(\theta)$  – вероятность того, что черенковский свет дойдет до ФЭУ, определяется выражениями (1), (4) или (5) для различных случаев, упомянутых выше.

На рис. 46 приведены зависимости  $\eta(\theta)$  при  $R = 30$  см,  $\Lambda = 6$  м, для детектора с рефлектором ( $D = 25$  см,  $d = 7$  см,  $H = 26$  см) без конических экранов и с экранами ( $\Delta\theta_s = 7^\circ$ ).

Видно, что применение экранов должно улучшить угловое разрешение детектора, не снижая его эффективности в области чувствительности. Эти свойства системы параболоидного типа, снабженной коническими экранами, были подтверждены экспериментальными исследованиями на пучке релятивистских электронов [6].

Автор считает своим приятным долгом поблагодарить Ю. Г. Балашко, прочитавшего текст рукописи и сделавшего ряд полезных замечаний.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] G o g i t i d z e N. Z., T s a r e v V. A., and C h e c h i n V. A. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., A 248, 186 (1986).
- [2] Ц а р е в В. А., Ч е ч и н В. А. Препринт ФИАН N 301, М., 1986.
- [3] Б е л о у с о в А. С., Г о г и т и д з е Н. З., У с и к А. П., Ц а р е в В. А. Препринт ФИАН N 25, М., 1991.
- [4] Ц а р е в В. А., Ч е ч и н В. А. ЭЧАЯ, 17, N 3, 389 (1986).
- [5] М е р з о н Г. И., М и н а с я н Д. И., Р у с е ц к и й А. С., Ц а р е в В. А. Препринт ФИАН, N 173, М., 1989.

[6] Мерзон Г. И., Русецкий А. С. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 7, (1998).

Поступила в редакцию 28 апреля 1998 г.

После переработки 8 июня 1998 г.