

О НАБЛЮДЕНИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ МЮОНОВ В МОРЕ

В. Ц. Пустоветов, Ю. А. Трубкин, В. М. Федоров

УДК 537.591

Рассмотрен метод регистрации релятивистских мюонов на больших глубинах в океане по их черенковскому излучению в естественной воде, окружающей установку.

Возможность использовать большие массы естественной воды морей и океанов в качестве радиатора черенковского излучения, по которому можно регистрировать одиночные релятивистские частицы, привлекает все большее внимание в плане развития физики высоких энергий и космических лучей, инициируя появление проектов таких суперустановок как ДИМАНД, БАТИСС и т.п. /1,2/. Экспериментальная сторона подобного детектирования черенковского излучения недостаточно разработана и требует выяснения ряда специфических факторов. Изучение их влияния может быть выполнено в эксперименте по детектированию черенковского света от космических мюонов в морской воде с помощью "открытого" ФЭУ, фотокатод которого защищен только от гидростатического давления. Естественно, такие наблюдения можно сделать на больших глубинах, где остаточный дневной свет вызывает ток, значительно меньший темнового тока лучших образцов фотоумножителей. Установка, построенная на этом принципе, может быть одновременно использована для уникальных исследований потоков космического излучения на глубинах вплоть до предельных или для наблюдения мюонов от нейтрино, генерированных на ускорителе, поскольку площадь "обзора" подобной установки в $\sim 10^3$ раз больше площади фотокатода.

В такой постановке эксперимента для плоского фотокатода площади $S_{\text{ф}}$, направленного вертикально вверх, величина сигнала,

обусловленного регистрацией прямого черенковского излучения от релятивистского мюона, прошедшего на расстоянии l от него, равна:

$$k = \frac{\alpha \eta S_{\text{ФЭУ}} \xi}{2\pi l \sin c} \cos \beta \exp(-l/\lambda \sin c),$$

где \bar{k} - среднее число электронов, выбитых с фотокатода, α - число фотонов черенковского излучения, генерируемых мюоном на единице пути в воде, η - квантовая эффективность фотокатода ФЭУ, l - кратчайшее расстояние от катода до трека, λ - длина ослабления света в воде, c - угол черенковского конуса в воде, β - угол между нормалью к фотокатоду и направлением луча света, определяемый соотношением:

$$\cos \beta = \cos \theta \cos c - \cos \theta \sin \theta \sin c \cos \varphi (1 - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi)^{-1/2},$$

θ и φ - соответственно зенитный и азимутальный углы траектории мюона, причем последний отсчитывается от азимута вектора \vec{r} , направленного от ФЭУ в точку пересечения трека с плоскостью фотокатода,

$$r = l(\cos^2 \theta + \sin^2 \theta \sin^2 \varphi)^{-1/2},$$

ξ - коэффициент, учитывающий потери света в иллюминаторе, равный:

$$\xi = T \exp(-\gamma n_2 t \sqrt{(n_2^2 - n_1^2) + n_1^2 \cos^2 \beta}),$$

T - коэффициент пропускания света в иллюминатор, t - толщина иллюминатора, γ - коэффициент ослабления света в веществе иллюминатора, n_1 и n_2 - соответственно коэффициенты преломления воды и материала иллюминатора.

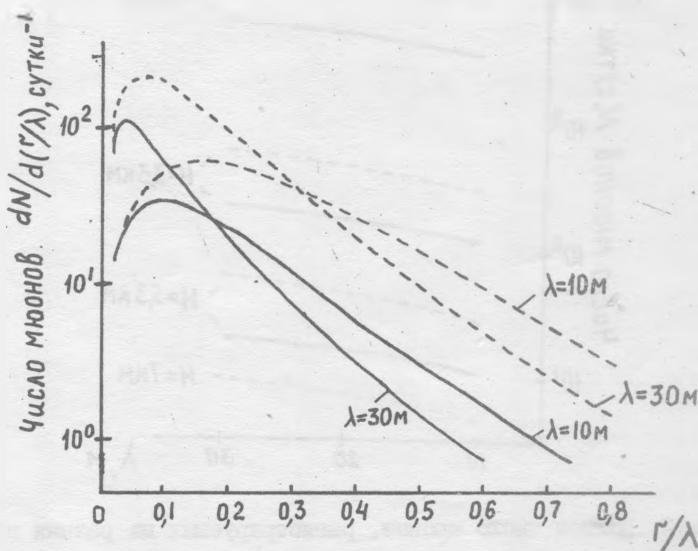
Для надежного выделения регистрируемых событий на уровне собственных шумов фотоумножителей, работающих в одноэлектронном режиме /3/, оптимально использовать тройные совпадения. В этом случае эффективность регистрации мюонов такой установкой определяется произведением эффективностей каналов $\xi_1(k)$, которые,

в свою очередь, определяются характером распределения амплитуд на выходе ФЭУ и величинами установленных порогов регистрации $p_e / 4$. Число регистрируемых мюонов на глубине H равно:

$$N(H, \lambda, p_e) = 2\pi I(H, 0) \int_0^{\infty} r dr \int_0^{\pi} \cos^{m+1} \theta d \cos \theta \int_0^{2\pi} \varepsilon_{\frac{3}{2}}^3(k) X(\cos \beta) d\varphi.$$

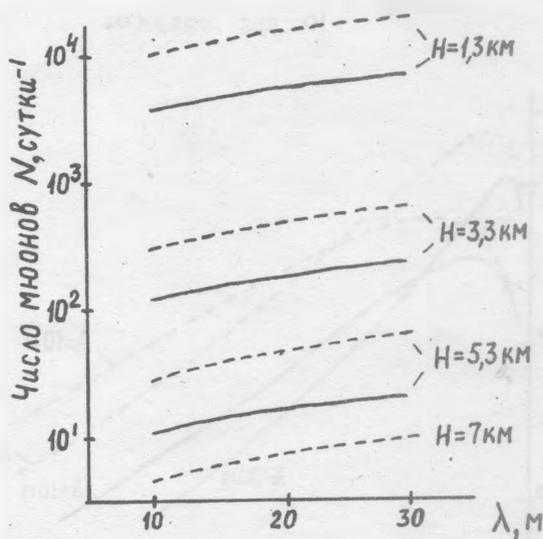
В этом выражении $I(H, 0)$ – вертикальный поток мюонов, m – показатель косинусного закона углового распределения мюонов на глубине H , аппроксимирующийся выражением $m(H) = 1,80 + 0,60 H$ (H в км) / 5/, $X(\cos \beta)$ – функция Хевисайда, учитывающая одностороннюю чувствительность фотокатода:

$$X(\cos \beta) = \begin{cases} 1 & \text{при } \cos \beta \geq 0, \\ 0 & \text{при } \cos \beta < 0. \end{cases}$$



Р и с. I. Число мюонов, регистрируемых на глубине 5,3 км, в функции расстояния от установки для двух значений λ при различном числе ФЭУ

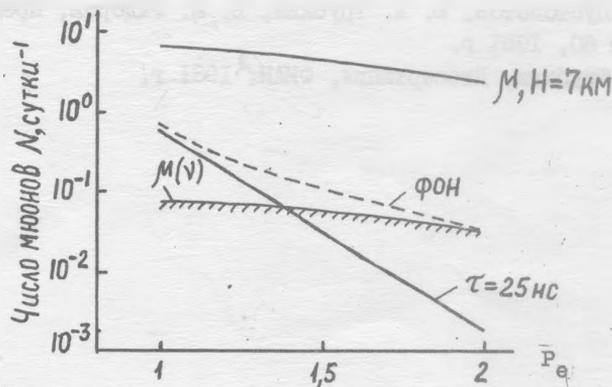
Некоторые результаты расчетов представлены на приводимых ниже рисунках. Расчеты выполнены в предположении $\alpha = 200$ фотонов/см, $t = 8$ см, $\gamma = 0,051$ см⁻¹, $\eta = 0,10$, $S_{\text{ф}} \approx 33$ см². На рис. 1 показана зависимость счета космических мюонов на глубине 5,3 км от расстояния r для установки, состоящей из трех групп по 5 ФЭУ в группе (сплошные кривые) и по 10 ФЭУ в группе (пунктир), и двух значений λ . Фотоумножители, входящие в одну группу, включены на линейное суммирование сигналов и пороги регистрации в группах выбраны на уровне $p_{\text{г}} = 1$ электрон. Рис. 2 демонстрирует зависимость полного счета событий на разных глубинах от прозрачности воды при указанных порогах в группах. Третий рисунок демонстрирует возможности метода для установки, содержащей 3 x 10 ФЭУ, в области очень больших глубин. Из него видно, что фон, который складывается из счета мюонов от косми-



Р и с. 2. Полное число мюонов, регистрируемых на разных глубинах, как функция прозрачности воды

ческих нейтрино и темновых импульсов ФЭУ-ИИО, отобранных из числа серийно выпускаемых, при разрешающем времени совпадений

между группами, равном 25 нс, более чем на порядок меньше ожидаемого числа событий.



Р и с. 3. Соотношение числа событий и фона в зависимости от порогов регистрации в группах

Для характеристики установки удобно ввести понятие эффективной площади

$$S_{эф} = (m + 2/2\pi)N(H, \lambda, p_e)/I(H, 0),$$

т.е. такой площади, на которой все попадающие в нее частицы вертикального потока регистрируются как бы с эффективностью 100%. Такая площадь для установки 3 x I3 ФЭУ (суммарная площадь фотокатодов $\sim 1200 \text{ см}^2$) и при $\lambda = 20 \text{ м}$ составляет $\sim 50 \text{ м}^2$ для регистрации космических мюонов. Для регистрации параллельного потока мюонов от нейтрино, генерированных на ускорителе, такая площадь $\approx 100 \text{ м}^2$.

Поступила в редакцию
8 октября 1981 г.

Л и т е р а т у р а

1. Proceedings of the 1975 Summer Workshop on DUMAND, Western Washington State College, 1976.

2. Experiment BARISS, Western Washington University, Bellingham, Washington, 1981.
3. В. П. Пустоветов и др., Препринт ФИАН № 21, 1975 г.
4. В. П. Пустоветов, Ю. А. Трубкин, В. М. Федоров, Препринт ФИАН № 60, 1981 г.
5. Ю. А. Трубкин, Диссертация, ФИАН, 1981 г.