

ИЗМЕРЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ МЮОНОВ ПОД ВОДОЙ НА ГЛУБИНАХ ДО 5 км

В.П. Пустоветов, Ю.А. Трубкин, В.М. Федоров, А.В. Кириленков

УДК 537.591

Приводятся результаты эксперимента по измерению интенсивности космических мюонов под водой на глубинах до 5 км, выполненные с помощью глубоководного черенковского детектора. В пределах ошибок измерений экспериментальные результаты согласуются с расчетной кривой поглощения космических мюонов в воде.

Измерение потоков космических мюонов под водой на больших глубинах является действенным методом исследования их спектра в области энергий > 1 ТэВ, а также дает информацию о характере энергетических потерь мюонов в веществе. Несмотря на все преимущества воды как поглотителя (однородность по химсоставу и плотности), эксперименты по измерению потоков космических мюонов под водой на глубинах свыше 1 км проводились лишь дважды /1, 2/, при этом максимальная глубина составила 3190 м. Измерения потоков космических мюонов на глубинах от 2 до 5 км под водой были выполнены во время 37-го рейса НИС "Академик Курчатов" в 1983 г. В качестве детектора использовался глубоководный черенковский детектор космических мюонов ГДМ /3/. Установка экспонировалась с борта судна на тросе. Принцип действия детектора основан на регистрации черенковского излучения, генерируемого космическими мюонами в радиаторе неограниченного объема, и подробно изложен в /4, 5/. Основной характеристикой детектора является эффективная площадь регистрации S_{ef} , которая зависит только от порога регистрации и показателя ослабления света морской водой. При этом порог регистрации обычно выражается непосредственно в среднем числе электронов, выбиваемых с фотокатода ФЭУ. Легко показать, принимая, согласно /6/, угловое распределение мюонов в воде в виде $I(H, \theta) = I(H, 0) \cos^m \theta$, где $m = 1,8 + 0,6H$; θ – зенитный угол, H – глубина, км, что величина S_{ef} связана с вертикальной интенсивностью мюонов $I(H, 0)$ и числом регистрируемых в единицу времени мюонов N_μ :

$$S_{ef} = (m + 2) N_\mu / 2\pi I(H, 0).$$

Таблица 1

Результаты измерений потоков космических мюонов в воде

Дата	Координаты	Длина троса, м	Время экспозиции, мин	Порог регистрации	Число событий
23.8.83	19°40'N	2016	150	~ 1 e	709
	76°40'W	3024	585		622
		2016	150		744
25.8.83	19°38'N	2016	135	~ 1,5 e	441
	76°36'W	4032	1200		288
		1968	135		470
17.9.83	22°08'N	3360	180	~ 2 e	75
	37°03'W	5446	1300		86

Результаты измерений потоков космических мюонов представлены в табл. 1. Для получения корректных количественных результатов необходимо учесть вклад фоновых событий.

Источники фоновых событий при измерениях с ГДМ могут быть двух типов: "внешний" фон, связанный с наличием различных источников света в морской воде (радиоактивность, биолюминесценция, взаимодействие нейтрино), и "внутренний" фон, обусловленный собственными шумами применяемых ФЭУ-110.

Поскольку для выделения мюонов в ГДМ применяется схема тройных совпадений, то, естественно, возможны фоновые события, вызываемые соответствующими комбинациями различных составляющих фона. Доминирующий вклад в радиоактивность воды вносит изотоп ${}^4\text{K}$. При этом максимальная энергия бета-частиц $E_m^\beta = 1,32$ МэВ, а энергия гамма-кванта при Е-захвате $E_\gamma = 1,46$ МэВ /7/, что значительно выше пороговой энергии черенковского свечения в морской воде $E_{th} = 0,25$ МэВ. В этом случае образуется черенковское излучение, вызываемое непосредственно бета-частицей или электроном отдачи при комптоновском рассеянии гамма-кванта. Средняя активность ${}^4\text{K}$ при солёности воды 3,5‰ составляет, согласно /8/, для бета-распада ~ 11 расп/с-л и для Е-захвата ~ 1,5 расп/с-л. Расчет среднего числа фотонов, испущенных в одном акте распада ${}^4\text{K}$ в воде, подробно изложен в /9/. Приведем здесь лишь результаты расчета: $n_i = a_i J_{\mu}^i$, $i = \beta, \gamma, \gamma'$,

где $a_\beta = 0,097$ (бета-распад); $a_\gamma = 0,141$ (Е-захват, первое комптоновское рассеяние); $a_{\gamma'} = 0,034$ (Е-захват, второе комптоновское рассеяние); $J_\mu = 2\pi a f \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda^{-2} [1 - n^{-2}(\lambda)] d\lambda$, $a = 1/137$ — число фотонов, образующихся на единице длины трека мюона в воде; λ , n — длина волны света в см и показатель преломления воды. Следует отметить, что эти данные точнее, чем в /9/, поскольку при расчете использовался бета-спектр ^{40}K , измеренный в /10/, а также учитывалась точная энергетическая зависимость ионизационных потерь электронов в воде. На основании этих результатов проводился расчет радиоактивного фона при измерениях с ГДМ.

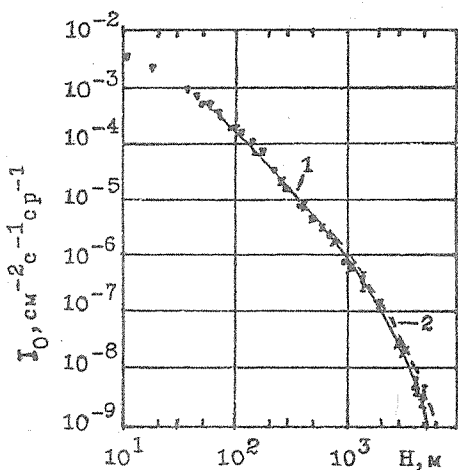
Биоломинесценция является наименее изученным источником фона, сильно зависящим от разнообразных факторов (места погружения, глубины, характера возбуждения и т.д. /11/). Поэтому сделать строгую количественную оценку биоломинесцентного фона сейчас не представляется возможным. По нашим оценкам биоломинесценция не вносит определяющего вклада в фон при измерениях с ГДМ. Относительно числа регистрируемых нейтринных событий следует отметить, что они по оценкам работы /4/ составляют величину $\lesssim 0,1 \text{ сут}^{-1}$ и ими можно пренебречь. Результаты измерений с учетом всех рассмотренных источников фона представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты обработки экспериментальных данных для потоков космических мюонов

Глубина, м	Фон	Число мюонов	-m	$S_{\text{ef}}, \text{M}^2$	$I_0, 10^{-9} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$
2925_{-65}^{+45}	100_{-11}^{+13}	522_{-27}^{+28}	$3,56 \pm 0,13$	$42,7 \pm 5,6$	31 ± 5
4025_{-26}^{+22}	121_{-14}^{+17}	167_{-22}^{+24}	$4,22 \pm 0,16$	$39,3_{-11,8}^{+16,3}$	$5,9_{-2,5}^{+2,0}$
5020_{-200}^{+140}	28_{-3}^{+4}	58 ± 10	$4,81 \pm 0,19$	$19,6_{-6,8}^{+9,0}$	$4,1_{-2,0}^{+1,6}$

В первой колонке указаны глубины погружения, определенные с учетом скорости дрейфа судна, а также гидродинамики установки и используемого троса. Ошибки в глубине погружения определяются изменением угла входа троса в воду за время экспозиции. В двух последующих колонках дается



Р и с. 1. Зависимость вертикальной интенсивности мюонов от глубины: 1 — расчетная кривая поглощения мюонов в воде, взятая из /6/, 2 — вычисленная, согласно /13/; ● — /1/, x — /2/, ▼ — /12/, ▲ — данная работа

суммарный фон за время экспозиции и зарегистрированное число мюонов. Ошибка в измерении фона обусловлена, в основном, погрешностью в измерении прозрачности воды, а ошибка в числе зарегистрированных мюонов включает также статистическую ошибку измерений. В следующей колонке указан показатель степени углового распределения космических мюонов m с ошибкой, учитывающей точность аппроксимации и неопределенность в глубине погружения. Эффективная площадь регистрации определялась из нормировочных измерений, которые проводились на малых глубинах, и корректировалась в соответствии с результатами измерений прозрачности воды на глубинах экспозиции. Нормировочные интенсивности на глубине 2 и 3 км были взяты из /2/. Ошибка в определении S_{ef} также, в основном, обязана неточности в определении прозрачности воды. Вертикальная интенсивность космических мюонов вычислялась согласно приведенному выше выражению и приведена в последней колонке. Представленные данные об интенсивности космических мюонов и ранее полученные экспериментальные результаты /1, 2, 12/ показаны на рис. 1. Там же приводятся расчетные кривые поглощения космических мюонов в воде, взятые из работ /6, 13/. В пределах ошибок измерений наблюдается удовлетворительное согласие эксперимента с расчетами.

Поступила в редакцию 4 мая 1984 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Higashi et al., Nuovo Cimento, 43A, 334 (1966).
2. Ю.Н. Вавилов и др., Изв. АН СССР, сер. физ. 34, № 9, 1977 (1970).
3. Н.В. Владимирский и др., ПТЭ, № 2, 43 (1983).
4. В.П. Пустоветов, Ю.А. Трубкин, В.М. Федоров. Препринт ФИАН № 60, М., 1981 г.
5. В.П. Пустоветов, Ю.А. Трубкин, В.М. Федоров, Краткие сообщения по физике ФИАН, № 1, 63 (1982).
6. Ю.А. Трубкин, В.М. Федоров. Препринт ФИАН № 141, М., 1975 г.
7. Справочник по ядерной физике. Под ред. Л.А. Арцимовича, ГИФМЛ, М., 1963 г.
8. Н.И. Попов, К.Н. Федоров, В.М. Орлов. Морская вода, Наука, М., 1979 г.
9. А.В. Кириленков, В.П. Пустоветов, Ю.А. Трубкин. Труды Всесоюзной конференции "Исследование мюонов и нейтрино в больших водных объемах", изд. Каз. ГУ, Алма-Ата, 1983 г., с.166.
10. L. Feldman, C.S. Wu, Phys. Rev., 87, 1091 (1952).
11. И.И. Гительзон. Живой свет в океане. Наука, М., 1976 г.
12. I.W. Rogers, M. Tristram, 18th ICRC, 7, 32 (1983).
13. В.И. Гуренцов, Г.Т. Зацепин, Е.Д. Михальчи. Ядерная физика, 23, вып 5, 1001 (1976).