

АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039.8

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИЗУЧЕНИЮ ОСЦИЛЛЯЦИЙ НЕЙТРИНО НА ГЛУБОКОВОДНОМ НЕЙТРИННОМ ТЕЛЕСКОПЕ NEMO

М. Ангинольфи^{*)}, М. В. Осипенко^{*)}, А. Б. Плотников, А. П. Черняев

(кафедра физики ускорителей высоких энергий; НИИЯФ)

В настоящее время в Национальном Институте Ядерной Физики (INFN, Italia) проектируется глубоководный нейтринный телескоп NEMO. Он предназначен для изучения космических и атмосферных источников нейтрино высоких энергий. Так же телескоп может быть использован для изучения осцилляций нейтрино. Данная работа посвящена компьютерному моделированию телескопа и расчету его эффективного объема. Исследования показали, что эффективный объем и набор статистики превосходит действующие на данный момент детекторы нейтрино.

Введение

Нейтрино играет уникальную роль в исследовании физики фундаментальных взаимодействий. Однако, несмотря на большие успехи в области исследования нейтрино, ряд проблем до сих пор остается малоизученным. В первую очередь это теория осцилляций нейтрино.

Эта теория описывает возможность перехода нейтрино из одного аромата в другой и позволяет решить проблему определения массы нейтрино, которая в настоящее время является одной из фундаментальных проблем физики элементарных частиц [1].

Эксперименты по изучению осцилляций нейтрино проводятся в лабораториях Homestake [2], SAGE [3], Gallex [4], Super KamiokaNDE [5], K2K [6], SNO [7], MINOS [8], OPERA [9].

В Национальном институте ядерной физики Италии (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) в рамках эксперимента NEMO проектируется глубоководный нейтринный телескоп. В соответствии с одним из предварительных проектов его предполагается установить в Средиземном море у побережья Греции [10, 11].

В настоящей работе рассматриваются вопросы, связанные с созданием нейтринного детектора, — расчет его эффективного объема и возможности регистрации этим детектором осцилляций нейтрино на пучке, полученном на ускорителе SPS в CERN.

Проект глубоководного нейтринного телескопа

Принцип действия глубоководного нейтринного телескопа заключается в регистрации черенковского излучения мюона, рожденного в реакции взаимодействия нейтрино с нуклоном атомного ядра:

$$\nu_{\mu} + N = \mu^{-} + X. \quad (1)$$

Фотоны черенковского излучения регистрируются с помощью фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), расположенных в определенном порядке в детекторе [11]. Порядок пространственного расположения ФЭУ в объеме детектора отличает проектируемый глубоководный телескоп NEMO от его предшественников — устанавливаемого телескопа ANTARES [10] и уже действующих нейтринных телескопов NT-200 [12], AMANDA [13].

Основными элементами детектора являются оптические модули, состоящие из ФЭУ (Hamamatsu HR7081-20, диаметр 10 дюймов, максимальная чувствительность при $\lambda \sim 400$ нм) и обрабатывающей сигнал электроники, которые заключены в устойчивую к давлению стеклянную сферу. Электроника фиксирует амплитуду и время регистрации сигнала.

Оптические модули собраны в кластеры. Кластер представляет собой совокупность оптических модулей, расположенных в одной горизонтальной плоскости. В детекторе NEMO кластер состоит из 24 оптических модулей (рис. 1) и оборудования, регистрирующего положение кластера относительно фундамента телескопа и скорость подводного течения. Каждый кластер состоит из шести лучей, длина которых 8 м, расположенных под углом 60° друг к другу. На каждом луче расположено по две пары оптических модулей, оси которых в каждой паре направлены вертикально и противоположно друг другу.

Все кластеры закреплены на вертикальном тросе на различной глубине на расстоянии 30 м друг от друга (рис. 1), образуя башню детектора. В основании башни находится блок электроники, отвечающий за сбор информации с кластеров и передачи ее на наземную станцию, соединенную с телескопом

^{*)} INFN, Sezione di Genova, 16146 Genova, Italy (Национальный институт ядерной физики, секция Генуи, Генуя, Италия).

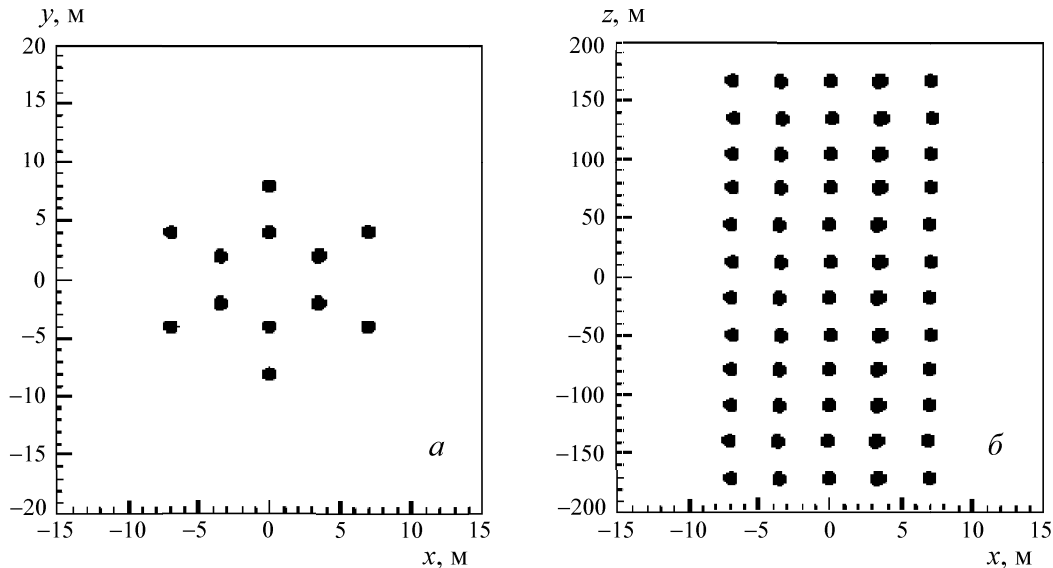


Рис. 1. Схематическое изображение детектора. Маркеры указывают положение оптических модулей в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях

подводным кабелем [14]. Объем телескопа при такой геометрии составляет $1.2 \cdot 10^6 \text{ м}^3$.

Для определения параметров проектируемого глубоководного телескопа было проведено компьютерное моделирование детектора. Расчет детектора проводился при помощи пакета программ, специально разработанных для моделирования подводных нейтринных телескопов и использовавшихся при проектировании глубоководного нейтринного телескопа ANTARES. Конфигурация детектора, тип ФЭУ, параметры среды задаются пользователем [15–17]. В настоящей работе использовался ФЭУ Hamamatsu HR7081-20, морская вода Средиземного моря: длина поглощения фотона в воде 62.5 м, длина рассеяния 52.85 м, коэффициент преломления $n = 1.35$ (для $\lambda = 450 \text{ нм}$).

Процесс расчета детектора происходит в несколько этапов. Сначала задается конфигурация детектора [18]. Затем проводится моделирование прохождения мюона в веществе детектора [19] и отклика ФЭУ детектора на прохождение мюона [20]. Завершает процесс восстановление трека мюона по полученным сигналам [21, 22].

Основным параметром, который определяет эффективность телескопа и изучается в ходе моделирования, является эффективный объем детектора V_{eff} , который рассчитывается по формуле

$$V_{\text{eff}} = \frac{N_r}{N_g} V_d, \quad (2)$$

где N_g — полное число мюонов в объеме детектора, N_r — число мюонных треков, восстановленных программой реконструкции событий из данных (амплитуд сигналов в ФЭУ и времен регистрации этих сигналов), полученных от оптических модулей телескопа, V_d — объем детектора, равный $1.2 \cdot 10^6 \text{ м}^3$.

Для моделирования потока мюонов использовались следующие параметры: поток направлен гори-

зонтально вдоль оси y , с равномерным распределением по углам в телесном угле 10° (относительно оси y), энергия мюонов варьировалась в пределах от 1 до 10 ГэВ. Энергетический спектр мюонов равномерный в выбранном интервале энергий.

В настоящей работе трек считался восстановленным, если число сигналов в разных оптических модулях составляло не менее пяти, так как для восстановления трека по координатам ФЭУ и временам регистрации черенковского излучения необходимо зафиксировать как минимум пять точек. Восстановленные события определяют число N_r из формулы (2).

Компьютерное моделирование проектируемого детектора NEMO показало, что эффективный объем детектора V_{eff} зависит от энергии мюона (рис. 2). При уменьшении энергии эффективный объем стремится к нулю, так как длина трека мюона становится меньше расстояния между оптическими модулями. С ростом энергии эффективный объем детектора возрастает до максимально возможного значения $2.1 \cdot 10^5 \text{ м}^3$, так как при энергии мюона 100 ГэВ длина

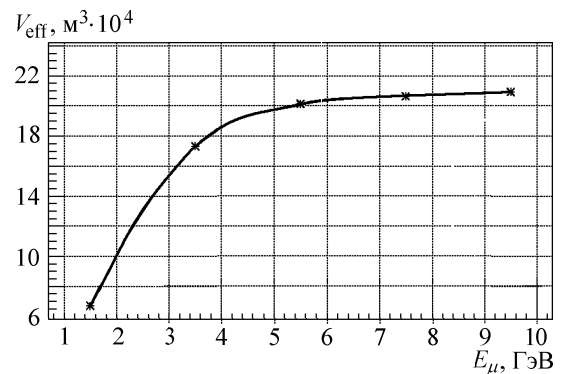


Рис. 2. Зависимость эффективного объема проектируемого глубоководного детектора нейтрино от энергии мюона. Получено в результате компьютерного моделирования детектора

его трека составляет около 400 м, что превосходит линейные размеры детектора.

Осцилляции нейтрино

Одной из задач нейтринного телескопа NEMO предполагается изучение осцилляций нейтрино по изменению потока нейтрино определенного аромата. Примеры аналогичных экспериментов в той же области энергий, проводящихся в мире: Super KamiokaNDE [5], K2K [6], MINOS [8], OPERA [9]. В NEMO возможно использование как естественных, так и искусственных источников нейтрино с энергией свыше нескольких ГэВ. В эксперименте, в котором роль источника нейтрино играет ускоритель SPS, начальный поток нейтрино задается параметрами первичного пучка протонов, свойствами мишени, а также длины туннеля, предназначенного для распада вторичных пионов.

Феномен осцилляций нейтрино основан на существовании истинных состояний нейтрино ν_1, ν_2, ν_3 , являющихся собственными состояниями массы, в то время как наблюдаемые три аромата нейтрино ν_E, ν_μ, ν_τ являются линейными суперпозициями этих трех состояний с коэффициентами, определяемыми углами смешивания $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$. В связи с этим аромат нейтрино изменяется по мере распространения нейтрино от источника. В процессе распространения в пространстве содержание различных компонентов нейтрино в потоке меняется за счет различной скорости распространения истинных компонентов нейтрино с различными массами. Например, вероятность сохранения аромата мюонного нейтрино при осцилляции в другой аромат x :

$$P_{\nu_\mu} = 1 - \sin^2 \theta_{2x} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{2x}^2 L}{4E_\nu} \right). \quad (3)$$

Таким образом, величина осцилляции нейтрино определяется двумя переменными: расстоянием от источника нейтрино до детектора L , энергией нейтрино E_ν , а также параметрами: углом смешивания θ_{2x} и разницей квадратов масс двух ароматов (ν_μ и ν_x) нейтрино Δm_{2x}^2 [23, 24].

В соответствии с уравнением (3) вероятность осцилляций нейтрино является периодической функцией аргумента L/E . Таким образом, фиксируя одну из величин, входящих в отношение, и меняя другую, можно выбирать точку на графике вероятности осцилляций, которая даст наибольший эффект исчезновения или появления нейтрино определенного аромата. Целью расчетов вероятности осцилляции нейтрино является определение значений угла смешивания θ_{2x} и разности квадратов масс Δm_{2x}^2 .

Эксперимент на исчезновение мюонных нейтрино Super KamiokaNDE [5] показал, что уменьшение потока мюонных нейтрино не приводит к увеличению числа электронных. Из этого был сделан вывод, что осцилляции происходят в основном в тау-нейтрино. Используя результаты эксперимента Super

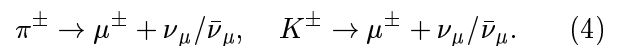
KamiokaNDE [5] по изучению ослабления мюонной составляющей потока атмосферных нейтрино в результате осцилляции ν_μ в ν_τ , можно оценить область ожидаемых значений параметров:

$$\sin^2 \theta_{23} > 0.82, \quad 10^{-3} < \Delta m_{23}^2 < 8 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}.$$

Наиболее вероятные значения параметров по результатам этого эксперимента: $\sin^2 \theta_{23} = 1$ (максимальный угол смешивания) и $\Delta m_{23}^2 = 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$.

Проект эксперимента NEMO с использованием источника в ЦЕРНе

Для проведения экспериментов по измерению осцилляций нейтрино планируется использовать источник нейтрино в CERN (бериллиевая мишень, облучаемая протонами с энергией 450 ГэВ, ускоренными в SPS). Географическое расположение глубоководного телескопа NEMO позволяет использовать пучок, направленный из CERN в GRAN SASSO. При взаимодействии протонов с мишенью происходят реакции множественного рождения пионов и K -мезонов высоких энергий, которые в свою очередь в процессе распространения распадаются за время 10^{-8} с с испусканием мюонного нейтрино:



После распадного туннеля длиной 1 км поток заряженных мюонов поглощается в мишени, которая в то же время играет роль цилиндра Фарадея, что позволяет измерить поток нейтрино. Вследствие сферической формы поверхности Земли подводный телескоп находится несколько ниже главного направления потока нейтрино. Для того чтобы направить основной поток нейтрино в телескоп, необходимо отклонить пучок пионов. При этом из спектра начального потока нейтрино для эксперимента по осцилляциям необходимо вырезать часть в интервале энергий 3–6 ГэВ (рис. 3). Расстояние L от CERN до NEMO равно 1675 км. Оптимальный интервал энергий нейтрино для исследования их осцилляций, рассчитанный с учетом имеющихся значений θ_{23} и Δm_{23}^2 , полученных на Super KamiokaNDE [5], находится в области 5–7 ГэВ (рис. 4).

На основании результатов компьютерного моделирования глубоководного телескопа NEMO можно сделать предварительные выводы об эффективности регистрации нейтрино в этом эксперименте, если известны начальный поток ν_μ и энергетический спектр нейтрино (рис. 3), вероятность осцилляций (рис. 4), эффективный объем телескопа в зависимости от энергии мюона (рис. 2). На основании этих данных было рассчитано количество регистраций нейтрино, ожидаемых в телескопе NEMO за год, а так же точность измерения осцилляций. Процедура расчета заключалась в следующем:

1) на основании значений потока нейтрино от источника I и сечения рассеяния нейтрино на

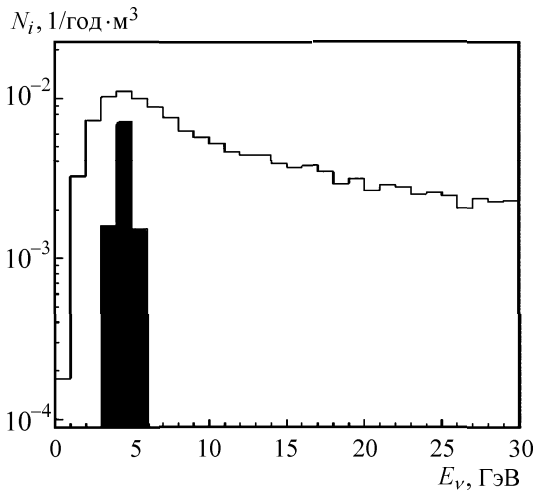


Рис. 3. Спектр числа взаимодействий нейтрино в веществе детектора. Нейтрино получены в ЦЕРНе на пучке протонов из SPS $N_i = I\sigma_\mu\rho/N_a$ (I — поток [1/(год·м²)], σ_μ — сечение рассеяния нейтрино на нуклоне [м²], ρ — плотность вещества мишени [г/м³], N_a — число Авогадро). Поток, отобранный с помощью отклоняющего вторичные пионы магнита, используемый для эксперимента по осцилляциям нейтрино, показан темным цветом

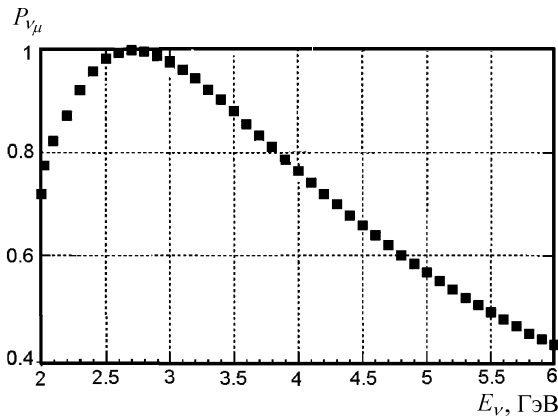


Рис. 4. Вероятность выживания мюонного нейтрино P_{ν_μ} как функция энергии нейтрино при расстоянии $L = 1375$ км и значений $\Delta m_{12}^2 = 0.002$ эВ², $\cos\theta_{12} = 1$

нуклоне σ , было рассчитано число взаимодействий нейтрино в 1 м³ вещества детектора (морской воды) за 1 год $N_i = I\sigma\rho/N_a$, где N_a — число Авогадро, ρ — плотность вещества детектора;

2) из семейства кривых вероятности сохранения аромата мюонного нейтрино P_{ν_μ} была выбрана кривая, соответствующая значению параметров $\Delta m_{23}^2 = 0.002$ эВ² и $\sin\theta_{23} = 1$ (рис. 4) (расчеты также проведены для значений Δm_{23}^2 от 0.001 до 0.004 эВ² с шагом 0.0005 эВ². Эти значения покрывают область возможных значений параметра Δm_{23}^2 , оцененную экспериментом Super KamioKaNDE);

3) на основании значения вероятности выживания получено число взаимодействий нейтрино в 1 м³ объема детектора за год с учетом осцилляций, $N_{\text{det}} = N_i P_{\nu_\mu}$, т.е. ослабление потока нейтрино одного аромата за счет перехода в другой;

4) мюонные нейтрино в объеме детектора рожают мюоны с приблизительно равномерным энергетическим спектром от 0 до $E_{\text{max}} = E_\nu$, где E_ν — энергия нейтрино. На основании этих данных был получен равномерный спектр мюонов, рожденных потоком нейтрино;

5) умножением количества мюонов, рожденных в 1 м³ детектора на его эффективный объем, рассчитанный по результатам компьютерного моделирования, было получено количество событий, зарегистрированных телескопом, в год (рис. 5).

Результаты моделирования показали, что проектируемый детектор в данном эксперименте позволяет регистрировать несколько сот нейтрино в год в интервале энергий от 3 до 10 ГэВ.

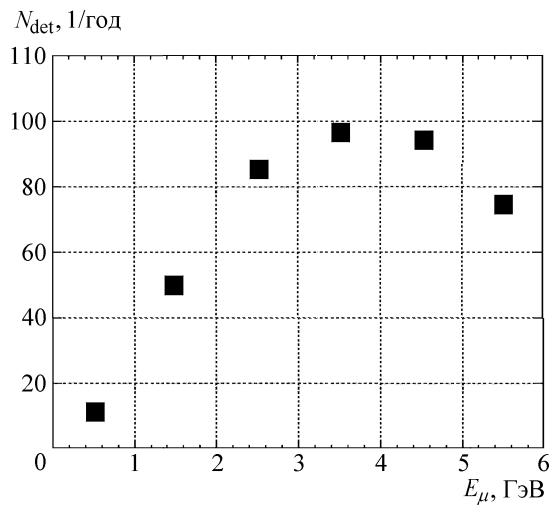


Рис. 5. Количество зарегистрированных детектором событий в год N_{det} в зависимости от энергии мюона E_μ . Результаты получены на основе расчетов и компьютерного моделирования

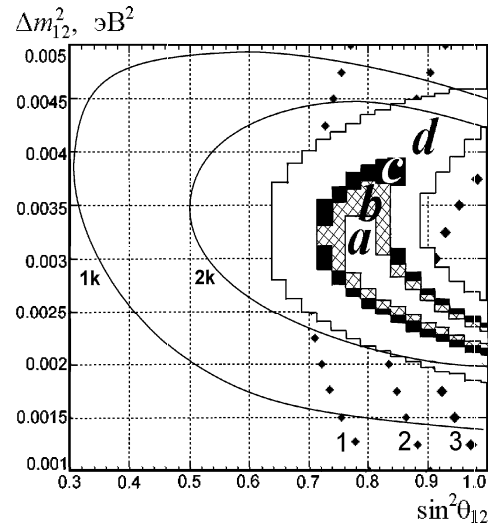


Рис. 6. Сравнение точности определения параметров осцилляции Δm_{12}^2 и θ_{12} для эксперимента Super KamioKaNDE и проектируемого глубоководного телескопа NEMO. Закрашенные области определяют значения параметров осцилляций, полученных на NEMO, для различных значений χ^2 : (a) $0 < \chi^2 < 1$; (б) $1 < \chi^2 < 2$; (в) $2 < \chi^2 < 3$; (г) $3 < \chi^2 < 8$. Точками выделены области доверительных интервалов значений Δm^2 и θ , полученных в эксперименте Super KamioKaNDE: (1) SK 99%; (2) SK 90%; (3) SK 98%

На основании результатов приведенных расчетов получено сравнение точности определения параметров осцилляций Δm_{23}^2 и θ_{23} для эксперимента Super KamiokaNDE и проектируемого глубоководного телескопа NEMO (рис. 6). Значения χ^2 определялось по формуле

$$\chi^2 = \sum_{i_{E\mu}=3}^6 \frac{|N(\Delta m_{23}^2, \theta_{23}) - N(\Delta m_{23}^{2\text{exp}}, \theta_{23}^{\text{exp}})|^2}{|\sqrt{N(\Delta m_{23}^2, \theta_{23})}|^2}, \quad (5)$$

где $N(\Delta m_{23}^2, \theta_{23})$ — число зарегистрированных в NEMO событий при значении параметров осцилляций $\Delta m_{23}^2, \theta_{23}$, $N(\Delta m_{23}^{2\text{exp}}, \theta_{23}^{\text{exp}})$ — число событий при фиксированных значениях $\Delta m_{23}^2, \theta_{23}$, полученных в аналогичном эксперименте [5]. Сравнения точности результатов аналогичного эксперимента Super KamiokaNDE показано на рис. 6. Следует учесть, что интервал $0 < \chi^2 < 1$ соответствует доверительному интервалу 68%, $0 < \chi^2 < 2$ — 90%, $0 < \chi^2 < 3$ — 99%. Число зарегистрированных нейтрино, на основе расчетов (рис. 5), составляет около 400.

Выводы

Компьютерное моделирование и расчеты на основании его результатов показали, что точность при измерении осцилляций нейтрино глубоководного нейтринного телескопа NEMO в 2–3 раза превышает точность эксперимента Super KamiokaNDE [5] и точность, достигаемую в идентичном эксперименте с «дальними» нейтрино K2K [6] (рис. 6). В настоящее время детектор NEMO обладает наибольшим эффективным объемом среди подобных детекторов, используемых для изучения осцилляций нейтрино. Измерения «плечных» экспериментов помогут объяснить результаты данного эксперимента, измеряя появление ν_τ в пучке мюонных нейтрино [9]. Аналогичный эксперимент MINOS [8] должен получить сравнимую статистику исчезновений ν_μ . Но так как параметр L/E (3) значительно отличается в случае NEMO и MINOS, в данном эксперименте будет исследована другая точка на кривой вероятности исчезновения ν_μ (рис. 4). Соответственно оба типа экспериментов дополняют друг друга.

Литература

1. Девис Р., мл. // УФН. 2004. **174**, № 4. С. 407.
2. Davis R. // International Symposium on Neutrino Astrophysics. Takayama Kamioka, 1992.
3. Abdurashitov J.N., Gavrin V.N., Girin S.V. et al. // Phys. Rev. 1999. **C60:055801**.
4. Hampel W., Handt J., Heusser G. et al. // Phys. Lett. 1999. **B447**. P. 127.
5. Fukuda Y., Hayakawa T., Ichihara E. et al. // Phys. Rev. Lett. 1998. **81**. P. 1562.
6. Ahn M.H. Aoki S., Bhang H. et al. // Phys. Rev. Lett. 2003. **90:041801**.
7. Ahmad Q.R., Allen R.C., Andersen T.C. et al. // Phys. Rev. Lett. 2002. **89:011301**.
8. Lang K. // Nucl. Instr. Meth. 2001. **A461**. P. 290.
9. Duchesneau D. // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 2003. **123**. P. 279.
10. Aslanides E., Aubert J., Basa S., Bernard F. A Deep Sea Telescope for High Energy Neutrinos. Genova, 1999.
11. Anghinolfi M. A Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment. INFN, Genova, 2003.
12. Balkanov V.A., Belolapatnikov I.A., Bezrukov L.B. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2000. **63**. P. 951.
13. Ahrens J., Anders E., Bai X. et al. // Phys. Rev. 2002. **D66:012005**.
14. Brunner J. The ANTARES Project. Toulon, 1999.
15. Brunner J. Antares Simulation Tools. Toulon, 1999.
16. Brunner J. E-print: ANTARES-Soft/1998-005.
17. Cassol F., Brunner J. GENDET 1.2: Cards and Tags. Toulon, 2000.
18. Navas S., Thompson L. KM3. User's Guide and Reference Manual. Toulon, 2000.
19. Brunner J. Updated Tag List for New ANTARES Event Format. Toulon, ANTARES-Soft/1999-003.
20. Brunner J. General Purpose Data Format for ANTARES Simulation and Reconstruction. Toulon, 1998.
21. Romeyer A., Stolarczyk Th. Reconstruction Algorithms. Toulon, 2001.
22. Heijboer A. An Algorithm for the Track Reconstruction in ANTARES. Toulon, 2002.
23. Torrente-Lujan E. A Review on Neutrino Physics, Mass and Oscillations. Toulon, 1999.
24. Биленький С.М. Осцилляции нейтрино. Дубна, 1983.

Поступила в редакцию
14.07.04