

АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039.8

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ
ДЛЯ ГЛУБОКОВОДНОГО НЕЙТРИННОГО ТЕЛЕСКОПА NEMOМ. Ангинольфи^{*)}, М. В. Осипенко, А. Б. Плотников, М. Таюти^{*)},
А. П. Черняев

(НИИЯФ; кафедра физики ускорителей высоких энергий)

E-mail: plotnikov-stu@hotmail.ru

Основной трудностью при детектировании нейтрино является малая вероятность взаимодействия нейтрино с веществом. Для увеличения статистики регистрации нейтрино детектор должен обладать большим эффективным объемом. Эффективный объем глубоководных нейтринных детекторов может быть увеличен путем роста физического объема либо усовершенствованием регистрирующей аппаратуры. В настоящей работе представлен разрабатываемый оптический модуль для детектора NEMO. Результаты компьютерного моделирования показывают, что применение такого оптического модуля существенно увеличивает эффективный объем детектора.

Введение

Особенности взаимодействия нейтрино с веществом позволяют получить информацию о процессах, проходящих в центре звезд, во взрывах сверхновых, квазарах и гамма-вспышках, исследовать осцилляции нейтрино, происхождение темной материи. Таким образом, потоки нейтрино несут уникальную информацию для астрофизических исследований [1, 2].

С другой стороны, регистрация нейтрино составляет определенную сложность. Одним из современных инструментов детектирования нейтрино являются глубоководные нейтринные детекторы. Глубоководный нейтринный детектор предназначен для регистрации черенковского излучения, испускаемого мюоном, который рождается при взаимодействии мюонного нейтрино с веществом [3, 4].

Помимо проектирующегося детектора NEMO, в настоящее время действует российский детектор NT-200 [5] на дне озера Байкал и детектор AMANDA [6] в толще антарктического льда. Также готовится к установке в Средиземном море, у побережья Франции детектор ANTARES [3].

Основным элементом такого типа детекторов является оптический модуль (ОМ). Настоящая работа посвящена описанию ОМ, разрабатываемого в рамках проекта NEMO. Конфигурация этого ОМ позволит: а) более эффективно отсеять шумовые сигналы при реконструкции треков мюонов; б) дать дополнительную информацию о направлении черенковского излучения.

Тем самым применение разрабатываемого ОМ в глубоководном детекторе повысит его эффективный объем и, следовательно, число зарегистрированных нейтрино.

Оптический модуль

При разработке ОМ для проектирующегося детектора NEMO было проведено сравнение с модулями детектора ANTARES. Это возможно из-за близкого географического положения, т.е. практически одинаковых условий эксплуатации детекторов: вещества детектора, фона, загрязненности, сезонных изменений.

ОМ, используемый в глубоководном нейтринном телескопе ANTARES, состоит из одного фотоэлектронного умножителя диаметром 24.5 см, заключенного в сферу из устойчивого к высокому давлению стекла (рис. 1, а).

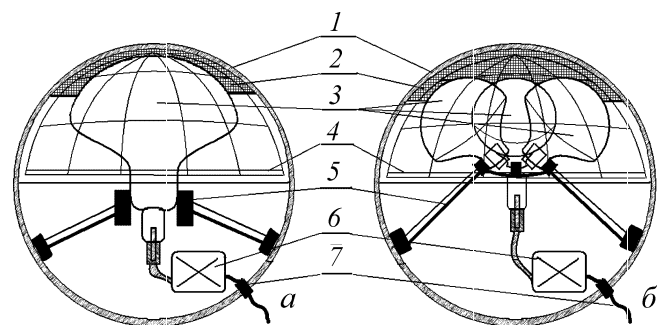


Рис. 1. ОМ стандартной (а) и разрабатываемой (б) конфигураций: 1 — стеклянная сфера, $R = 680$ мм, толщина 65 мм; 2 — оптический гель; 3 — фотоэлектронный умножитель, $D = 24.5$ см в случае (а) и 4 фотоэлектронных умножителя в случае (б); 4 — сетка магнитного экранирования; 5 — каркас крепления; 6 — электропитание; 7 — контактный кабель

Помимо ФЭУ, в ОМ находятся: оптический гель, обеспечивающий контакт поверхности ФЭУ со стеклянной сферой; полусферическая металлическая сетка, экранирующая ФЭУ от магнитных полей; элек-

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

троники, обрабатывающая сигналы ФЭУ и фиксирующая положение ОМ и ориентацию его оси [3].

ОМ детектора ANTARES дает информацию об амплитуде и времени регистрации сигнала. Во избежание погрешностей при восстановлении траектории мюона положение и ориентация оси ОМ регистрируются электроникой.

Исследуемая конфигурация ОМ детектора NEMO состоит из четырех ФЭУ диаметром 12.25 см, расположенных внутри такой же сферы (рис. 1, б). Видимый телесный угол для каждого ФЭУ сокращается при этом до 45° в связи с установкой системы зеркал (рис. 2), описанной ниже, по сравнению со 112° для «стандартного вида» ФЭУ (рис. 3). Оси четырех ФЭУ в системе координат ОМ, где начало отсчета лежит в центре сферы ОМ, а ось Z направлена вверх, отклонены от вертикали на $\theta = 45^\circ$ и в горизонтальной плоскости ориентированы в четырех направлениях под углом $\varphi = 90^\circ$.

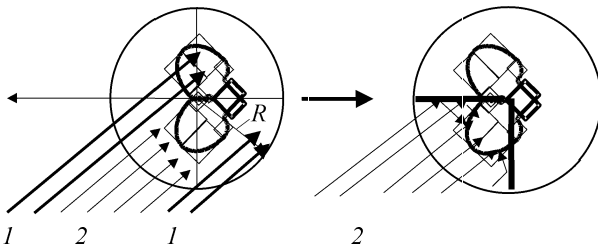


Рис. 2. Схематическое изображение эффективности регистрации фотонов, падающих на ОМ до и после применения системы собирающих и фокусирующих зеркал. Цифрой 1 обозначены лучи, не попадающие в ФЭУ; цифрой 2 — лучи, регистрируемые ФЭУ

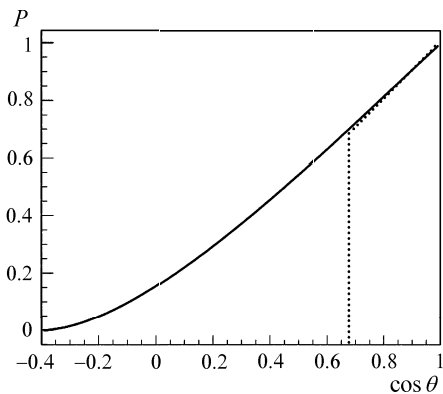


Рис. 3. Эффективность P регистрации фотона в зависимости от угла с осью ФЭУ: сплошная линия — для стандартного ФЭУ, прерывистая линия — для ФЭУ разрабатываемого проекта NEMO

Общая площадь четырех ФЭУ диаметром 12.25 см равна площади одного ФЭУ диаметром 24.5 см. Уменьшение площади каждого ФЭУ и сокращение половинного угла конуса обзора неизбежно ведет к уменьшению количества зарегистрированных фотонов. Для того чтобы этого избежать, планируется использовать специально разработанную систему зеркал, фокусирующих свет на поверхность ФЭУ. Эта система позволит не только увеличить эффективную площадь ФЭУ, но и сохранить чув-

ствительность ОМ к направлению пришедшего черенковского излучения (рис. 2).

Моделирование ОМ для детектора NEMO

Для изучения возможностей новой конфигурации ОМ было проведено компьютерное моделирование нейтринного детектора.

При моделировании использовался стандартный пакет программ проекта ANTARES, созданный для моделирования глубоководных нейтринных телескопов большого объема. Пакет программ включает в себя: моделирование прохождения нейтрино или мюонов через вещество; моделирование отклика детектора на излучение мюона, проходящего через детектор; учет характеристик шума в среде; реконструкция треков мюонов по сигналам с ОМ детектора [7, 8].

Несмотря на схожесть детекторов NEMO и ANTARES, для изучения ОМ проекта NEMO необходимо было адаптировать некоторые части пакета, описывающие геометрию детектора и ОМ [3].

Для этого в первую очередь было произведено уменьшение половинного угла конуса обзора ФЭУ до 45° . На рис. 3 показаны угловые распределения эффективности регистрации фотона для стандартного и нового ФЭУ. Каждый из четырех ФЭУ диаметром 12.25 см имеет усеченный угол зрения. Это связано с тем, что в ОМ каждый ФЭУ должен охватывать свою наблюдаемую область. Возникновение пересечения видимых областей привело бы к неопределенности в определении направления фотона.

Программа реконструкции трека была изменена следующим образом. Во время первого этапа реконструкции трека мюона все сигналы проходят триггер. Триггер отбирает сигналы с амплитудой более 2.5 фотоэлектрона или пару сигналов, зарегистрированных с разницей во времени ≤ 20 нс, на двух разных ФЭУ, контролируемых одним модулем LCM (Local Control Module) [9–11]. LCM собирает информацию с группы ОМ, называемой кластером. Существенное различие в архитектуре смоделированных детекторов со стандартным ОМ и ОМ, разрабатываемым для детектора NEMO, заключается в том, что при моделировании детектора со стандартным ОМ на один ФЭУ приходится один LCM, следовательно, нет совпадающих сигналов. В этом случае программа реконструкции использует только сигналы с амплитудой выше 2.5 фотоэлектрона. В случае с четырьмя ФЭУ триггерный модуль контролирует все ФЭУ, имея 6 вариантов для поиска совпадений во времени. Таким образом, программа реконструкции получает значительно больше исходных точек. Увеличение количества сигналов, выполняющих условия триггера, приводит к повышению эффективности восстановления треков мюонов.

Каждый сигнал несет информацию о времени регистрации, амплитуде и координатах сработавшего ОМ. На втором этапе строится трек мюона по

прошедшим триггер сигналам методом наименьших квадратов. Минимизируется разность между измеренным временем сигнала и расчетным временем прохождения фотона от предполагаемого трека до сработавшего ОМ. Удаленность трека мюона от места расположения сработавшего ОМ определяется амплитудой сигнала и вероятностью регистрации фотона, пришедшего под определенным углом. В программе для каждого сработавшего ОМ рассчитывается точка, через которую прошел и излучил зарегистрированный свет мюон с максимальной вероятностью. Эти точки используются в дальнейшем при построении прямой [12, 13]. Распределение таких точек для ОМ носит вероятностный характер. Проведенное моделирование одного ОМ с четырьмя ФЭУ позволило построить распределение координат точек, в которых было испущено зарегистрированное ОМ черенковское излучение.

После адаптации программы было проведено моделирование детекторов с одинаковой геометрией, но с разными ОМ. Для предварительного моделирования была выбрана кубическая форма детектора. В этом случае расстояние между струнами детектора и между горизонтальными плоскостями, в которых располагаются ОМ, одинаково [14]. Всего в детекторе содержится 16 струн (вертикальных тросов, на которых крепятся ОМ), 4 ряда по 4 струны и 12 плоскостей (этажей), в которых расположены ОМ. Поток мюонов, которые рождались равномерно по объему, окружающему детектор, был направлен вертикально вверх с угловым разбросом $\pm 20^\circ$. Выбор направления потока мюонов связан с использованием земного шара как экрана от атмосферных мюонов. С уменьшением угла θ соотношение сигнал-шум уменьшается за счет регистрации фоновых, атмосферных мюонов. Энергия мюонов изменялась от 10 ГэВ до 5 ТэВ. Спектр энергий равномерный. Шумовые сигналы добавлялись с частотой 60 кГц для детектора со стандартным ОМ и 15 кГц для новой конфигурации ОМ из расчета на каждый ОМ.

Результаты моделирования

Было проведено сравнение детекторов, состоящих из кубических ячеек размером $L = 40$ м и $H = 40$ м, с ОМ двух типов: стандартным, применяемым в ANTARES, и разрабатываемым для NEMO.

Основной характеристикой детектора является его эффективный объем. Детектор с большим эффективным объемом имеет преимущество в скорости набора статистики, таким образом, имеет большую статистическую точность по сравнению с остальными детекторами.

Эффективный объем детектора V_e рассчитывался по формуле

$$V_e = \frac{N_r}{N_g} V_{\text{det}},$$

где N_r — количество реконструированных мюонов; N_g — общее количество мюонов, задействованных в моделировании; V_{det} — физический объем детектора [15].

Качество восстановленных событий оценивалось по углу между смоделированным треком мюона и восстановленным программой реконструкции (рис. 4). Для обоих типов ОМ отклонение реконструированных треков мюонов не превышает 5° , для детектора с ОМ NEMO количество восстановленных событий больше.

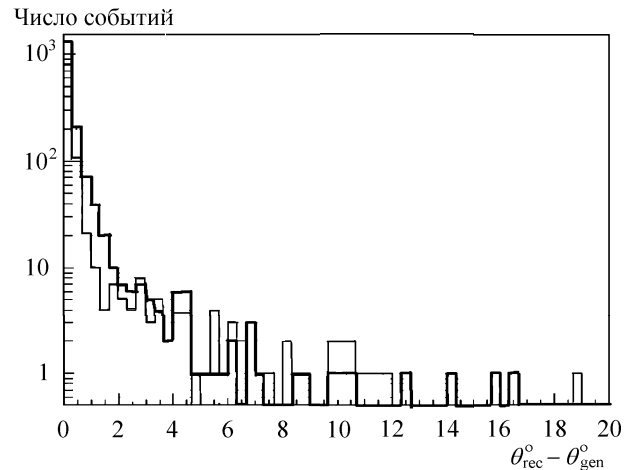


Рис. 4. Количество событий в зависимости от угла между сгенерированным и восстановленным треками мюона. Для детектора с размерами $L = 40$ м и $H = 40$ м тонкая линия — со стандартными ОМ; жирная линия — с ОМ детектора NEMO

По результатам моделирования эффективный объем детектора с ОМ для NEMO превышает эффективный объем детектора со стандартными ОМ в 2–3 раза при низких энергиях и на ~ 30 –40% при энергиях до 5 ТэВ (рис. 5).

Аналогичное моделирование в случае отсутствия шумовых сигналов показало, что шум слабо влияет на разницу между эффективными объемами детекторов с разными ОМ.

Однако нельзя не принимать во внимание эффект триггера, так как в случае с новым ОМ программа реконструкции имеет возможность выбрать для построения прямой не только сигналы с амплитудой выше 2.5 фотоэлектрона, но и совпавшие по времени сигналы на ФЭУ, находящиеся в одном ОМ, что намного увеличивает качество и количество реконструируемых событий. Чтобы понять вклад этого эффекта в разницу между эффективными объемами, было проведено моделирование для детектора с аналогичной геометрией, с новыми ОМ, но без влияния LSM на выбор сигналов для построения прямой.

Прерывистая линия на рис. 5, а изображает эффективный объем детектора с новыми ОМ, без влияния LSM на выбор сигналов для реконструкции. Это говорит о том, что примерно половину вклада в улучшение эффективного объема детектора дает триггер, выбирающий сигналы для реконструкции,

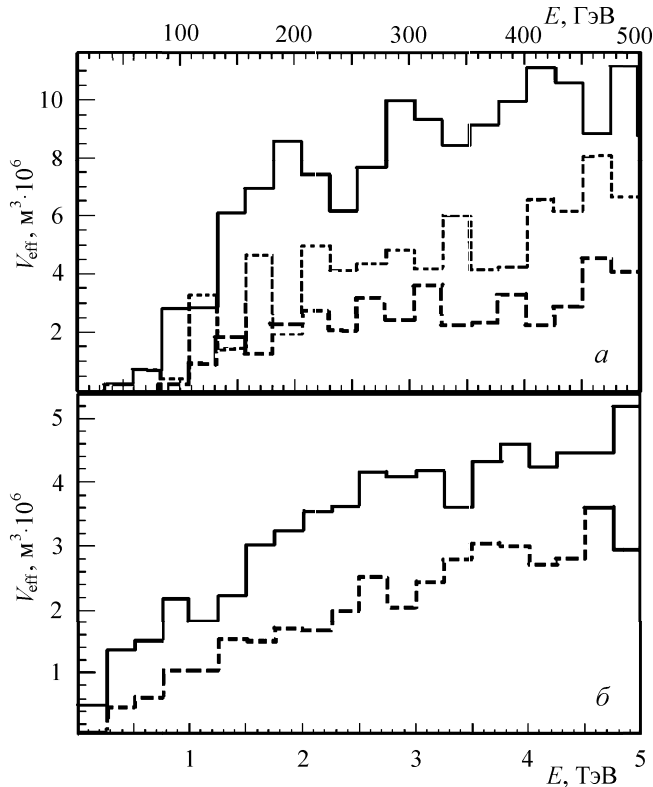


Рис. 5. Эффективный объем для детекторов: (а) сплошная линия — новые ОМ, прерывистая линия на верхней гистограмме демонстрирует эффективный объем детектора с новыми ОМ без эффекта триггера; жирная прерывистая линия — стандартные ОМ. Зависимость эффективного объема от энергии рассчитана для интервала энергий от 10 до 500 ГэВ; (б) Эффективный объем для детекторов: сплошная линия — новые ОМ, прерывистая линия — стандартные ОМ. Зависимость эффективного объема от энергии рассчитана для интервала энергий от 10 ГэВ до 5 ТэВ

вторую половину вклада дает «чувствительность» ОМ к направлению пришедшего излучения [16, 17].

Применение детектора

До настоящего времени остается нерешенным вопрос о дефиците массы во Вселенной, или о так называемой темной материи. На основе астрономических данных можно допустить, что во Вселенной содержится большее количество вещества, чем можно оценить известными на сегодняшний день способами. Предполагается, что недостающая масса существует в форме небарионной (темной) материи. Одним из кандидатов на роль темной материи является нейтралино. Нейтралино представляет собой легчайшее собственное состояние массы суперсимметричных партнеров калибровочных и хиггсовского бозонов [18]. Согласно этой гипотезе, в результате гравитационного взаимодействия нейтралино накапливаются внутри массивных астрономических объектов, например в Солнце. Там нейтралино аннигилируют в пары фермион–антифермион, в калибровочные и хиггсовский бозоны, глюоны, фотоны [19]. В последующем распаде образовавшихся частиц могут испускаться высокоэнергетичные нейтрино.

Таким образом, наблюдение солнечных нейтрино высокой энергии ($E_\nu \sim 1/4m_\chi \sim 50\text{--}150$ ГэВ) будет служить доказательством в пользу существования нейтралино. На рис. 6 показан рассчитанный поток нейтрино, рожденных при аннигиляции нейтралино в Солнце, как функция массы нейтралино для различных значений плотности нейтралино Ω_χ во Вселенной. Проведено сравнение «чувствительности» — способности детектора регистрировать потоки нейтрино низкой интенсивности, излученные из точечного объекта. Компьютерное моделирование реальных конфигураций детекторов ANTARES и NEMO показало, что детектор NEMO со стандартным ОМ (заполненные прямоугольники на графике) имеет более высокую чувствительность по сравнению с детектором ANTARES. Чувствительность детектора NEMO с новым ОМ позволяет ему регистрировать на Земле потоки солнечных нейтрино с энергией от 50 до 150 ГэВ с интенсивностью от 90 частиц в год на км^3 (рис. 6). Следовательно, для регистрации наибольшего числа нейтралино с массами до 200 ГэВ и для регистрации нейтралино с массами свыше 200 ГэВ при значениях плотности Ω_χ до $0.3/h^2$ необходим детектор NEMO с модифицированными ОМ.

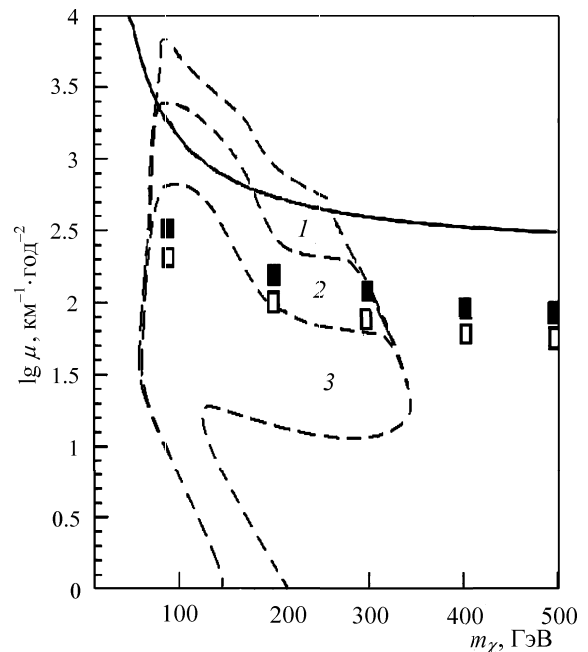


Рис. 6. Чувствительность различных детекторов в зависимости от массы нейтралино после трех лет работы: сплошная линия — детектор ANTARES, заполненные прямоугольники — NEMO со стандартными ОМ, пустые прямоугольники — NEMO с новыми ОМ. Область 1 — соответствует значениям $0.03 < \Omega_\chi h^2 < 0.2$; область 2 — $0.1 < \Omega_\chi h^2 < 0.3$; область 3 — $0.3 < \Omega_\chi h^2 < 1$

Заключение

Результаты компьютерного моделирования показали, что разрабатываемый в рамках проекта NEMO новый оптический модуль, содержащий четыре ФЭУ

вместо одного в случае стандартного ОМ, дает в два раза больший эффективный объем для энергий до 500 ГэВ, а для энергий до 5 ТэВ объем увеличивается на 30–40% по сравнению с тем же детектором, оборудованным стандартными ОМ.

Увеличение эффективного объема зависит от работы триггера для ОМ с четырьмя ФЭУ, а также от дополнительной информации о направлении мюона, которую позволяет получить новая конфигурация ОМ.

На основе результатов моделирования было принято решение применить ОМ с четырьмя ФЭУ диаметром 12.25 см каждый при конструировании детектора. Дальнейшее численное моделирование будет направлено на поиск оптимальной геометрии детектора NEMO.

Расчет чувствительности проектирующегося детектора к потоку нейтрино высоких энергий от Солнца показал, что глубоководный телескоп NEMO имеет более высокую чувствительность по сравнению с аналогичным проектируемым детектором ANTARES. В настоящей работе не проводилось сравнение с проектируемым детектором IceCube в связи с различным диапазоном энергий детектируемых солнечных нейтрино. Из-за особенностей географического положения и ограничения на энергию регистрируемых нейтрино с околоразрешенным направлением ($E > 100$ ГэВ) детектор IceCube способен регистрировать солнечные нейтрино лишь с массой выше 400 ГэВ [20]. В этой связи проектирующийся глубоководный телескоп NEMO в настоящее время является единственным детектором, который будет способен зарегистрировать нейтрино с массами от 100 до 400 ГэВ.

Литература

1. Девис Р. (мл.) // УФН. 2004. **174**, № 4. С. 407.
2. Бакал Дж. Нейтринная астрофизика. М., 1993.
3. Aslanides E., Aubert J., Basa S., Bernard F. A deep sea telescope for high energy neutrinos. Genova, 1999.
4. Anghinolfi M. A long baseline neutrino oscillation experiment INFN. Genova, 2003.
5. Balkanov V.A., Belolaptikov I.A., Bezrukov L.B. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2000. **63**. P. 951.
6. Ahrens J., Andres E., Bai X. et al. // Phys. Rev. 2002. **D66**. P. 032006.
7. Brunner J. Antares simulation tools. Toulon, 1999.
8. Brunner J. E-print: ANTARES-Soft/1998-005.
9. Navas S., Thompson L. KM3 User guide and reference manual. Toulon, 2000.
10. Brunner J. E-print: ANTARES-Soft/1999-003.
11. Brunner J. General purpose data format for ANTARES simulation and reconstruction. Toulon, 1998.
12. Romeyer A., Stolarczyk Th. Reconstruction algorithms. Toulon, 2001.
13. Heijboer A., An algorithm for the track reconstruction in ANTARES. Toulon, 2002.
14. Cassol F., Brunner J. GENDET 1.2: cards end tags. Toulon, 2000.
15. Brunner J. The ANTARES project. Toulon, 1999.
16. Ангинольфи М., Осипенко М.В., Плотников А.Б. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2005. № 5. С. 13 (Moscow University Phys. Bull. 2005. N 5. P. 15).
17. Ангинольфи М., Осипенко М.В., Плотников А.Б. и др. Препринт НИИЯФ МГУ 2005-1/767.
18. Edsjo J. E-print: Hep-ph/9704384.v1.
19. Bergstrom L., Edsjo J., Gondolo P. E-print: Hep-ph/9607237.
20. Ahrens J. // Proc. of the 27th International Cosmic Ray Conference. Hamburg. Germany. 7–15 August 2001.

Поступила в редакцию
23.03.05