

УДК 537. 591

## РОЛЬ НЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ НА ЯДРАХ В ПРОЦЕССАХ ПЕРЕНОСА АТМОСФЕРНЫХ МЮОНОВ В ВЕЩЕСТВЕ

К.С. Лохтин, С.И. Синеговский

### PART OF THE MUON-NUCLEUS INELASTIC SCATTERING IN THE PROPAGATION OF ATMOSPHERIC MUONS THROUGH MATTER

K.S. Lokhtin, S.I. Sinegovsky

Для двух моделей неупругого рассеяния мюонов на ядрах рассчитаны спектры адронных ливней, образуемые мюонами космических лучей в воде. Форма этих спектров зависит от модели, и различие это существенно (фактор  $\sim 2$ ) для ливней очень больших энергий. Показано, что интегральные спектры мюонов на большой глубине в воде, рассчитанные с использованием гибридной модели мюон-ядерного взаимодействия, также заметно искажаются при  $E > 100$  ТэВ по сравнению с расчетом для модели фотоядерного взаимодействия.

Spectra of hadron cascade showers produced by the cosmic ray muons traveling through water are calculated with two models of the muon inelastic scattering on nuclei. The shape of the ultra-high energy shower spectra depends distinctly (up to factor 2) on the model. It is shown that deep underwater muon energy spectra, calculated with the hybrid model of the muon-nucleus interaction, are noticeably distorted at  $E > 100$  TeV in comparison with those calculated with the photonuclear interaction model.

Энергию мюонов и атмосферных, и рожденных в процессах взаимодействия атмосферных или астрофизических нейтрино с нуклонами вещества, можно определять по черенковскому свету самих мюонов и частиц ливней, образуемых мюонами в электромагнитных взаимодействиях и в неупругом рассеянии на ядрах. При высоких энергиях тормозное излучение мюона и неупругое рассеяние на ядре порождают наиболее мощные ливни. Расчеты показывают [1, 2], что в области малых относительных энергопередач ( $y < 10^{-3}$ ) преобладают ливни за счет образования  $e^+e^-$ -пар, тогда как в интервале  $10^{-2} < y < 1$  доминируют ливни от тормозного  $\gamma$ -кванта и ливни, вызванные неупругим рассеянием мюона на ядре. Представляют интерес оценка частоты образования каскадных ливней в веществе, рождающихся в мюон-ядерных взаимодействиях при очень высоких энергиях, и исследование влияния этого взаимодействия на форму спектров мюонов космических лучей в воде на глубине, соответствующей размещению больших глубоководных детекторов мюонов и нейтрино (HT-200+, AMANDA, ANTARES, NESTOR).

В данной работе рассчитаны спектры ливней, образуемых мюонами в воде в процессах неупругого рассеяния на ядрах, а также интегральные спектры атмосферных мюонов в воде на глубине до 4 км. Расчет выполнен для двух моделей – гибридной модели неупругого рассеяния лептонов на ядрах [3, 4] и, для сравнения, известной модели фотоядерного взаимодействия мюонов (ОВД) [5]. Гибридная, или двухкомпонентная (2К) модель [4] отвечает разбиению диапазона виртуальностей  $Q^2$  на два интервала: для  $0 < Q^2 < 5$  ГэВ<sup>2</sup> используется реджевская параметризация структурных функций нуклона, а для  $Q^2 > 5$  ГэВ<sup>2</sup> расчет базируется на кварк-партоновой схеме и партоновых распределениях СТЕО6 [6], полученных из глобального фита экспериментальных данных.

Определим интегральный спектр ядерных ливней, т.е. число ливней с энергией  $\omega = E_0 - E' > y_0 E_0$  в слое толщиной  $\Delta h = h_2 - h_1$ , образуемых лептоном с энергией больше заданной:

$$S_{\omega}^n(E_0, \theta, \Delta h) = N_0 \int_{h_1}^{h_2} dt \int_{E_0}^{\infty} dE D_{\ell}(E, t, \theta) \int_{y_0}^{y_{\max}} dy \frac{d\sigma_n(E, y)}{dy},$$

[см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> ср<sup>-1</sup>].

Здесь  $d\sigma(E, y)/dy$  – дифференциальное сечение неупругого рассеяния мюона на ядре,  $D_{\ell}(E, h, \theta)$  – дифференциальный энергетический спектр лептонов с энергией  $E$  на глубине  $h$ , распространяющихся под углом  $\theta$  к вертикали,  $y = \omega/E$  – доля энергии лептона, переданной ливню,  $N_0$  – число ядер в 1 г вещества.

На рис. 1 приведены спектры адронных ливней, образуемых мюонами космических лучей при прохождении через слой воды толщиной 10 м вблизи поверхности, рассчитанные с использованием 2К-модели [3, 4] (сплошная линия) и с использованием модели ОВД [5]. При  $E=10$  ТэВ результаты расчетов ливней от мюонов для двух моделей отличаются незначительно (до 10 %). Однако с ростом энергии отличие результатов возрастает: для  $E=100$  ТэВ оно достигает  $\sim 30$  %, а при энергии  $10^5$  ТэВ результат 2К-модели в области больших  $y$  в 2.4 раза превышает результат модели фотоядерного взаимодействия [5]. Очевидно, последняя, удовлетворительно описывая

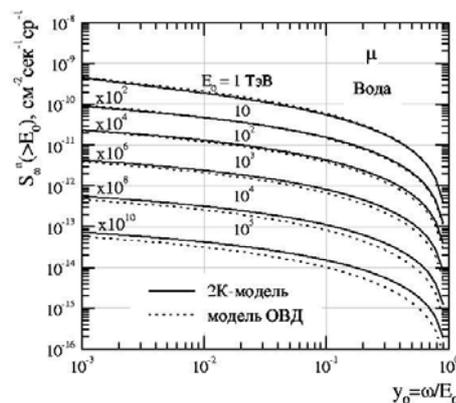


Рис. 1. Спектры адронных ливней, образуемых мюонами при прохождении через воду.

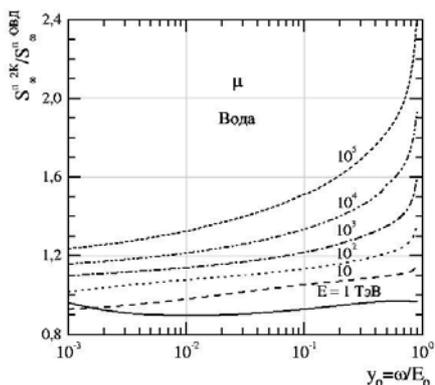


Рис. 2. Отношения спектров адронных ливней, образуемых мюонами при прохождении через воду.

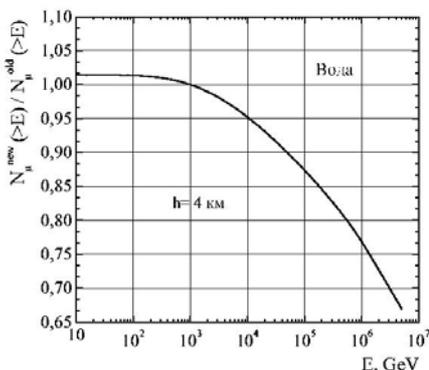


Рис. 3. Отношение интегральных спектров мюонов в воде на глубине 4 км, рассчитанных для двух моделей неупругого рассеяния – 2К [4] и ОВД [5].

спектры ливней от мюон-ядерного взаимодействия в воде и грунте при энергиях до 10 ТэВ, становится неприменимой в области более высоких энергий. Отношение спектров ливней для этих двух моделей показано на рис. 2. Для энергий  $E > 10^3$  ТэВ число ливней, рассчитанных в 2К-модели, на 20–50 % превышает старый результат [1, 2] даже в области малых сбросов энергии ( $y \sim 0.1$ ). Для катастрофических же сбросов энергии ( $y > 0.5$ ) число ливней может возрасти в  $\sim 2$  раза.

Для атмосферных мюонов в воде на основе метода решения уравнения переноса [7] (см. также [8]) был выполнен новый расчет глубоководных спектров  $D_\mu(E, h, \theta)$ . В новом расчете прежнее сечение фотоядерного взаимодействия [5] в интеграле столкновений уравнения переноса было заменено вновь рассчитанным сечением [3, 4] неупругого рассеяния

мюона на ядре. На рис. 3 представлено отношение интегральных спектров мюонов  $N_\mu^{2K}(>E) / N_\mu^{GVDM}(>E)$  вблизи вертикали в воде на глубине 4 км, рассчитанных с использованием 2К-модели [4] неупругого рассеяния мюонов на ядре и модели векторной доминантности [5]. Можно сказать, что эффект нового сечения вполне ощутимый – потоки мюонов высоких энергий на глубине 4 км уменьшаются в полтора раза по сравнению с прежними расчетами [7, 8].

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, грант ур.02.01.063 «Университеты России».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин К.С., Синеговский С.И. Электромагнитные и адронные ливни, образуемые атмосферными мюонами в воде // Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физика волновых процессов», 17–22 сент. 2001. Иркутск, 2001. С. 42.
2. Кузьмин К.С. Спектры электромагнитных и ядерных ливней, образуемых мюонами космических лучей в веществе // Вестник Иркутского университета: Материалы ежегодной научно-теоретической конференции молодых ученых. Иркутск: Иркутский ун-т, 2001. С. 170–171.
3. Кузьмин К.С., Лохтин К.С., Синеговский С.И. Неупругое рассеяние заряженных лептонов на ядрах // Труды VII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом», БШФФ, 13–18 сент. 2004. Иркутск, 2005. Р. 220–222.
4. Kuzmin K.S., Lokhtin K.S., Sinegovsky S.I. Charged lepton-nucleus inelastic scattering at high energies // Intern. J. Mod. Phys. A. 2005. V. 20 (в печати); hep-ph/0412377.
5. Безруков Л.Б., Бугаев Э.В. Эффекты затенения нуклонов в фотон-ядерных взаимодействиях // Ядерная физика. 1981. Т. 33, № 5. С. 1195–1207.
6. Pumplin J., Stump D.R., Huston J. et al. New generation of parton distributions with uncertainties from global QCD analyses // J. High Energy Phys. 2002. V. 0207, 012. P. 1–46; hep-ph/0201195.
7. Naumov V.A., Sinegovsky S.I., Bugaev E.V. A new method for calculating the energy spectrum of cosmic-ray muons under thick layers of matter // Ядерная физика. 1994. Т. 57. С. 439–451.
8. Bugaev E.V., Misaki A., Naumov V.A. et al. Atmospheric muon flux at sea level, underground and under-water // Phys. Rev. D. 1998. V. 58, 054001. P. 1–27; hep-ph/9803488.