

# АННОТИРОВАННЫЙ ОТЧЕТ

о результатах НИР по гранту за 2020 год

Конкурс 2020 года на соискание грантов для поддержки научно-исследовательской работы аспирантов и молодых сотрудников ИГУ.

Направление Физика и астрономия Шифр гранта 091-20-306

1. Наименование НИР по гранту “Статистический анализ сравнения расчетных спектров атмосферных нейтрино высоких энергий с экспериментальными данными”
2. Структурное подразделение (кафедра, лаборатория)  
Физический факультет, кафедра теоретической физики
3. Исполнитель НИР Морозова Анна Дмитриевна

## 5. Ожидаемые результаты в соответствии с заявленным планом работы

Предполагалось оценить уровень статистической значимости моделей адрон-ядерных взаимодействий на основе данных по реконструкции высокоэнергетических спектров атмосферных нейтрино, выполненной в экспериментах Frejus, Super-Kamiokande (SK), AMANDA-II, ANTARES и IceCube. Статистический анализ был выполнен для двух известных параметризаций энергетического спектра и состава первичных космических лучей, опирающихся на экспериментальные данные – Зацепина-Сокольской (ZS) и Хилласа-Гайссера (H3a). Ожидаемым результатом выполненного исследования является статистический анализ сравнения рассчитанных спектров мюонных и электронных нейтрино, генерируемых космическим лучами высокой энергии в атмосфере Земли, с экспериментальными данными. Уровень статистической значимости каждой из используемых моделей адрон-ядерных взаимодействий (QGSJET-II-03, SIBYLL 2.1, модель Кимеля-Мохова), можно количественно охарактеризовать величиной  $\chi^2/\text{ndf}$ , которая определяет отклонение расчета от эксперимента в терминах стандартной (гауссовой) среднеквадратичной ошибки.

## 6. Основные полученные научные результаты

В проведенном исследовании выполнены расчеты энергетических спектров атмосферных нейтрино, мюонных ( $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ ) и электронных, ( $\nu_e + \bar{\nu}_e$ ) от ( $\pi$ , K)-распадов в интервале энергий 100 ГэВ – 10 ПэВ с использованием двух

параметризации НЗа и ZS спектров первичных космических лучей для моделей адрон-ядерных взаимодействий KM, QGSJET II-03, SIBYLL-2.1. При расчете потоков атмосферных нейтрино учитывались только ( $\pi$ ,  $K$ )–источники нейтрино, поскольку при энергиях ниже 600 ТэВ вклад распадов очарованных частиц («прямые» нейтрино) по данным эксперимента IceCube не обнаружен.

Статистический анализ основан на  $\chi^2$ -критерии: статистически значимыми являются модели, для которых сравнение расчета с экспериментом удовлетворяет условию  $\chi^2/\text{ndf} \leq 1$ , где

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{\text{ndf}} \frac{(\Phi_i^{\text{exp}} - \Phi_i^{\text{mod}})^2}{(\delta\Phi_i^{\text{exp}})^2}.$$

Здесь  $\Phi_i(E_\nu) \equiv \langle dJ_\nu / dE_\nu \rangle_\theta$  – дифференциальный спектр нейтрино (измеренный в эксперименте  $\Phi_i^{\text{exp}}$  и теоретически рассчитанный для определенной модели  $\Phi_i^{\text{mod}}$ ), усредненный по зенитному углу,  $\delta\Phi_i^{\text{exp}}$  – среднеквадратичная ошибка измерений потока в  $i$ -ом бине (интервале энергий  $\Delta E_i = E_{i+1} - E_i$ ,  $\text{ndf}$  – число энергетических бинов (экспериментальных точек). Для сравнения расчета с экспериментальным значением потока, отнесенного к  $i$ -му бину по энергии, выполнялось усреднение по бину:

$$\langle \Phi_\nu^{\text{mod}}(\bar{E}_i) \rangle = \frac{1}{\Delta E_i} \int_{E_i}^{E_{i+1}} \Phi_\nu^{\text{mod}}(E) dE.$$

Вычисленные по усредненным потокам значения  $\chi^2$  более аккуратны по сравнению со значениями потоков, вычисленных для средней энергии нейтрино, кроме того, в расчете при этом не теряется важная экспериментальная информация об ошибке определения энергии нейтрино.

Результаты расчетов спектров мюонных и электронных нейтрино от ( $\pi$ ,  $K$ )-распадов (conventional neutrinos, CN) показаны на рис. 1, здесь же приведены экспериментальные точки и неопределенности измерений.

Приведем краткую сводку результатов выполненного статистического анализа: Спектры атмосферных мюонных нейтрино для всех моделей хорошо согласуются с измерениями, выполненными к настоящему времени в экспериментах Frejus, AMANDA, IceCube и ANTARES – статистическая значимость моделей заметно меньше одного стандартного отклонения. Анализ дает указание на то, что параметризация НЗа спектра КЛ чуть предпочтительнее ZS: во всех случаях наблюдается  $\chi^2(\text{НЗа}) < \chi^2(\text{ZS})$ . Совместный анализ всех данных по мюонным нейтрино показывает более высокую статистическую значимость предсказаний модели Кимеля–Мохова ( $\chi^2/\text{ndf} = 0.63$ ).

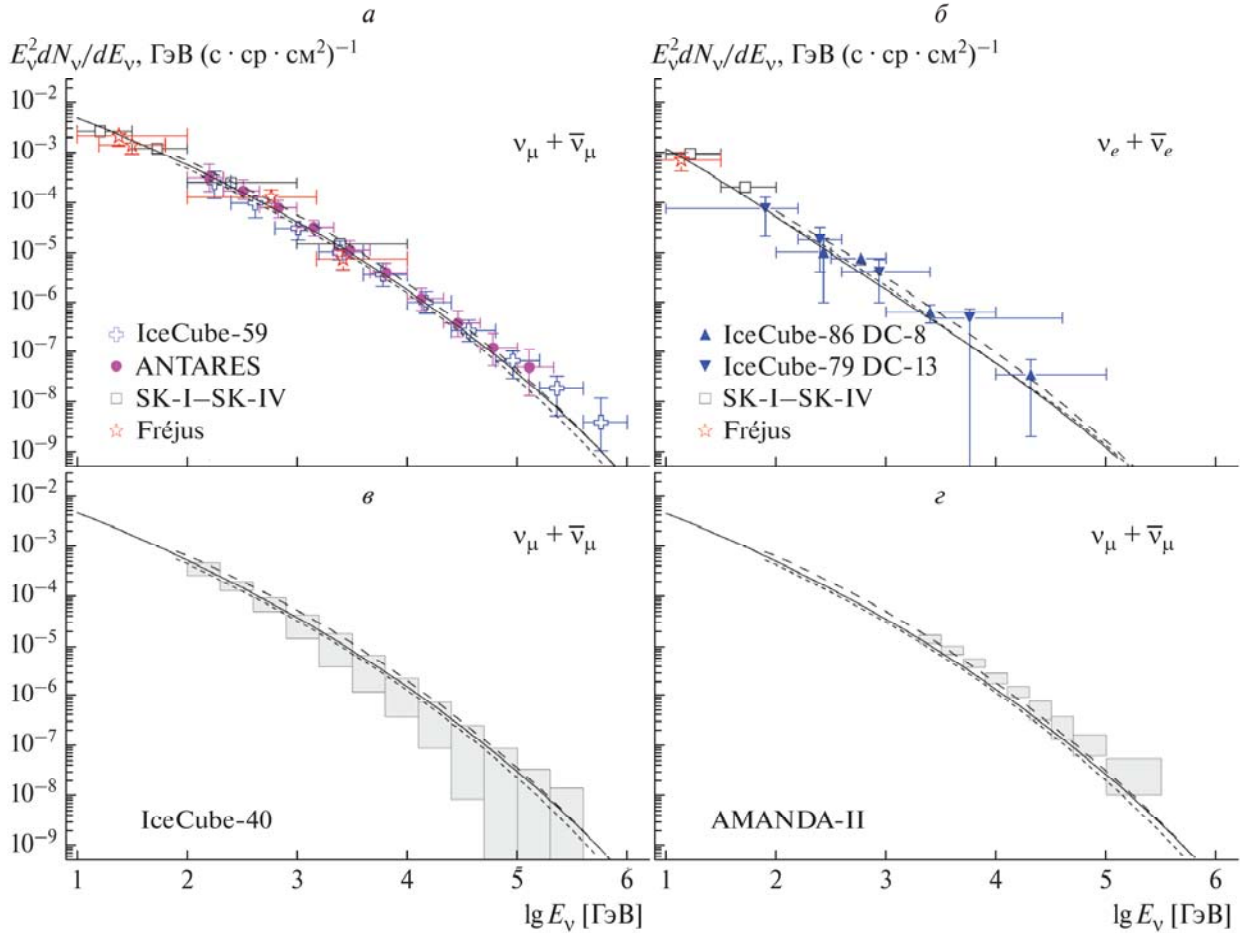


Рис. 1. Спектры атмосферных нейтрино ( $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ ) (а, в, г) и ( $\nu_e + \bar{\nu}_e$ ) (б), измеренные в экспериментах IceCube, ANTARES, AMANDA, Frejus, Super-Kamiokande. Кривые – спектры нейтрино, рассчитанные для спектра космических лучей HZa и моделей адрон-ядерных взаимодействий KM (сплошные линии), QGSJET-II-03 (нижняя штриховая линия) и SIBYLL-2.1 (верхняя штриховая линия).

Модели хорошо описывают данные по спектру электронных нейтрино, полученные в эксперименте IceCube-79. SIBYLL-2.1 лучше других описывает эти данные (с малой статистикой):  $\chi^2/3=0.22$ , но для более поздних данных IceCube-86 согласие заметно хуже ( $\sim 1.4 \sigma - 2.8 \sigma$ ). Однако совместный анализ данных IceCube и Super-Kamiokande (7 точек) дает неплохой результат для моделей SIBYLL-2.1 ( $\chi^2/7=0.89$ ) и QGSJET II-03 ( $\chi^2/7=0.91$ ). Общее впечатление – качество данных по  $\nu_e + \bar{\nu}_e$  невысокое из-за малой статистики событий в экспериментах.

## **7. Предполагаемое использование результатов, в том числе в учебном процессе**

Полученный анализ является оценкой совместности расчета потоков атмосферных нейтрино с имеющимися экспериментальными данными. Выполненный анализ показывает, что расчет спектров мюонных нейтрино является достаточно надежным для использования его результатов в моделировании событий в детекторе нейтринного телескопа Baikal-GVD и восстановлении спектра атмосферных нейтрино. Результаты предполагается использовать также в курсе лекций по нейтринной астрофизике (бакалавры, 4 курс).

## **8. Перечень публикаций по результатам работы**

Опубликована статья в журнале Известия РАН. Серия физическая:

А.А. Кочанов, К.С. Кузьмин, А.Д. Морозова, Т.С. Синеговская, С.И. Синеговский. Спектры атмосферных нейтрино: статистический анализ сравнения расчета с экспериментом // Известия РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85, №4. С. 570-575.