Энергетический спектр и массовый состав космических лучей по данным астрофизического комплекса TAIGA

В.В. Просин (НИИЯФ МГУ) От имени коллаборации TAIGA , 20.04.2021



ПЛАН ДОКЛАДА

- 1. Начало экспериментов в Тункинской долине
- 2. Абсолютная калибровка энергетических спектров
- 3. Тунка-25
- 4. Тунка-133
- 5. TAIGA
- 6. Энергетический спектр в широком диапазоне
- 7. Измерения глубины максимума ШАЛ
- 8. Оценка среднего состава космических лучей в диапазоне 10¹⁵ 10¹⁸ эВ

History of the EAS Cerenkov light study in the Tunka Valley

- 1. 1992 4 QUASAR-370 PMT on the Lake Baikal ice (Л.А. Кузьмичев).
- 2. 1993 1995 Tunka-4 4 QUASAR-370 PMT in the Tunka Valley.
- 3. 1995 ICRC in Roma. Start of the first International Collaboration with Gianni Navarra and A.M. Hillas.











Абсолютная калибровка: нормировка интегрального энергетического спектра за каждую ночь на эталонный спектр, полученный в эксперименте QUEST (Черенковские детекторы на EAS-TOP)



Тунка-25: детекторы черенковсвкого света КВАЗАР-370



План установки Тунка-25



Энергетический спектр в 2005 г



FURTHER STEPS

10¹⁴ - 10¹⁵ eV

Новые детекторы большей площади



10¹⁶ - 10¹⁸ eV TUNKA-133 project





175 оптических детекторов EMI 9350 и HAMAMATSU Ø 20 cm

унка-133



675 m a.s.l.

1 km

Тунка-133: запись импульса (шаг = 5 нс): Фитирование специальной функцией и

измерение параметров:

 $Q=c \cdot S_{pulse}$, A_{max} , FWHM, t_i



anode:

CORSIKA: Функции – ФПР и ФАР



b_A

ФАР: A(R) = A(400)·((R/400+1)/2)-bA крутизна: b_A

ФПР: Q(R) = Q(300)·((R/300+1)/2)-bQ крутизна: bo



CORSIKA: Пересчет от Q_{200} к E_0





The TAIGA experiment - a hybrid detector for very High energy gamma-ray astronomy and cosmic ray physics in the Tunka valley



History of the EAS Cerenkov light study in the Tunka Valley

2013 – Start of TAIGA Collaboration . TAIGA = Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy TAIGA-HiSCORE = (High Sensitivity Cosmic Ray Explorer)







TAIGA-HISCORE 2019-2020



HiSCORE: Суммарный сигнал от 4-х ФЭУ шаг 0.5 нс





Восстановление параметров ШАЛ по минимальному количеству станций Q₇₀

Для E₀ < 10¹⁵ эВ: Нет измерения на расстоянии ≥ 200 м

X₀,Y₀ определяется как ц. т. А_i для 3-5 станций, ближайших к оси Q_{gc} среднее Q для 2-х ближайших к оси станций

g.c.

 $lgQ_{70}(\theta) = lgQ_{gc}(\theta) + 0.75 \cdot sec(\theta) \cdot (sec(\theta) - 1)$:

$$E_0 = C \cdot Q_{70}^{0.87}$$

HiSCORE Effective Area for fitted events



HiSCOREEffective Area for center of gravity events



Tunka Primary Energy Spectra with EAS Cerenkov Light

Tunka-133: 350 clean moonless nights 2175 h ~375,000 events With ~100% efficiency ~4200 events with $E_0 > 10^{17}$ eV

TAIGA-HiSCORE: 35 clean moonless nights 180 h ~900,000 events with ~100% efficiency



United Primary Energy Spectrum $10^{13} - 10^{20} \text{ eV}$



выводы

по спектру всех первичных частиц

- С помощью единой методики восстановления энергии первичных частиц по черенковскому свету от широких атмосферных ливней восстановлен энергетический спектр всех частиц в широком диапазоне от 2.10¹⁴ до 2.10¹⁸ эВ (4 порядка).
- 2) Хорошая стыковка как с прямыми и горными измерениями на низких энергиях, так и с измерениями гигантских установок на высоких энергиях свидетельствует о достигнутом правильном измерении энергий во всем доступном диапазоне.
- 3) Спектр имеет сложную структуру с несколькими особенностями, отражающими происхождение космических лучей от многих источников.

Методы оценки массового состава космических лучей.



Соотношение числа электронов и мюонов в ливне: параметр S (Ne, Nµ): S = lgNµ -0.2xlgNe

Глубина максимума ШАЛ X_{max} : $\Delta X_{max} = X_0/\cos\theta - X_{max}$

Как измерить глубину максимума ШАЛ?



CORSIKA: Расчетные пространственные распределения



Крутизна ФПР: **P=Q(80)/Q(200)**

СОRSIKA: Корреляция относительного положения максимума и крутизны ФПР

Крутизна: P = Q(80)/Q(200) $\Delta X_{max} = X0/cos\theta - X_{max}$

Пересчет от параметра Р к ΔХ_{max} не зависит ни от энергии (10¹⁵ – 10¹⁸ эВ), ни от зенитного угла ливня (0° - 30°), ни от модели взаимодействия первичной частицы



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Тунка-133: Результаты обработки за 7 лет с 2010 по 2017 гг. Зенитный угол θ ≤ 30°, Площадь 0.64 км², Энергия ≥ 10¹⁶ эВ – 69000 событий.

Чтобы при всех энергиях иметь один и тот же диапазон расстояний от оси ШАЛ, на заключительном этапе обработке диапазон ограничивается до 300 м.

TAIGA-HISCORE: Результаты обработки данных сезона 2019-20 г за 74 ночи с отличной погодой и одновременной работой 2-х кластеров. Зенитный угол θ≤30°, Площадь 0.44 км² Энергия ≥ 10¹⁵ эВ – 280000 событий.

Чтобы при всех энергиях иметь один и тот же диапазон расстояний от оси ШАЛ, на заключительном этапе обработке диапазон ограничивается до 300 м.

Глубина максимума ШАЛ



RMS(X_{max})





Глубина максимума ШАЛ



Средний состав космических лучей <**InA>**

Пересчет к среднему составу для всех установок, включая AUGER, произведен методом интерполяции между расчетами глубины максимума для протонов и железа по модели QGSJET II-04.

Модель EPOS-LHC дает увеличение <InA> при 3.10¹⁶ эВ на ~0.3

Модель Sibill2.3с дает увеличение <InA> при 3·10¹⁶ эВ на ~0.5



выводы

- В диапазоне 10¹⁶ 10¹⁷ точки установки Тунка-133 повторяют результат ранее опубликованной работы, а именно, утяжеление массового состава космических лучей, но со сдвигом на ~ 0.8 в сторону более легкого состава (в среднем первичного гелия).
- На предельно высоких для наших экспериментов энергий наблюдается отличная стыковка с последними результатами Pier Auger Observatory (PAO), а именно, облегчение состава.
- 3) Результаты работы предварительные.

а) Планируется более полное моделирование эксперимента для выявления возможных систематических искажений.

б) Планируется более полный анализ искажений формы импульсов черенковского света для получения согласия двух методов оценки глубины максимума.

в) Требуется анализ экспериментальных распределений по глубине максимума для всего диапазона энергий.

Спасибо за внимание!

