

## МОНТЕ-КАРЛО-МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ОЛВЭ-НЕРО

*Х. Караташ*<sup>1,2,\*</sup>, *И. Сатышев*<sup>1,2</sup>, *Л. Г. Ткачев*<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>2</sup> Институт ядерной физики, Алма-Ата, Казахстан

<sup>3</sup> Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

Обсерватория лучей высоких энергий (ОЛВЭ) — проект космического эксперимента, основанного на ионизационном калориметре для измерения спектра и состава космических лучей. Эффективный геометрический фактор установки не менее  $12 \text{ м}^2 \cdot \text{ср}$  для протонов и не менее  $16 \text{ м}^2 \cdot \text{ср}$  для ядер и электронов. В течение  $\sim 5\text{--}7$  лет экспозиции эта миссия позволит измерить поэлементные спектры космических лучей в области энергий  $10^{12}\text{--}10^{16}$  эВ/частица с высоким энергетическим разрешением. Представлено моделирование эксперимента методом Монте-Карло с использованием борированного сцинтиллятора в составе калориметра.

The High Energy Ray Observatory (HERO) is a project for a space experiment based on an ionization calorimeter to measure the spectrum and composition of cosmic rays. The effective geometric factor of the installation is not less than  $12 \text{ m}^2 \cdot \text{sr}$  for protons and not less than  $16 \text{ m}^2 \cdot \text{sr}$  for nuclei and electrons. During  $\sim 5\text{--}7$  y of exposure, this mission will measure the element-by-element spectra of cosmic rays in the energy range  $10^{12}\text{--}10^{16}$  eV/particle with high energy resolution. A Monte Carlo simulation of an experiment using a borated scintillator as part of a calorimeter is presented.

PACS: 98.70.Sa; 07.05.Tr

### ВВЕДЕНИЕ

Источником большей части космических лучей (КЛ) являются взрывы сверхновых в нашей Галактике [1]. Взрывы сверхновых представляют собой одну из наиболее важных фаз эволюции крупных звезд, в результате которой возникают релятивистские объекты, такие как нейтронные звезды и черные дыры.

В последнее время интерес сместился к изучению тонких структур энергетических спектров ядер КЛ и их химического состава. Было получено указание на существование излома в спектрах протонов и гелия вблизи магнитной жесткости 10 ТВ в эксперименте CREAM [2]. Наличие этой структуры было подтверждено на уровне четырех стандартных отклонений в эксперименте НУКЛОН [3]. Существование этого

---

\* E-mail: karatash@jinr.ru

колена в спектрах протонов и гелия было подтверждено в экспериментах DAMPE [4] и CALET [5].

Таким образом, можно выделить две важные задачи в физике КЛ высоких энергий: прецизионное измерение спектра КЛ при энергиях ниже колена Куликова–Христиансена 3 ПэВ и получение спектров с поэлементным измерением заряда в этой области, которые предстоит решить в эксперименте ОЛВЭ-HERO (Обсерватория лучей высоких энергий — High-Energy Ray Observatory).

Космическая обсерватория ОЛВЭ-HERO основана на использовании тяжелого image-калориметра (10 и более тонн) для измерения энергии частиц, восстановления их траектории и разделения электромагнитных и адронных компонент КЛ [6]. Хорошо зарекомендовавшие себя методы, основанные на падовых кремниевых детекторах, будут использоваться в системе измерения заряда частиц, как в эксперименте НУКЛОН [7].

### МОНТЕ-КАРЛО-МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРОЩЕННОГО ВАРИАНТА ДЕТЕКТОРА ОЛВЭ-HERO

Рассматривается упрощенный вариант монте-карло-моделирования детектора ОЛВЭ-HERO в виде шара диаметром 2,5 м, состоящего из 125 сферических слоев вольфрама 0,1 см и борированного сцинтиллятора 0,9 см, как показано на рис. 1, а. В результате реакции захвата бором теплового нейтрона с сечением 755 б образуется энергичная  $\alpha$ -частица, которая уносит большую часть энергии в этой реакции (1,47 МэВ). Цель моделирования — оценить уровень дополнительного фона  $\alpha$ -частиц. Использование борированного сцинтиллятора позволит измерять сигнал от  $\alpha$ -частиц, который даст возможность повысить уровень режекции между электромагнитной и адрон-ядерной компонентами КЛ. На рис. 1, б представлены зависимости выхода  $\alpha$ -частиц от времени для  $\gamma$ -квантов с энергией 10 ГэВ, а также протона, ядер He и Fe с энергией 10 ГэВ/нуклон, откуда видно их различие в 20 и более раз.

Изотропно падающие на детектор КЛ инициируют развитие ливней вторичных частиц, которые формируют спектр замедленных до тепловых энергий нейтронов, плотность которых зависит от размеров и структуры детектора. Каждая из вторичных частиц ливня моделируется в GEANT-4 вплоть до пороговой энергии с образованием возбужденных ядер — источников испарительных нейтронов, их замедления и последующего рождения  $\alpha$ -частиц или выхода вторичной частицы из детектора.

На рис. 2 представлено энергетическое разрешение калориметра с использованием борированного сцинтиллятора, которое для протонов с энергией 100 ТэВ равно  $\sim 13\%$ . Измерению дополнительного и независимого сигнала от запаздывающих  $\alpha$ -частиц соответствует вдвое худшее разрешение, что несущественно улучшает точность восстановления энергии первичной КЛ частицы.

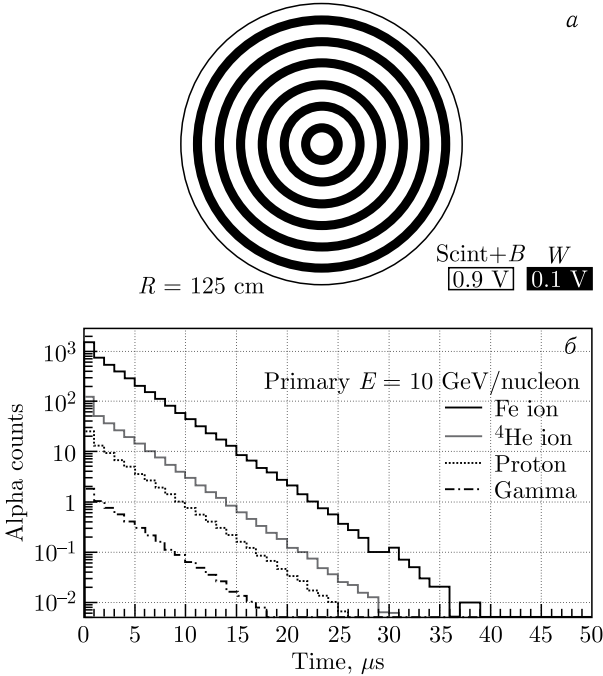


Рис. 1. а) Упрощенный вариант детектора ОЛВЭ-HERO; б) выходы  $\alpha$ -частиц для разных начальных частиц

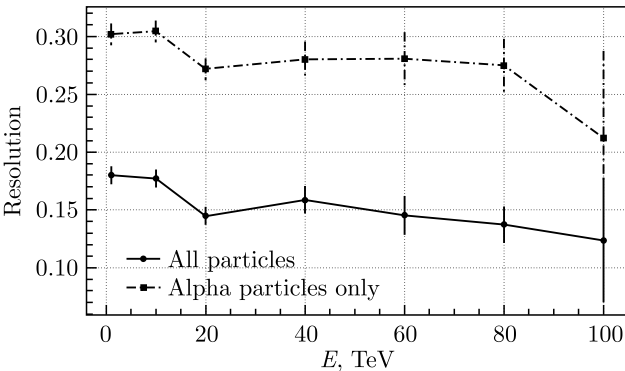


Рис. 2. Энергетическое разрешение калориметра с использованием борированного сцинтиллятора. Сплошной линией показано разрешение от регистрации всех вторичных частиц, штрихпунктирной линией — только от измерения сигнала  $\alpha$ -частиц

На рис. 3, а представлен отклик детектора в зависимости от энергии первичного протона, из которого видна линейная зависимость на всем

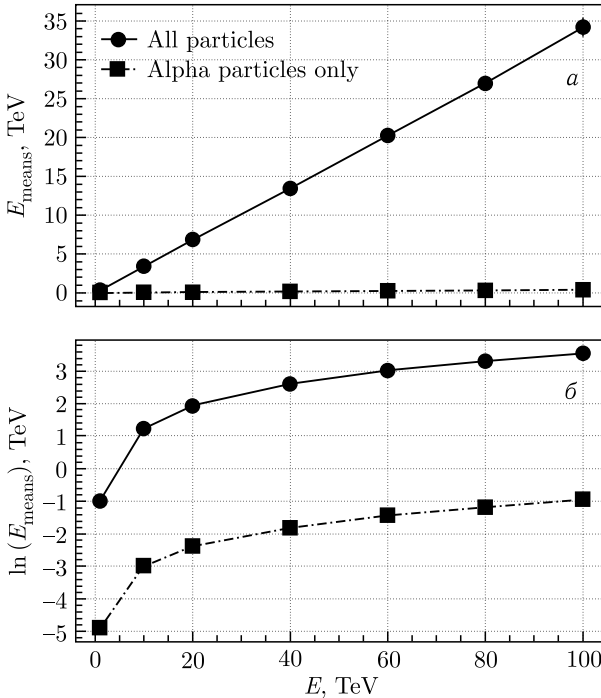


Рис. 3. Отклик детектора в зависимости от энергии первичного протона. Дополнительный и независимый вклад от  $\alpha$ -частиц показан штрихпунктирной линией интервале энергий. На рис. 3, б — та же зависимость в логарифмическом масштабе, чтобы показать незначительный вклад  $\alpha$ -частиц, рождаемых в борированном сцинтилляторе.

## МОНТЕ-КАРЛО-МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТОТИПА ДЕТЕКТОРА ОЛВЭ-HERO

Схематический вид прототипа детектора ОЛВЭ-HERO для тестов на пучках ускорителей высоких энергий, приведенный на рис. 4, представляет собой калориметр в виде слоистой структуры из 30 детектирующих плоскостей с ортогональными направлениями 16 стрипов в соседних плоскостях. Размеры стрипа:  $200 \times 12,5 \times 7$  мм. Между сцинтилляционными пластинами находится поглотитель из меди (2 мм) и свинца (3 мм), что составляет  $\sim 20$  радиационных и  $\sim 1,15$  ядерных длин, достаточных для развития каскада вторичных частиц.

Сцинтилляционный сигнал передается WLS-файбером на 16-анодный ФЭУ H8711-10 НАМАМАТСУ и поступает в электронику сбора данных — блок CAEN R5560. Блок R5560 — это 128-канальная система сбора данных с программируемой логикой обработки. Сборка прототипа

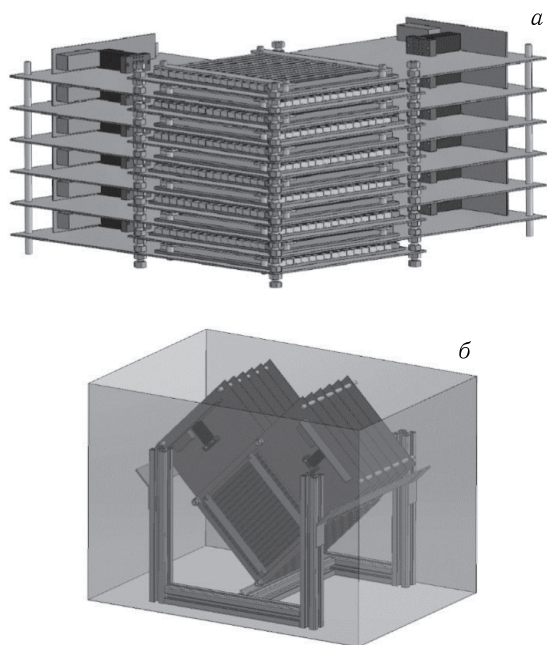


Рис. 4. Схематический вид сборки прототипа детектора ОЛВЭ-HERO

детектора ОЛВЭ-HERO помещается внутри светонепроницаемого кожуха, и ее схематический вид представлен на рис. 4, б.

При монте-карло-моделировании для получения более общего представления о развитии каскада вторичных частиц рассматривался прототип из 100 слоев детектора. В качестве параметризации развития каскада использовалась модель QGSP\_BERT\_HP. На рис. 5, а представлены энергопотери  $\alpha$ -частиц для нейтронов различных энергий. В качестве начальных частиц взяты нейтроны с энергией 0,25 эВ, 500 эВ, 100 кэВ и 5 МэВ для предполагаемой калибровки прототипа детектора на реакторе ВВР-К в Казахстане (Алма-Ата). Средняя энергия реакторных нейтронов лежит в области 2–3 МэВ. На рис. 5, б представлены энергопотери  $\alpha$ -частиц в каждой плоскости для первичных электронов и протонов с энергиями 13 ГэВ, а также ядер He, C и Fe с энергиями 13 ГэВ/нуклон.

Из рис. 5, а видно, что уже в детекторе в 20–30 слоев возможно разделение сигналов от реакторных нейтронов различной энергии при достаточной статистике. Из рис. 5, б видно, что при достаточном энергетическом разрешении калориметра можно получить поэлементный спектр КЛ. Отклик на начальный КЛ-электрон в 5–10 раз меньше, чем на начальный КЛ-протон во всех слоях калориметра. Разница откликов

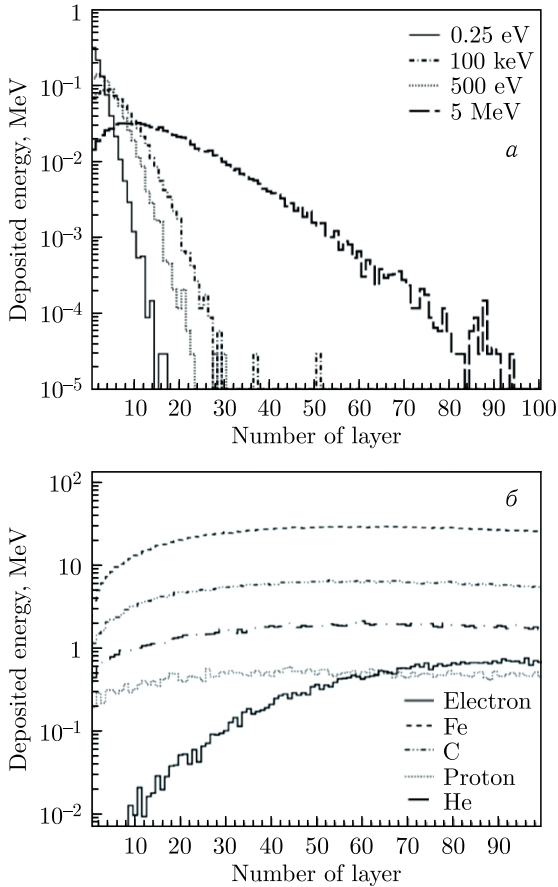


Рис. 5. а) Энергопотери  $\alpha$ -частиц для нейтронов различных энергий. б) Энергопотери  $\alpha$ -частиц электронов,  $p$ , He, C и Fe с энергиями 13 ГэВ/нуклон. Гистограммы нормированы на одно событие

существенно меньше в прототипе по сравнению с полномасштабным детектором из-за утечки каскада вторичных частиц в адрон-ядерном взаимодействии через боковую поверхность прототипа.

На рис. 6, а приведен отклик детектора в зависимости от энергии налетающего протона, и видна хорошая линейность. На рис. 6, б приведено его энергетическое разрешение. Видно, энергетическое разрешение примерно вдвое хуже по сравнению с разрешением в упрощенном варианте полномасштабного детектора, приведенном на рис. 2, а, что объясняется небольшой ядерной длиной прототипа и возрастающим выходом вторичного каскада за пределы калориметра с ростом энергии первичного протона.

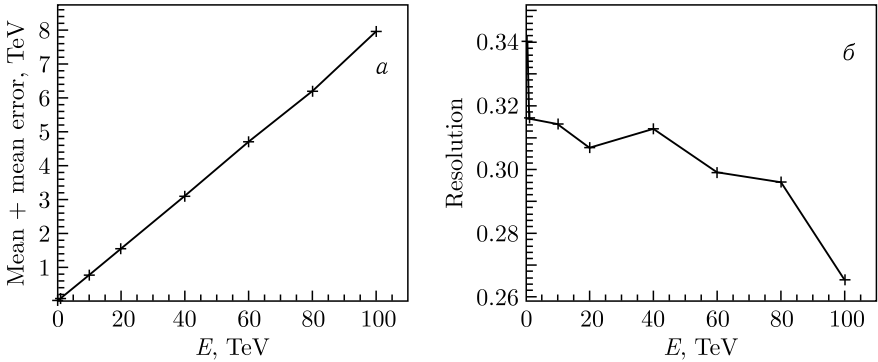


Рис. 6. а) Отклик детектора в зависимости от энергии налетающего протона. б) Энергетическое разрешение в зависимости от энергии налетающего протона

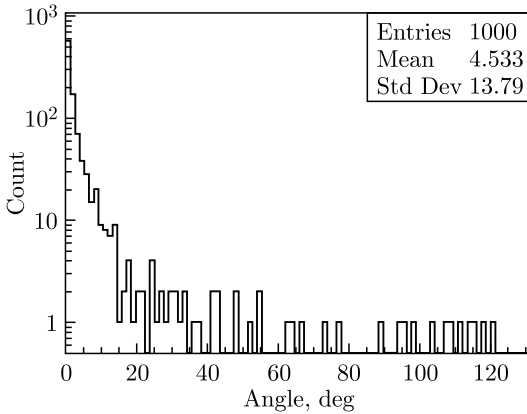


Рис. 7. Угловое разрешение прототипа ОЛВЭ-HERO

В связи с тем, что в эксперименте ОЛВЭ-HERO предполагается многолетний набор данных и будет получена статистика на уровне нескольких миллиардов событий, необходимая для исследования анизотропии КЛ в области колена, представляет интерес оценить с помощью монте-карло-моделирования ожидаемое угловое разрешение детектора. Из представленного на рис. 7 предварительного моделирования развития каскада вторичных частиц от протона с энергией 100 ГэВ видно угловое разрешение  $\sim (4,5 \pm 14)^\circ$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено предварительное монте-карло-моделирование калориметра детектора ОЛВЭ-HERO, а также прототипа детектора с использованием борированного сцинтиллятора для режекции электромагнитной

и адрон-ядерной компоненты КЛ. Полученные результаты предполагается проверить в тестах на пучках ускорителей, а также на реакторе ВВР-К в Казахстане (Алма-Ата).

**Финансирование.** Работа поддержана Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант AP19678699).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ginzburg V., Syrovatskii S.* The Origin of Cosmic Rays. Pergamon Press, 1964.
2. *Ahn H. S., Allison P., Bagliesi M. G., Beatty J. J., Bigongiari G., Childers J. T., Conklin N. B., Coutu S., DuVernois M. A., Ganel O., Han J. H., Jeon J. A., Kim K. C., Lee M. H., Lutz L., Maestro P., Malinin A., Marrocchesi P. S., Minnick S., Mognet S. I., Nam J., Nam S., Nutter S. L., Park I. H., Park N. H., Seo E. S., Sina R., Wu J., Yang J., Yoon Y. S., Zei R., Zinn S. Y.* Discrepant Hardening Observed in Cosmic-Ray Elemental Spectra // *Astrophys. J. Lett.* 2010. V. 714. P. L89–L93.
3. *Atkin E., Bulatov V., Dorokhov V., Gorbunov N., Filippov S., Grebenyuk V., Karmanov D., Kovalev I., Kudryashov I., Kurganov A., Merkin M., Panov A., Podorozhny D., Polkov D., Porokhovoy S., Shumikhin V., Tkachenko A., Tkachev L., Turundaevskiy A., Vasiliev O., Voronin A.* New Universal Cosmic-Ray Knee near a Magnetic Rigidity of 10 TV with the NUCLEON Space Observatory // *JETP Lett.* 2018. V. 108. P. 5–12.
4. *An Q. et al. (DAMPE Collab.).* Measurement of the Cosmic Ray Proton Spectrum from 40 GeV to 100 TeV with the DAMPE Satellite // *Sci. Adv.* 2019. V. 5, No. 9. P. eaax3793; arXiv:1909.12860.
5. *Marrocchesi P. S. et al. (CALET Collab.).* CALET Results after 5 Years on the ISS // *PoS (ICRC2021).* V. 010.
6. *Prosin V. V. et al. (TAIGA Collab.).* Energy Spectrum of Primary Cosmic Rays, According to TUNKA-133 and TAIGA-HiSCORE EAS Cherenkov Light Data // *Bull. Russ. Acad. Sci.* 2019. V. 33, No. 8. P. 1016–1019.
7. *Voronin G., Grebenyuk V. M., Karmanov D. E., Korotkova N. A., Krumshstein Z. V., Merkin M. M., Pakhomov A. Yu., Podorozhnyi D. M., Sadovskii A. B., Sveshnikova L. G., Tkachev L. G., Turundaevsky A. N.* Testing a Prototype of the Charge-Measuring System for the NUCLEON Setup // *Instrum. Exp. Tech.* 2007. V. 50. P. 187–195.