

УДК 524.1

## ТЕКУЩИЙ СТАТУС МИССИИ НУКЛОН-2

© 2019 г. А. А. Курганов<sup>1, \*</sup>, В. Л. Булатов<sup>2</sup>, О. А. Васильев<sup>1</sup>, Д. Е. Карманов<sup>1</sup>, И. М. Ковалев<sup>1</sup>, М. И. Панасюк<sup>1</sup>, А. Д. Панов<sup>1</sup>, Д. М. Подорожный<sup>1</sup>, Д. А. Полков<sup>2</sup>, Г. Е. Седов<sup>1</sup>, Л. Г. Ткачев<sup>3, 4</sup>, П. Л. Ткачев<sup>1</sup>, А. Н. Турундаевский<sup>1</sup>, С. Б. Филиппов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

<sup>2</sup>Общество с ограниченной ответственностью “ГОРИЗОНТ”, Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>4</sup>Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области “Университет “Дубна”, Дубна, Россия

\*E-mail: me@sx107.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

Эксперимент НУКЛОН-2 нацелен на изучение изотопного и зарядового состава средних, тяжелых и сверхтяжелых ионов ( $Z < 82$ ) в энергетическом диапазоне от 300 МэВ/нуклон до 1 ГэВ/нуклон. Представлена планируемая конструкция спутникового эксперимента по изучению космических лучей НУКЛОН-2. Проведенное моделирование подтверждает работоспособность алгоритмов разделения изотопов.

DOI: 10.1134/S036767651905020X

### ВВЕДЕНИЕ

В областях физики, связанных с космосом, в том числе физике источников космических лучей и астрофизике в целом, на текущий момент наблюдается повышенный интерес к данным по изотопному составу космических лучей, что связано с большим количеством физических задач, для которых эти данные необходимы. Эти задачи включают изучение локального окружения Солнца, в том числе измерение локального диффузионного коэффициента, поиск локальных источников и определение возраста космических лучей, изучение изотопных аномалий, возникающих при взрывах Сверхновых в обогащенную тяжелыми элементами среду, изучение нестандартных процессов ускорения космических лучей, особенностей инжекции частиц в них и исследование процессов нуклеосинтеза.

На сегодняшний день наблюдается сильный недостаток экспериментальных данных по изотопному и зарядовому составу космических лучей с  $Z > 32$  для изотопного и  $Z > 40$  для зарядового разрешения и с учетом того, что в ближайшее время эксперименты в данной области не планируются, новый эксперимент в данной области крайне актуален [1].

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТ НУКЛОН-2

НУКЛОН-2 – это планируемый спутниковый эксперимент для прямого изучения космических лучей и их изотопного и зарядового составов. Диапазон  $Z$  для задачи зарядового разрешения простирается от углерода до границы стабильных ядер, а для задачи изотопного разрешения – от 6 до 66. Планируемое время экспозиции и геометрический фактор составляют 5 лет и  $0.8 \text{ м}^2 \cdot \text{ср}$  соответственно.

Для разделения изотопов в эксперименте используется модифицированная методика  $E-dE$ . Эта методика основана на измерении полной энергии частицы  $E$  и ее линейных потерь энергии  $dE/dx$  в одном из детекторов системы. Произведение этих двух величин пропорционально массе частицы  $M$  и квадрату ее заряда  $Z^2$ .

Научная аппаратура эксперимента планируется к установке в качестве дополнительной нагрузки на российский коммерческий спутник. Планируемая орбита – солнечно-синхронного типа с высотой 400–600 км и наклоном в  $97^\circ$ .

Предполагаемая компоновка эксперимента состоит из 48 идентичных независимых спектрометров тяжелых изотопов космических лучей (СТИКЛ). Принципы их функционирования,

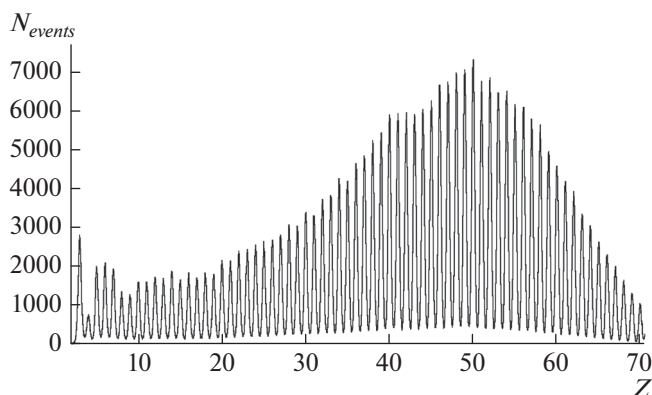


Рис. 1. Полученное заряженное разрешение на пучке фрагментированных ядер Pb при  $A/Z = 2.2$ .

управления и контроля максимально заимствованы из эксперимента НУКЛОН [2].

Каждый СТИКЛ состоит из 32 спаренных кремниевых калориметрических детекторов толщиной в 1 мм каждый и 8 трековых стриповых детекторов толщиной 300 мкм и имеет два симметричных входных окна с двух сторон. Масса и заряд частицы определяются через измерение потерь энергии частицей в каждом из детекторов вплоть до ее остановки с соответствующим пиком Брэгга.

## 2. ПРОТОТИП ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проверки работоспособности аппаратуры и методов анализа был разработан прототип эксперимента НУКЛОН-2, состоящий из 13 миллиметровых и 18 300-микронных кремниевых детекторов. Устройство триггера прототипа позволяет настраивать его на регистрацию частиц, останавливающихся внутри калориметра и пролетающих его насквозь.

Прототип был протестирован на ускорителе SPS CERN на высокоэнергетическом (150 ГэВ/нуклон) фрагментированном пучке ядер с  $Z$  до 82 при различных соотношениях  $A/Z$ . Полученное зарядовое разрешение для  $A/Z = 2.2$  представлено на рис. 1, составляет 0.17 зарядовых единиц вне зависимости от конкретного ядра и подтверждает работоспособность электроники прототипа и адекватный уровень ее шумов во всем планируемом диапазоне  $Z$ . Конкретное значение разрешения (0.17 зарядовых единиц) хорошо соответствует результатам, полученным для аналогичного эксперимента в Монте-Карло моделировании.

## 3. МОНТЕ-КАРЛО МОДЕЛЬ

Было также проведено Монте-Карло моделирование в программных пакетах FLUKA, GEANT3 и GEANT4 с упрощенной геометрией модели для проверки изотопного разрешения эксперимента, оптимизации его конструкции и получения допу-

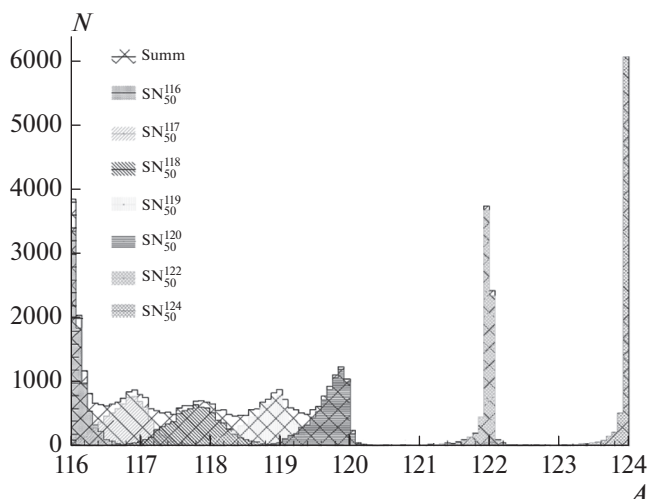


Рис. 2. Полученное изотопное разрешение для ядер олова в модели Монте-Карло.

стимого уровня шумов. Полученные данные были обработаны различными методами (нейронные сети и многомерный анализ, основанный на методе максимального правдоподобия). Было получено изотопное разрешение вплоть до  $Z = 64$ . Полученное разрешение для ядер олова показано на рис. 2. При обработке события с фрагментационными процессами считались фоновыми и фильтровались методами, схожими с методами обработки.

В моделировании было также показано, что при уровне приведенных шумов электроники ниже 5 МэВ сильное ухудшение изотопного разрешения не наблюдается. Важно отметить, что полученный в прототипе уровень шумов электроники ниже 1 МэВ, и тем самым подтверждается возможность разрешения изотопов во всем заявленном зарядовом диапазоне.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперимент НУКЛОН-2 – это планируемый спутниковый эксперимент по прямому изучению космических лучей и их изотопного и зарядового составов. Представленные результаты пучкового тестирования прототипа и Монте-Карло симуляции подтверждают работоспособность основных идей, заложенных в эксперимент. Эксперимент все еще находится в разработке и планируется к запуску в 2020–2022 годах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карманов Д.Е., Курганов А.А., Панасюк М.И. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 4. С. 436; Karmanov D.E., Kurganov A.A., Panasyuk M.I. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. № 4. P. 401.
2. Atkin E., Bulatov V., Dorokhov V. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sec. A. 2015. V. 770. P. 189.