

УДК 537.591.15

## $\gamma$ -СЕМЕЙСТВА С “ГАЛО” ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ШАЛ В РЭК И ОЦЕНКА ДОЛИ $p + He$ В ПКЛ ПРИ $E_0 = 1-100$ ПЭВ

Р. А. Мухамедшин<sup>1</sup>, В. С. Пучков<sup>2</sup>, С. Е. Пятовский<sup>2</sup>, С. Б. Шаулов<sup>2</sup>

*В статье описаны экспериментальные  $\gamma$ -семейства, полученные в рентгеноэмульсионных камерах (РЭК) эксперимента ПАМИР, в которых зарегистрированы события, названные “гало”. Природа гало объяснена в рамках стандартной модели ядерных взаимодействий. На основании событий с гало получена оценка доли  $p+He$  в первичных космических лучах (ПКЛ). Показано, что массовый состав ПКЛ остается смешанным в диапазоне  $E_0 = 1-100$  ПэВ.*

**Ключевые слова:** рентгеноэмульсионная камера, широкий атмосферный ливень, космические лучи, массовый состав, гало.

Для исследования стволов ШАЛ в КЛ широко применяется метод РЭК. Схема установки РЭК ПАМИР представлена на рис. 1. Высокоэнергичная компонента стволов ШАЛ ( $E_\gamma \geq 2$  ТэВ) регистрируется на рентгенографической пленке, расположенной между слоями Pb, как отдельные пятна потемнений. Высокая разрешающая способность рентгенографической пленки и высокий порог регистрации  $\gamma$ -квантов позволяют регистрировать в РЭК узкие коллимированные пучки высокоэнергичных частиц в виде групп пятен потемнения, генетически связанных с индивидуальными ШАЛ и называемых  $\gamma$ -семействами.

Применение рентгенографической пленки с двухсторонним слоем эмульсии, разделенной пластической подложкой толщиной  $\sim 200 \mu$ , позволяет определять координаты, зенитный и азимутальный углы электронно-фотонной компоненты (ЭФК) ШАЛ с точностью  $\sim 100 \mu$ ,  $3^\circ$  и  $15^\circ$ , соответственно.

Плотность потемнения на рентгенографической пленке пропорциональна количеству  $\gamma$ -квантов и  $e^\pm$  (далее –  $\gamma$ -кванты) в ЭФК, инициированной в Pb, то есть пропор-

<sup>1</sup> ИЯИ РАН, 117312 Россия, Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а.

<sup>2</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: sep@lebedev.ru.

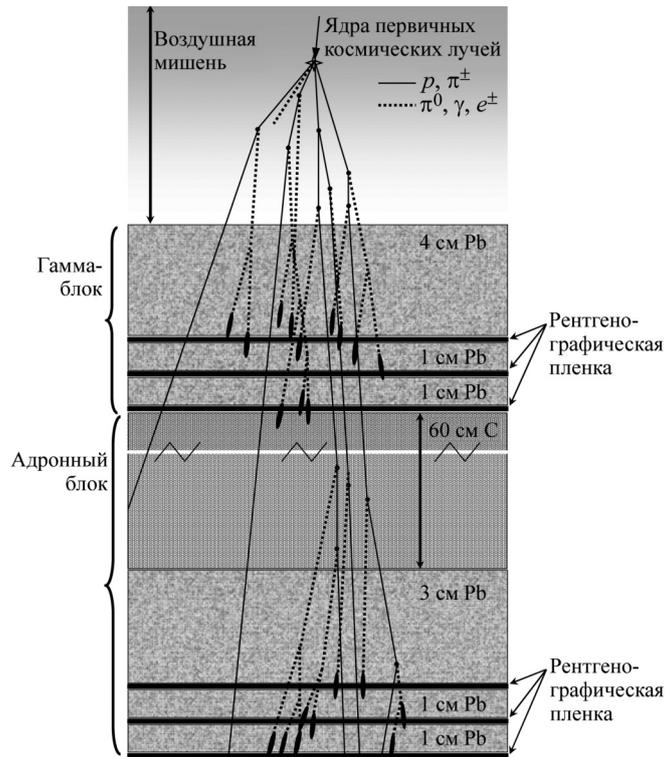


Рис. 1: Схема РЭК эксперимента ПАМИР.

циональна энергии  $\gamma$ -кванта  $E_\gamma$ , вызвавшего электромагнитный каскад в Pb. Точность определения энергии при фотометрировании  $\sigma(E_\gamma)/E_\gamma = 0.2-0.3$ .

С ростом энергии первичной частицы отдельные пятна от  $\gamma$ -квантов начинают перекрываться, создавая области повышенной оптической плотности. Такие семейства называются  $\gamma$ -семействами с гало.

Для анализа  $\gamma$ -семейств с гало использована MC0-модель [1], близкая к модели QGSJ и хорошо описывающая характеристики экспериментальных данных, полученных с помощью РЭК. Анализ экспериментальных данных РЭК ПАМИР с использованием MC0 показал, что более 90% зарегистрированных  $\gamma$ -семейств образованы p+He компонентой ПКЛ, и могут быть использованы для оценки доли протонов и ядер гелия (p+He) в ПКЛ.

$\gamma$ -семейства с гало. События с гало наблюдаются в экспериментальных  $\gamma$ -семействах, начиная с  $E_0 \sim 3 - 5$  ПэВ. Впервые событие с гало наблюдалось в японо-бразильском эксперименте на г. Чакалтая (Боливия), получившее название “Андромеда”. Гало “Андромеда” было отнесено к экзотическим событиям в ядерных взаимодействиях.

В дальнейшем события с гало наблюдались в других экспериментах с РЭК, в т.ч. в РЭК ПАМИР. Статистика РЭК ПАМИР включает 61  $\gamma$ -семейство с гало при суммарной экспозиции 3000 м<sup>2</sup>·год·ср. Крупнейшими по площади стали гало “ФИАНИТ” (рис. 2) и “Таджикистан”.

Для изучения явления гало, по модели МС0 разыграны  $\gamma$ -семейства в диапазоне  $E_0 = 0.3\text{--}3000$  ТэВ со следующими критериями:

- минимальная энергия семейств на уровне наблюдения 100 ТэВ;
- минимальное количество частиц в семействах  $N_{\min} = 3$ ;
- ПКЛ представлены частицами 9 групп ядер: p, He, C, N, O, Mg, Si, V, Fe;
- глубина уровня наблюдения 594 г/см<sup>2</sup> для РЭК ПАМИР [2, 3] и 695 г/см<sup>2</sup> для ШАЛ+РЭК эксперимента АДРОН (Тянь-Шань) [4];
- порог учета частиц по энергии 100 ГэВ для  $\gamma$ -квантов и стабильных адронов, приходящих в РЭК из атмосферы;
- зенитный угол прихода ядер ПКЛ в диапазоне от 0 до 0.9 рад.

Расчет гало выполнен с использованием разыгранных по модели МС0  $\gamma$ -семейств методом Монте–Карло с применением алгоритма “шахматная доска”. Предварительный отбор  $\gamma$ -семейств соответствует обработке экспериментальных данных в РЭК ПАМИР:

- отбор  $\gamma$ -квантов;
- $\gamma$ -семейства с  $\Sigma E_\gamma \geq 100$  ТэВ ( $E_\gamma \geq 4$  ТэВ) и  $\gamma$ -кванты с расстоянием до энергетически взвешенного центра тяжести  $\gamma$ -семейства  $R \leq 15$  см.

В использованном в расчете гало алгоритме “шахматная доска” применены функции пространственного распределения (ФПР)  $\gamma$ -квантов в Рb, которые были рассчитаны для конфигурации РЭК ПАМИР. ФПР алгоритма “шахматная доска” учитывают расстояние  $\gamma$ -квантов до оси ШАЛ ( $R$ ), глубину развития каскада в Рb, энергию  $\gamma$ -квантов и вероятность того, что первое взаимодействие происходит в глубине РЭК. ФПР согласованы друг с другом в осевом приближении и приближении больших  $R$  и учитывают эффект Ландау–Померанчука–Мигдала.

Условия отбора  $\gamma$ -семейств с гало в РЭК ПАМИР и для расчетов по модели МС0:

- $\Sigma E_\gamma \geq 500$  ТэВ;
- площадь гало  $S_{D=0.5}$  внутри изоденсы с оптической плотностью  $D = 0.5$   $S_{D=0.5} \geq 4$  мм<sup>2</sup> – для гало с одним центром;

однако в ряде случаев гало может содержать несколько центров; в этом случае гало называется “многоцентровым”, а его суммарная площадь:

$$\Sigma S_{iD=0.5} \geq 4 \text{ мм}^2, \text{ если } S_{iD=0.5} \geq 1 \text{ мм}^2.$$

В  $\gamma$ -семействах с  $\Sigma E_\gamma \geq 500$  ТэВ ( $E_\gamma \geq 4$  ТэВ) каскады от высокоэнергичных  $\gamma$ -квантов в РЭК перекрываются, образуя на рентгенографической пленке области с высокой оптической плотностью. Расчеты по алгоритму “шахматная доска” с применением ФПР позволили получить гало, аналогичные экспериментальным. На рис. 2 представлены экспериментальное гало “ФИАНИТ” (слева) и расчетное гало, образованное первичным  $p$  ( $E_p = 420$  ПэВ) (справа) с площадями,  $S_{\text{halo}}$ , 1020 мм<sup>2</sup> и 2100 мм<sup>2</sup>, соответственно. Как следует из рис. 2, механизм образования  $\gamma$ -семейств с гало хорошо описывается в рамках стандартной модели ядерных взаимодействий.

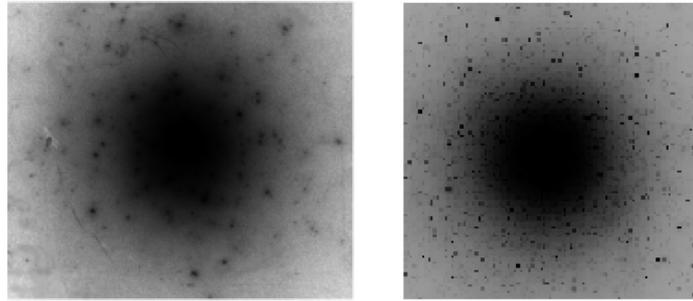


Рис. 2: Скан гало “ФИАНИТ” (оценка  $E_0$  по энерговыделению в РЭК  $\sim 400$  ПэВ,  $S_{\text{halo}} = 1020$  мм<sup>2</sup>) (слева); расчетное гало, образованное первичным  $p$  ( $E_p = 420$  ПэВ,  $S_{\text{halo}} = 2100$  мм<sup>2</sup>) (справа).

Расчеты показали, что регистрируемые в РЭК  $\gamma$ -семейства без гало с  $\Sigma E_\gamma = 100$ –400 ТэВ ( $E_\gamma \geq 4$  ТэВ) в основном образованы первичными  $p$  с  $E_0 = 1$ –10 ПэВ, в то время как  $\gamma$ -семейства с гало с  $\Sigma E_\gamma \geq 500$  ТэВ ( $E_\gamma \geq 4$  ТэВ) в основном образованы первичными  $p$ +He с  $E_0 \geq 10$  ПэВ. Наблюдаемое в РЭК ПАМИР большое количество  $\gamma$ -семейств с гало указывает на значительную долю  $p$ +He в спектре ПКЛ вплоть до  $E_0 \sim 100$  ПэВ.

Таким образом, гало, наблюдаемые в РЭК, в основном образованы  $p$ +He ( $\geq 90\%$ ), механизм образования гало описывается в рамках стандартной модели ядерных взаимодействий, что позволяет использовать  $\gamma$ -семейства с гало для оценки доли  $p$ +He в ПКЛ.

*Вероятности образования  $\gamma$ -семейств с гало ядрами ПКЛ.* Массовый состав ПКЛ в расчетах по МС0 представлен в табл. 1. Расчеты показали, что 83% всех  $\gamma$ -семейств с гало образованы первичными  $p$ , 13% – ядрами He, и  $\leq 4\%$  – тяжелыми ядрами (рис. 3). Данные расчеты позволяют получить оценку доли  $p$ +He в массовом составе ПКЛ в диапазоне  $E_0 = 1$ –100 ПэВ.

Т а б л и ц а 1

Массовый состав ПКЛ в расчетах по модели МС0

$E$ , ПэВ	1	10	100
$p$ , %	33	26	20
He, %	22	17	15

Расчеты по МС0 показывают, что в случае, когда ПКЛ состоят только из  $p$ , вместо 61 гало, зарегистрированных в РЭК ПАМИР, количество наблюдаемых гало должно быть 140, а в случаях чистого He и тяжелых ядер 34 и 5, соответственно. Из сказанного следует, что, с учетом ошибки ( $61 \pm 8$  экспериментально зарегистрированных гало), доля  $p$ +He и ядер  $> He$  в массовом составе ПКЛ при  $E_0 = 10$  ПэВ должна быть  $\geq 33\%$ .

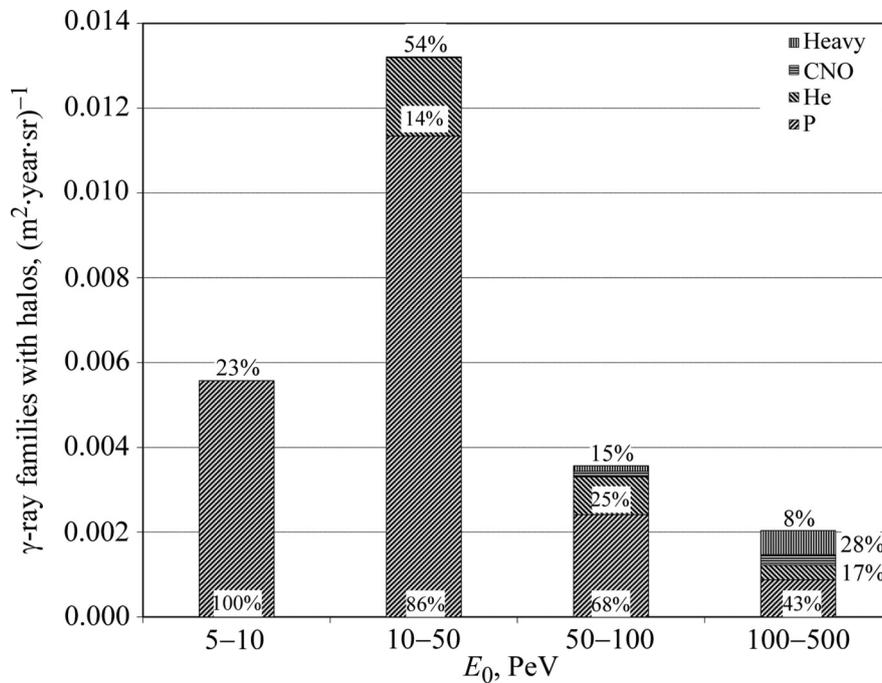


Рис. 3: Зависимость потока  $\gamma$ -семейств с гало от энергии и относительные доли ядер ПКЛ, образующих данные семейства.

Доля  $\gamma$ -семейств с многоцентровыми гало. В ряде случаев гало состоит из нескольких центров. Доля многоцентровых гало – параметр, сильно зависящий от типа ядра ПКЛ (табл. 2), т.е. многоцентровость – параметр, чувствительный к доле  $p$ +He в ПКЛ.

Из табл. 2 следует, что  $\gamma$ -семейства с гало в основном образуют первичные  $p$  с возможно небольшой долей He. Данный вывод подтверждают вероятности образования  $\gamma$ -семейств с гало от ядер ПКЛ с  $E_0 \geq 5$  ПэВ (табл. 3).

Т а б л и ц а 2

Доля  $\gamma$ -семейств с многоцентровыми гало, образованными различными ядрами

p	He	C	Fe	МСO	ПАМИР
0.25	0.45	0.59	0.70	0.28	0.23
$\pm 0.03$	$\pm 0.09$	$\pm 0.11$	$\pm 0.03$	$\pm 0.03$	$\pm 0.07$

Т а б л и ц а 3

Вероятности образования гало

p	He	> He
1.76%	0.44%	0.13%

Расчеты показывают (табл. 3), что при  $E_0 \geq 5$  ПэВ эффективность образования  $\gamma$ -семейств с гало первичными  $p$  в четыре раза выше, чем ядрами He. Данное обстоятельство объясняет преимущественную регистрацию в РЭК  $\gamma$ -семейств с гало, образованных  $p$ .

Возраст ШАЛ для оценки массового состава ПКЛ. По данным эксперимента АДРОН [4], проведенного на Тянь-Шане на высоте 3330 м н.у.м. ( $695 \text{ г/см}^2$ ), проанализировано  $\sim 800000$  ШАЛ и установлена тенденция массового состава ПКЛ становиться более тяжелым с ростом  $E_0$  – от  $p$  к тяжелым ядрам в диапазоне  $E_0 = 1\text{--}100$  ПэВ (рис. 4).

Горизонтальное развитие ШАЛ определено с применением NKG-функции:

$$\rho(N_e, r, S) = C(S)N_e \cdot (r/r_0)^{S-2}(1 + r/r_0)^{S-4.5},$$

где  $\rho$  – плотность  $e^\pm$  на расстоянии  $r$  от оси ШАЛ,  $N_e$  – количество  $e^\pm$  в ШАЛ,  $S$  – возраст ШАЛ на уровне наблюдения,  $r_0$  – радиус Мольера. Параметр  $S$  характеризует крутизну спада ФПР.

Результаты расчета зависимости среднего значения возраста ШАЛ,  $\langle S \rangle$ , от  $N_e$  (количество заряженных частиц) для уровня эксперимента АДРОН в сравнении с экспериментальными данными ШАЛ+РЭК (АДРОН) и ШАЛ (KASCADE, Karlsruhe), для которого проанализировано 1 млн. событий, представлены на рис. 4. Данные ШАЛ (KASCADE, Karlsruhe) приведены к уровню эксперимента АДРОН в предположении линейной зависимости  $S(N_e)$ . Расчетные для АДРОН границы значений  $S$  для  $p$ , He, C и Fe показаны на рис. 4 пунктирными линиями: с ростом  $E_0$  максимум развития ШАЛ смещается в глубь атмосферы, и  $S$  уменьшается.

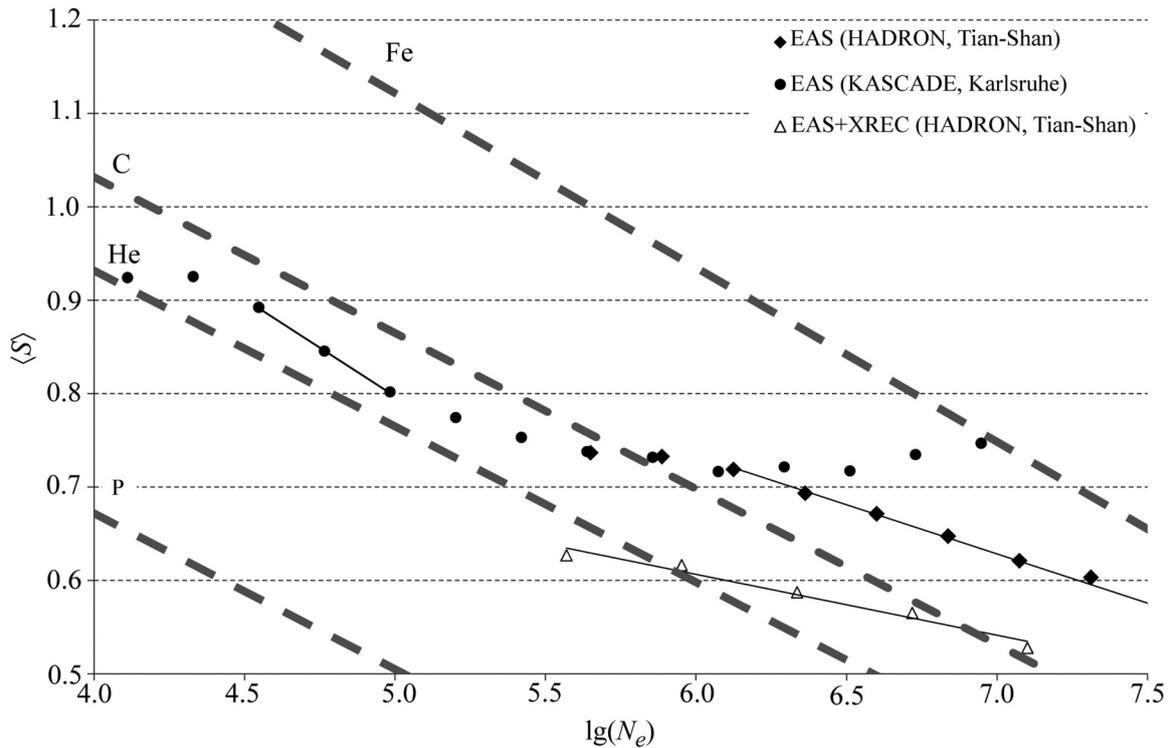


Рис. 4: Зависимость возраста  $S$  ПЧЛ от  $N_e$ . Зависимость для ПЧЛ, образованных первичными  $p$ ,  $C$ ,  $He$  и  $Fe$  (расчет по МСО для АДРОН), пунктирные линии; данные АДРОН [4, 7] (ромбики и полые треугольники), KASCADE [8] (залитые кружки).

Утяжеление среднего массового состава ПЧЛ в диапазоне энергий  $E_0 = 5\text{--}50$  ПэВ соответствует данным АДРОН. Однако в соответствии с данными АДРОН массовый состав ПЧЛ остается смешанным со значительной долей  $p+He$  до  $E_0 = 50$  ПэВ, в то время как данные KASCADE показывают, что при  $E_0 = 50$  ПэВ средний возраст ПЧЛ соответствует преобладающей доле  $Fe$  в массовом составе ПЧЛ.

Анализ параметра  $S$ , полученный на основании данных АДРОН, показывает, что массовый состав ПЧЛ остается смешанным до  $E_0 = 100$  ПэВ.

Доля  $p+He$  в соответствии с экспериментальными данными ARGONIE, CREAM и РЭК ПАМИР. Доля  $p+He$  в зависимости от  $E_0$  в соответствии с данными экспериментов ARGONIE, CREAM и РЭК ПАМИР представлены на рис. 5.

В соответствии с данными ARGONIE доля  $p+He$  измерена до  $E_0 \sim 3$  ПэВ и начинает быстро уменьшаться при  $E_0 \sim 1$  ПэВ. Доля  $p+He$  представлена на рис. 5 сплошной линией [6]. В то же время в соответствии с данными РЭК ПАМИР доля  $p+He$  при тех же  $E_0$  существенна и не может быть меньше 33%.

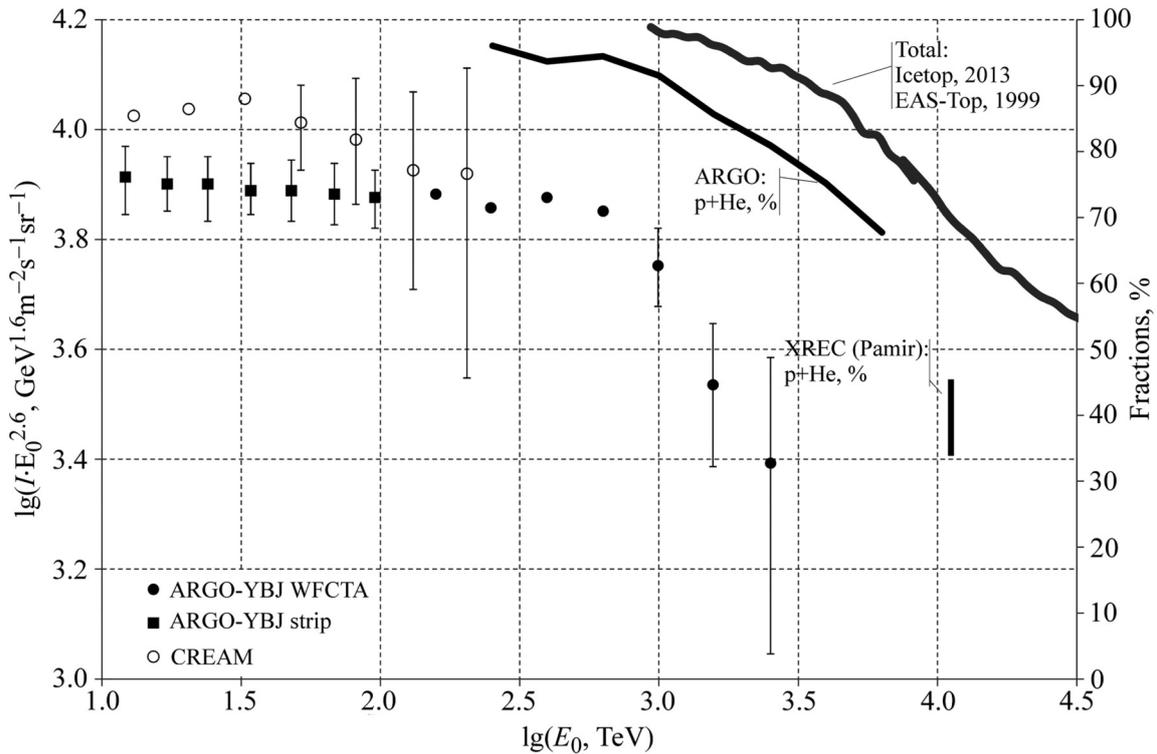


Рис. 5: Зависимости потока  $p+He$  от  $E_0$  по данным экспериментов ARGO и CREAM в соответствии с [5] (левая ось) и доли  $p+He$  от  $E_0$  по данным ARGO [6] и РЭК ПАМИР (черная линия, правая ось).

Аналогичные результаты следуют из анализа возраста ШАЛ в соответствии с данными АДРОН. Массовый состав ПКЛ остается смешанным с тенденцией к утяжелению при  $E_0 = 1-100$  ПэВ.

*Выводы.* Выполненные расчеты объяснили природу  $\gamma$ -семейств с гало в рамках стандартной модели ядерных взаимодействий, которая дает хорошее описание экспериментальных данных РЭК ПАМИР:

1. Явление гало в  $\gamma$ -семействах не является экзотическим событием, но представляет собой перекрытие отдельных пятен потемнения на рентгенографической пленке;
2. Оценка доли  $p+He$  в массовом составе ПКЛ при  $E_0 = 10$  ПэВ, основанная на сравнении экспериментально определенного количества  $\gamma$ -семейств с гало и известных вероятностей образования гало первичными  $p$  и  $He$ , соответствует  $\geq 33\%$ ;
3. При  $E_0 = 1-100$  ПэВ массовый состав ПКЛ остается смешанным с тенденцией к утяжелению.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] R. A. Mukhamedshin, Eur. Phys. J. C **60**, 345 (2009); DOI: 10.1140/epjc/s10052-009-0945-y.
- [2] В. С. Пучков, А. С. Борисов, А. С. Гусев и др., Известия Российской академии наук. Сер. Физическая **75**(3), 421 (2011).
- [3] A. S. Borisov, Z. M. Guseva, V. G. Denisova, et al., EPJ Web of Conferences **52**, 04007 (2013). DOI: 10.1051/epjconf/20125204007.
- [4] S. P. Bessharov, K. V. Cherdintseva, A. P. Chubenko, et al., Nuclear Physics B- Proceedings Supplements **196**, 118 (2009). DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2009.09.021.
- [5] I. De Mitri on behalf of the ARGO-YBJ collaboration. EPJ Web of Conferences **99**, 08003 (2015). DOI: 10.1051/epjconf/20159908003.
- [6] S. S. Zhang and Z. Cao for the LHAASO and ARGO-YBJ Collaboration. in: Proc. of the 34 th International Cosmic Ray Conference, Hague, Netherlands, 2015 PoS(ICRC2015) **261**. URL: <http://pos.sissa.it/236/261/pdf>.
- [7] В. С. Асейкин, Н. Г. Вильданов и др., Препринт ФИАН № 178 (М., ФИАН, 1981).
- [8] Проект KCDC (KASCADE Cosmic Ray Data Centre). URL: <https://kcdc.ikp.kit.edu>.

Поступила в редакцию 29 декабря 2016 г.