

УДК 524.1

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРОВ ЭВОЛЮЦИОНИРУЮЩИХ ПРОСТРАНСТВЕННО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

© 2021 г. В. Н. Зиракашвили<sup>1, \*</sup>, В. С. Птускин<sup>1</sup>, С. И. Роговая<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова  
Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: zirak@izmiran.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 28.12.2020 г.

Исследовано влияние космологической эволюции и пространственного распределения источников на решение обратной задачи об определении спектров источников космических лучей сверхвысоких энергий. Решение учитывает распространение и потери энергии протонов и ядер в расширяющейся Вселенной. Установлено, что активные галактические ядра являются наиболее вероятными источниками космических лучей сверхвысоких энергий.

DOI: 10.31857/S0367676521040426

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема происхождения космических лучей с энергиями  $E > 10^{18}$  эВ остается важной нерешенной задачей астрофизики космических лучей. Список потенциальных источников, которые в принципе могли бы дать наблюдаемые космические лучи, включает активные галактические ядра, источники гамма-всплесков, магнетары, взаимодействующие галактики, ударные волны, сопровождающие формирование крупномасштабных космологических структур и другие (см. обзор [1]).

Как правило, определение энергетического спектра внегалактических источников производится методом проб и ошибок, когда рассчитываются ожидаемые у Земли интенсивность и состав космических лучей при сделанных предположениях о спектре и составе источников, которые корректируются на основе сравнения с наблюдениями и расчет повторяется. Таким образом, расчет производится от источника к наблюдателю. При этом обычно предполагается, что спектр источника имеет степенной вид по магнитной жесткости ускоренных частиц.

В наших предыдущих работах [2–4] мы показали, как можно обратиться процедуру расчета и вычислить энергетические спектры источников, исходя из наблюдаемого спектра космических лучей и не вводя каких-либо предположений о форме спектра в источниках.

Настоящая работа предполагает использование данного подхода для источников с различной космологической эволюцией. Рассматривается сложный химический состав в источниках и предполагается, что форма спектра отдельных ядер описывается одной функцией магнитной жесткости частиц  $q(E/Z)$ , где  $E$  – энергия частицы,  $Z$  – зарядовое число.

### ТИПЫ ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Пространственная плотность источников отдельных ядер с массовым числом  $A$  задавалась в виде  $Q(z)k(A)q(E/Z)$ , где  $z$  – красное смещение, коэффициенты  $k(A)$  описывают химический состав источников, а функция  $Q(z)$  описывает их космологическую эволюцию.

Мы рассмотрели три типа источников с различной космологической эволюцией: 1) равномерно распределенные неэволюционирующие источники с пространственной плотностью  $Q \propto (1+z)^m$ ,  $m = 0$ ; 2) активные галактические ядра с законом эволюции  $Q \propto (1+z)^4$ ,  $z < 0.7$ ,  $Q = \text{const}$ ,  $z > 0.7$  [5]; 3) лацертиды с законом эволюции [5]

$$Q \propto \frac{(z + 0.000283)^{0.85}}{(z + 0.7662)^6} \exp\left(-\frac{z}{10.0}\right). \quad (1)$$

Использовалась следующая аналитическая аппроксимация наблюдаемого спектра в эксперименте Auger [6]

$$J(E) \propto E^{-3.23}, \quad E < E_{ankle}, \quad J(E) \propto E^{-2.63} \times \left(1 + \exp\left(\frac{\lg(E/E_{1/2})}{0.15}\right)\right)^{-1} \exp(-E^4/E_c^4), \quad (2)$$

$$E > E_{ankle}.$$

Здесь  $E_{ankle} = 5 \cdot 10^{18}$  эВ,  $E_{1/2} = 10^{19.63}$  эВ,  $E_c = 2.0 \cdot 10^{20}$  эВ.

Подробное изложение метода решения обратной задачи можно найти в наших работах [3, 4].

Химический состав источников (т.е. коэффициенты  $k(A)$ ) подбирался так, чтобы минимизировать сумму квадратов относительных отклоне-

**Таблица 1.** Химический состав космических лучей в источниках (в процентах)

	H	He	CNO	Si	Fe
AGN	21	54	21	3	0.2
Lac	61	24	4	10	0.6
$m = 0$	48	48	1	3	0.5

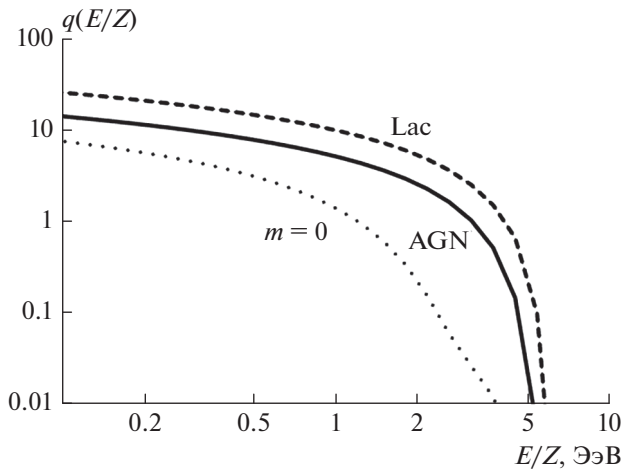
ний от наблюдаемого спектра, среднего логарифма и его дисперсии.

Химический состав, найденный для трех типов источников, приводится в табл. 1. На рис. 1 показаны вычисленные спектры в источниках. На рис. 2а и 2б вычисленные средний логарифм массового числа  $A$  и его дисперсия сравниваются с результатами Auger [7]. Наилучшее согласие с наблюдениями достигается для активных галактических ядер. Спектры отдельных ядер для этого случая показаны на рис. 2в.

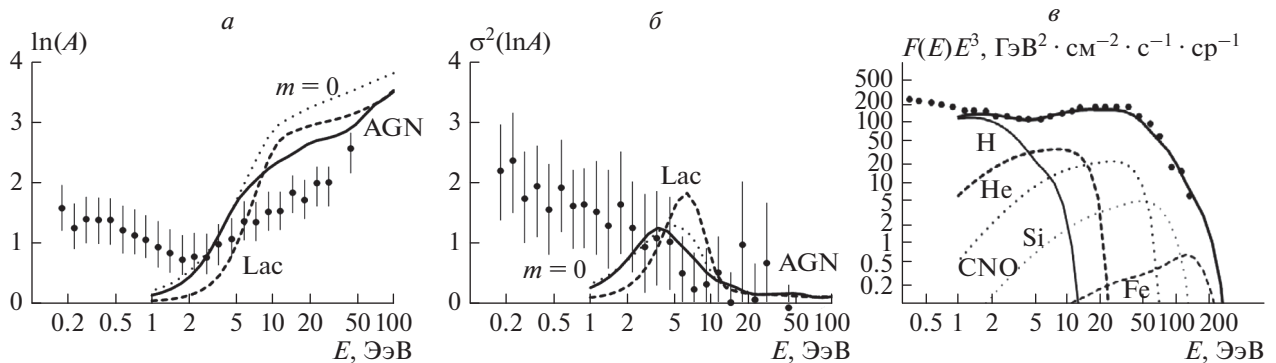
### ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе обратная задача о распространении космических лучей сверхвысоких энергий решена для различных типов потенциальных внегалактических источников. Полученные спектры источников очень жесткие с показателем меньше 1 и обрезанием при энергии порядка  $4 \cdot 10^{18} Z$  эВ. Источники КЛ сверхвысоких энергий должны быть сильно обогащены ядрами для того, чтобы объяснить средний логарифм, измеренный Auger. Ядер гелия должно быть на порядок больше, чем при солнечном химическом составе. Наши результаты находятся в качественном согласии с результатами решения прямой задачи [8].

Согласно нашим результатам, наиболее вероятными источниками космических лучей сверх-



**Рис. 1.** Вычисленные спектры источников в произвольных единицах. Показаны результаты для активных галактических ядер (AGN), лацертид (Lac) и неэволюционирующих источников ( $m = 0$ ).



**Рис. 2.** Сравнение наблюдаемого среднего логарифма  $A$  [7] (а) и дисперсии логарифма  $A$  [7] (б) с вычисленными. Показаны результаты для активных галактических ядер (AGN), лацертид (Lac) и неэволюционирующих источников ( $m = 0$ ). Спектры всех частиц (сплошная кривая) и отдельных ядер, вычисленные для активных галактических ядер (в). Также показаны экспериментальные данные Auger [6] (кружки).

высоких энергий являются активные галактические ядра.

Работа была частично поддержана РФФИ (проект № 19-02-00043).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Batista R.A., Biteau J., Busramante M. et al.* // *Front. Astron. Space Sci.* 2019. V. 6. P. 23.
2. *Ptuskin V.S., Rogovaya S.I., Zirakashvili V.N.* // *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 2015. V. 3. P. 54.
3. *Зиракашвили В.Н., Птускин В.С., Роговая С.И., Клепач Е.Г.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2015. Т. 79. № 3. С. 351; *Zirakashvili V.N., Ptuskin V.S., Rogovaya S.I., Klepach E.G.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2015. V. 79. No. 3. P. 319.
4. *Зиракашвили В.Н., Птускин В.С., Роговая С.И., Клепач Е.Г.* // *Изв. вузов. Радиофиз.* 2016. Т. 59. С. 957.
5. *Калашев О.Е.* Космические лучи ультравысоких и сверхвысоких энергий. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Москва: ИЯИ РАН, 2016.
6. *Letesser-Selvon A., Aab A., Abreu P. et al.* // *arXiv: 1310.4620.* 2013.
7. *Bellido J. et al. (Pier Auger Collaboration)* // *arXiv: 1708.06592.* 2017.
8. *Aloisio R., Berezinsky V., Blasi P.* // *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 2014. V. 10. P. 020.

### Determining spectra of spatially distributed evolutionary sources of extragalactic ultra-high energy cosmic rays

V. N. Zirakashvili<sup>a,\*</sup>, V. S. Ptuskin<sup>a</sup>, S. I. Rogovaya<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation, Russian Academy of Sciences, Moscow, 108840 Russia*

\*e-mail: [zirak@izmiran.ru](mailto:zirak@izmiran.ru)

Influence of cosmological evolution of ultra high energy cosmic ray sources on the solution of the inverse problem for source spectra is investigated. The propagation and energy losses of protons and nuclei in the expanding Universe are taken into account. We conclude that active galactic nuclei are the most probable sources of ultra high energy cosmic rays.