

**Решение обратной задачи  
переноса в  
межгалактическом пространстве и  
определение энергетического  
спектра и состава  
внегалактических источников  
частиц сверхвысоких энергий**

В.Н.Зиракашвили, Е.Г.Клепач, В.С.Птускин,  
С.И.Роговая

ИЗМИРАН, 142190 Троицк Москва

# Уравнение переноса для протонов и ядер в расширяющейся Вселенной

$$\begin{aligned}
 & -H(z)(1+z)\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{F(A,\varepsilon,z)}{(1+z)^3}\right) - \\
 & -\frac{\partial}{\partial\varepsilon}\left(\varepsilon\left(\frac{H(z)}{(1+z)^3} + \frac{1}{\tau(A,\varepsilon,z)}\right)F(A,\varepsilon,z)\right) + \nu(A,\varepsilon,z)F(A,\varepsilon,z) \\
 & = \sum_{i=1,2,\dots} \nu(A+i \rightarrow A,\varepsilon,z)F(A+i,\varepsilon,z) + q(A,\varepsilon)(1+z)^m.
 \end{aligned}$$

$$H(z) = H_0((1+z)^3\Omega_m + \Omega_\Lambda)^{1/2}$$

Постоянная Хаббла

$$\varepsilon = E/A \quad \text{Энергия на нуклон}$$

# Решение выражается через функцию Грина

$$F(A, \varepsilon, z = 0) = \sum_{A'} \int d\varepsilon' G(A, \varepsilon; A', \varepsilon') q(A', \varepsilon').$$

$$N(E) = \sum_{A, A'} A^{-1} \int d\varepsilon' G(A, E / A; A', \varepsilon') q(A', \varepsilon').$$

$$q(A, \varepsilon) = k(A) Q(\varepsilon A / Z)$$

Предполагаем, что спектры ядер – функции жесткости

Наблюдаемый спектр всех частиц по полной энергии

$$N_i = \sum_j S_{ij} Q_j, \quad S_{ij} = \sum_{A, A'} \frac{Z(A') k(A')}{A' A} G(A, E_i / A; A', \varepsilon_j Z / A) \Delta \varepsilon_j$$

Решение в дискретном виде

Можно обратить задачу и искать источники по наблюдаемым спектрам

Уравнения для решения некорректной задачи  
находим из минимизации функционала

$$L = \sum_i \left( 1 - \frac{1}{N_i} \sum_j S_{ij} Q_j \right)^2 + \varepsilon_R \sum_j (Q_{j-1} - 2Q_j + Q_{j+1})^2$$

$\varepsilon_R$  - параметр регуляризации

$$\sum_j S_{kj}^R Q_j = N_k^R, \quad N_k^R = \sum_i \frac{1}{N_i} S_{ik},$$

$$S_{kj}^R = \sum_i \frac{1}{N_i^2} S_{ik} S_{ij} + \varepsilon_R (6\delta_{kj} - 4\delta_{k,j-1} - 4\delta_{k,j+1} + \delta_{k,j-2} + \delta_{k,j+2})$$

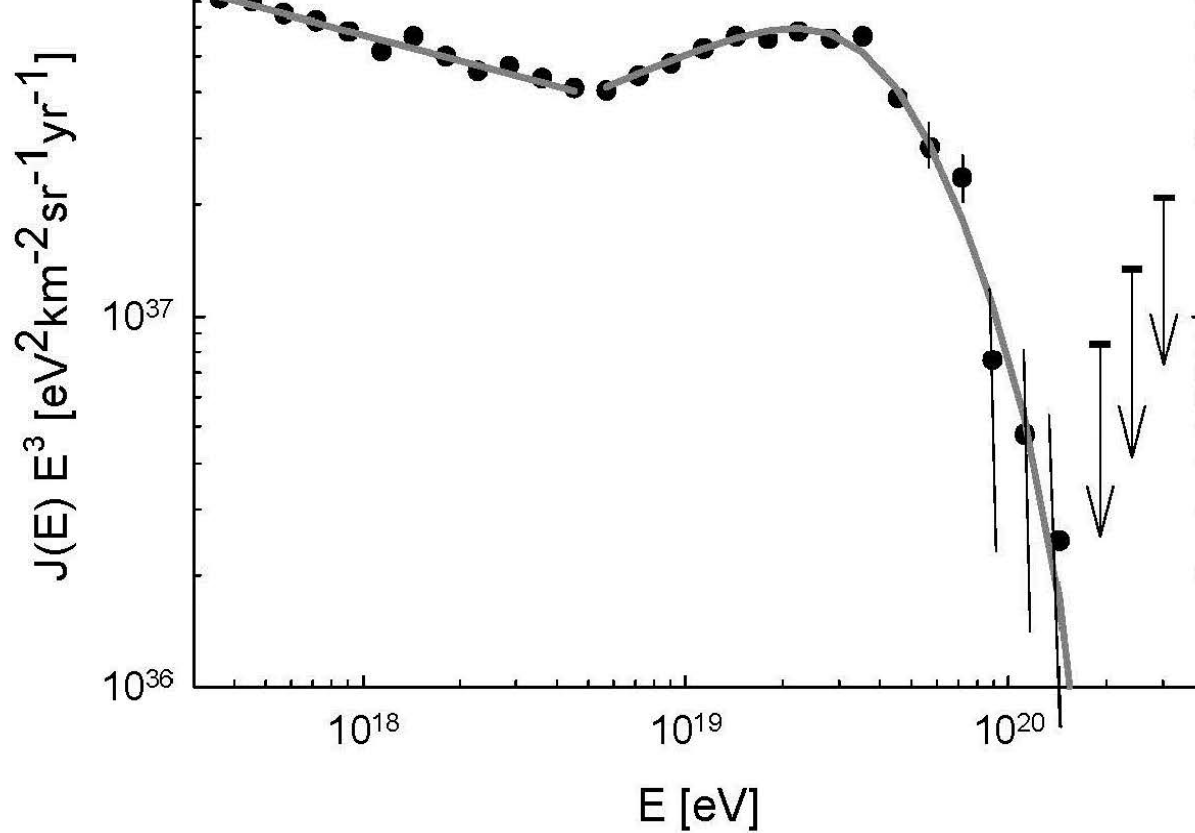


РИС. 1

**Аналитическое  
приближение  
спектров Auger**

$$E_{ankle} = 5 \cdot 10^{18} \text{ eV}, E_{1/2} = 10^{19.63} \text{ eV}, E_c = 1.5 \cdot 10^{20} \text{ eV}$$

$$J(E) \propto E^{-3.23}, E < E_{ankle};$$

$$J(E) \propto E^{-2.63} \left( 1 + \exp\left(\frac{\log(E / E_{1/2})}{0.15}\right) \right)^{-1} \exp(-E^4 / E_c^4), E > E_{ankle}$$

# Состав космических лучей в источниках. *k(A)*. Таблица 1.

	1 Н	4 He	12 C	16 O	24 Mg	28Si	56Fe
Сплошная	1	0.2	0.03	0.03	0.015	0.004	0.004
пунктир	1	6	0.65	0.2	0.096	0.12	0.015

Внегалактические источники согласно Блази и др.

Модифицированный состав внегалактических источников

Рис. 2. Рассчитанные для состава в источниках, приведенного во второй строке Таблицы 1, спектры космических лучей у Земли после распространения в межгалактической среде: толстая сплошная черная линия – суммарный спектр всех типов ядер, тонкая сплошная линия – спектр протонов, линия с длинными штрихами – спектр ядер гелия, линия с короткими штрихами – суммарный спектр ядер углерода и кислорода, пунктирная линия – суммарный спектр ядер магния и кремния, штрих-пунктирная линия – спектр ядер железа. Наблюдаемый у Земли спектр – толстая сплошная серая линия. Величина приведена в единицах  $10^{40} \text{эВ}^2 \text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$

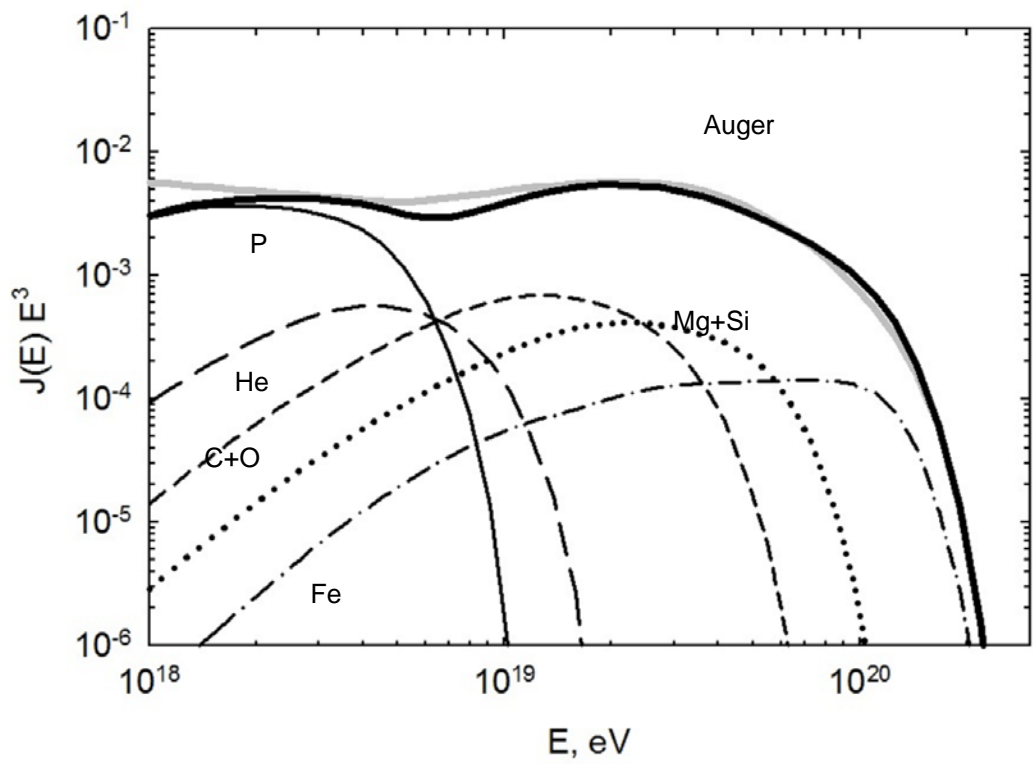


Рис3. Рассчитанные для состава в источниках, приведенного в 3-ей строке Таблицы 1, спектры космических лучей у Земли после распространения в межгалактической среде: толстая сплошная черная линия – суммарный спектр всех типов ядер, тонкая сплошная линия – спектр протонов, линия с длинными штрихами - спектр ядер гелия, линия с короткими штрихами – суммарный спектр ядер углерода и кислорода, пунктирная линия – суммарный спектр ядер магния и кремния, штрих-пунктирная линия – спектр ядер железа. Наблюдаемый у Земли спектр– толстая сплошная серая линия. Величина приведена в единицах  $1040 \text{ эВ}^2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ .

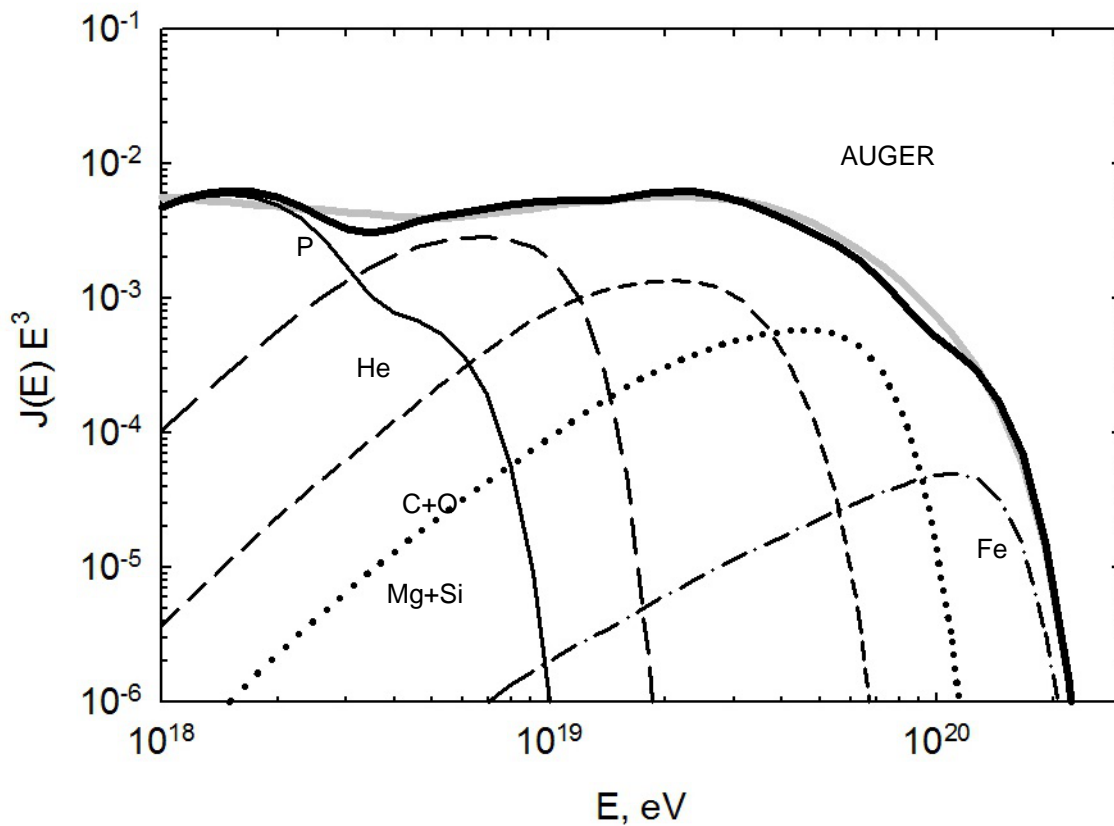
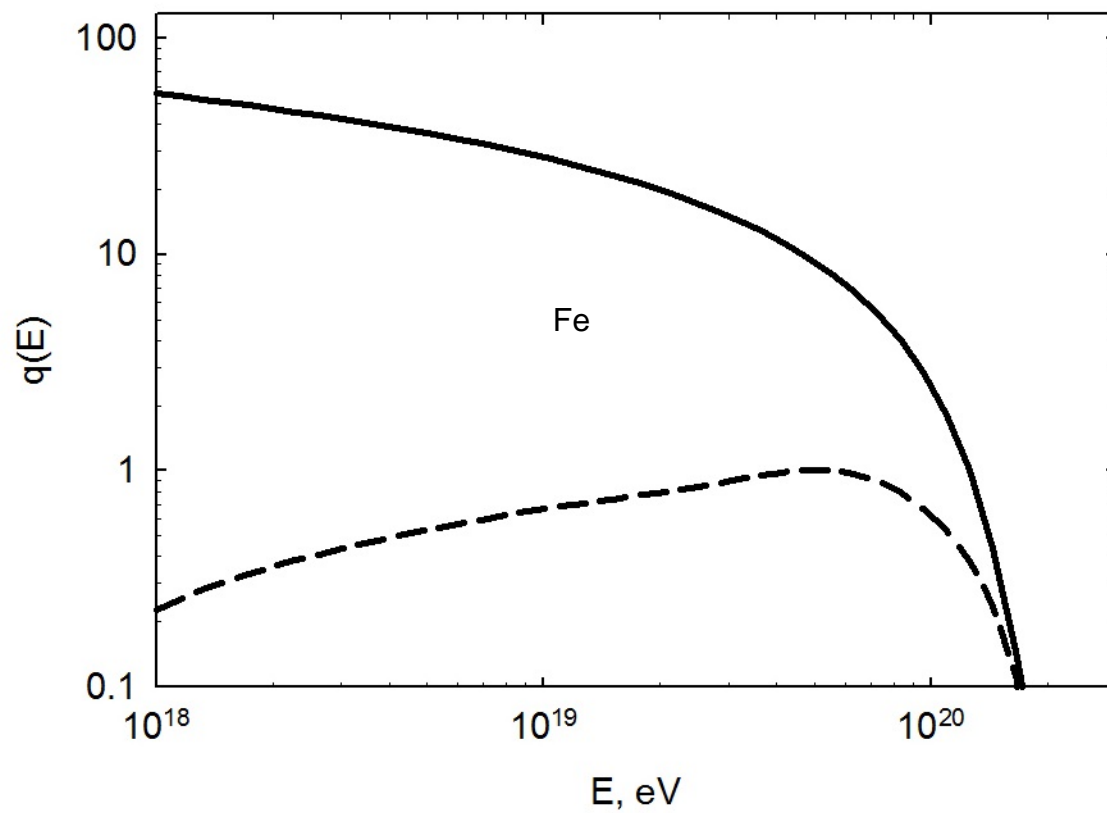
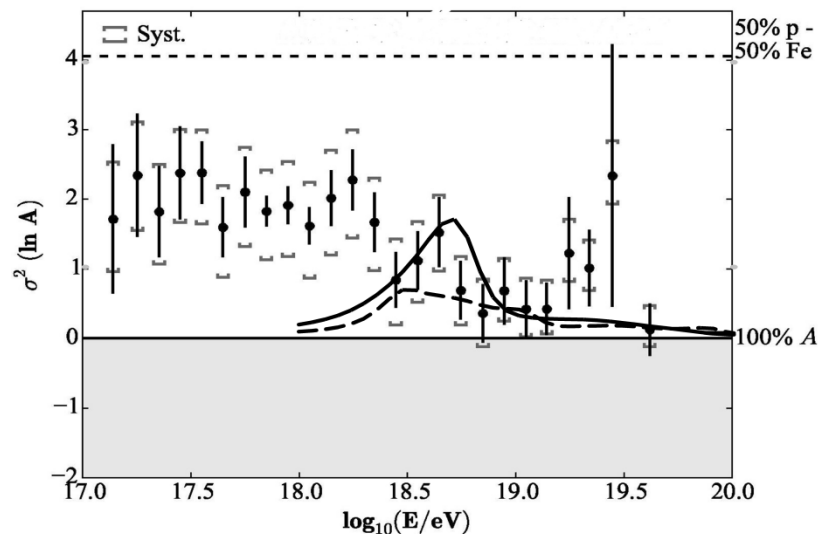
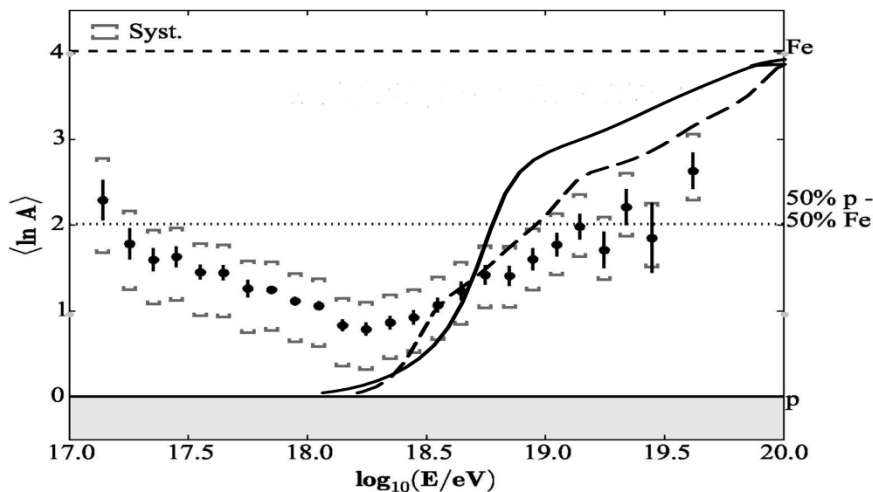






Рис. 4. Рассчитанные спектры ядер железа в относительных единицах во внегалактических источниках для состава ядер указанных во второй (сплошная линия) и третьей (штриховая линия) строках Таблицы 1.





**Рис. 5. Средний логарифм массового числа, определенный по данным эксперимента Auger [19] в рамках модели взаимодействий EPOS-LHC и результаты нашего расчета для внегалактических источников космических лучей для составов ядер, указанных во второй (сплошная линия) и третьей (штриховая линия) строках Таблицы 1.**

**Рис. 6. Квадрат дисперсии логарифма массового числа, в тех же обозначениях, что на Рис. 5.**

# Выводы

- Возможна постановка обратной задачи об определении спектров метагалактических источников КЛ по наблюдаемым спектрам.
- Для объяснения среднего наблюдаемого логарифма необходим очень «тяжелый» химический состав источников. Кроме того, спектры источников очень жесткие с показателем меньше 1 и энергией обрезания  $E_{\max} = 4 \cdot 10^{18} \text{ Z эВ}$ .