

# Определение спектров внегалактических источников космических лучей сверхвысоких энергий

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

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

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

$$N(A, E, z = 0) = A^{-1} \sum_{A'} \int d\varepsilon' G(A, E/A; A', \varepsilon') q(A', \varepsilon')$$

$\sum_A N(A, E, z = 0)$  Наблюдаемый спектр всех частиц по полной энергии

$$N_i(A, z = 0) = A^{-1} \sum_{j, A'} (\Delta\varepsilon)_j G_{ij}(A; A') q_j(A')$$

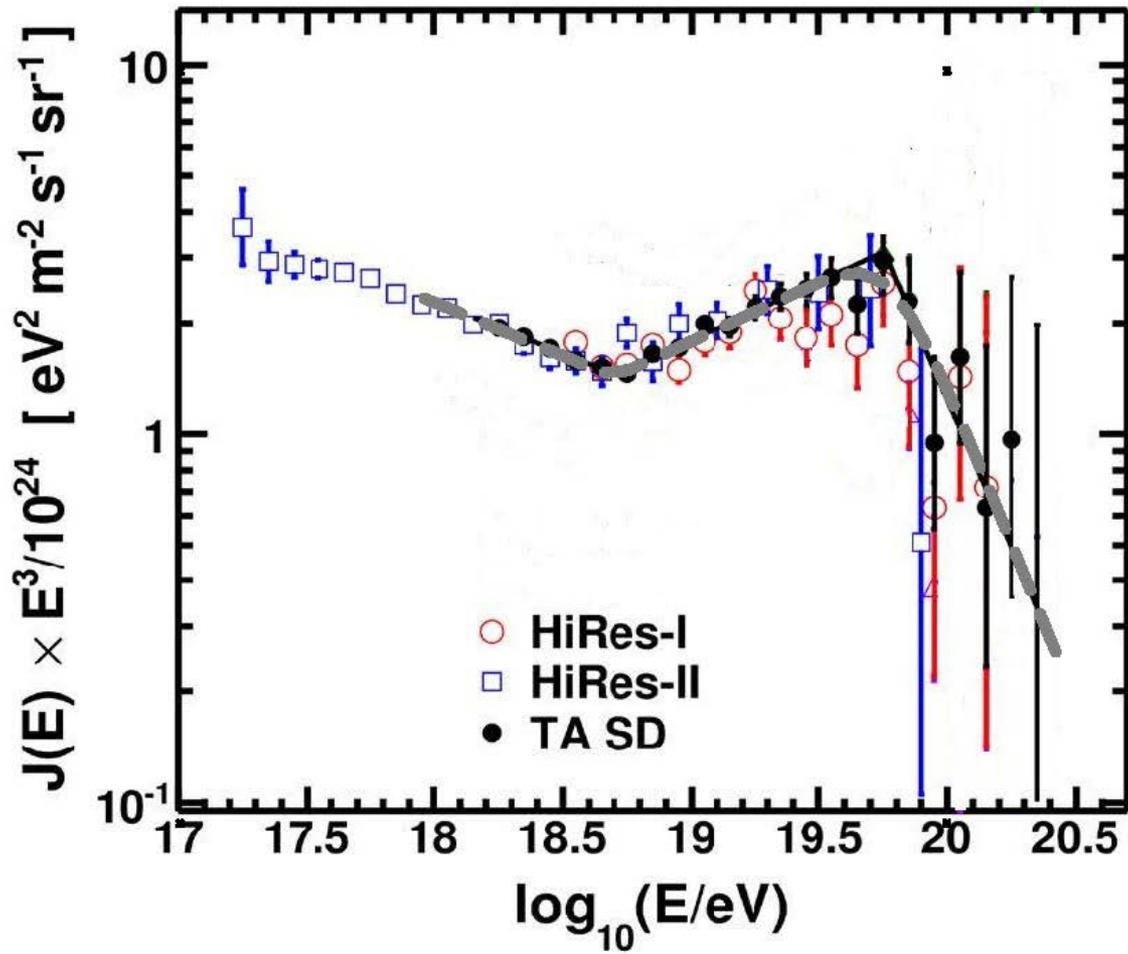
Решение в дискретном виде

Можно обратить задачу и искать источники по наблюдаемым спектрам

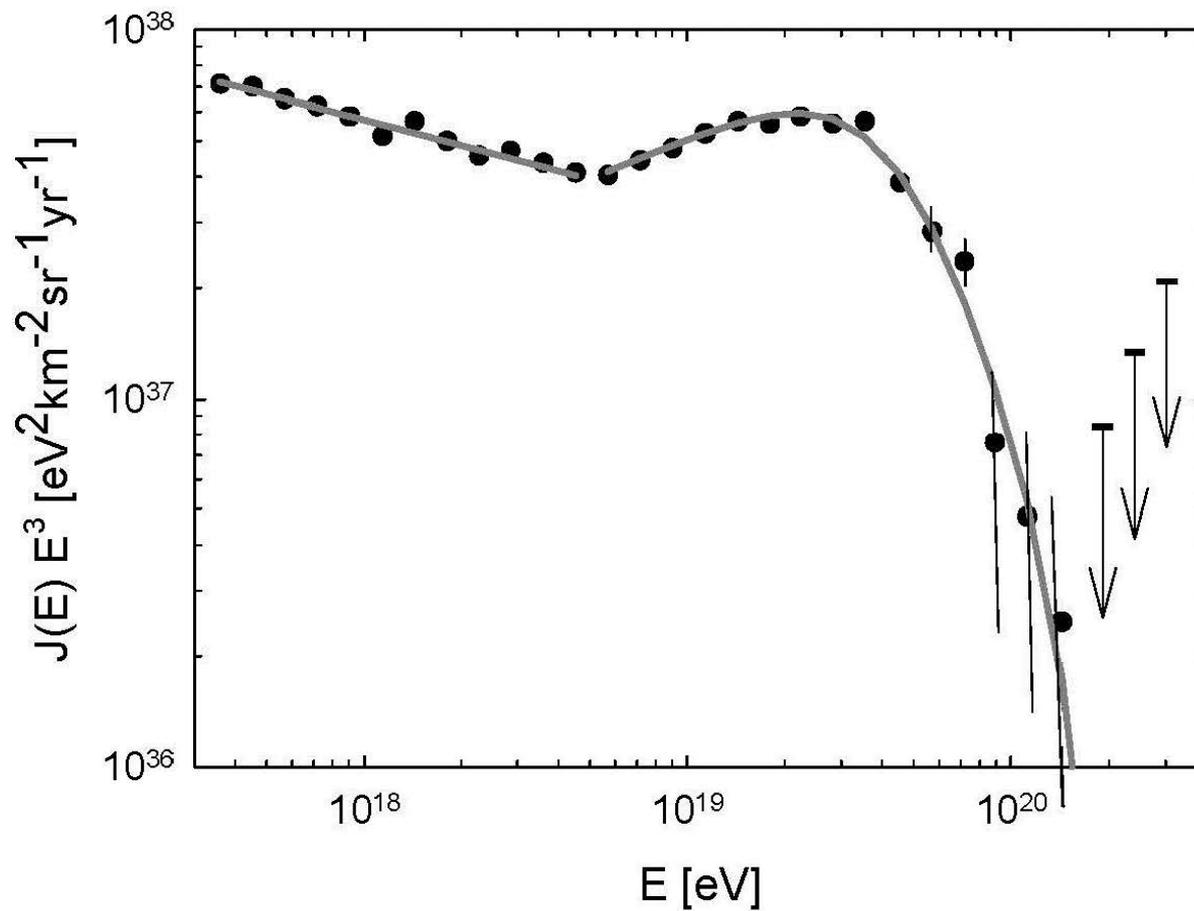
Если известен только спектр всех частиц  
и источник содержит только ядра одного

сорта  $A = A_s$

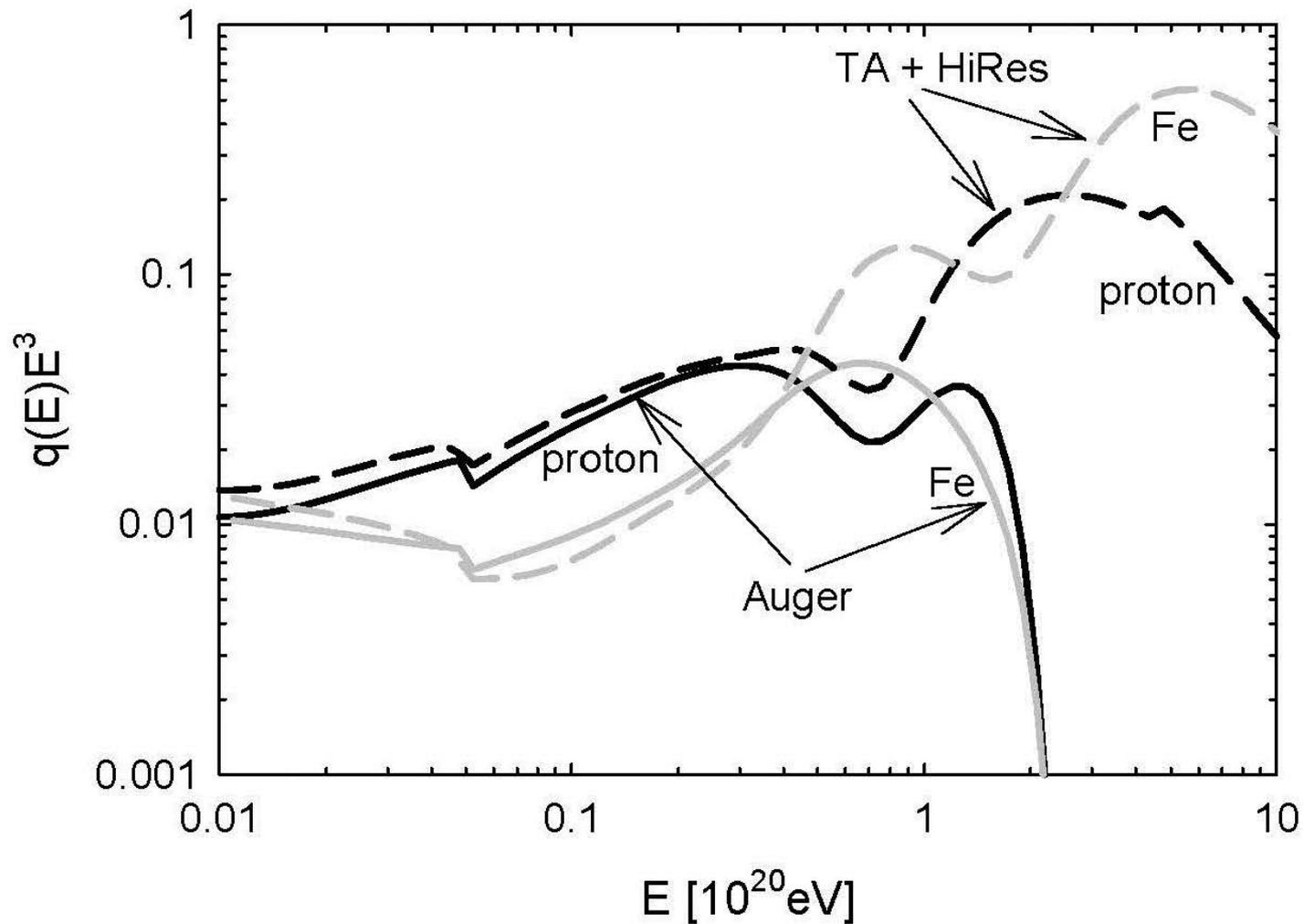
$$q_j(A_s) = \sum_i \left( \sum_A A^{-1} (\Delta\varepsilon)_j G_{ij}(A, A_s) \right)^{-1} \times \sum_A N_i(A, z = 0)$$



Аналитическое приближение спектров  
TA+HiRes

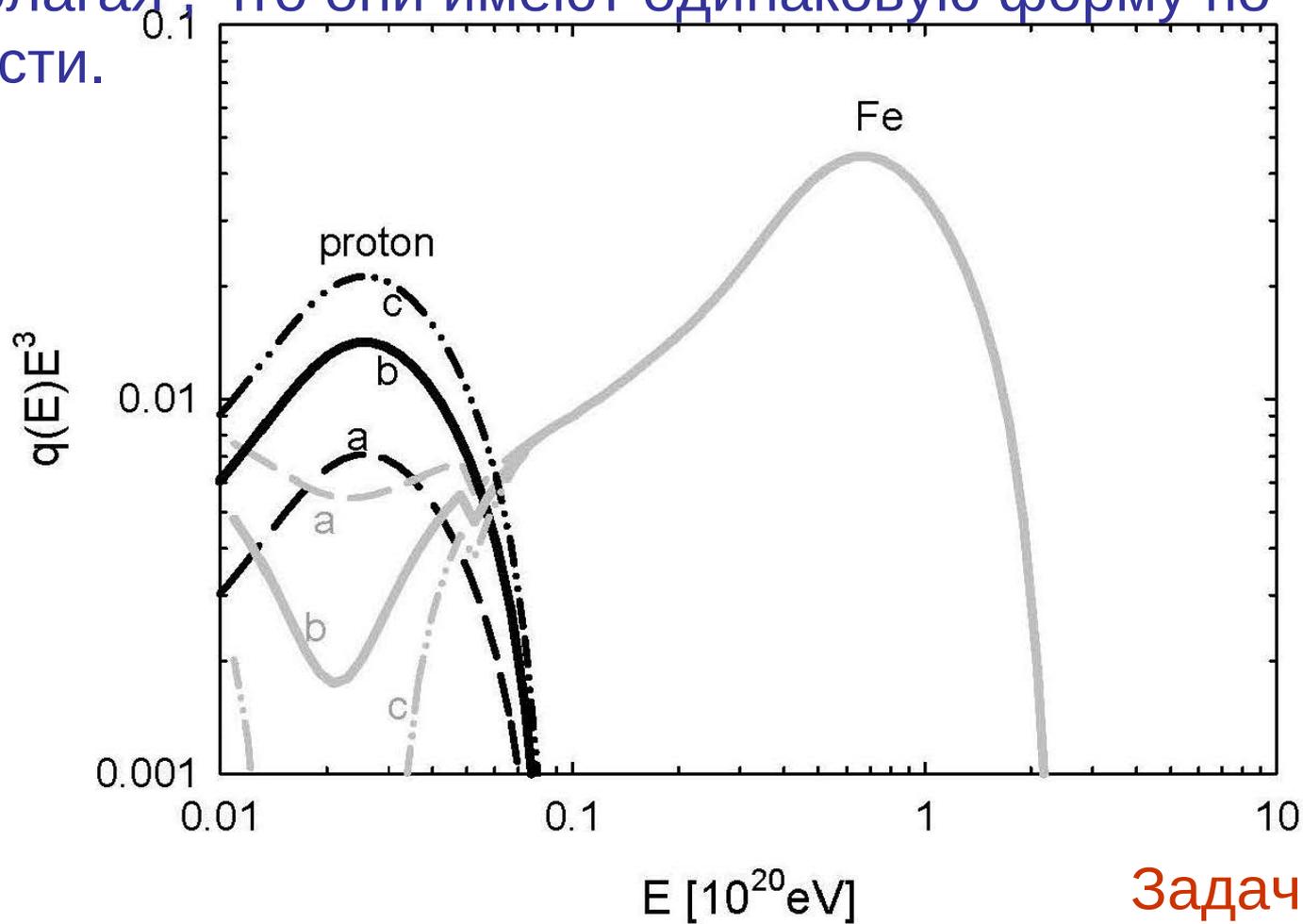


**Аналитическое приближение спектров Auger**



**Спектры источников, полученные если в источниках присутствуют только ядра железа или протоны**

Спектры источников разных ядер можно также найти предполагая, что они имеют одинаковую форму по жесткости.

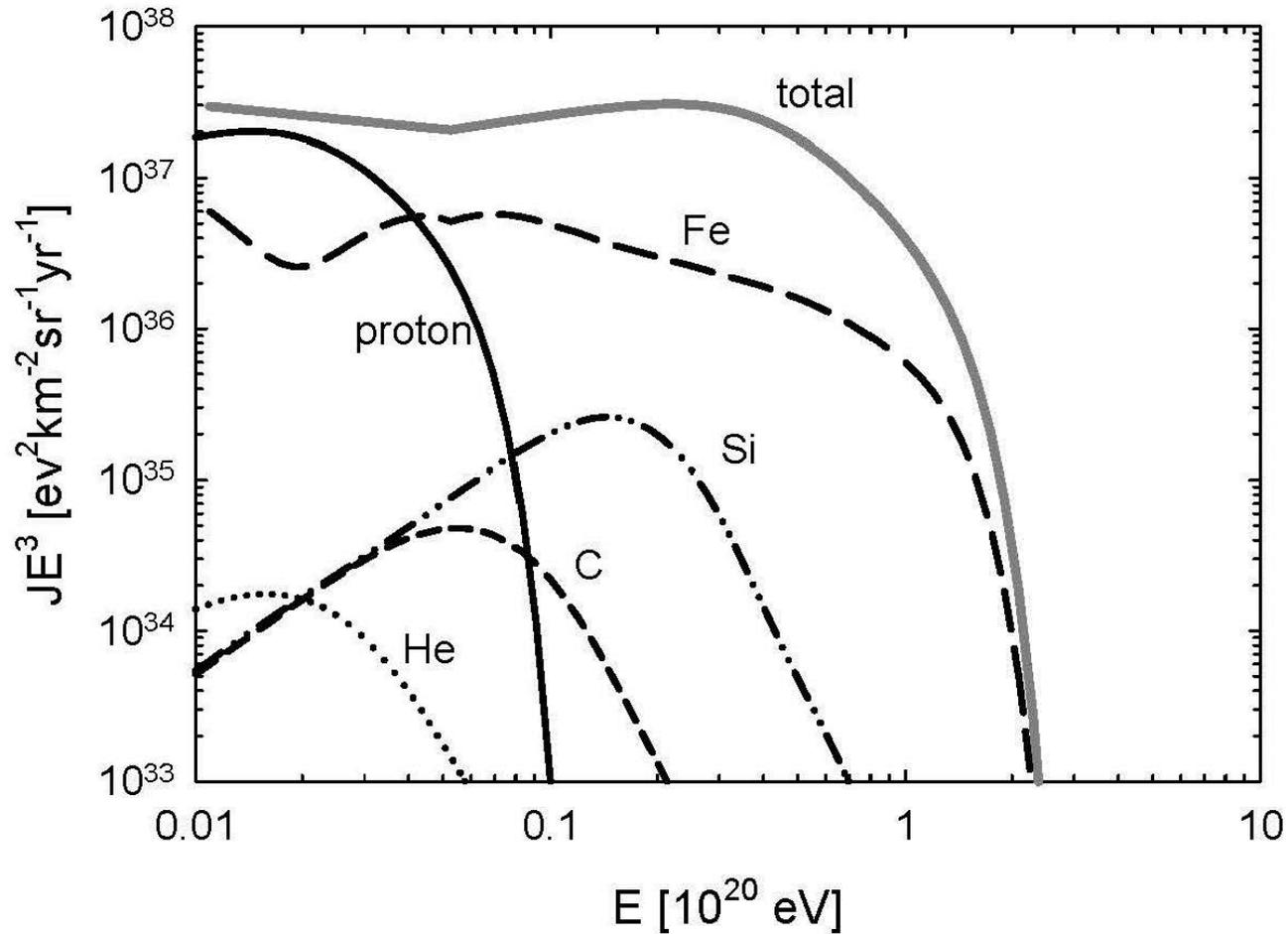


Отношение ядер железа к протонам

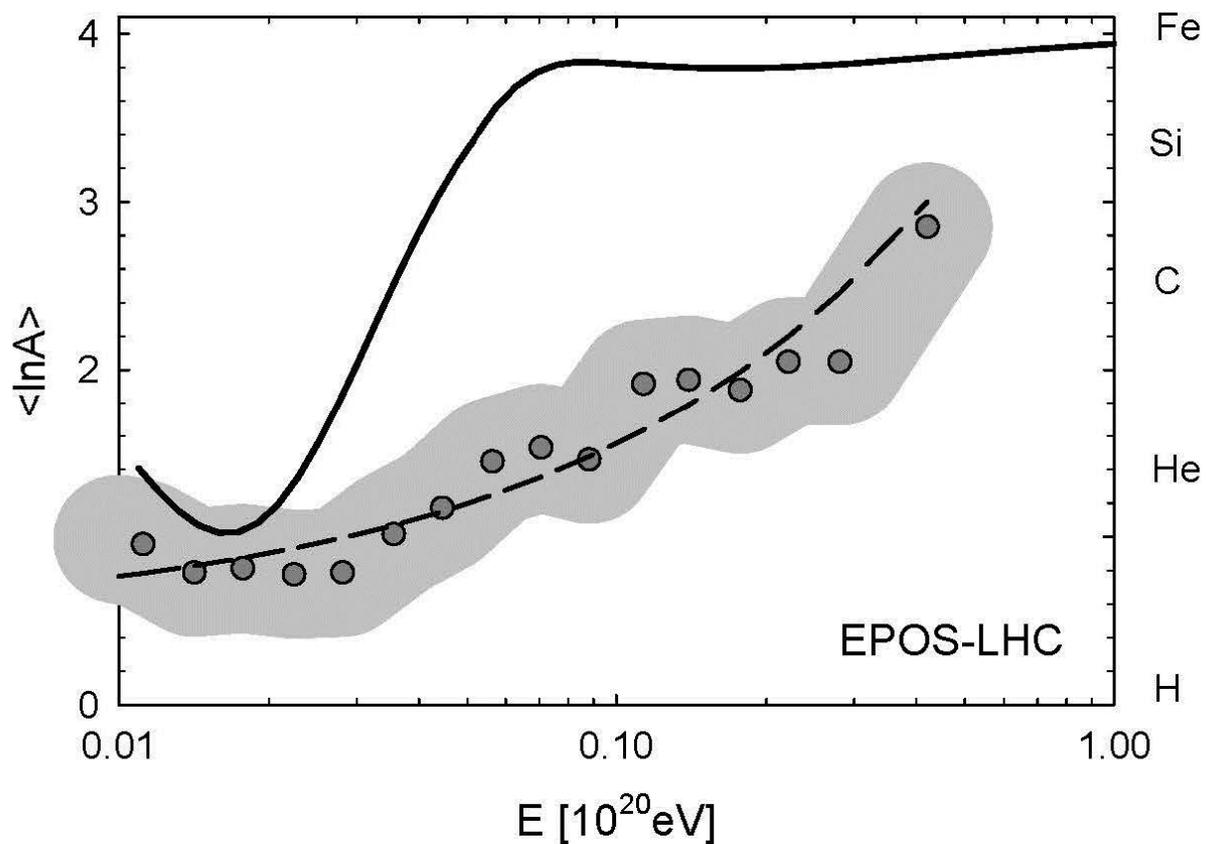
(a)  $S_{Fe}/S_p = 2 \cdot 10^{-2}$ , (b)  $S_{Fe}/S_p = 10^{-2}$

(c)  $S_{Fe}/S_p = 6.7 \cdot 10^{-3}$ .

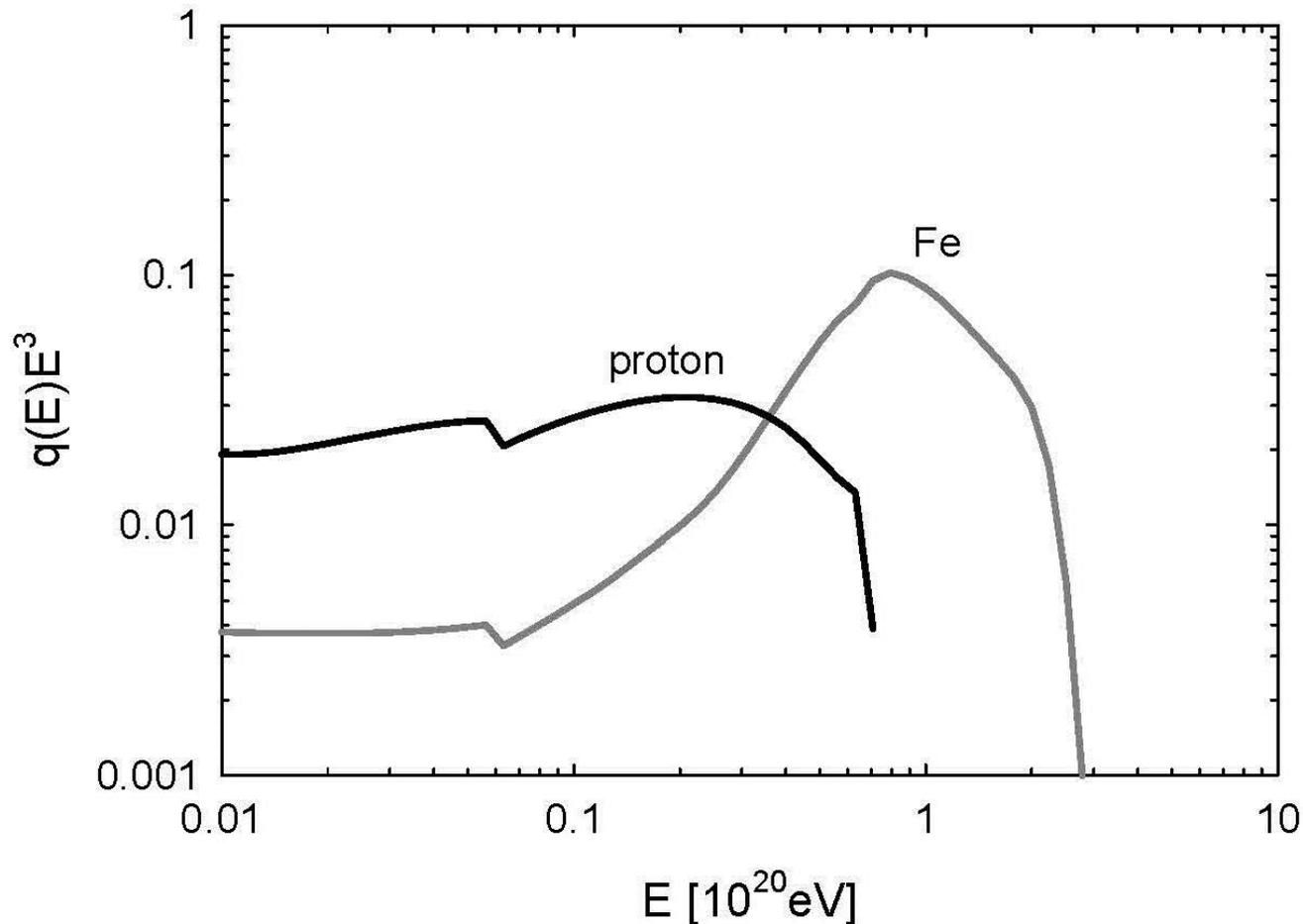
Задача не  
корректна при  
малых  
отношениях



Спектры различных ядер для отношения ядер железа к протонам в источнике  $S_{\text{Fe}}/S_{\text{p}}=10^{-2}$



Вычисленный  $\langle \ln(A) \rangle$  для отношения ядер железа к протонам в источнике  $S_{\text{Fe}}/S_{\text{p}}=10^{-2}$



Используя наблюдаемый спектр всех частиц и данные Auger по  $\langle \ln A \rangle$  можно определить спектры ядер железа и протонов в источнике не делая предположения об их форме

# Выводы

- Возможна постановка обратной задачи об определении спектров метagalактических источников КЛ по наблюдаемым спектрам.
- Спектры источников, полученные в предположении доминирования ядер железа в источниках, жестче чем спектры чисто протонных источников.