

**Ядра железа  
в космических лучах предельно высоких энергий  
у Земли**

**А. В. Урысон**

**ФИАН**

## Введение

Источники космических лучей (КЛ) с ультравысокой энергией  $E > 4 \cdot 10^{19}$  эВ (УВЭ) надежно не установлены.

В литературе обсуждаются как галактические, так и внегалактические объекты, где частицы КЛ могут быть ускорены до таких энергий.

В этой работе мы предполагаем, что КЛ ускоряются до УВЭ в окрестности сверхмассивных черных дыр (СМЧД).

Они обнаружены в центре многих галактик, включая Млечный Путь, и в настоящее время общепринято, что

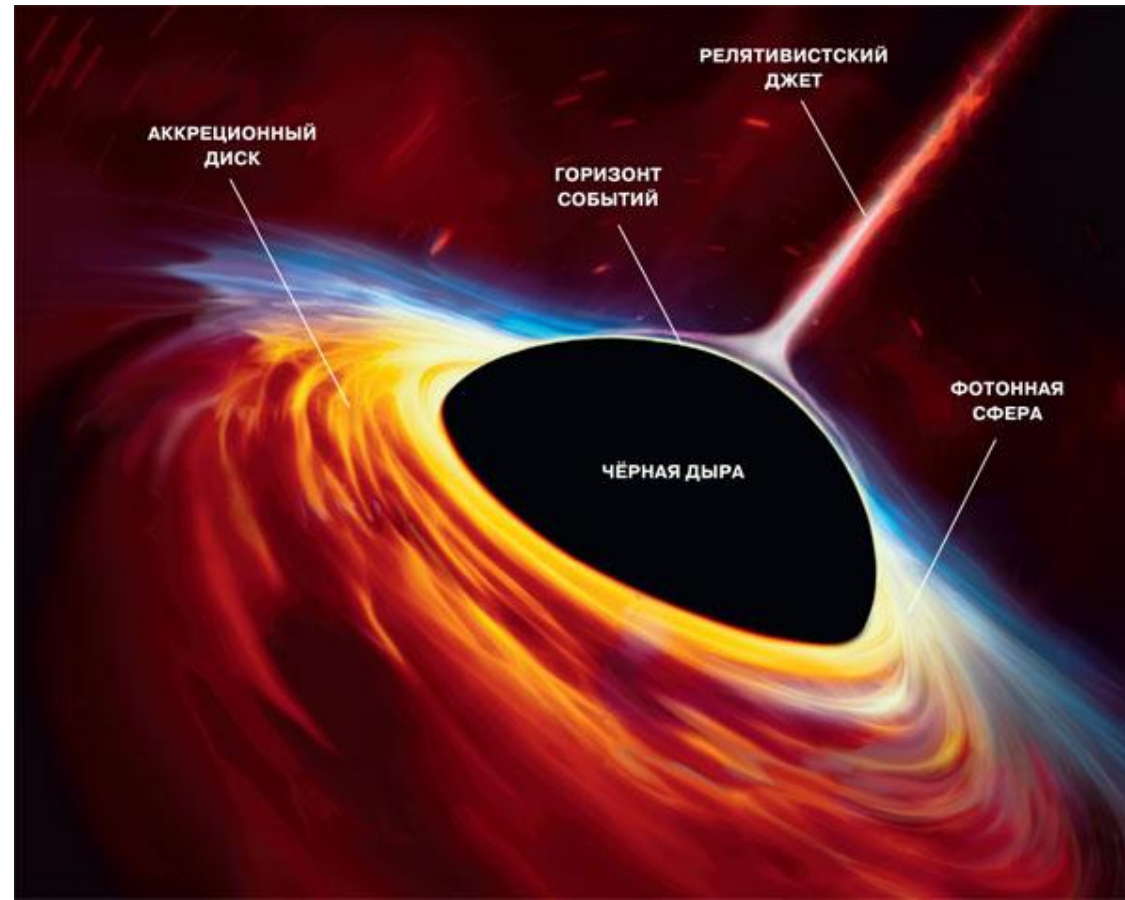
в ядре практически каждой галактики существует СМЧД (Черепашук 2022).

## Ускорение КЛ может происходить

в джете [Крымский 1976, Bell 1978, Cesarsky 1992, Istomin & Gunya 2020],

аккреционном диске [Haswell+1992],

а также **вблизи полярных шапок СМЧД**, куда частицы попадают из аккреционного диска [Kardashev 1995, Neronov+ 2009].



**Если эта гипотеза верна,**

**ускорение КЛ может происходить  
практически во всех галактических ядрах,  
где есть СМЧД.**

(Для ускорения КЛ в джете необходима активная фаза СМЧД,  
когда идет подпитка аккреционного диска, иначе джет «выключается»).

**Джет и аккреционный диск содержат вещество звезд,  
поэтому в составе КЛ в источниках присутствуют элементы  
с различными массовыми числами  $A$  вплоть до ядер железа.**

На пути от источника к установке элементный состав КЛ видоизменяется, потому что ядра КЛ УВЭ взаимодействуют с фоновыми излучениями (космическим микроволновым, радио, внегалактическим светом)

в реакциях

$A + \gamma \rightarrow A + e^+ + e^-$  (прямое рождение пар, пороговая энергия в СЦМ 1 МэВ),

$A + \gamma \rightarrow A' + mN + n\pi$  (фотопионное рождение, пороговая энергия 145 МэВ),

$A + \gamma \rightarrow A' + mN$  (фоторасщепление ядер, пороговая энергия десятки МэВ).

Мы обсуждаем распространение в межгалактическом пространстве ядер железа  $^{56}\text{Fe}$  УВЭ, а именно:

вычисляем **долю** дошедших от источника до установки ядер с массовым числом **A=56** и их фрагментов с массовыми числами **A=54, 55** относительно всех остальных частиц от **A=1** до **A=53**:

$$R=(A54 + A55+A56)/\text{все частицы}$$

В вычислениях использовался размещенный в интернете в открытом доступе код **TransportCR** [Kalashev Kido 2015].

## Модель

### Основные предположения модели

#### I. Источники

- 1) Источники КЛ УВЭ – СМЧД в ядрах галактик.
- 2) Расстояния до источников  $L \approx 2-3500$  Мпк.
- 3) На таких расстояниях необходимо учитывать эволюцию источников.  
Эволюция СМЧД неясна,  
и в вычислениях бралась эволюция одного из типов активных ядер галактик – BL Lac.
- 4) Спектр инжекции КЛ – степенной  $E^{-\gamma}$ ,  $\gamma=2.2$ .

Пункты 3) и 4) выбраны потому, что с ними описывается совокупность данных о КЛ (Giacinti+ 2015).

- 5) КЛ УВЭ = это ядра железа ( $A=56$ ).

# Модель

## II. Фоновые излучения

**CMB:** Планковское распределение по энергии,  
у фотонов средняя энергия  $\varepsilon_r = 6.7 \times 10^{-4}$  eV, плотность  $n_r = 400$  cm<sup>-3</sup>.

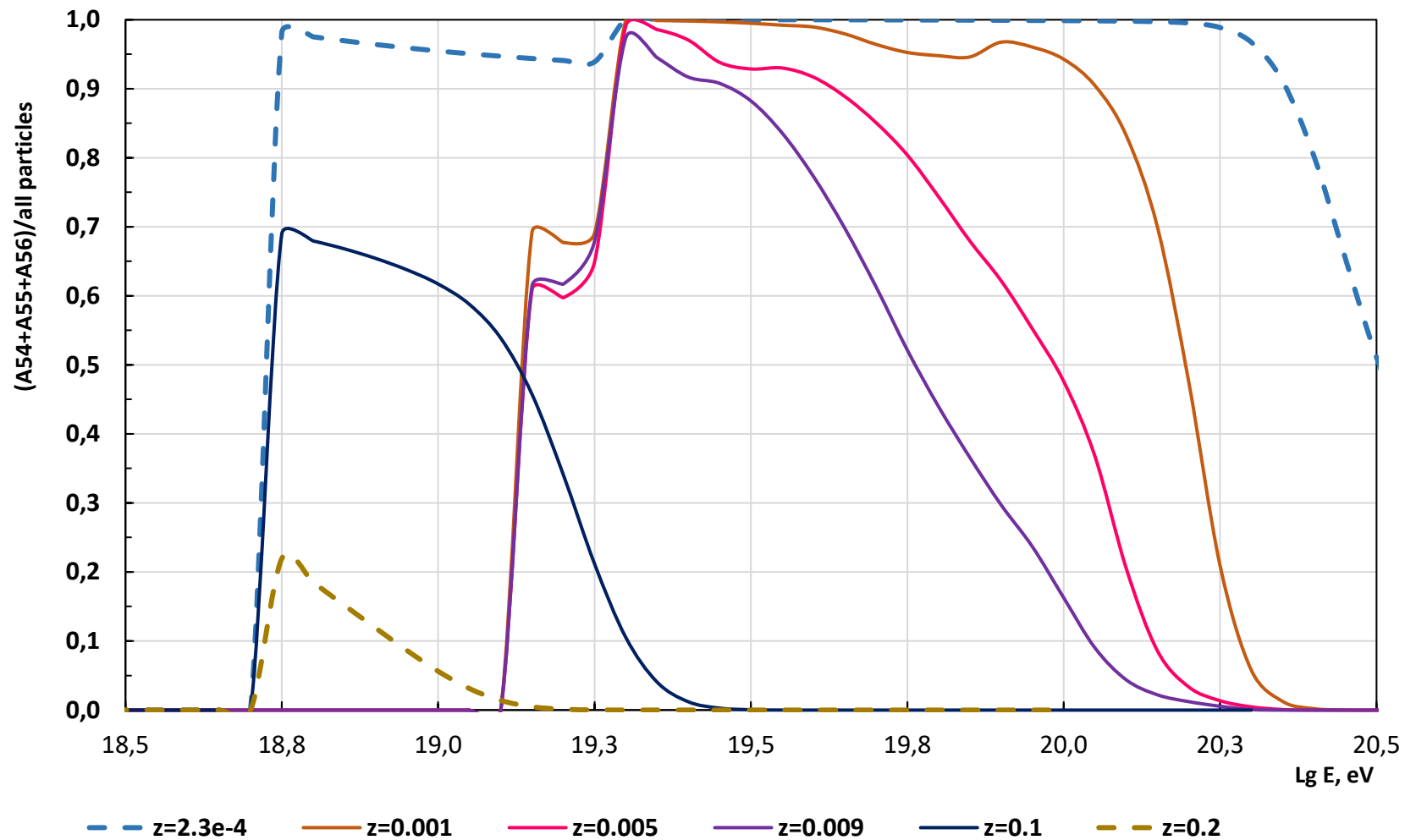
**Радио:** Protheroe, Biermann 1996; 1997.

**EVL:** Inoue + 2013.

Взаимодействие ядер с излучением: [Puget+ 1976, Stecker & Salamon 1999)



# Результаты



Ядра железа  $^{56}\text{Fe}$  и фрагментов  $A=54,55$ , пришедшие на установку (if ever) с разных расстояний, имеют энергии:

Энергия ядра $E$	Расстояние до источника
$>10^{20}$ eV	$\sim 1$ Мpc Магеллановы облака, M31
$10^{20}$ eV	$\approx 7$ Мpc Местная группа
$>10^{19}$ eV	$< 100$ Мpc
$< 10^{19}$ eV	$> 300 - 3500$ Мpc

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сейчас общепринято, что в ядре практически каждой галактики существует СМЧД (Черепашук 2022).

Если источники КЛ УВЭ – СМЧД в ядрах галактик, то ядра железа  $^{56}\text{Fe}$  и фрагменты с  $A=54, 55$

с энергией  $>10^{20}$  eV приходят из Магеллановых облаков, М31 (Андромеда);

с энергией  $10^{20}$  eV приходят из Местной группы;

с энергией  $>10^{19}$  eV приходят с расстояний  $<100$  Мрс;

с энергией  $<10^{19}$  eV приходят с расстояний  $>300 - 3500$  Мрс.

Громадная часть источников находится на расстояниях  $> 100$  Мрс,

поэтому ядра железа падают на установку (if ever), имея энергию  $<10^{19}$  eV.

**СПАСИБО**