

# РОЖДЕНИЕ НЕЙТРИНО И ГАММА-КВАНТОВ ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ОКОЛОГАЛАКТИЧЕСКИМ ГАЗОМ

выполнил: Н. Мартыненко  
научный руководитель: С. В. Троицкий

Кафедра физики частиц и космологии  
Физического факультета МГУ

30 мая 2022



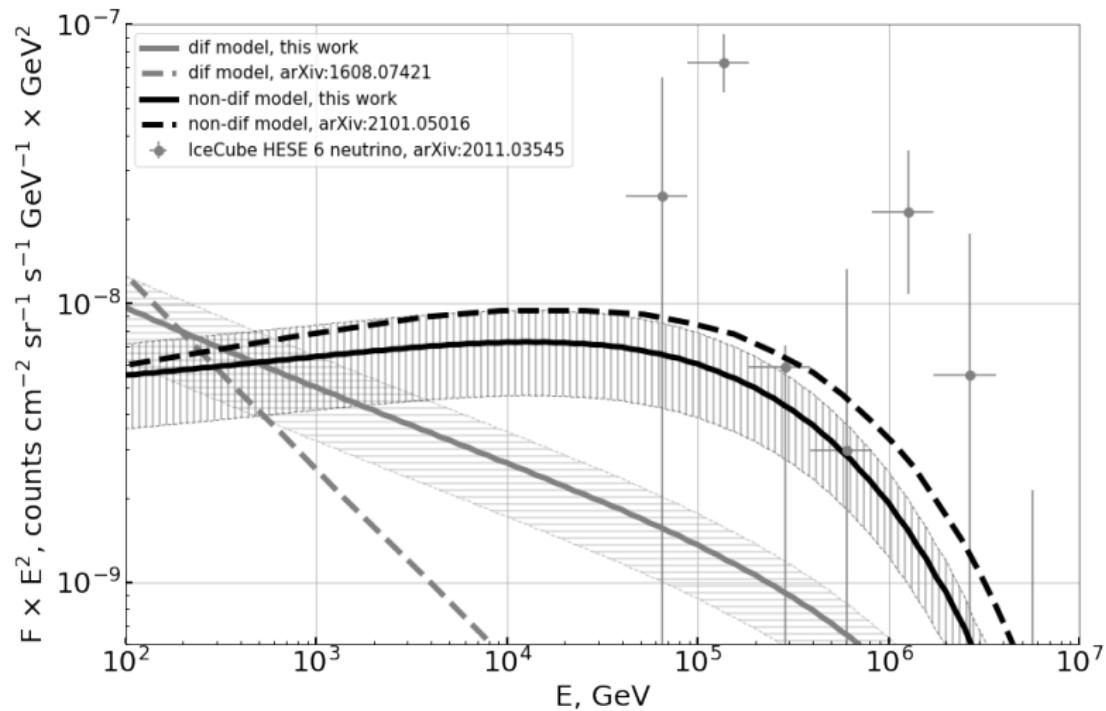
# Аннотация

**Проблема:** можно ли объяснить поток нейтрино IceCube взаимодействием космолучей с газом в гало Млечного Пути?

- **Первая часть:** оценка профиля концентрации газа в гало из наблюдений (спектры кислорода + ram-pressure stripping)
- **Вторая часть:** спектр и концентрация космолучей
  - сценарии-конкуренты: диффузионный и бездиффузионный
  - диффузионный сценарий: уравнение диффузии
  - бездиффузионный сценарий: наблюдения M31
  - оценка потоков, мощности источника, внегалактического вклада

**Основной результат:**  $\simeq (1\ldots 14)\%$  потока IceCube в сценарии с диффузией,  $\simeq (6\ldots 61)\%$  — без диффузии.

# Аннотация



## Основные факты:

- расстояния в пределах  $R_{\text{vir}} \sim 200$  кпс (гало)
- резервуар разреженного газа (наблюдения)
- имеет вклад в наблюдаемые потоки космолучей (взаимодействия частиц высоких энергий с газом)

## Проблемы

- Оценки потоков в публикациях отличаются в  $\sim 100$  раз!
- Механизм доставки космолучей в гало: диффузия?

[Phys. Rev. D 94:063013 (2017)] vs [ApJ 914:135 (2021)]

# Окологалактическая среда и космолучи

Основные факты:

- расстояния в пределах  $R_{\text{vir}} \sim 200$  кпс (гало)
- резервуар разреженного газа (наблюдения)
- имеет вклад в наблюдаемые потоки космолучей (взаимодействия частиц высоких энергий с газом)

## Проблемы

- Оценки потоков в публикациях отличаются в  $\sim 100$  раз!
- Механизм доставки космолучей в гало: диффузия?

[Phys. Rev. D 94:063013 (2017)] vs [ApJ 914:135 (2021)]

# Окологалактическая среда и космолучи

Модельные допущения:

- сферическая симметрия относительно центра Галактики
- наблюдаемые потоки — результат взаимодействия космических лучей (протонов) с окологалактическим газом
- линейное распространение вдоль каждого луча зрения — открытый код [arXiv:1406.0735 (2014)]
- концентрация газа  $\propto$  плотность первичных КЛ — определяет плотность источника вторичных КЛ

## Замечание

Реальные траектории заряженных частиц нелинейны, однако это можно учесть уже после расчета в наших допущениях

# Окологалактическая среда и космолучи

Модельные допущения:

- сферическая симметрия относительно центра Галактики
- наблюдаемые потоки — результат взаимодействия космических лучей (протонов) с окологалактическим газом
- линейное распространение вдоль каждого луча зрения — открытый код [arXiv:1406.0735 (2014)]
- концентрация газа  $\times$  плотность первичных КЛ — определяет плотность источника вторичных КЛ

## Задачи

Получить:

- ❶ профиль плотности газа
- ❷ профиль и спектр первичных космолучей

## Задачи

Получить:

- ➊ профиль плотности газа
- ➋ профиль и спектр первичных космолучей

На больших дистанциях — два основных метода:

- наблюдения за спутниковыми галактиками — мало данных, но нет зависимости от химического состава
- спектры излучения и поглощения (O<sup>VII</sup>, O<sup>VIII</sup>) — много данных, но  $M_{\text{ox}}$  вместо  $M_{\text{gas}}$ , нужно закладывать химический состав

При раздельном анализе результаты не согласуются!

Нужен совместный анализ.

## Задачи

Получить:

- ➊ профиль плотности газа
- ➋ профиль и спектр первичных космолучей

$$n_{\text{CGM}}(r) = n_0 \left(1 + r^2/r_c^2\right)^{-\frac{3\beta}{2}}$$

$$r_c = 3 \text{ kpc}$$

$$n_0 = 4.54 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-3}, \quad \beta = 0.337, \quad r_{\text{kpc}}^* \geq 30 \text{ [MNRAS, 511:843 (2022)]}$$

$$n_0 = 4.47 \times 10^{-1} \text{ cm}^{-3}, \quad \beta = 1.000, \quad r_{\text{kpc}} < 30 \text{ [ApJ, 763:21 (2013)]}$$

---

\*здесь и далее  $x_{\text{unit}} \equiv x/\text{unit}$

# Окологалактическая среда. Оценки плотности

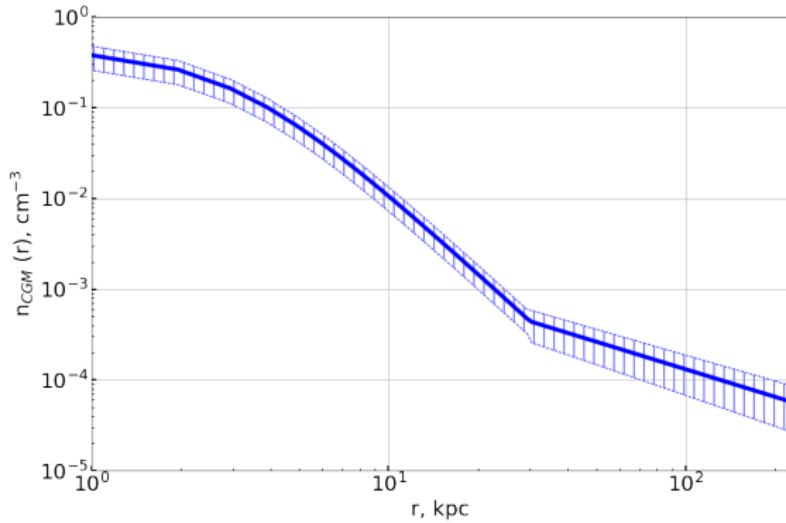


Рис.: Профиль плотности окологалактического газа. [ApJ, 763:21 (2013)] & [MNRAS, 511:843 (2022)].

## Задачи

Получить:

- ➊ профиль плотности газа
- ➋ профиль и спектр первичных космолучей

Модель диффузии:

- источники космолучей — возле диска Млечного Пути
- частицы закручиваются в хаотичных магнитных полях
- процесс доставки в гало описывается уравнением диффузии

## Проблема

Модель диффузии плохо согласуется с наблюдениями M31

## Задачи

Получить:

- ➊ профиль плотности газа
- ➋ профиль и спектр первичных космолучей

Модель диффузии:

- источники космолучей — возле диска Млечного Пути
- частицы закручиваются в хаотичных магнитных полях
- процесс доставки в гало описывается уравнением диффузии

## Проблема

Модель диффузии плохо согласуется с наблюдениями M31

## Задачи

Получить:

- ➊ профиль плотности газа
- ➋ профиль и спектр первичных космолучей

Бездиффузионное распространение:

- доускорение в гало (ударные волны?)
- доставка в пузырях-контейнерах

## Проблема

Нет адекватной модели: как получить профиль космолучей?

## Задачи

Получить:

- ➊ профиль плотности газа
- ➋ профиль и спектр первичных космолучей

Бездиффузионное распространение:

- доускорение в гало (ударные волны?)
- доставка в пузырях-контейнерах

## Проблема

Нет адекватной модели: как получить профиль космолучей?

## Задачи

Получить:

- ➊ профиль плотности газа
- ➋ профиль и спектр первичных космолучей

уравнение диффузии:

$$\frac{\partial}{\partial t} j(E, r, t) = D(E) \Delta j(E, r, t) - c \sigma_{pp}(E) n_{\text{CGM}}(r) j(E, r, t) + Q(E, r, t)$$

## Задачи

Получить:

- ➊ профиль плотности газа
- ➋ профиль и спектр первичных космолучей

$$\frac{\partial}{\partial t} j(E, r, t) = D(E) \Delta j(E, r, t) - c \sigma_{pp}(E) n_{\text{CGM}}(r) j(E, r, t) + Q(E, r, t)$$

$$j(E, r, t) = \frac{dn_{\text{CR}}}{dE}$$

$$j(E, r, t_0) = ?$$

## Задачи

Получить:

- ➊ профиль плотности газа
- ➋ профиль и спектр первичных космолучей

$$\frac{\partial}{\partial t} j(E, r, t) = \mathbf{D}(E) \Delta j(E, r, t) - c \sigma_{pp}(E) n_{\text{CGM}}(r) j(E, r, t) + Q(E, r, t)$$

$$D(E) = D_0 E_{\text{GeV}}^{1/3}, \quad D_0 = 1.2 \times 10^{29} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

[ApJ 763:21 (2013)]

## Задачи

Получить:

- ➊ профиль плотности газа
- ➋ профиль и спектр первичных космолучей

$$\frac{\partial}{\partial t} j(E, r, t) = D(E) \Delta j(E, r, t) - c \sigma_{pp}(E) n_{\text{CGM}}(r) j(E, r, t) + Q(E, r, t)$$

$$\sigma_{pp}(E) = \sigma_0 + \sigma_1 (\log E_{\text{GeV}}) + \sigma_2 (\log E_{\text{GeV}})^2$$

[Particle Data Group (2021)], фит по точкам  $E > 10 \text{ GeV}$

## Задачи

Получить:

- ➊ профиль плотности газа
- ➋ профиль и спектр первичных космолучей

$$\frac{\partial}{\partial t} j(E, r, t) = D(E) \Delta j(E, r, t) - c \sigma_{pp}(E) n_{\text{CGM}}(r) j(E, r, t) + Q(E, r, t)$$

$$n_{\text{CGM}}(r) = n_0 \left(1 + r^2/r_c^2\right)^{-\frac{3\beta}{2}}$$

[ApJ, 763:21 (2013)] & [MNRAS, 511:843 (2022)]

## Задачи

Получить:

- ➊ профиль плотности газа
- ➋ профиль и спектр первичных космолучей

$$\frac{\partial}{\partial t} j(E, r, t) = D(E) \Delta j(E, r, t) - c \sigma_{pp}(E) n_{\text{CGM}}(r) j(E, r, t) + Q(E, r, t)$$

$$Q(E, r, t) \propto E^{-\alpha} e^{-\frac{E}{E_{\text{cut}}}} \theta(r_Q - r) \times Q_{\text{time}}(t)$$

## Задачи

Получить:

- ➊ профиль плотности газа
- ➋ профиль и спектр первичных космолучей

$$Q(E, r, t) \propto E^{-\alpha} e^{-\frac{E}{E_{\text{cut}}}} \theta(r_Q - r) \times Q_{\text{time}}(t)$$

$$\alpha = 2, \quad E_{\text{cut GeV}} = 10^8, \quad r_{Q \text{ kpc}} = 15, \quad Q_{\text{time}} = \begin{cases} 1 + t_{\text{Gyr}}, & t_{\text{Gyr}} \in [0, 2] \\ 3, & t_{\text{Gyr}} \in [2, 6] \\ 6 - t_{\text{Gyr}}/2, & t_{\text{Gyr}} \in [6, 10] \end{cases}$$

[Phys. Rev. D 94:063013 (2017)]

# Спектр и концентрация КЛ. Модель диффузии

## Задачи

Получить:

- ➊ профиль плотности газа
- ➋ профиль и спектр первичных космолучей

уравнение диффузии:

$$\frac{\partial}{\partial t} j(E, r, t) = D(E) \Delta j(E, r, t) - c \sigma_{pp}(E) n_{\text{CGM}}(r) j(E, r, t) + Q(E, r, t)$$

дополнительные условия:

$$j(E, r, t = 0) = \frac{\partial}{\partial r} j(E, r = 0, t) = j(E, r \rightarrow \infty, t) = 0$$

# Спектр и концентрация КЛ. Модель диффузии

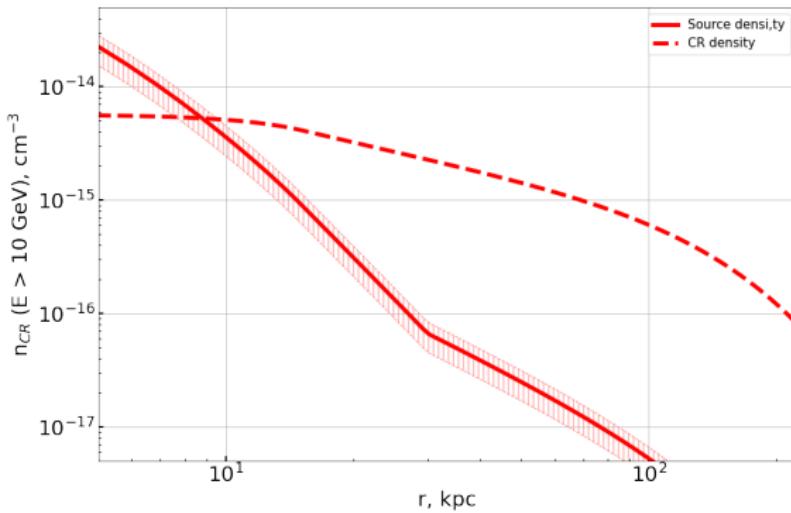


Рис.: Профиль плотности космолучей и источника в модели диффузии

## Задачи

Получить:

- ➊ профиль плотности газа
- ➋ профиль и спектр первичных космолучей

Допущение: пусть функция факторизуется  $j(E, r) \propto n_{\text{CR}}(r)E^{-\alpha}e^{-\frac{E}{E_{\text{cut}}}}$

Положим  $\alpha = 2$ ,  $E_{\text{cut GeV}} = 2 \times 10^7$  [ApJ 914:135 (2021)]

$n_{\text{CR}}(r)$  — по наблюдениям M31, которые «исключают» диффузию

## Задачи

Получить:

- ➊ профиль плотности газа
- ➋ профиль и спектр первичных космолучей

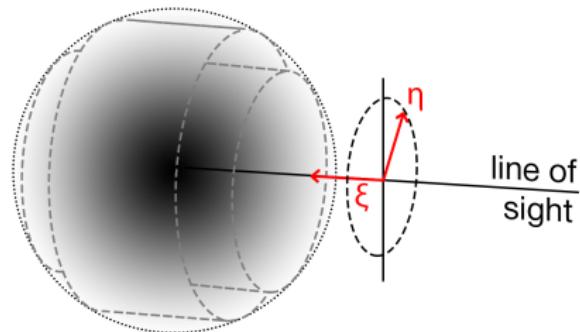
Допущение: пусть  $n_{\text{CR}}(r) \times n_{\text{CGM}}(r) \propto r^{-a}$

Тогда, подобрав  $a$  по наблюдениям M31 [ApJ 880:95 (2019)], получим  
 $n_{\text{CR}}(r) \propto r^{-a} \div n_{\text{CGM}}(r)$

## Задачи

Получить:

- ➊ профиль плотности газа
- ➋ профиль и спектр первичных космолучей



## Задачи

Получить:

- ➊ профиль плотности газа
- ➋ профиль и спектр первичных космолучей

$$I(\eta_{in}, \eta_{out} | a) = 2I_0 \times \frac{1}{\eta_{out}^2 - \eta_{in}^2} \int_{\eta_{in}}^{\eta_{out}} d\eta \, \eta^2 \int_0^{\sqrt{1-\eta^2}} d\xi \, (\xi^2 + \eta^2)^{-a/2} =$$
$$= \boxed{2I_0 \times \frac{1}{\eta_{out}^2 - \eta_{in}^2} \int_{\eta_{in}}^{\eta_{out}} d\eta \, \eta^{2-a} \sqrt{1-\eta^2} {}_2F_1 \left( \frac{1}{2}, \frac{a}{2}, \frac{3}{2}, 1 - \frac{1}{\eta^2} \right)}$$

## Задачи

Получить:

- ➊ профиль плотности газа
- ➋ профиль и спектр первичных космолучей

Наблюдения:  $I(\eta_{in}^{\text{SH}}, \eta_{out}^{\text{SH}}|a) \div I(\eta_{in}^{\text{FOH}} \equiv \eta_{out}^{\text{SH}}, \eta_{out}^{\text{FOH}}|a) = 1.4 \pm 1.0$

Из выражения выше получаем  $a_{\text{opt}} = 1.5$ ,  $a_{\text{sharp}} = 2.3$

# Спектр и концентрация КЛ. Модель без диффузии

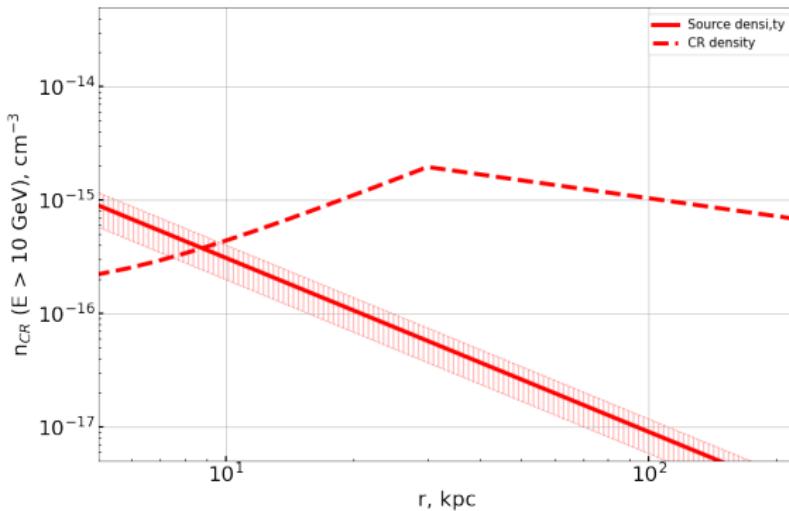


Рис.: Профиль плотности космолучей и источника в модели без диффузии

# Спектр и концентрация КЛ. Модель без диффузии

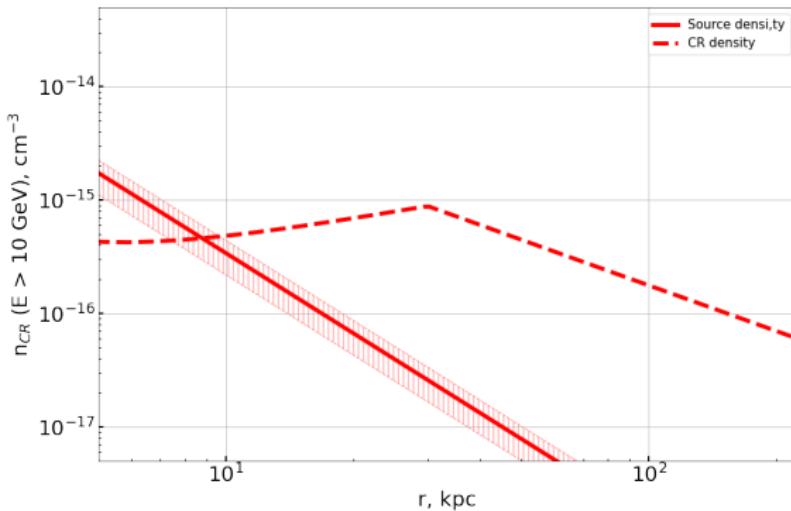


Рис.: Профиль плотности космолучей и источника в модели без диффузии

# Спектр и концентрация КЛ

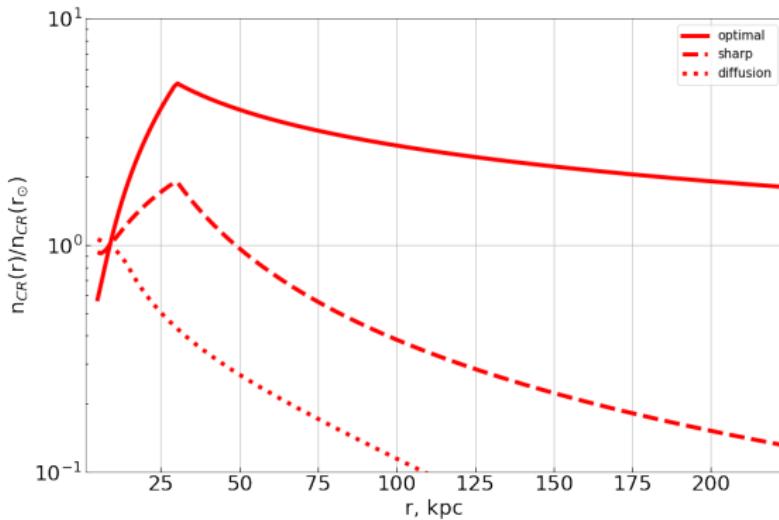
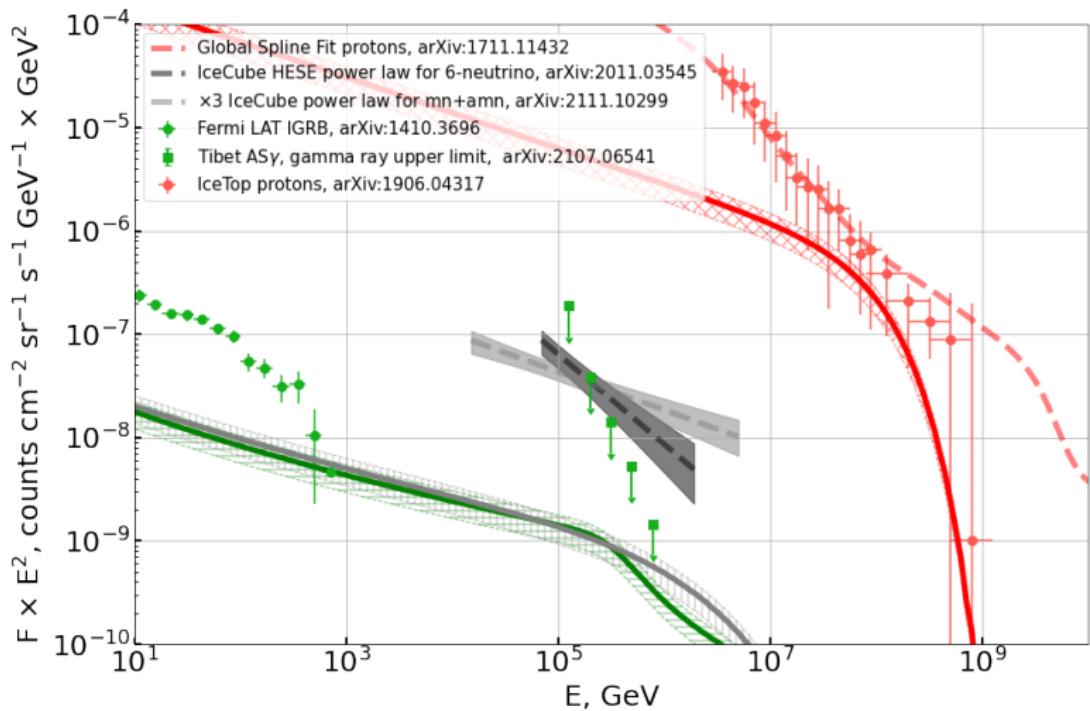
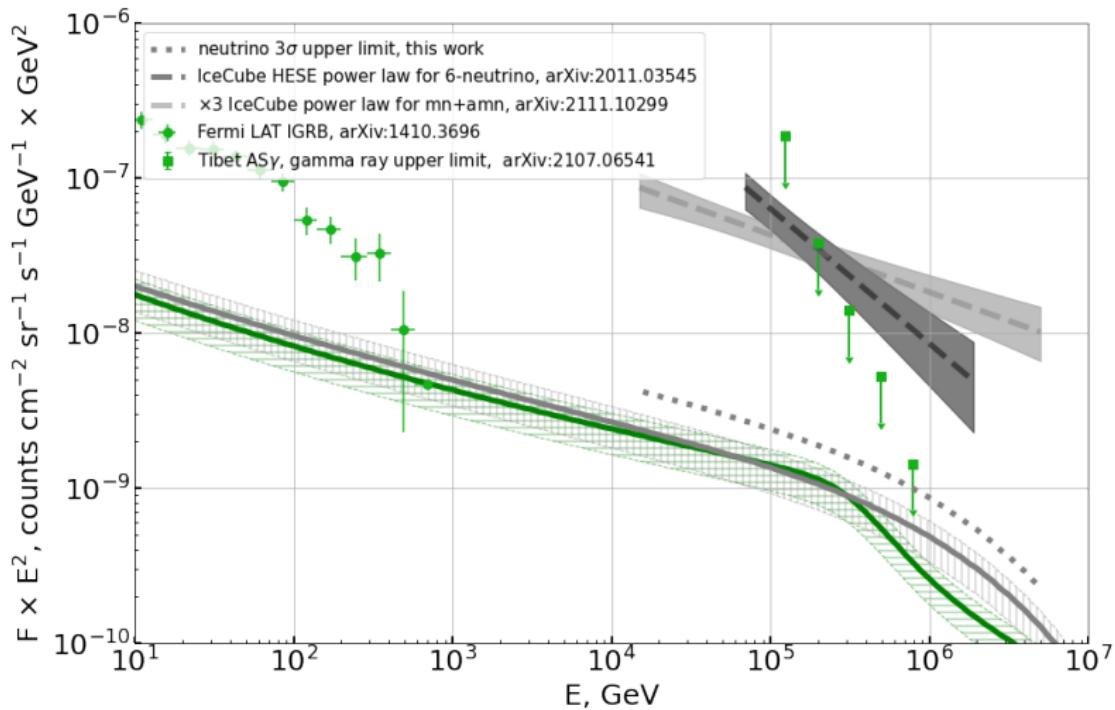


Рис.: Сравнение профилей плотности космолучей

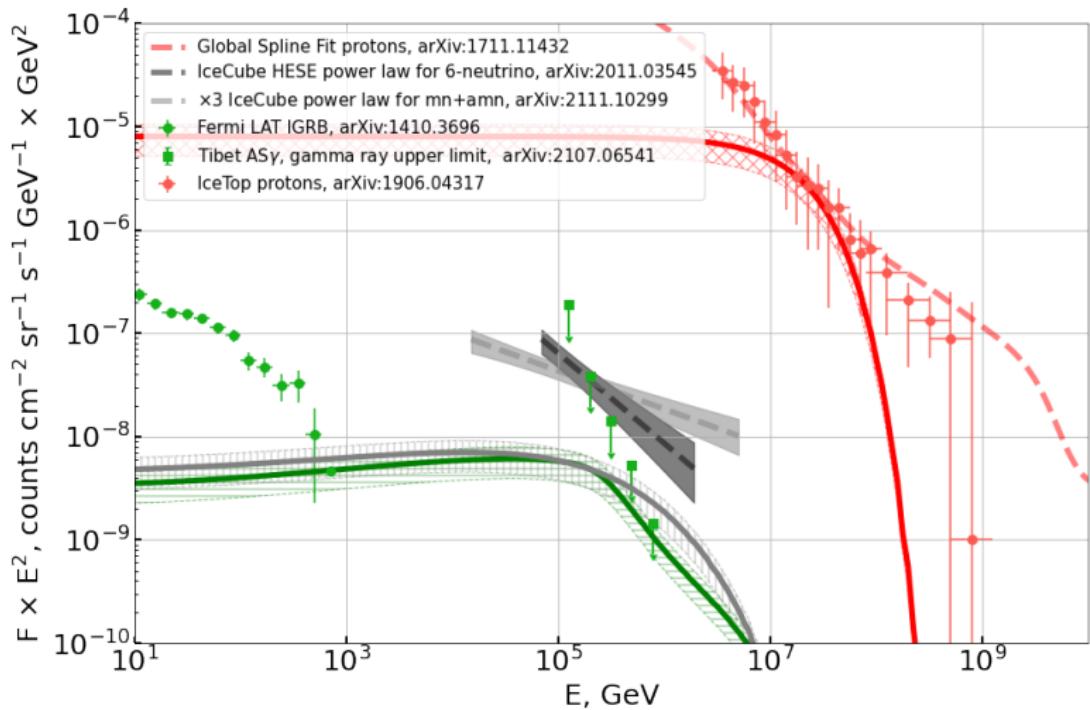
# Результаты. Потоки вторичных частиц



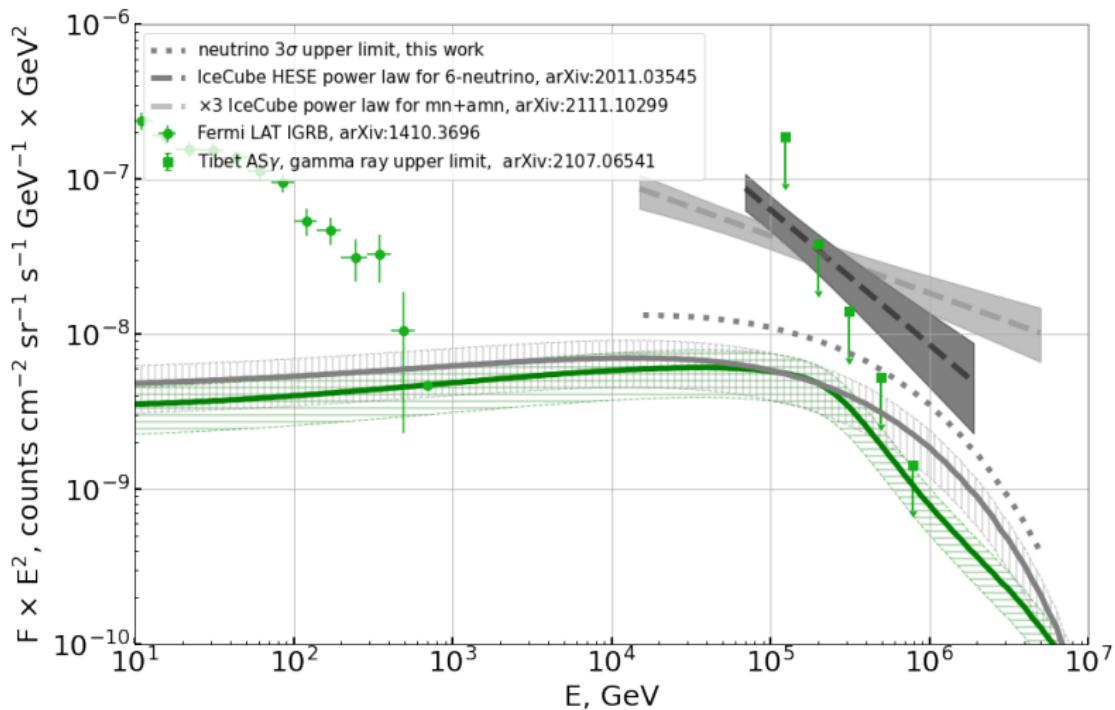
# Результаты. Потоки вторичных частиц



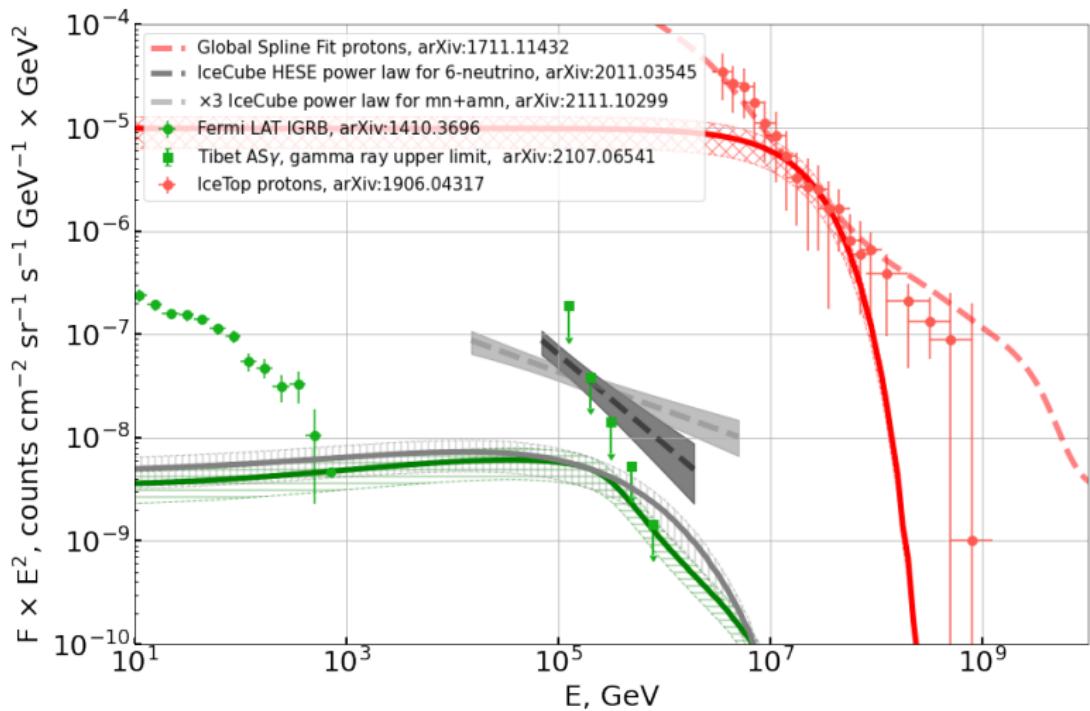
# Результаты. Потоки вторичных частиц



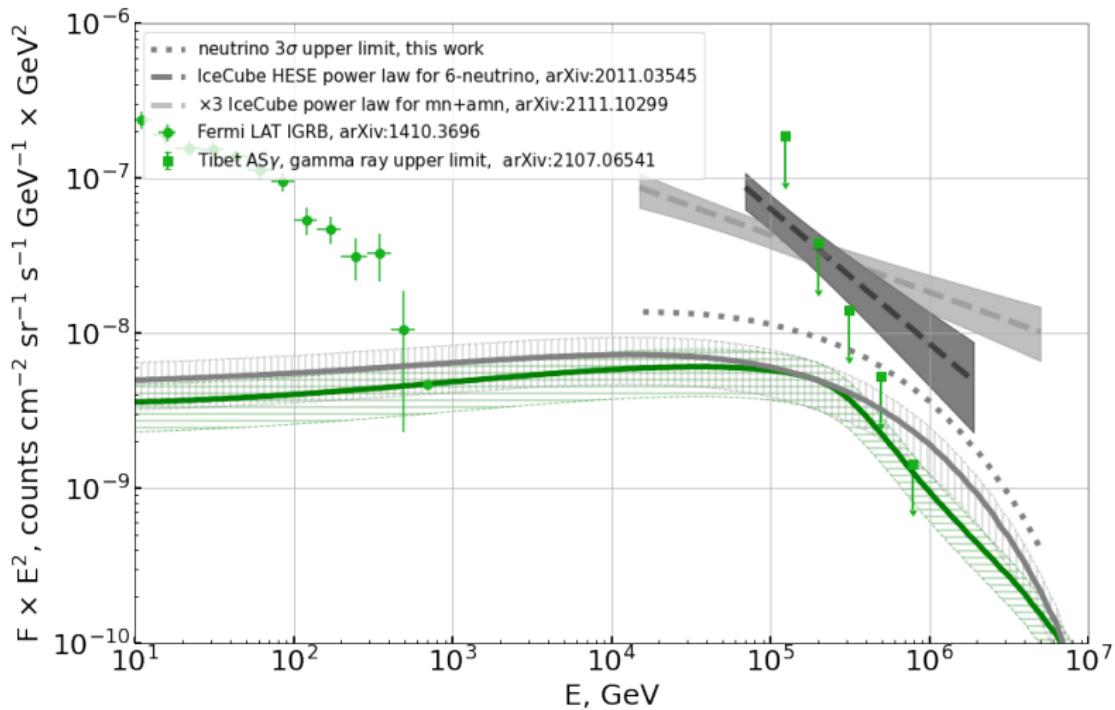
# Результаты. Потоки вторичных частиц



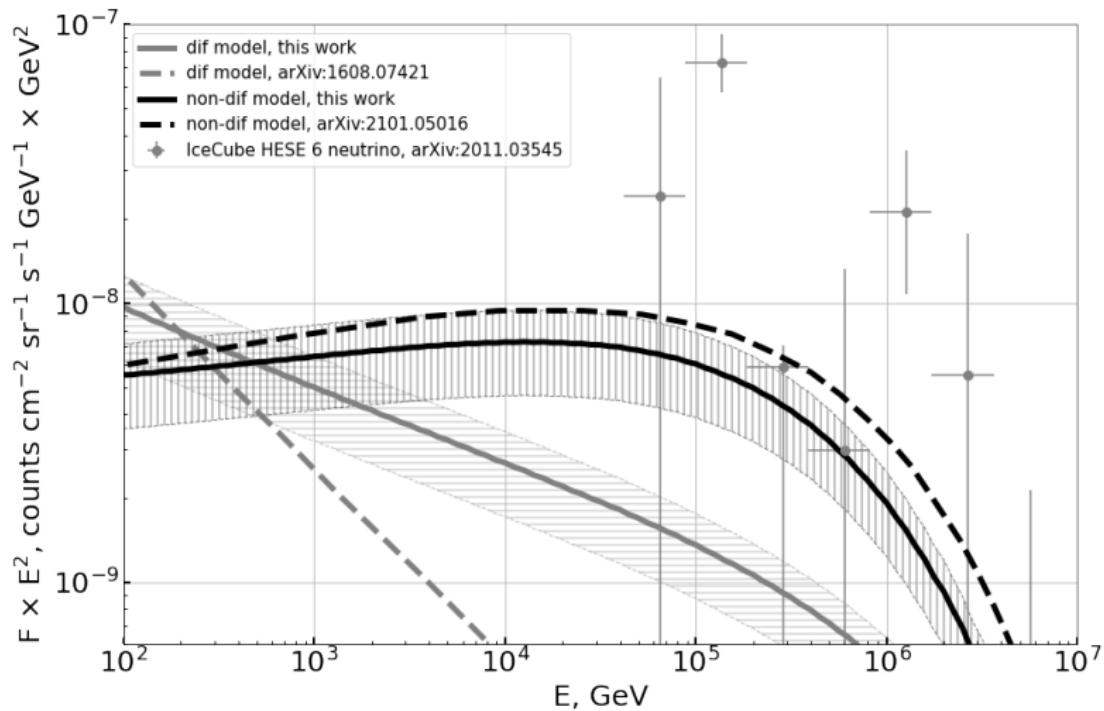
# Результаты. Потоки вторичных частиц



# Результаты. Потоки вторичных частиц



# Результаты. Потоки вторичных частиц



# Результаты. Потоки вторичных частиц

## Модель с диффузией:

- объясняет (3...5)% наблюдаемого потока нейтрино (best-fitting),  
(1...14)% с учетом всех погрешностей
- с большим запасом согласуется с ограничениями Tibet-As $\gamma$ , IceTop

## Модель без диффузии:

- объясняет (12...21)% наблюдаемого потока нейтрино (best-fitting),  
(6...61)% с учетом всех погрешностей
- упирается в ограничения Tibet-As $\gamma$  и IceTop

# Результаты. Потоки вторичных частиц

## Замечание

Оба вида моделей дают примерно одинаковую полную энергию КЛ в пределах гало ( $\sim 10^{55}$  erg), однако в бездиффузионном случае локальная плотность энергии КЛ в  $\sim 4$  раза ниже.

# Оценка вклада других галактик

$$I_{\text{gal}} = \text{const} \times \int_0^{R_{\text{vir, gal}}} dr n_{\text{CGM, gal}}(r) n_{\text{CR, gal}}(r) 4\pi r^2, \quad F_{\text{gal}} = \frac{I_{\text{gal}}}{4\pi d_{L, \text{gal}}^2}$$

$$d_L = (1+z)d = (1+z)c \int_0^z \frac{dz'}{H(z')}$$

$$F_{\text{MW}} = \text{const} \times \int_{r_\odot}^{R_{\text{vir, MW}}} dr n_{\text{CGM}}(r) n_{\text{CR}}(r)$$

$$\xi \equiv \frac{F_{\text{EG}}}{F_{\text{MW}}} = \int dN_{\text{gal}}(z) \ F_{\text{gal}}(z) \div F_{\text{MW}}$$

# Оценка вклада других галактик

$$\xi \equiv \frac{F_{\text{EG}}}{F_{\text{MW}}} = \int dN_{\text{gal}}(z) F_{\text{gal}}(z) \div F_{\text{MW}}$$

Допущение:  $I_{\text{gal}} \div I_{\text{MW}} = \left( M_{\text{gal}}^* \div M_{\text{MW}}^* \right)^\gamma$ ,  $\gamma \sim (1\dots 2)$ . Тогда:

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{4\pi c}{H_0} \int dz \frac{n_{\text{gal}}^{1-\gamma}(z)(1+z)^{-2}}{\sqrt{\Omega_\Lambda + \Omega_M(1+z)^3}} \left( \rho_{\text{gal}}^*(z)/M_{\text{MW}}^* \right)^\gamma \times \\ &\quad \times \frac{\int\limits_0^{R_{\text{vir, MW}}} dr r^2 n_{\text{CGM}}(r) n_{\text{CR}}(r)}{\int\limits_{r_\odot}^{R_{\text{vir, MW}}} dr n_{\text{CGM}}(r) n_{\text{CR}}(r)} \end{aligned}$$

# Оценка вклада других галактик

$$\xi = \frac{4\pi c}{H_0} \int dz \frac{n_{\text{gal}}^{1-\gamma}(z)(1+z)^{-2}}{\sqrt{\Omega_\Lambda + \Omega_M(1+z)^3}} \left(\rho_{\text{gal}}^\star(z)/M_{\text{MW}}^\star\right)^\gamma \times \\ \times \frac{\int\limits_0^{R_{\text{vir, MW}}} dr r^2 n_{\text{CGM}}(r) n_{\text{CR}}(r)}{\int\limits_{r_\odot}^{R_{\text{vir, MW}}} dr n_{\text{CGM}}(r) n_{\text{CR}}(r)}$$

$n_{\text{gal}}(z)$  — [A&A 583:A61 (2015)],  $\rho_{\text{gal}}^\star(z)$  — [MNRAS 450:1604 (2015)]

**Результат:**  $\xi \leq 0.1$  при  $\gamma \sim 1$ ,  $\xi \leq 0.01$  при  $\gamma \sim 2$ , то есть  $F_{\text{EG}} \leq (1...10)\%F_{\text{MW}}$ . Это за пределами точности  $F_{\text{MW}}$

# Результаты. Итог

## Потоки астрофизических нейтрино от гало Галактики

- с диффузией: (1...14)% наблюдаемого потока
- без диффузии: (6...61)% наблюдаемого потока

## Мощность источника

- оба сценария накладывают примерно одинаковые требования на мощность  $P \sim 10^{42} \text{ erg s}^{-1} \times T_{\text{Myr}}^{-1}$

## Вклад других галактик в поток нейтрино

- < (1...10)% от Галактического для обеих моделей (в ~ 2 раза выше в бездиффузионной модели относительно диффузионной)