

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

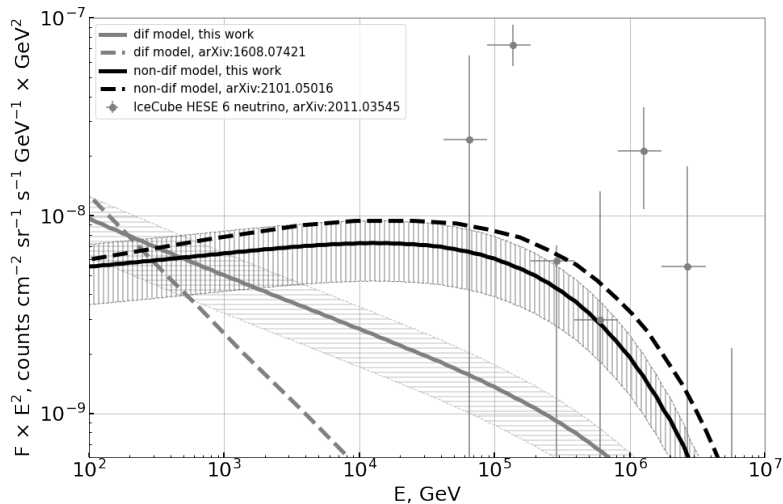
30 мая 2022



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



Основные факты:

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

Проблемы

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

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

Основные факты:

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

Проблемы

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

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

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

Замечание

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

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:

- 1 профиль плотности газа
- 2 профиль и спектр первичных космолучей

Задачи

Получить:

- 1 профиль плотности газа
- 2 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 (OVII, OVIII) — много данных, но M_{ox} вместо M_{gas} , нужно закладывать химический состав

При раздельном анализе результаты не согласуются!

Нужен совместный анализ.

Задачи

Получить:

- 1 профиль плотности газа
- 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

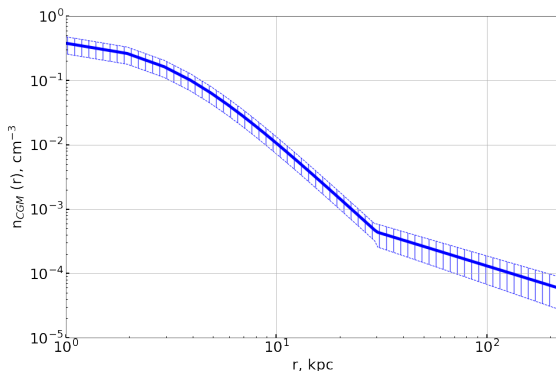


Рис.: Профиль плотности окологалактического газа. [ApJ, 763:21 (2013)] & [MNRAS, 511:843 (2022)].

Задачи

Получить:

- 1 профиль плотности газа
- 2 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:

- 1 профиль плотности газа
- 2 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:

- 1 профиль плотности газа
- 2 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:

- 1 профиль плотности газа
- 2 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:

- 1 профиль плотности газа
- 2 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:

- 1 профиль плотности газа
- 2 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:

- 1 профиль плотности газа
- 2 профиль и спектр первичных космолучей

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

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

[ApJ 763:21 (2013)]

Задачи

Получить:

- 1 профиль плотности газа
- 2 профиль и спектр первичных космолучей

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

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

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

Задачи

Получить:

- 1 профиль плотности газа
- 2 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:

- 1 профиль плотности газа
- 2 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:

- 1 профиль плотности газа
- 2 профиль и спектр первичных космолучей

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

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

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

Задачи

Получить:

- 1 профиль плотности газа
- 2 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

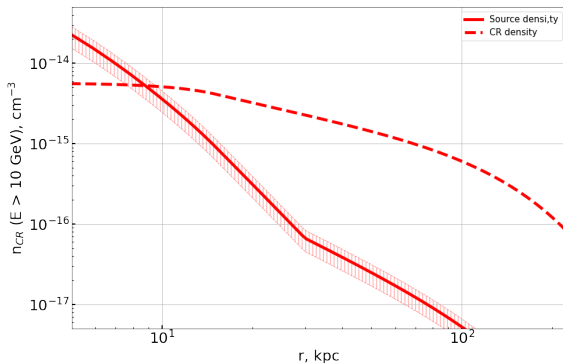


Рис.: Профиль плотности космолучей и источника в модели диффузии

Задачи

Получить:

- 1. профиль плотности газа
- 2. 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:

- 1. профиль плотности газа
- 2. профиль и спектр первичных космолучей

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

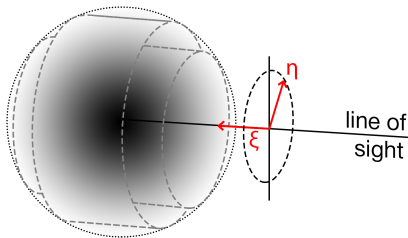
Тогда, подобрав a по наблюдениям M31 [ApJ 880:95 (2019)], получим $n_{\text{CR}}(r) \propto r^{-a} \div n_{\text{CGM}}(r)$

Спектр и концентрация КЛ. Модель без диффузии

Задачи

Получить:

- 1 профиль плотности газа
- 2 профиль и спектр первичных космолучей



Задачи

Получить:

- 1 профиль плотности газа
- 2 профиль и спектр первичных космолучей

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

Задачи

Получить:

- 1 профиль плотности газа
- 2 профиль и спектр первичных космолучей

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

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

Спектр и концентрация КЛ. Модель без диффузии

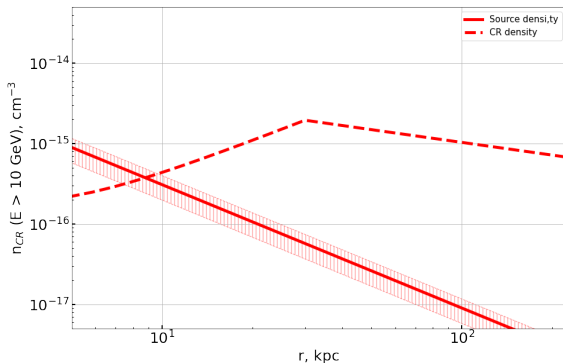


Рис.: Профиль плотности космолучей и источника в модели без диффузии

Спектр и концентрация КЛ. Модель без диффузии

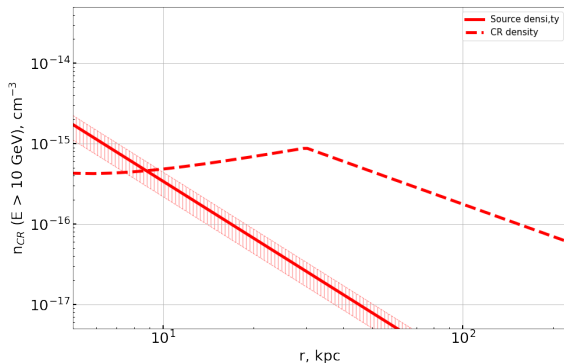


Рис.: Профиль плотности космолучей и источника в модели без диффузии

Спектр и концентрация КЛ

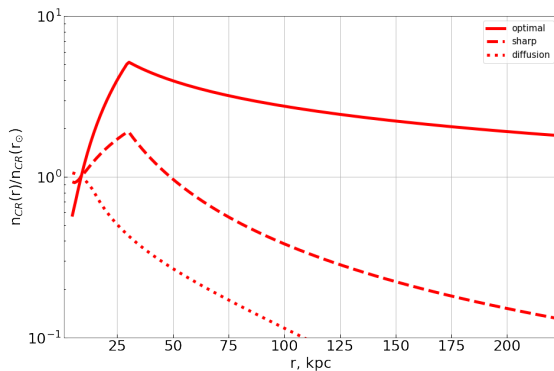
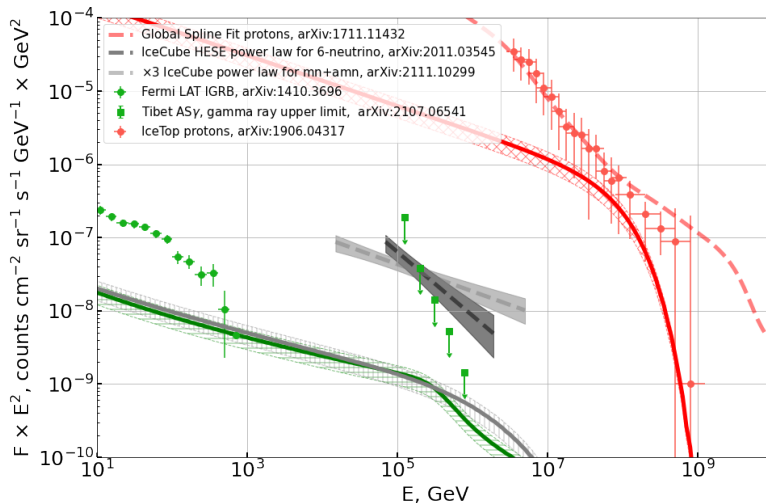
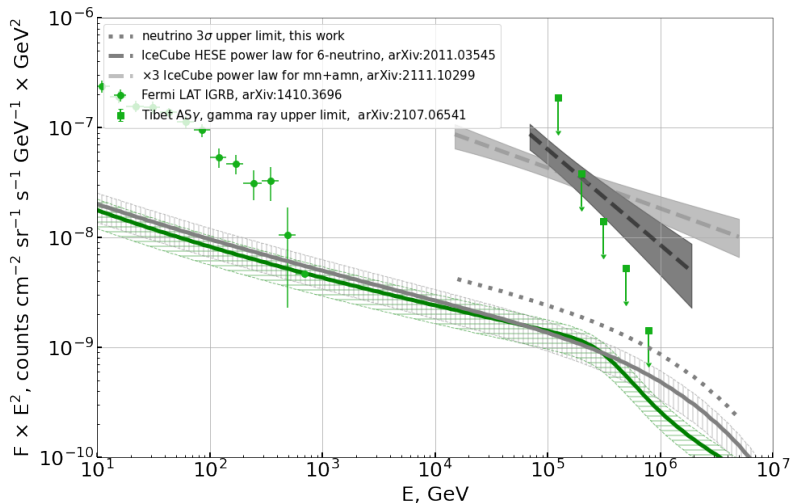


Рис.: Сравнение профилей плотности космолучей

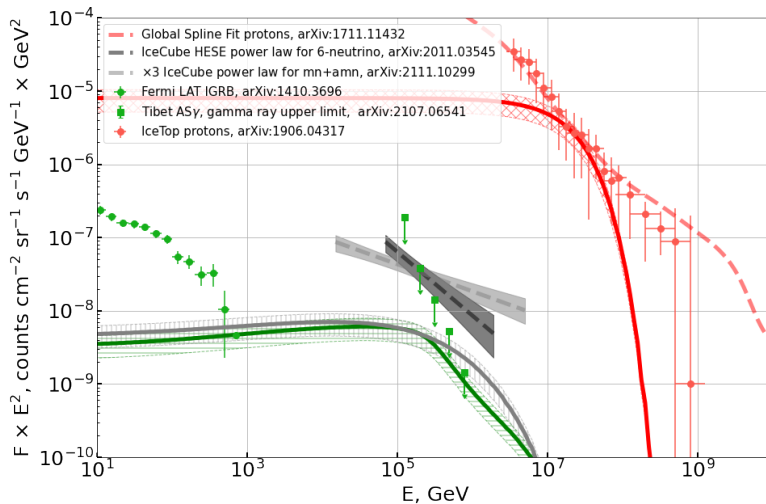
Результаты. Поток вторичных частиц



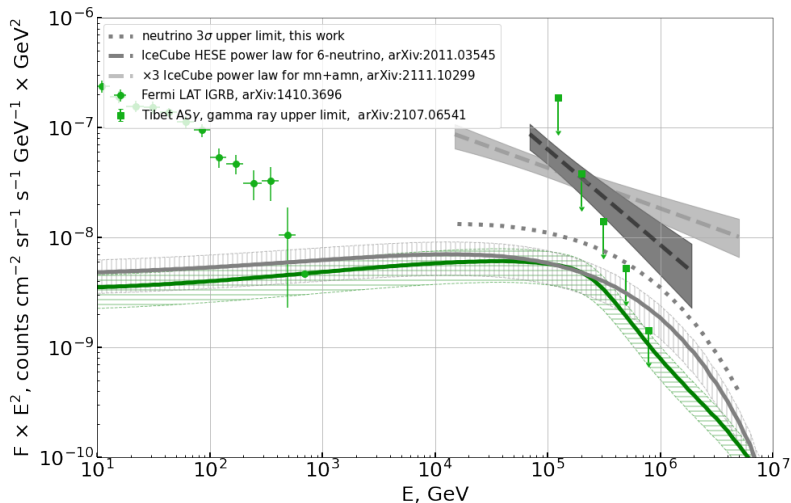
Результаты. Поток вторичных частиц



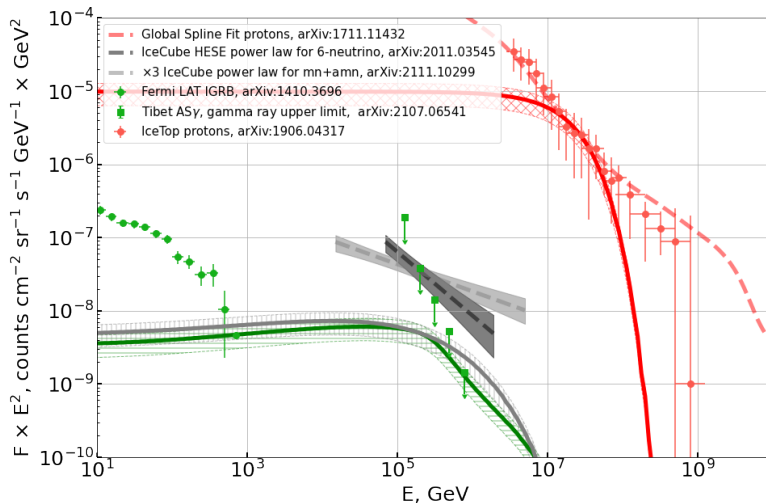
Результаты. Поток вторичных частиц



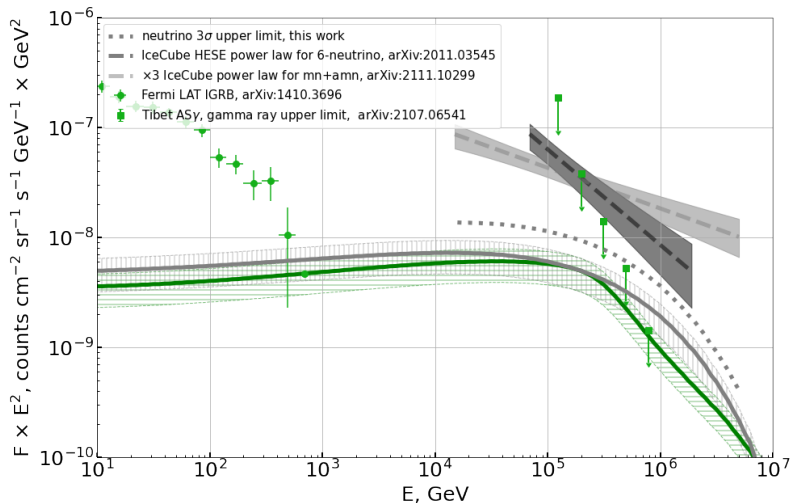
Результаты. Поток вторичных частиц



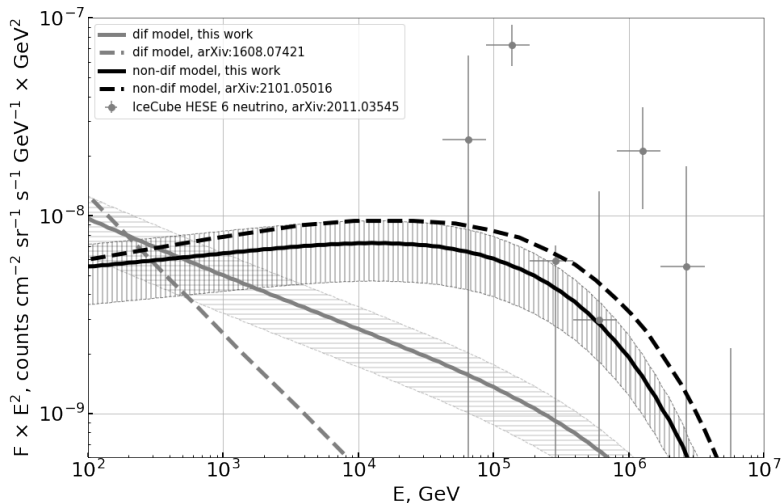
Результаты. Поток вторичных частиц



Результаты. Поток вторичных частиц



Результаты. Поток 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 γ , IceTop

Модель без диффузии:

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

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 ~ 4 раза ниже.

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

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

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

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

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

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

$$\xi = \frac{4\pi c}{H_0} \int dz \frac{n_{\text{gal}}^{1-\gamma}(z)(1+z)^{-2}}{\sqrt{\Omega_\Lambda + \Omega_M(1+z)^3}} (\rho_{\text{gal}}^*(z)/M_{\text{MW}}^*)^\gamma \times$$

$$\times \frac{\int_0^{R_{\text{vir, MW}}} dr r^2 n_{\text{CGM}}(r) n_{\text{CR}}(r)}{\int_{r_\odot}^{R_{\text{vir, MW}}} dr n_{\text{CGM}}(r) n_{\text{CR}}(r)}$$

$$\xi = \frac{4\pi c}{H_0} \int dz \frac{n_{\text{gal}}^{1-\gamma}(z)(1+z)^{-2}}{\sqrt{\Omega_{\Lambda} + \Omega_M(1+z)^3}} (\rho_{\text{gal}}^*(z)/M_{\text{MW}}^*)^{\gamma} \times$$
$$\frac{\int_0^{R_{\text{vir, MW}}} dr r^2 n_{\text{CGM}}(r) n_{\text{CR}}(r)}{\int_{r_{\odot}}^{R_{\text{vir, MW}}} dr n_{\text{CGM}}(r) n_{\text{CR}}(r)}$$

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

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_{MW}

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)