



ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В АНИЗОТРОПНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Борисов В.Д., Физический факультет МГУ
Юровский В. О., Физический факультет МГУ
Кудряшов И.А., НИИЯФ МГУ

Актуальность темы:

- Наблюдаются большие неоднородности в пространственном распределении вещества и магнитного поля Галактики.
- Отсутствует общепринятая трактовка изломов в спектре КЛ в районе $3 \cdot 10^{15}$ эВ (большое колено) и 10^{13} эВ (малое колено).
- Современные численные расчеты указывают на анизотропию диффузии.
- В настоящий момент существует большое количество различных моделей транспорта КЛ, начиная от простейшей "leaky-box" модели, включая такие численные модели как GALPROP, DRAGON и заканчивая моделями фрактальной аномальной диффузии. Мы предлагаем дополнить эти модели учетом анизотропии диффузии крупномасштабного транспорта космических лучей и учетом локальных особенностей микроскопического транспорта космических лучей в турбулентном магнитном поле.

Модель. Диффузионное уравнение:

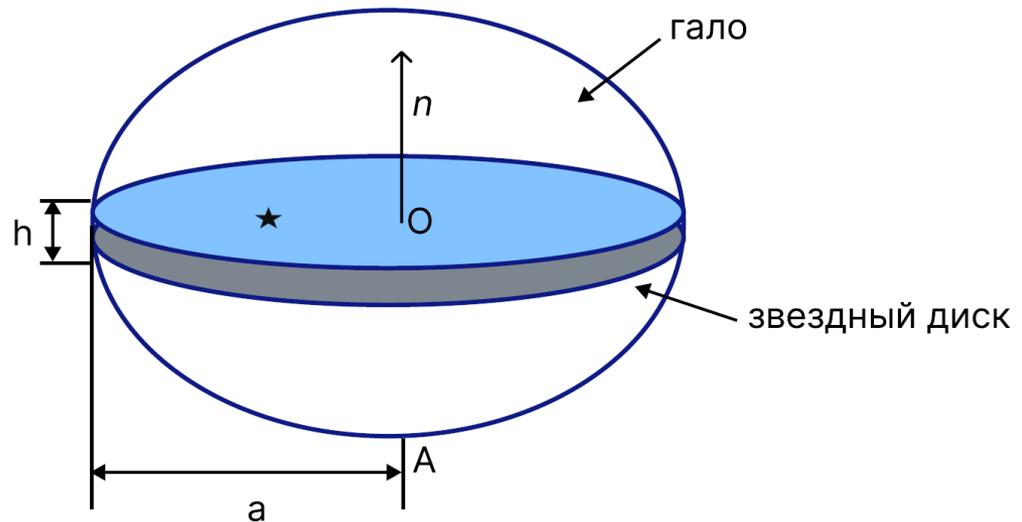
$$\nabla(\hat{D}\nabla f) = S(R, z)$$

$$\text{Где, } \hat{D} = \begin{pmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{yx} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} \end{pmatrix},$$

∇ – оператор набла, $S(R, z)$ –
Функция распределения
источников

Модельные параметры:

$h = 300$ пк, $a = 17$ кпк — большая полуось, $OA = 9$ кпк — радиус
гало Галактики.



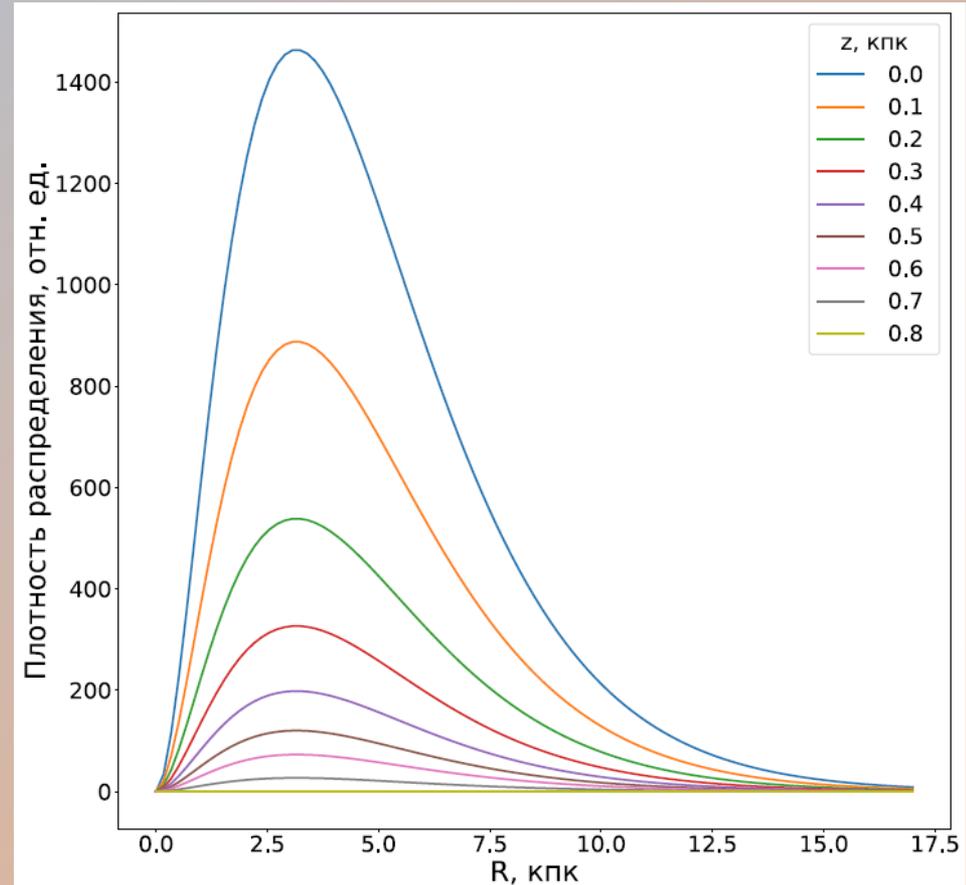
Распределение источников:

Yusifov I. & Kucuk I. 2004,
Moskalenko et. al. 2016

$$S(R, z) = \left(\frac{R}{R_{sun}} \right)^a \exp \left(-b \frac{R - R_{sun}}{R_{sun}} - \frac{|z|}{z_0} \right)$$

Где, $a = 1.9$, $b = 5$, $R_{sun} = 8.3$ Кпк,
 $z_0 = 0.2$ Кпк

График зависимости плотности
распределения источников. Цветом
показаны разные z .



Модель магнитного поля:

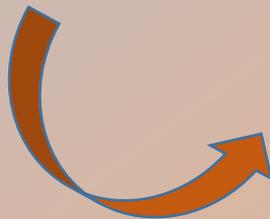
MICHAEL UNGER & GLENNYS R. FARRAR. 2024

$$B(r_0, \phi_0) = \sum_{m=1}^n B_m \cos(m(\phi_0 - \phi_m))$$

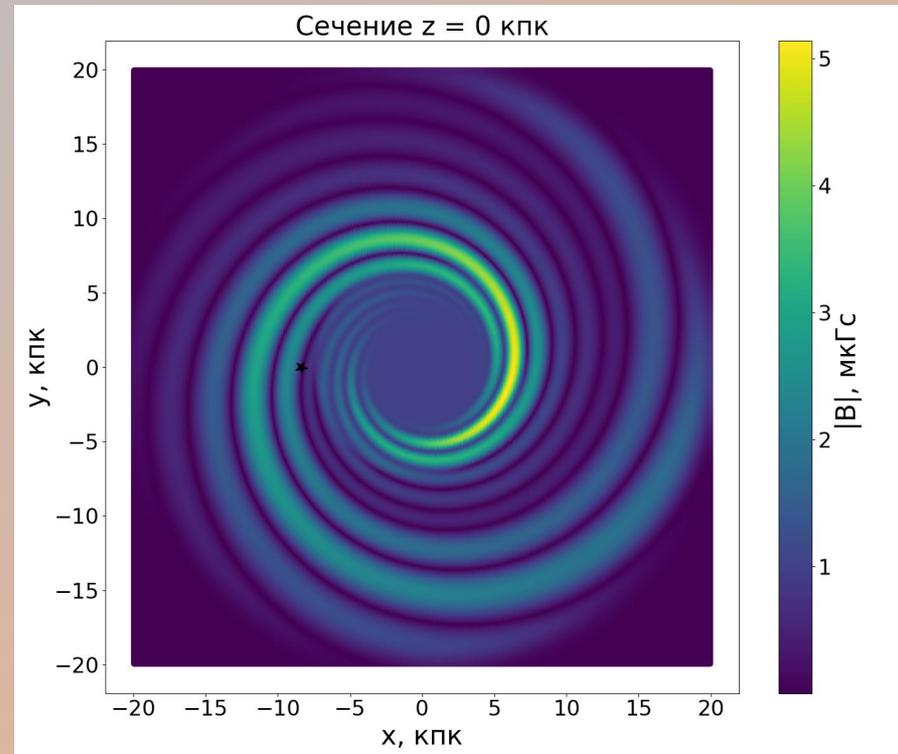
$$\mathbf{B}_d = (\sin \alpha, \cos \alpha, 0) \frac{r_0}{r} B(r_0, \phi_0) h_d(z) g_d(r),$$

Где,

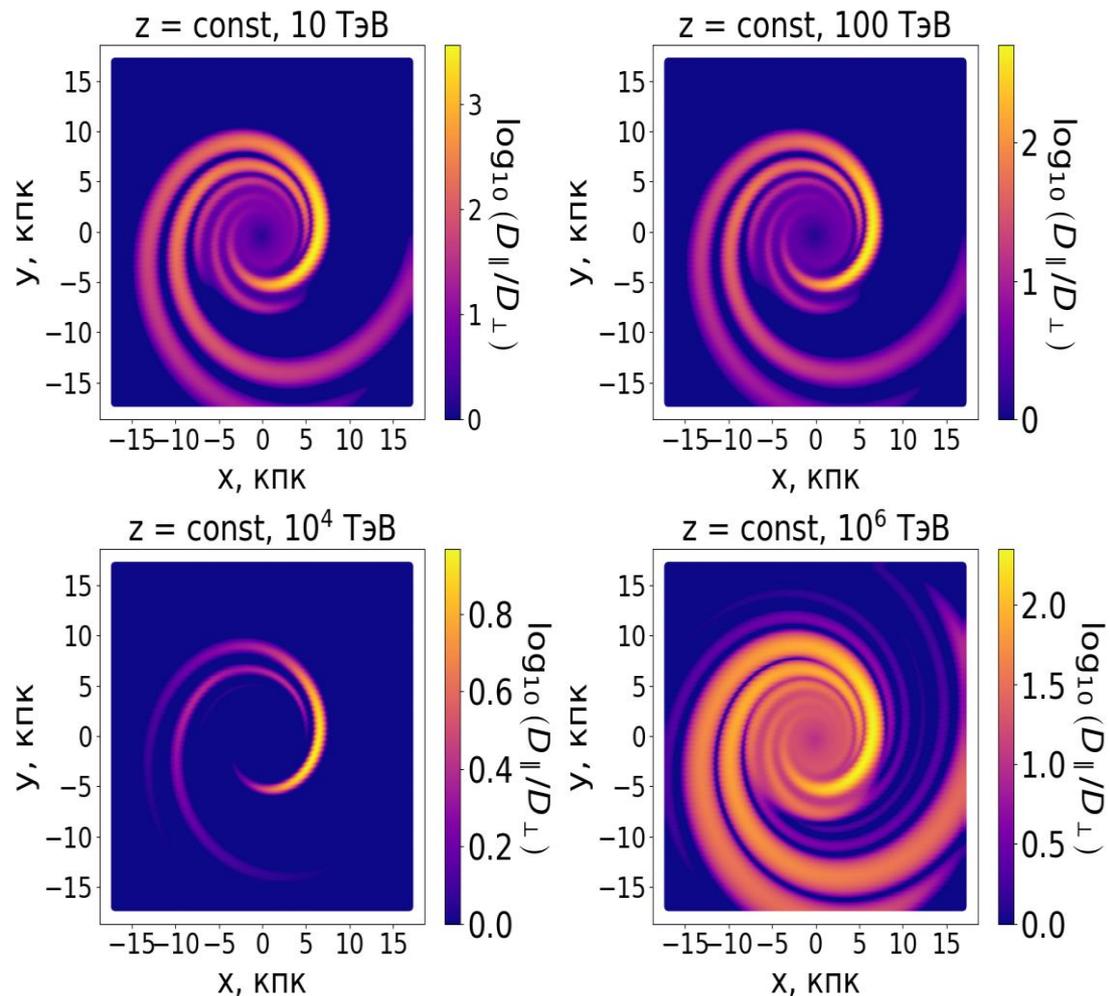
$$\phi_0 = \phi - \ln(r/r_0) / \operatorname{tg} \alpha.$$



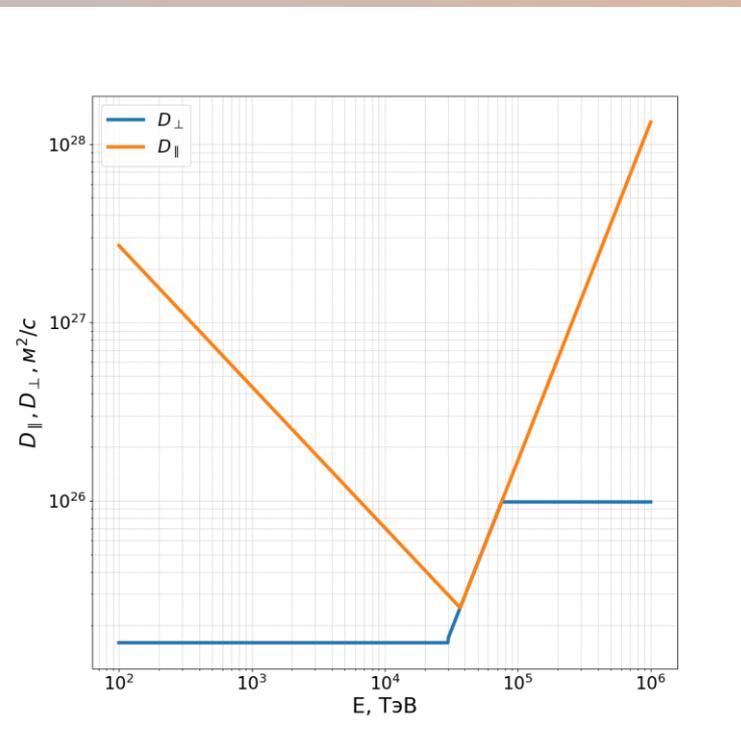
Магнитное поле в цилиндрической системе координат в точке (r, φ, z) задается выражением:



Энергетическая зависимость отношения компонент тензора диффузии :

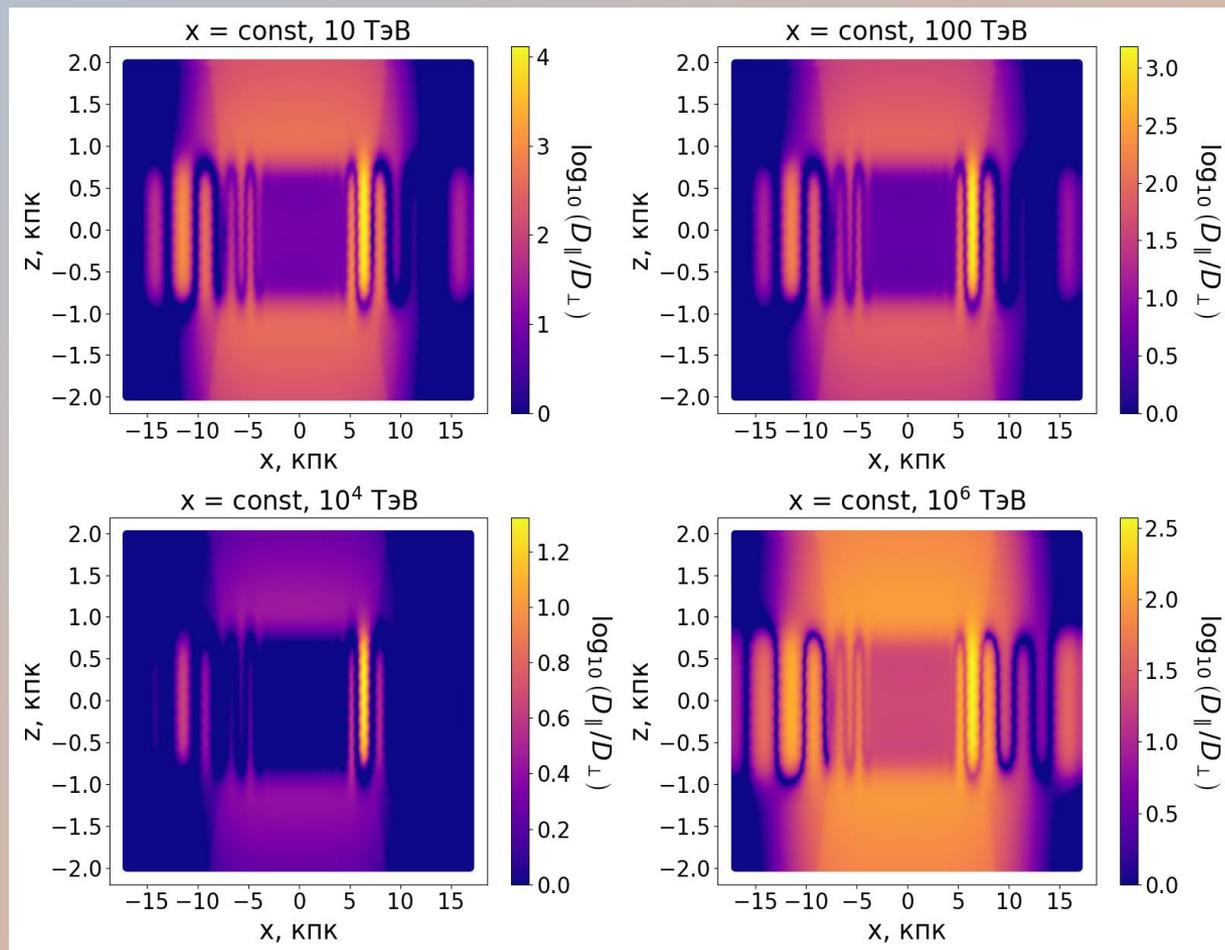


Графики зависимости $\log_{10}\left(\frac{D_{\parallel}}{D_{\perp}}\right)$ от координат в плоскости диска для разных E , ТэВ.



Энергетическая зависимость компонент тензора диффузии :

Графики зависимости $\log_{10} \left(\frac{D_{\parallel}}{D_{\perp}} \right)$ от координат для сечения диска $y = 0$ для разных E , ТэВ.



Разностная схема:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} D_{ij}(\vec{r}) \frac{\partial}{\partial x_j} f(\vec{r}) = S(\vec{r}), \quad \text{где } S(x_j) \text{ - концентрация источников в точке } \vec{r} = (x_1, x_2, x_3).$$

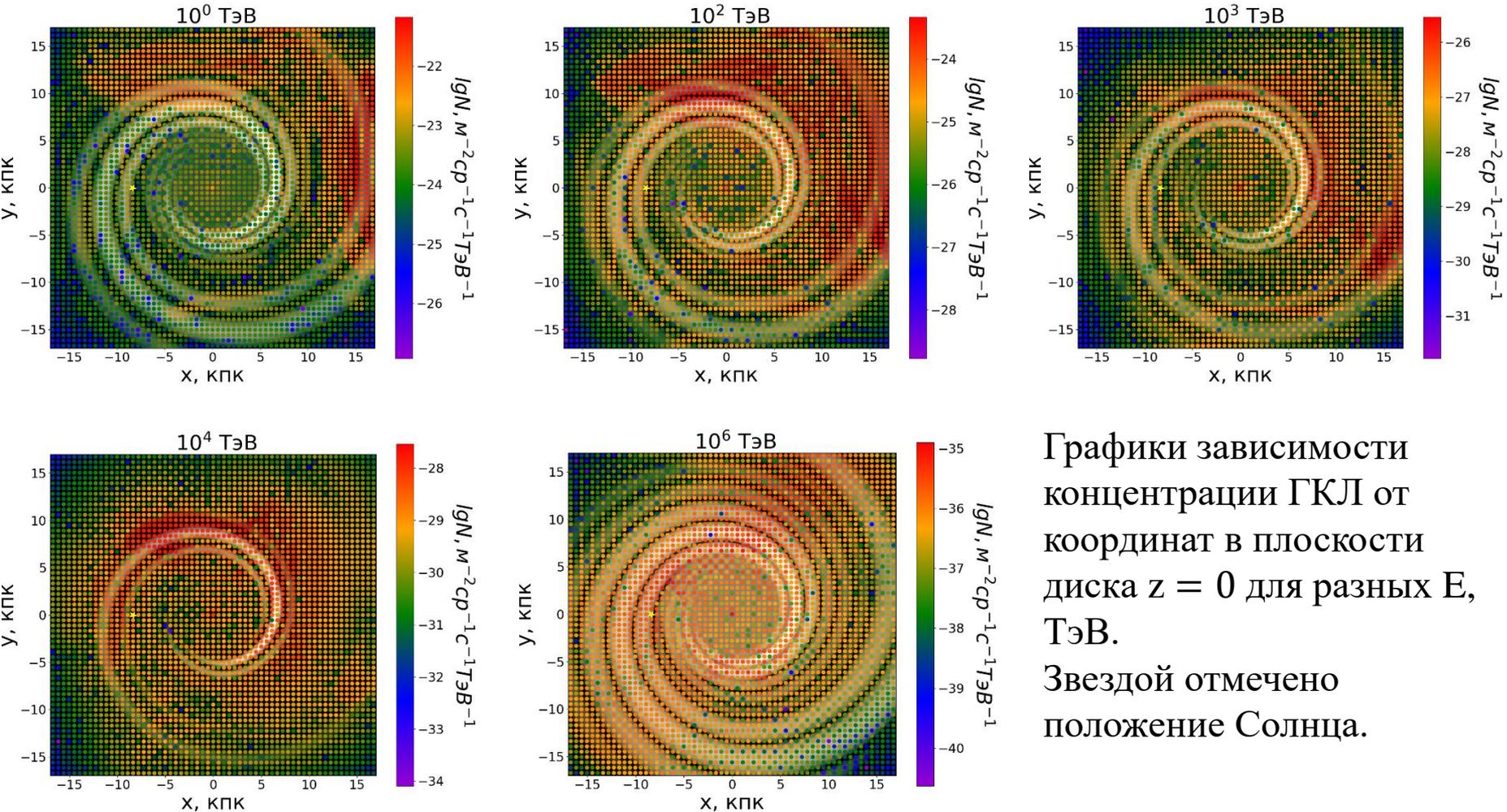
- Раскрытие всех производных до простых слагаемых вида:

$$\frac{\partial D_{ij}(\vec{r})}{\partial x_i} \frac{\partial f(\vec{r})}{\partial x_j} \quad \text{и} \quad D_{ij}(\vec{r}) \frac{\partial^2 f(\vec{r})}{\partial x_i \partial x_j}$$

- Рекурсивная замена:

$$\frac{\partial g(\vec{r})}{\partial x_i} \rightarrow \frac{g(\vec{r} + \vec{x}_i h_i) - g(\vec{r} - \vec{x}_i h_i)}{2h_i}$$

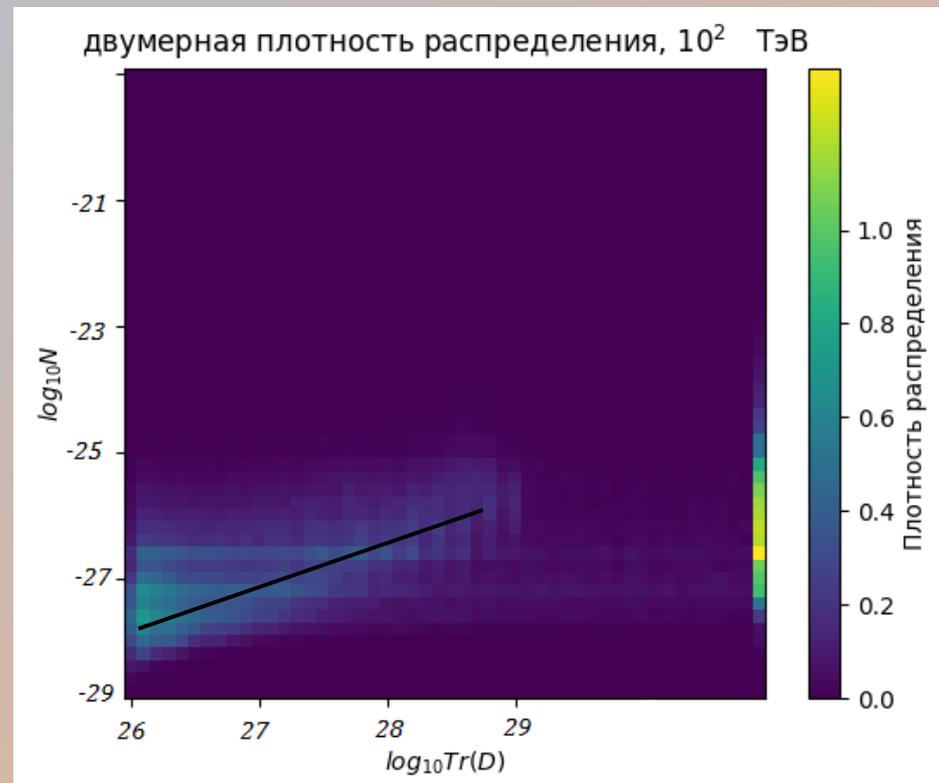
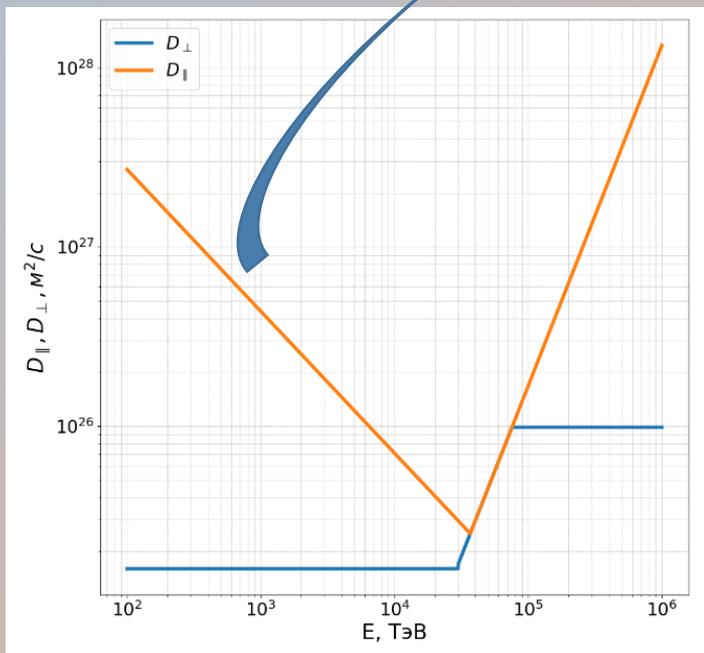
Результаты. Концентрации ГКЛ:



Графики зависимости концентрации ГКЛ от координат в плоскости диска $z = 0$ для разных E , ТэВ. Звездой отмечено положение Солнца.

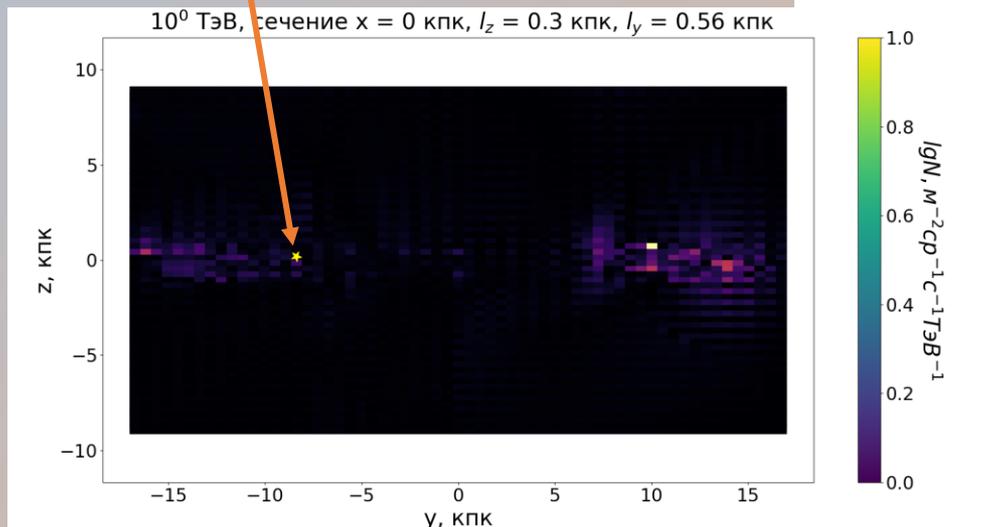
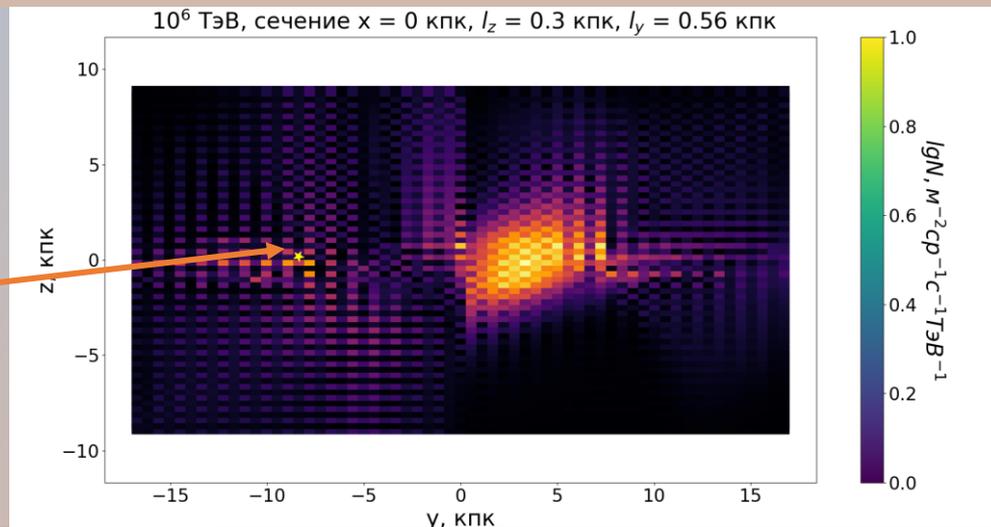
Корреляция концентрации КЛ и “вязкости” среды:

“Область до 30 ПэВ”



Направленные потоки истекания КЛ из диска в гало Галактики

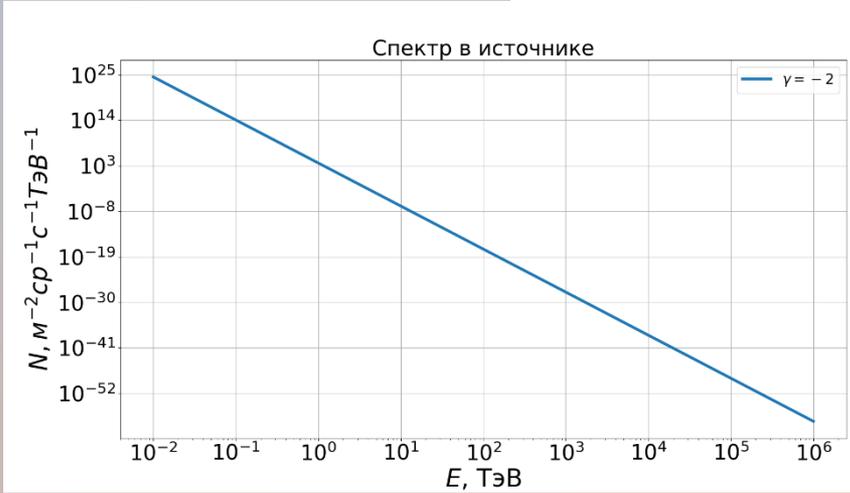
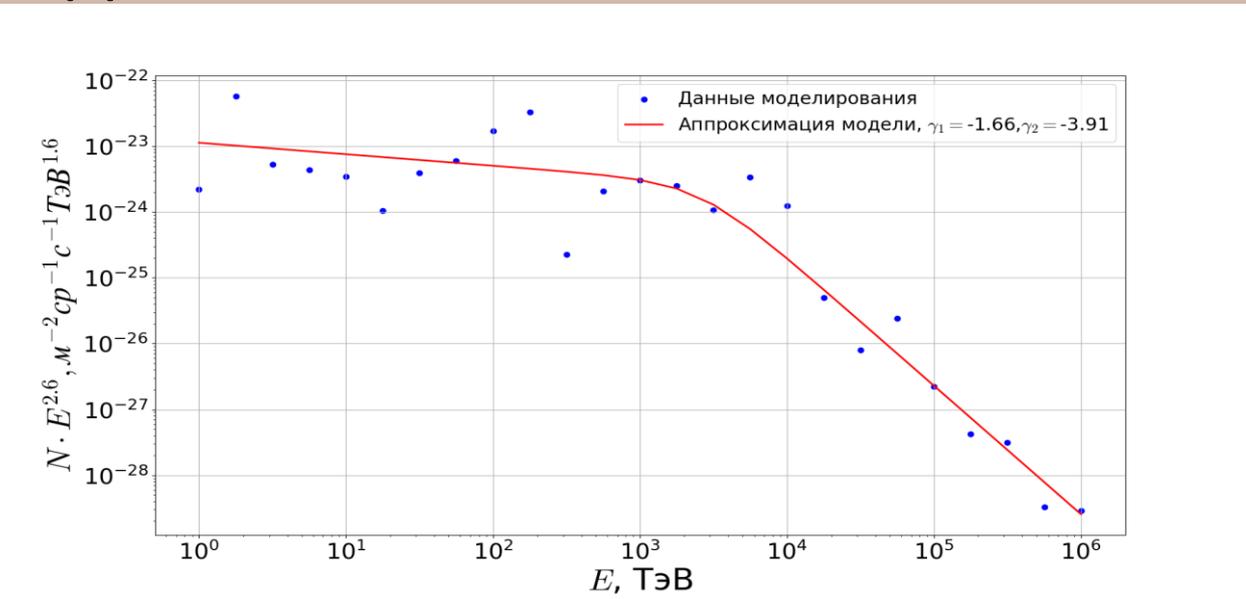
Положение
Солнца



Расчетное влияние транспорта на спектр ГКЛ в построенной модели:

Спектр в районе Солнца.
Положение излома 2.6 ПэВ

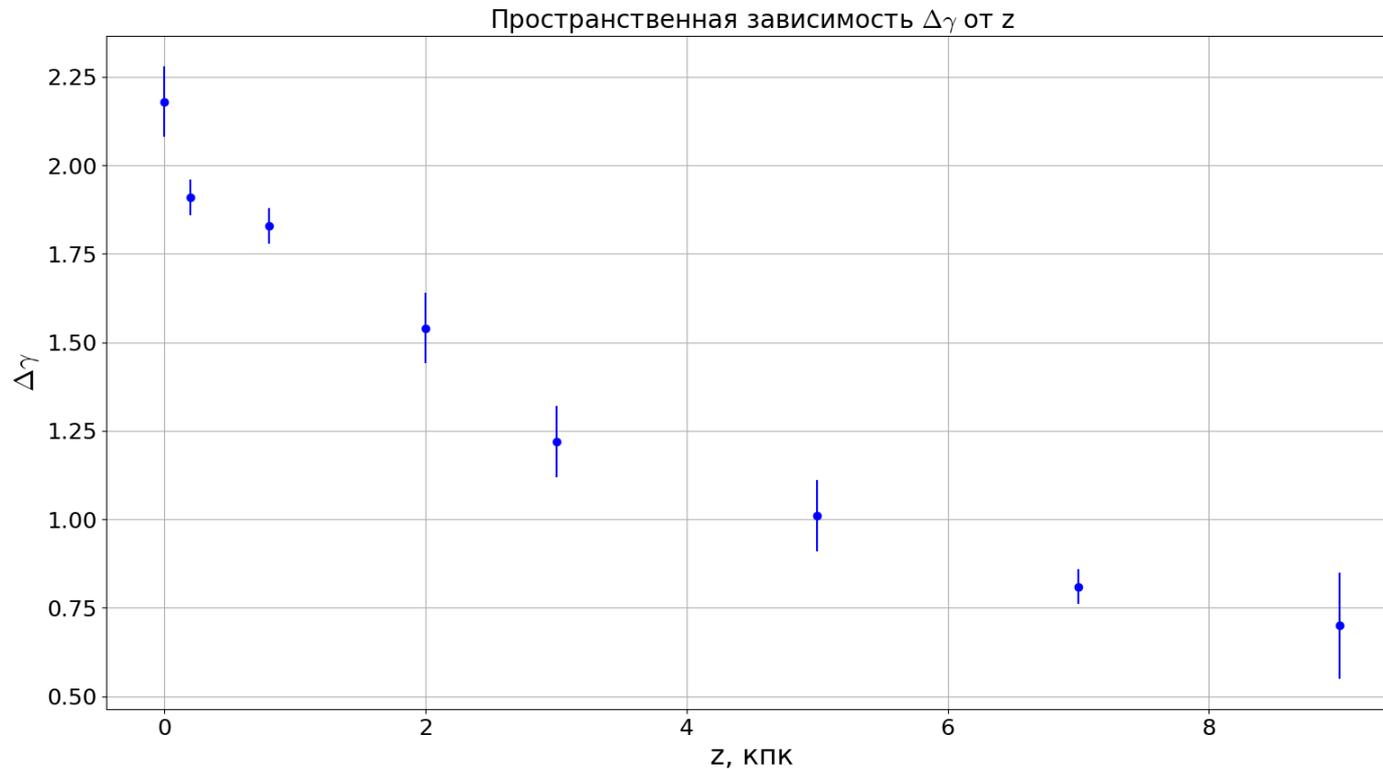
Стат. Значимость излома:
 $\sigma = 5.1$



$$F_s(\gamma_1, \gamma_2, N_0, E_0, E) = N_0 \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-\frac{\gamma_1}{2}} \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-\frac{\gamma_2}{2}} \left[\frac{(E_0/E)^{\frac{s}{2}} + (E/E_0)^{\frac{s}{2}}}{2} \right]^{\frac{\gamma_1 - \gamma_2}{s}}$$

Результаты 12

Спектр ГКЛ в различных точках Галактики:



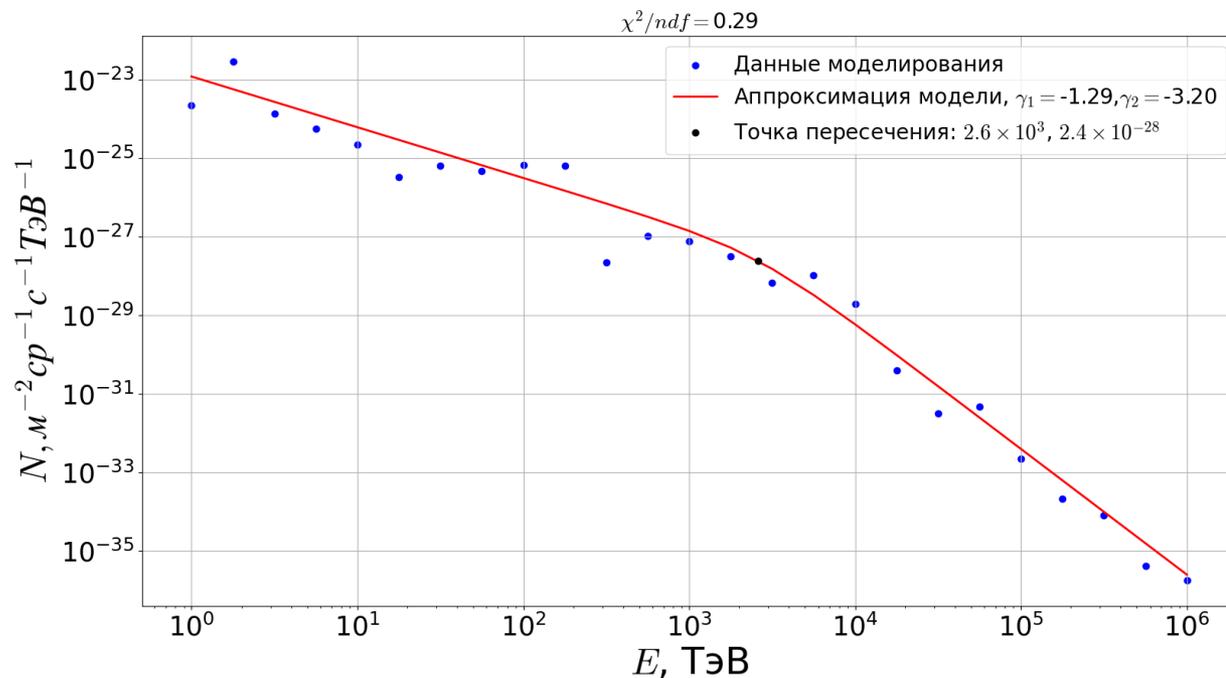
Характер модуляция спектра изменяется в зависимости от пространственного положения в Галактике.

Выводы:

1. В модельном магнитном поле, учитывающем крупномасштабную структуру Галактики, наблюдается немонотонное изменение компонент тензора диффузии, в зависимости от пространственного положения и энергии распространяющихся частиц.
2. На разных энергиях доминируют различные механизмы переноса заряженных частиц, ориентация крупномасштабного магнитного поля влияет на преимущественное направление диффузии частиц, т.е. наблюдается крупномасштабная анизотропия. В разных частях галактики концентрации частиц одной энергии существенно отличаются.
3. Распространение КЛ носит сложный характер: при магнитной жесткости менее нескольких десятков ТВ доминирует перенос заряженных частиц в плоскости диска Галактики вдоль рукавов, при высокой жесткости ($10^5 - 10^6$ ТВ) — существенную роль играет, как распределение источников, так и крупномасштабная структура магнитного поля (наблюдается утечка КЛ в гало Галактики).
4. В построенной модели со степенным спектром в источнике наблюдается модуляция спектра в виде “излома” в энергетическом спектре КЛ. Положение излома изменяется в диапазоне от нескольких ПэВ до 30 ПэВ. Модуляция может влиять на формирование излома Куликова – Христиансена наряду с другими эффектами.

Спасибо за внимание!

Расчетное влияние транспорта на спектр ГКЛ в построенной модели:



Сглаживание:

$$s = 2.4$$

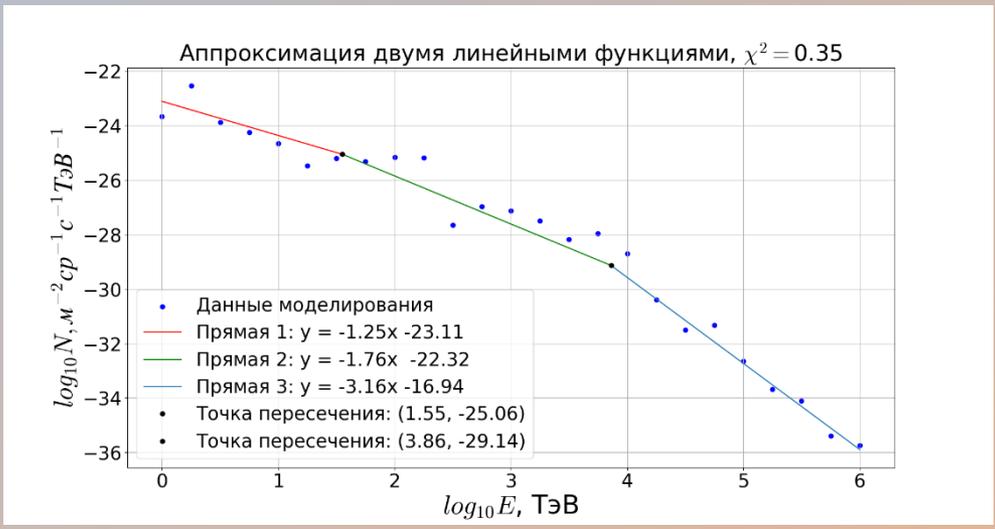
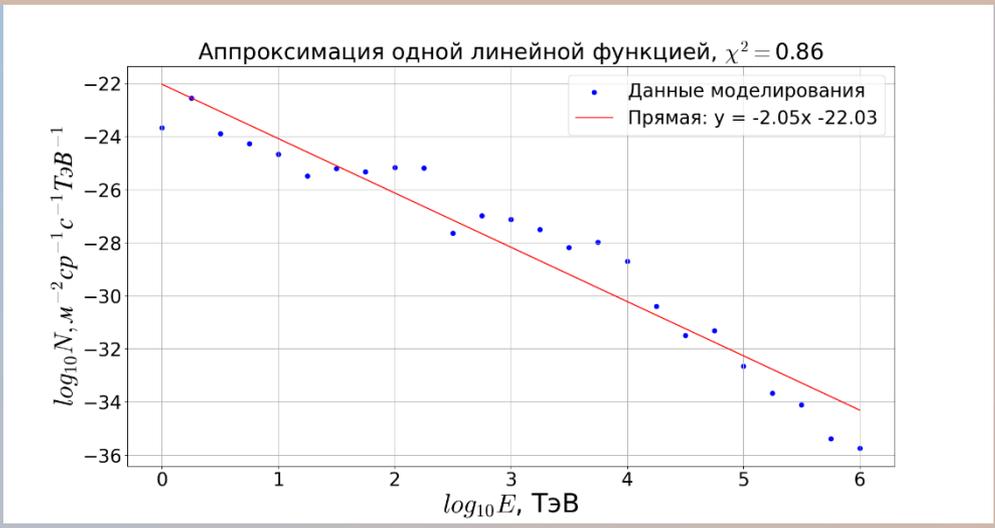
Стат. Значимость:

$$\sigma_{grad} = 5.1$$

$$\sigma_{diff} = 4.9$$

$$F_s(\gamma_1, \gamma_2, N_0, E_0, E) = N_0 \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-\frac{\gamma_1}{2}} \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-\frac{\gamma_2}{2}} \left[\frac{(E_0/E)^{\frac{s}{2}} + (E/E_0)^{\frac{s}{2}}}{2} \right]^{\frac{\gamma_1 - \gamma_2}{s}}$$

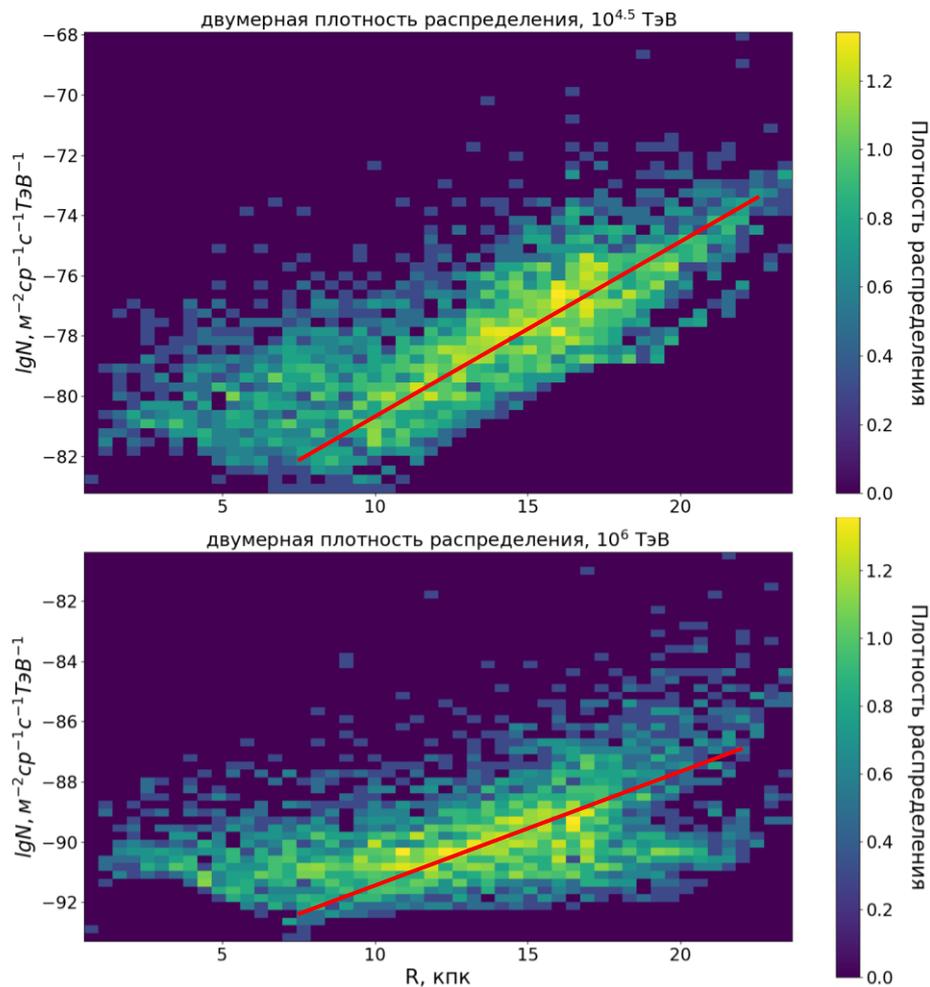
Расчетное влияние транспорта на спектр ГКЛ:



Аппроксимация:
 $E^{-\gamma}$

Стат. Значимость:
 $\sigma_1 = 1.7$
 $\sigma_2 = 2.1$

Пространственная корреляция:



$\Delta\gamma$	σ_{grad}	σ_{dif}	s	z, кпк
2.18	5.2	5.3	2.8	0
1.91	4.9	5.1	2.4	0.2
1.83	5.0	5.2	2.6	0.8
1.54	4.9	4.9	2.7	2
1.22	3.1	3.2	2.6	3
1.01	3.4	3.4	2.4	5
0.81	4.9	4.8	2.5	7
0.7	3.7	3.7	2.7	9

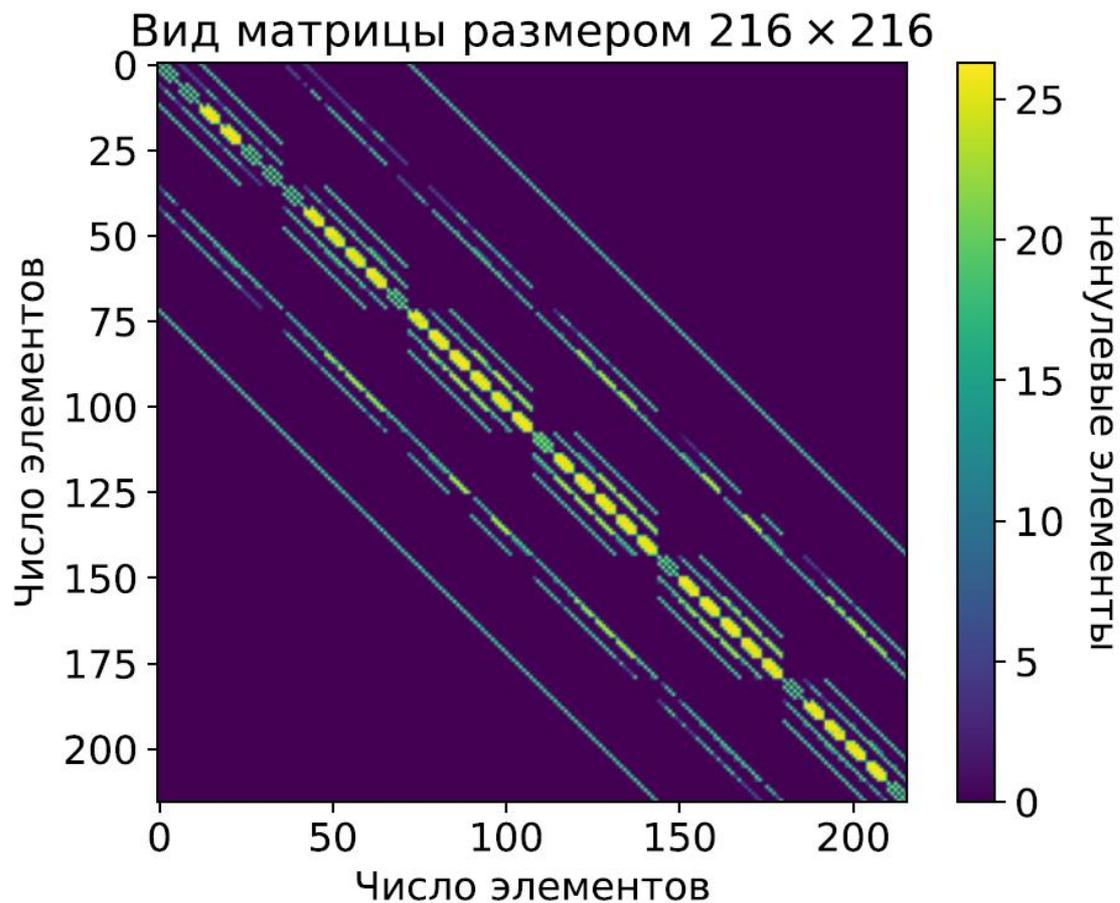
Шаблон разностной схемы:

$$A_{ij}N^j = S_i$$

A_{ij} — разреженная матрица,

N^j — столбец решений,

S_i — столбец источников.



Покомпонентная запись тензора \widehat{D}

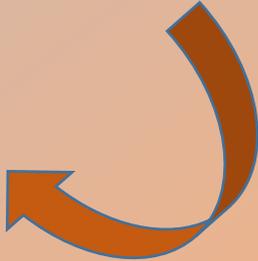
$$\begin{aligned}
 & D[0][0](x, y, z) \frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x, y, z) + D[0][1](x, y, z) \frac{\partial^2}{\partial y \partial x} f(x, y, z) + D[0][2](x, y, z) \frac{\partial^2}{\partial z \partial x} f(x, y, z) + D[1][0](x, y, z) \frac{\partial^2}{\partial y \partial x} f(x, y, z) + \\
 & D[1][1](x, y, z) \frac{\partial^2}{\partial y^2} f(x, y, z) + D[1][2](x, y, z) \frac{\partial^2}{\partial z \partial y} f(x, y, z) + D[2][0](x, y, z) \frac{\partial^2}{\partial z \partial x} f(x, y, z) + D[2][1](x, y, z) \frac{\partial^2}{\partial z \partial y} f(x, y, z) + \\
 & D[2][2](x, y, z) \frac{\partial^2}{\partial z^2} f(x, y, z) + \frac{\partial}{\partial x} D[0][0](x, y, z) \frac{\partial}{\partial x} f(x, y, z) + \frac{\partial}{\partial y} D[0][1](x, y, z) \frac{\partial}{\partial x} f(x, y, z) + \frac{\partial}{\partial z} D[0][2](x, y, z) \frac{\partial}{\partial x} f(x, y, z) + \\
 & \frac{\partial}{\partial x} D[1][0](x, y, z) \frac{\partial}{\partial y} f(x, y, z) + \frac{\partial}{\partial y} D[1][1](x, y, z) \frac{\partial}{\partial y} f(x, y, z) + \frac{\partial}{\partial z} D[1][2](x, y, z) \frac{\partial}{\partial y} f(x, y, z) + \frac{\partial}{\partial x} D[2][0](x, y, z) \frac{\partial}{\partial z} f(x, y, z) + \\
 & \frac{\partial}{\partial y} D[2][1](x, y, z) \frac{\partial}{\partial z} f(x, y, z) + \frac{\partial}{\partial z} D[2][2](x, y, z) \frac{\partial}{\partial z} f(x, y, z)
 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_1} D_{11} \frac{\partial f}{\partial x_1} \approx \frac{1}{h_1^2} \left(\frac{D_{11;i+1,jk} + D_{11;ijk}}{2} (f_{i+1,jk} - f_{ijk}) + \frac{D_{11;i-1,jk} + D_{11;ijk}}{2} (f_{i-1,jk} - f_{ijk}) \right)$$

Разностная аппроксимация
главных компонент:

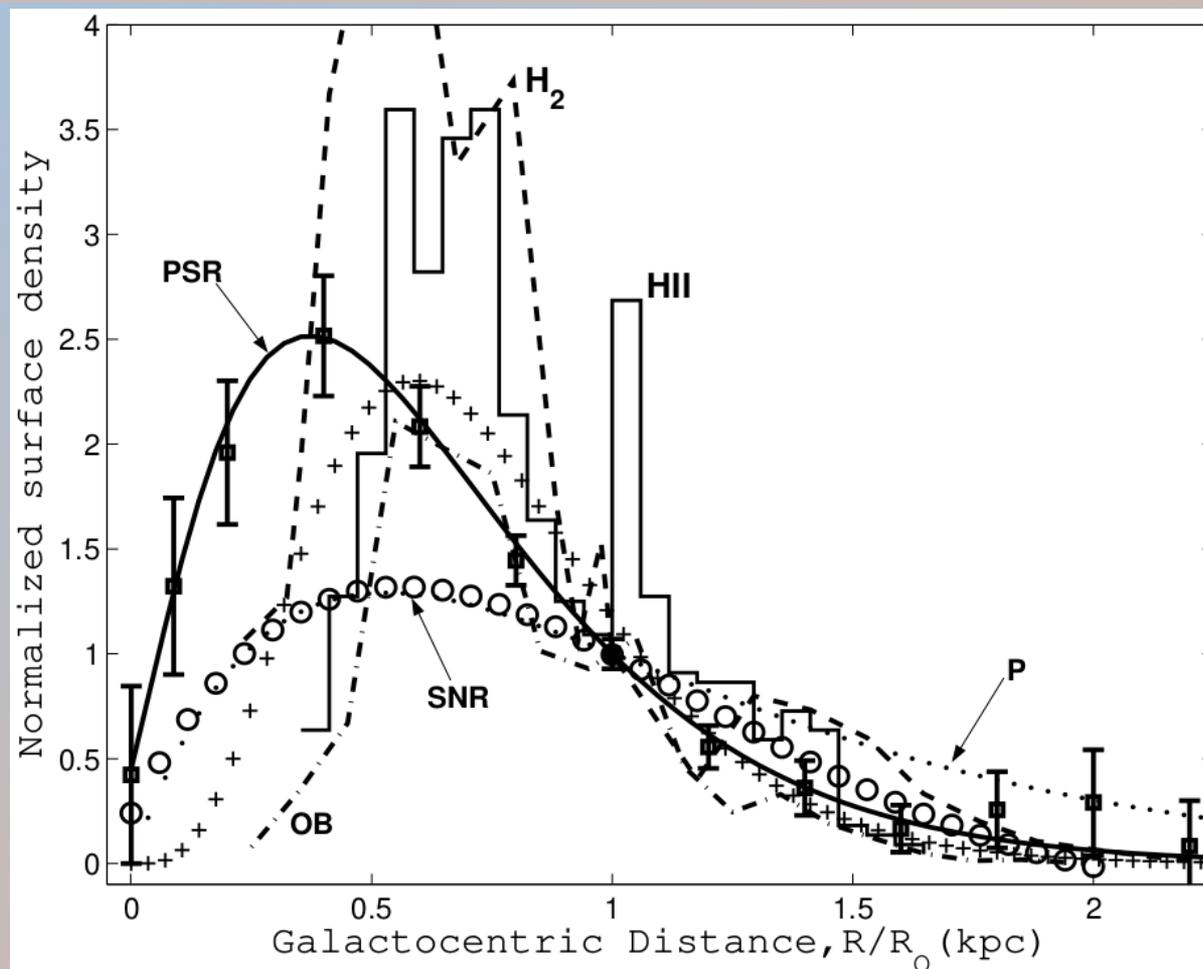
$$\frac{\partial}{\partial x_2} D_{22} \frac{\partial f}{\partial x_2} \approx \frac{1}{h_2^2} \left(\frac{D_{22;i,j+1,k} + D_{22;ijk}}{2} (f_{i,j+1,k} - f_{ijk}) + \frac{D_{22;i,j-1,k} + D_{22;ijk}}{2} (f_{i,j-1,k} - f_{ijk}) \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_3} D_{33} \frac{\partial f}{\partial x_3} \approx \frac{1}{h_3^2} \left(\frac{D_{33;i,j,k+1} + D_{33;ijk}}{2} (f_{i,j,k+1} - f_{ijk}) + \frac{D_{33;i,j,k-1} + D_{33;ijk}}{2} (f_{i,j,k-1} - f_{ijk}) \right)$$



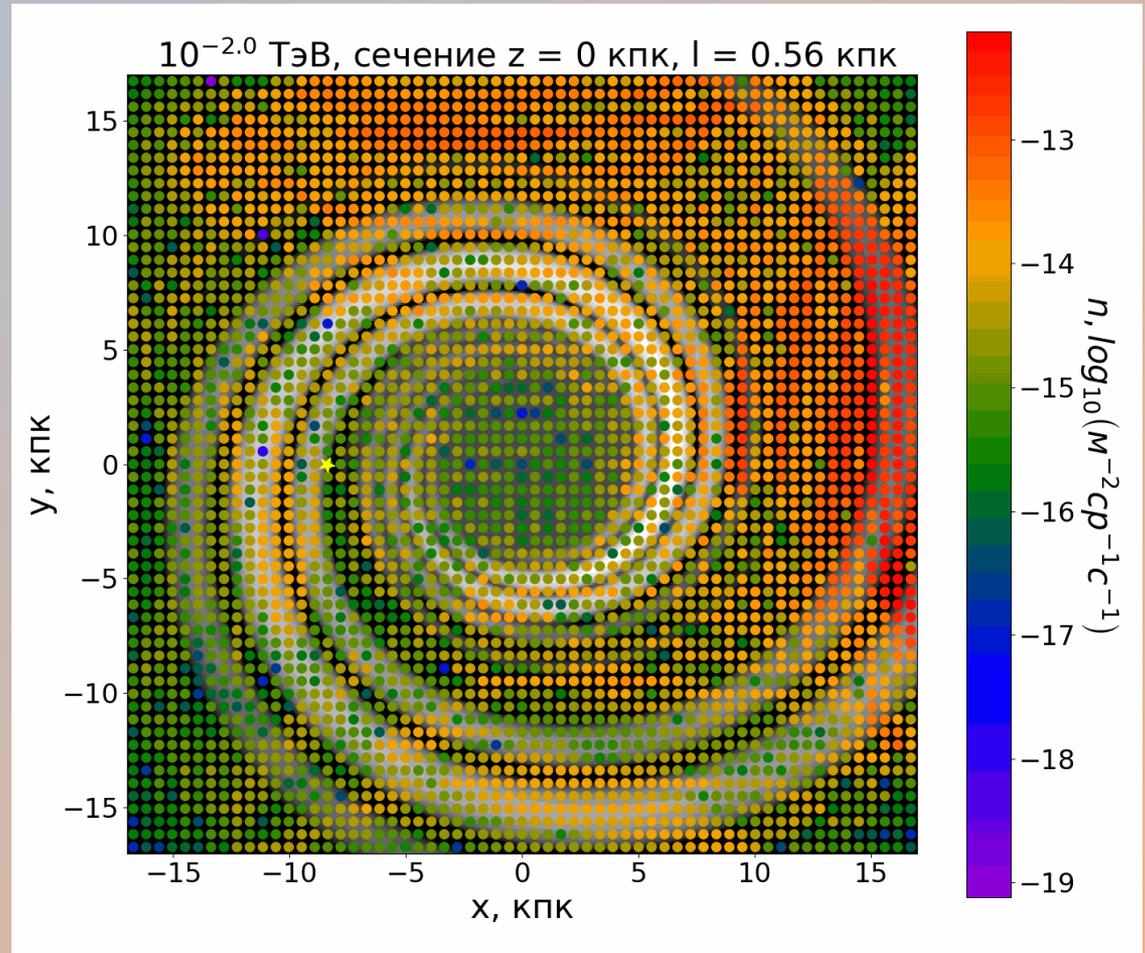
Распределение источников:

Yusifov I. & Kucuk I. 2004



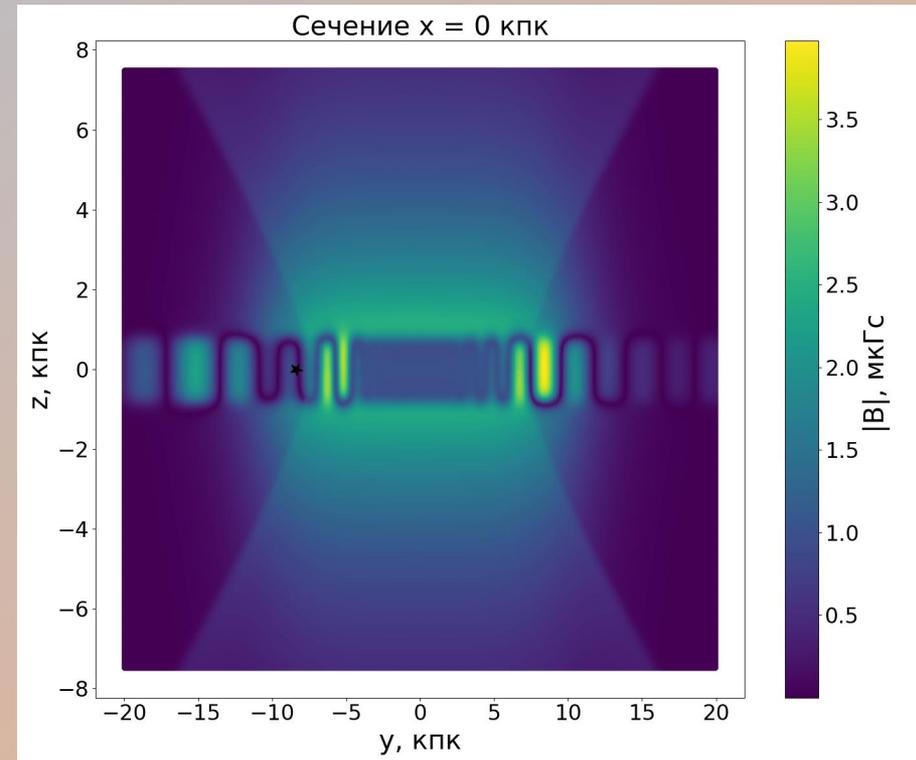
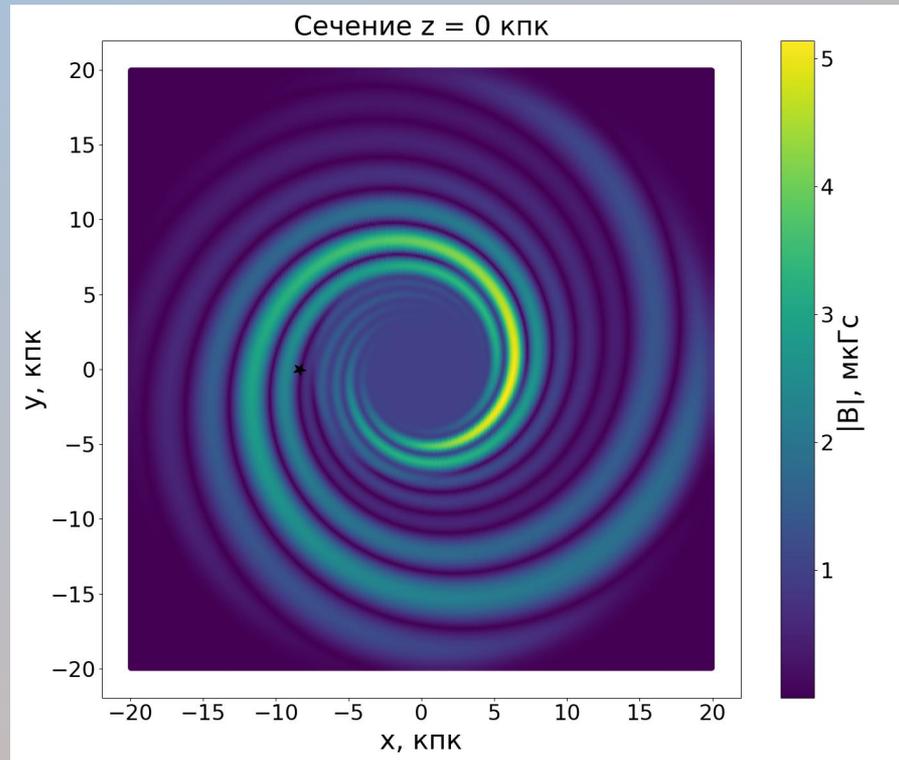
Концентрации ГКЛ:

Графики зависимости концентрации ГКЛ от координат в плоскости диска $z = 0$ для разных E , ТэВ. Звездой отмечено положение Солнца.

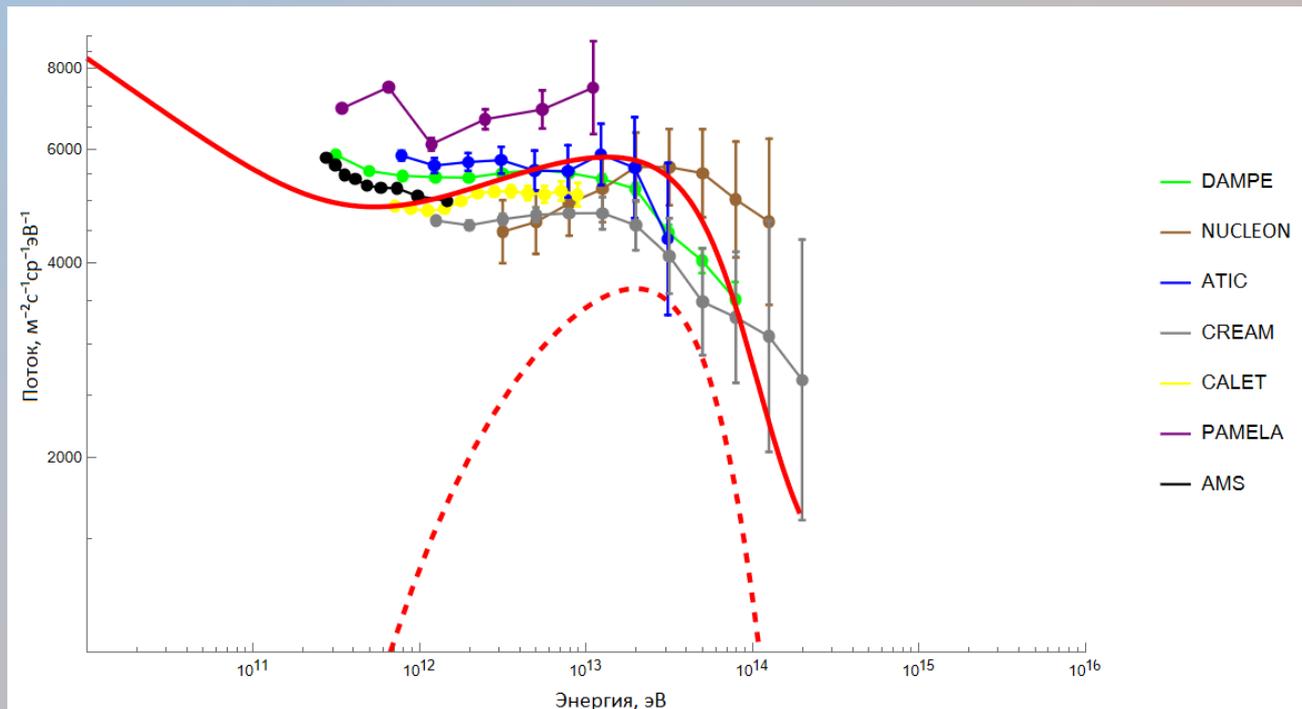


Крупномасштабное магнитное поле Галактики

MICHAEL UNGER & GLENNYS R. FARRAR. 2024



Энергетический спектр в районе магнитной жесткости 10 ТВ



$$F_{summ} = F_{bgr}(R) + F(R),$$

$$F_{bgr}(R) = a_0 R^{-\gamma}, \text{ где}$$

параметры a_0 и γ

брались из данных экспериментов NUCLEON, ATIC, AMS и DAMPE по протонам в области 50 – 3000 ГэВ

Аппроксимация экспериментальных данных: красная пунктирная линия – наблюдаемый вклад близкого источника Vela Junior, красная сплошная линия – суперпозиция фона и спектра источника