Физический факультет
Московского
государственного университета
имени М.В.Ломоносова

Численная модель распространения космических лучей в условиях анизотропной диффузии

Борисов В. Д.

Перятинская А.И., Кудряшов И.А.

Мотивация & Цели:

Проблема:

•стандартные модели предполагают изотропную диффузию;

•галактическое магнитное поле имеет выраженную структуру;

Следствие:

•перенос вдоль и поперёк поля различается;

•Это напрямую влияет на интерпретацию спектров космических лучей и поиск новых физических эффектов;

Цель:

•учесть анизотропию диффузии в модели переноса КЛ.

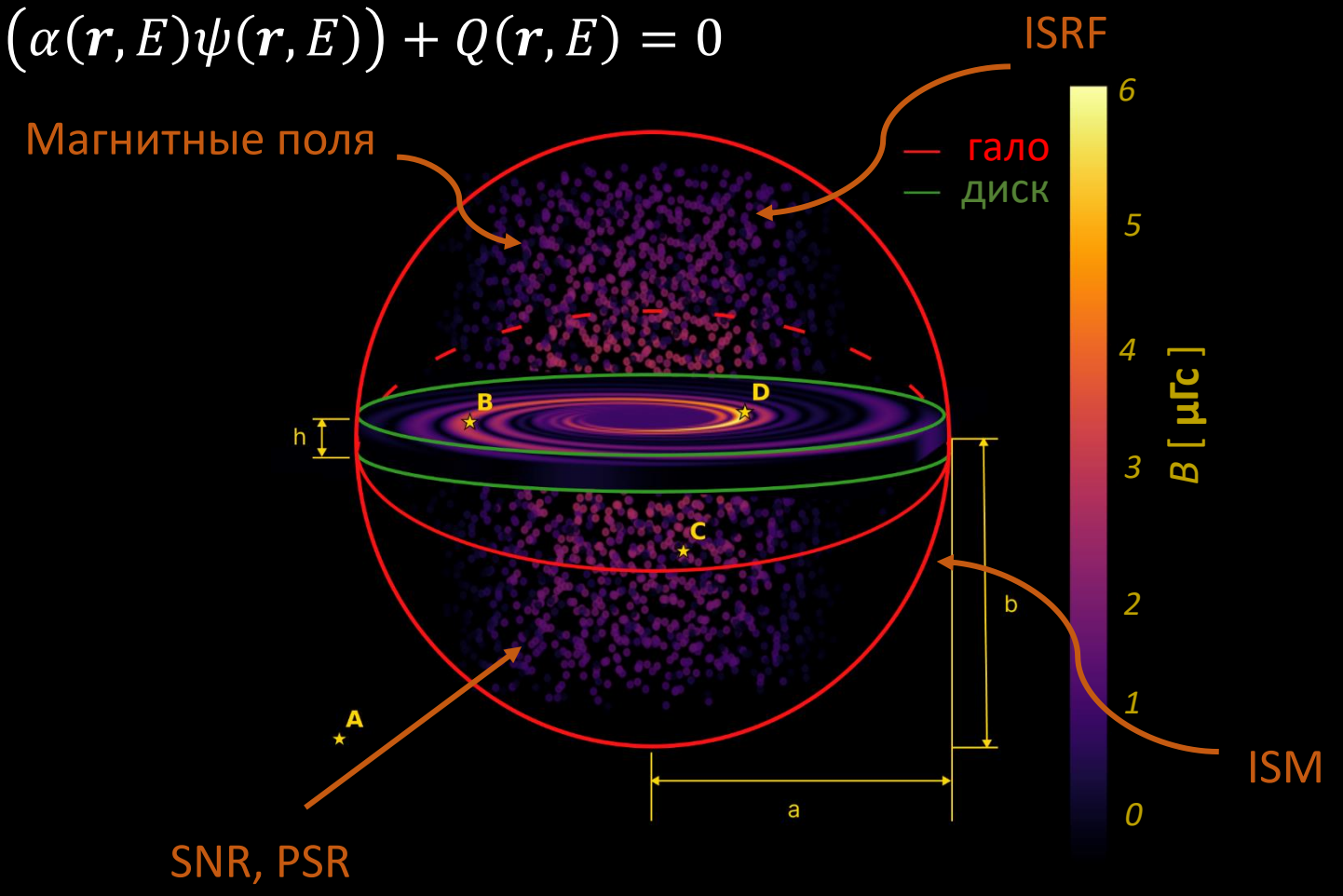
Модель. Диффузионное уравнение:

$$\nabla \widehat{D}_{ij}(\boldsymbol{B}(\boldsymbol{r}), E)\nabla\psi(\boldsymbol{r}, E)) - \frac{\partial}{\partial E}\big(\alpha(\boldsymbol{r}, E)\psi(\boldsymbol{r}, E)\big) + Q(\boldsymbol{r}, E) = 0$$

Здесь тензор

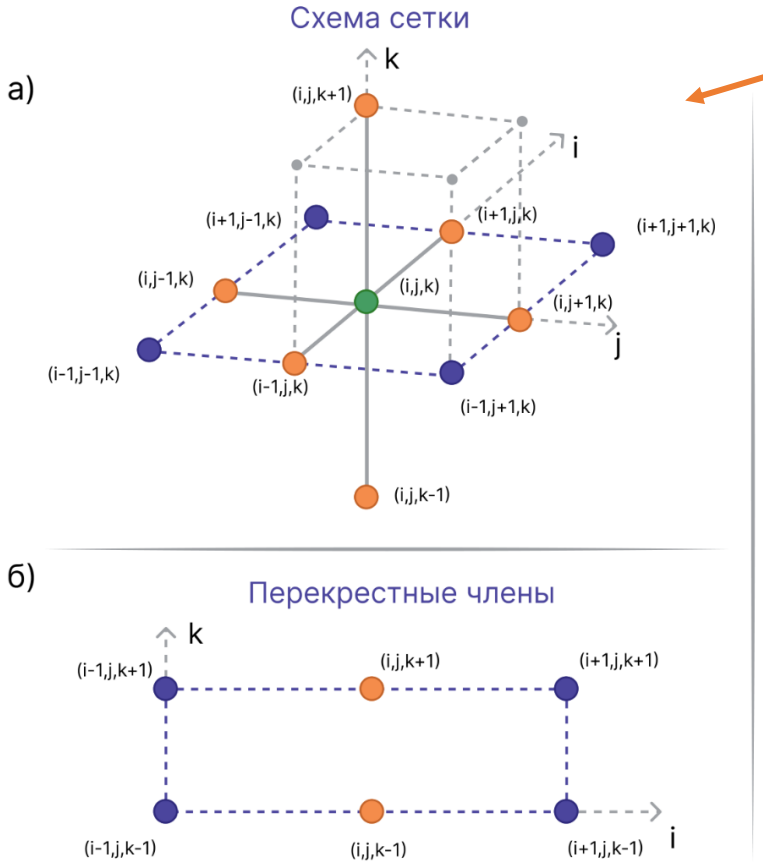
$$\widehat{D}_{ij} = \begin{pmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{yx} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} \end{pmatrix},$$

перенос КЛ зависит от направления.

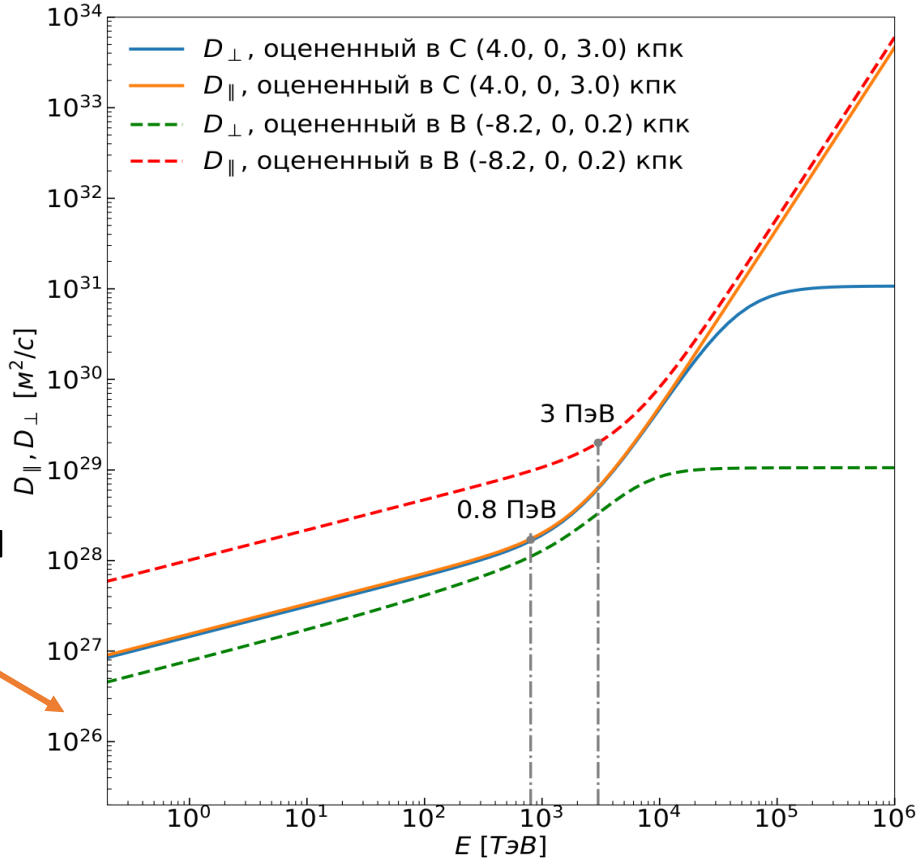


Метод численного решения:

Разработана 4D-разностная схема (x, y, z, E) с 19-точечным шаблоном, что позволило корректно учесть анизотропию;



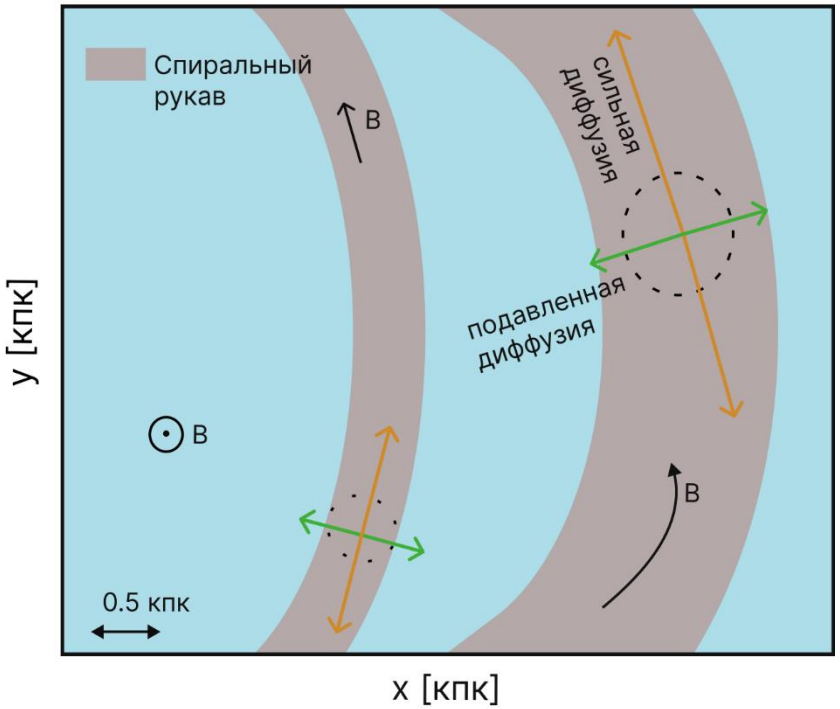
Компоненты тензора.

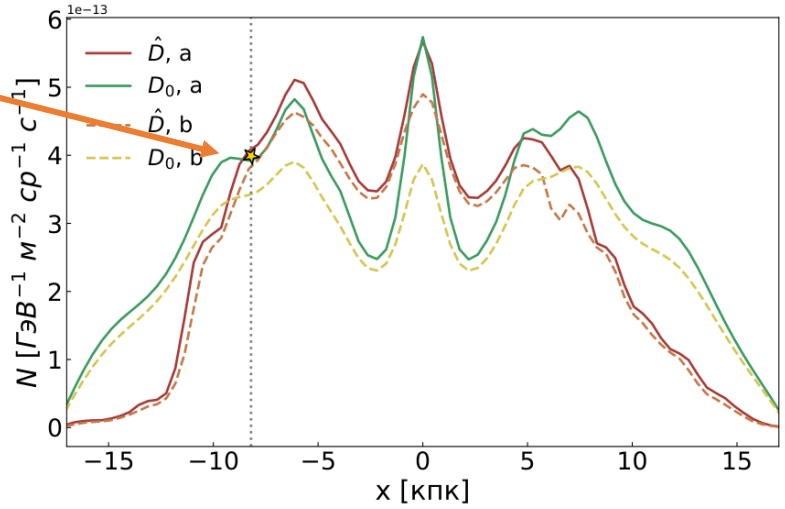


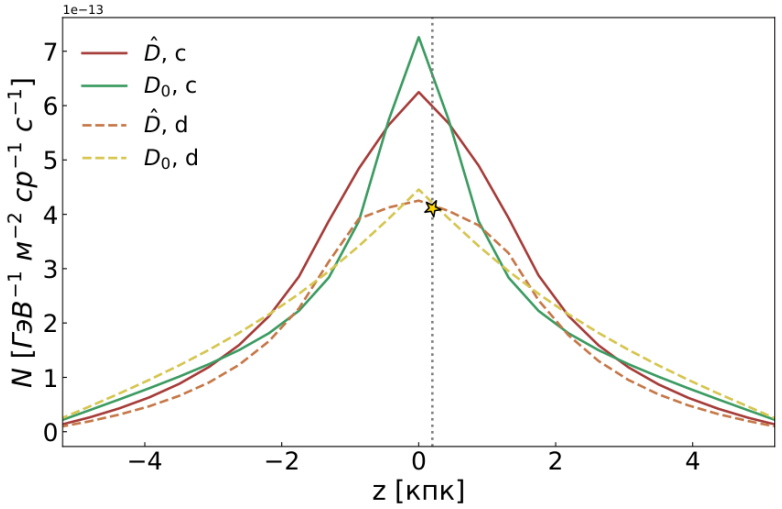
Результаты. Пространственное распределение:

Влияние анизотропной диффузии;

Схема «вымывания КЛ вдоль рукава».



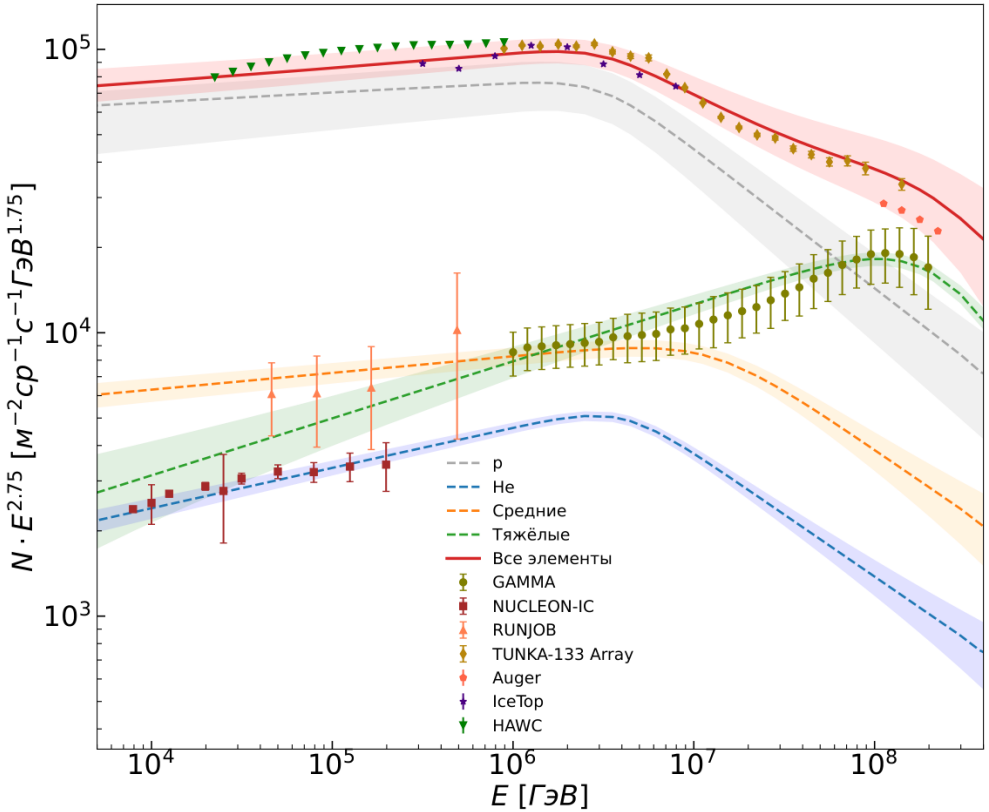


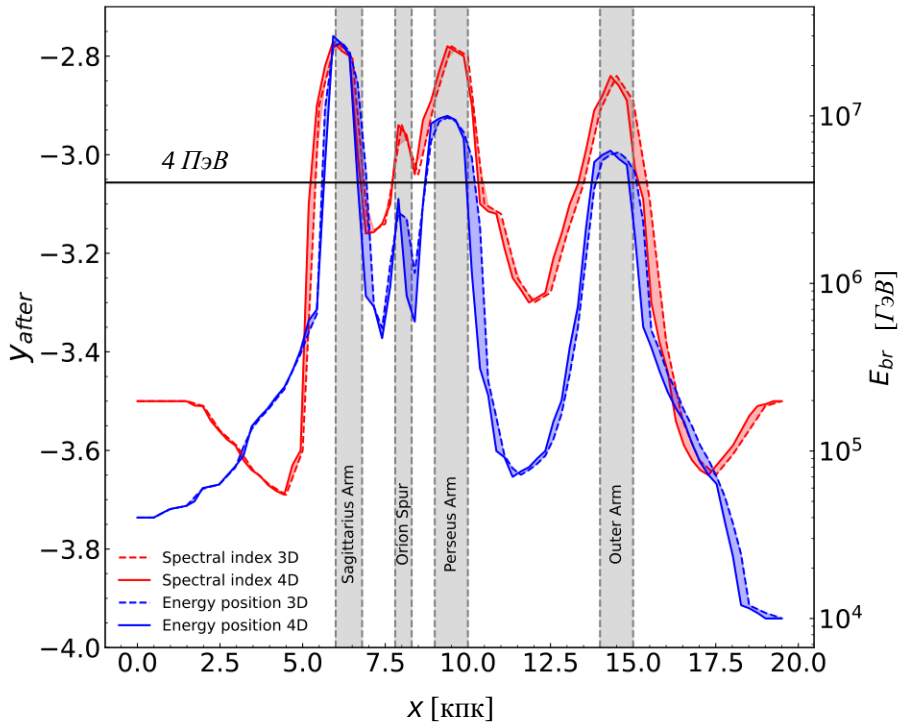


- Анизотропная модель → перенос вдоль линий магнитного поля;
- Изотропная модель → гладкое распределение.

Спектры ядер КЛ:

Энергетический спектр КЛ зависит от положения в Галактике;

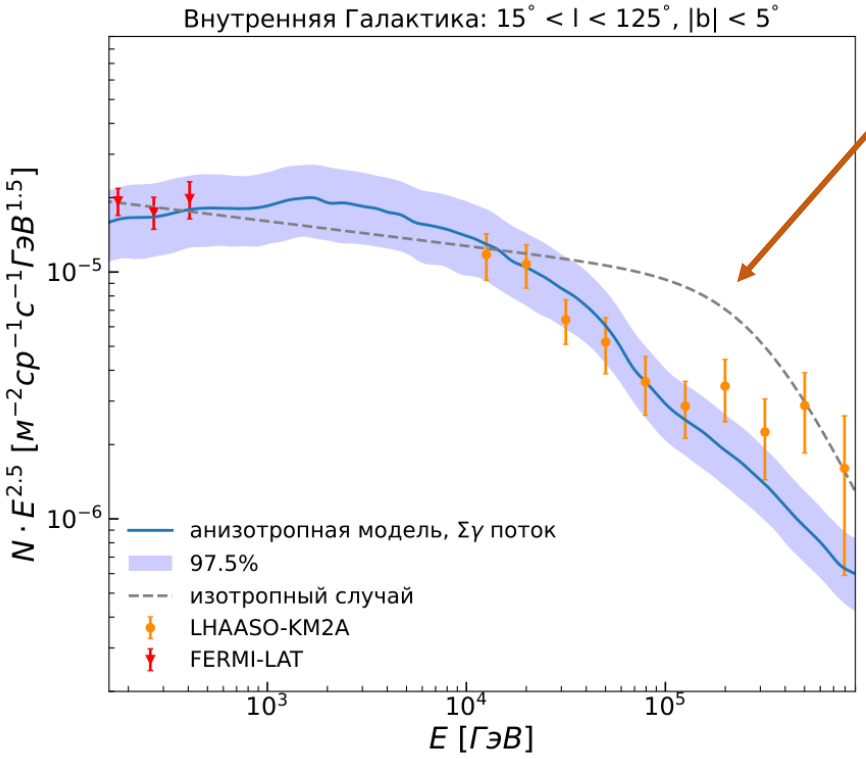


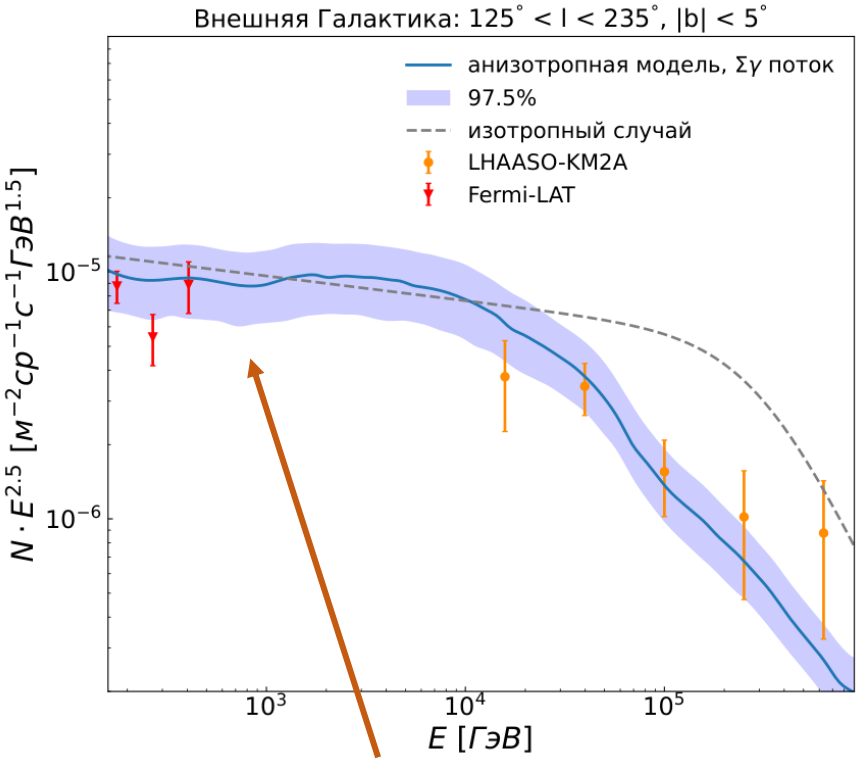


Модель воспроизводит наблюдаемые спектры КЛ.

Колено КЛ и γ-излучение:

Изотропная модель — не согласуется с экспериментом;

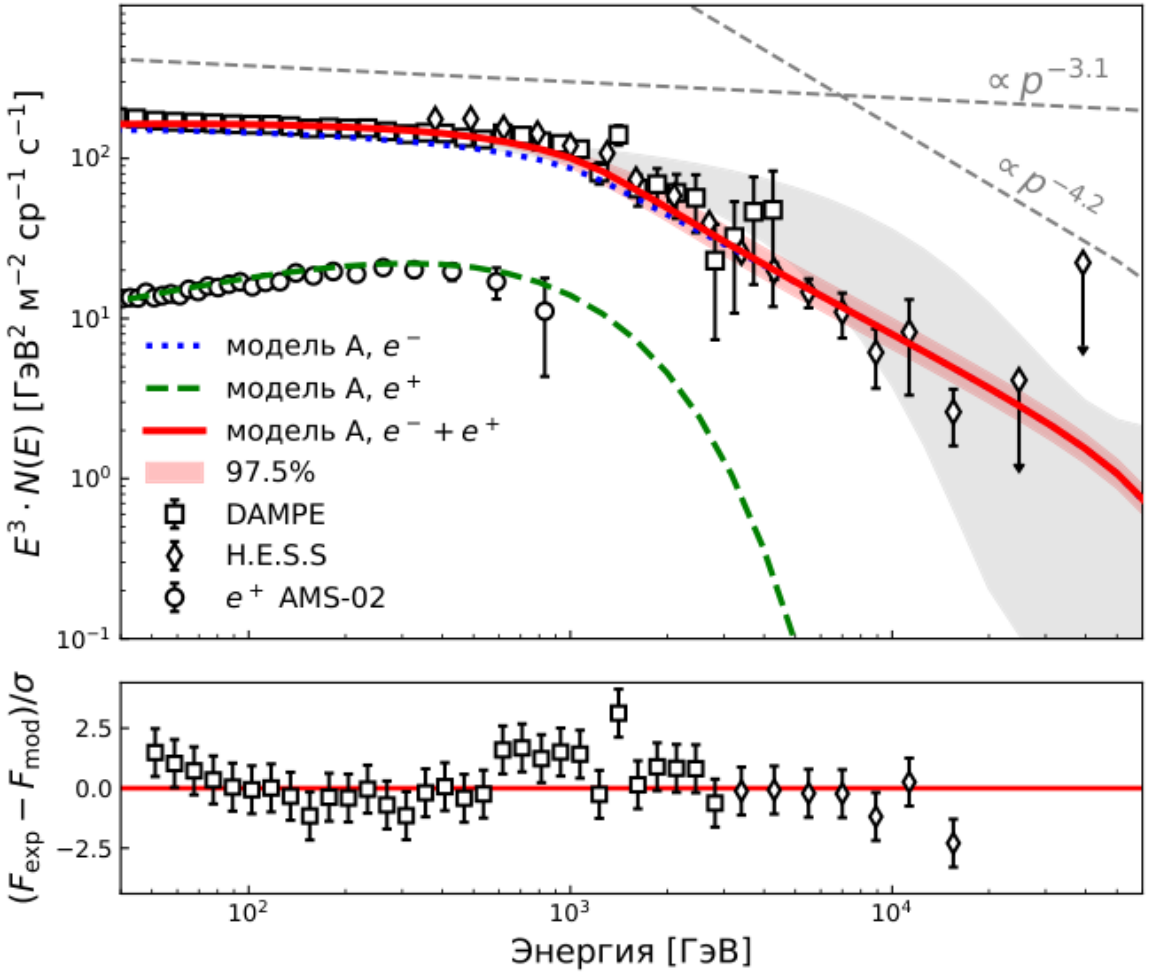




Показано: «Колено» КЛ не является универсальным — оно зависит от положения в Галактике.

анизотропная — описывает наблюдаемые спектры.

Результаты. Спектр $e^+ + e^-$ КЛ:

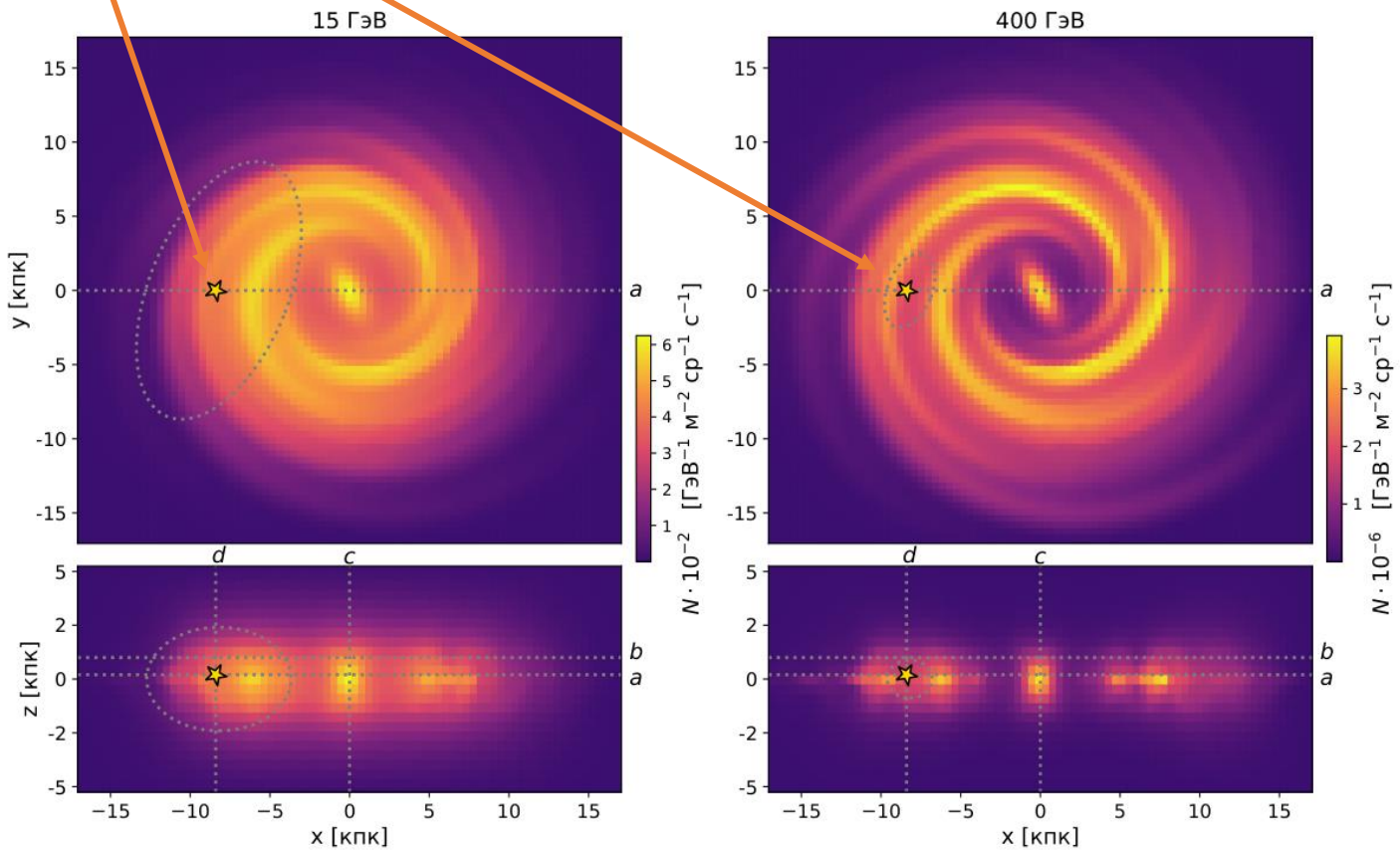


$$\frac{\chi^2}{ndf} = 1.03;$$

На высоких энергиях необходимо учитывать и анизотропию, и стохастику источников.

Утечка лептонов КЛ в гало Галактики:

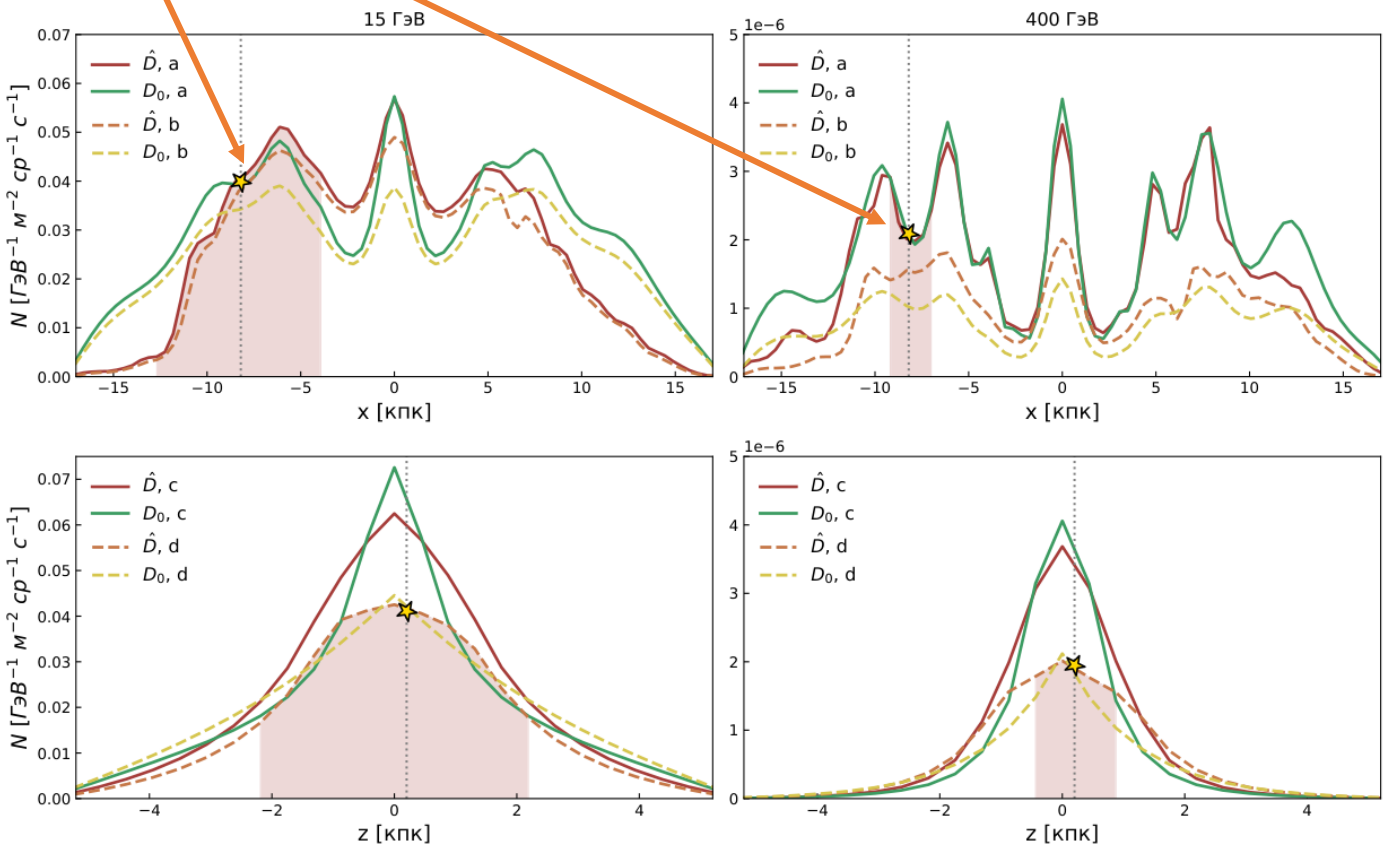
Положение
солнечной системы



Лептонный горизонт становится анизотропным (эллипсоид).

Лептонный горизонт:

Положение
солнечной системы



Анизотропия существенно усиливает утечку лептонов в гало.

Основные результаты & выводы:

1. Показана пространственная зависимость «колена» КЛ и интерпретированы данные по диффузному гамма-излучению;
   Phys. Rev. D (Borisov, Yurovsky, Peryatinskaya, Kudryashov 2025)
2. Предсказана анизотропная форма лептонного горизонта.
   Phys. Rev. D (Borisov & Kudryashov 2026)

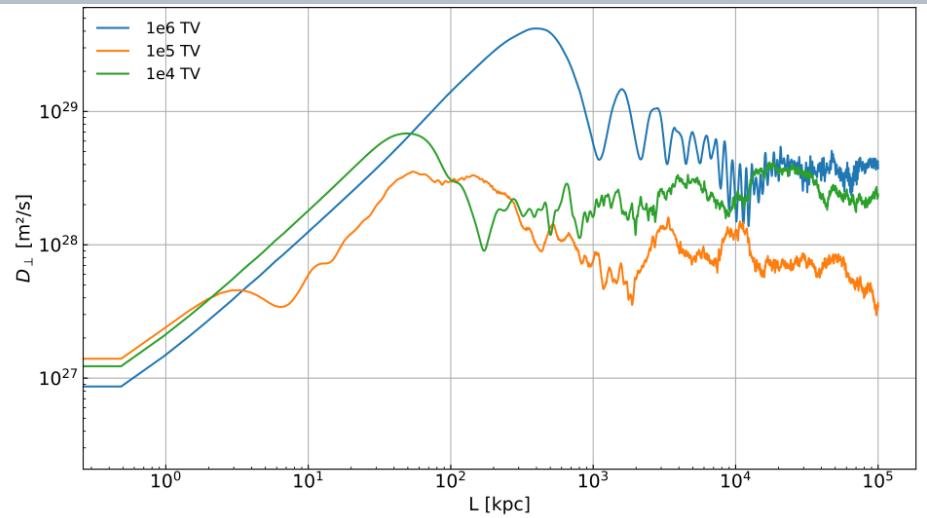
Выводы:

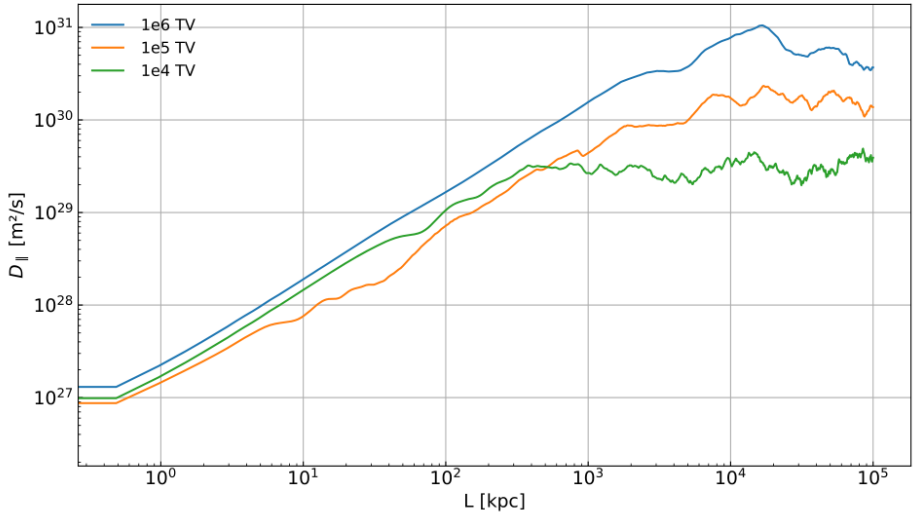
1. Анизотропная диффузия является одним из ключевых факторов формирования спектров КЛ;
2. «Колено» КЛ и спектры частиц зависят от положения в Галактике;
3. Единая модель самосогласованно описывает ядра, лептоны и γ-излучение.

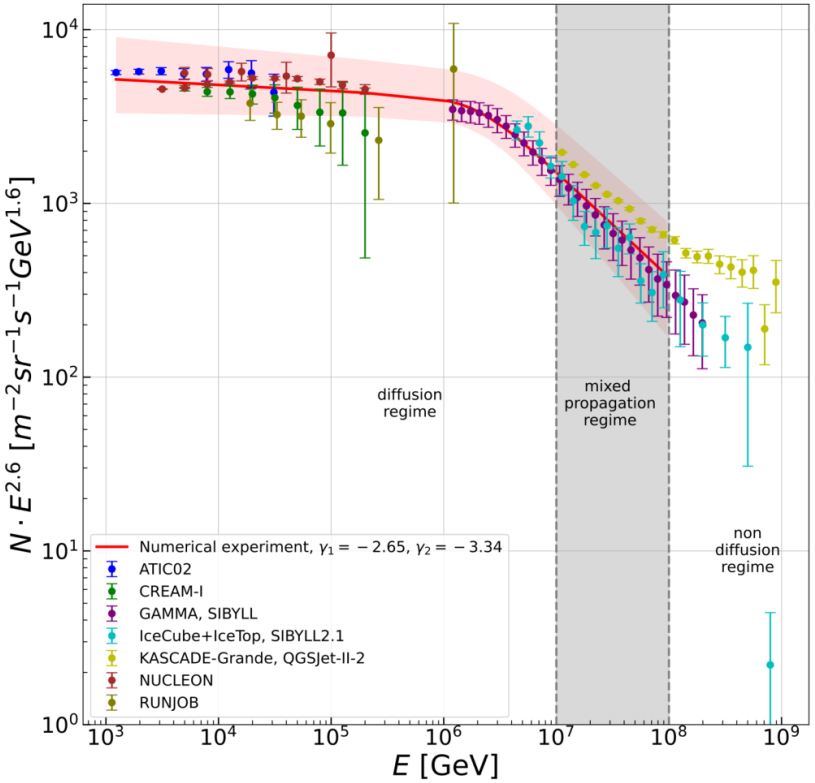
Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-22-00246

Спасибо за внимание!

Дополнительные слайды:





Характерное смещение, необходимое для выхода на диффузионный режим распространения.

Локальный спектр протонов КЛ