

Моделирование движения частиц от прототипа
гипотетического шарового скопления антизвезд в
магнитных полях Галактики

Докладчик, студент М20-115:

Кириченко А.О.

Научный руководитель:

Хлопов М.Ю.

Консультант:

Майоров А.Г.

Введение и мотивация

Природа барионной асимметрии, т.е. преобладания вещества над антивеществом в видимой части Вселенной, является одной из важнейших проблем современной космологии.

Возможная природа антивещества во Вселенной:

- Первичное антивещество, т.е. вещество, которое могло образоваться на ранних стадиях эволюции Вселенной и сохранилось к настоящему моменту.
- Вторичное антивещество.
- Антивещество от экзотических источников.

А.Д. Сахаров (1967) и В.А. Кузьмин (1970) сформулировали необходимые условия для бариосинтеза - механизма генерации барионной асимметрии во Вселенной. Условия Сахарова допускают несколько сценариев бариосинтеза.

В случае неоднородного бариосинтеза Вселенная может содержать локальный избыток не только вещества, но и антивещества.

Можно ожидать присутствие домена антивещества во Вселенной и, предположительно, даже в нашей Галактике в виде шарового скопления антизвезд.

Регистрация ядер антивещества в составе космических лучей экспериментами BESS, PAMELA, AMS будет явным индикатором присутствия такого домена антивещества в гало нашей Галактики.

Цель и задачи работы

Цель работы:

Получить ожидаемый поток античастиц от прототипа шарового скопления антизвезд путем моделирования частиц в регулярном и нерегулярном магнитных полях Галактики.

Задачи:

- Создать программу моделирования движения частиц.
- Получить оценку энергии магнитного обрезания в регулярном магнитном поле.
- Смоделировать траектории движения частиц с учетом нерегулярного магнитного поля.

Модель магнитного поля (МП) и программа моделирования

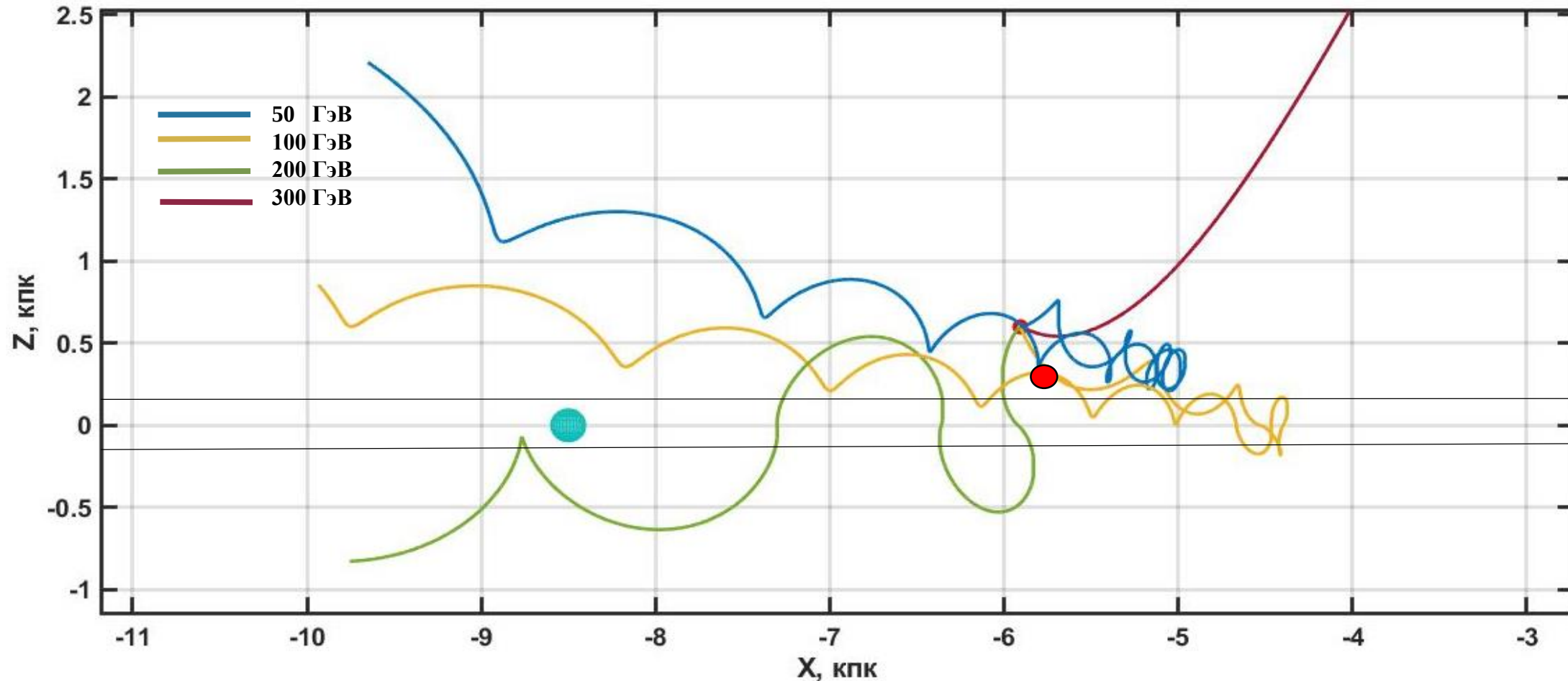
- Для моделирования МП в программном пакете Matlab была написана отдельная программа на основе широко известной **модели магнитных полей нашей Галактики JF12** [1].
- Модель JF12 отдельно рассматривает регулярную и нерегулярную компоненты МП. Регулярное поле при этом разбивается еще на три поля. Такое детальное описание обеспечивает хорошее приближение для реальных МП Галактики.
- Также для построения самих траекторий используется пакет программ, детально описанный в [2]. На вход программы подаются компоненты МП, тип частицы, ее энергия и т.п.

[1] R. Jansson and G. R. Farrar: A New Model of the Galactic Magnetic Field, ApJ 757, 14 (2012).

[2] V. Golubkov, A. Mayorov: Software for Numerical Calculations of Particle Trajectories in the Earth's Magnetosphere and Its Use in Processing PAMELA Experimental Data, Bull.Russ. Acad.Sci.Phys. 85, 383-385 (2021).

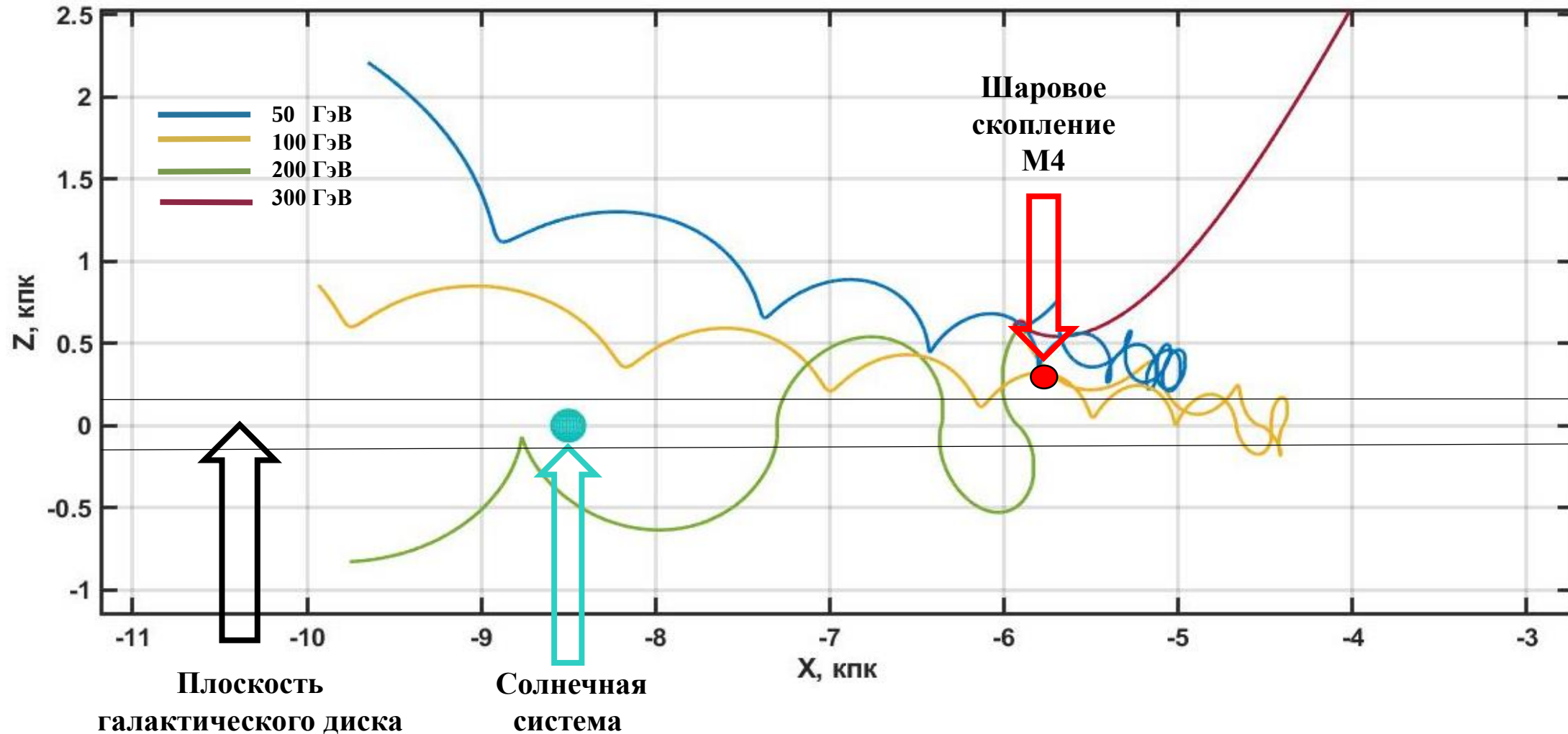
Моделирование частиц в регулярном магнитном поле

- Иллюстрация моноэнергетических траекторий античастиц в регулярном поле от ШС М4 была получена в прошлом семестре. Далее будем использовать ее для оценки новых результатов.



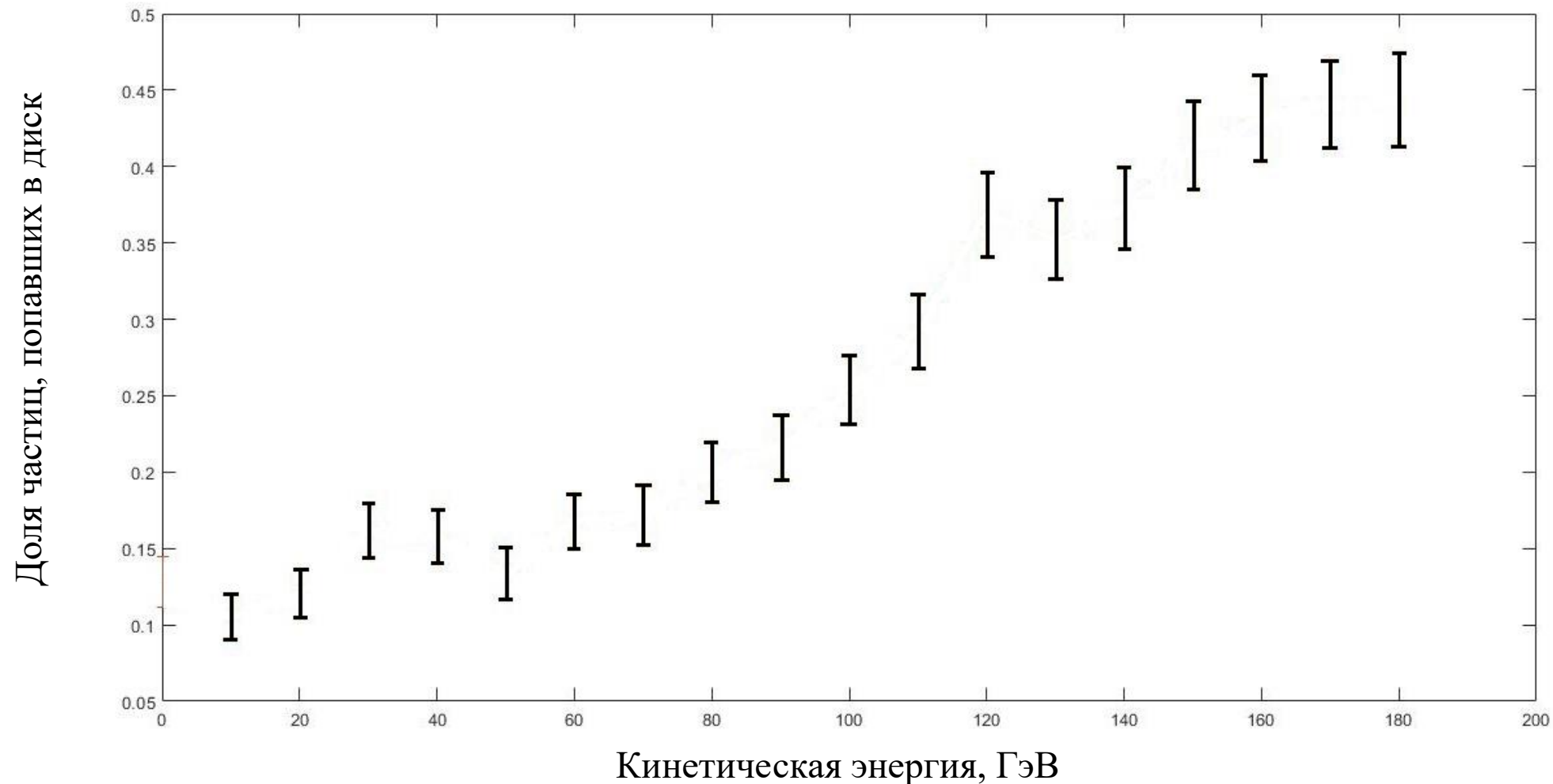
Моделирование частиц в регулярном магнитном поле

- Иллюстрация моноэнергетических траекторий античастиц в регулярном поле от ШС М4 была получена в прошлом семестре. Далее будем использовать ее для оценки новых результатов.



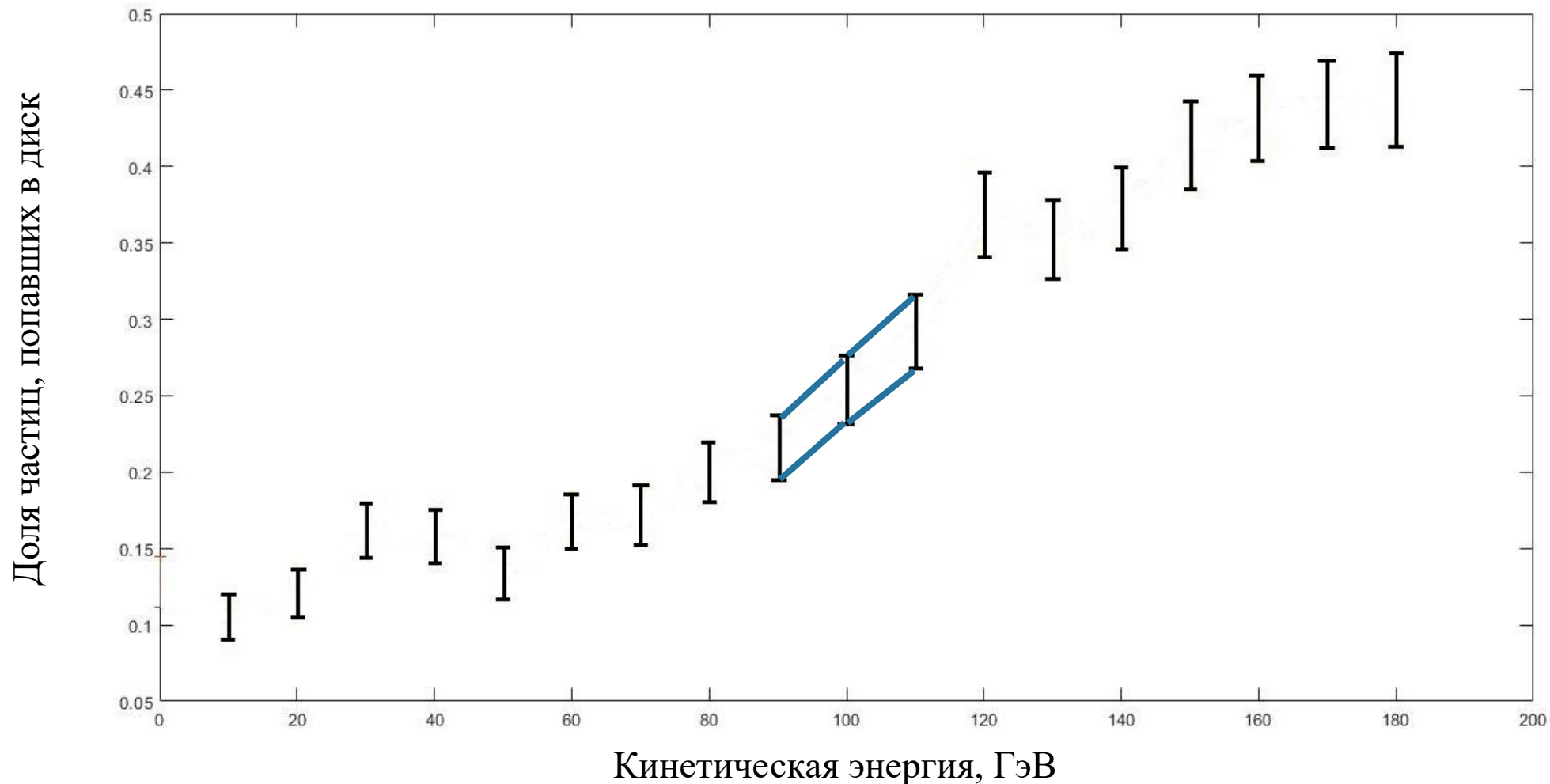
Оценка энергии магнитного обрезания в регулярном магнитном поле

- Зависимость доли проникающих в галактический диск частиц, от энергии частиц.



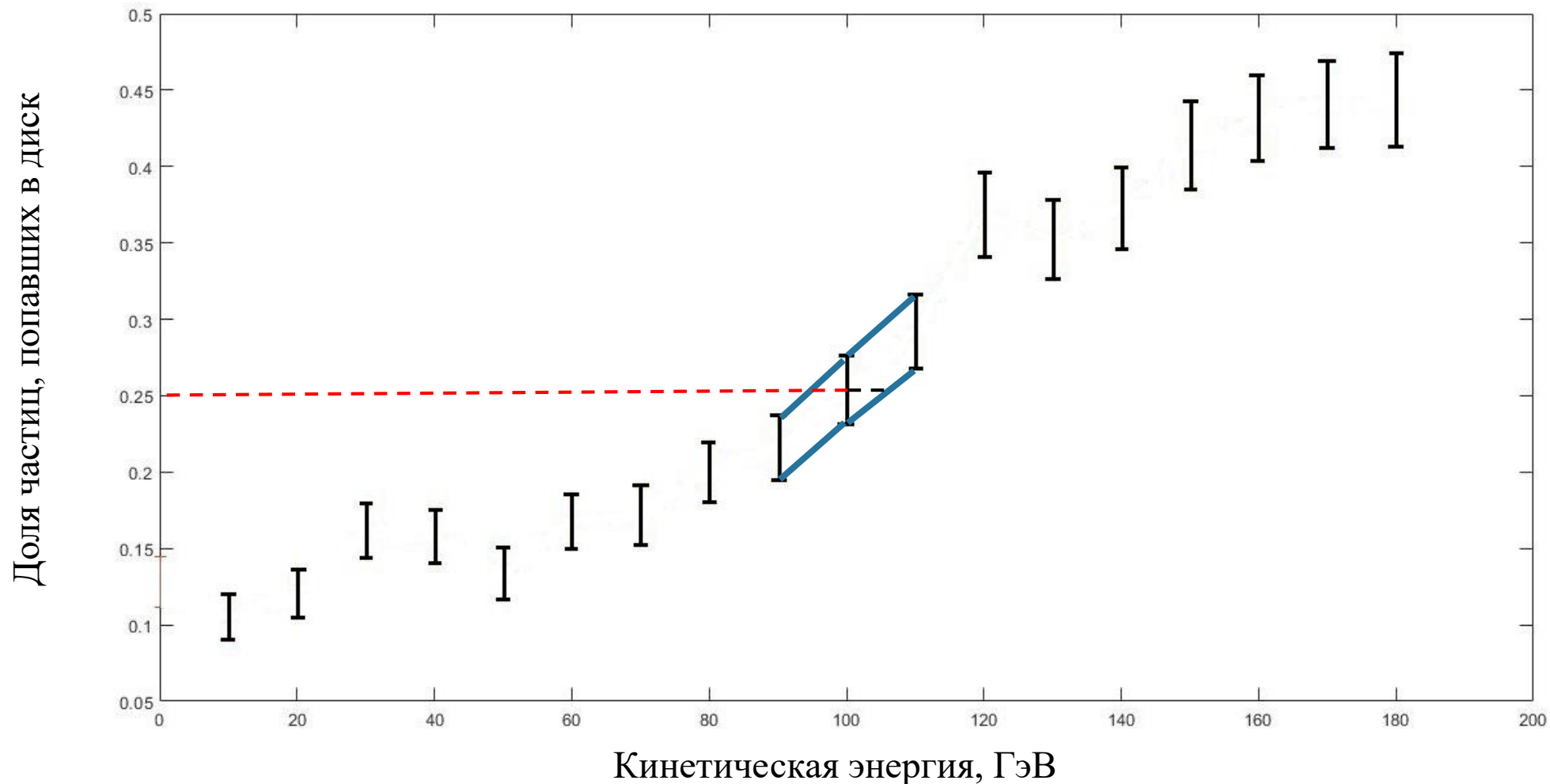
Оценка энергии магнитного обрезания в регулярном магнитном поле

- Зависимость доли проникающих в галактический диск частиц, от энергии частиц. По данному графику можно получить оценку энергии магнитного обрезания.



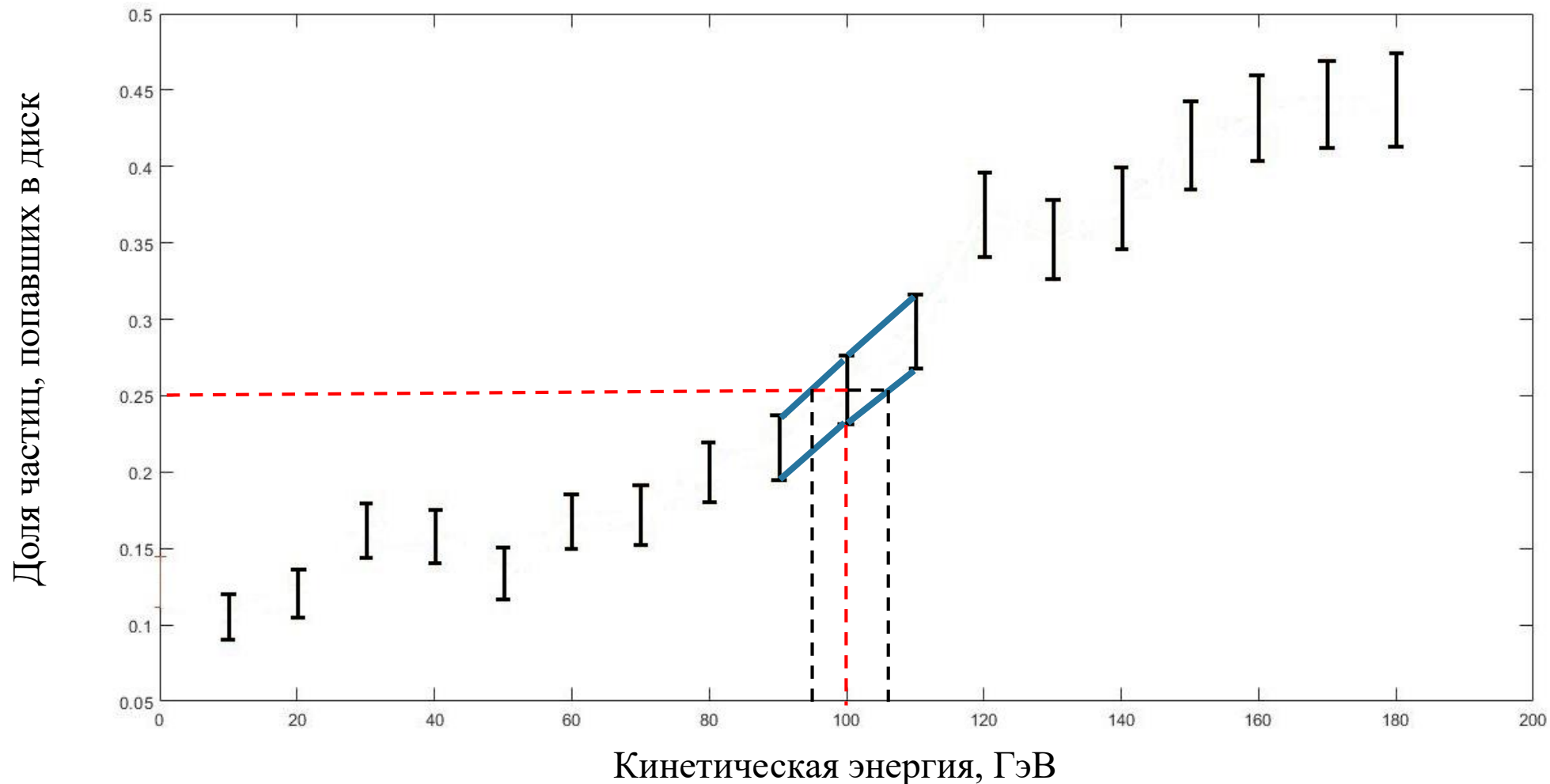
Оценка энергии магнитного обрезания в регулярном магнитном поле

- Зависимость доли проникающих в галактический диск частиц, от энергии частиц. По данному графику можно получить оценку энергии магнитного обрезания.



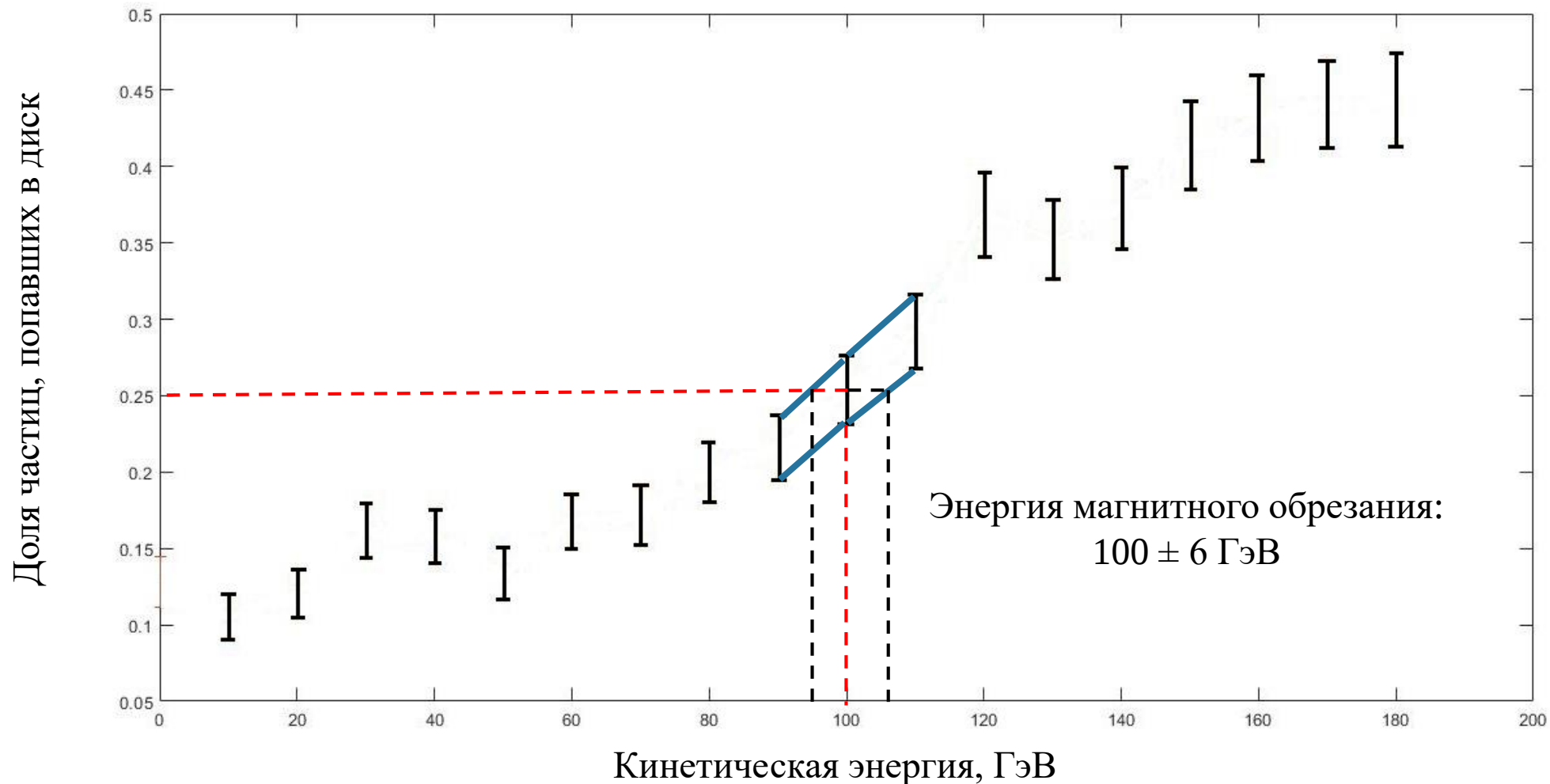
Оценка энергии магнитного обрезания в регулярном магнитном поле

- Зависимость доли проникающих в галактический диск частиц, от энергии частиц. По данному графику можно получить оценку энергии магнитного обрезания.



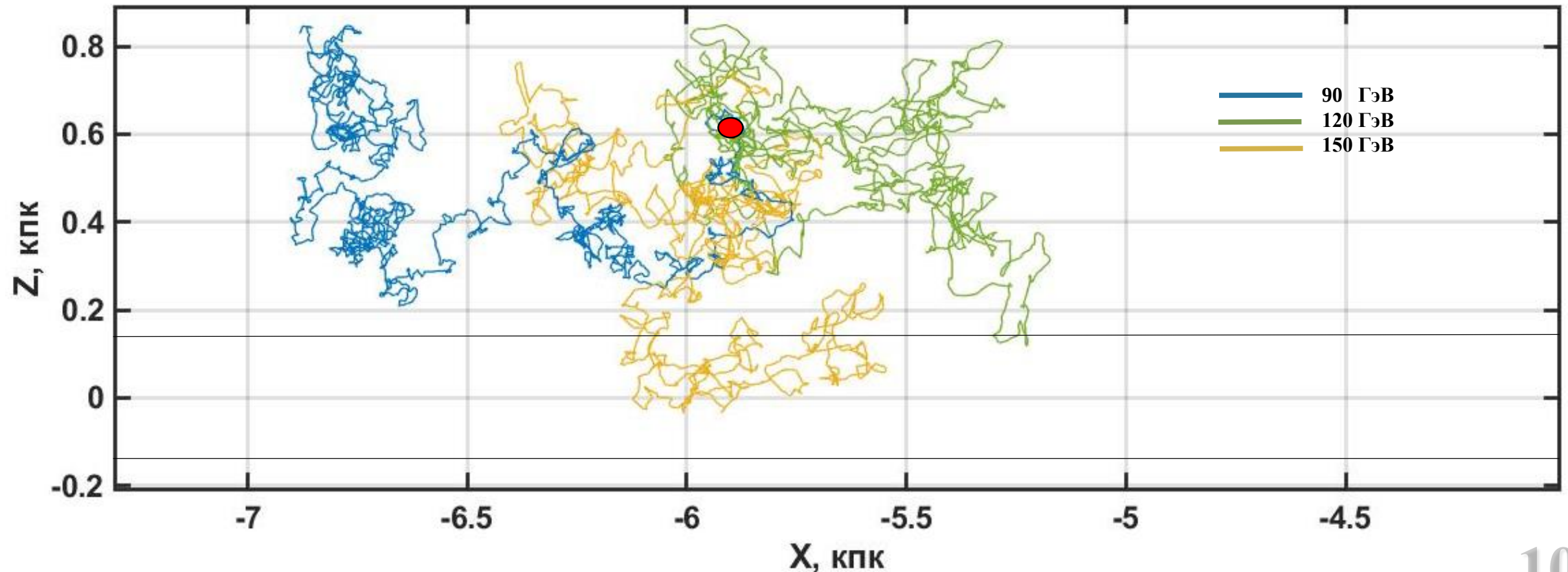
Оценка энергии магнитного обрезания в регулярном магнитном поле

- Зависимость доли проникающих в галактический диск частиц, от энергии частиц. По данному графику можно получить оценку энергии магнитного обрезания.



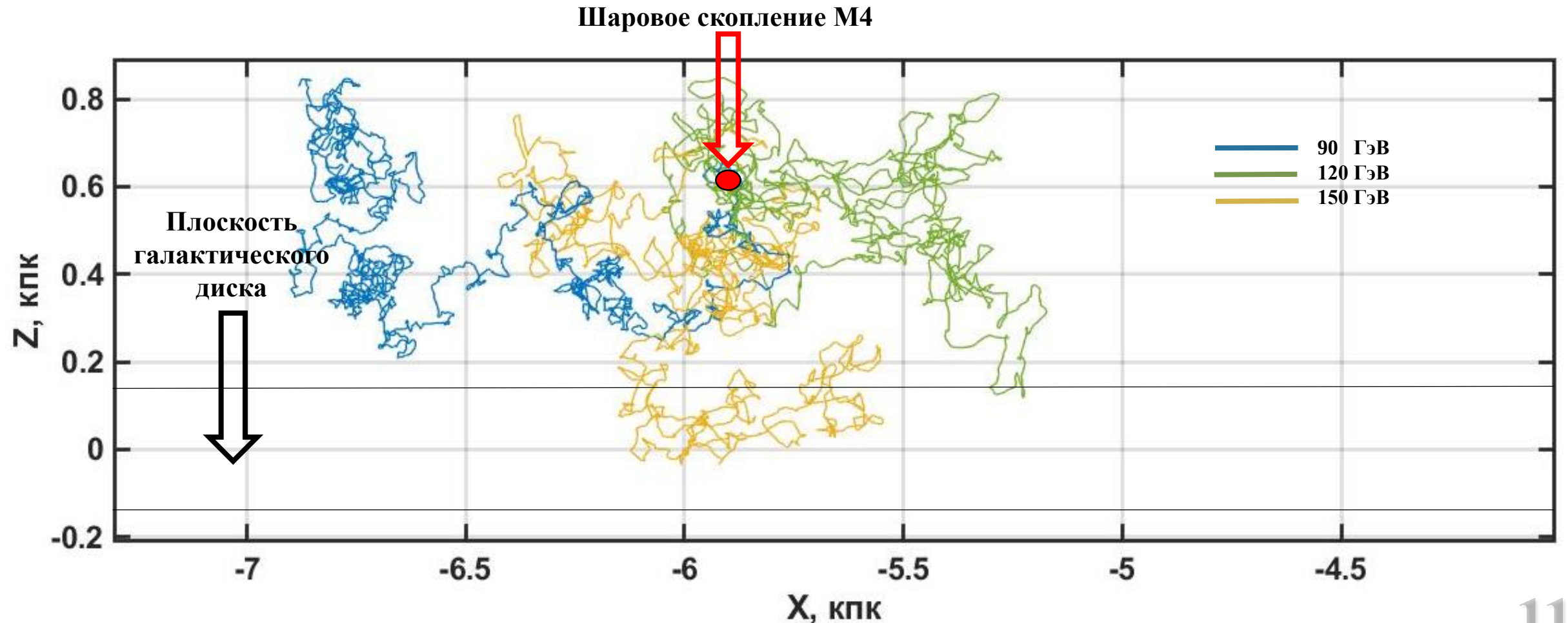
Моделирование с нерегулярной компонентой магнитного поля

- Визуализация движения частиц с учетом нерегулярной компоненты магнитного поля.
- С ростом энергий частиц увеличивается вероятность их проникновения в диск.



Моделирование с нерегулярной компонентой магнитного поля

- Визуализация движения частиц с учетом нерегулярной компоненты магнитного поля.
- С ростом энергий частиц увеличивается вероятность их проникновения в диск.



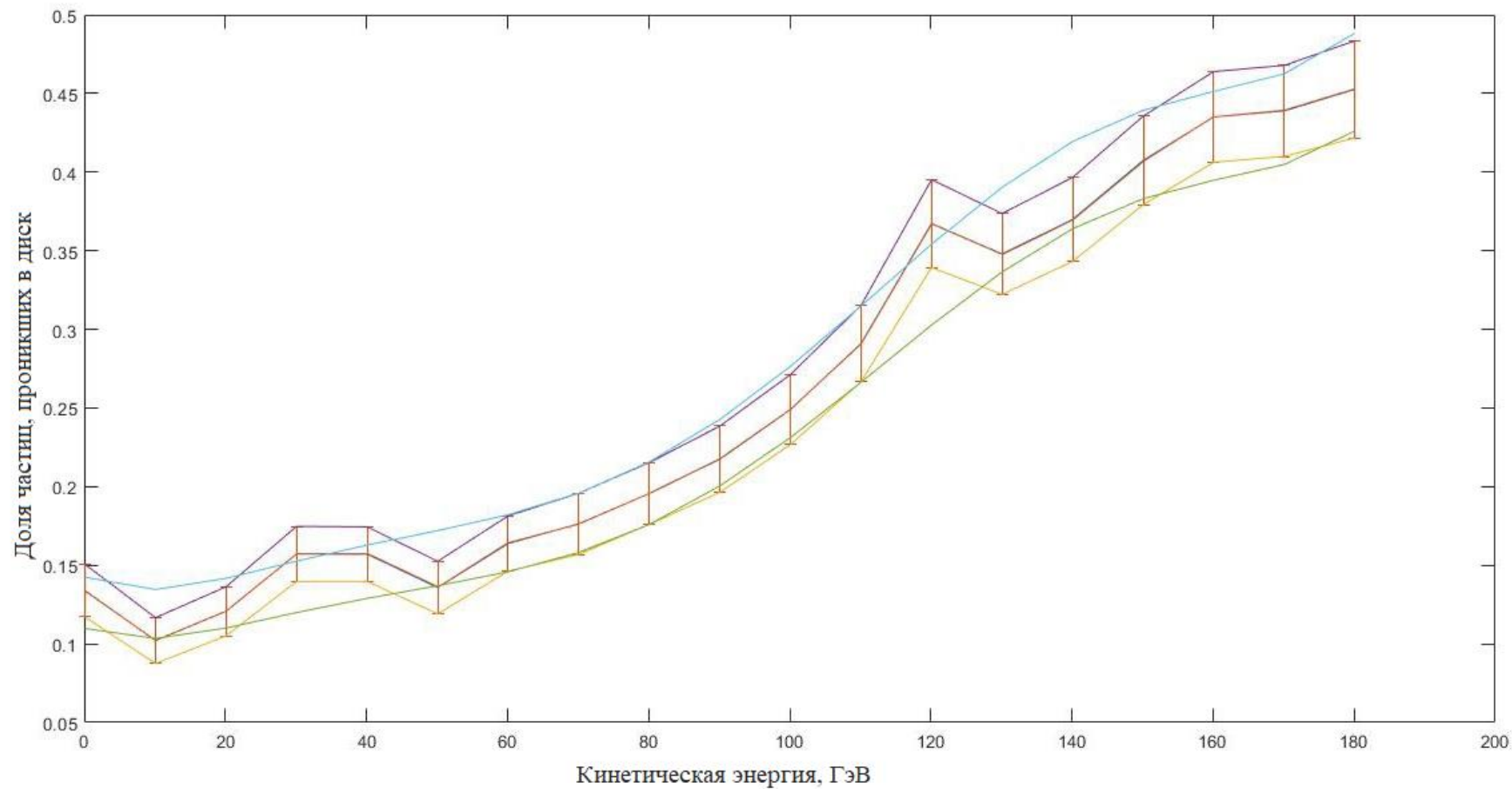
Заключение

- На основе моделирования траекторий частиц была оценена пороговая энергия проникновения частиц в диск с учетом регулярного магнитного поля.
- Были учтены нерегулярности магнитного поля и произведено соответствующее моделирование траекторий частиц.
- Дальнейшая работа будет направлена на оценку пороговой энергии при учете нерегулярного магнитного поля Галактики.
- Созданная программы моделирования поможет получить прогнозы ожидаемого потока антиядер от доменов антивещества в нашей Галактике.

Back up

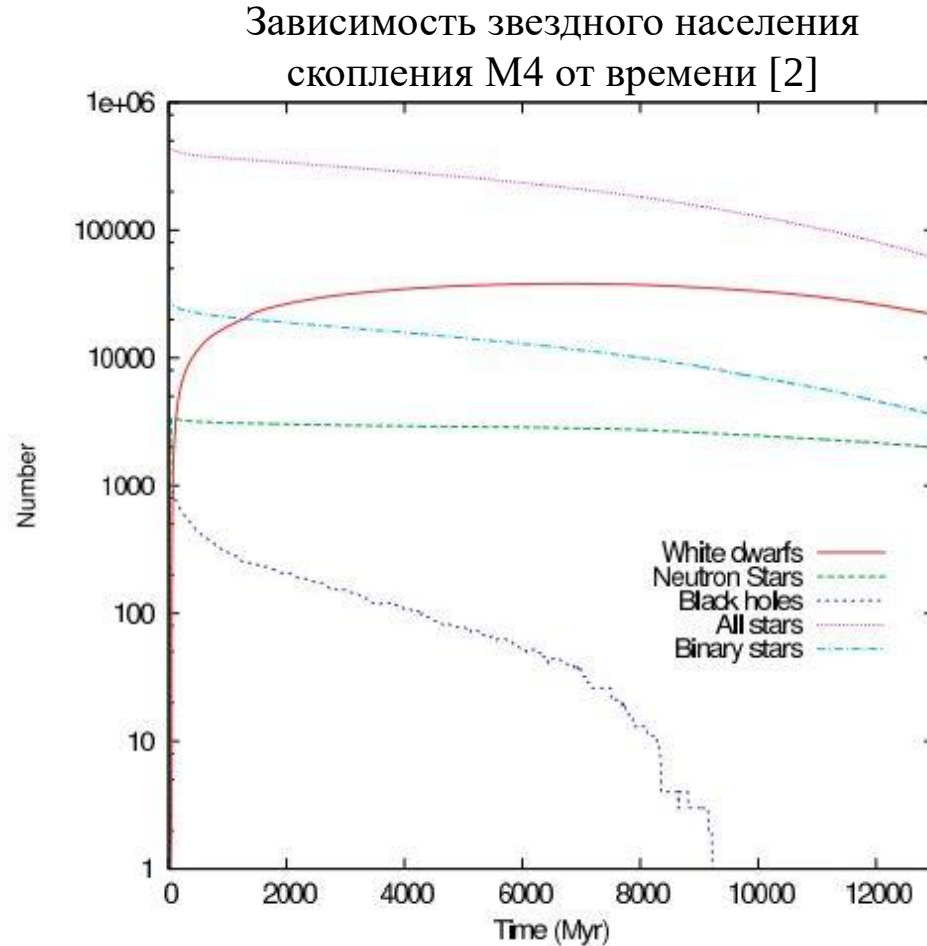
Магнитные поля Галактики(3)

Доля событий, попавших в галактический диск толщиной 300 пк, в зависимости от энергии частиц.



Энергия обрезания 100 ± 10 ГэВ

Вспышки сверхновых



Число нейтронных звезд не изменилось за 12 млрд. лет. Это значит, что примерно 12 млрд. лет назад они могли образоваться как результат взрыва сверхновых.

[2] D. C. Heggie, M. Giersz: Monte Carlo simulations of star clusters – V. The globular cluster M4 (2008).

Вспышки сверхновых(2)

$$\rho_{CR} = \frac{E_{sn} \dot{N}_{sn} t_{ret}}{V} \quad (1)$$

N_{sn} -число нейтронных звезд в М4,

$\dot{N}_{sn}$ -средняя частота взрыва сверхновых

E_{sn} - энергия от одной сверхновой

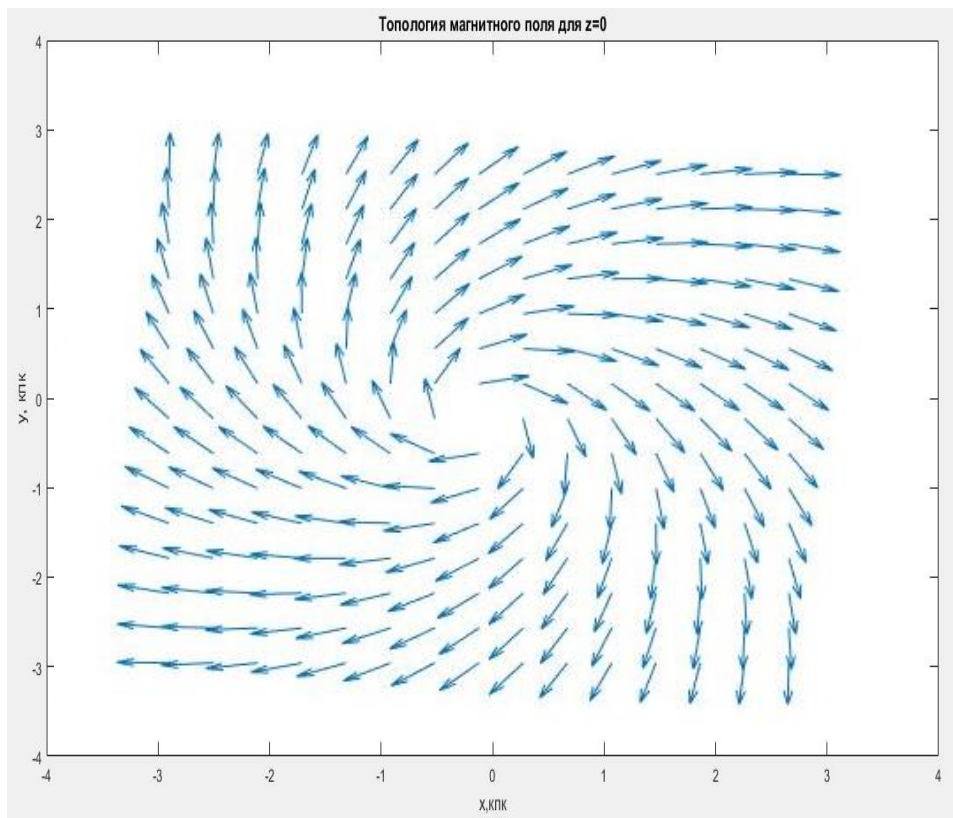
t_{ret} - время удержания КЛ

V - объем области распространения

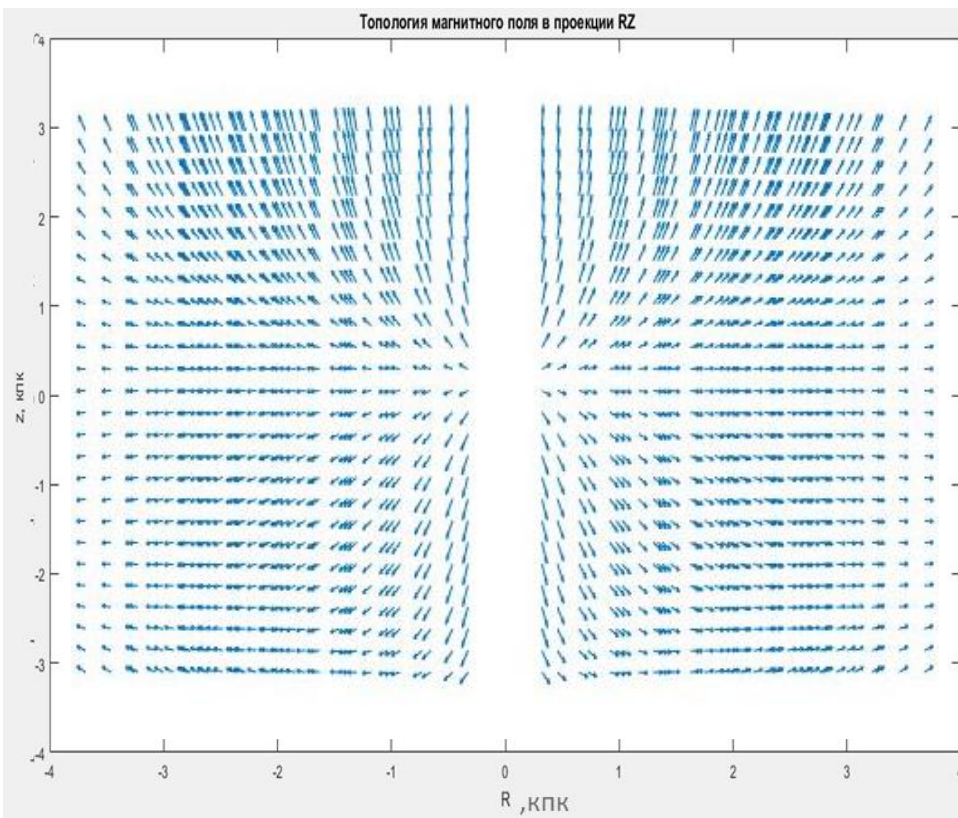
Магнитные поля Галактики (2)

Получены топологии

Для $z=0$:



Для RZ:



Магнитные поля Галактики

Используя данные [3]:

$$B_{\phi} = -\frac{B_1}{2R/R_0} \frac{z}{(z + z_0)} \left(\sqrt{(R/R_0)^2 + (z/z_0)^2} - z/z_0 \right)$$

$$B_R = \frac{1}{2} B_1 \frac{z_0^2}{(z + z_0)^2} \tanh(R/R_0)$$

$$B_z = \frac{0.1 B_1 z_0}{R_0} + \frac{1}{2} B_1 \frac{z_0^2}{(z + z_0)^2} \left(\frac{\tanh(R/R_0)}{R} + \frac{\text{sech}^2(R/R_0)}{R_0} \right)$$

Вспышки сверхновых(3)

Используя данные таблицы

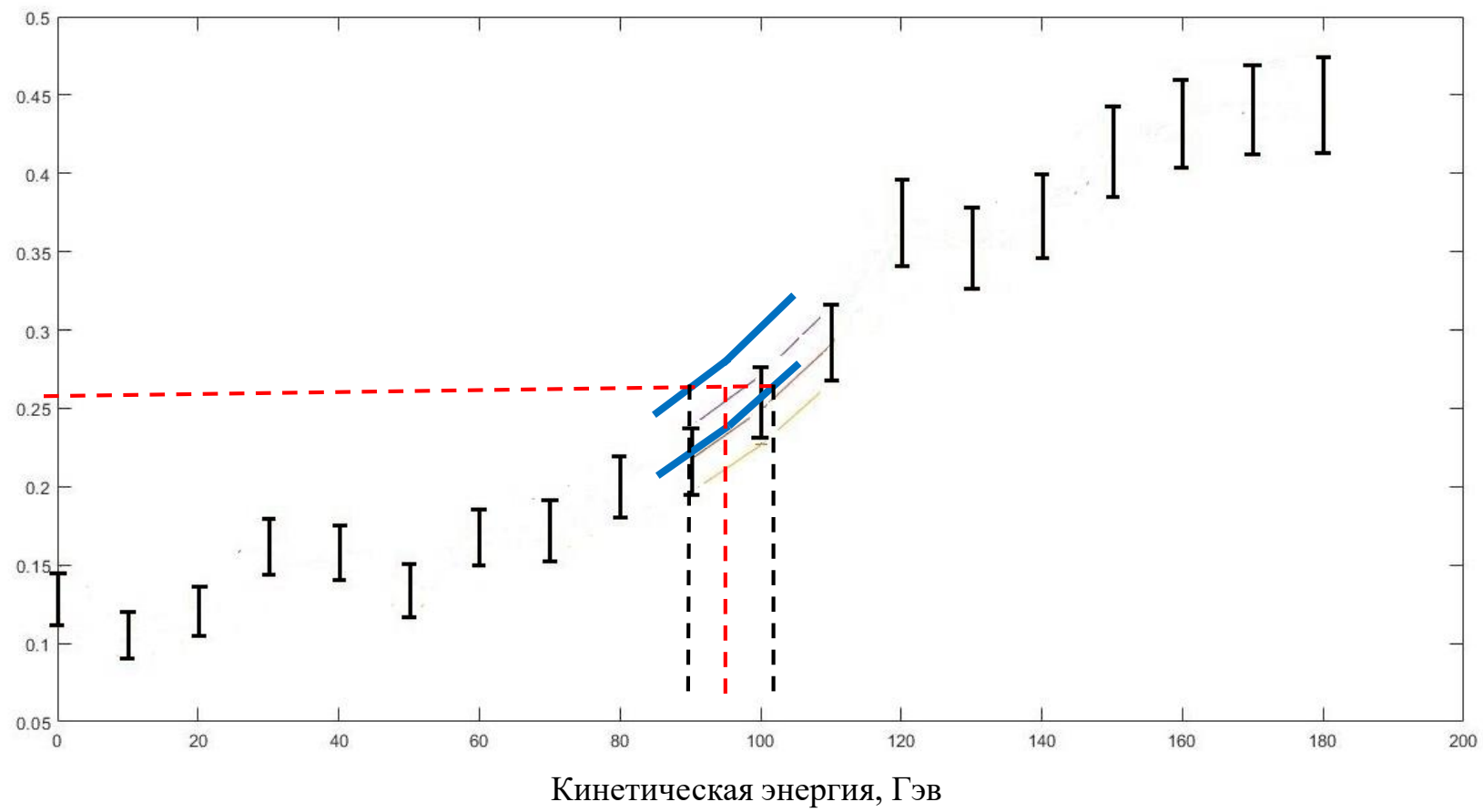
N_{sn}	t	$\dot{N}_{sn}$	E_{sn}	t_{ret}	V
$2 \cdot 10^4$	$13 \cdot 10^9$ лет	$2 \cdot 10^{-5}$	10^{51} эрг	10^7 лет	$3 \cdot 10^3$ КПК

Получаем значение плотности

$$\rho_{CR} = 10^{-4} \text{ эВ/см}^3$$

Плотность энергии для вторичных антипротонов:

$$\rho_{\bar{p}} = 10^{-5} \text{ эВ/см}^3$$



Первичная антиматерия

Барионная асимметрия Вселенной — наблюдаемое преобладание в видимой части Вселенной вещества над антивеществом.

А. Д. Сахаров (1967) и В.А. Кузьмин (1970) сформулировали необходимые условия для бариосинтеза - механизма генерации барионной асимметрии во Вселенной:

1. Асимметрия между частицами и античастицами как нарушение зарядовой С- и комбинированной СР-симметрии.
2. Нарушение закона сохранения барионного заряда.
3. Нарушение локального термодинамического равновесия.

Первичная антиматерия(2)

В конечном результате бариосинтеза во Вселенной могут образовываться не только области с избытком вещества, но и области с избытком антивещества.

Шаровые скопления антизвезд могли бы образоваться в период формирования Галактики и сохраниться в ее гало к настоящему времени.

Антиядра в космических лучах могут являться доказательством существования таких шаровых скоплений.

Рассматривается М4 как прототип шарового скопления
антизвезд[1] :

Возраст	Расстояние от Солнца	Число звезд
12 млрд. лет	1.72 кпк	$8 \cdot 10^4$

Три возможных механизма инъекции антигелия в космические
лучи от шарового скопления М4:

1. Стационарное истечение вещества с поверхности антизвезд.
2. Вспышки на антизвездах.
3. Взрывы антисверхновых в шаровом скоплении.

Гипотеза существования домена антивещества в Галактике

Регистрация ядер антивещества в составе космических лучей экспериментами BESS, PAMELA, AMS будет явным индикатором присутствия такого домена антивещества в гало нашей Галактики. Для теоретического предсказания потока антиядер **необходимо произвести моделирование движения античастиц в магнитных полях Галактики от предполагаемого шарового скопления антивещества.**

Магнитное поле вместе с межзвездной средой вносят значительные модификации в изначальный поток космических лучей: потеря энергии заряженными частицами, фрагментация ядер, диффундирование частиц в магнитных полях Галактики.

Задача первого этапа - оценить долю частиц, которая способна проникнуть в галактический диск (т.е. получить оценку энергии обрезания частиц при проникновении в диск). Для моделирования частиц от источника за прототип шарового скопления антизвезд было выбрано известное наблюдаемое шаровое скопление М4.