

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ ЧАСТИЦ И КОСМОЛОГИИ

КУРСОВАЯ РАБОТА

«ЗЕРКАЛЬНАЯ МАТЕРИЯ В КОСМИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ»

Выполнил студент
204 группы
Степанов Виктор Андреевич

Научный руководитель:
д.ф.-м.н., член-корр. РАН, г.н.с. ОТФ ИЯИ РАН
Горбунов Дмитрий Сергеевич

МОСКВА

2021

Оглавление

Введение	2
Зеркальная материя (Черновой вариант)	3
0.1. Приглашение в зеркальный мир	3
0.2. От частиц к галактикам	4
CORE/CUSP проблема (черновой вариант)	6
Зеркальные галактики как возможное решение	8
Обсуждение	15
Ссылки	16

ВВЕДЕНИЕ

Согласно данным космологических наблюдений, вклад барионов (протонов, ядер) в полную современную плотность энергии составляет 5%, вклад реликтовых нейтрино ещё меньше – не более 0,6%. Другие известные частицы – электроны и фотоны – дают в современную эпоху вовсе пренебрежимый вклад в общую плотность энергии.

Что же составляет 95% энергии Вселенной? Начнём с самого простого – примерно 70% этой энергии равномерно разлито по всему пространству. Что это такое – никто достоверно не знает и эта работа никак приобретению этого знания не поспособствует. Остальные 20% энергии на данном этапе эволюции человечества описываются большим количеством теорий-гипотез, ни одна из которых не была проверена экспериментально: альтернативная гравитация, ..., зеркальные частицы.

Рассмотрению последней теории, в частности, в приложении к проблеме сингулярного гало тёмной материи в некоторых галактиках, и посвящена данная работа.

В ней мы предполагаем, что часть тёмной материи представлена частицами зеркальной материи, данная гипотеза, хотя и не слишком популярна, имеет своих поклонников в научных кругах и богатую историю [111].

ЗЕРКАЛЬНАЯ МАТЕРИЯ (ЧЕРНОВОЙ ВАРИАНТ)

0.1. Приглашение в зеркальный мир

Идея "зеркальных частиц" впервые была озвучена Ли и Янгом (вставить ссылку на источник) в далёком (каком) году после "экспериментального обнаружения" нарушения чётности в слабых взаимодействиях. Необходимо отметить, что в те годы набирала популярность Стандартная модель через симметрии.. – сам Янг Чжэньнин является соавтором теории Янга-Миллса - неабелевой калибровочной теории, призванной (...) Поэтому идея сохранить Р-симметрию является (.естественной..) или "Р-симметрию было бы круто сохранить" Одно из решений – введение в рассмотрение зеркальных партнеров частиц Стандартной модели ьаналогично делается делается в суперсимметричных теориях – частиц с теми же массами, зарядами, (...), но (...)

Частицы зеркальной материи могут взаимодействовать с барионной материей только гравитационно (ссылка на источник "Окунь, Померанчук"), что наталкивает на мысль о возможном использовании их в качестве темной материи.

Существование целого мира "тневых" частиц, взаимодействующих друг с другом и не взаимодействующих с обычными частицами только гравитационно (1,2), является специфической особенностью современных моделей суперструн, рассматриваемых как модели Всего. Наличие тневых частиц является необходимым условием, обеспечивающим компенсацию асимметрии левого и правого состояний хиральности обычных частиц, причём частицы и поля обладают свойствами, строго симметричными свойствам соответствующих обычных частиц и полей (3, 4). Благодаря строгой симметрии физических законов для обычных и зеркальных

частиц анализ космологической эволюции зеркальной материи позволяет сделать определённые выводы относительно космологической эволюции зеркальной материи.

Строгая симметрия свойств обычных частиц и их зеркальных партнёров означает, что их массы, спины и константы взаимодействий равны. Так, например, обычному электрону соответствует зеркальный электрон со спином $1/2$, массой, равной массе электрона, и зеркальным электрическим зарядом, по величине равной обычному заряду электрона. Зеркальные электроны электрически нейтральны, не взаимодействуют с обычными фотонами, и, вместе с зеркальными ядрами, образует атомы зеркальной материи. ...

0.2. От частиц к галактикам

Зеркальные частицы полностью аналогичны своим партнёрам – те же константы взаимодействия, те же (компоненты S-матрицы хехе). Возникает закономерный вопрос: могут ли они образовывать крупномасштабные структуры ьсродний барионным галактикам?

Кто-то это уже исследовал и я скажу пару слов по этому поводу, когда перечитаю статью (вставить ссылку на источник)

(Не возникает ли противоречия с LCDM?)

Согласно (5-8) на стадии доминирования излучения во Вселенной доминируют по плотностям обычное и зеркальное излучение и легкие нейтрино с небольшой примесью равных по плотности обычных и зеркальных барионов. После RD стадии начинают доминировать нерелятивистские частицы тёмной материи, начинается формирование крупномасштабных неоднородностей. Влияние зеркальной материи на наблюдаемые свойства такой структуры возможны только при островном распределении зеркальных барионов. В последнем случае масштаб барионных неоднородностей может быть произвольным, и формирование "чистых"зеркальных объектов возможно во всех масштабах. Зеркальные барионные острова выглядели бы в этом случае как пустоты, лишённые обычной материи галактик.

CORE/CUSP ПРОБЛЕМА (ЧЕРНОВОЙ ВАРИАНТ)

В начале 1990х первые результаты численной симуляции задачи N-тел гало темной материи, основанной на «бесстолкновительной» холодной темной материи (CDM), стали доступны. «Эти» не проявляли наблюдаемого «core-like» поведения внутренних частей, но они лучше были описаны «крутым степенным законом распределения плотности массы», который так же называется «острием». Когда мы фитируем распределение массы, полученное из этих ранних симуляций, мы получаем, что во внутренних частях $\rho \propto r^{-\alpha}$, $\alpha = -1$. В дальнейшем мы будем использовать « α » для распознавания innermass density power-law slope.

Результаты этих и последующих симуляций базируются на (Л)CDM парадигме, когда большинство массы-энергии нашей Вселенной состояло из «невзаимодействующей» CDM в комбинации с космологической постоянной Ламбда. Эта (Л)CDM парадигма даёт всестороннее описание Вселенной на больших масштабах. Однако, несмотря на огромные успехи, следует помнить, что cusp и распределение тёмной материи в центре не предсказываются «первыми» принципами (Л)CDM. Скорее, эти свойства получены из аналитического фитирования, сделанного для численного моделирования только-тёмной-материи. Хотя качество и количество этих симуляций улучшилось на порядки с годами, пока нет «космологической теории», которая объясняет и правильно предсказывает распределение темной материи в галактиках из «первых принципов».

За последние 15 лет или около того много усилий было вложено в определение распределения массы в центре в галактиках с помощью их кривых вращения, и сравнение их с результатами всё более сложных численных симуляций. В первую очередь, можно резюмировать эту работу как «наблюдательные данные дают $\alpha = 0$, в то время как

симуляция – $\alpha = -1$ ». Это стойкое различие известно как «core cusp controversy», иногда также описываемое как «мелкомасштабный кризис космологии». [источник]

Наличие «куспа» в центре CDM гало – одни из самых ранних и сильных результатов, полученных с помощью космологической симуляции задачи N тел. Дубинский и Карлберг (1991) были среди первых, кто исследовал профиль плотностей CDM гало, они обнаружили, что внутренние части этих симулированного гало могли быть описаны степенным законом с $\alpha = -1$. Они не исключили существование центрального ядра, но отметили, что оно должно быть меньше, чем разрешение их симуляции (1.4 кПк). Последующие симуляции на всё более высоких и высоких разрешениях сделали наличие ядер в смоделированных гало CDM все более маловероятны.

Систематическое исследование Наварро симулированных гало CDM, полученных с учётом множества различных наборов космологических параметров, выявило, что самая внутренняя часть распределения плотности массы тёмной материи может быть хорошо описана характеристикой $\alpha = -1$ внутреннего наклона для ВСЕХ смоделированных гало, независимо от массы, размера или «космологии». Аналогичный общий результат был найден для внешних частей профиля массы, с более крутым уклоном $\alpha = -3$. Наварро назвал это «универсальным профилем плотности», он задаётся формулой (2),

Поиск и исследование более массивных галактик с преобладанием тёмной материи может быть более эффективным способом изучения проблемы core-cusp. К счастью, эти галактики существуют, они называются галактиками с низкой поверхностной яркостью (LSB). Термин LSB-галактики используется здесь для обозначения позднего типа, богатых газом дисковых галактик с преобладанием тёмной материи. Их оптическая составляющая хорошо описывается экспоненциальным диском с (экстраполированной) центральной поверхностной яркостью с поправкой на наклон более слабой, чем $\mu(0, B) = 23 \text{ mag arcsec}^{-2}$.

Возможные решения: 1 2 3

ЗЕРКАЛЬНЫЕ ГАЛАКТИКИ КАК ВОЗМОЖНОЕ РЕШЕНИЕ

Одно из возможных решений проблемы сингулярного гало – гипотеза "зеркального мира". Из более ранних работ на данную тему стоит отметить [123], в которой автор упоминает данную возможность и проводит качественное исследование вопроса.

Также в [123] было проведено исследование, результатом которого стало распределение магнитного поля в гало зеркальной материи. Приведём краткий обзор результатов.

(i) Отсутствует крупномасштабная компонента магнитного поля, в этом мы видим прямую аналогию со сфероидальными и эллиптическими галактиками [321]. Мелкомасштабную компоненту можно считать постоянной по направлению (с некоторой степенью точности) в пределах корреляционного объёма 100^3 pc^3 .

(ii) Мелкомасштабное поле под действием динамо-механизма экспоненциально насыщается до максимального значения, равного $b = \sqrt{4\pi\rho v}$ за время порядка 10^7 лет (где ρ – плотность вещества, v – типичная скорость кругового движения в данной области пространства)

(iii) Поле достигает насыщения при больших красных смещениях $z > 10$, что является возможной причиной того, что CUSP-LSB-галактики практически не наблюдаются (из-за сложностей в исследовании)

В данной работе мы продолжаем изучение CORE-CUSP проблемы в соприкосновении с гипотезой зеркального мира и делаем следующие модельные предположения:

1. "Тёмная компонента" не полностью состоит из зеркального вещества, большую долю плотности оставляет за собой классическая

тёмная материи, природа которой не ясна. В дальнейшем будем обозначать $\beta = \frac{\Omega_{Unknown}}{\Omega_{Mirror}}$. Природа этого ограничения интуитивна и может быть проиллюстрирована классическим наблюдением за газом в двух галактиках, пролетевших сквозь друг друга (см. Рис. 0). Это изображение является наглядным подтверждением того факта, что темная материя слабо взаимодействует сама с собой, и, если мы предполагаем, что зеркальная компонента присутствует в гало каждой галактики в том или ином объёме, то становится совершенно ясно, что этот объём должен быть ограничен.

Экспериментальное ограничение на β может быть получено из наблюдений за сталкивающимися LSB галактиками, что, несомненно, сопряжено с большими трудностями.

2. Гало успело приобрести CUSP до начала экспоненциального роста магнитного поля. Причём профиль плотности для неизвестной и зеркальной составляющих совпадает с точностью до фактора β .

3. Стохастические компоненты магнитного поля ориентированы в каждой ячейке турбулентности произвольным образом и в течение времени не изменяют своего направления (что, вообще говоря, не должно влиять на конечные выводы) (см. Рис. 2)

4. Мы рассматриваем только центр гало, в котором и проявляется сингулярность. Начальные условия – профиль плотности и скорости частиц взяты из [132] и даются выражением:

$$\rho = \frac{\rho_{crit} \delta_c r_s}{r}$$

$$v = v_{max} \frac{4 \frac{r}{r_{max}}}{(1 + \frac{r}{r_{max}})^2}$$

где v_{max} приблизительно равно $1.4v_{200}$, $r_{max} = 2r_s$. (См. Рис. 3)

Профиль плотности, от которого зависит магнитное поле, будем считать примерно постоянным в силу двух причин: во-первых, зеркальная плотность даёт вовсе не полный вклад в профиль, а лишь некоторую его часть, во-вторых, изменение магнитного поля во времени и с радиусом гораздо сильнее, чем от движения проводящей плазмы.

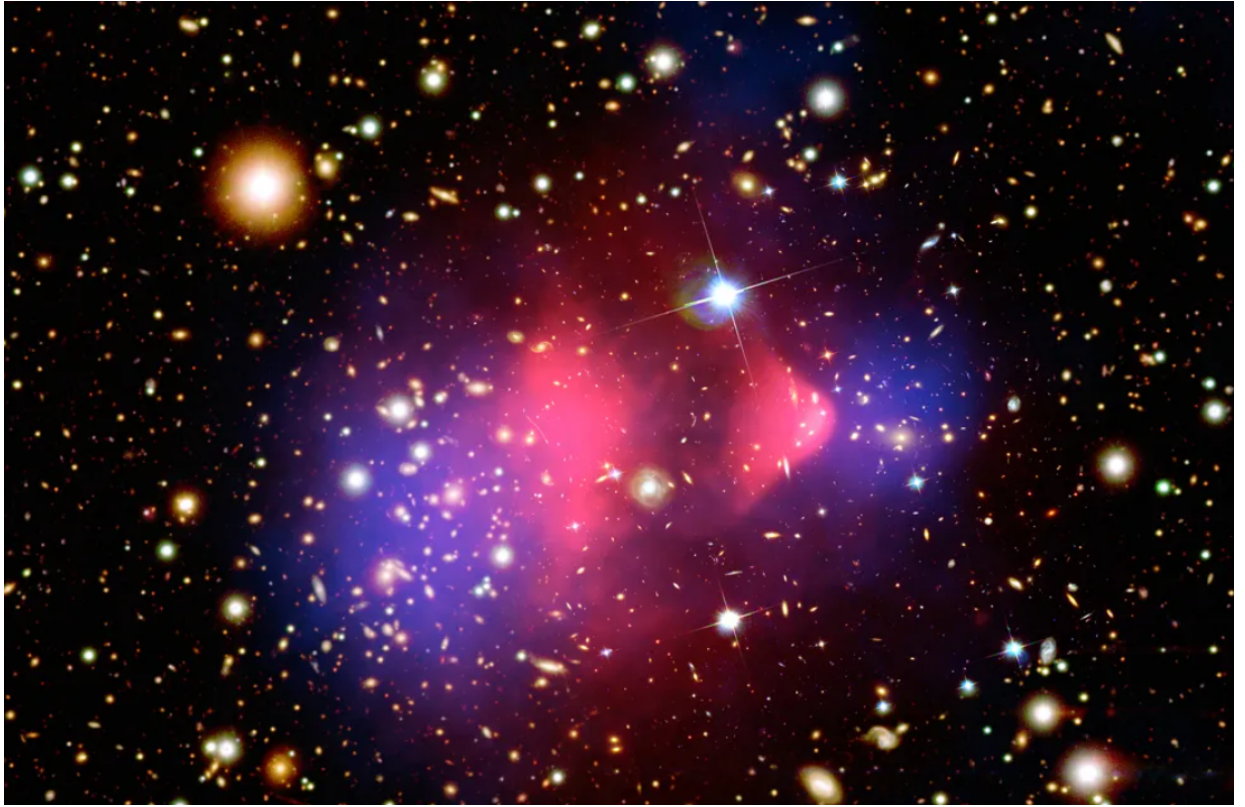


Рис. 0.1: Скопление галактик Пуля. Две галактики прошли друг сквозь друга и холодный газ в них не только нагрелся от трения, но и этим трением немного затормозился — его мы видим в виде двух розовых облаков (и большинство звезд тоже находится там). Основная масса двух галактик сконцентрирована не в области газа и звезд, а в областях, окрашенных синим цветом. Мы не только не видим ничего там, но, что еще более важно, эти области прошли сквозь сталкивающиеся галактики и друг сквозь друга практически не теряя скорости — барионная (обычная) материя не может вести себя таким образом

Отметим, что аналитическое решение задачи даже в пределах одной ячейки турбулентности в стационарном режиме, по-видимому, не представляется возможным. Для подтверждения выпишем лагранжиан частицы в поле и уравнения Лагранжа (выбраны координаты в плоскости Лапласа):

$$L = \frac{m}{2}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{eH}{c} \frac{y}{\sqrt{x}} f(0.25; 0.5; 1.5; -\frac{y^2}{x^2}) - 2\pi G \rho_0 \sqrt{x^2 + y^2}$$

Уравнения Лагранжа:

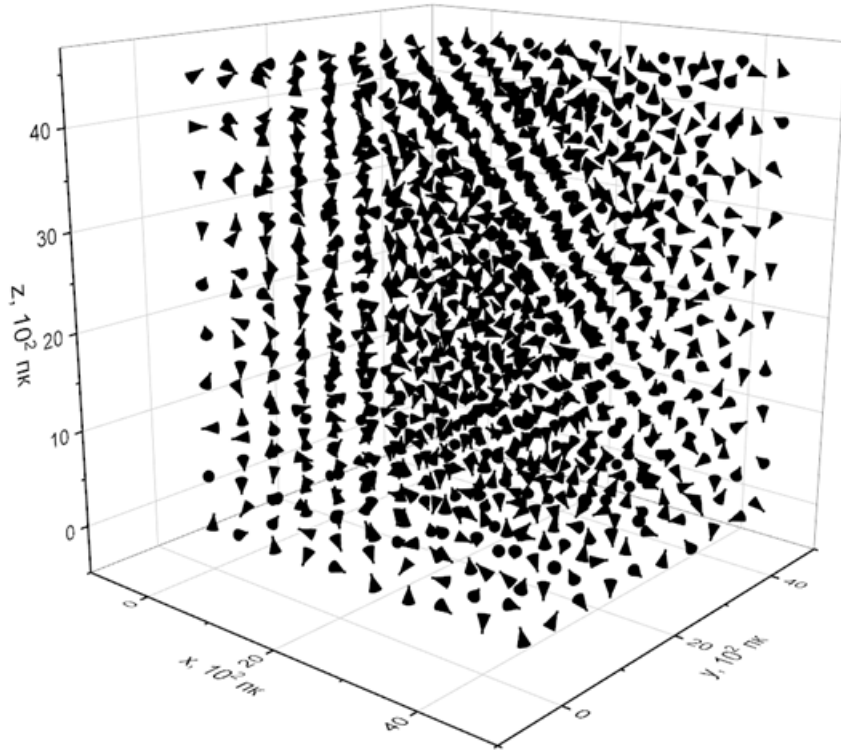


Рис. 0.2: Поле направлений мелкомасштабной компоненты магнитного поля

$$m\ddot{y} - \frac{eH\dot{x}}{c\sqrt{x}} \left(f(0.25; 0.5; 1.5; -\frac{y^2}{x^2}) - \frac{1}{6} \frac{y^2}{x^2} f(1.25; 1.5; 2.5; -\frac{y^2}{x^2}) \right) + 2\pi Gm\rho_0 \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} = 0$$

$$m\ddot{x} + \frac{eH}{c\sqrt{|x|}} f(0.25; 0.5; 1.5; -\frac{y^2}{x^2}) \left(\dot{y} - \frac{y\dot{x}}{2|x|} \right) + \frac{eH}{6c} \frac{y^2}{x^2\sqrt{|x|}} f(1.25; 1.5; 2.5; -\frac{y^2}{x^2}) \left(\frac{y\dot{x}}{x} - \dot{y} \right) +$$

$$\frac{eH}{2c} \frac{y\dot{x}}{\sqrt{|x^3|}} f(0.25; 0.5; 1.5; -\frac{y^2}{x^2}) - \frac{1}{6} \frac{eHy^3\dot{x}}{cx^3} f(1.25; 1.5; 2.5; -\frac{y^2}{x^2}) + 2\pi Gm\rho_0 \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} =$$

где $f(\dots)$ – гипергеометрическая функция.

Стоит также упомянуть, что строгое решение этой задачи неизбежно было бы связано с полномасштабным моделированием задачи N тел.

Моделирование

В данной работе мы моделируем движение ста частиц с различными начальными радиусами и скоростями, удовлетворяющими распределению Наварро, Френко и Уайта в гравитационном потенциале и

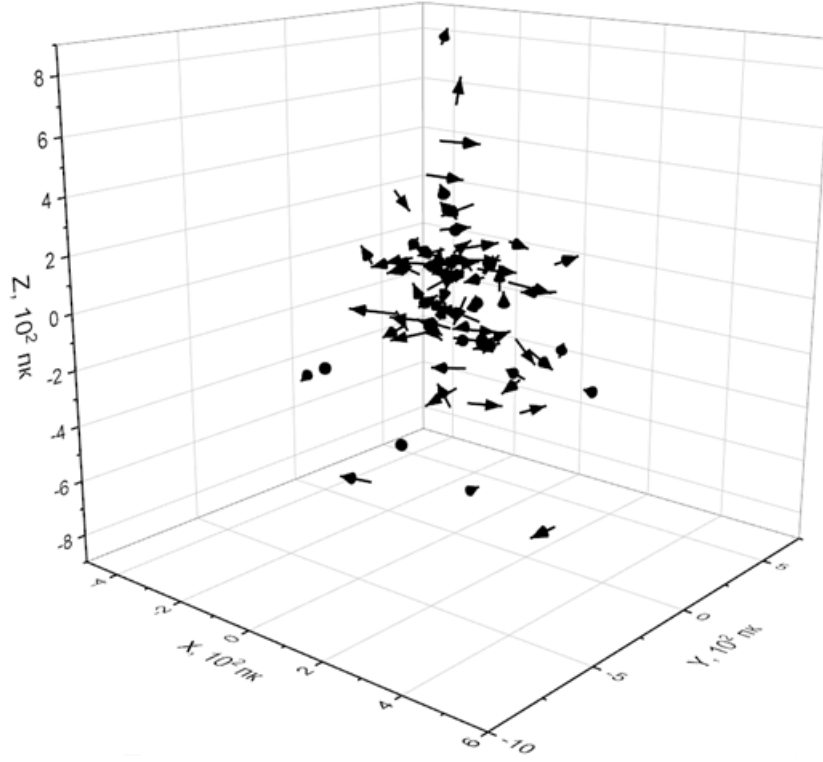


Рис. 0.3: Начальные положения частиц и их скорости

в мелкомасштабном магнитном поле. Конкретный набор космологических параметров взят из симуляций бесстолкновительной тёмной материи [132].

r_s , кПК	v_{200} , км/с	r_s/r_{200}	r_{200} , кПК
8.9	88	0.052	177

Изначально частицы составляли NFW профиль плотности, в ходе симуляции этот профиль изменялся, по его изменению возможно определить, может ли зеркальная гипотеза объяснить CORE-CUSP проблему.

Из-за ограниченных технических ресурсов мы не имеем возможности провести полноценную N-body симуляцию, поэтому полученные в ходе моделирования результаты можно считать в лучшем случае качественно описывающими ситуацию.

Напомним также, что, в силу модельных ограничений, нас не интересует область гало $r > r_s$.

Результатом симуляций являются траектории частиц в стохастическом поле, а также новое распределение плотности, которое зависит от параметра β . На Рис. 4-6 представлены траектории частиц для различных начальных условий.

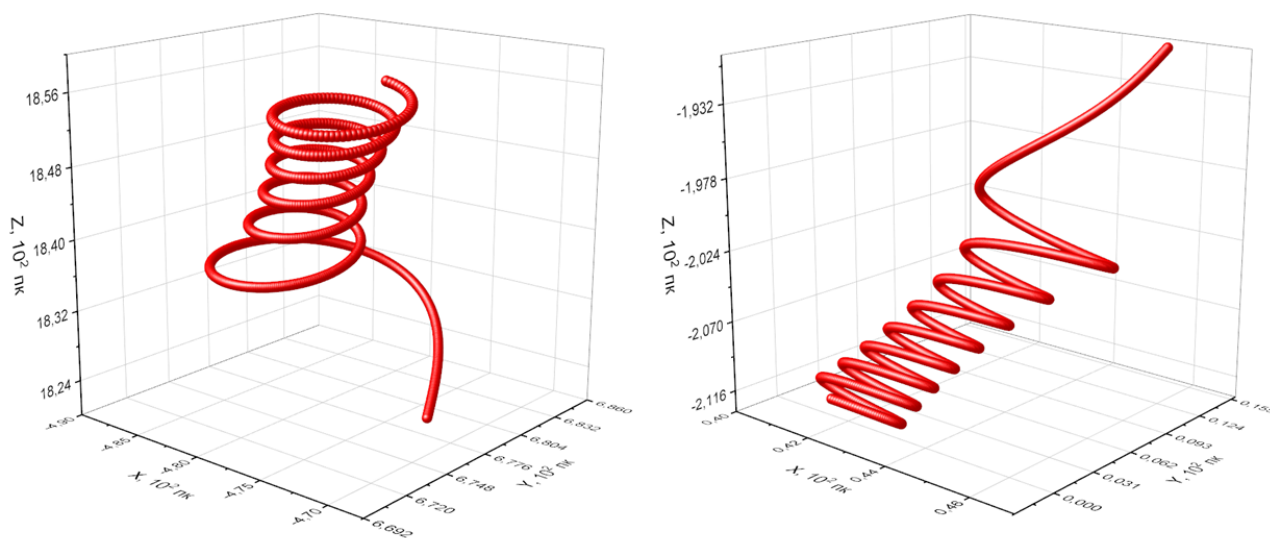


Рис. 0.4: Траектории частиц, 196 рс, 2 крс

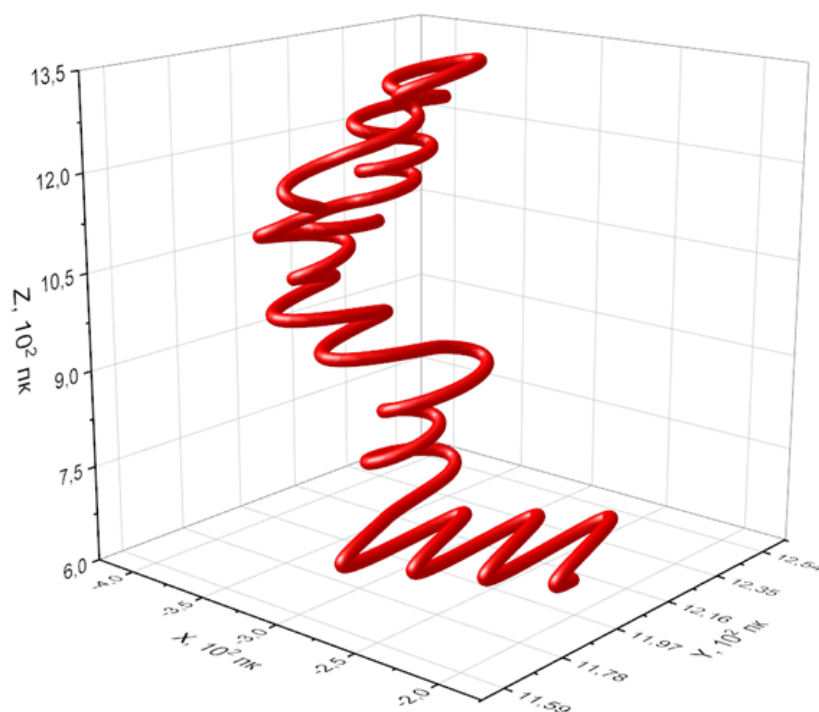


Рис. 0.5: Наглядное изменение траектории при переходе в другую ячейку турбулентности

Стоит отметить, что траектории частиц интуитивно достоверные как для частиц в локально однородном магнитном поле.

Для анализа плотности выберем область гало $r < 2\text{кpc}$. На Рис. 7 представлены профили плотностей для различных β .

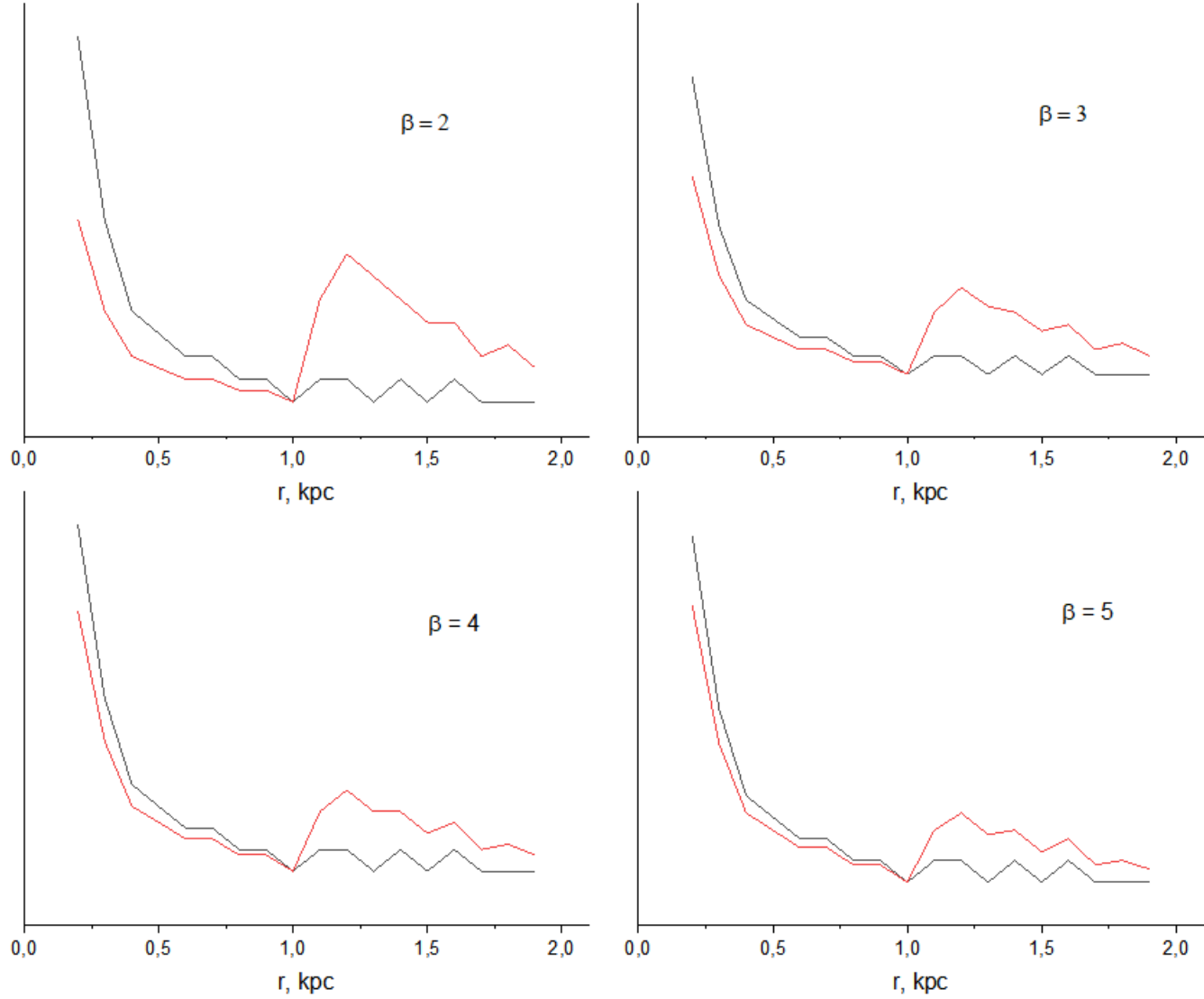


Рис. 0.6: Профили плотности для различных β . Чёрные линии – профили NFW

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют, что зеркальная гипотеза не способна, вообще говоря, решить проблему сингулярного гало (не наблюдается CORE-подобного поведения), однако вкупе с астрофизическими причинами (напр. представленными в [312]), сглаживающими профиль, может являться достоверной теорией, разрешающей кризис мелкомасштабной космологии. Возможно, различие с CORE-like профилем обусловлено низким качеством симуляции. Задача нуждается в моделировании на более высоком разрешении с большим числом частиц.

Несмотря на отсутствие явной константы, интегральная плотность на радиусах 0.5 - 2.0 кpc близка к постоянной, что на заре изучения LSB-галактик могло послужить доказательством правдивости теории.

Наилучшим образом наблюдательные данные описываются при $\frac{\Omega_{Mirror}}{\Omega_{Summ}} = 0.2$, это даёт новые возможности для экспериментальной проверки гипотезы (по наблюдениям за взаимодействующими галактиками низкой поверхностной яркости)

Также стоит отметить, что столь большая плотность зеркальной материи именно в LSB галактиках хорошо согласуется с выводами [321], которые писали, что области зеркальности порождают войды барионного (обычного) вещества – уменьшается поверхностная яркость галактики.

ССЫЛКИ

1. Дополняется