

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

Физический факультет
Кафедра физики частиц и космологии

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ГОРЯЧЕГО ГАЗА В ГАЛО МЛЕЧНОГО ПУТИ С ПОМОЩЬЮ МЕРЫ ДИСПЕРСИИ ПУЛЬСАРОВ

Курсовая работа
студентки 4 курса
Жежер Я.В.
Научный руководитель:
доктор физ.-мат. наук Троицкий С.В.
кандидат физ.-мат. наук Нугаев Э.Я.

Зав. кафедрой
физики частиц и космологии
Рубаков В.А.

Москва
2013

Содержание

1	Введение	2
2	Проблема нехватки барионов	3
3	Галактическое гало и его горячая составляющая	4
3.1	Состав гало Млечного Пути	4
3.2	Теоретические ограничения на параметры горячего гало .	5
3.2.1	Непрямые наблюдения	5
3.2.2	Рентгеновское излучение	6
3.2.3	Измерение меры дисперсии пульсаров	6
4	Модели, описывающие горячую межзвездную среду	8
4.1	Модель Маллера и Буллока (Maller&Bullock, 2004)	8
4.2	Модель Наварро, Френка и Уайта (Navarro, Frenk & White, 1991)	8
4.3	Модель диска	9
5	Предыдущие исследования	9
6	Анализ данных и результаты	10
6.1	Данные	10
6.2	Анализ и результаты	11
7	Выводы	13

1 Введение

Звезды в нашей Галактике существуют не сами по себе, а находятся в веществе: в разреженной материи, которая называется межзвездной средой. Она содержит обычную материю, релятивистские заряженные частицы, которые называют космическими лучами, а также магнитные поля. Эти три основные составляющие имеют сопоставимые давления и тесно связаны между собой электромагнитными силами. Через эту связь космические лучи и магнитные поля вместе действуют на обычную материю, определяя ее движение и пространственное распределение, что, в свою очередь, оказывает эффективное действие против гравитационного взаимодействия. С другой стороны, масса обычной материи сдерживает магнитные поля, а тем самым и космические лучи в Галактике; турбулентные движения могут быть ответственны за усиление магнитных полей для ускорения частиц.

На данный момент считается, что межзвездная среда содержит не более половины от полной массы Местной Группы [1]. Кроме того, она не светит так ярко и явно, как звезды, но играет жизненно важную роль во многих физических и химических процессах, которые происходят в Галактике.

Самый важный из этих процессов, вероятно, цикл превращения материи в звезды и обратно. В первом шаге звезды формируются из межзвездной материи. Она отнюдь не распределена равномерно по пространству, а наоборот, имеет сильную разницу в распределении по плотности и по температуре между разными областями, и только самые плотные и холодные могут становиться гравитационно неустойчивыми и образовывать новые звезды.

Затем в звездах материя проходит через ряд термоядерных реакций, в которых синтезируются тяжелые элементы. Часть их возвращается в межзвездное пространство в виде звездного ветра и через взрывы сверхновых. В обоих случаях кроме выброса вещества происходит и мощный выброс энергии, в свою очередь способствующий формированию неоднородностей.

Межзвездная среда – важная составляющая процессов, происходящих в Галактике, а потому знание ее свойств и состава позволит предсказывать эволюцию и химические реакции, в ней происходящие [8].

В данной работе рассматривается наименее изученная на данный момент составляющая межзвездной среды – горячий газ. Последние исследования показали, что он может быть распределен в гало вокруг Млечного Пути с радиусом более 100 кпк. Рассматриваются три различные модели распределения горячего компонента – Маллера и Буллока, Наварро, Френка и Уайта, а также экспоненциальная модель. Для их исследования применяется мера дисперсии пульсаров, которая позволяет

оценить концентрацию электронов на луче зрения.

2 Проблема нехватки барионов

Стандартная космологическая модель позволяет определить плотность барионов в космическом пространстве двумя различными способами: объединяя данные о космическом нуклеосинтезе с измерениями содержания гелия, дейтерия и лития, или анализируя спектральную плотность флуктуация температуры реликтового излучения [24].

Гравитирующую массу Местной группы можно достоверно определить из классического временного аргумента Кана-Вольтера. Кан и Вольтер заметили, что в Местной Группе существуют две основные спирали, которые приближаются друг к другу со скоростью 100 км с^{-1} . Такое движение, обратное расширению, может быть вызвано только гравитационными силами; причем расстояние между двумя спиралями гораздо меньше, чем расстояние до ближайшей яркой галактики М33, а значит гравитирующая масса сосредоточена только в спиралях.

Кан и Вольтер предположили простую модель – две массивные точки на круговой орбите. В момент Большого Взрыва они находились в периге, и к настоящему времени должны были пройти через апоцентр по крайней мере один раз. То есть апоцентр должен быть больше чем настоящее расстояние между спиралями, а период обращения – по крайней мере в два раза меньше возраста Вселенной. Эти ограничения выражаются формулами:

$$\begin{aligned} r &= a(1 - \cos \chi), \\ t &= \left(\frac{a^3}{GM} \right)^{1/2} (\chi - \sin \chi), \\ \frac{dr}{dt} &= \sqrt{\frac{GM}{a}} \frac{\sin \chi}{1 - \cos \chi}, \end{aligned} \tag{1}$$

где r – расстояние между спиралями на данный момент, $\frac{dr}{dt}$ – относительная скорость, a – большая полуось, χ – эксцентрическая аномалия, t – время, прошедшее с момента Большого Взрыва. Эта система имеет бесконечное множество решений, зависящих от числа проходов через апоцентр. Наименьшую (и наиболее правдоподобную) оценку для массы дает случай единичного прохождения: $5 \times 10^{12} M_{\odot}$ для всей материи в Местной Группе [4].

Доля барионов от всей массы вещества известна – $f_b = 0.165$ [9], и полная масса барионного вещества должна быть $M_b = (1.65 - 3.3) \times 10^{11} M_{\odot}$, а наблюдается масса $M_* \approx 0.65 \times 10^{11} M_{\odot}$

[10]. Масса холодного газа не дает существенного вклада, и еще как минимум $10^{11} M_{\odot}$ в Галактике не достает.

Есть два возможных решения этой проблемы: либо недостающие барионы находятся в межзвездном пространстве и окружают галактики (circumgalactic medium); либо каким-то образом в прошлом происходил "выброс" барионов в межгалактическое пространство (intergalactic medium) и они распределены в среде Местной Группы, которая содержит около пятидесяти галактик.

3 Галактическое гало и его горячая составляющая

Одна из теорий, которые могут объяснить недостаток барионов – существование гало вокруг нашей Галактики, образовавшегося за счет аккреции вещества из межгалактического пространства и из остатков взрывов сверхновых, с радиусом, достигающим 250 кпк. Это предположение отчасти подтверждается тем, что в Млечном Пути по-прежнему идет процесс звездообразования, причем скорость этого процесса остается примерно постоянной последние 5-7 миллиардов лет; затраченное вещество должно восполняться, что может происходить в процессе аккреции окологалактического вещества.

3.1 Состав гало Млечного Пути

Гало Млечного Пути состоит из нейтрального холодного, ионизованных теплого и горячего компонент. Нейтральный компонент – гало H_I , простирающееся на несколько килопарсек вне плоскости Галактики. Масса его составляет порядка $3 \times 10^8 M_{\odot}$, максимальная температура – около $3.7 \times 10^3 K$. "Холодным" этот компонент называется из-за своей температуры $\approx 10K$.

Теплый ионизованный компонент (warm ionized medium – WIM) состоит в основном из практически полностью ионизованного водорода, аналогично областям H_{II} в Млечном Пути. От них теплый компонент отличает наличие линий S_{II} и N_{II} , а также слабая линия O_{VI} . Размер теплого гало – несколько килопарсек, температура – около $10^4 K$. Масса его составляет около 30 % от всей массы межзвездного вещества (interstellar medium – ISM).

Идея существования горячего газа в межзвездном веществе впервые появилась в работе Спитцера (1956 год). Он предположил существование галактической короны, состоящей из горячего разреженного газа, которая бы создавала давление, нужное для существования наблюдаемых межзвездных облаков на высоких широтах. Двадцать лет спустя два

независимых измерения подтвердили существование такого газа: данные со спутника Коперник, который обнаружил в спектре нескольких ярких звезд широкие ультрафиолетовые линии поглощения сильно ионизованных атомов, ионизация которых происходит только при температурах выше определенных; а также наблюдаемое фоновое мягкое рентгеновское излучение, которое наиболее вероятно появляется вследствие термальной эмиссии из горячего межзвездного газа.

На данный момент предполагаются два основных механизма формирования горячего газа: взрывы сверхновых и мощные ветра от звезд-источников. Взрывы сверхновых создают быстро распространяющиеся ударные волны в межзвездной среде, которые заметают полости, наполненные горячим разреженным газом и окруженные холодной плотной оболочкой сколлапсировавшей межзвездной материи [8].

Если гало горячего газа действительно существует, то оно представляет собой потенциальный источник недостающих барионов Галактики. Существуют экспериментальные доказательства того, что по крайней мере часть этих барионов содержится в протяженной горячей короне. Например, это позволяет объяснить облака газа в Магеллановом потоке и форму оболочек вдоль краев Большого Магелланова облака [17].

3.2 Теоретические ограничения на параметры горячего гало

3.2.1 Непрямые наблюдения

Наблюдения карликовых галактик-спутников – один из самых явных методов доказательства существования горячего газа в гало. Карликовые галактики обычно насыщены газом, кроме тех случаев, когда они находятся близко (ближе чем на 300 кпк) к более крупной системе. Такие наблюдения проводились в 2009 году Грчевичем и Путманом, которые изучали компонент H_I в карликовых галактиках Местной группы. Они определили примерный радиус обрезания, который составил 270 кпк. Давление горячего газа способно "обдирать" карликовые галактики, создавая недостаток в них водорода.

Кроме того, некоторые ограничения возможны из изучения газовых облаков вокруг Галактики, таких как Магелланов поток: их существование также возможно объяснить давлением горячего газа, который играет роль конфайнмента, не дающего этим облакам распространяться по среде.

3.2.2 Рентгеновское излучение

Рентгеновское излучение позволяет получить ограничения на размеры и плотность горячего газа вокруг Галактики. Получаемый спектр следует аппроксимировать суммой трех компонент: космический рентгеновский фон, тепловое излучение плазмы солнечного ветра и отдаленное тепловое излучение. Третий компонент и считается возникающим из-за существования гало [32].

3.2.3 Измерение меры дисперсии пульсаров

Пульсар представляет собой быстро вращающуюся нейтронную звезду с массой около 1.4 солнечных масс с радиусом около 20 км. Пульсары испускают периодическое радиоизлучение, которое можно сравнить со светом маяка: мы видим луч, только когда маяк поворачивается к нам. Это излучение, как полагают, связано с сильным магнитным полем пульсара и испускается с полюсов [23]. Большинство пульсаров имеет период вращения от 0.25 с до 2 с. Период вращения пульсаров постепенно увеличивается и определяется отношением $P/\dot{P}$, которое называется характерным временем жизни пульсара. Типичное значение $P/\dot{P} = 10^7$ лет [3].

В среднем импульсы, испускаемые пульсарами, имеют очень стабильную форму с предсказуемым временем прихода. Проходя через межзвездную среду, импульс меняется, и, изучая эти изменения, можно определять свойства среды. В частности, для этого используется одна из характеристик пульсаров – мера дисперсии. Мера дисперсии позволяет рассмотреть распределение свободных электронов на луче зрения до пульсара, находящегося на расстоянии D от Земли:

$$DM = \int_0^D \rho_e(r) dr \quad (2)$$

Мера дисперсии определяется через относительную задержку времени прихода сигналов на двух разных частотах:

$$\delta t = K \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) DM, \quad (3)$$

где $K = \frac{1}{2.410331 \times 10^{-4}}$ МГц²см³с/пк. Таким образом эту характеристику можно определять с большой точностью.

Итак, третий метод получения ограничений на параметры гало – измерение меры дисперсии пульсаров. Так как в выражение для меры дисперсии входит плотность электронов на луче зрения, можно оценить вклад теплого и горячего компонентов межзвездного пространства, сравнивая полную меру дисперсии, которая определяется экспериментально,

с рассчитанной суммой вкладов теплового и горячего компонент межзвездной среды.

Расстояние до пульсаров обычно определяют через меру дисперсии. Однако существует класс пульсаров, расстояние до которых можно измерять независимо. С их помощью можно проводить более достоверные исследования межзвездного пространства – это пульсары в шаровых скоплениях [21].

Шаровое звездное скопление (англ. globular cluster) – скопление, содержащее большое число звезд и обращающееся вокруг галактического центра в качестве спутника. Шаровые скопления сильно гравитационно связаны, поэтому имеют сферическую форму, а концентрация звезд в них увеличивается ближе к центру. На данный момент в нашей Галактике обнаружено около 150 шаровых скоплений.

Известно 28 шаровых скоплений, в которых находятся 144 пульсара. Наибольшее количество пульсаров находится в скоплениях 47 Тусанае и Terzan 5 [27].

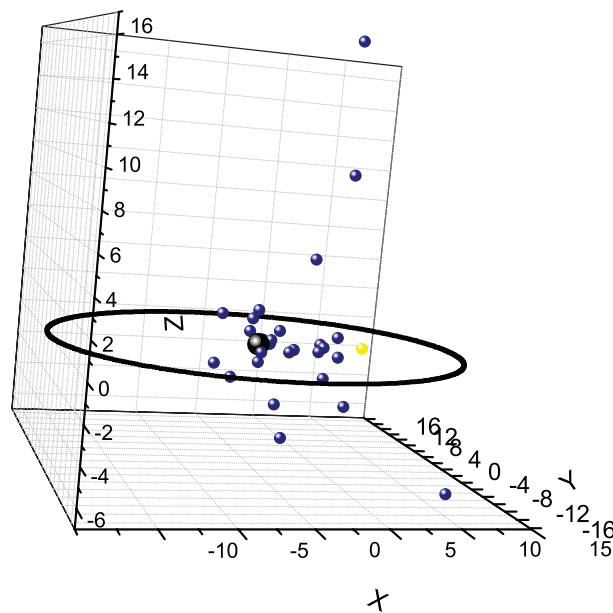


Рис. 1: Распределение шаровых скоплений вокруг Млечного Пути

На рис. 1 показано распределение шаровых скоплений, в которых есть пульсары, вокруг Млечного Пути в системе координат с началом отсчета в центре Галактики. Здесь черная сфера – галактический центр, желтая – Солнечная система, расстояния измеряются в килопарсеках.

4 Модели, описывающие горячую межзвездную среду

На сегодняшний день три модели наиболее часто употребляются для описания горячего гало: модель Маллера и Буллока, модель Наварро, Френка и Уайта и модель диска [1].

4.1 Модель Маллера и Буллока (Maller&Bullock, 2004)

Модель Маллера и Буллока (МВ) предполагает, что газ находится в гидростатическом равновесии внутри гало темной материи. Если горячий газ существенно не излучает, то будет адиабатически подстраиваться под изменение давления. Внутри R_c – радиуса охлаждения (cooling radius) газ считается адиабатическим с $P \propto \rho_h^{5/3}$. Гравитационным потенциалом (распределением темной материи) считается NFW-профиль гало темной материи с концентрацией C_v [11].

Распределение имеет вид:

$$\rho_g^{MB}(r) = \rho_v \left[1 + \frac{3.7}{x} \ln(1+x) - \frac{3.7}{C_v} \ln(1+C_v) \right]^{3/2} \quad (4)$$

$$T_g^{MB}(r) = T_v \left[1 + \frac{3.7}{x} \ln(1+x) - \frac{3.7}{C_v} \ln(1+C_v) \right], \quad (5)$$

здесь r – расстояние от Галактического центра, $x \equiv r/R_s$, R_s – характерный радиус гало темной материи, ρ_v – плотность газа на расстоянии вириального радиуса, T_v – температура на расстоянии вириального радиуса.

4.2 Модель Наварро, Френка и Уайта (Navarro, Frenk & White, 1991)

Модель Наварро, Френка и Уайта описывает пространственное распределение массы темной материи, примененное к гало, обнаруженному при моделировании системы N тел в стандартной космологической модели. Это аппроксимация равновесного распределения темной материи, полученного в моделировании частиц, не испытывающих столкновения. Профиль NFW чаще всего используется для описания темной материи.

Выражение для плотности в этой модели имеет вид:

$$\rho_g^{NFW}(r) = \frac{\rho_g}{x(1+x)^2}, \quad (6)$$

здесь также $x \equiv r/R_s$, $R_s \equiv R_v/C_h$ – характерный радиус в модели NFW.

Применительно к горячему газу, предположение состоит в том, что профиль плотности горячего межзвездного газа просто повторяет распределение для темной материи, при этом концентрация C_h горячего газа может как совпадать с концентрацией C_v темной материи, $C_h = 12$, и тогда горячее гало полностью повторяет гало темной материи, так и отличаться, $C_h = 3$ (случай низкой концентрации).

4.3 Модель диска

Еще одна модель, которая претендует на описание распределения горячего газа в гало – экспоненциальная модель диска, которая подтверждается последними наблюдениями рентгеновского излучения. Распределение по плотности и температуре в этой модели имеет вид:

$$\rho_g^{DISK}(z) = \rho_0 \exp\left(-\frac{z}{h_\rho \xi}\right) \quad (7)$$

$$T_g^{DISK}(z) = T_0 \exp\left(-\frac{z}{h_T \xi}\right), \quad (8)$$

здесь ξ – объемный фактор заполнения, z – расстояние от поверхности диска, ρ_0 и T_0 – плотность и температура газа на характерном расстоянии, h_ρ и h_T – соответствующие характерные расстояния.

5 Предыдущие исследования

В своей статье "A huge reservoir of ionized gas around the Milky Way: accounting for the Missing Mass?" (Gupta et al., 2012) [2] А. Гупта, С. Матур и другие исследовали теплую и горячую составляющие межзвездного вещества, используя данные космической рентгеновской обсерватории "Чандра" (Chandra X-ray Observatory).

Идея этого исследования состояла в изучении линий поглощения сильно ионизованного газа с $z \approx 0$ в спектрах активных ядер галактик. В результате были найдены линии поглощения $K\alpha$ O_{VII} и O_{VIII} , а в шести источниках – линия $K\beta$ O_{VII} .

Для оценки ионной плотности столбца использовалось приближение оптически прозрачного газа: $N(ion) = 1.3 \times 10^{20} \left(\frac{EW}{f\lambda^2}\right)$, где EW – эквивалентная ширина перехода, f – сила осциллятора для перехода. Был получен разброс значений для O_{VII} : $\log N(O_{VII}) = 15.82 - 16.50 \text{ cm}^{-2}$, и среднее значение для O_{VIII} $\log N(O_{VIII}) = 16.19 \pm 0.08 \text{ cm}^{-2}$.

В результате было получено, что горячий газ с температурой 10^6 K простирается вне диска на расстояния $L > 139 \text{ кпк}$, масса его составляет $M_{total} > 6.1 \times 10^{10} M_\odot$. Плотность газа имеет ограничение сверху: $n_e < 2.6 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$.

6 Анализ данных и результаты

6.1 Данные

Для вычислений использовались данные о 144 пульсарах, которые находятся в 28 шаровых скоплениях вокруг Млечного Пути [6]. Расстояние, галактическая широта и экспериментально определенная мера дисперсии были взяты из каталога ATNF Pulsar Catalogue (Australia Telescope National Facility) [5].

Идея вычислений состоит в том, чтобы рассчитывать вклад горячего газа в меру дисперсии, и далее анализировать эти данные, сравнивая с полной мерой дисперсии пульсаров. Использовались четыре модели, описанные выше - Наварро, Френка и Уайта – далее NFW с $C = 12$ и $C = 3$, Маллера и Буллока – MB и экспоненциальная модель – DISK.

Каждая из моделей описывает распределение плотности по массе, но не концентрацию электронов – величину, которая входит в выражение для меры дисперсии. В статье Гупты было указано, что в горячем газе нашли линии поглощения двух ионов кислорода – O_{VII} и O_{VIII} , то есть кислорода с одним оставшимся электроном и полностью ионизованного кислорода. Зная массу, можно найти количество атомов в единице объема, исходя из соотношения:

$$\frac{m}{M} = \frac{N}{N_A}, \quad (9)$$

где m – масса вещества, M – молярная масса, N – число атомов, N_A – число Авогадро. Заменяя массу на плотность, получаем необходимую величину:

$$\frac{\rho}{M} = \frac{n}{N_A}. \quad (10)$$

Для того, чтобы найти концентрацию электронов, нужно умножить концентрацию атомов на количество электронов. Известно, что O_{VII} и O_{VIII} находятся в смеси в горячем веществе, но до сих пор не была найдена конкретная пропорция содержания двух газов. Поэтому рассматривались два разных варианта – концентрация электронов, если горячее вещество состоит только из O_{VII} и только из O_{VIII} ; то есть были рассчитаны верхняя и нижняя границы вклада горячего газа в меру дисперсии.

$$n_e^{O_{VII}} = 7 \times \frac{\rho \times N_A}{M} \quad (11)$$

$$n_e^{O_{VIII}} = 8 \times \frac{\rho \times N_A}{M} \quad (12)$$

Таким образом, выражение для каждого распределения, кроме того, нужно умножить на 2.625×10^{26} для семи электронов и на 3×10^{26} для восьми электронов.

Также во все распределения входит не определенный заранее нормировочный множитель ρ_0 . Он подбирается таким образом, чтобы полная масса вещества в гало была $10^{11} M_\odot$, то есть чтобы в горячем газе содержалась недостающая барионная масса.

Вириальный радиус Млечного Пути – $R_v = 260 \text{ кпк}$, масса вещества в сфере радиуса R_v :

$$M = 4\pi \int_0^{260} \rho r^2 dr, \quad (13)$$

причем нужно учесть, что такой расчет дает нормировочный множитель в единицах $\frac{\text{кг}}{\text{кпк}^3}$, которые нужно перевести в $\frac{\text{кг}}{\text{см}^3}$. Полученные в результате значения:

$$\begin{aligned} \rho_v^{MB} &= 0.069 \times 10^{-27} \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \\ \rho_{v,C=12}^{NFW} &= 0.32 \times 10^{-25} \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \\ \rho_{v,C=3}^{NFW} &= 0.13 \times 10^{-26} \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \\ \rho_v^{DISK} &= 4 \times 10^{-25} \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \end{aligned}$$

Вкупе с данными о расстояниях до шаровых скоплений это позволяет посчитать теоретический вклад в меру дисперсии горячего газа для всех пульсаров для разных моделей.

6.2 Анализ и результаты

В результате для всех 144 пульсаров была рассчитана мера дисперсии согласно 8 имеющимся распределениям плотности. Самый простой способ проверки модели – ее непротиворечие с имеющимися экспериментальными данными.

Во-первых, посчитанная таким образом мера дисперсии не должна превышать экспериментальную, так как горячий газ дает лишь один из множества вкладов, и суммарное число, разумеется, должно быть больше. Оказалось, что одна из моделей явно противоречит эксперименту: в модели NFW для концентрации $C = 3$ для пульсаров B1310+18 и J0514-4002A, а также для пульсаров из шаровых скоплений M30, M15, M53, M3 и M5 теоретически рассчитанная мера дисперсии больше экспериментальной. Следовательно можно сделать вывод о несоответствии этого распределения реальному распределению плотности горячего гало.

Далее, возможно оценить среднюю плотность электронов на луче зрения:

$$\langle n_e \rangle = \frac{DM}{L}, \quad (14)$$

где L – расстояни до пульсара в парсеках. Средняя плотность электронов в межзвездной среде известна – 10^{-2} см^3 , и плотность горячего газа не должна превышать ее.

На рис. 2 показаны примеры распределения плотностей горячего газа, рассчитанных теоретически и экспериментально – вычисленных на основе известной меры дисперсии для различных моделей. Для всех моделей плотность оказалась меньше экспериментальной, с этой точки зрения все они правдоподобны.

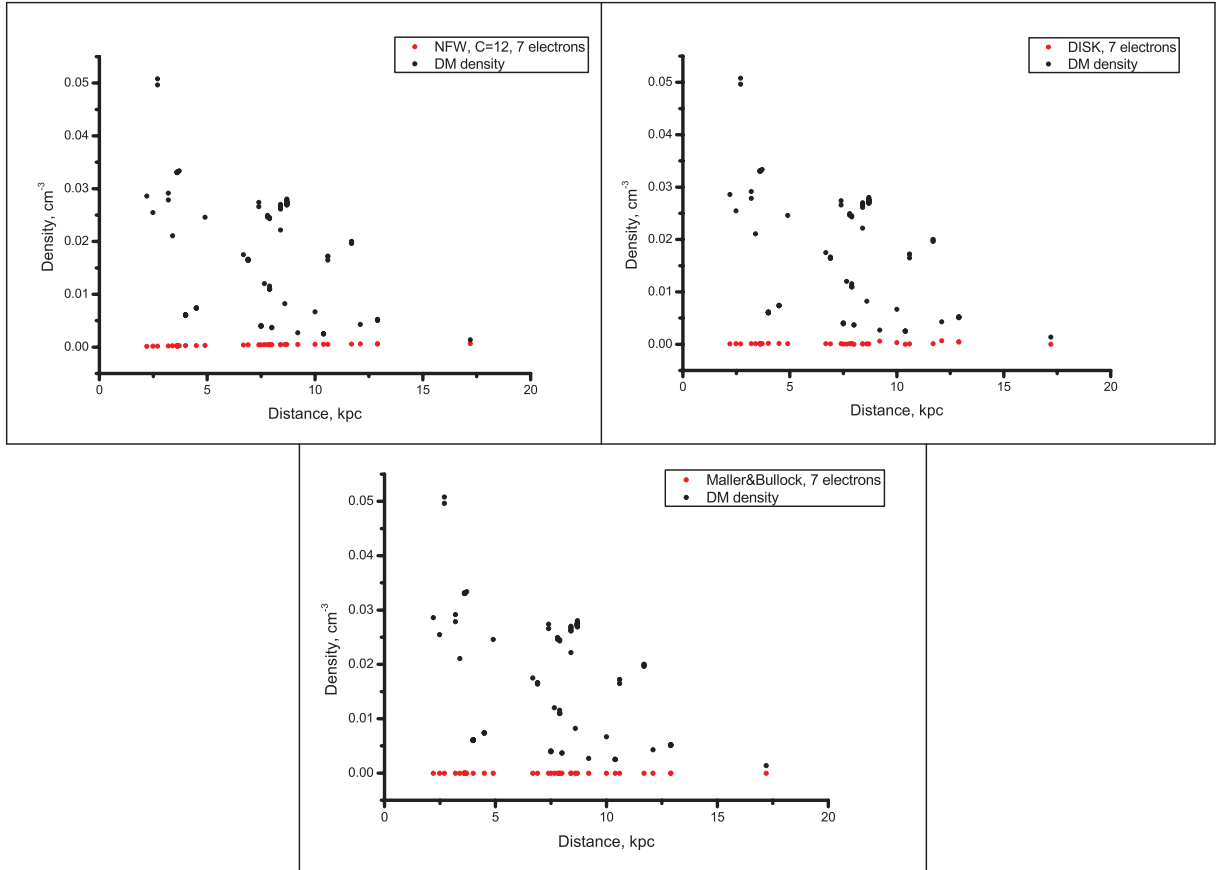


Рис. 2: Сравнение теоретической и экспериментальной концентраций электронов

Один из способов сравнения с экспериментальными данными – вычисление попарных разностей мер дисперсий пульсаров. Так как полная мера дисперсии складывается из сумм разных компонентов, разность экспериментальных мер дисперсии должна быть больше разности рассчитанных вкладов горячего гало:

$$DM_{real} = DM_{hot} + DM_{warm} + \dots$$

$$\Delta DM_{real} = \Delta DM_{hot} + \Delta DM_{warm} + \dots > \Delta DM_{hot}$$

На рис. 3 показана интерпретация этого способа. По осям Y – subtractDM – отложены попарные разности экспериментальных мер дисперсий, а по осям X – разности мер дисперсий для различных моделей. Обозначения моделей: MB7el, MB8el – модель Маллера и Буллока для семи и восьми электронов, соответственно; NFWC127el, NFWC128el – модель Наварро, Френка и Уайта с концентрацией $C = 12$; NFWC37el, NFWC38el – модель Наварро, Френка и Уайта с концентрацией $C = 3$; DISK7el, DISK8el – модель диска. Красная прямая – прямая $X = Y$ на всех графиках.

Так как разность экспериментальных мер дисперсии всегда больше разности вкладов от горячего газа, все точки на графиках должны лежать выше прямой $X = Y$, за исключением, возможно, некоторых событий, поскольку встречаются пульсары с аномально высокими или низкими мерами дисперсии. Однако оказалось, что для всех моделей число точек ниже прямой много меньше полного числа точек (10296 точек), следовательно, таким образом нельзя с уверенностью признать модель не соответствующей действительности.

7 Выводы

Введение и правильное описание гало горячего газа может позволить описать одну из основных космологических проблем – проблему нехватки барионов. Поэтому важно составить модель, которая бы правильно описывала его распределение по плотности и температуре.

Их четырех существующих моделей распределения горячего газа в гало вокруг Млечного Пути удалось явно исключить одну – модель Наварро, Френка и Уайта для концентрации $C = 3$. Другие способы сравнения полученных результатов с экспериментальными данными не позволяют в явном виде признать какую-либо модель не соответствующей действительности.

В дальнейшем возможно применить статистические методы проверки моделей, использовать нейтрон-протонное отношение, которое позволит оценить плотность газа, не опираясь на данные о содержании кислорода: наличие кислорода в гало на данный момент не может считаться полностью доказанным.

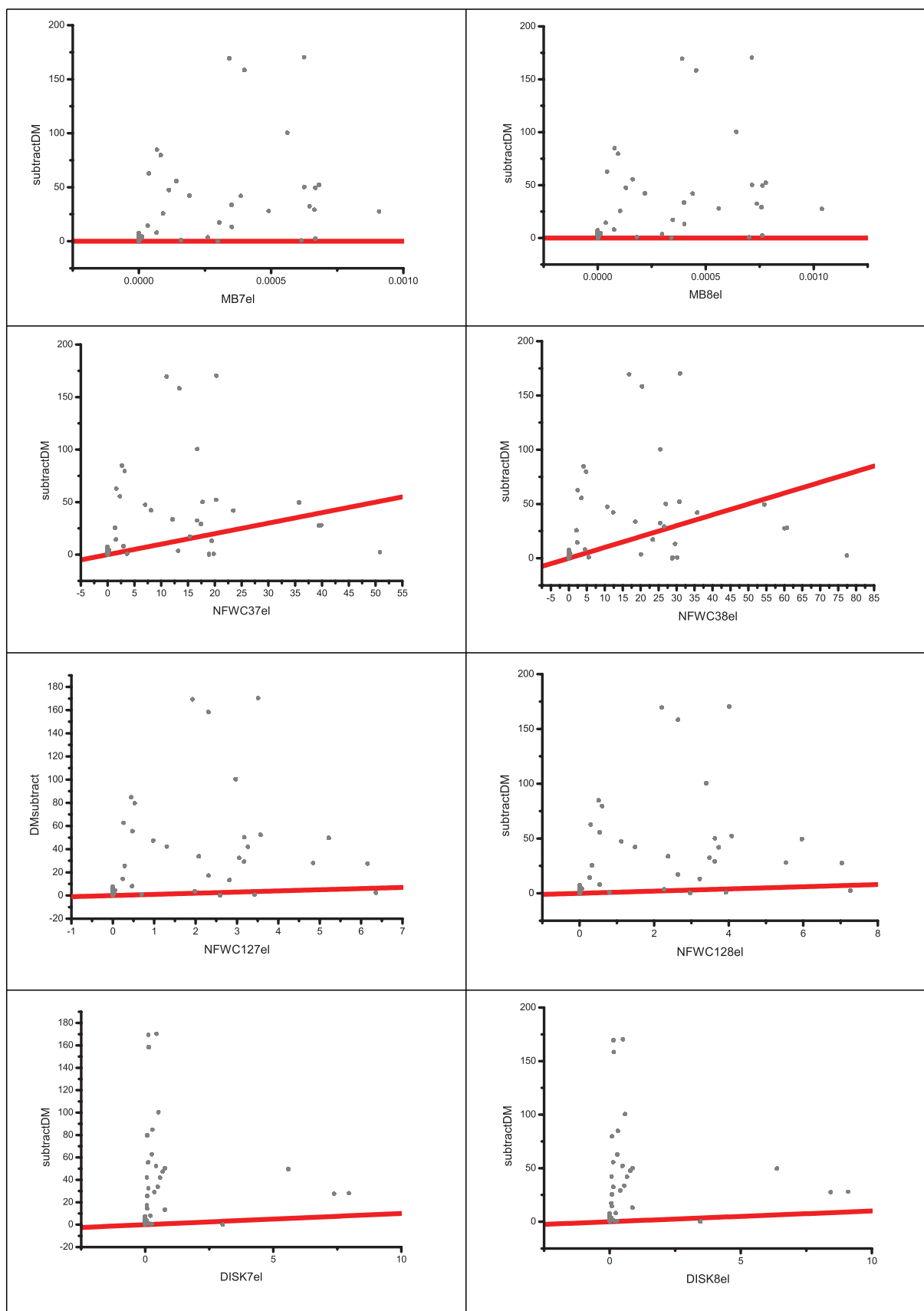


Рис. 3: Попарные теоретические и экспериментальные разности мер дисперсий для пульсаров

Список литературы

1. T. Fang, J. Bullock, M. Boylan-Kolchin (2012) [arXiv:1211.0758v1].
2. A. Gupta, S. Mathur, Y. Krongold, F. Nicastro, M. Galeazzi (2012) *ApJ*, 756, L8 [arXiv:1205.5037].
3. В.Л. Гинзбург (1971) *УФН* **103**, 3.
4. Y.-S. Li, S. D. M. White (2008) *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **384**, 1459–1468.
5. G. B. Hobbs, R. N. Manchester. ATNF Pulsar Catalogue.
<http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>
6. P. C. Freire. Pulsars in globular clusters.
<http://www.naic.edu/~pfreire/GCpsr.html>
7. W. E. Harris. Catalog of Parameters for Milky Way Globular Clusters: The Database. <http://physwww.mcmaster.ca/~harris/mwgc.dat>
8. K. M. Ferriere (2001) *Rev.Mod.Phys.* **73**, 1031-1066.
9. E. Komatsu, K. M. Smith, J. Dunkley (2011) *ApJS* **192**, 18.
10. P. J. McMillan, J. Binney (2012) *MNRAS* **419**, 2251.
11. A. H. Maller , J. S. Bullock (2004) *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* **355**, 694-712 [arXiv:astro-ph/0406632].
12. S. Redfield, R. E. Falcon (2008) [arXiv:0804.1802].
13. E. M. Berkhuijsen, A. Fletcher (2008) [arXiv:0806.4316].
14. A. Marasco, F. Fraternali (2010) [arXiv:1010.3563].
15. G. Nelemans, J. W. Hartman, F. Verbunt, D. Bhattacharya, R. A.M.J. Wijers (1997) *Astron. Astrophys.* **322**, 489-492.
16. E. J. Hodges-Kluck, J. N. Bregman (2012) [arXiv:1211.1669].
17. J. Binney, F. Fraternali (2011) [arXiv:1110.3282].
18. M. E. Anderson, J. N. Bregman (2010) [arXiv:1003.3273].
19. M. Guélin (1974) *Galactic Radio Astronomy* **1**, 51-63.
20. F. J. Lockman (2002) *The Astrophysical Journal* **580**:L47–L50.
21. B. M. Gaensler, G. J. Madsen, S. Chatterjee, S. A. Mao (2008) [arXiv:0808.2550].

22. L. M. Haffner, R.-J. Dettmar, J. E. Beckman (2009) *Rev.Mod.Phys.* **81**, 969 [arXiv:0901.0941].
23. L. M. Marschke (2006) *UW-L Journal of Undergraduate Research* **IX**.
24. S. S. McGaugh (2007) *Proceedings of the International Astronomical Union* **Volume 3**, Symposium S244, 36-145.
25. R. Dave (2009) [arXiv:0901.3149].
26. B. McKernan, T. Yaqoob, C. S. Reynolds (2004) *The Astrophysical Journal* **617**, 232–239.
27. F. Camilo , F. A. Rasio (2005) *ASP Conf. Ser.* **Vol. 328**, 147.
28. J.-S. Hwang, C. Park, J.-H. Choi (2012) [arXiv:1212.6721].
29. D. B. Henley, R. L. Shelton, K. Kwak, M. Ryan Joung, M.-M. Mac Low (2010) *ApJ* **723**, 935 [arXiv:1005.1085].
30. D.-W. Kim, S. Pellegrini "Hot Interstellar Matter in Elliptical Galaxies". Springer, 2012.
31. D. D. Clayton "Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis". The University of Chicago Press, 1983.
32. H. W. Woerden, B. P. Wakker, U. J. Schwartz, K. S. De Boer "High-Velocity CLouds". Kluwer Academic Publishers, 2004.