

УДК: 514.8,521,539

Введение барионных струн в модель структуры спиральных галактик

А. В. Коганов¹, В. Г. Кречет²

¹Научно-исследовательский институт системных исследований РАН,
Россия, 117218, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36, к. 1

²Московский государственный технологический университет «Станкин»,
Россия, 127055, г. Москва, Вадковский пер., д. 1

E-mail: koganow@niisi.msk.ru

Получено 1 июля 2012 г.,
после доработки 1 августа 2012 г.

Предлагается новый альтернативный подход для объяснения плоского спектра скоростей орбитального движения звезд на периферии спиральных галактик и, в частности, значительного превышения значений скоростей, вычисленных по теореме о вириале. Концепция заключается в предположении о наличии у гравитационного поля центрального тела галактики цилиндрической, а не сферической симметрии. Эту конфигурацию поля можно объяснить наличием на оси галактики космической струны, длина которой перекрывает диаметр диска галактики. Эта модель будет подвергнута сравнению с более традиционной концепцией наличия у спиральной галактики шарового гало темной материи. Для этого подхода также будет предложена кинематическая модель и высказана гипотеза о природе темного вещества. Исследуются данные астрономических наблюдений о наличии космических струн в зонах, примыкающих к галактикам.

Ключевые слова: спиральная галактика, гравитация, темная материя, космические струны

The introduction of baryon string in the model of spiral galaxies structure

A. V. Koganov¹, V. G. Krechet²

¹Scientific-research Institute of system studies of RAS, 36 Nakhimovsky st., build 1, Moscow, 117218, Russia.

²Moscow state technological University «Stankin», 1 Vadkovsky per., Moscow, 127055, Russia.

Abstract. – It proposes a new alternative approach to explain the flat spectrum of the velocity for stars orbital motion on the periphery of spiral galaxies. In particular, that velocity significant excess of speed calculated according to the virial theorem. The concept is the assumption of the existence for gravitational field of the Central body of the galaxy cylindrical, and not spherical, symmetry. The configuration of this field can be explained by the presence on galaxy axis the cosmic string, the length of which covers the diameter of the disk of the galaxy. This model will be subjected to comparison with the more traditional concept of the availability of the spiral galaxy ball halo of dark matter. For this approach it will also be offered a kinematic model, and the hypothesis about the nature of dark matter. It examines the data of astronomical observations about the presence of cosmic strings in the zones adjacent to galaxies.

Keywords: a spiral galaxy, gravity, dark matter, cosmic strings

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2012, vol. 4, no. 3, pp. 597–612 (Russian).

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, а также при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 10-01-00041а, и Российского гуманитарного научного фонда, проект 11-03-00035а.

1. Введение

Как известно [Зельдович, Новиков, 1967], тщательное изучение движения звезд в галактиках привело в середине XX века к обнаружению аномалии спектра их скоростей в зависимости от расстояния до центра диска галактики по отношению к предсказаниям механики Ньютона. Объяснение этих эффектов потребовало пересмотра представлений о структуре галактик. Во-первых, выяснилось, что на периферии диска орбитальные скорости звезд не соответствуют потенциальной энергии гравитационного поля наблюдаемых объектов галактики. Это нарушало вириальную теорему, что породило предположение о наличии в галактике дополнительной массы. Во-вторых, спектр скоростей орбитального движения звезд при достаточном удалении от центра оказался плоским, т. е. эти скорости слабо и немонотонно зависели от радиуса орбиты: $v(r) \approx \text{const}$. В рамках ньютоновской теории гравитации, которая достаточно хорошо проверена для больших удалений от центра гравитации, указанная зависимость имеет вид $v(r) \sim 1/\sqrt{r}$. Сравнение этих спектров представлено на рисунке 1. Эти проблемы привели исследователей к гипотезе о существовании в галактиках ненаблюдаемой дополнительной материи (скрытой массы). Такая материя могла бы теоретически согласовать наблюдения с вириальной теоремой при определенном распределении скрытой массы в пространстве вокруг диска галактики. К такому же выводу привели и некоторые другие наблюдения, которые не обсуждаются в рамках данной работы. В настоящее время указанная скрытая масса получила название «темная материя».

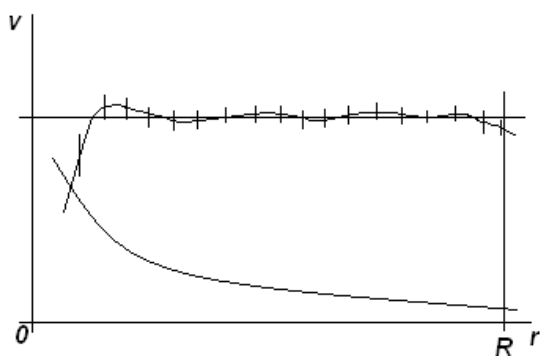


Рис. 1. Теоретический спектр орбитальных скоростей звезд v по Ньютону в зависимости от расстояния r до центра галактики (нижняя кривая) и типичный реальный спектр скоростей

Выдвигалось несколько гипотез о природе темной материи. Вначале высказывалось предположение о ее нейтринной природе [Зельдович, 1967; Линде, 1990]. Но полученные малые оценки возможной массы у нейтрино всех типов (единицы электрон-вольт) показали, что эти частицы не могут обеспечить необходимый гравитационный эффект. Позднее на роль частиц темной материи предлагались аксионы – псевдоскалярные частицы, существование которых предполагалось в теории сильных взаимодействий для предотвращения возможного нарушения CP-инвариантности. Но эти частицы не были обнаружены [Silk, 2012]. В конце XX века на ту же роль предлагались нейтралино – суперпартнер фотона. Ожидалось обнаружение этих частиц на Большом Адронном коллайдере, но пока ни одна суперчастица в этих экспериментах не была обнаружена.

Эти проблемы с объяснением природы темной материи явились стимулом для авторов, чтобы выдвинуть альтернативную концепцию объяснения наблюдаемых аномалий в движении звезд спиральных галактик. При этом будет использована ньютоновская теория гравитации. Эффект будет получен за счет гипотетического введения в галактику темного вещества, имею-

Согласование теории и наблюдения требует предположения о преобладании темной массы над массой яркой материи (наблюдаемые небесные объекты) примерно в 6–7 раз. Это означает, что наблюдается только 10–15% вещества галактики. И это относится ко всем исследованным спиральным галактикам [Риса, 2006; Сажин, 2008; Грин, 2008; Чернин, 2004]. У галактик других типов соотношения этих масс иные, но присутствие темного вещества наблюдается. В частности, по отклонению лучей света обнаружены галактики, в которых содержится практически только темная материя, а также галактики, где содержание темной материи значительно ниже указанного [Попов, 2012; Рубиков, 2012; Смольников, 2001].

шего природу космических струн [Vilenkin, 1994]. Возникновение и существование таких объектов теоретически обосновано в теории большого взрыва. Имеются астрономические наблюдения, косвенно подтверждающие их реальность [Кононович, Мороз, 2004; Черепашук, 2012; Карта распределения темной материи].

2. Гипотеза цилиндрической симметрии гравитации в диске галактики

Напомним, что подавляющая часть звезд спиральных галактик формирует пространственную систему диска с толщиной, много меньшей, чем диаметр, и с утолщением в центре, симметричным относительно плоскости диска. Характерное отношение диаметра к толщине – около 50–60. Для галактики Млечный Путь толщина 500 пк при диаметре 30000 пк (радиус $R \cong 50000$ сл). Наше Солнце расположено на расстоянии около 30 т. с. л. от центрального тела.

Такое строение галактики и указанное выше распределение орбитальных скоростей звезд $v(r)$ может соответствовать цилиндрической симметрии гравитационного поля в звездном диске при достаточном удалении r от центра. Для каждой звезды выполняется равенство центростремительного ускорения и гравитационного ускорения g_r , поскольку именно гравитация порождает это ускорение:

$$\frac{v^2}{r} = g_r(r). \quad (2.1)$$

По теореме Гаусса–Остроградского, примененной к ньютоновскому гравитационному полю, можно записать

$$\oint_S \vec{g} d\vec{s} = -4\pi GM. \quad (2.2)$$

Здесь G – гравитационная постоянная, M – масса вещества внутри замкнутой поверхности S .

Если предположить цилиндрическую симметрию гравитационного поля относительно оси галактики, то рассмотрим внутри галактического диска цилиндрическую поверхность, ось которой совпадает с осью галактического диска, толщина близка к средней толщине диска l , и радиус основания равен рассматриваемому расстоянию r от центра до звезды. В силу цилиндрической симметрии и (2.2)

$$\oint_S \vec{g} d\vec{s} = -2\pi r l \cdot g_r, \quad (2.3)$$

$$2\pi r l \cdot g_r = 4\pi GM, \quad (2.3)$$

$$g_r = \frac{2GM}{rl}. \quad (2.4)$$

Таким образом, из предположения цилиндрической симметрии следует, что гравитационное ускорение для орбитального движения звезды внутри галактического диска в классической модели гравитации убывает как $1/r$, а не как $1/r^2$. Подстановка (2.4) в (2.1) дает

$$v^2 = 2GM/l,$$

$$v(r) = \sqrt{\frac{2GM}{l}} = \text{const}. \quad (2.5)$$

Получен наблюдаемый плоский спектр скоростей звезд в той зоне диска, где верна гипотеза цилиндрической симметрии поля. В этой теории непосредственно не использовалось пред-

положение о наличии дополнительных масс в галактике. Но при этом остается вопрос о том, какая физическая структура обеспечивает такую конфигурацию гравитационного поля.

3. Гипотеза о космической струне на оси галактики

Цилиндрическая симметрия гравитационного поля может быть осуществлена помещением на ось вращения галактики массивной космической струны. Существование таких струн также является гипотезой, имеющей обоснование, независимое от наблюдения галактического движения. Возможность их образования на начальных этапах эволюции Вселенной предсказывается различными вариантами Теории великого объединения (ТВО). Космические струны могут образоваться из бозонного конденсата в результате фазового перехода, когда происходит разделение сильного и электрослабого взаимодействий [Vilenkin, Shellard, 1994; Грин, 2008; Карта распределения темной материи]. Плотность вещества таких струн соответствует энергии ТВО ($\sim 10^{14}$ Гев), т. е. порядка 10^{88} г/см³, а их толщина соответствует характерному радиусу действия в ТВО ($r_{ТВО} \sim \hbar / Cm_{ТВО}$), т. е. порядка 10^{-27} см. Это приводит к оценке линейной плотности струны (масса на единицу длины) $\rho_l \sim 10^{20}$ кг/см². Пространственная частота, с которой встречаются струны в наблюдаемой части Вселенной, теоретически близка к частоте галактик. Такие струны могут быть как замкнутыми, так и разомкнутыми.

До открытия нехватки массы наблюдаемых звезд для правильного описания движения звезд в галактике считалось, что именно космические струны своей гравитацией первоначально сформировали первые галактики. Авторы считают, что новые данные позволяют вернуться к этой гипотезе, по крайней мере для спиральных галактик.

Для получения гравитационного поля с симметрией, описанной в предыдущем разделе, длина космической струны предполагается не менее диаметра галактики $2R$, расположение – в центре галактики ортогонально и симметрично относительно срединной плоскости диска галактики. На рисунке 2 показана схема такого расположения. Для нашей галактики $R \sim 10^{23}$ см. Если L – половина длины струны, то $L = nR$, где $n > 1$. При $L = R \sim 10^{23}$ см получаем массу струны $M_c = L\rho_l = 10^{42}$ кг. Звездная масса нашей галактики оценивается в 10^{11} солнечных масс, что составляет $M_g \sim 2 \cdot 10^{41}$ кг. Следовательно, масса струны примерно на порядок больше массы звездной материи (с учетом $n > 1$), что соответствует оценкам массы темной материи по движению звезд и отклонению лучей света.

4. Расчет поля ускорения гравитации для прямолинейной струны

Ниже производится расчет поля ускорения гравитации такой космической струны в диске галактики и в пространстве вокруг галактики. Поскольку расчет ведется в предположении справедливости механики Ньютона, то будет использован принцип суперпозиции. Нелинейные эффекты ОТО должны проявляться в относительно малой окрестности струны, и они не вносят существенных поправок для областей, от нее удаленных. Для пояснения расчетов можно использовать рисунок 2. Плоскость галактического диска в диаметральном сечении моделируется осью x . Струна моделируется гравитирующим массивным отрезком $S = [-L; L]$, расположенным по оси y , которая ортогональна к x . Струна имеет линейную плотность $\rho_l = m$. Рассматривается ускорение силы тяжести в трех точках. Точка A расположена на оси x на расстоянии r от S . Точка B имеет смещение H по оси y ($|H| < L$) на расстоянии r от S по оси x . Точка C имеет смещение Y по оси y ($|Y| \geq L$) на расстоянии r по оси x от оси y . В силу круговой симметрии в плоскости диска галактики эти три точки исчерпывают все частные случаи расположения точки пространства относительно галактики.

Ускорение силы тяжести $g = (g_x, g_y)$ для точки A при условии выражено интегралом

$$g_y(r)_A = mG \int_{-L}^L \frac{dy}{y^2 + r^2} \sin \operatorname{atg} \left(\frac{y}{r} \right) = mG \int_{-L}^L \frac{y dy}{(y^2 + r^2)^{3/2}} = 0, \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} g_x(r)_A &= mG \int_{-L}^L \frac{dy}{y^2 + r^2} \cos \operatorname{atg} \left(\frac{y}{r} \right) = \\ &= mGr \int_{-L}^L \frac{dy}{(y^2 + r^2)^{3/2}} = \frac{2mGL}{r\sqrt{L^2 + r^2}}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

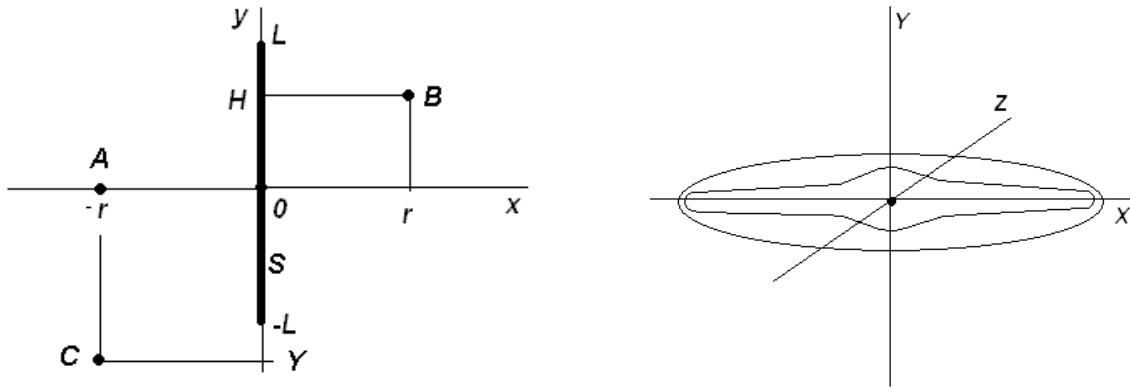


Рис. 2. Справа показана схема галактики и расположение осей координат в плоском сечении. Слева представлена схема для расчета поля гравитации. Гравитирующая массивная ось $S = [-L; L]$ по оси y имеет линейную плотность m . Рассматривается ускорение силы тяжести в трех точках. Точка A расположена на оси x на расстоянии r от S . Точка B имеет смещение H по оси y ($|H| < L$) на расстоянии r от S . Точка C имеет смещение Y по оси y ($|Y| \geq L$) на расстоянии r от оси y

Для малых значений радиуса $r \ll L$

$$g_x(r)_A \approx \frac{2mG}{r}. \quad (4.3)$$

Эта формула соответствует выражению (2.4), которое таким образом получает подтверждение в рассматриваемой модели. Тем самым модель дает физический механизм локальной цилиндрической симметрии гравитационного поля.

Для больших радиусов $r \gg L$

$$g_x(r)_A \approx \frac{2mGL}{r^2}. \quad (4.4)$$

Это означает, что на большом удалении от галактики поле имеет обычную сферическую симметрию с высокой точностью.

Ускорение силы тяжести в точке B для $|H| \leq L$ выражено интегралом

$$\begin{aligned} g_x(r)_B &= mG \int_{-L}^L \frac{dy}{(y - H)^2 + r^2} \cos \operatorname{atg} \left(\frac{y}{r} \right) = \\ &= mGr \int_{-L}^L \frac{dy}{((y - H)^2 + r^2)^{3/2}} = mGr \int_{-L-H}^{L-H} \frac{dz}{(z^2 + r^2)^{3/2}}; \end{aligned}$$

$$g_x(r)_B = \frac{mGry}{r^2 \sqrt{y^2 + r^2}} \Big|_{-L-H}^{L-H} = \frac{mG}{r} \left(\frac{L-H}{\sqrt{(L-H)^2 + r^2}} + \frac{L+H}{\sqrt{(L+H)^2 + r^2}} \right), \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} g_y(r)_B &= mG \int_{-L}^L \frac{dy}{(y-H)^2 + r^2} \sin \operatorname{atg} \left(\frac{y}{r} \right) = mG \int_{-L}^L \frac{(y-H)dy}{((y-H)^2 + r^2)^{3/2}} = \\ &= mG \int_{-L-H}^{L-H} \frac{zdz}{(z^2 + r^2)^{3/2}} = mG \left(\frac{-1}{\sqrt{z^2 + r^2}} \right) \Big|_{-L-H}^{L-H}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Подставляя значения пределов интегрирования, получаем выражение для компоненты ускорения по оси y

$$g_y(r)_B = mG \left(\frac{1}{\sqrt{(L+H)^2 + r^2}} - \frac{1}{\sqrt{(L-H)^2 + r^2}} \right). \quad (4.7)$$

Формулы (4.5) и (4.7) полностью определяют ускорение для массивной точки при условии $|H| < L$.

При малых радиусах $|r| \ll L - H$ выполнены приближенные соотношения

$$g_x(r)_B \underset{r \rightarrow 0}{\approx} \frac{2mG}{r}, \quad (4.8)$$

$$g_y(r)_B \underset{r \rightarrow 0}{\approx} \frac{-2HmG}{L^2 - H^2} \left(1 + O \left(\frac{r}{L-H} \right)^2 \right). \quad (4.9)$$

Заметим, что при $|H| \rightarrow L$ ускорение вдоль оси y неограниченно возрастает в сторону центра системы S . Этот теоретический факт дает основание для поиска источников мощного электромагнитного излучения очень низкой частоты (единицы или доли герца), идущего из зон вокруг космической струны. Оно должно возникнуть при гравитационном ускорении в этих зонах заряженных частиц космического излучения. Также должно наблюдаться вторичное гамма-излучение, возникающее при столкновении ускоренных частиц с веществом гало галактики и с частицами космического фона.

При больших радиусах $r \gg L$ выполнены приближенные соотношения

$$g_x(r)_B \underset{r \rightarrow \infty}{\approx} \frac{2LmG}{r^2}, \quad (4.10)$$

$$g_y(r)_B \underset{r \rightarrow \infty}{\approx} \frac{4mGH}{r^2}. \quad (4.11)$$

Для точки C справедливы те же уравнения (4.5) и (4.7) при $H = Y$, но в этих формулах один из членов становится отрицательным и появляется асимптотика $|Y| \rightarrow \infty$. Для анализа этой ситуации запишем формулы с аргументом Y :

$$g_x(Y)_C = \frac{mG}{r} \left(\frac{L+Y}{\sqrt{(L+Y)^2 + r^2}} + \frac{L-Y}{\sqrt{(L-Y)^2 + r^2}} \right), \quad (4.12)$$

$$g_y(Y)_C = mG \left(\frac{1}{\sqrt{(L+Y)^2 + r^2}} - \frac{1}{\sqrt{(L-Y)^2 + r^2}} \right). \quad (4.13)$$

Для анализа асимптотики используем приближение

$$\begin{aligned} \sqrt{(L \pm Y)^2 + r^2} &= |L \pm Y| \sqrt{1 + \frac{r^2}{(L \pm Y)^2}} \underset{|Y| \rightarrow \infty}{\approx} |L \pm Y| \left(1 + \frac{r^2}{2(L \pm Y)^2} \right), \\ \frac{L \pm Y}{\sqrt{(L \pm Y)^2 + r^2}} &\underset{|Y| \rightarrow \infty}{\approx} \text{sign}(L \pm Y) \left(1 + \frac{r^2}{2(L \pm Y)^2} \right)^{-1} = \frac{2(L \pm Y)^2 \text{sign}(L \pm Y)}{2(L \pm Y)^2 + r^2}. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Тогда из уравнения (4.12) получаем

$$g_x(r)_C \underset{|Y| \rightarrow \infty}{\approx} \frac{8r^2 LY}{(2L^2 + r^2)^2 + 4Y^4 + (4r^2 - 8L^2)Y^2} \underset{|Y| \rightarrow \infty}{\approx} \frac{2r^2 L}{Y^3}. \quad (4.15)$$

Таким образом, для удаленных по оси y точек ускорение в направлении приближения к этой оси убывает как обратный куб удаления вдоль этой оси от центра полосы S .

Из уравнений (4.13), (4.14) можно оценить асимптотику проекции ускорения на ось y по смещению Y :

$$\begin{aligned} g_y(Y)_C \underset{Y \rightarrow \infty}{\approx} mG \left[\frac{1}{(L+Y) \left(1 + \frac{r^2}{2(L+Y)^2} \right)} - \frac{1}{(Y-L) \left(1 + \frac{r^2}{2(Y-L)^2} \right)} \right], \\ g_y(Y)_C \underset{Y \rightarrow \infty}{\approx} mG \left(\frac{1}{L+Y} - \frac{1}{Y-L} \right) (1 + o(1)), \\ g_y(Y)_C \underset{Y \rightarrow \infty}{\approx} \frac{-2L}{Y^2 - L^2} \approx \frac{-2L}{Y^2}. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Заметим, что проекция (4.15) ускорения на ось x убывает по смещению Y быстрее (как обратные кубы смещения).

5. Анализ поля в диске галактики

Теперь можно провести анализ гипотезы о темной материи в форме космической струны. Предположим, что темная материя образует ось, ортогональную плоскости спиральной галактики. Тогда формулы (4.9) и (4.11) объясняют, почему звезды не выходят из плоскости диска. Формулы (4.3) и (4.8) объясняют распределение скоростей по радиусу диска галактики в срединном и внешнем кольцах диска.

Вероятно, при столкновении спиральных галактик оси темной материи разрушаются. Поэтому в эллиптических галактиках движение звезд соответствует центральной гравитации, а не осевой.

Формулы (4.4) и (4.10), а также (4.16) объясняют, почему на больших расстояниях галактики гравитируют как сферические тела.

Формулы (4.8), (4.9) объясняют механизм образования черной дыры в центре «темной оси». При приближении по радиусу диска к центру центробежное ускорение растет неограниченно, а сжимающее диск ускорение постоянно. На концах темной оси сжимающее ускорение растет неограниченно, и это формирует сам диск галактики, а также затягивает вещество центральной зоны в черную дыру.

Используя полученные формулы для компонент вектора гравитационного ускорения (g_x, g_y) , можно исследовать это поле внутри звездного диска галактики. При этом надо учи-

тывать, что толщина диска $2l$ значительно меньше диаметра галактики $2R$. Для галактики Млечный Путь $l \approx R/30$. При этом в диске находится большинство звезд галактики. Поэтому, с учетом $L > R$, в анализе формул предыдущего раздела можно принять $H/L \ll 1$. Это соотношение позволяет пренебрегать членами разложения в ряд порядка $(H/L)^2$ и выше. Кроме того, мы не будем рассматривать звезды, расположенные близко к краю галактики или к ее центру, что соответствует неравенствам $0 < r_0 < r < R < L$ для некоторого значения r_0 , соответствующего радиусу центральной зоны диска. Для большинства спиральных галактик значение r_0 имеет тот же порядок, что и максимальная толщина диска.

В указанных предположениях из (4.5) получаем

$$g_x(r, H) = \left(\frac{2\rho_l G}{r} \sqrt{1 + \frac{r^2}{2L^2}} \right) \left(1 + O\left(\frac{H^2}{L^2}\right) \right). \quad (5.1)$$

Пренебрегая малыми членами, получаем

$$g_x(r, H) = \frac{2\rho_l G}{r} \sqrt{1 + \frac{r^2}{2L^2}}. \quad (5.2)$$

В этом выражении исчезает зависимость от смещения H вдоль оси вращения галактики (ось y). Это соответствует цилиндрической симметрии поля. Аналогично, из формулы (4.7) получаем с учетом малых величин

$$g_y(r, H) = -\frac{2\rho_l G}{H(1+r^2/L^2)^{3/2}} \cdot \frac{H^2}{L^2} = O\left(\frac{H^2}{L^2}\right). \quad (5.3)$$

Таким образом, внутри диска осевое ускорение практически отсутствует, а радиальное ускорение зависит только от радиальной координаты звезды, что объясняет устойчивость структуры диска. *Это соответствует цилиндрической симметрии поля.*

В итоге для орбитальной скорости звезды в галактическом диске уравнение (2.1) примет вид

$$\frac{v^2}{r} = \frac{2M_c G}{Lr} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+r^2/L^2}}. \quad (5.4)$$

Здесь M_c – масса космической струны, $M_c/L \equiv \rho_l$ – ее линейная плотность. Из (5.4) получаем окончательное выражение для орбитальной скорости:

$$v = \frac{\sqrt{2G\rho_l}}{\sqrt[4]{1+r^2/L^2}}. \quad (5.5)$$

Проведем анализ зависимости этой оценки от знаменателя. Для звезд среднего кольца диска $r < R < L$, причем в обозначениях раздела 3 $L = nR$, $n > 1$. Для галактики Млечный Путь $n \approx 3$, исходя из необходимой массы темного вещества и плотности струны. Так что $r^2/L^2 < n^{-2} \approx 1/10$. Тогда для $0 < r < L/n$ верны неравенства

$$\sqrt{2G\rho_l} / \sqrt[4]{1,1} = 0,976\sqrt{2G\rho_l} < v < \sqrt{2G\rho_l}.$$

Для галактик, в которых $L = R$, $n = 1$, соответствующий интервал значений имеет вид

$$\sqrt{2G\rho_l} / \sqrt[4]{2} = 0,84\sqrt{2G\rho_l} < v < \sqrt{2G\rho_l}.$$

Если принять минимальное расстояние от центра, равное внутренней границе зоны плоского диска $r_0 \approx R/3$ и $n=1$, то

$$0,84\sqrt{2G\rho_l} < v < 0,976\sqrt{2G\rho_l}.$$

Эти расчеты показывают, что знаменатель формулы (5.5) слабо влияет в рассматриваемом интервале расстояний r от центра. Это хорошо соответствует эмпирическому спектру скоростей, изображенному на рисунке 1, в средней зоне радиусов. Орбитальная скорость в этой зоне примерно постоянна:

$$v = \sqrt{2GM_c / L} \pm 7\%. \quad (5.6)$$

Формула (5.6) хорошо согласована с оценкой (2.5), полученной из гипотезы цилиндрической симметрии поля, и с разбросом результатов измерений.

6. Сравнение струнной и шаровой моделей темной материи

Рассмотренная выше струнная модель является альтернативой для ранее созданной и ставшей общепринятой модели шарового распределения темного вещества [Чернин, 2004; Черепашук, 2012]. В этой модели темное вещество распределено в шаре, который концентричен диску видимой галактики и объемлет его. Плотность темной массы падает обратно пропорционально квадрату расстояния до центра галактики. В этом разделе мы оценим среднюю плотность темного вещества в шаровой модели, рассмотрим ее гравитационный потенциал, построим кинематическую модель такого распределения темного вещества и дадим сравнительную оценку двух моделей.

Вначале получим оценку отношения плотностей яркого (bright) и темного (dark) вещества в галактиках с геометрией, близкой к Млечному Пути, при шаровой модели распределения темной материи. На рисунке 3 показана схема распределения этих видов материи в галактике. В таблице 6.1 даны необходимые для анализа обозначения.

Таблица 6.1. Обозначения в формулах данного раздела

Обозначение	Содержание обозначения
R	Радиус галактического диска и объемлющего шара
r	Радиус внутреннего концентрического шара в объемлющем шаре
$S_d, S_d(r)$	Площадь сферы – поверхности этого шара
$r(z)$	Расстояние от точки пространства $z = (z_1, z_2, z_3)$ до центра галактики
$\rho(r)$	Радиальная плотность темного вещества для массы сферического кольца
$u(z)$	Плотность темного вещества в точке $z = (z_1, z_2, z_3)$ шара
H	Толщина центральной зоны яркого диска галактики
x	Координата по оси вращения галактики для некоторой точки границы диска яркой материи
$r(x)$	Координата этой точки по радиусу диска
V_d	Объем шара, содержащего диск галактики
V_B	Объем диска галактики в указанной модели с треугольным сечением
M_d	Масса темного вещества
M_b	Масса яркого вещества
α	Доля яркого вещества в галактике
v_d	Средняя плотность темного вещества в объемлющем шаре
v_b	Средняя плотность яркого вещества в чечевице
$P(z)$	Потенциал гравитации относительно бесконечности для точки z

Оценим плотности темного и яркого вещества. В принятой модели и обозначениях таблицы 6.1 верны следующие формулы:

$$\begin{aligned}
 V_d &= \frac{4\pi}{3} R^3, \\
 r(x) &= R - \frac{R}{H} x, \\
 V_b &= 2\pi \int_0^H r_b^2(x) dx = 2\pi \int_0^H \left(R - \frac{R}{H} x \right)^2 dx = \frac{2\pi}{3} RH^2, \\
 S_d(r) &= 4\pi r^2.
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

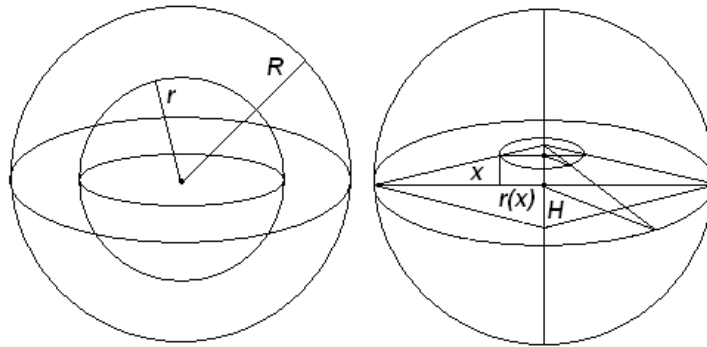


Рис. 3. Слева показаны концентрические сферы изоплотности для шаровой модели распределения темной материи. Справа показана модель чечевицеобразного распределения яркой материи в галактике с условно треугольным сечением. H – толщина центральной зоны; x – координата по оси галактики одной из точек поверхности диска яркой материи; $r(x)$ – координата этой точки по радиусу диска

Закон обратных квадратов для сферической модели определяется формулой

$$v'_d(r) = \frac{\rho}{4\pi r^2}. \tag{6.2}$$

Из этого закона следует соотношение

$$\rho = \rho(r) = \text{const}, 0 < r \leq R. \tag{6.3}$$

Тогда по определению $\rho(r)$

$$M_d = \int_0^R \rho(r) dr = R\rho. \tag{6.4}$$

По определению средней плотности

$$\bar{\rho} = \frac{M_d}{R}.$$

Таким образом $\rho = \bar{\rho}$.

Далее, по определению

$$v_d = \frac{M_d}{V_d} = \frac{3R\rho}{4\pi R^3}, \tag{6.5}$$

$$v_b = \frac{M_b}{V_b} = \frac{3M_b}{2\pi RH^2}. \tag{6.6}$$

По определению параметра α тождественно выполнено

$$M_b = \alpha(M_b + M_d),$$

откуда получаем

$$M_b = \frac{\alpha M_d}{1 - \alpha}, \tag{6.7}$$

$$\frac{v_b}{v_d} = \frac{3\alpha M_d 4\pi R^3}{2\pi(1-\alpha)3RH^2 M_d} = \frac{2\alpha}{(1-\alpha)} \left(\frac{R}{H}\right)^2. \tag{6.8}$$

Рассмотрим фактические параметры для Млечного Пути и большинства спиральных галактик:

$$\alpha = 0.04 = \frac{1}{25},$$

$$\frac{R}{H} \approx 30.$$

Тогда получаем

$$\frac{v_b}{v_d} = \frac{2 \cdot 0.04}{0.96} 30^2 = 75. \tag{6.9}$$

Фактически это отношение может быть еще выше, поскольку радиус зоны распространения темной материи может быть больше, чем у диска. Это наводит на мысль, что темная материя может состоять из относительно малых тел обычного холодного вещества, которые не несут на себе ощутимого электрического заряда. При такой малой плотности они не наблюдаются вне галактического диска, но оказывают гравитационное влияние за счет большой общей массы. Внутри галактического диска возможны редкие столкновения темных тел с веществом диска, но при такой низкой плотности они не выделяются на фоне других «ярких» процессов. На основе этой гипотезы можно построить динамическую модель темного шарового гало спиральной галактики.

Динамическая модель темного вещества

Для рассмотренной модели шарового распределения темного вещества можно предположить, что оно состоит из холодных «камней», которые двигаются вокруг центрального тела галактики по очень вытянутым орбитам с большим эксцентриситетом. Направления больших осей этих орбит равномерно заполняют объемлющую сферу. Эта модель показана на рисунке 4. Тогда для их сферической плотности статистически выполняется закон (6.2) обратных квадратов радиуса концентрической сферы. Для этого надо предположить достаточную асинхронность по фазам движения камней по орбитам, так что на каждой сфере средняя их плотность пропорциональна плотности точек пересечения сферы с орбитами.

Такая интерпретация темной материи не проходит для модели осевого распределения дополнительной массы, которая была использована в струнной модели. Для создания этой массы потребуется концентрация вблизи оси галактики орбит темного вещества. В этом случае объем, занятый темным веществом, становится очень малым и плотность «камней» достигает недопустимых

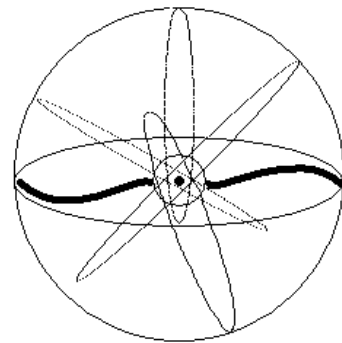


Рис. 4. Модель темного вещества, состоящего из мелких холодных тел на орбитах с большим эксцентриситетом, большие оси которых заполняют равномерно по направлениям объемлющий шар галактики. Средняя плотность такого вещества на внутренних сферах обратно пропорциональна квадрату радиуса сферы. За пределами объемлющего шара плотность спадает до нуля

больших значений. Однако, как показано в струнной модели, в принципе такое распределение орбит решило бы проблему спектра скоростей.

Перейдем к расчету потенциала точки галактики при шаровой модели распределения темной материи. Рассматривается только потенциал темной материи. Результат представлен на рисунке 5. В общем случае, если масса M распределена со сферической симметрией в некоторой области пространства, для точки, расположенной вне этой массы на расстоянии r от центральной точки симметрии, потенциал относительно бесконечности имеет вид

$$P(r) = \frac{GM}{r}. \quad (6.10)$$

Если распределение плотности темного вещества $u(z)$ в объеме шара галактики имеет сферическую симметрию, т. е. принимает постоянное значение на сфере $r(z) = \text{const}$, то можно записать $u(z) = q(r(z))$, и при $r < R$ для потенциала верна формула

$$P(z) = G \int_{r(z)}^R \frac{M(s)}{s^2} ds + GMR, \quad (6.11)$$

где $M(s)$ – масса концентрического галактике шара с радиусом s :

$$M(s) = \int_0^s \rho(t) dt = 4\pi \int_0^s t^2 q(t) dt.$$

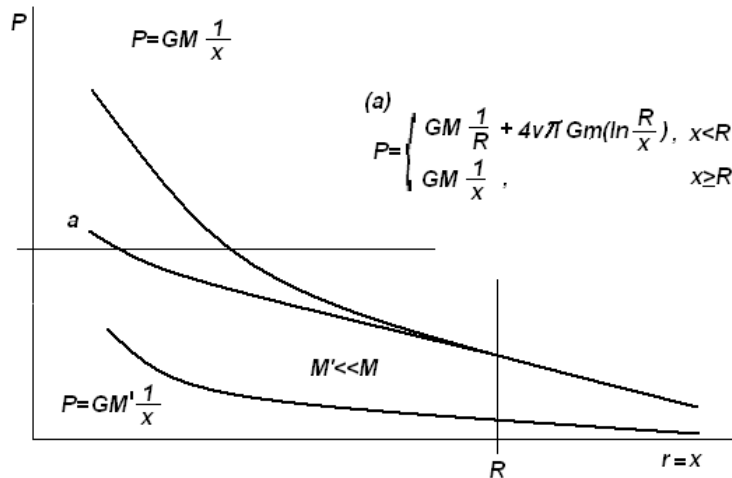


Рис. 5. Показаны потенциалы относительно бесконечности для точки галактики без темной материи (нижний график) и с распределением темного вещества по принципу шаровой модели (график *a*). Верхний график показывает потенциал при концентрации всей темной материи в центре галактики. Показан сдвиг эквипотенциальной поверхности вдоль радиуса, вызванный распределением темной материи. В точке границы галактики $x = R$ сохраняется гладкость потенциала, что означает определенное значение гравитационного ускорения на краю галактики

Если $u(z) = mr^{-2}(z)$ для некоторой линейной плотности m , то $q(r) = mr^{-2}$ и

$$M(s) = 4\pi ms. \quad (6.12)$$

Тогда из (6.11) для точки с $r(z) = r$ можно записать

$$P(z) = 4\pi Gm(\ln(R) - \ln(r)) + GMR^{-1}.$$

В безразмерной форме

$$P(z) = 4\pi Gm \cdot \ln(R/r) + GMR^{-1}. \quad (6.13)$$

Для случая $r(z) \geq R$ действует только центральная гравитация суммарной массы галактики

$$P(z) = GMr^{-1}. \quad (6.13')$$

Формула (6.12) определяет ускорение гравитации в точке, находящейся внутри объемлющего шара галактики ($r(z) < R$):

$$g(r) = GM(r)/r^2 = 4\pi Gm/r. \quad (6.14)$$

На диске это выражение совпадает с формулами (2.4) и (4.3) и точно так же решает задачу спектра скоростей. Это объясняет популярность шаровой модели в современной космологии.

Полученные формулы показывают, что для шаровой модели внутри галактики изопотенциал смещается к периферии по сравнению с центральной гравитацией, а вне галактики совпадает с ней. При этом на границе галактики сохраняется непрерывность первой производной потенциала по радиусу. Это означает, что ускорение гравитации на границе определено однозначно: используя (6.12) и (6.14) можно записать цепочку равенств

$$g(R+0) = GM/R^2 = 4\pi mR/R^2 = 4\pi m/R = g(R-0). \quad (6.15)$$

7. Сравнение шаровой и струнной моделей и данные о космических струнах

Сравним сильные и слабые стороны двух моделей. Обе модели хорошо объясняют горизонтальный участок спектра орбитальных скоростей. Но объяснение части спектра при малых радиусах требует дополнительных соображений о структуре центральной зоны галактического диска в обеих моделях. На этом мы не будем останавливаться. Слабой стороной струнной модели является само предположение о существовании космических струн, которое пока проблематично. Имеются только косвенные подтверждения этой гипотезы. Для шаровой модели, как показано выше, не требуется предположения о наличии особых форм вещества, что, безусловно, можно рассматривать как положительное качество. Однако в шаровой модели совершенно не понятно, почему яркое вещество сосредоточено в диске, в то время как темное вещество движется по вытянутым орбитам в объеме всего шара. Такое неравноправие наводит на мысль об особой природе темной массы, но никаких подсказок в этом направлении модель не дает. Напротив, струнная модель объясняет концентрацию вещества, притянутого струной, в диске, проходящем через середину струны ортогонально ей. Это видно из формулы (4.7), которая дает отрицательный знак ускорения вдоль струны, что означает направление к центру струны.

Это очень сильное качество струнной модели. Оно позволяет предположить, что сами галактики были сформированы как вторичные образования после появления космических струн. Струны притягивали вещество и организовывали его в форме вращающегося диска. Вращение порождено несбалансированностью моментов движения относительно струны у захваченного вещества. Массы, у которых не хватило орбитальной скорости, падали в центральную зону струны и образовали там черную дыру. Встречное движение тел приводило к столкновениям и потере скорости с последующим падением на черную дыру. В результате остались только тела, двигающиеся по орбитам в одну сторону и с достаточными орбитальными скоростями. Эта модель появления галактик практически вынужденно следует из предположения о существовании космических струн.

Рассмотрим данные астрономических наблюдений, косвенно подтверждающие струнную структуру темного вещества. За последние десятилетия проведено много реконструкций распределения темной материи по отклонению света далеких галактик в гравитационных линзах [Темная материя не на месте]. Эти линзы не всегда совпадают с зонами концентрации яркого вещества. В этом случае линзирование приписывается гравитации темной материи. Несмотря на условный характер такой интерпретации, она выглядит очень убедительно в сочетании с данными о скоростях звезд в галактических дисках. Большинство таких реконструкций показывает волокнистую структуру темного вещества в пространстве между близкими галактиками (рисунок 6). При этом, складывается впечатление, что при сближении галактик их образующие струны притягиваются друг к другу, создавая темную ось центров галактик. При сближении нескольких галактик эти струны образуют темную сеть в пространстве между галактиками [Темная материя не на месте] (рисунок 8).

На то же качество указывает распределение газа в скоплениях галактик [Темная материя не на месте; Темная материя – свежее исследование]. Газ также образует оболочки невидимых осей, исходящих из галактик или соединяющих галактики (рисунки 7 и 8). Поскольку темная струна создает сильное поле притяжения в своей окрестности, газ именно так и должен распределяться вдоль струн.

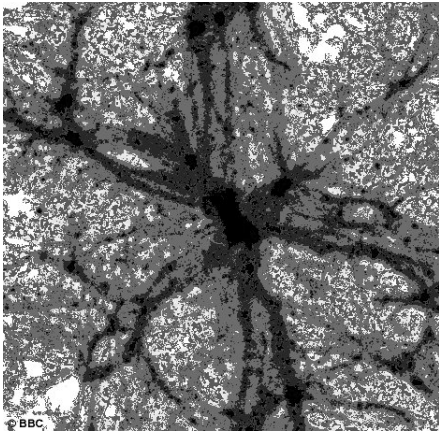


Рис. 6. Реконструкция распределения темной материи. Черные зоны – обычная материя (<http://unsorted.me/post1400419.html>)

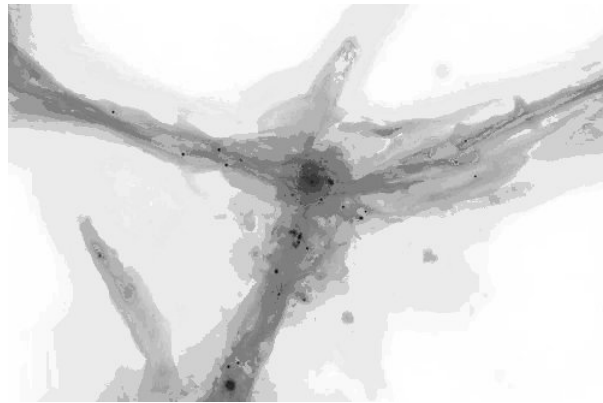


Рис. 7. Анализ света от квазаров J113418.96+574204.6 и Q0956+122, удаленных от Земли на расстояние 12 миллиардов световых лет, показал, что он прошел сквозь два облака водорода, находящихся на расстоянии около 11,8 и 11,6 миллиарда световых лет от нашей планеты (<http://astroinform.com/news.php?item.82>)

Гравитационное поле струн обладает особым свойством порождать два симметричных изображения объекта, загороженного струной относительно наблюдателя. Такие раздвоенные изображения наблюдаются в дальней астрономии. Для них имеются и другие объяснения, поскольку такой эффект может дать гравитационное поле диска далекой галактики, если он повернут ребром к наблюдателю, а яркий объект загорожен диском. Однако далеко не для всех двойных изображений обнаружены такие диски.

Еще меньшую вероятность имеет четверка симметричных изображений, образующих яркие углы квадрата, если это явление объяснять ортогональным расположением двух галактических дисков, которые оба повернуты ребром к наблюдателю, а объект закрыт зоной видимого пересечения дисков. Между тем такие изображения встречаются достаточно часто [Астрономы по-новому подсчитали возраст Вселенной]. Струнная модель дает более простые условия возникновения такого эффекта. Достаточно, если яркий объект расположен за центральной зоной дисковой галактики, развернутой к наблюдателю ребром диска. Тогда гравитация диска и ортогональной к нему струны породит четыре приблизительно симметричных изображения этого объекта. Вероятность такой конфигурации значительно выше, чем у нужного расположения двух галактик и объекта наблюдения.

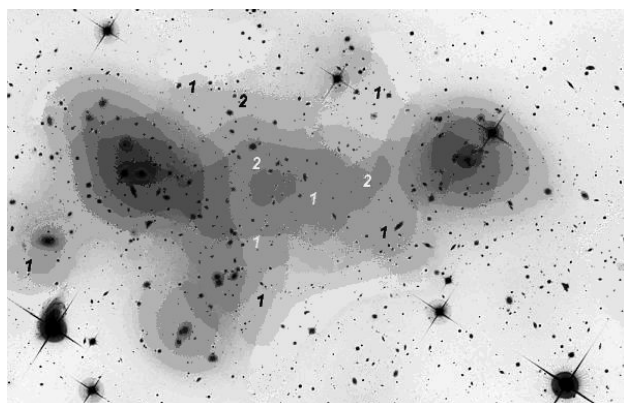


Рис. 8. Распределение темной материи (1) и газа (2) в скоплении галактик Abell 520

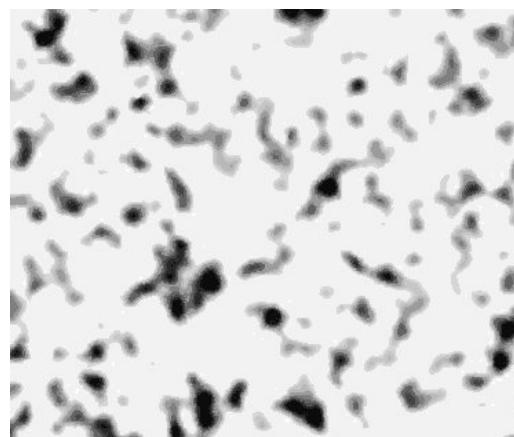


Рис. 9. Карта распределения темной материи в одном из секторов небесной сферы (<http://www.3dnews.ru>)

Имеется достоверное наблюдение зон свечения в гамма-спектре, которые расположены симметрично относительно оси и плоскости диска спиральных галактик [в галактике найдены загадочные сверхгигантские пузыри] (рисунок 10). У этого явления пока нет общепринятого объяснения. Возможно, речь идет о выбросе вещества из центра галактики. Однако, как показано выше, струна создает зоны ускорения к центру галактики частиц всех видов именно с указанной симметрией. Разгоняясь в гравитационном поле струны, как в линейном ускорителе, такие частицы могут стать источником гамма-излучения при любом торможении, например в результате столкновения с веществом гало галактики или с частицами космического фона.

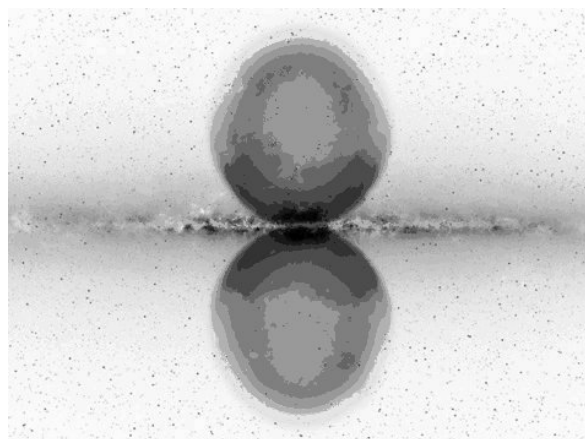
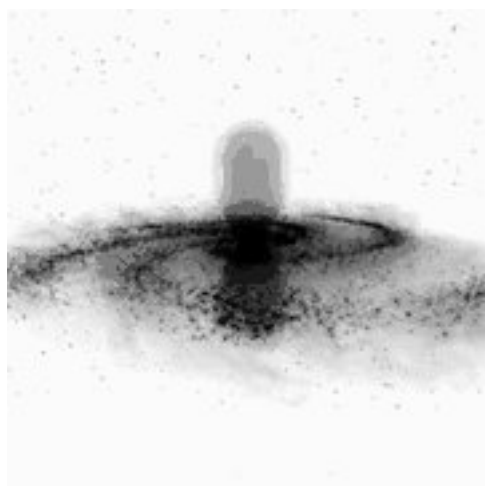


Рис. 10 Зоны гамма-свечения около галактики Млечный Путь. Масштаб реконструкции по вертикали справа – 50 т. с. л., NASA/GoddardSpaceFlightCenter

8. Заключение

Очевидно, что выбор правильной модели галактики будет сделан в результате дополнительных наблюдений и исследований. Однако на нынешнем этапе очень важно иметь достаточный запас принципов построения таких моделей, который позволит сделать правильный выбор.

Предложенная модель, в которой темная материя представлена барионной струной, идущей по оси диска спиральной галактики, объясняет ряд эффектов, включая дисковую форму

галактики, распределение скоростей звезд в зависимости от радиуса орбиты, поведение темного вещества при сближении галактик, наблюдаемую волокнистую структуру темного вещества и гамма-свечение в окрестности галактики. Эта модель может рассматриваться как шаг к построению теории темной материи и формирования галактик.

Литература

- Астрономы по-новому подсчитали возраст Вселенной.
<http://www.rosbalt.ru/style/2010/03/03/717487.html> (опубликовано 08.06.2012 г.)
- В галактике найдены загадочные сверхгигантские пузыри. Электронная публикация по материалу NASA/GoddardSpaceFlightCenter
<http://www.keyhunter.ru/index.php?act=Print&client=printer&f=38&t=51>
(опубликовано 08.06.2012г.)
- Грин Б.* Элегантная Вселенная. – М.: УРСС, 2008. – 288 с.
- Зельдович Я. Б., Новиков И. Д.* Релятивистская астрофизика. – М.: Наука, 1967. – 580 с.
- Линде А. Д.* Физика элементарных частиц и инфляционная космология. – М.: Наука, 1990. – 248 с.
- Карта распределения темной материи. Электронная публикация.
<http://world-phenomena.ru/166-karta-temnoy-storony.html> (опубликовано 08.06.2012 г.)
- Кононович Э. В., Мороз В. И.* Общий курс астрономии. – М.: УЗСС, 2004. – 544 с.
- Обнаружены облака из древнейшего строительного материала во Вселенной.
<http://astroinformer.com/news.php?item.82> (опубликовано 11.06.2012 г.)
- Попов Л.* Астрономы поймали за хвост галактику из темной материи. Электронная публикация:
<http://www.membrana.ru/particle/914> (опубликовано 08.06.2012 г.)
- Рис М.* Вселенная // Сборник статей под редакцией М. Риса. – М.: ООО «Издательство Артель», 2006. – 512 с.
- Рубиков В.* Темная материя и темная энергия во вселенной. Электронная публикация:
<http://victorpetrov.ru/temnaya-vfteriya-i-temnaya-energiya-vo-vse.html>
(опубликовано 08.06.2012 г.)
- Сажин М. В.* Современная космология в популярном изложении. – М.: УРСС, 2008. – 240 с.
- Смольников А. А.* Темная материя во Вселенной // Природа, 2001, №7, с. 10–19.
- Темная материя не на месте. Космос–Журнал. По материалам NASA.
<http://www.cosmos-journal.ru/articles/710/> (опубликовано 08.06.2012 г.)
- Темная материя – свежее исследование. <http://www.membrana.ru/> (опубликовано 11.06.2012 г.)
- Черепашук А. М.* Гравитационное микролинзирование и проблема скрытой массы. Электронная публикация. <http://www.astronet.ru/db/msg/1171344> (опубликовано 08.06.2012 г.)
- Чернин А. Д.* Звезды в физике. – М.: УРСС, 2004. – 176 с.
- Silk J.* Baryonic dark matter. arXiv:astro-ph/9407024v1 (опубликовано 08.06.2012 г.)
- Vilenkin A., Shellard E. P.* Cosmic strings and other topological defects. – Cambridge, 1994. – 517 с.