

А. В. Коганов, В. Г. Кречет

О новом подходе к проблеме структуры спиральных галактик

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

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 существованием 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 существовании космических струн в зонах, примыкающих к галактикам.

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

A. V. Koganov, V. G. Krechet

Introduction of Baryon String in the Model of Spiral Structure Galaxies

A new alternative approach is proposed 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 the 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 the 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 a kinematic model will also be offered, and the hypothesis about the nature of dark matter will be proposed. The data of astronomical observations about the presence of cosmic strings in the zones adjacent to galaxies are examined.

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

Введение

Как известно [3], тщательное изучение движения звезд в галактиках привело в середине XX века к обнаружению аномалии спектра их орбитальных скоростей в зависимости от расстояния до центра диска галактики по отношению к предсказаниям механики Ньютона. Выяснилось, что на периферии при достаточном удалении от центра диска эти скорости слабо зависели от радиуса орбиты: $v(r) \approx \text{const}$. В ньютоновской теории гравитации, которая довольно хорошо проверена для больших удалений от центра гравитации, указанная зависимость имеет вид $v(r) \sim 1/\sqrt{r}$ (рис. 1). Эти проблемы привели к возникновению гипотезы о существовании в галактиках ненаблюдаемой скрытой массы – «темной материи». Согласование теории и наблюдения требует предположения о преобладании темной массы над массой «яркой материи» (наблюдаемые по излучению небесные объекты) примерно в 6–7 раз. Это относится ко всем исследованным спиральным галактикам [1, 2, 9,12]. 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 [7, 8, 10].

Выдвигалось несколько гипотез о сущности темной материи. Предположение о ее нейтринной природе [3, 6] отпало, когда были получены малые оценки возможной массы у нейтрино всех типов (единицы электрон-вольт).

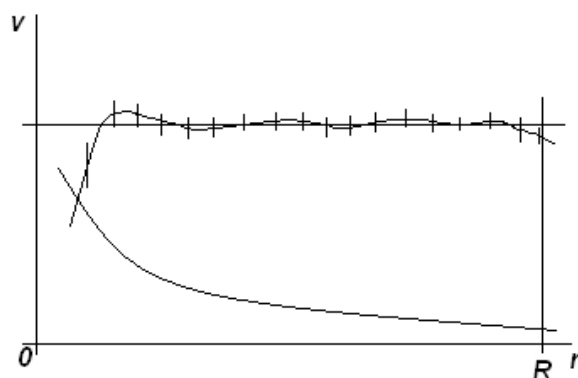


Рис. 1. Теоретический спектр скоростей звезд V по Ньютону в зависимости от расстояния r до центра галактики (нижняя кривая) и типичный реальный спектр скоростей

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 [13]. 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 выявлена. В данной работе выдвигается альтернативная концепция гипотетического введения в галактику темного вещества, имеющего природу космических струн [14]. Возникновение и существование таких объектов теоретически обосновано в теории большого взрыва. Имеются астрономические наблюдения, косвенно подтверждающие их реальность [4, 5, 11].

2. Гипотеза цилиндрической симметрии гравитации в диске галактики

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). 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 :

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

По теореме Гаусса – Остроградского,

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

Здесь G – гравитационная постоянная, M – масса вещества внутри замкнутой поверхности S . 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. Если предположить цилиндрическую симметрию гравитационного поля относительно оси галактики, то по (2.2)

$$g_r = \frac{2GM}{rl}, \quad \oint_S \vec{g} \, ds = -2\pi rl \cdot g_r \quad (2.3)$$

$$2\pi rl \cdot g_r = 4\pi GM. \quad (2.4)$$

В этой модели g_r убывает, как $1/r$, а не как $1/r^2$ в классической модели гравитации, где сферическая симметрия. Подстановка (2.4) в (2.1) дает:

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

Получен наблюдаемый плоский спектр скоростей звезд.

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 [2, 4, 14]. Плотность вещества этих струн соответствует энергии ТВО ($\sim 10^{14}$ Гев), то есть порядка 10^{88} г/см³, а их толщина – характерному радиусу действия в ТВО ($r_{TVO} \sim \hbar / Cm_{TVO}$), то есть порядка 10^{-27} см. Оценка линейной плотности струны $\rho_l \sim 10^{20}$ кг/см. 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 описания их движения предполагалось, что именно космические струны своей гравитацией первоначально сформировали первые галактики. Авторы считают, что новые данные позволяют вернуться к этой гипотезе. Для получения гравитационного поля с цилиндрической симметрией длина космической струны предполагается не менее диаметра галактики $2R$, расположение в центре галактики ортогонально и симметрично относительно срединной плоскости диска галактики. На рис. 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 $M_r \sim 2 \cdot 10^{41}$ 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

Расчет ведется в предположении справедливости механики Ньютона, будет также использован принцип суперпозиции. Нелинейные эффекты ОТО влияют только в относительно малой окрестности струны и несущественны для областей от нее удаленных. Для пояснения расчетов можно использовать рис. 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

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

$$g_x(r)_A = mG \int_{-L}^L \frac{dy}{y^2 + r^2} \cos \operatorname{atg}\left(\frac{y}{r}\right) = \frac{2mGL}{r\sqrt{L^2 + r^2}} \quad (4.2)$$

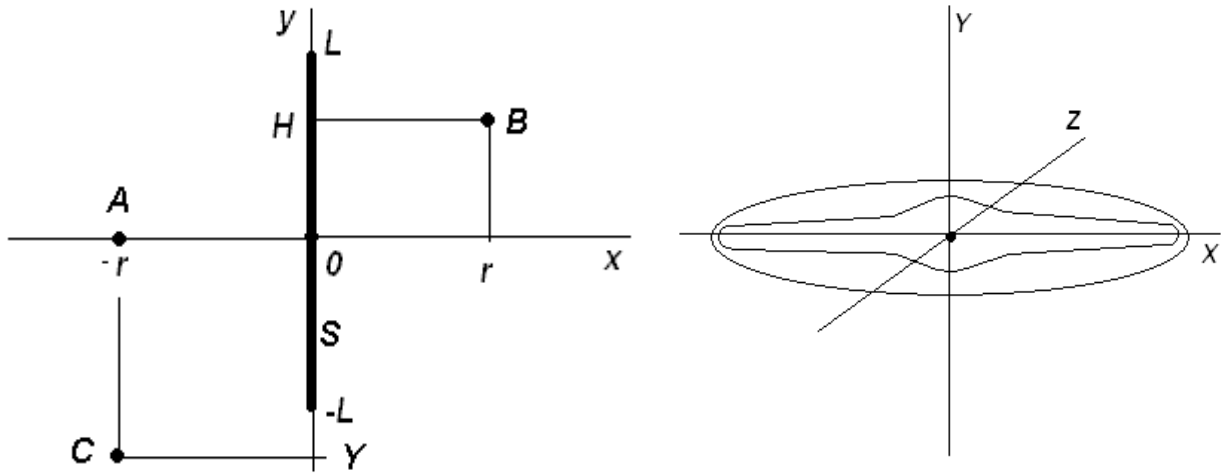


Рис. 2. Справа показана схема галактики и расположение осей координат в плоском сечении. Слева представлена схема для расчета поля гравитации

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 предлагает физический механизм локальной цилиндрической симметрии гравитационного поля. Для больших радиусов $r \gg L$ (на большом удалении от галактики) поле имеет обычную сферическую симметрию с высокой точностью.

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

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

$$g_x(r)_B = mG \int_{-L}^L \frac{\cos \operatorname{atg}(y/r) dy}{(y-H)^2 + r^2} = \frac{mG}{r} \left(\frac{L-H}{\sqrt{(L-H)^2 + r^2}} + \frac{L+H}{\sqrt{(L+H)^2 + r^2}} \right) \quad (4.5)$$

$$g_y(r)_B = mG \int_{-L}^L \frac{\sin \operatorname{atg}(y/r) dy}{(y-H)^2 + r^2} = mG \left(\frac{1}{\sqrt{(L+H)^2 + r^2}} - \frac{1}{\sqrt{(L-H)^2 + r^2}} \right) \quad (4.6)$$

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

$$g_x(r)_B \underset{r \rightarrow 0}{\approx} \frac{2mG}{r} \quad (4.7)$$

$$g_y(r)_B \underset{r \rightarrow 0}{\approx} \frac{-2HmG}{L^2 - H^2} \left(1 + O\left(\left(\frac{r}{L-H}\right)^2\right) \right) \quad (4.8)$$

Заметим, что при $|H| \rightarrow L$ ускорение вдоль оси y неограниченно возрастает в сторону центра системы. Этот теоретический факт дает основание для поиска источников мощного электромагнитного излучения, идущего из зон вокруг космической струны при гравитационном ускорении в этих зонах заряженных частиц космического излучения, как очень низкой частоты (доли герца). Должно наблюдаться также излучение в гамма-спектре при столкновении ускоренных частиц с веществом гало галактики, а также с трансверсальным и встречным космическим излучением.

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

$$g_x(r)_B \underset{r \rightarrow \infty}{\approx} \frac{2LmG}{r^2} \quad (4.9)$$

$$g_y(r)_B \underset{r \rightarrow \infty}{\approx} \frac{4mGH}{r^2} \quad (4.10)$$

Для точки C справедливы те же уравнения (4.5) и (4.6) 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 .

$$g_x(Y)_C = \frac{mG}{r} \left(\frac{L+Y}{\sqrt{(L+Y)^2 + r^2}} + \frac{L-Y}{\sqrt{(L-Y)^2 + r^2}} \right) \quad (4.11)$$

$$g_y(Y)_C = mG \left(\frac{1}{\sqrt{(L+Y)^2 + r^2}} - \frac{1}{\sqrt{(L-Y)^2 + r^2}} \right) \quad (4.12)$$

Для анализа асимптотики используем приближение

$$\sqrt{(L \pm Y)^2 + r^2} = |L \pm Y| \sqrt{1 + \frac{r^2}{(L \pm Y)^2}} \underset{|Y| \rightarrow \infty}{\approx} |L \pm Y| \left(1 + \frac{r^2}{2(L \pm Y)^2} \right);$$

$$\frac{L \pm Y}{\sqrt{(L \pm Y)^2 + r^2}} \underset{|Y| \rightarrow \infty}{\approx} \text{sign}(L \pm Y) \left(1 + \frac{r^2}{2(L \pm Y)^2} \right)^{-1} = \frac{2(L \pm Y)^2 \text{sign}(L \pm Y)}{2(L \pm Y)^2 + r^2}. \quad (4.13)$$

Из (4.11) (4.13)

$$g_x(r)_C \underset{|Y| \rightarrow \infty}{\approx} \frac{8r^2LY}{(2L^2 + r^2)^2 + 4Y^4 + (4r^2 - 8L^2)Y^2} \underset{|Y| \rightarrow \infty}{\approx} \frac{2r^2L}{Y^3}. \quad (4.14)$$

Из (4.12) (4.13)

$$g_y(Y)_C \underset{Y \rightarrow \infty}{\approx} mG \left(\frac{1}{L+Y} - \frac{1}{Y-L} \right) (1 + o(1)) \underset{Y \rightarrow \infty}{\approx} \frac{-2L}{Y^2 - L^2} \approx \frac{-2L}{Y^2}. \quad (4.15)$$

Заметим, что проекция (4.14) ускорения на ось x убывает по смещению Y быстрее (как обратные кубы смещения).

5. Анализ поля в диске галактики

Предположим, что темная материя образует ось, ортогональную плоскости спиральной галактики. Тогда формулы (4.8) и (4.10) раскрывают, почему звезды не выходят из плоскости диска. Формулы (4.3) и (4.7) объясняют распределение скоростей по радиусу диска галактики в срединном и внешнем

кольце диска. Формулы (4.4) и (4.9), а также (4.15) позволяют понять, почему на больших расстояниях галактики гравитируют как сферические тела. Формулы (4.7) (4.8) описывают механизм образования черной дыры в центре «темной оси». При приближении по радиусу диска к центру центростремительное 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.

Исследуем поле гравитационного ускорения (g_x, g_y) внутри звездного диска галактики. 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 выражается неравенствами $0 < r_0 < r < R < L$ 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,

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

В этом выражении исчезает зависимость от смещения H вдоль оси вращения галактики (ось y). Это соответствует цилиндрической симметрии поля. Аналогично, из формулы (4.6) получаем с учетом малых величин

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

Уравнение (2.1) орбитальной скорости звезды 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 выражение для орбитальной скорости

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

Для звезд среднего кольца диска $r < R < L$, и в обозначениях раздела 3 $L = nR$, $n > 1$. Для галактики «Млечный путь» $n \approx 3$, исходя из необходимой массы темного вещества и плотности струны ($r^2/L^2 < n^{-2} \approx 1/10$). Для $0 < r < L/n$

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

Для галактик с $L = R$, $n = 1$, верно $\sqrt{2G\rho_l} / \sqrt[4]{2} = 0,84\sqrt{2G\rho_l} < v < \sqrt{2G\rho_l}$.

Если принять $r_0 \approx R/3$ и $n = 1$, то $0,84\sqrt{2G\rho_1} < v < 0,976\sqrt{2G\rho_1}$.

Знаменатель формулы (5.5) слабо влияет в этом интервале значений r . Это хорошо соответствует эмпирическому спектру скоростей (рис. 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 [11, 12]. 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.

Обе модели хорошо объясняют горизонтальный участок спектра орбитальных скоростей. Слабой стороной струнной модели является само предположение о существовании космических струн, которое пока проблематично. Имеются только косвенные подтверждения этой гипотезы. Для шаровой модели не обязательно предположение о наличии особых форм вещества. Но она не объясняет, почему яркое вещество сосредоточено в диске, а темное вещество движется по вытянутым орбитам в объеме всего шара. Струнная модель объясняет концентрацию вещества, притянутого струной, в диске (формула (4.6) дает ускорение к центру струны).

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.

Библиографический список

1. Вселенная [Текст] : сб. статей / под ред. М. Риса. – М. : ООО «Издательство Артель», 2006 г. – 512 с.
2. Грин, Б. Элегантная вселенная [Текст] / Б. Грин. – М. : «УРСС», 2008. – 288 с.
3. Зельдович, Я. Б., Новиков, И. Д. Релятивистская астрофизика [Текст] / Я. Б. Зельдович, И. Д. Новиков. – М. : «Наука», 1967. – 580 с.
4. Карта распределения темной материи [Электронный источник]. – Режим доступа : <http://world-phenomena.ru/166-karta-temnoy-storony.html>
5. Кононович, Э. В., Мороз, В. И. Общий курс астрономии [Текст] / Э. В. Кононович, В. И. Мороз. – М. : «УЗСС», 2004. – 544 с.
6. Линде, А. Д. Физика элементарных частиц и инфляционная космология [Текст] / А. Д. Линде. – М. : «Наука», 1990. – 248 с.
7. Попов, Л. Астрономы поймали за хвост галактику из темной материи [Электронный источник] / Л. Попов. – Режим доступа: <http://www.membrana.ru/particle/914>
8. Рубиков, В. Темная материя и темная энергия во вселенной [Электронный источник] / В. Рубиков. – Режим доступа : <http://victorpetrov.ru/temnaya-vfteriya-i-temnaya-energiya-vo-vse.html>
9. Сажин М. В. Современная космология в популярном изложении [Текст] / М. В. Сажин. – М. : «УРСС», 2008 г. – 240 с.
10. Смольников, А. А. Темная материя во вселенной [Текст] / А. А. Смольников // Природа. – 2001. – №7. – С. 10–19.
11. Черепашук, А. М. Гравитационное микролинзирование и проблема скрытой массы [Электронный источник] / А. М. Черепашук. – Режим доступа : <http://www.astronet.ru/db/msg/1171344>
12. Чернин, А. Д. Звезды в физике [Текст] / А. Д. Чернин. – М. : «УРСС», 2004. – 176 с.
13. Silk Joseph Baryonic dark matter // arXiv:astro-ph/9407024v1
14. Vilenkin A., Shellard E. P. Cosmic strings and other topological defects. Cambridge, 1994, 517 p.