

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 63

ФЕВРАЛЬ, 2020

ВЫПУСК 1

ФИЛАМЕНТЫ КРУПНОМАСШТАБНОЙ СТРУКТУРЫ И ПЕРВИЧНЫЕ СКАЛЯРНЫЕ И ВЕКТОРНЫЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

И.К.РОЗГАЧЕВА, И.Б.КУВШИНОВА

Поступила 9 апреля 2019

Принята к печати 18 декабря 2019

Собраны опубликованные данные о наблюдаемых свойствах филаментов (цепочек галактик и групп галактик), которые доминируют в крупномасштабной структуре Вселенной. Часть этих свойств не описывается в стандартной космологической модели Λ CDM. Выявлено, что свойства галактик зависят от их расположения внутри или вблизи филамента. Предлагается гипотеза о том, что в ранней Вселенной могли быть первичные филаменты из контрастов плотности. В них образование массивных протогалактик могло происходить раньше, чем в одиночных контрастах плотности. Тогда в современную эпоху должна наблюдаваться зависимость свойств галактик от их связей с сохранившимися филаментами. Предложена модель первичного филамента из первичных скалярных и векторных гравитационных возмущений в однородной и изотропной космологической модели, заполненной материи с пренебрежимо малым давлением, без использования гипотезы о приливном взаимодействии гало темной материи.

Ключевые слова: Галактики: скопления галактик: крупномасштабная структура:
филаменты: гравитационные возмущения

1. *Введение.* В современном изучении крупномасштабной структуры Вселенной можно выделить два больших направления. Первое направление связано с проведением и анализом больших обзоров неба в различных диапазонах электромагнитного спектра. Второе направление посвящено численному моделированию крупномасштабной структуры в приближении задачи N тел, а также моделированию самих обзоров (каталогов) для выявления роли систематических эффектов, которые необходимо учитывать при анализе данных реальных обзоров. Главным результатом обоих направлений исследований является установление того факта, что доминирующим структурным элементом крупномасштабной структуры являются филаменты - цепочки, состоящие из галактик, групп галактик, скоплений галактик, межгалактического газа и пыли.

Впервые филаменты заметили в середине 1970-х годов в трехмерном обзоре распределения ярких галактик CfA Redshift Survey. В известных уже тогда нескольких сверхскоплениях выделили области с повышенной концентрацией филаментов, причем сверхскопления связывались в единую сеть тоже филаментами [1-3].

Обнаруживать филаменты сложно, потому что угловая двухточечная корреляционная функция и угловой спектр мощности распределения галактик не содержат информацию о морфологии структур скучивания галактик. Для выделения филаментов в обзорах галактик были развиты специальные методы обработки изображений (см., например, [4]).

На основе визуализации результатов численного моделирования в рамках стандартной космологической Λ CDM-модели была предложена гипотеза о том, что филаменты являются следствием приливного взаимодействия гало темной материи, содержащих галактики, на нелинейной стадии эволюции крупномасштабной структуры (см. [5] и ссылки там). Пересечения гало с эллипсоидальными формами могут приводить к появлению филаментов с более высокой плотностью темной материи.

Возможно, что в рамках этой модели с помощью подбора параметров, в частности, свойств частиц темной материи, удастся описать наблюдаемые свойства филаментов. Однако до сих пор нет прямых доказательств существования частиц темной материи [6,7].

Есть также проблема у основной гипотезы теории крупномасштабной структуры: захват барионов в гало темной материи. Дело в том, что до эпохи рекомбинации движения барионной и темной материи на масштабах меньше звукового горизонта различны. Сгустки темной материи сжимаются, сгустки радиационно-доминированной плазмы распространяются как релятивистские звуковые волны. Таким образом, барионная материя должна двигаться относительно темной материи в эпоху до рекомбинации и после нее. Скорости этого относительного движения нужно учитывать при моделировании, потому что небольшие гало темной материи не могут захватывать в свое гравитационное поле быстро движущиеся потоки барионной материи. Следовательно, рост контрастов плотности барионов на малых пространственных масштабах должен происходить медленнее по сравнению с моделью, в которой нет относительных скоростей барионной и темной материй [8]. Пока влияния скоростей галактик на трехточечную корреляционную функцию их распределения не обнаружено [9]. Это, конечно, может быть связано с качеством измерения скоростей галактик, а также с гипотезой о темной материи. Наконец, в работе [10] приведены веские аргументы против гипотезы о существовании темной материи в галактиках и скоплениях.

Ниже мы приводим собранные в литературе факты о наблюдаемых свойствах филаментов. Часть из них не описывается (возможно, пока) стандартной Λ CDM-моделью.

Эти факты и отмеченные трудности гипотезы о темной материи стимулируют рассмотрение альтернативных физических моделей филаментов. В этой работе мы приводим наглядный пример образования вытянутых структур

в распределении материи, благодаря первичным скалярным и векторным гравитационным возмущениям в однородной и изотропной космологической модели, оставаясь в рамках общей теории относительности и без привлечения гипотезы о приливном взаимодействии гало темной материи.

Первичные гравитационные возмущения описываются малыми возмущениями метрики пространства-времени. Возмущения метрики в отдельных областях пространства приводят к изменению системы отсчета в этих областях по сравнению с системой отсчета фоновой космологической модели. Скалярное возмущение метрики приводит к тому, что в области возмущения плотность материи убывает медленнее, чем плотность материи в расширяющейся фоновой системе отсчета. В результате фоновый наблюдатель обнаружит рост относительного контраста плотности материи в этой области, хотя непосредственного притока материи не происходит.

В случае векторных гравитационных возмущений контрастов плотности материи нет. Область пространства с измененной системой отсчета расширяется также, как и фоновое пространство. Векторное возмущение переносит изменение системы отсчета в соседние области фонового пространства. Фоновый наблюдатель будет трактовать это перемещение как процесс появления направленного движения материи. Например, так можно описывать появление вихревого движения материи без изменения ее плотности.

Пусть изменение системы отсчета в области пространства вызывается одновременно скалярными и векторными возмущениями метрики. Тогда векторное возмущение переносит систему отсчета со скалярным возмущением в соседние области фонового пространства. В этом случае фоновый наблюдатель увидит вращение контраста плотности или направленное перемещение контраста плотности, либо комбинацию этих движений. Подобное перемещение нескольких контрастов плотности будет наблюдаться как вытянутая структура типа филамента.

В области пересечения двух или более векторных возмущений, которые переносят свои контрасты плотности, появится первичный контраст плотности для образования скопления галактик. Такие филаменты могут быть первичными структурными элементами крупномасштабной структуры Вселенной.

Затухание векторного возмущения должно приводить к постепенному разрушению первичного филамента. Однако при затухании векторного возмущения скалярные возмущения продолжают расти, поэтому сохранение первичной филаментарной структуры может быть обеспечено коллективным взаимодействием контрастов плотности, но уже на квазилинейной стадии эволюции крупномасштабной структуры. В этих первичных филаментах галактики будут образовываться раньше, чем в одиночных контрастах плотности. Кроме того в первичных филаментарных структурах более вероятны столкно-

вения и слияния протогалактик, поэтому в них должно образовываться больше массивных галактик.

2. Наблюдаемые свойства филаментов. Филаменты обнаружены вплоть до красных смещений $z \sim 4$. Сейчас, благодаря сложному анализу данных обзоров CfA2, 2dF, SDSS, 2MASS, 6dF, GAMA, VIPERS, 2MPZ, WISExSCOS, установлены следующие факты:

1. Длина филаментов 50-200 Мпк, ширина на порядок меньше. Примерно половина всех наблюдаемых галактик входит в филаменты, причем не больше 20% из них принадлежат скоплениям и группам в этих филаментах. Скопления галактик находятся на пересечении филаментов, но не во всех пересечениях филаментов есть скопления. Сверхскопления галактик состоят из филаментов, в том числе пересекающихся. Сверхскопления связаны друг с другом филаментами и образуют космическую сеть (крупномасштабная структура) [11-14].

2. Анализ наблюдений в нескольких спектральных диапазонах (инфракрасный, оптический, рентгеновский) относительно близких филаментов с красными смещениями $z < 0.9$ позволил установить, что в них много теплого газа. Обнаружено, что красные галактики с большими массами находятся преимущественно внутри или ближе к филаменту, чем голубые маломассивные галактики. Большие (образовались раньше) галактики находятся внутри или ближе к филаментам по сравнению с небольшими галактиками (образовались позднее). Не обнаружено различия населений галактик (пассивные, ранних типов, красные) в скоплениях и в соединяющих эти скопления филаментах [15-17].

3. Большие оси галактик имеют выделенное направление: они выстраиваются (статистически значимо) вдоль направления филамента, который их содержит, или вдоль филамента, к которому они ближе всего. Это выстраивание сильнее выражено у ярких галактик, образовавшихся в более раннюю эпоху, чем у неярких галактик, образовавшихся позднее [18-29].

4. Анализ лучевых скоростей галактик позволил обнаружить, что галактики движутся преимущественно по направлению к ближайшему филаменту, а галактики внутри филаментов движутся к ближайшему скоплению галактик в филаменте [21,22]. Это означает, что галактики филамента, скорее всего, образовались внутри филамента. Скорости галактик велики, причем характерное время пересечения ими филамента меньше возраста галактик, поэтому они могли бы покинуть филамент, если бы попали в него из внешнего пространства.

Скопления аккумулируют газ и галактики из филаментов. Это подтверждается тем, что, во-первых, в скоплениях скорости галактик и температура межгалактического газа превышают величины, которые были бы при выполн-

нении вириального равновесия скоплений. Во-вторых, скейлинговые зависимости между рентгеновскими светимостями скоплений, температурами межгалактического газа в скоплениях и дисперсиями скоростей галактик в скоплениях заметно отличаются от зависимостей, которые были бы при выполнении вириального равновесия скоплений (см. [23] и ссылки там). Отметим, что отклонение от вириального равновесия часто трактуется как признак присутствия темной материи.

5. Гигантские филаменты с масштабами от нескольких сотен мегапарсек до гигапарсек обнаружены в распределении галактик и скоплений, квазаров, гамма-барстеров (Great Wall, Great GRB Wall, Hyperion, LQG) [24-28]. Размеры этих структур в несколько раз больше максимального масштаба скучивания для корреляционной функции галактик в стандартной космологической Λ CDM-модели.

Первый из перечисленных фактов хорошо воспроизводится в численных моделях в рамках Λ CDM-модели (см., например, [29,30] и ссылки там). Согласно этим моделям, филаменты темной материи появляются при красных смещениях $z \sim 3 - 5$, постепенно из них формируются двумерные структуры, которые ограничивают ворды при $z < 1$. Максимальные масштабы вордов не превышают 300 Мпк для космологических параметров современной Λ CDM-модели. Этот максимальный масштаб ограничивает сверху размер филаментов, что противоречит существованию гигантских филаментов (факт 5). Авторы моделей крупномасштабной структуры предполагают, что гигантские филаменты являются следствием проекции, а не реальными объектами. Однако уже обнаружены признаки выстраивания красных галактик и квазаров вдоль гигантского филамента LQG [31]. Это подтверждает реальность филамента LQG и указывает на трудность Λ CDM-модели.

Факты 2-4 указывают на то, что галактики в филаментах образовывались внутри этих филаментов, т.е. филаменты являются первичными структурами и в них галактики образовались раньше (наблюдаются как массивные красные галактики), чем галактики вне филаментов (наблюдаются как маломассивные голубые галактики).

3. *Модель образования первичных филаментов из скалярных и векторных гравитационных возмущений.* Для наглядности выберем однородную и изотропную космологическую модель, которая заполнена материи с пренебрежимо малым давлением (пыль) и имеет синхронную метрику:

$$ds^2 = g_{ik} dx^i dx^k = a^2 (d\eta^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2), \quad (1)$$

где латинские индексы пробегают значения 0, 1, 2, 3; масштабный фактор $a = a_0 \eta^2 = a_0 (t/t_0)^{2/3}$; t - космологическое время; η - конформное время; x ,

y, z - пространственные координаты. Мы будем придерживаться терминологии, использованной в классической книге [32].

Гравитационные возмущения описываются с помощью малых поправок к фоновой метрике (1) (синхронная калибровка):

$$g_{ik} \rightarrow g_{ik} + h_{ik}, \quad h_{00} = 0 = h_{0\alpha}. \quad (2)$$

Здесь греческие индексы пробегают значения 1, 2, 3. В линейном приближении малые возмущения удовлетворяют уравнениям:

$$\delta G_i^k = \kappa \delta T_i^k, \quad (3)$$

где κ - гравитационная постоянная Эйнштейна, δG_i^k - возмущение тензора Эйнштейна, δT_i^k - возмущение тензора энергии-импульса материи. Для пыли

$$\delta T_i^k = \varepsilon \left(u_i \delta u^k + u^k \delta u_i \right) + \delta \varepsilon u_i u^k. \quad (4)$$

Здесь $\delta \varepsilon$ - возмущение плотности среды, $\varepsilon = \varepsilon_0 (a_0/a)^3$, компоненты четырехмерной скорости u^k и ее возмущения δu^k удовлетворяют условиям: $u^\alpha = 0$, $u^0 = 1/a$, $\delta u^0 = 0$.

В пространстве-времени с метрикой (1) могут существовать три типа гравитационных возмущений: скалярные, векторные и тензорные. Здесь мы будем рассматривать скалярные и векторные возмущения. При тензорных возмущениях (гравитационные волны) материя остается однородной и не приобретает дополнительной скорости, поэтому с ними не может быть связано формирование филаментов.

Представим скалярное возмущение метрики $(h_\alpha^\beta)_{S,n}$ в виде плоской волны с волновым вектором n_α и суммы изотропного (амплитуда μ_n) и анизотропного (амплитуда λ_n) тензоров:

$$(h_\alpha^\beta)_{S,n} = \left[\mu_n \frac{1}{3} \delta_\alpha^\beta + \lambda_n \left(\frac{1}{3} \delta_\alpha^\beta - \frac{n_\alpha n^\beta}{n^2} \right) \right] e^{in_\alpha} x^\alpha. \quad (5)$$

Скалярное гравитационное возмущение создает контраст плотности:

$$\left(\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} \right)_n = \frac{a}{3\kappa \varepsilon_0 a_0^3} \left[n^2 (\lambda_n + \mu_n) + 3 \frac{a'}{a} \mu'_n \right] e^{in_\alpha} x^\alpha, \quad (6)$$

где штрих означает дифференцирование по η . Известно [32], что уравнения (3) для скалярных возмущений (5) имеют решение с растущим контрастом плотности $\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} = \delta_0 \frac{a}{a_0} = \delta_0 \eta^2$, причем возмущения обычной трехмерной скорости $(a \delta u^\alpha)_{S,n}$ нет:

$$(a \delta u^\alpha)_{S,n} = \frac{1}{3\kappa \varepsilon_0 a_0^3} a n^\alpha (\lambda_n + \mu_n)' e^{in_\alpha} x^\alpha = 0. \quad (7)$$

Этот рост контраста плотности связан не с притоком материи в область с

возмущенной метрикой пространства, а с тем, что в этой области плотность материи уменьшается медленнее $\delta\epsilon = \delta_0\epsilon_0\eta^{-4}$, чем уменьшение плотности в фоновой системе отсчета $\epsilon = \epsilon_0\eta^{-6}$.

Векторное возмущение метрики $(h_\alpha^\beta)_{V,m}$ представим в виде поперечной векторной волны с волновым вектором m_α и амплитудой σ_m :

$$(h_\alpha^\beta)_{V,m} = \sigma_m \frac{l_\alpha m^\beta + l^\beta m_\alpha}{m} e^{im_\alpha x^\alpha}, \quad l_\alpha m^\alpha = 0. \quad (8)$$

Известно [32], что уравнения (3) для векторных возмущений (8) имеют решение с возмущением скорости $(a\delta u^\alpha)_{V,m} = -\frac{ml^\alpha}{2\kappa\epsilon_0 a_0^3} a \sigma' e^{im_\alpha x^\alpha}$, которое затухает как η^{-2} . Векторные возмущения не создают контрастов плотности материи. Область пространства с векторным возмущением расширяется также, как и фоновое пространство. Благодаря возмущению скорости векторное возмущение системы отсчета переносится в соседние области фонового пространства. Таким образом, векторные возмущения метрики относятся к эффектам общей теории относительности (см. [33]).

Малые возмущения (5) и (8) удовлетворяют уравнениям (3). Это также справедливо для гравитационного возмущения, которое описывается суммой возмущений (5) и (8). Для такого скалярно-векторного возмущения из уравнений (3) можно найти следующие уравнения для амплитуд λ_n , μ_n , σ_m :

$$\lambda_n'' + 2\frac{a'}{a}\lambda_n' - \frac{n^2}{3}(\lambda_n + \mu_n) = 2\frac{m_\alpha n^\alpha}{mn} \frac{l_\beta n^\beta}{n} \left(\sigma_m'' + 2\frac{a'}{a}\sigma_m' \right) e^{i(m_\alpha - n_\alpha)x^\alpha}, \quad (9)$$

$$\mu_n'' + 2\frac{a'}{a}\mu_n' + \frac{n^2}{3}(\lambda_n + \mu_n) = 0, \quad (10)$$

$$a\delta u^\alpha = \frac{a}{2\kappa\epsilon_0 a_0^3} \left[\frac{2}{3}n^\alpha (\lambda_n + \mu_n)' e^{in_\alpha x^\alpha} - ml^\alpha \sigma_m' e^{im_\alpha x^\alpha} \right], \quad (11)$$

$$\frac{\delta\epsilon}{\epsilon} = \frac{a}{3\kappa\epsilon_0 a_0^3} \left[n^2(\lambda_n + \mu_n) + 3\frac{a'}{a}\mu_n' \right] e^{in_\alpha x^\alpha}. \quad (12)$$

Подчеркнем, что в общем случае $m_\alpha n^\alpha \neq 0$, $l_\alpha n^\alpha \neq 0$, поэтому решение (9)-(12) описывает наложение двух типов гравитационных возмущений в одной области пространства.

Используем уравнения (9)-(10). Сложим эти два уравнения и после простых преобразований получим уравнение, связывающее $(\lambda_n + \mu_n)$ и σ_m' :

$$\left(a^2 (\lambda_n + \mu_n)' \right)' = 2\frac{m_\alpha n^\alpha}{mn} \frac{l_\beta n^\beta}{n} \left(a^2 \sigma_m' \right)' e^{i(m_\alpha - n_\alpha)x^\alpha}. \quad (13)$$

Уравнение (13) имеет решение:

$$(\lambda_n + \mu_n)' = 2 \frac{m_\alpha n^\alpha}{mn} \frac{l_\beta n^\beta}{n} \sigma'_m e^{i(m_\alpha - n_\alpha)x^\alpha} + \frac{C_1}{a^2}, \quad (14)$$

$$\lambda_n + \mu_n = (\lambda_n + \mu_n)_0 + 2 \frac{m_\alpha n^\alpha}{mn} \frac{l_\beta n^\beta}{n} (\sigma_m - (\sigma_m)_0) e^{i(m_\alpha - n_\alpha)x^\alpha} + C_1 \int_{\eta_0}^{\eta} \frac{d\eta}{a^2}, \quad (15)$$

где нижний индекс ноль указывает на значение функций в начальный момент $\eta_0 = 1$, C_1 есть постоянные интегрирования, которая равна

$$C_1 = 2 \frac{m_\alpha n^\alpha}{mn} \frac{l_\beta n^\beta}{n} (\sigma'_m)_0 e^{i(m_\alpha - n_\alpha)x^\alpha} - (\lambda_n + \mu_n)'_0. \quad (16)$$

Используя решение (14)-(16), получаем выражения для скорости $a\delta u^\alpha$ и контраста плотности $d\varepsilon/\varepsilon$:

$$a\delta u^\alpha = \frac{a}{2\kappa\varepsilon_0 a_0^3} \left[\left(\frac{4}{3} n^\alpha \frac{m_\alpha n^\alpha}{mn} \frac{l_\beta n^\beta}{n} - ml^\alpha \right) \sigma'_m e^{im_\alpha x^\alpha} + \frac{2}{3} n^\alpha \frac{C_1}{a^2} e^{in_\alpha x^\alpha} \right], \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon}{\varepsilon} &= \frac{a}{3\kappa\varepsilon_0 a_0^3} \left[n^2 ((\lambda_n + \mu_n)_0 + \right. \\ &\quad \left. + 2 \frac{m_\alpha n^\alpha}{mn} \frac{l_\beta n^\beta}{n} (\sigma_m - (\sigma_m)_0) e^{i(m_\alpha - n_\alpha)x^\alpha} + C_1 \int_{\eta_0}^{\eta} \frac{d\eta}{a^2} \right) + 3 \frac{a'}{a} \mu'_n \right] e^{in_\alpha x^\alpha}. \end{aligned} \quad (18)$$

Как видно из выражений (17)-(18), при отсутствии векторного возмущения мы имеем классическую растущую модуля для контраста плотности:

$$\frac{d\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{a}{3\kappa\varepsilon_0 a_0^3} n^2 (\lambda_n + \mu_n)_0 e^{in_\alpha x^\alpha} = \delta_0 \eta^2, \text{ причем } (\lambda_n + \mu_n) = \text{const} \text{ и } C_1 = 0, [32].$$

В этом случае трехмерная скорость равна нулю $a\delta u^\alpha = 0$, т.е. область пространства со скалярным возмущением метрики не движется относительно фоновой системы отсчета. Из-за скалярного возмущения плотность материи убывает медленнее, чем плотность материи в фоновой системе отсчета, поэтому контраст плотности растет в области возмущения, но потоков материи в эту область нет.

В присутствии векторного возмущения скорость $a\delta u^\alpha$ контраста плотности $d\varepsilon/\varepsilon$ зависит от амплитуд скалярного и векторного возмущения метрики. Например, для классического решения $C_1 = 0$, $m_\alpha n^\alpha = mn$, $l_\alpha n^\alpha = 0$ и $\sigma_m = (\sigma_m)_0 / \eta^3$ контраст плотности приобретает скорость $a\delta u^\alpha$, направление которой перпендикулярно волновому вектору n^α , т.е. векторное возмущение создает вращение скалярного возмущения. Скорость вращения убывает как η^{-2} , поэтому вращательный момент сохраняется: $a(a\delta u^\alpha) = \text{const}$ (уменьшение скорости компенсируется увеличением размеров области пространства из-за общего расширения пространства).

Приведем два типа степенных решений уравнений (9)-(12) для растущей моды контрастов плотности.

Классические решения:

Скалярные возмущения метрики: $\lambda_n + \mu_n = \text{const}$, $d\varepsilon/\varepsilon = \delta_0 \eta^2$, $a\delta u^\alpha = 0$.

Векторные возмущения метрики: $\sigma_m = \frac{(\sigma_m)_0}{\eta^3}$, $\frac{d\varepsilon}{\varepsilon} = 0$, $a\delta u^\alpha = \frac{3ml^\alpha}{2\kappa\varepsilon_0 a_0^3} \frac{(\sigma_m)_0}{\eta^2} e^{im_\alpha x^\alpha}$.

Решение для скалярно-векторного возмущения:

$$\sigma'_m = \frac{(\sigma_m)_0}{\eta^k}, \quad (\lambda_n + \mu_n)' = 2C_{lmn} \frac{(\sigma_m)_0}{\eta^k} e^{i(m_\alpha - n_\alpha)x^\alpha} + \frac{C_1}{a_0^2} \frac{1}{\eta^4}, \quad C_{lmn} = \frac{m_\alpha n^\alpha}{mn} \frac{l_\beta n^\beta}{n}, \quad (19)$$

$$\lambda_n + \mu_n = (\lambda_n + \mu_n)_0 + \frac{2}{k-1} C_{lmn} (\sigma_m)_0 \left(1 - \frac{1}{\eta^{k-1}} \right) e^{i(m_\alpha - n_\alpha)x^\alpha} + \frac{C_1}{3a_0^3} \left(1 - \frac{1}{\eta^3} \right), \quad (20)$$

$$a\delta u^\alpha = \frac{\eta^2}{2\kappa\varepsilon_0 a_0^2} \left[\left(\frac{4}{3} C_{lmn} n^\alpha - ml^\alpha \right) \frac{(\sigma_m)_0}{\eta^k} e^{im_\alpha x^\alpha} + \frac{2C_1}{3a_0^2} \frac{n^\alpha}{\eta^4} e^{in_\alpha x^\alpha} \right], \quad (21)$$

$$\frac{d\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{n^2 \eta^2}{5\kappa\varepsilon_0 a_0^2} \left[\left((\lambda_n + \mu_n)_0 + \frac{C_1}{3a_0^2} \right) e^{in_\alpha x^\alpha} + \frac{2C_{lmn} (\sigma_m)_0}{k-1} e^{im_\alpha x^\alpha} \right]. \quad (22)$$

Для скалярно-векторных возмущений при $m_\alpha n^\alpha \neq 0$, $l_\alpha n^\alpha \neq 0$ решения (19)-(22) описывают комбинацию двух типов движений контраста плотности - вращение и направленное перемещение. Момент импульса сохраняется $a(a\delta u^\alpha)\delta\varepsilon = \text{const}$ при показателе $k=4$.

Направленное движение нескольких контрастов плотности сформирует вытянутую структуру из контрастов плотности, которая будет первичным возмущением для будущего филамента.

Описанная "игрушечная" модель демонстрирует основные физические элементы образования первичных филаментов. Причем появление первичных филаментов связано именно с векторными возмущениями системы отсчета и поэтому является эффектом общей теории относительности.

4. Заключение. Мы провели анализ публикаций о крупномасштабной структуре Вселенной, в которых содержатся данные о наблюдаемых свойствах филаментов из галактик и групп галактик. Эти свойства указывают на то, что в филаментах галактики являются более массивными и их возраст больше, чем возраст галактики вне филаментов. Обнаружено также геометрическое выстраивание галактик вдоль филаментов. Все это указывает на то, что свойства галактик зависят от филаментов. Поэтому мы предложили гипотезу о том, что в ранней Вселенной существовали вытянутые структуры или первичные филаменты, состоящие из контрастов плотности. В них столкновения и слияния контрастов плотности более вероятны. Поэтому

образование массивных протогалактик в первичных филаментах могло происходить раньше, чем в одиночных контрастах плотности. Тогда в современную эпоху должна наблюдаться зависимость свойств галактик от их связи с сохранившимися филаментами. Для подтверждения этой гипотезы требуются дальнейшие исследования.

Мы предложили модель образования первичного филамента благодаря первичным скалярным и векторным гравитационным возмущениям. В дальнейшем мы предполагаем более подробно рассмотреть эту модель и ее наблюдательные ограничения.

Мы благодарим Всероссийский институт научной и технической информации за возможность использования полitemатической базы данных database VINITI.

Всероссийский институт научной и технической информации (ВИНТИ РАН),
Москва, Россия, e-mail: rozgacheva@yandex.ru kib139@mail.ru

FILAMENTS OF THE LARGE SCALE STRUCTURE AND PRIMARY SCALAR AND VECTOR GRAVITATIONAL PERTURBATIONS

I.K.ROZGACHEVA, I.B.KUVSHINOVA

The published data on observed properties of filaments (chains of galaxies and galaxy groups) which dominate in large-scale structure of the Universe are collected. A part from these properties is not described within standard cosmological Λ CDM model. It is revealed that properties of galaxies depend on their arrangements in or near the filament. The hypothesis that in the early Universe there could be primary filaments from density contrasts is offered. In them there was earlier formation of massive protogalaxies, than in single contrasts of density. Then the dependence of properties of galaxies on their links with the surviving filaments has to be observed in present epoch. The model of primary filament owing to the primary scalar and vector gravitational perturbations in the uniform and isotropic cosmological model which is filled with matter with negligible pressure, without use of a hypothesis of tidal interaction of dark matter halos is offered.

Keywords: *Galaxies: galaxy clusters: large-scale structure: filaments: gravitational perturbations*

ЛИТЕРАТУРА

1. *M.Jõeveer, J.Einasto*, in: "The large scale structure of the Universe." Proceedings of the Symposium, Tallin, Estonian SSR, September 12-16, 1977. Dordrecht, D.Reidel Publishing Co., 241-250; Discussion, p.250-251, 1978.
2. *V. De Lapparent et al.*, *Astrophys. J.*, **302**, L1, 1986.
3. *R.J.Bond et al.*, *Nature*, **380**, 603, 1996.
4. *E.Tempel et al.*, arXiv:astro-ph/1308.2533.
5. *Y.-C.Chenet et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **461**, 3896, 2016.
6. *X.J.Liu, X.Ji.Chen*, *Nature Physics*, **13**, 212, 2017.
7. *А.В.Засов и др.*, УФН, **187**, 3, 2017.
8. *D.Tseliakhovich, C.Hirata*, *Phys. Rev. D*, **82**, 083520, 2010.
9. *Z.Slepian et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **474**, 2109, 2018.
10. *И.К.Розгачева, А.А.Аганов*, *Астрон. ж.*, **95**, 585, 2018.
11. *Ya.B.Zeldovich et al.*, *Nature*, **300**, 407, 1982.
12. *J.H.Oort*, *Superclusters*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **21**, 373, 1983.
13. *M.Einasto et al.*, *Astron. Astrophys.*, **476**, 697, 2007.
14. *J.Bagchi et al.*, *Astrophys. J.*, **844**, 25, 2017.
15. *N.Werner et al.*, *Astron. Astrophys.*, **482**, L29, 2008.
16. *F.Durret et al.*, *Astron. Astrophys.*, **588**, A69, 2016.
17. *Y.-C.Chen et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **466**, 1880, 2017.
18. *E.Tempel et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **428**, 1827, 2013.
19. *Y.-C.Chen et al.*, arXiv:astro-ph/1805.00159.
20. *S.Codis et al.*, arXiv:astro-ph/1809.062121.
21. *S.Kim et al.*, *Astrophys. J.*, **833**, 207, 2016.
22. *D.Pomarède et al.*, *Astrophys. J.*, **845**, 55, 2017.
23. *И.Б.Кувшинова, И.К.Розгачева*, *Астрон. ж.*, **87**, 760, 2010, (*Astron. Rep.*, **54**, 696, 2010).
24. *S.Bharadwaj et al.*, *Astrophys. J.*, **606**, 25, 2004.
25. *I.K.Rozgacheva et al.*, arXiv:astro-ph/1201.5554.
26. *R.G.Clowes et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **429**, 2910, 2013.
27. *С.И.Широков и др.*, *Вестник СПбГУ*, Сер. 1., **1**(59), Вып. 4, 659, 2014.
28. *I.Horváth et al.*, *Astron. Astrophys.*, **561**, L12, 2014.
29. *O.Cucciati et al.*, *Astron. Astrophys.*, **619**, A49, 2018.
30. *J.Zhang et al.*, *Phys. Rev. D*, **97**, 023534, 2018.
31. *V.Pelgrims, D.Hutsemékers*, *Astron. Astrophys.*, **590**, A53, 2016.
32. *Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц*, *Теоретическая физика*, т. II, Теория поля, М., Наука, 1988.
33. *Я.Б.Зельдович, И.Д.Новиков*, *Астрофизика*, **6**, 379, 1970, (*Astrophysics*, **6**, 203, 1970).