

Яков Зельдович и парадигма Космической Паутины

Я. Эйнасто (Эстония)

Перевод М.Х. Шульмана (shulman@dol.ru, www.timeorigin21.narod.ru)

arXiv:1410.6932v1 [astro-ph.CO] 25 Oct 2014

*The Zeldovich Universe: Genesis and Growth of the Cosmic Web
Proceedings IAU Symposium No. 308, 2015
Rien van de Weygaert, Sergei Shandarin, Enn Saar % Jaan Einasto, eds.*

© 2015 International Astronomical Union
DOI: 00.0000/X0000000000000000X

Yakov Zeldovich and the Cosmic Web Paradigm

Jaan Einasto (jaan.einasto@to.ee)
Tartu Observatory, Observatooriumi 1, 61602 Tõravere, Estonia

Обсуждается формирование современной космологической парадигмы. Более подробно описываются ранние исследования темной материи и “космической паутины”, а также роль Якова Зельдовича в формировании соответствующих концепций.

1. Формирование современной космологической парадигмы

Современная классическая космологическая парадигма сформировалась шаг за шагом в первой части 20-го века. Было установлено, что существуют звездные системы за пределами нашего Млечного Пути – внешние галактики (Öpik(1922), Hubble(1925)). Затем выяснилось, что что внешние галактики удаляются от нас, т.е. Вселенная расширяется (Hubble(1929)). На основе теории относительности Эйнштейна Фридман (1922) объяснил расширение как свойство бесконечной Вселенной. Скорость расширения может быть выражена через постоянную Хаббла H_0 . Sandage & Tammann(1975) нашли примерную величину $H_0 = 50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, в то время как de Vaucouleurs(1978) и van den Bergh(1972) склонялись к величине, примерно равной $H_0 = 100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. В силу этой неопределенности постоянная Хаббла часто выражается в безразмерных единицах h , определенных соотношением $H_0 = 100 h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

Другой основой классической космологической парадигмы является распределение галактик и галактических скоплений. С использованием 48-дм Palomar Schmidt телескопа был выполнен фотографический обзор. Abell (1958) использовал этот обзор для составления каталога больших галактических скоплений на северной половине небосвода; позже этот каталог был распространен на южную половину (Abell et al.(1989)). Zwicky et al. (1968) использовали этот обзор для составления каталога галактик и галактических скоплений в северной полусфере. Этот галактический каталог содержит объекты до 15.5 фотографической магнитуды. Авторы обоих каталогов

отмечали, что галактики и скопления галактик демонстрировали тенденцию к объединению.

Средняя плотность, связанная с наличием галактик, была определена используя среднюю плотность светимости и среднему отношению массы к светимости (M/L) для галактик. Доступные в 1950-х наблюдения дают низкую плотность, $\Omega \approx 0.05$.

Этот комплекс данных сформировал классическую космологическую парадигму. Однако теоретическое объяснение расширяющейся Вселенной на основании модели Фридмана было математическим, оно не рассматривало физических процессов в ранней Вселенной. Таким образом, в начале 1960-х в некоторых центрах теоретики начали думать о физике ранней Вселенной. Наиболее важное развитие в этих направлениях осуществили Джим Пиблз (Jim Peebles) в Принстоне и Яков Зельдович с сотрудниками в Москве.

Одним из этих первых шагов при изучении физических процессов была выработка иерархических сценариев кластеризации - Peebles & Yu(1970), Peebles(1971). С другой стороны, московская команда развила модель структуры “блинов” - Zeldovich(1970) и теория эффекта Сюняева-Зельдовича в космическом фоновом микроволновом (реликтовом) излучении Sunyaev & Zeldovich(1969).

Для обсуждения новых проблем космологии и астрофизики Зельдович организовал летнюю и зимнюю школы. Первая из таких школ прошла в новой обсерватории в Tögrave в 1962 году; последующие школы проходили на кавказских зимних курортах. Наша космологическая команда в Тарту была приглашена на кавказскую зимнюю школу в 1972, 1974 годах и позднее. Дискуссии на зимних школах положили начало нашему сотрудничеству с командой Зельдовича.

Были также сделаны важные наблюдательные открытия. Penzias & Wilson(1965) обнаружили реликтовое излучение. Спутниковые обсерватории позволили обнаружить рентгеновские лучи от галактических скоплений и найти массу горячего газа в скоплениях, равно и как и полную массу скоплений (Forman et al.(1972)).

Этот наблюдательный и теоретический прогресс послужил основанием для формирования современной космологической парадигмы. В последующем будут более детально обсуждены некоторые аспекты новой космологической парадигмы, связанные с открытием космической паутины. Весьма неожиданно было обнаружено, что структура космической паутины тесно связана с другой проблемой – природой темной материи и ее роли в формировании космической паутины.

2. Темная материя

В середине 60-х общее мнение астрономического сообщества состояло в том, что классическая космологическая парадигма находится в согласии со всеми доступными наблюдательными и теоретическими данными. Между тем имелись некоторые необъясненные факты. Одним из этих любопытных фактов был парадокс массы в скоплении Волосы Вероники (Coma cluster). Масса, вычисленная по случайным движениям галактик скопления, была намного выше, чем ожидаемая масса, полученная сложением масс отдельных галактик, как отметил Zwicky(1933).

Другим любопытным фактом была форма кривых вращения галактик. Как установили Oort(1940), Roberts(1966) и Rubin & Ford(1970), кривые вращения спиральных галактик плоские на больших галактоцентрических расстояниях. Поскольку яркость поверхности галактик быстро падает на периферии, плоские поверхности означают, что отношение массы к светимости быстро увеличивается на больших галактоцентрических расстояниях. Oort(1940) и Roberts(1966) объяснили это наблюдение с помощью гипотезы, что на больших расстояниях звезды с малыми массами доминируют в галактике.

По некоторым невыясненным причинам эти наблюдения были проигнорированы астрономическим сообществом.

Тартусские астрономы исследовали методы моделирования структуры галактик. Первая динамическая модель галактики Андромеды была рассчитана Öpik(1922). Кузьмин (Kuzmin(1952), Kuzmin(1956)) развил более точный метод моделирования галактик и применил этот метод к нашей Галактике.

Я помогал Кузьмину в вычислениях и был заинтересован в продолжении моделирования галактик, используя больше наблюдательных данных о галактических популяциях. Во-первых, я тщательно исследовал методы, использованные предыдущими авторами для модельного расчета распределения масс галактик. себя я выяснил, что в большинстве моделей простые условия физического обоснования не выполняются. Более важными условиями являются следующие: пространственная плотность быть неотрицательной и конечной, некоторые моменты плотности должны быть конечными, в частности, моменты, определяющие в модели массу и эффективный радиус. Затем я выяснил, что тот профиль плотности распределения, который удовлетворяет всем физическим условиям, представляет собой обобщенную экспоненциальную модель: $\rho(a) = \rho_0 \exp(-(a/a_c)^{1/N})$, где ρ_0 – центральная плотность, a – главная полуось эллипсоида равной плотности, a_c – радиус ядра, N – структурный параметр, позволяющий варьировать форму профиля плотности. Я использовал затем этот профиль плотности в моей модели Галактики (Einasto(1965)) и в моделях других галактик. Сейчас этот профиль известен как “профиль Einasto”.

Центральной проблемой при моделировании галактик является калибровка отношений масса-светимость популяций. Это может быть сделано за счет дополнительных независимых данных. Наиболее важными данными являются дисперсии скоростей открытых и шаровых скоплений со схожими фотометрическими свойствами, исходя из предположения, что галактические популяции были сформированы в результате распада скоплений и звездных ассоциаций. Чтобы использовать данные популяций с различным возрастом и композицию когерентных систем я развил модели эволюции популяций, сходную с моделями Tinsley(1968). Неожиданно для себя я открыл, что невозможно представить кривые вращения галактик с помощью суммирования гравитационного притяжения известных звездных популяций. Единственным способом привести в соответствие кинематические и фотометрические данные было предположить присутствие новой популяции – короны – с большими радиусом, массой и отношением M/L.

Я рассчитал модели с массивными коронами для всех главных галактик Местной Группы и центральной галактики скопления Virgo, M87. Результаты обсуждались на Первой Европейской Астрономической Встрече в Афинах в сентябре 1972 года (Einasto(1974)). Однако наблюдаемые кривые вращения

еще не были достаточно протяженными, чтобы установить массу и радиус корон. Итак, я продолжал размышлять о том, как найти полные массы и радиусы корон. В конце концов я решил использовать компаньоны галактик в качестве маркеров масс гигантских галактик. Я собрал необходимые данные и нашел, что масса (и эффективный радиус) корон примерно в десять раз больше, чем сумма масс всех известных звездных популяций. Полная космологическая плотность материи в галактиках, включая массивные короны, составляет 0.2 от критической космологической плотности (Einasto et al.(1974)). Сходную оценку полной плотности получили Ostriker et al.(1974).

С целью обсудить существование и физическую природу темной материи, мы организовали в январе 1975 года конференцию в Таллинне, Эстония (Doroshkevich et al.(1975)). К тому времени слухи о темной материи распространялись среди сообществ астрономов и физиков, и присутствовали все ведущие советские астрономы и физики. Для корон были предложены две базовые модели: тусклые звезды и горячий газ. Было установлено, что обе модели связаны с серьезными трудностями. Обсуждались также нейтрино, но они были исключены, поскольку могли формировать лишь сгустки массивных скоплений, но короны галактик обладают массой в тысячу раз меньшей.

Проблема темной материи обсуждалась также на Третьей Европейской Астрономической Встрече в Тбилиси в июне 1975 года. На сессии, посвященной темной материи, основная дискуссия имела место между сторонниками классической парадигмы, придерживающихся общепринятой оценки массы галактик, и приверженцами новой парадигмы, связанной с существованием темной материи. Наиболее серьезные аргументы в пользу классической космологической парадигмы были представлены Materne & Tammann(1976): первичный нуклеосинтез предполагает Вселенную, имеющую низкую плотность $\Omega \approx 0.05$ (эта трудность уже обсуждалась Зельдовичем на конференции в Таллине); однородность хаббловского потока также говорила о низкой плотности Вселенной. Было ясно, что существование темной матери было в конфликте с классической космологической парадигмой. Если она и существует, то ее плотность $\Omega \approx 0.2$ должна быть объяснена с других позиций.

Природа темной материи и ее роль в эволюции Вселенной оставалась проблемой в течение почти десяти лет. Чтобы ее решить, понадобились данные о распределении галактик в пространстве и другие новые данные.

3. Структура Вселенной

Когда Зельдович поставил вопрос о формировании галактик, у меня вначале не было никаких идей о том, как найти ответ. Но вскоре я вспомнил наш предшествующий опыт при изучении галактических популяций: их пространственное распределение и кинематика эволюционировали медленно. Системы галактик гораздо больше по размеру, так что их эволюция должна быть еще медленнее. Случайные скорости галактик имеют порядок несколько сотен км/с и ли меньше, поэтому в течение всего времени жизни Вселенной галактики перемещаются от их исходного местоположения всего лишь примерно на $1 h^{-1} \text{ Mpc}$. Если существует некоторые регулярности в крупномасштабном распределении галактик, то эти регулярности должны отражать условия во Вселенной при формировании галактик. Таким образом у нас возникла идея о том, каким должен быть ответ на вопрос Зельдовича: *мы должны изучить крупномасштабное распределение галактик.*

Мы начали собирать данные по красным смещениям из всех доступных источников. Хотя нам требовались данные о крупномасштабном распределении галактик, мы собирали информацию о красных смещениях не только галактик, но также и ближайших скоплений, скоплений Abell и Zwicky, равно как и активных скоплений (радиогалактик и галактик Маркаряна). Наш опыт показывал, что скопления и активные галактики являются хорошими маркерами костяка структуры. Красные смещения ближайших галактик и скоплений исследовались в северном полушарии небосвода.

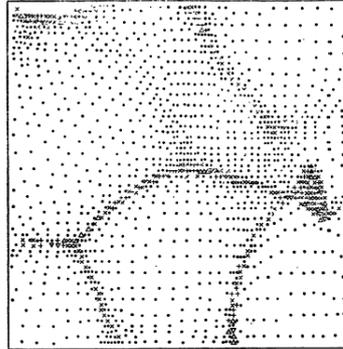


Рисунок 1.

Распределение частиц при моделировании согласно модели блинов Зельдовича (цитируется по работе Einasto et al.(1980)).

В середине 1970-х существовало два базовых сценария формирования структуры: иерархический сценарий кластеризации Peebles & Yu(1970) и сценарий блинов Зельдовича Zel'dovich(1970). Иерархический сценарий хорошо представляет видимое 2-мерное распределение галактик (см. карты Licks). Численные эксперименты, выполненные командой Зельдовича, показали формирование высокоплотных узлов, объединенных цепочками частиц в сеть, как видно из рис. 1. Нашей задачей было выяснить, демонстрирует ли реальное распределение галактик сходство с каким-либо из этих теоретических сценариев.



Рисунок 2.

Джим Пиблз (слева), Яков Зельдович и Малкэм Логэйр (справа) на Таллиннском Симпозиуме 1977 года (архив автора).

После Встречи в Тбилиси Зельдович предложил организовать международный симпозиум, посвященный исключительно космологии. Это предложение было одобрено Международным Астрономическим Союзом (IAU),

и симпозиум “Крупномасштабная структура Вселенной” состоялся в Таллинне в сентябре 1977 года. Две фотографии участников приведены на рис. 2.

Первым докладчиком на тему о распределении галактик был Брент Тьюли (Tully & Fisher(1978)), который показал фильм о распределении галактик в Местном Суперскоплении. Этот фильм показал, что данное суперскопление состоит из некоторого числа цепочек галактик, которые ответвляются от центрального скопления данного суперскопления. В пространстве между цепочками увидеть галактики нельзя. О присутствии войдов в распределении галактик было доложено Tiftt & Gregory(1978) и Tarenghi et al.(1978) в суперскоплениях Волосы Вероники и Геркулеса соответственно.

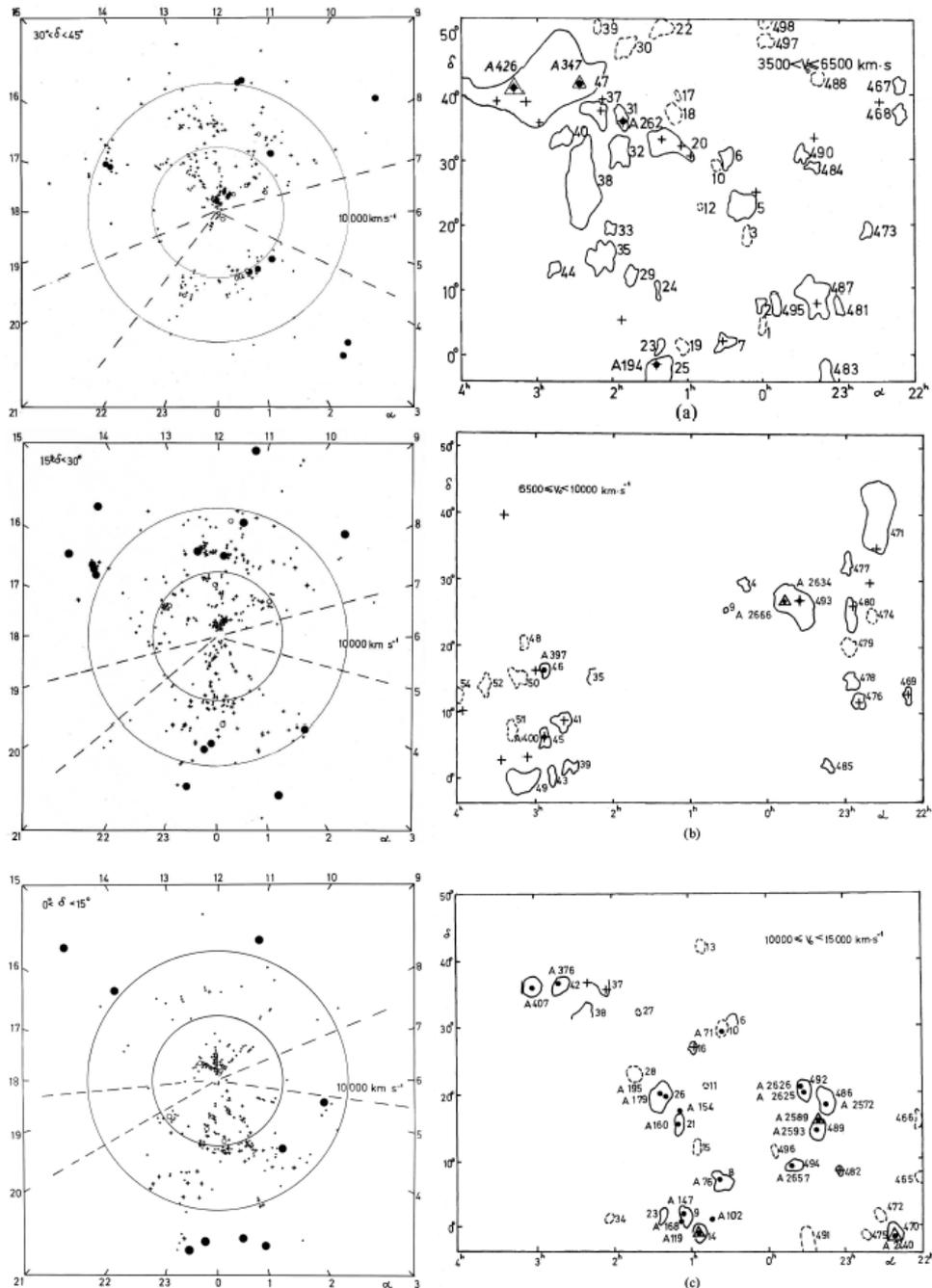


Рисунок 3. Распределение галактик и скоплений, см. текст.

В нашем выступлении мы показали клинообразные диаграммы галактик и скоплений в северном полушарии графики галактик и скопления в регионе суперскопления Персея, см. рис. 3. На этом рисунке левая половина показывает клинообразные диаграммы в трех областях (Jöeveer & Einasto(1978)). Зачерненные кружочки отвечают мощным скоплениям галактик, незачерненные кружки – группам, точки - галактикам, крестики – галактикам Маркаряна. На диаграммах справа приведены график скоплений Abell'a и контуры скоплений Цвикки в области Персея на небе на трех пространственных расстояниях (Jöeveer et al.(1977), Einasto et al.(1980)). В совокупности эти картины показывают крупномасштабное трехмерное распределение галактик и систем галактики.

Трехмерные данные показали богатство распределения галактик. Вместо случайного распределения галактик и скоплений существует сложная иерархическая сеть, получившая название “ячеистой структуры”. Наблюдаются не только нити (цепочки) галактик и скоплений, но стало ясно, что цепочки галактик образуют мосты между суперскоплениями. Существуют по большей части непрерывная сеть суперскоплений и нитей. Некоторые цепочки являются довольно мощными и состоят из скоплений и групп галактик, как главный мост суперскопления Персея – Рыбы. Галактические нити, пересекающие войды, бедны и состоят только из галактик и бедных скоплений Цвикки. Короче говоря, трехмерные данные приводят к тому, что структура Вселенной гораздо богаче, чем думали до сих пор. Теперь она получила название космической паутины.

Наша картина обладала определенным сходством с результатами моделирования, выполненного в соответствии со сценарием блинов Зельдовича. Однако был сделан вывод лишь об общем сходстве модели и данных наблюдений. Зельдович (Zeldovich(1978)) в своем выступлении подчеркнул, что необходимо провести сравнение результатов моделирования с наблюдательными данными, используя количественные методы. Таким образом мы и команда Зельдовича приступили к поиску количественных методов для изучения распределения галактик.

Наши главные результаты были опубликованы в работе Zeldovich et al.(1982). Там мы использовали корреляционную функцию, связность систем галактик, длину наибольшей системы, вычисленной для разных длин соединений, и функцию множественности системы галактик. Сравнение выполнялось для трехмерной модели блинов, иерархической модели, пуассоновской модели и данных наблюдений (ограниченного объема выборка галактик, включающая суперскопление Вирго). Эти тесты показали, что в большинстве из них модель блинов хорошо согласуется с наблюдениями. Напротив, иерархическая модель кластеризации противоречит всем тестам, см. тест множественности слева на рис. 4.

Однако некоторые различия между моделью блинов и данными наблюдений были очевидными. Наиболее важным отличием было исчезновение систем средней мощности в модели блинов, наблюдаемое для реальных галактических выборок, как видно из теста множественности. Как мы вскоре поняли, причиной этого было допущение, что темная материя состоит из нейтрино.

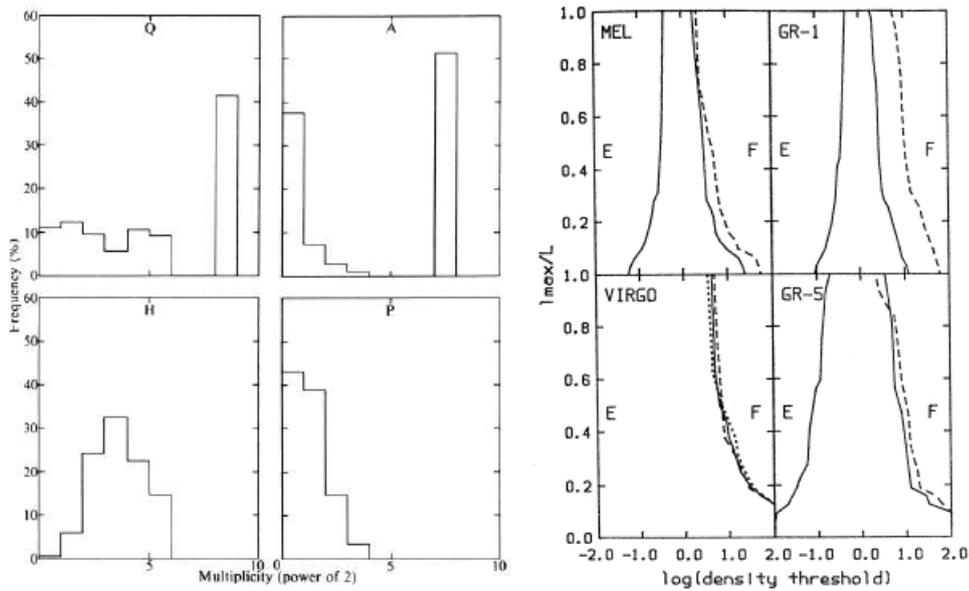


Рисунок 4.

Слева: распределение галактик согласно множественности систем. Множественность выражена через степень числа 2. Выборки обозначены: О – наблюдаемая, А – адиабатическая модель блинов, Н – иерархическая модель кластеризации, Р – пуассоновская модель (Zeldovich et al.(1982)).

Справа: длина наибольшей системы (в единицах размера объема выборки) в зависимости от пороговой плотности (в единицах средней плотности выборки). Е – для регионов с малой плотностью (пустых), F – для регионов с высокой плотностью (заполненных). MEL показывает моделирование Melot (модель CDM), GR-1 и GR-5 – моделирование Gramann (модель LCDM) при расширении с фактором 1 и 5.2 (современная эпоха). VIRGO – наблюдаемая выборка в окрестности суперскопления Вирго. В моделях сплошными линиями указаны непересекающиеся выборки со всеми включенными “частицами”, пунктирные линии показывают пересекающиеся образцы, где “частицы” в регионах с низкой плотностью были удалены (Einasto et al.(1986)). Отметим сходство распределений между пересекающейся LCDM-моделью в современную эпоху GR-5 и наблюдениями.

4. Астрофизика частиц

В начале 1980-х был выполнен важный наблюдательный и теоретический анализ, который подкрепил необходимость изменения парадигмы. Для понимания природы темной материи ключевое значение приобрели исследование флуктуаций температуры реликтового излучения (СМВ). Из теоретического анализа было очевидно, что температура СМВ не может быть постоянной, ожидавшиеся флуктуации температуры составляли $\delta T/T \approx 10^{-3}$ (в предположении барионной природы горячей плазмы перед рекомбинацией). Флуктуации исследовались с помощью лучших доступных радиотелескопов, но ничего не было обнаружено, а верхний предел оценки был гораздо ниже ожидавшейся амплитуды.

Наиболее важным теоретическим достижением была разработка инфляционной модели ранней Вселенной в работах Starobinsky(1980), Starobinsky(1982), Guth(1981) и Linde(1982). Модель инфляции

основывалась на разнообразном наблюдательном и теоретическом материале. Одним из главных выводов модели стало предсказание, что полная плотность материи/энергии во Вселенной должна быть в точности равна критической космологической плотности: $\Omega_{tot} = 1$.

Наблюдаемая плотность барионной материи во Вселенной равна примерно $\Omega_b = 0.05$, что подкреплено анализом первичного нуклеосинтеза (уже упоминавшаяся работа [Materne & Tammann\(1976\)](#) при обсуждении дискуссии о темной материи в Тбилиси в 1975 году). Таким образом, единственная возможность объяснить низкий уровень температурных флуктуаций СМВ и выводы из теории инфляции состояла в допущении небарионного характера темной материи. Небарионная материя очень слабо взаимодействует с излучением, так что флуктуации плотности небарионной материи могли начать усиливаться уже во время горячей фазы эволюции Вселенной.

Эти проблемы обсуждались в апреле 1981 года на конференции в Талинне, где присутствовали как астрономы, так и специалисты по физике частиц. Конференция на подобную же тему состоялась в сентябре – октябре в Ватикане. На обеих конференциях приводились аргументы в пользу небарионной природы темной материи. Так возникла новая область исследований – астрофизика частиц.

Первым естественным кандидатом на роль темной материи были нейтрино, единственные известные небарионные частицы. Однако вскоре выявились проблемы с нейтрино в качестве кандидата на роль темной материи, это обсуждалось, в том числе, в работе [Zeldovich et al.\(1982\)](#). Таким образом, астрономы и физики начали думать, что бы могло бы явиться альтернативой. Главным аргументом против нейтрино была их высокая скорость, близкая к скорости света, которая позволила бы сформировать только очень массивные и большие по размерам сверхскопления и системы. Чтобы обеспечить формирование меньших систем, частицы темной материи должны иметь более высокую массу и меньшую скорость. Иначе говоря, анализировались различные возможные гипотетические частицы, которые допускали бы формирование систем меньшей массы. Такие частицы получили общепринятое название “Холодная Темная Материя (Cold Dark Matter)”, в противоположность “Горячей Темной Материи” на базе нейтрино.

В 1983 [Adrian Melott](#) выполнил моделирование задачи N тел со спектральной плотностью возмущений, которая соответствовала сценариям как с горячей, так и с холодной темной материей. Он посетил Москву и Таллинн, чтобы осудить свои результаты и сравнить модели с наблюдениями. Этот анализ был проделан совместно с московской и таллиннской командами и был опубликован в работе [Melott et al.\(1983\)](#). Здесь мы применили те же тесты, которые были использованы в работе [Zeldovich et al.\(1982\)](#). Наши результаты показали, что CDM-модель находится в блестящем соответствии со всеми количественными тестами. Статья заканчивается выводом, что формирование структуры начинается с потока частиц, образующих нитеобразную паутину, как в модели блинов Зельдовича, но в ходе последующей эволюции системы растут как в сценарии с иерархической кластеризации Пиблза.

Преимущества CDM-модели детально обсуждались в работе [Blumenthal et al.\(1984\)](#). Теперь, в конце концов, наличие темной материи было принято ведущими теоретиками. Весьма детальные серии моделирования задачи N тел, основанного на CDM модели и идее замкнутой Вселенной с критической плотностью, были выполнены “бандой четырех” ([Efstathiou et al.\(1985\)](#), [White et al.\(1987\)](#)).

В 1980-х внимание нашей космологической команды в Тарту было посвящено количественному изучению структуры космической паутины, используя различные тесты. При этих исследованиях мы использовали CDM-моделирование Melott'a для сравнения наблюдений с моделями формирования структуры. Но нам потребовалось выполнить собственное моделирование, чтобы полностью контролировать модель. Enn Saar предложил развить модель с космологическим Λ -членом. В этой модели плотность материи была принята равной $\Omega_m = 0.2$, как мы установили из наблюдений (Einasto et al.(1974)). Остальная плотность материи/энергии заключена в Λ -члене, $\Omega_\Lambda = 1 - \Omega_m = 0.8$. Моделирование выполнил наш аспирант Mirt Gramann.

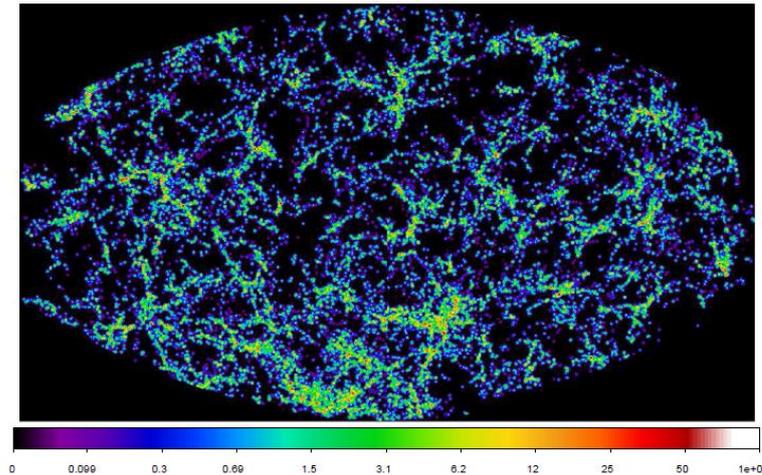


Рисунок 5. Поле плотности светимости обзора SDSS в сферической оболочке толщины $10h^{-1}$ Мpc на расстоянии $240h^{-1}$ Мpc. Шкала плотности – логарифмическая, в единицах средней плотности светимости для всего Слоановского Обзора. Мощный комплекс в нижней области изображения является частью Великой Слоановской Стены; он состоит из трех очень мощных сверхскоплений (Suhhonenko et al.(2011)).

Наша LCDM модель была использована для исследований различных свойств космической паутины. Первое исследование было посвящено топологии космической паутины (Einasto et al.(1986)). Это исследование показывает, что LCDM-модель аппроксимирует наблюдательные данные даже лучше, чем стандартная CDM-модель с критической плотностью. Необходимость использовать LCDM-модель обсуждалась в деталях в работе Efstathiou et al.(1990).

Уже в нашем первом исследовании космической паутины, выполненном Jöeveer et al.(1977), у нас возник вопрос: образуют ли галактики слои (sheets) между нитями, как предполагается в сценарии блинов, или эти последние формируются только в сверхплотных областях, когда нити в слоях пересекаются, и узлы при пересечении нитей. Тот же вопрос был задан в работе Zeldovich et al.(1982) и изучался на основе наблюдательных данных в работе Einasto et al.(1980). Предварительный ответ был таков – не существует слоев галактик, которые изолируют соседние регионы с низкой плотностью между сверхскоплениями.

Более подробное исследование Einasto et al.(1986) показало, что топология паутины зависит от порогового уровня плотности для разделения регионов с высокой и низкой плотностью при моделировании. При очень низкой

пороговой плотности слои частиц изолируют войды между мощными регионами. Однако в регионах с низкой плотностью не существует условий для образования галактик. Плотность сжимающегося газа должна превосходить порог примерно в 1.6 от средней плотности для того, чтобы за время Хаббла иметь возможность сжаться, как показано [Press & Schechter\(1974\)](#). Если мы исключаем частицы из регионов с низкой плотностью (перекрестное образование галактик), то войды (регионы с низкой плотностью) образуют один большой связанный регион, как в действительности, так и при моделировании – отсутствуют слои, изолирующие войды, см. правую панель рис. 4. Длина наибольшей системы во всех выборках зависит от порога. Сходные результаты получены в [Gott et al.\(1986\)](#).

Недавний анализ плотности поля светимости показывает мощность космической паутины с богатыми и бедными суперскоплениями, нитями галактик и войдами, см. рис. 5.

Важный аспект структуры космической паутины – это ее фрактальный характер, как предложено в работах [Mandelbrot\(1982\)](#), [Mandelbrot\(1986\)](#). Во время визита в NORDITA с Enn Saar мы исследовали фрактальные свойства паутины в сотрудничестве с Bernard Jones и Vincent Martinez. Наши результаты показали, что и наблюдательные, и модельные выборки демонстрируют мультифрактальные свойства ([Jones et al.\(1988\)](#)).

Одной из трудностей исходного сценария блинов была форма объектов, образованных во время сжатия. Предполагалось, что образующиеся системы являются плоскими блиноподобными объектами, тогда как доминирующими свойствами паутины является ее нитеобразность ([Jöeveer & Einasto\(1978\)](#), [Einasto et al.\(1980\)](#)). Эта трудность была объяснена в работе [Bond et al.\(1996\)](#), где было показано, что приливные силы в большинстве случаев приводят именно к одномерным структурам, т.е. к нитеобразной форме.

5. Заключение

Вклад команды Зельдовича в современную космологию впечатляет. Зельдович очень активно сотрудничал с другими группами, включая нашу космологическую команду из Тарту. Благодаря тесному сотрудничеству между нашими командами мы совместно добились успеха в получении интересных результатов относительно природы темной материи и структуры космической паутины, а также связи между этими двумя феноменами.

Что более всего впечатлило меня в новой космологической парадигме, так это ее красота – Вселенная оказывается гораздо богаче по своим свойствам, чем думали ранее. Наличие темной материи показывает, что Природа и Вселенная богаче: вдобавок к известным формам материи она содержит новую популяцию, которая даже сегодня не детектируется физиками. Структура Вселенной также богаче в том отношении, что вместо случайного фона поля галактик мы видим теперь Космическую Паутину со всеми ее мелкими и крупными деталями.

Я благодарю всех моих сотрудников в Тарту и Москве за исключительно плодотворные годы исследований свойств Вселенной.

Настоящее исследование было поддержано [ETAG](#), проект [IUT26-2](#), а также грантом [European Structural Funds](#) на [Centre of Excellence “Dark Matter in \(Astro\)particle Physics and Cosmology” TK120](#).

Ссылки

- Abell, G. O. 1958, *ApJS*, 3, 211
- Abell, G. O., Corwin, Jr., H. G., & Olowin, R. P. 1989, *ApJS*, 70, 1
- Blumenthal, G. R., Faber, S. M., Primack, J. R., & Rees, M. J. 1984, *Nature*, 311, 517
- Bond, J. R., Kofman, L., & Pogosyan, D. 1996, *Nature*, 380, 603
- de Vaucouleurs, G. 1978, *ApJ*, 224, 710
- Doroshkevich, A. G., Joeveer, M., & Einasto, J. 1975, *AZh*, 52, 1113
- Efstathiou, G., Davis, M., White, S. D. M., & Frenk, C. S. 1985, *ApJS*, 57, 241
- Efstathiou, G., Sutherland, W. J., & Maddox, S. J. 1990, *Nature*, 348, 705
- Einasto, J. 1965, *Trudy Astrophys. Inst. Alma-Ata*, 5, 87 (*Tartu Astr. Obs. Teated*, 17)
- Einasto, J. 1974, in *Stars and the Milky Way System*, ed. L. N. Mavridis, 291
- Einasto, J., Gramann, M., Einasto, M., et al. 1986, *Tartu Astr. Obs. Preprint*, 3
- Einasto, J., Jõeveer, M., & Saar, E. 1980, *MNRAS*, 193, 353
- Einasto, J., Kaasik, A., & Saar, E. 1974, *Nature*, 250, 309
- Forman, W., Kellogg, E., Gursky, H., Tananbaum, H., & Giacconi, R. 1972, *ApJ*, 178, 309
- Friedmann, A. 1922, *Zeitschrift fur Physik*, 10, 377
- Gott, III, J. R., Dickinson, M., & Melott, A. L. 1986, *ApJ*, 306, 341
- Guth, A. H. 1981, *Physics Letters D*, 23, 347
- Hubble, E. 1929, *Proceedings of the National Academy of Science*, 15, 168
- Hubble, E. P. 1925, *ApJ*, 62, 409
- Jõeveer, M. & Einasto, J. 1978, in *IAU Symposium, Vol. 79, Large Scale Structures in the Universe*, ed. M. S. Longair & J. Einasto, 241–250
- Jõeveer, M., Einasto, J., & Tago, E. 1977, *Tartu Astr. Obs. Preprint*, 3
- Jones, B. J. T., Martinez, V. J., Saar, E., & Einasto, J. 1988, *ApJL*, 332, L1
- Kuzmin, G. 1952, *Tartu Astr. Obs. Publ.*, 32, 211
- Kuzmin, G. 1956, *AZh*, 33, 27
- Linde, A. D. 1982, *Physics Letters B*, 108, 389
- Mandelbrot, B. B. 1982, *The Fractal Geometry of Nature*, ed. Mandelbrot, B. B.
- Mandelbrot, B. B. 1986, *Physics Today*, 39, 11
- Materne, J. & Tammann, G. A. 1976, in *Stars and Galaxies from Observational Points of View*, ed. E. K. Kharadze, 455–462
- Melott, A. L., Einasto, J., Saar, E., et al. 1983, *Physical Review Letters*, 51, 935
- Oort, J. H. 1940, *ApJ*, 91, 273
- Öpik, E. 1922, *ApJ*, 55, 406
- Ostriker, J. P., Peebles, P. J. E., & Yahil, A. 1974, *ApJL*, 193, L1
- Peebles, P. J. E. 1971, *Physical cosmology* (Princeton Series in Physics, Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1971)
- Peebles, P. J. E. & Yu, J. T. 1970, *ApJ*, 162, 815
- Penzias, A. A. & Wilson, R. W. 1965, *ApJ*, 142, 419
- Press, W. H. & Schechter, P. 1974, *ApJ*, 187, 425
- Press, W. H. & Schechter, P. 1974, *ApJ*, 187, 425
- Roberts, M. S. 1966, *ApJ*, 144, 639
- Rubin, V. C. & Ford, W. K. J. 1970, *ApJ*, 159, 379
- Sandage, A. & Tammann, G. A. 1975, *ApJ*, 196, 313
- Shane, C. & Wirtanen, C. 1967, *Publ. Lick Obs.*, 22
- Soneira, R. M. & Peebles, P. J. E. 1978, *AJ*, 83, 845
- Starobinsky, A. A. 1980, *Physics Letters B*, 91, 99
- Starobinsky, A. A. 1982, *Physics Letters B*, 117, 175
- Suhhonenko, I., Einasto, J., Liivamägi, L. J., et al. 2011, *A&A*, 531, A149

- Sunyaev, R. A. & Zeldovich, Y. B. 1969, *Nature*, 223, 721
- Tarengi, M., Tift, W. G., Chincarini, G., Rood, H. J., & Thompson, L. A. 1978, in *IAU Symposium, Vol. 79, Large Scale Structures in the Universe*, ed. M. S. Longair & J. Einasto, 263
- Tift, W. G. & Gregory, S. A. 1978, in *IAU Symposium, Vol. 79, Large Scale Structures in the Universe*, ed. M. S. Longair & J. Einasto, 267
- Tinsley, B. M. 1968, *ApJ*, 151, 547
- Tully, R. B. & Fisher, J. R. 1978, in *IAU Symposium, Vol. 79, Large Scale Structures in the Universe*, ed. M. S. Longair & J. Einasto, 214
- van den Bergh, S. 1972, *A&A*, 20, 469
- White, S. D. M., Frenk, C. S., Davis, M., & Efstathiou, G. 1987, *ApJ*, 313, 505
- Zeldovich, Y. B. 1970, *A&A*, 5, 84
- Zeldovich, Y. B. 1978, in *IAU Symposium, Vol. 79, Large Scale Structures in the Universe*, ed. M. S. Longair & J. Einasto, 409–420
- Zeldovich, Y. B., Einasto, J., & Shandarin, S. F. 1982, *Nature*, 300, 407
- Zwicky, F. 1933, *Helvetica Physica Acta*, 6, 110
- Zwicky, F., Herzog, E., & Wild, P. 1968, *Catalogue of galaxies and of clusters of galaxies* (Pasadena: California Institute of Technology (CIT), 1961-1968)