

## Введение.

Материалы данных лекций представляют собой введение в последовательное описание космологических моделей и сравнения их с наблюдательными данными по крупномасштабному распределению вещества во Вселенной. Эти лекции рассчитаны на студентов старших курсов и аспирантов, начинающих заниматься темой "Крупномасштабная структура Вселенной". Материалы лекций основаны на классических работах по космологии, на которые в каждой теме даны ссылки для более глубокого изучения и дальнейшей работы по тематике. Цель лекций - описать связь параметров теоретических моделей с наблюдаемыми характеристиками распределения внегалактических объектов, которые исследуются многими астрономическими методами, в том числе и методами радиоастрономии.

Наблюдения с хорошей точностью свидетельствуют о том, что Вселенная однородна в больших масштабах, в малых же масштабах наблюдается развитая структура. Однородность Вселенной в больших масштабах предсказывается и объясняется в инфляционных моделях ранней Вселенной (Линде, 1980). На масштабах менее  $300h^{-1}\text{Мпк}$  однородность нарушается из-за гравитационной неустойчивости и наблюдается развитая структура: скопления галактик, группы галактик, галактики, звезды, планеты.

Объяснение возникновения и развития наблюдаемой крупномасштабной структуры Вселенной (КМС) – пространственного распределения галактик, их групп и скоплений – является одной из наиболее важных задач современной космологии. На настоящий момент полагается, что эти объекты были образованы посредством роста малых первичных неоднородностей плотности, задаваемых случайным гауссовым полем флуктуаций метрики. Механизм их генерации – параметрическое усиление квантовых флуктуаций в ходе инфляционной стадии расширения Вселенной (Лукаш, 1980) – хорошо изучен, но конкретный вид спектра космологических возмущений в реальной Вселенной известен с меньшей определенностью. Классическая теория гравитационной неустойчивости, описывающая дальнейшую эволюцию возмущений во Вселенной, была сформулирована Лифшицем (1946) для случая идеальной жидкости. В дальнейшем она была развита для многокомпонентной Вселенной (Лукаш, 1980) и для бесстолкновительных сред (Захаров, 1979).

С одной стороны, согласно инфляционным теориям, а также результатам современных наблюдений, полная плотность энергии во Вселенной должна быть равна критической  $\Omega_{tot} = 1$ , что соответствует плоской геометрии<sup>1</sup>. С другой стороны, существует несколько физических указаний на то, что во Вселенной, наряду с обычной барионной материей, присутствует скрытая небарионная материя, проявляющая себя гравитационным взаимодействием, а также ненулевая энергия вакуума - космологическая постоянная, проявляющая себя в эволюции крупномасштабной структуры и других популяций далеких астрофизических объектов (квazarов и сверхновых).

Наиболее важными указаниями на существование скрытой массы во Вселенной являются наблюдения динамических особенностей гало массивных галактик – зависимость масса-светимость, а также объяснение наблюдаемой кривой вращения галактик. Вклад барионов в общую плотность составляет величину порядка  $\Omega_b = 0.019/h^2$ , где  $h$  – безразмерная хаббловская постоянная в единицах ( $100^{-1-1}$ ).

---

<sup>1</sup>Плоскими называются модели, в которых полная плотность Вселенной  $\Omega_{tot} = \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$ , где  $\Omega_m$  - сумма масс всех компонент материи,  $\Omega_\Lambda$  - масса космологической постоянной выраженная в критической.

При фиксированном возрасте Вселенной модели с отличной от нуля космологической постоянной позволяют использовать значения постоянной Хаббла большие, чем в моделях с полной плотностью материи  $\Omega_m = 1$ . Другим сильным аргументом в пользу рассмотрения космологических плоских моделей с ненулевой космологической постоянной является интерпретация хаббловской диаграммы, построенной по наблюдениям вспышек сверхновых Type Ia в проекте Supernova Cosmology Project (Perlmutter et al., 1999) <sup>2</sup>. Современные наблюдательные данные говорят о том, что величина  $\Omega_\Lambda$  сопоставима с величиной  $\Omega_m$ .

Таким образом, динамика возмущений сегодня определяется в основном небарионной скрытой массой и космологической постоянной. Существует несколько кандидатов на вещество скрытой массы – массивные бесстолкновительные частицы, первичные черные дыры, космологические струны, монополи и др.. Вопрос о космологической скрытой массе частично связан с физикой фундаментальных взаимодействий, предсказывающей существование целого ряда слабо взаимодействующих частиц, которые либо отсоединились от первичной космологической плазмы на ранних стадиях расширения, либо никогда не находились в термодинамическом равновесии с другими частицами. Каждому типу составляющей скрытой массы соответствует определенная модель образования крупномасштабной структуры Вселенной.

Сравнение теоретических предсказаний момента образования и характеристик крупномасштабной структуры с наблюдательными данными является одним из основных тестов адекватности космологических моделей и методом определения ее параметров (космологической постоянной, постоянной Хаббла, характеристиками скрытой материи, наклоном и амплитудой спектра первичных возмущений, и др.).

Любая космологическая модель, претендующая на объяснение образования структуры Вселенной, должна быть согласуемой с набором наблюдательных данных на нескольких порядках масштабов - от масштабов скоплений галактик ( $8h^{-1}$  мпк) и до масштабов квадрупольной анизотропии температурных флуктуаций реликтового фона, обнаруженного космическим экспериментом COsmic Background Explorer (COBE) <sup>3</sup>, в миллиметровом диапазоне ( $3000h^{-1}$  Мpc) и исследованиях, проводимых на многих масштабах экспериментом Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) <sup>4</sup>.

Имеется несколько экспериментов, которые могли бы стать критическими наблюдательными тестами для проверки теорий образования видимой структуры Вселенной. В первую очередь, это обнаружение анизотропии температурных флуктуаций реликтового излучения (РИ) на малых и больших угловых масштабах (в том числе и радиодиапазоне, например, проект "Геном Вселенной" CAO <sup>5</sup>). Другим важным тестом является анализ скучивания внегалактических объектов, который был улучшен в последние годы наблюдениями пространственного распределения галактик и скоплений галактик в рентгеновском, оптическом и радиодиапазонах – составление каталогов по наблюдениям в радиодиапазоне, например в лаборатории внегалактической радиоастрономии АКЦ ФИАН <sup>6</sup> и лаборатории внегалактической астрофизики и космологии CAO <sup>7</sup>).

---

<sup>2</sup><http://www-supernova.lbl.gov>

<sup>3</sup><http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe>

<sup>4</sup><http://map.gsfc.nasa.gov/index.html>

<sup>5</sup><http://brown.nord.nw.ru/CG/CG.htm>

<sup>6</sup><http://www.asc.rssi.ru/mosdeparts/SpaceRA/ExtragalRA/EgraLab.htm>

<sup>7</sup><http://luna.sao.ru/>