

«ГАИШ МГУ»

КОСМОЛОГИЯ

Наталья Архипова
АКЦ ФИАН

Лекция 1: Космологические модели

1. Радиоастрономия и космология
2. Космология с радиогалактиками
3. Реликтовое излучение

Радиоастрономический вклад в космологию

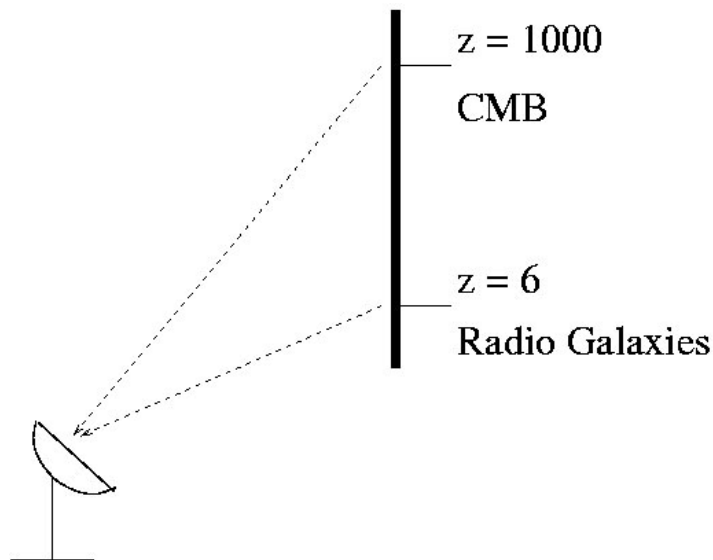
Радиоастрономия
и космология

Радиоастрономия
и космология

Реликтовое
излучение

- ▶ Отождествление радиогалактик (1947-1951)
- ▶ Отождествление квазаров (1961)
- ▶ Подсчеты радиоисточников $\log N - \log S$ (1964-1997)
- ▶ Открытие реликтового излучения (1965, 1978)
- ▶ Коррекция теории образования LSS
- ▶ Апертурный синтез (1967-1974)
- ▶ Открытие пульсаров (1967-1974)
- ▶ Исследование двойного пульсара (1974, 1993)
- ▶ Открытие флуктуаций CMB (1992, 2006)
- ▶ Определение космологических параметров (2003)

Космологический диапазон радиоастрономии



Тесты радиокосмологии

- ▶ Реликтовое излучение
 - 1) Спектр мощности
 - 2) Статистические свойства сигнала (гауссовость)
- ▶ Радиогалактики
 - 1) Зависимость $\text{Log } N - \text{Log } S$ ("число источников – плотность потока")
 - 2) Зависимость "размер - красное смещение"
 - 3) Зависимость "плотность потока - красное смещение"
 - 4) Гравитационное линзирование
 - 5) Формирование крупномасштабной структуры
 - 6) Возраст звездных систем
 - 7) Формирования сверхмассивных ЧД на больших zПоиск темной материи в гало
- ▶ Пульсары
 - 1) Двойные пульсары - излучение грав. волн
 - 2) Пульсарная сетка - регистрация грав. волн

Радиогалактики

Радиоастрономия
и космология

Радиоастрономия
и космология

Реликтовое
излучение

Радиогалактики – реперы Вселенной

Самая далекая радиогалактика: $z=5.19$ (van Breugel et al., 1999)

Jim Condon: Все далекие радиогалактики есть в обзоре GB6 (6 см, 18 мЯн) (Gregory & Condon, 1991)

Самая далекая известная галактика $z=8.55$! Твселенной=600 млн.лет!

К настоящему времени составлены обширные каталоги радиоисточников, полные до величин потока в единицы миллианских.

Зависимость $\log N - \log S$

Подсчёты числа N радиоисточников, имеющих плотность потока S на заданной частоте, попадающую в заданный интервал значений. Интегральная функция распределения $N(S)$: N - число источников, имеющих плотность потока больше S . Можно показать, что в евклидовой модели Вселенной $\log N = -1.5 \log S$:

Пусть имеется популяция равномерно распределённых в пространстве радиоисточников с одинаковыми светимостями L , а R - расстояние, на котором источник с заданной светимостью L даёт плотность потока S : Тогда все источники, попадающие в сферу радиусом R , будут иметь плотность потока больше S . Число этих источников пропорционально объёму сферы: $N \sim V \sim R^3$. С другой стороны, $S \sim R^{-2}$. Следовательно, $N \sim S^{-3/2}$. То же соотношение оказывается справедливым, если источники имеют различные L , образующие некоторую функцию светимости (при определённых ограничениях на её свойства).

Зависимость Log N - Log S

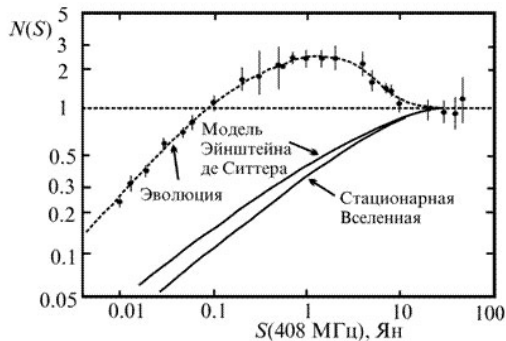


Рис. 2.2 Интегральные подкритерии $N(S)$, нормированные на статистическую ожидаемую модель $N \propto S^{-3/2}$.

Зависимость $\text{Log } N - \text{Log } S$

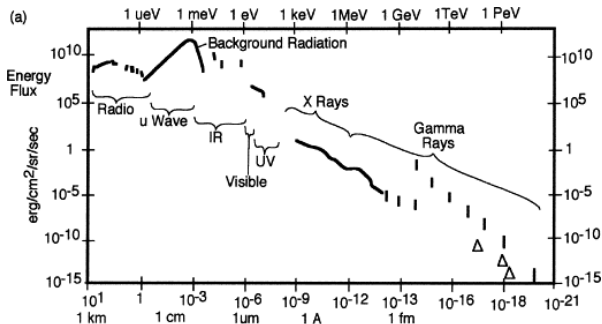
Реально получаемые подсчёты радиоисточников дают более крутой наклон зависимости $\log N - \log S$, от -1.85 до -2 (в зависимости от длины волны и от типов источников, включаемых в рассмотрение).

Влияние различных эффектов на зависимость $\text{Log } N - \text{Log } S$:

1. Эволюция источников в прошедшие эпохи
2. Эффективное значение светимости зависит от z источника: излучение принято в одной полосе частот $\Delta\nu$, а было испущено в другой $\Delta\nu/(1+z)$.
3. Красное смещение z приводит к уменьшению радиуса сферы, соответствующей данной величине S ; следовательно, и N уменьшается.
4. В расширяющейся Вселенной источники в прошлом должны были располагаться теснее; поэтому, глядя в прошлое, мы так их и должны видеть, т.е. при малых S число N возрастает.

Реликтовое излучение - фоновое излучение с планковским спектром с температурой в несколько градусов было предсказано Г.А. Гамовым в 1946 г. в предложенной им модели горячей Вселенной. Термин "реликтовое" был предложен И.С. Шкловским, т.к. это излучение представляет собой реликт, остаток от ранней стадии эволюции Вселенной. В 1964 г. А.Г. Дорошкевич и И.Д. Новиков исследовали возможности наблюдательного обнаружения РИ и показали что при возможной температуре 1-5К РИ может быть уверенно обнаружено на длинах волн $\lambda = 0.1 - 100\text{см}$. И рекомендовали рупорный радиотелескоп лаборатории "Белл". Излучение было открыто в 1965 г. Пензиасом и Вилсоном на волне 7.5 см [Penzias A.A., Wilson R.W., ApJ, 1965, 142, 419] при наладке именно радиоантенны "Белл".

Спектр излучения РИ

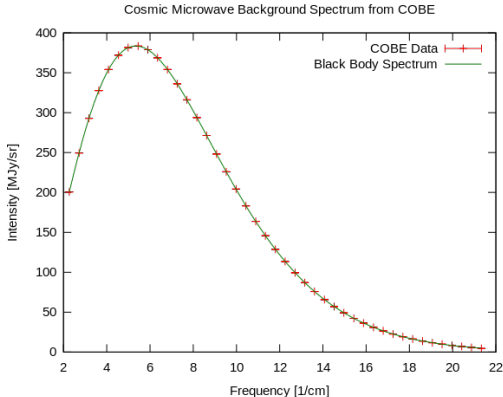


Реликтовое излучение – фоновое излучение с планковским спектром, соответствующим температуре $T_b = 2.7\text{K}$ (максимум в спектре на $\sim 1.5\text{мм}$). В области спектра $\lambda = 0.1 - 100\text{ см}$ ожидаемый фон РИ значительно превышает суммарный фон от радиогалактик, преобладающий в области более длинных волн, а также суммарный фон от инфракрасных звезд, который преобладает при $\lambda < 0.1\text{см}$.

Радиоастрономия
и космологияРадиоастрономия
и космологияРеликтовое
излучение

Свойства РИ

Наиболее точные измерения спектра РИ в области мм длин волн, вблизи максимума спектра, были сделаны на спектрометре в дальней ИК области, установленном на спутнике COBE.



Реликтовое излучение: $T_{h\nu} = \frac{2.73}{a} K \nu_{max} \sim 300$. Отклонение от планковского спектра по интенсивности не более $5 * 10^{-5}$.

Рекомбинация водорода

При $a \leq 10^{-3}$ фотоны ионизуют вещество - тепловое равновесие: $T_{\text{matter}} = T_{h\nu} = T$. Наблюдаемый микроволновый фон возник в эпоху рекомбинации, когда излучение отделилось от вещества и среда стала прозрачной. При этом планковский спектр фонового излучения сохраняет свою форму, но яркостная температура уменьшается обратно пропорционально масштабному фактору $a(t)$:

$$T_0 = T_e \frac{a(t_e)}{a(t_0)}$$

где T_e - температура излучения в момент времени t_e , а T_0 - температура излучения в современную эпоху t_0 . При этом

$$T_0 = \frac{T_e}{1 + z_e}$$

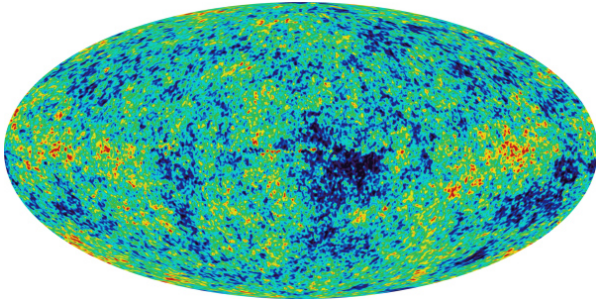
Учитывая, что рекомбинация водорода (в равновесных условиях, согласно уравнению Саха) происходит при T_e 3000 К, для эпохи рекомбинации получим

$$z_e \approx \frac{T_e}{T_0} \approx \frac{3000}{2.7} \approx 1100$$

Основная часть наблюдаемого фона поступает именно с этого красного смещения. Возраст 300000 лет. Вселенная становится прозрачной.

Наблюдаемая карта анизотропии РИ

До начала рекомбинации вещество и излучение находились в термодинамическом равновесии между собой, а затем излучение отделилось от вещества, и уровень флуктуаций РИ в настоящее время почти такой же как в эпоху рекомбинации. Поэтому флуктуации РИ в настоящее время отражают уровень флуктуаций в барионном веществе на эпоху рекомбинации $\frac{\delta T}{T} \sim \frac{\delta \rho}{\rho} \sim 10^{-6}$



Восстановленная карта анизотропии РИ (WMAP) с исключённым изображением Галактики, изображением радиоисточников и изображением дипольной анизотропии. Красные цвета означают более горячие области, а синие цвета — более холодные области.

Экспериментов по РИ больше 60!

Самые известные из них:

- ▶ РЕЛИКТ-1 СССР, 1983—1984, открытие анизотропии реликтового излучения!
- ▶ COBE 1989-1993, Надежное обнаружение анизотропии РИ
- ▶ WMAP (2001-2011) лучшее определение космологических параметров к 2011г.
- ▶ PLANCK (2009-н.в.) Planck Legacy Archive (PLA)

- ▶ Регистрация: time ordered data: $T(t)=T(l,b)$
- ▶ Пикселизация: map-making и осреднение данных в пикселях
- ▶ Разделение компонент
- ▶ Анализ статистики сигнала
- ▶ Анализ спектра мощности

Спектр СМВА

Анализ карт распределения T_b реликтового фона основан на построении углового спектра неоднородностей. Распределение относительных флуктуаций яркостной температуры T/T_0 рассматривается как случайное поле, заданное на поверхности сферы. Для этого поля можно выполнить разложение по сферическим гармоникам Y_{lm} :

$$\frac{\Delta T}{T_0}(\theta, \varphi) = \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_l^m Y_l^m(\theta, \varphi),$$

Составляющие углового спектра C_l - компоненты разложения двухточечной корреляционной функции флуктуаций $\Delta T/T_0$, взятых в точках m и n , по полиномам Лежандра $P_l(\cos)$:

$$C(\theta) = \left\langle \frac{\Delta T(m)}{T_0} \cdot \frac{\Delta T(n)}{T_0} \right\rangle = \frac{1}{4\pi} \sum_{l=1}^{\infty} C_l P_l(\cos \theta).$$

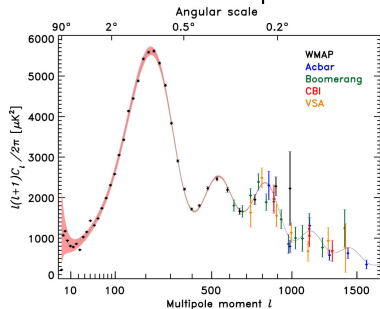
Угловые скобки здесь означают усреднение по всевозможным направлениям m , n .

Таким образом, величины C_l представляют собой мощность мультиполя порядка l в разложении функции $\Delta T/T_0(\theta, \phi)$ по сферическим гармоникам.

Спектр мощности реликтового излучения (распределение энергии по угловым масштабам, то есть по мультиполям).

Спектр получен по данным наблюдений: WMAP (2006), Acbar (2004) Boomerang (2005), CBI (2004) и VSA (2004).

The Code for Anisotropies in the Microwave Background (CAMB)



$$C_l \equiv C_l(h, \Omega_b h^2, \Omega_{CDM} h^2, \Omega_\Lambda, \Omega_\nu, n, \dots)$$

Параметры по СМВА

WMAP Cosmological Parameters			
Model: lcdm+sz+lens			
Data: wmap7			
$10^2 \Omega_b h^2$	$2.258^{+0.057}_{-0.056}$	$1 - n_s$	0.037 ± 0.014
$1 - n_s$	$0.0079 < 1 - n_s < 0.0642$ (95% CL)	$A_{\text{BAO}}(z = 0.35)$	$0.463^{+0.021}_{-0.020}$
C_{220}	5763^{+38}_{-40}	$d_A(z_{\text{eq}})$	14281^{+158}_{-161} Мпс
$d_A(z_*)$	14116^{+160}_{-163} Мпс	$\Delta_{\mathcal{R}}^2$	$(2.43 \pm 0.11) \times 10^{-9}$
h	0.710 ± 0.025	H_0	71.0 ± 2.5 km/s/Мпс
k_{eq}	$0.00974^{+0.00041}_{-0.00040}$	ℓ_{eq}	137.5 ± 4.3
ℓ_*	302.44 ± 0.80	n_s	0.963 ± 0.014
Ω_b	0.0449 ± 0.0028	$\Omega_b h^2$	$0.02258^{+0.00057}_{-0.00056}$
Ω_c	0.222 ± 0.026	$\Omega_c h^2$	0.1109 ± 0.0056
Ω_Λ	0.734 ± 0.029	Ω_m	0.266 ± 0.029
$\Omega_m h^2$	$0.1334^{+0.0056}_{-0.0055}$	$r_{\text{hor}}(z_{\text{dec}})$	285.5 ± 3.0 Мпс
$r_s(z_d)$	153.2 ± 1.7 Мпс	$r_s(z_d)/D_V(z = 0.2)$	$0.1922^{+0.0072}_{-0.0073}$
$r_s(z_d)/D_V(z = 0.35)$	$0.1153^{+0.0038}_{-0.0039}$	$r_s(z_*)$	$146.6^{+1.5}_{-1.6}$ Мпс
R	1.719 ± 0.019	σ_8	0.801 ± 0.030
A_{SZ}	$0.97^{+0.68}_{-0.97}$	t_0	13.75 ± 0.13 Gyr
τ	0.088 ± 0.015	θ_*	0.010388 ± 0.000027
θ_*	0.5952 ± 0.0016 °	t_*	379164^{+5187}_{-5243} yr
z_{dec}	1088.2 ± 1.2	z_d	1020.3 ± 1.4
z_{eq}	3196^{+134}_{-133}	z_{reion}	10.5 ± 1.2
z_*	$1090.79^{+0.94}_{-0.92}$		