

«Проблемы современной астрофизики
и геофизики»
МФТИ

КОСМОЛОГИЯ

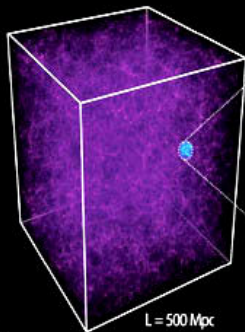
Лекция 1

Сергей Пилипенко
АКЦ ФИАН

План лекций

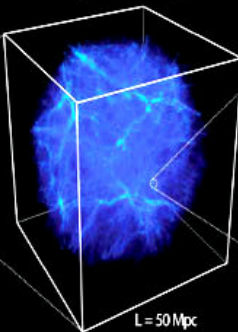
1)

Millennium volume



2)

GIMIC high-resolution region



3)

Disc galaxy

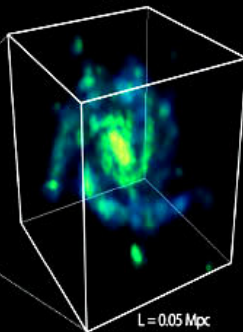


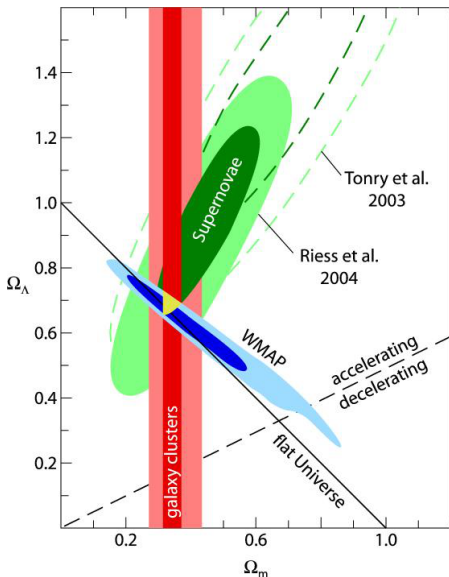
Image courtesy of Virgo Consortium.

Лекция 1: расширение Вселенной

1. Введение
2. Ньютоновские решения
3. Уравнения состояния
4. Тепловая история Вселенной
5. Способы изучения
6. Темная материя
7. Темная энергия
8. Полезные формулы

Введение

Космология



Цель –
научиться
понимать
современные
результаты и
задачи
КОСМОЛОГИИ.

Введение

Ньютоновские
решения

Уравнения
состояния

Тепловая
история
Вселенной

Способы
изучения

Темная
энергия

Темная
материя

Полезные
формулы

Введение

Космология

Введение

Ньютоновские
решения

Уравнения
состояния

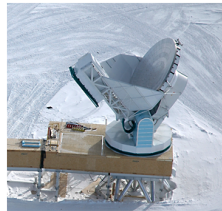
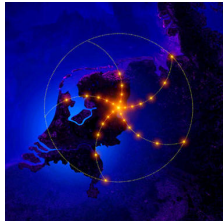
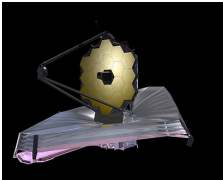
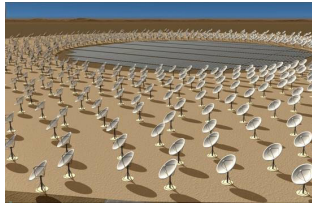
Тепловая
история
Вселенной

Способы
изучения

Темная
энергия

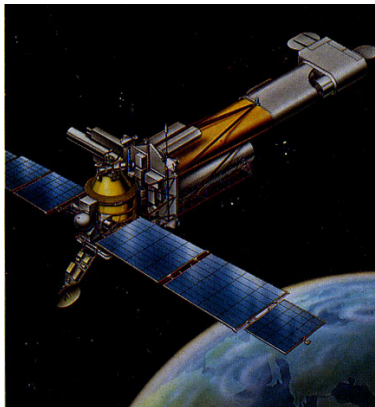
Темная
материя

Полезные
формулы

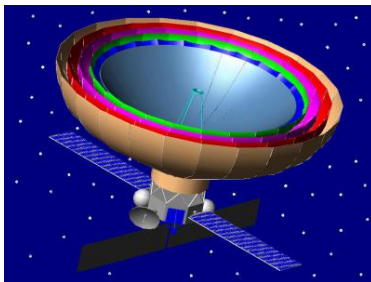


Square Kilometer Array, James Webb ST, LOFAR, South Pole Telescope

Введение



Спектр Рентген-Гамма, Спектр-М



Космология

Введение

Ньютоновские
решения

Уравнения
состояния

Тепловая
история
Вселенной

Способы
изучения

Темная
энергия

Темная
материя

Полезные
формулы

Ньютоновские решения

Расширение однородного шара:

$$\mathbf{v} = H\mathbf{r}. \quad H = H(t).$$

$$\mathbf{v}' = \mathbf{v} - \mathbf{v}_A = H\mathbf{r} - H\mathbf{r}_A = H(\mathbf{r} - \mathbf{r}_A) = H\mathbf{r}'$$

Космология

Введение

Ньютоновские
решения

Уравнения
состояния

Тепловая
история
Вселенной

Способы
изучения

Темная
энергия

Темная
материя

Полезные
формулы

Ньютоновские решения

Уравнение движения:

$$\ddot{R} = -\frac{GM}{R^2} = -\frac{4\pi G}{3}\rho R.$$

Если известно t_0 , R_0 , H_0 , ρ_0 :

$$(\dot{R})^2 = \frac{8\pi G R_0^2}{3} \left(\frac{R_0}{R} - (\rho_0 - \rho_c) \right),$$

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}, \quad \Omega = \frac{\rho}{\rho_c}$$

Введение

Ньютоновские
решения

Уравнения
состояния

Тепловая
история
Вселенной

Способы
изучения

Темная
энергия

Темная
материя

Полезные
формулы

Свойства решений

$$(\dot{R})^2 = \frac{8\pi G R_0^2}{3} \left(\frac{R_0}{R} - (\rho_0 - \rho_c) \right)$$

- ▶ $\dot{R} > 0 \quad \forall t < t_0$ если $H_0 > 0$.
- ▶ $\rho_0 > \rho_c \Rightarrow$ расширение сменится сжатием.
- ▶ $\rho_0 < \rho_c \Rightarrow R \rightarrow \infty$ при $t \rightarrow \infty$.
- ▶ $\rho_0 = \rho_c \Rightarrow R = R_0 \left(\frac{t}{t_0} \right)^{2/3}$

Введение

Ньютоновские
решенияУравнения
состоянияТепловая
история
ВселеннойСпособы
изученияТемная
энергияТемная
материяПолезные
формулы

Уравнения состояния

«Пыль»: $P = 0$, $\epsilon = \rho c^2 \propto R^{-3}$.

Фотоны, релятивистский газ: $P = \epsilon/3$.

Адиабатическое расширение:

$$d(\epsilon V) = -P dV.$$

$\epsilon \propto R^{-4} \Rightarrow$ при малых R $\epsilon_{h\nu} > \epsilon_{\text{dust}}$

Уравнения состояния

$$\ddot{R} = -\frac{4\pi G}{3} R \frac{(\epsilon + 3P)}{c^2}.$$

- Для $P = \epsilon/3$ при $\rho_0 = \rho_c$:

$$R \propto t^{1/2}$$

Космология

Введение

Ньютоновские
решения

Уравнения
состояния

Тепловая
история
Вселенной

Способы
изучения

Темная
энергия

Темная
материя

Полезные
формулы

$R \leftrightarrow a$ – масштабный фактор. k – кривизна пространства, $k = -1, 0, 1$.

Метрика:

$$ds^2 = c^2 dt^2 -$$

$$-a^2 \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right].$$

$a = 1$ в настоящий момент времени.

Введение

Ньютоновские
решения

Уравнения
состояния

Тепловая
история
Вселенной

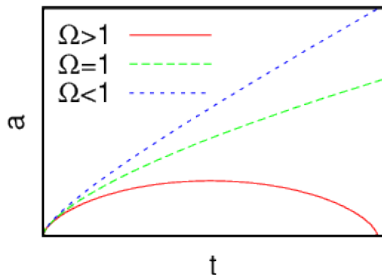
Способы
изучения

Темная
энергия

Темная
материя

Полезные
формулы

Промежуточный итог



- ▶ $\Omega = \frac{\rho_0}{\rho_c}$ определяет закон расширения.
- ▶ Уравнение состояния также влияет на него.

Тепловая история

Сейчас $H_0 \approx 73$ км/с/Мпк.

Реликтовое излучение:

$$T_{h\nu} = \frac{2.73}{a} K$$

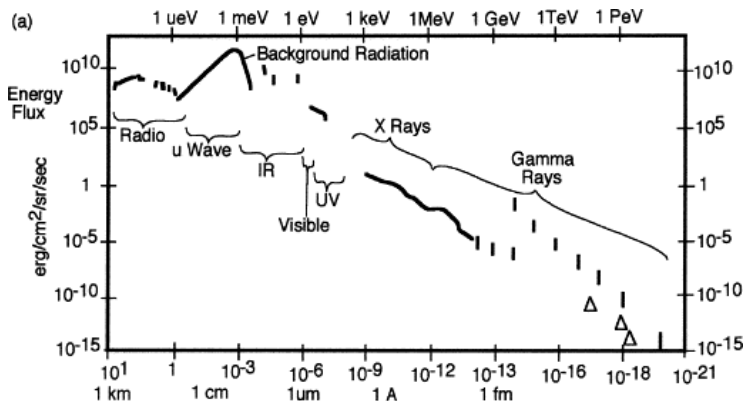
Тепловой спектр. $\nu_{max} \sim 300$ ГГц.

При $a \leq 10^{-3}$ фотоны ионизуют

вещество, наступает тепловое

равновесие: $T_{matter} = T_{h\nu} = T$.

Спектр излучения



Космология

Введение

Ньютоновские
решения

Уравнения
состояния

Тепловая
история
Вселенной

Способы
изучения

Темная
энергия

Темная
материя

Полезные
формулы

Замечания

- ▶ Если $\Omega \sim 1$ сейчас, при $a = 10^{-3}$ $\Omega = 1$ с высокой точностью.
- ▶ $\epsilon_{h\nu} > \epsilon_{\text{matter}}$ при $a < 10^{-4}$ (радиационно-доминированная плазма). $a \propto t^{1/2}$.
- ▶ $a \approx 10^{-3}$ соответствует возрасту $t \approx 300\,000$ лет.

Термодинамическое равновесие

$kT \gtrsim mc^2$ – условие равновесия.

Электроны: $5 \cdot 10^9 K$.

Адроны: $10^{13} K$.

При $T > T_{eq}$: $n_\gamma \sim n_x \sim n_{\tilde{x}}$

При $T \ll T_{eq}$ $n_x \sim 0$. Но не для барионов!

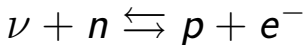
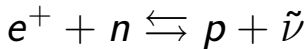
$\frac{n_\gamma}{n_p} \approx 10^9$, $n_{\tilde{p}} \lll n_p$ – барионная асимметрия!

Введение

Ньютоновские
решенияУравнения
состоянияТепловая
история
ВселеннойСпособы
изученияТемная
энергияТемная
материяПолезные
формулы

Нуклеосинтез

При $T > 2 \cdot 10^{10} K$:



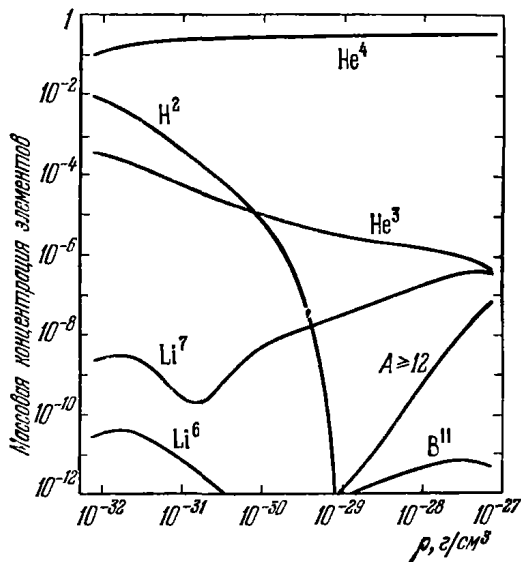
При $T \sim 10^{10} K$ происходит закалка н.
 До $T = 3 \cdot 10^8 K$ ($t = 100$ с): реакции
 $n + p = D + \gamma$, $D + D = T + p$,
 $T + D = He^4 + n$, $D + D = He^3 + n$,
 $He^3 + n = T + p$ и т.д.

Введение

Ньютоновские
решенияУравнения
состоянияТепловая
история
ВселеннойСпособы
изученияТемная
энергияТемная
материяПолезные
формулы

Нуклеосинтез

Космология



Введение

Ньютоновские
решения

Уравнения
состояния

Тепловая
история
Вселенной

Способы
изучения

Темная
энергия

Темная
материя

Полезные
формулы

Нуклеосинтез: наблюдения

Старые звезды, межзвездная среда,
изотопы в планетах, молекулы с
дейтерием:

$$\Omega_b \approx 0.03 - 0.04.$$

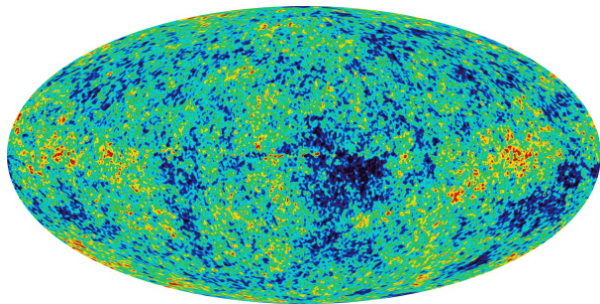
Введение

Ньютоновские
решенияУравнения
состоянияТепловая
история
ВселеннойСпособы
изученияТемная
энергияТемная
материяПолезные
формулы

Рекомбинация водорода

$$T \approx 3000\text{K}$$

Возраст 300 000 лет. Вселенная становится прозрачной. РИ.



Космология

Введение

Ньютоновские
решения

Уравнения
состояния

Тепловая
история
Вселенной

Способы
изучения

Темная
энергия

Темная
материя

Полезные
формулы

Вторичная ионизация

Время от рекомбинации до примерно 400 млн. лет – «Тёмные века».

После 400 млн. лет ($a \sim 0.1$) образуются первые галактики и ионизуют водород (но прозрачность не теряется). Межгалактический газ нагревается до 10^4K .

[Введение](#)[Ньютоновские решения](#)[Уравнения состояния](#)[Тепловая история Вселенной](#)[Способы изучения](#)[Темная энергия](#)[Темная материя](#)[Полезные формулы](#)

Способы изучения расширения Вселенной

Красное смещение:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda}.$$

Космологическое красное смещение:

$$z = \frac{1}{a} - 1, \quad a = \frac{1}{1 + z}.$$

Введение

Ньютоновские
решения

Уравнения
состояния

Тепловая
история
Вселенной

Способы
изучения

Темная
энергия

Темная
материя

Полезные
формулы

Определение расстояний

1. По светимости (L – светимость, F – поток)

$$D_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}.$$

2. По углу (d – физ.размер, θ – угол)

$$D_A = \frac{d}{\theta}$$

Введение

Ньютоновские
решенияУравнения
состоянияТепловая
история
ВселеннойСпособы
изученияТемная
энергияТемная
материяПолезные
формулы

Единицы измерения

$$1 \text{ пк} \approx 3,09 \cdot 10^{18} \text{ см} \approx 3,26 \text{ св. лет},$$
$$1 \text{ Мпк} \approx 3,09 \cdot 10^{24} \text{ см}.$$

Размер галактик $\sim 1\text{-}100$ кпк.

Расстояния между галактиками ~ 1 Мпк.

Горизонт Вселенной $\sim 10^4$ Мпк.

Углы: $^{\circ}, ' = 1/60^{\circ}, '' = 1/60'$

Определение расстояний

В космологии $D_L \neq D_a!!!$

Зависимость $D_L(z)$ или $D_A(z)$ можно пересчитать в $a(t)$.

Часто употребляют $H(z) = \frac{1}{a} \frac{da}{dt}$.

Космология

Введение

Ньютоновские
решения

Уравнения
состояния

Тепловая
история
Вселенной

Способы
изучения

Темная
энергия

Темная
материя

Полезные
формулы

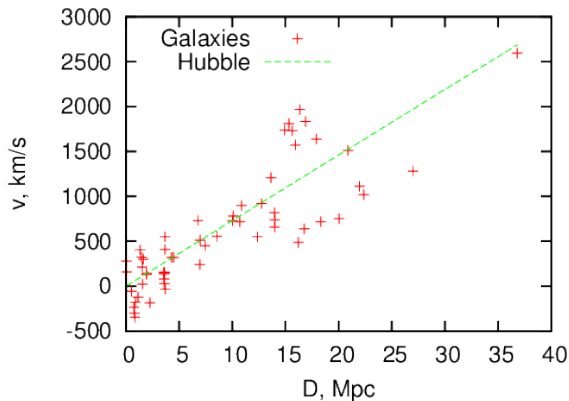
«Лестница» расстояний

1. До 10 кпк – параллакс.
2. Цефеиды (звезды с характерной зависимостью $L(T)$) – до 30 Мпк.
3. Различные корреляции свойств галактик (светимость) – до 300 Мпк.
4. Мегамазеры (угол) – до 250 Мпк.
5. Барионные акустические осцилляции (угол) – до 1000 Мпк ($z \sim 0.3$).
6. Сверхновые Ia (светимость) – до ~ 3000 Мпк ($z \sim 1.0$).
7. Анизотропия РИ (угол) – почти до горизонта ($z \approx 1000$).

Введение

Ньютоновские
решенияУравнения
состоянияТепловая
история
ВселеннойСпособы
изученияТемная
энергияТемная
материяПолезные
формулы

Лабораторная работа 1



Измерение постоянной Хаббла.

Космология

Введение

Ньютоновские
решения

Уравнения
состояния

Тепловая
история
Вселенной

Способы
изучения

Темная
энергия

Темная
материя

Полезные
формулы

Темная энергия

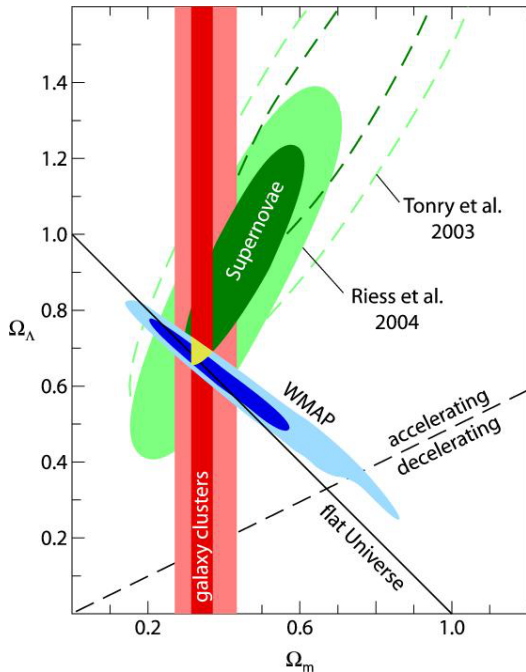
Из закона расширения можно определить полную плотность Вселенной Ω и долевой состав компонент с разными уравнениями состояния.

Результат парадоксальный:

$\Omega = 1.0$ – полная (Вселенная плоская).

$\Omega_m \approx 0.3$ – пылевидная ($P = 0$).

$\Omega_\Lambda \approx 0.7$ – с отталкиванием! $P = -\epsilon$.



Космология

Введение

Ньютоновские
решения

Уравнения
состояния

Тепловая
история
Вселенной

Способы
изучения

Темная
энергия

Темная
материя

Полезные
формулы

Гипотезы

- ▶ Лямбда-член в уравнении Эйнштейна.
- ▶ Энергия вакуума.
- ▶ Реликт инфляции.

Инфляция – процесс сверхбыстрого расширения Вселенной в самые ранние моменты жизни. Необходим для достижения изотропии и однородности.

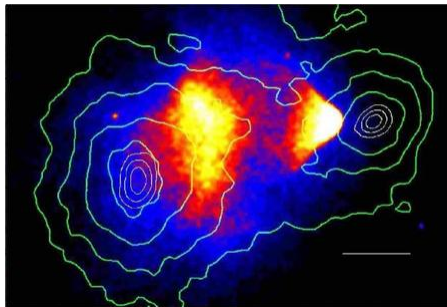
Введение

Ньютоновские
решенияУравнения
состоянияТепловая
история
ВселеннойСпособы
изученияТемная
энергияТемная
материяПолезные
формулы

Темная материя

$$\Omega_m \approx 0.3, \Omega_b \approx 0.04.$$

Другие указания: кривые вращения галактик, нехватка газа в скоплениях.



Скопление «Пуля»

Темная материя

Горячая (нейтринная) ТМ не проходит.
Газ, продукты эволюции звезд – не
проходят.

Минимальная масса $\sim k\text{эВ}$.

Максимальная $\sim$ массы Луны.

Космология

Введение

Ньютоновские
решения

Уравнения
состояния

Тепловая
история
Вселенной

Способы
изучения

Темная
энергия

Темная
материя

Полезные
формулы

Практические формулы

Для стандартной космологической модели:

$$r = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz}{[\Omega_\Lambda + \Omega_m(1+z)^3]^{1/2}}.$$

– сопутствующее расстояние.

$$D_L = r(1+z), \quad D_A = \frac{r}{(1+z)}.$$

Введение

Ньютоновские
решенияУравнения
состоянияТепловая
история
ВселеннойСпособы
изученияТемная
энергияТемная
материяПолезные
формулы

Возраст Вселенной

$$t(z) = \frac{1}{H_0} \cdot$$

$$\int_z^\infty \frac{dz}{(1+z) [\Omega_\Lambda + \Omega_m(1+z)^3]^{1/2}}.$$

Параметр Хаббла:

$$H(z) = H_0 [\Omega_\Lambda + \Omega_m(1+z)^3]^{1/2}$$

Космология

Введение

Ньютоновские
решения

Уравнения
состояния

Тепловая
история
Вселенной

Способы
изучения

Темная
энергия

Темная
материя

Полезные
формулы

Постоянная Хаббла:

$$H_0 = 73 \pm 3 \text{ км/с/Мпк.}$$

Критическая плотность:

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 4.9 \cdot 10^{-30} \text{ г/см}^3$$

Введение

Ньютоновские
решения

Уравнения
состояния

Тепловая
история
Вселенной

Способы
изучения

Темная
энергия

Темная
материя

Полезные
формулы