



通俗宇宙学简介

Introductory Cosmology for Babies

郭雨泽
YUZE GUO

武汉大学物理科学与技术学院
SCHOOL OF PHYSICS AND TECHNOLOGY, WUHAN UNIVERSITY

2023 年 8 月 21 日
AUGUST 21ST, 2023

目录



自
強
弘
毅
求
是
拓
新

① INTRODUCTION

② OBSERVATIONS

2. 1 Dark Night Sky
2. 2 Isotropic & Homogeneous
2. 3 Redshift

③ TOPIC: CMB

④ FREE TIME :D



① INTRODUCTION



自
強
弘
毅
求
是
拓
新



什么是宇宙学?

定义 1.1: 宇宙学

Cosmology is the study of the universe, or cosmos, regarded as a whole.
(宇宙学是将宇宙作为一个整体进行研究的学科。)

- 复杂的宇宙 → 简化的模型
- 天文学中常用的单位:
 - 长度: pc, Mpc;
 - 质量: M_{\odot} ;
 - 光度: L_{\odot} ;
 - 时间: yr, Myr, Gyr;
 - 能量: eV, MeV;
 - ...

基于观测的学科

宇宙学也是基于观测的学科, 但也会出现观测落后于理论的情况.

例 1.1

Copernicus 其实在得到新的观测结果之前就已经提出了日心说的模型.

目前的宇宙标准模型: *the “Hot Big Bang” model* (热大爆炸模型).



② OBSERVATIONS

2. 1 Dark Night Sky
2. 2 Isotropic & Homogeneous
2. 3 Redshift



自
強
弘
毅
求
是
拓
新

Dark Night Sky

Olbers' paradox

理论 静态且无限的宇宙，假设所有恒星数密度为 n 均匀分布，可见光光度均为 L .

则在宇宙的任一点，可见光的强度为

$$F = \int_0^{+\infty} \frac{L}{4\pi r^2} \cdot 4\pi r^2 n dr \rightarrow +\infty \quad (1)$$

即每一点的亮度都为无穷大.

观测 夜晚的天空背景在可见光波段漆黑一片.

猜想

- ① 星际空间并非透明；
- ② 宇宙并非无穷大/恒星并非均匀分布；
- ③ 宇宙的年龄/恒星存在的时间有限；
- ④ ...

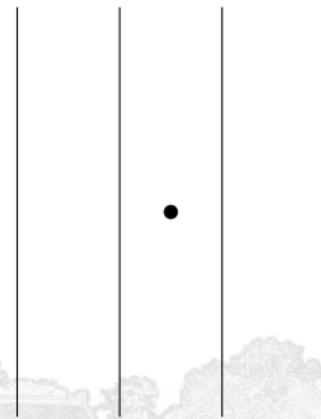
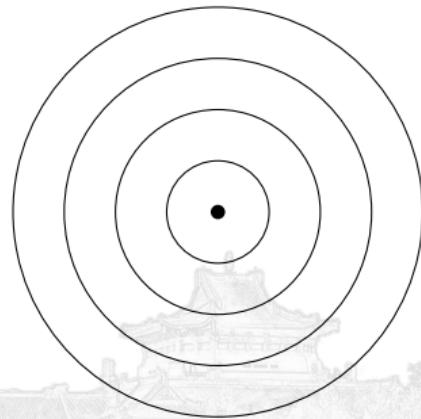


Isotropic & Homogeneous

大尺度: $\gtrsim 100$ Mpc.

- **isotropic** (各向同性): 宇宙中没有某个特别的方向; 每个方向上的物理性质都是一样的;
- **homogeneous** (匀质?): 宇宙中没有某个特别的位置; 每个地点所看到的宇宙图景都是一样的.

Isotropy \neq Homogeneity



Cosmological Principle

定理 2.1: 宇宙学原理 (Cosmological Principle)

Viewed on a sufficiently large scale, the properties of the universe are the same for all observers.

宇宙在大尺度上是均匀且各向同性的。



Redshift \propto Distance

当星系远离时, 由于 Doppler 效应, 其光谱发射线会变长.

- 实验室测得发射线波长 λ_{em} ;
- 观测得发射线波长 λ_{ob} ;

则红移 (redshift)

$$z \equiv \frac{\lambda_{\text{ob}} - \lambda_{\text{em}}}{\lambda_{\text{em}}} \quad (2)$$

当红移 $|z| \ll 1$ 时, 有关系

$$z \approx \frac{v}{c} \quad (3)$$

观测结果:

- ① 对大部分星系, $z > 0$ (远离);
- ② 距离越远, z 越大.

Redshift \propto Distance

Lemaître 宇宙在膨胀;

Hubble 红移 z 与距离 r 有线性关系:

$$z = \frac{H_0}{c} r \quad (4)$$

代入 Doppler 效应,

$$v = H_0 r \quad (5)$$

Hubble 常数的当前值为

$$H_0 = 68 \pm 2 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \quad (6)$$

引入因子 $a(t)$, 宇宙膨胀表示为 $r(t) = a(t)r(t_0)$, 则

$$v = \dot{r} = \dot{a}r(t_0) = \frac{\dot{a}}{a}r \longrightarrow H_0 = \frac{\dot{a}}{a} \quad (7)$$

宇宙万法的那个源头

Hubble 常数的量纲:

$$[H_0] = \frac{[v]}{[r]} = T^{-1}$$

那么 H_0^{-1} 就具有时间的量纲. 它表示的是什么时间呢?

$H_0^{-1} \approx 14.4 \text{ Gyr}$ 被称为 **Hubble** 时间. t_0 为宇宙年龄.

$$t_0 \sim H_0^{-1}$$



③ TOPIC: CMB



自
強
弘
毅
求
是
拓
新



观测事实

- 在全天空背景下，始终存在一个稳定的额外热辐射，等效温度为 $\sim 2.7\text{K}$ ；
- 该辐射在大尺度下具有各向同性 (isotropy)；
- 存在微小的各向异性 (anisotropy)；
- 存在 E 与 B 两种模式的偏振 (polarization).

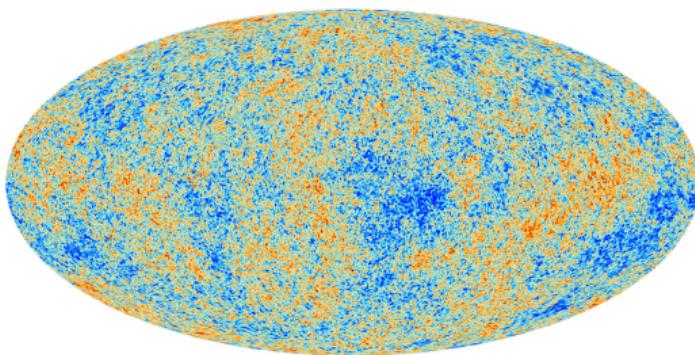


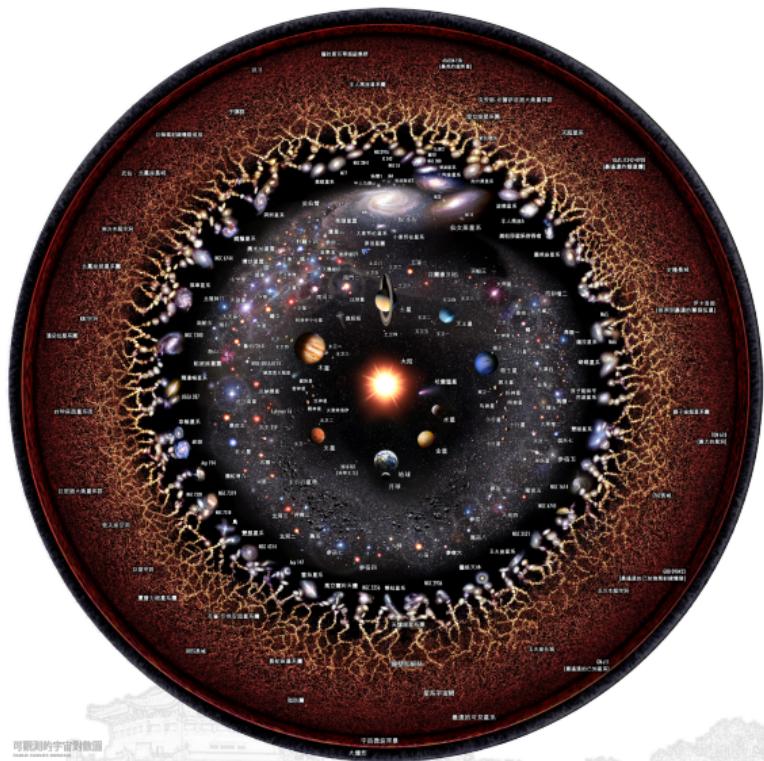
图 1: Planck 卫星得到的 CMB 谱

理论预测

- 复合阶段 (**Recombination**): 大爆炸后 38 万年, $T \sim 3000\text{ K}$, 自由电子和质子结合形成氢原子, 电子数密度急剧减小.
电子对光子散射作用减小 (类似平均自由程 $\lambda = \frac{1}{\sigma n}$), 光子经过最后一次散射后可以在空间中自由传播, 宇宙变「透明」.
- 最后散射面 (**Last Scattering Surface**): 经过最后一次碰撞成为自由传播光子所分布的一个球面 ($z \approx 1060$);
最终散射层 ($\Delta z \approx 200$)

更早期的光子因短自由程而无法传播至今, 因此可以说, 最后散射面就是 CMB 的光源, 也就是我们通过电磁波手段所能观测到的最遥远的宇宙.

宇宙图景



自
强
弘
毅*

图 2: 以我们为中心的宇宙全景, 长度呈对数增长。注意距离我们越远, 时间也约靠前。

结论

- ① 存在 — 对热大爆炸模型的有力支持;
- ② 黑体辐射谱型 — 早期宇宙的高度热平衡;
- ③ 各向同性 — 宇宙学原理;
- ④ 各向异性 —
 - 偶极各向异性: 由地球空间运动引起的 Doppler 频移;
 - 全空间背景辐射温度涨落 ($\frac{\Delta T}{T} \approx 10^{-5}$): 宇宙早期微小密度涨落的反映,形成宇宙大尺度结构的「种子」. (暴涨, 量子涨落...)

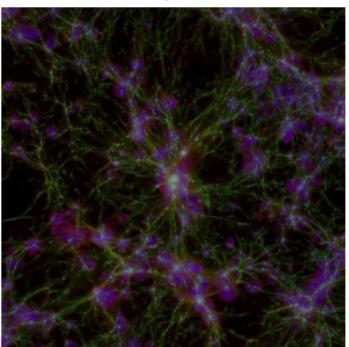


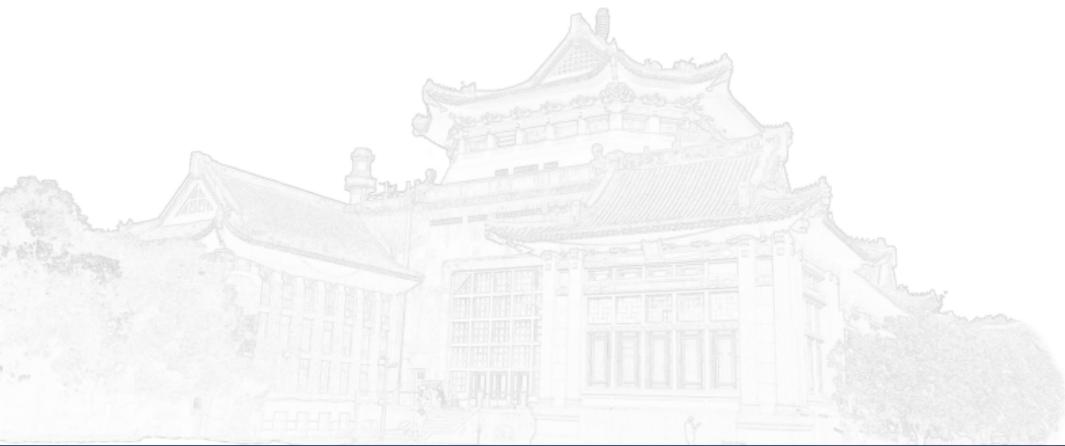
图 3: 宇宙大尺度结构 (Large Scale Structure)

我超, 原!

⑤ CMB 的偏振

- **E-polarization** — 类似电场 (E), 在形式上是球面上的散度场; 来自于 Thompson 散射;
- **B-polarization** — 类似磁场 (B), 形式上是旋度场; 其来源预计有二:
 - ① E-polarization 经引力透镜 (gravitational lensing) 形成;
 - ② 暴涨时产生的原初引力波 (Primordial Gravitational Waves) 对最后散射面上的辐射影响.

④ FREE TIME :D



自强弘毅
求是拓新



还有

大家记得宇宙中除了物质还有暗物质和暗能量!!!()

自强弘毅
求是拓新



Thanks!

自强弘毅
求是拓新

