

Lecture 7

赵思逸

2023 年 4 月 5 日

1 视界 (Horizon)

1.1 粒子视界 (particle horizon)

粒子视界 (particle horizon) : 对于过去的事件所能观测到的最远距离。或在 t 时刻看到的最远宇宙在 t 时刻的距离。

$$d_{ph}(t) = a(t) \int_0^t \frac{cdt'}{a(t')} \quad (1)$$

在今天,

$$d_{ph}(t_0) = \frac{c}{H_0} \int_0^1 \frac{da'}{a'^2 \sqrt{\Omega_R a'^{-4} + \Omega_M a'^{-3} + \Omega_\Lambda + \Omega_K a'^{-2}}} \quad (2)$$

- 对于辐射为主的宇宙, $a \propto t^{1/2}$, $d_{ph}(t_0) = 2t_0 = D_H$.
- 对于冷物质为主的宇宙, $a \propto t^{2/3}$, $d_{ph}(t_0) = 3t_0 = 2D_H$.

1.2 事件视界 (event horizon)

事件视界 (event horizon): 未来的观测者所能看到的在 t 时刻或以后的事件在 t 时刻的最远距离。

$$d_{eh}(t) = a(t) \int_t^\infty \frac{cdt'}{a(t')} \quad (3)$$

- 对于冷物质为主的宇宙, $a \propto t^{2/3}$, $d_{eh} \rightarrow \infty$.
- 若 Λ 为主, $a \propto e^{Ht}$, $H = H_0 \Omega_\Lambda^{1/2}$, $d_{eh} \rightarrow \frac{c}{H}$ 常数, 足够时间以后, 只有引力束缚的本星系群能看到。

1.3

从 t 时刻发出的信号在未来 T 时刻所能到达的最远距离

$$\lim_{T \rightarrow \infty} a(T) \int_t^T \frac{cdt'}{a(t')} = d_{eh} \frac{a(T)}{a(t)} \quad (4)$$

若 Λ 为主, $a \propto e^{Ht}$, $H = H_0 \Omega_\Lambda^{1/2}$, $d_{eh} \rightarrow \frac{c}{H}$ 常数, 但 $a(T) \rightarrow \infty$, 所以我们发出的信号可以到达无限远。

早期宇宙的历史

本章会讲 3 个重要的话题: (时间由晚到早。)

- CMB 微波背景辐射
- BBN 大爆炸核合成
- Inflation 暴涨宇宙

2 微波背景辐射

2.1 退耦 (decoupling)

自由质子和自由电子复合成中性氢原子, 放出光子 (大于等于 13.6 eV), 中性氢原子也可以吸收光子电离为自由的质子和电子。

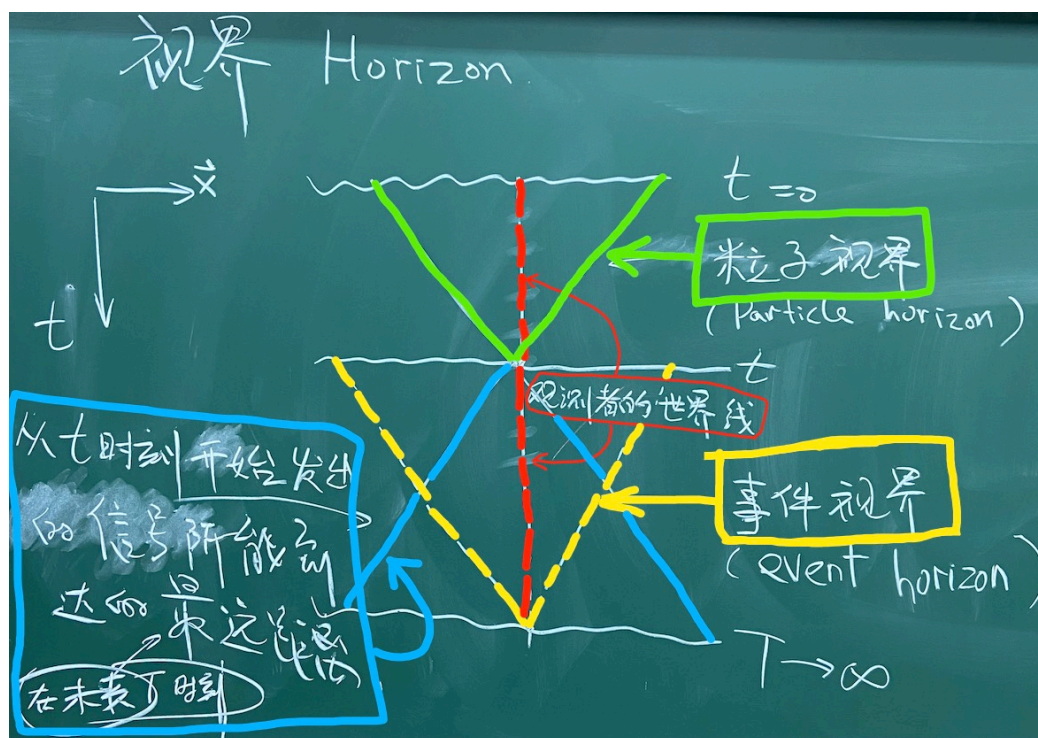


图 1: 视界

随着宇宙膨胀，光子能量降低，复合率逐渐变得远大于电离率。具体地说，当 $k_B T = 0.3 \text{ eV}$ 时，复合率远大于电离率。

另一方面，当光子和电子的散射速率小于宇宙膨胀速率后，光子和电子退耦。

光子被电子散射的速率 $\Lambda_\gamma = \sigma_T n_e v$ ，其中 σ_T 是 Thomson 散射截面， n_e 是电子数密度， v 是电子运动速度。早期运动速度接近光速，

$$\Lambda_\gamma \simeq \sigma_T n_e c \propto a^{-3} \propto (T/T_{\gamma 0})^3$$

其中 $T_{\gamma 0}$ 是今天 CMB 的温度。

宇宙膨胀速率，在辐射占主导期， $H \propto a^{-2} \propto (T/T_{\gamma 0})^2$ 。早期散射速率远大于膨胀速率，能达到化学平衡。但散射速率降得更快，当散射速率小于宇宙膨胀速率，化学平衡被打破。

在化学平衡中的等离子体中，光子不断被散射，宇宙对光子是不透明的 (opaque)，化学平衡被打破时，光子不再发生散射，而是惯性运动，形成最后散射面。最后散射面由被我们观测到的 CMB 光子的最后一次散射位置组成，近似为一个二维球面。见图 (2)

2.2 CMB 的特征

- 各向同性：来自所有方向的 CMB 温度高度相同。
- 辐射场强度随频率的分布符合黑体辐射谱。(Planck 公式)
- 退耦能标约为 0.3 eV ，温度约为 3000 K ，红移约为 1100
- 温度涨落有偶极矩，大小约为 10^{-3} 。(因为地球、太阳、银河系的运动。)
- 扣除偶极矩后，仍然存在微小的温度起伏，这就是后来宇宙密度起伏、形成星系等结构的种子/初始条件。

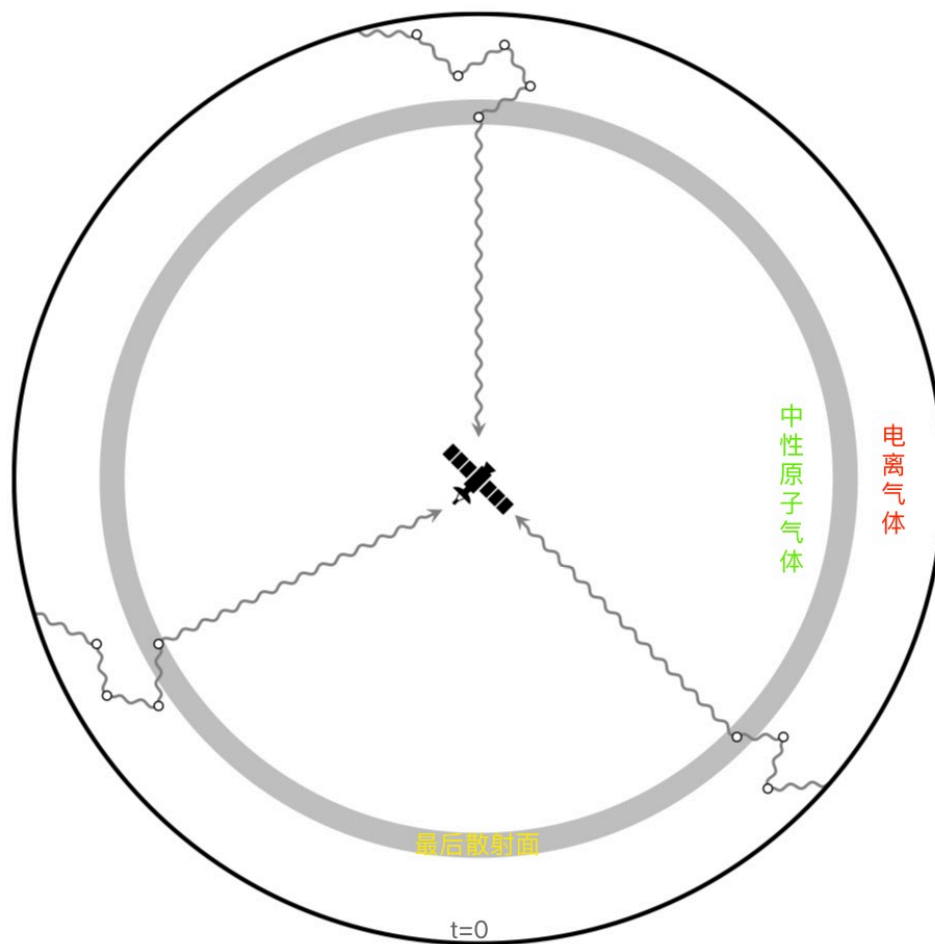


图 2: 图中灰色圆环为最后散射面, 修改自 Daniel Baumann: Cosmology (2021)