

《天体物理学》

第十二章 宇宙 (b)

讲授：徐仁新

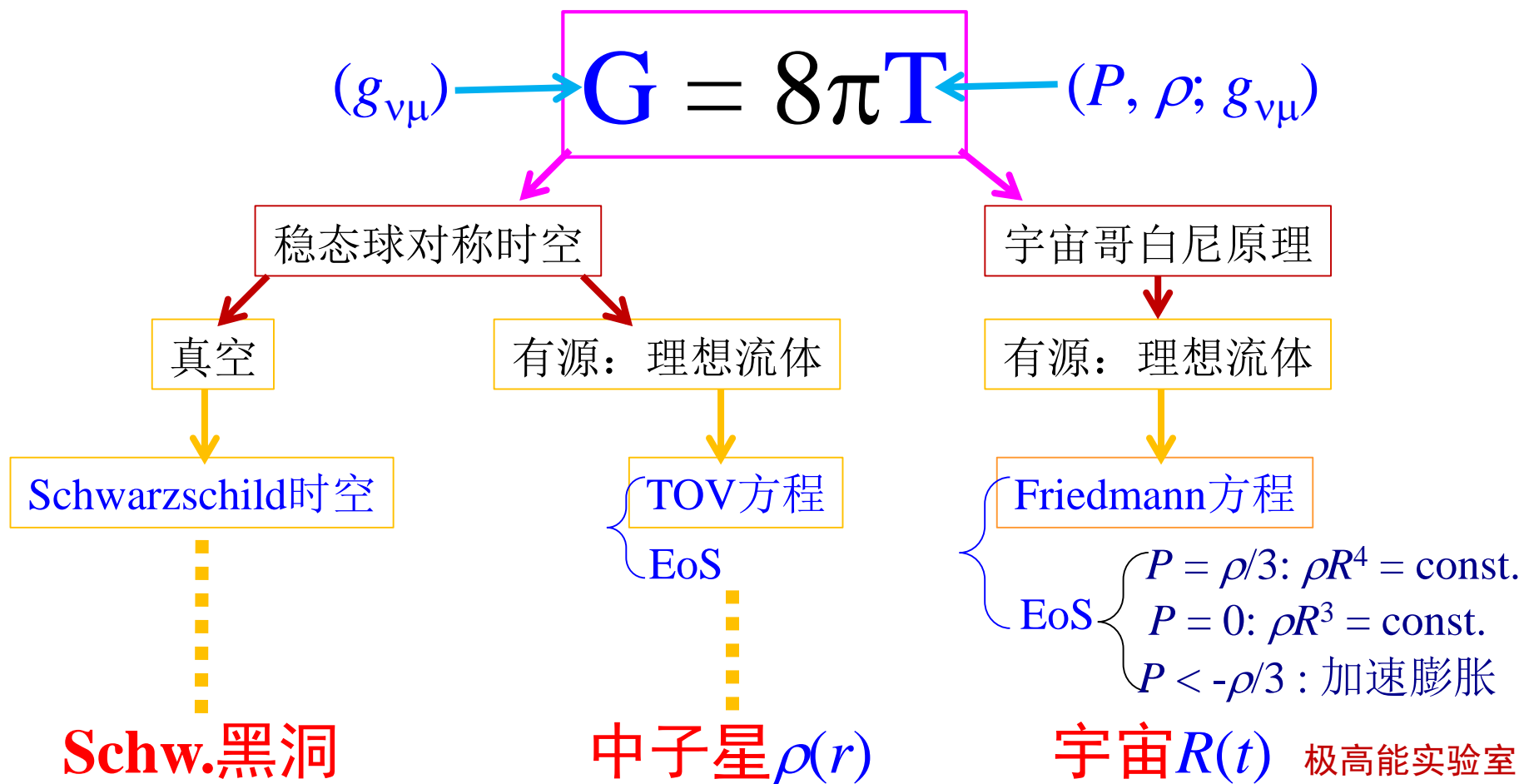
北京大学物理学院天文学系

- 0, 什么是宇宙?
- 1, 基本观测事实
- 2, Robertson-Walker度规
- 3, 宇宙膨胀动力学
- 4, 极早期宇宙真空相变
- 5, 暴胀
- 6, 辐射与物质间的脱耦
- 7, 宇宙早期核合成
- 8, 暗物质与暗能量
- 9, 可观测宇宙之外?

宇宙膨胀动力学

对比黑洞、中子星和宇宙三类研究客体

(真空/有源Einstein场方程不同时空对称性时的三类解)



4, 极早期宇宙真空相变 时空泡沫 (“原子”) 的尺度

- 满足Heisenberg关系虚粒子寿命: $\tau \sim \hbar/(Mc^2)$
 - 虚粒子运动速度: 几乎为光速 c
 - 质量 M 的虚粒子明显影响周围空间弯曲的尺度: $r_s \sim GM/c^2$
 - 自由粒子波包的典型尺度: $\lambda \sim \hbar/(Mc)$
 - 时空量子效应出现于 $\lambda \sim r_s$ 情形 \Rightarrow Planck质量: $M_p = (\hbar c/G)^{1/2}$
 - 泡沫空间尺度: Planck长度 $l_p \sim \hbar/(M_p c) = (G\hbar/c^3)^{1/2} = 1.61 \times 10^{-33}$ cm
 - 泡沫时间尺度: Planck时间定义 $t_p = l_p/c = 5.38 \times 10^{-44}$ s
- $\{t_p, l_p\}$ 尺度以下: 没有 “四方上下、古往今来” !

一个比喻: 海平面

远看一平如镜, 近看汹涌澎湃! 



4, 极早期宇宙真空相变

Planck时代: 宇宙年龄小于 $\sim t_p$ 的阶段

- 时空量子涨落显著, 不能明确定义时空; 又称为时空创生期
- 该时期宇宙处于极高温

Higgs标量场与真空对称性自发破缺

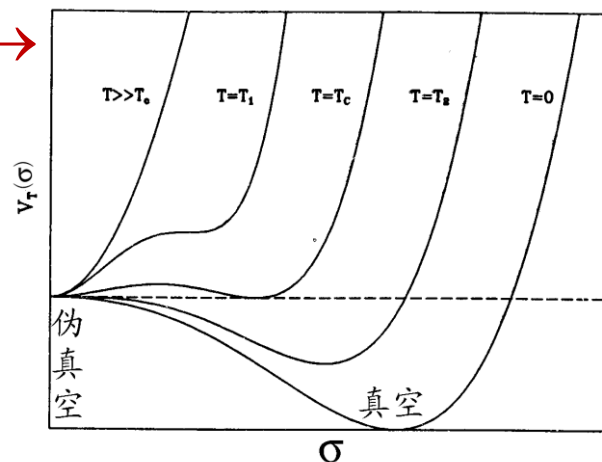
- 大统一理论认为自然界存在Higgs标量场 \rightarrow 存在一个临界温度 T_c : **成功实例: 弱电**

$\left\{ \begin{array}{l} T > T_c \text{ 时真空位于 } \sigma = 0 \text{ 处, 对称态} \\ T < T_c \text{ 时真空位于 } \sigma \neq 0 \text{ 处, 失称态} \end{array} \right.$

- 宇宙降温导致真空对称性逐渐降低

又称为: 真空对称性自发破缺 (即: **真空相变**)

\Rightarrow 基本相互作用的分化: $t \sim 10^{-44} \text{ s} \rightarrow t \sim 10^{-36} \text{ s} \rightarrow t \sim 10^{-10} \text{ s}$



4, 极早期宇宙真空相变

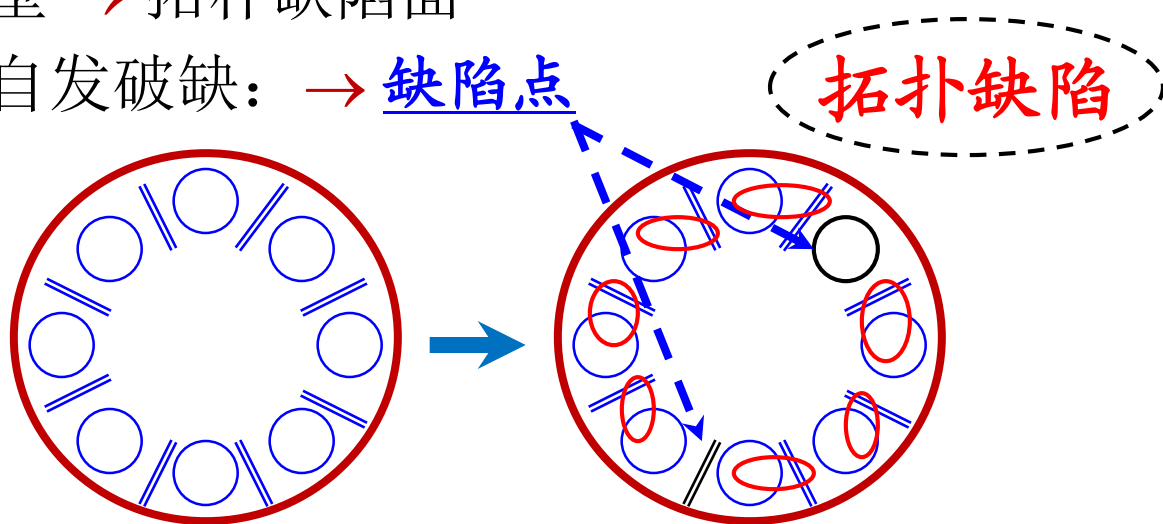
对称性破缺:

一般而言, 要使某一物理现象具有某种对称性则要求**相关的动力学理论和该系统所处状态** (在场论中称为“**真空态**”) 均具有该对称性。若一个物理状态不具有某种对称性, 则称这一对称性破缺了。

对称性自发破缺两例:

- 铁磁相变: 畴壁 \rightarrow 拓扑缺陷面
- 餐桌上对称性自发破缺: \rightarrow 缺陷点
- Honey coils

对称性自发破缺后果之一:



5, 暴胀

真空相变的后果

- 导致目前四种基本相互作用的分化
- 相变所释放出巨大能量，是当今宇宙中物质和辐射的来源
- 极早期宇宙的暴胀

原真空（即伪真空）态与新真空态间存在势垒；起初量子隧穿几率很低

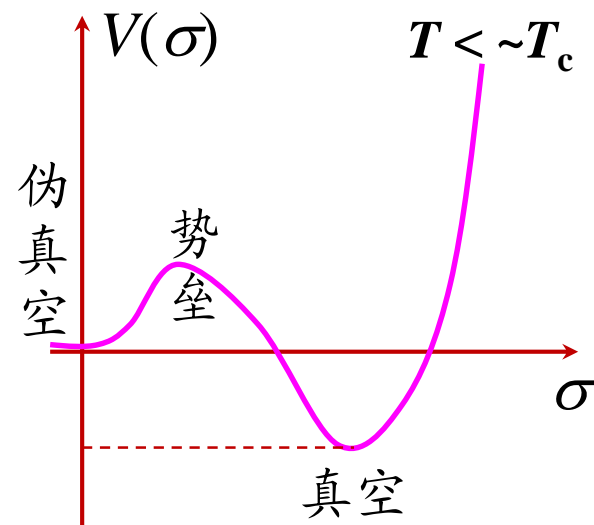
⇒ 非立即相变成 $\sigma \neq 0$ 态，真空能主导

此时宇宙膨胀行为主要决定于真空能！

根据Friedmann方程(\dot{R})（以 $k=0$ 为例）

$$\frac{\dot{R}^2}{R^2} + \cancel{\frac{k}{R^2}} = \frac{8\pi G}{3} \rho \Rightarrow dR \sim R dt \Rightarrow R \sim \exp[t]$$

由真空能为主的宇宙将指数膨胀！ → “暴胀”



回忆：等密度膨胀

5, 暴胀

暴胀解决“平坦性疑难”

- 辐射为主: $\rho R^4 = \text{常数}$; 物质主导: $\rho R^3 = \text{常数}$

$$\text{Friedmann方程}(\dot{R}) \Rightarrow \rho = \rho_c + \frac{3k}{8\pi G R^2} \Rightarrow \xi \equiv \left| 1 - \frac{1}{\Omega} \right| \propto \frac{k}{\rho R^2}$$

ξ 随着宇宙的膨胀而严重地放大!

- 动力学计算发现: 现今 ξ 值应大约是Planck时期的 10^{64} 倍!
- 目前观测发现 Ω 非常接近于1 (Ω 肯定小于10)
- 难道早期宇宙 Ω 要极端地微调以致于惊人地与1接近?
- 这一不自然的结论, 即所谓的“平坦性疑难”
- 暴胀模型的理解:

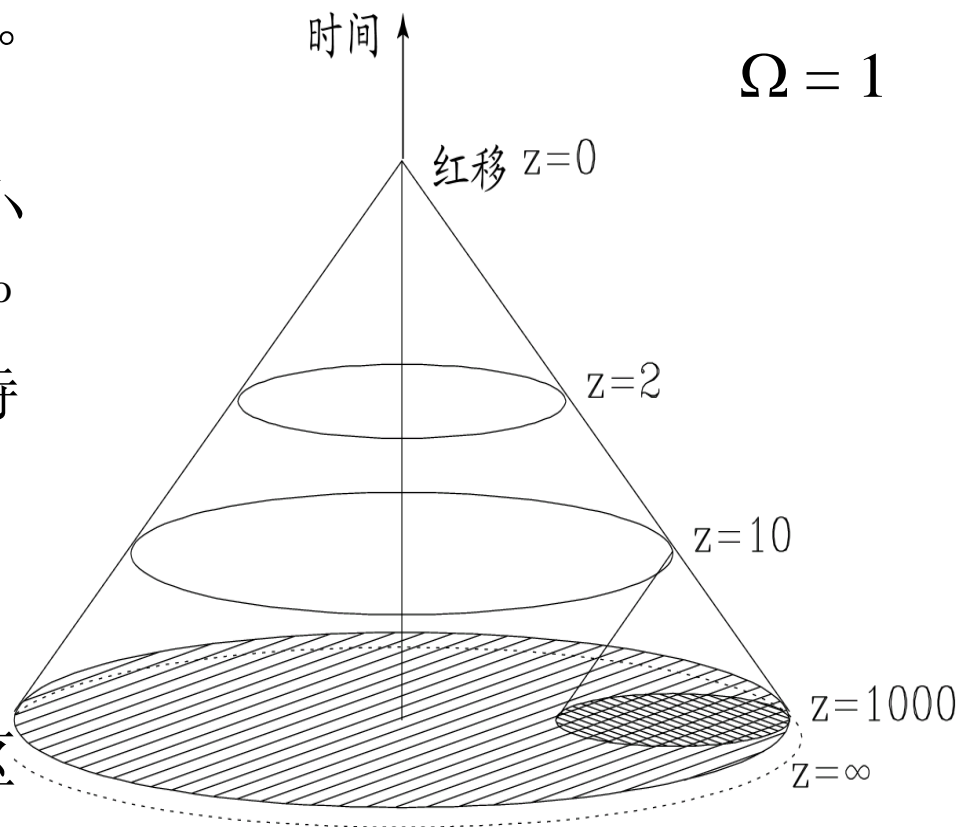
极早期近指数加速膨胀, R 短时间内极增约 e^{70} 倍。 R 增长使 ξ 非常接近于0。暴胀后 ξ 又被逐渐放大, 直到今天, ξ 还很接近0。

5, 暴胀

暴胀解决“视界疑难”

- 宇宙可观测的空间边界称为视界，它随年龄增加而增加。
- CMB在 $z \sim \text{eV}/3\text{K} \approx 10^3$ 时透明。
- 测量发现CMB几乎是均匀的！
- 宇宙年龄 t 时因果联系区域大小却只有 $\sim ct$ ，对应目前天区 $\sim 1^\circ$
- 为何无因果联系的区域辐射特征却如此的均匀？
→ “视界疑难”！
- 暴胀模型的理解：

在暴胀期之前有因果联系的区域在暴胀期间被极端地放大！



5, 暴胀

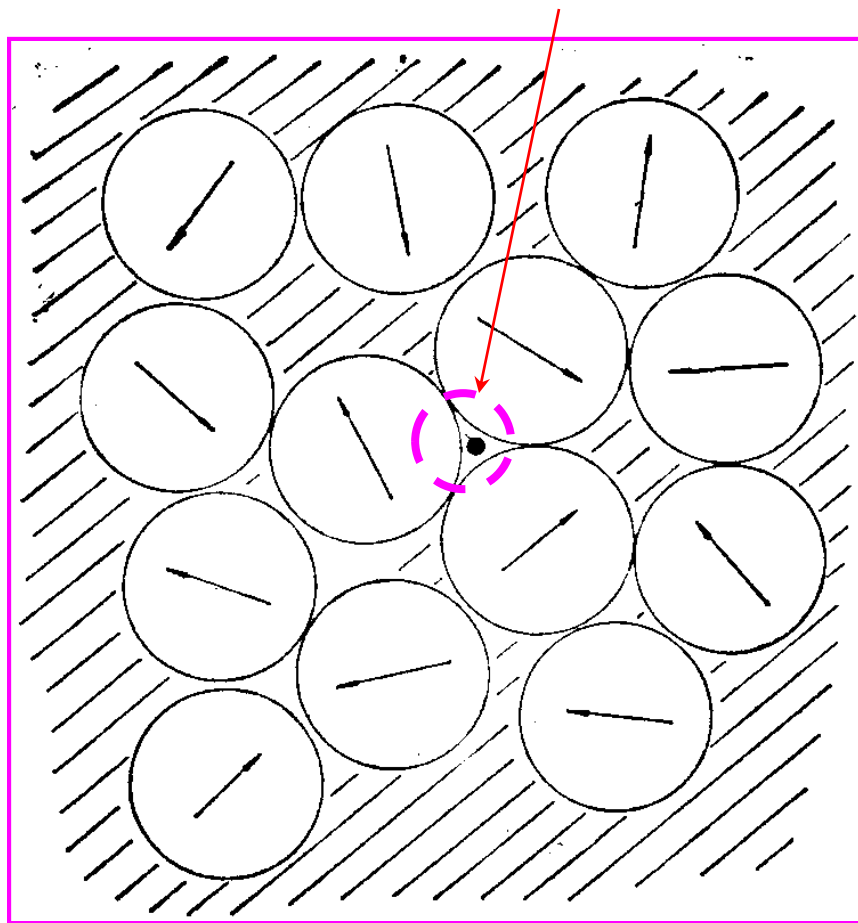
TD { magnetic monopole
cosmic string
domain wall

暴胀解决 “磁单极疑难”

- 磁单极是零维拓扑缺陷，可能出现于不同真空的交界处
- 估计大统一真空相变产生磁单极
相变发生年龄 $t \sim 10^{-36} \text{s}$ ，当时具有
因果关联区体积 $\sim (ct)^3 \sim 10^{-76} \text{cm}^3$
若10种不同真空可产生一磁单极
 \Rightarrow 相变时磁单极密度 $\sim 10^{75} \text{cm}^{-3}$
 \Rightarrow 目前磁单极的数密度：

$$\sim 10^{75} \left(\frac{R}{R_0} \right)^3 \approx 10^{75} \left(\frac{T_0}{T} \right)^3 \approx 10^{-8} \text{cm}^{-3}$$

- 暴胀模型的理解：
磁单极被严重稀释了！

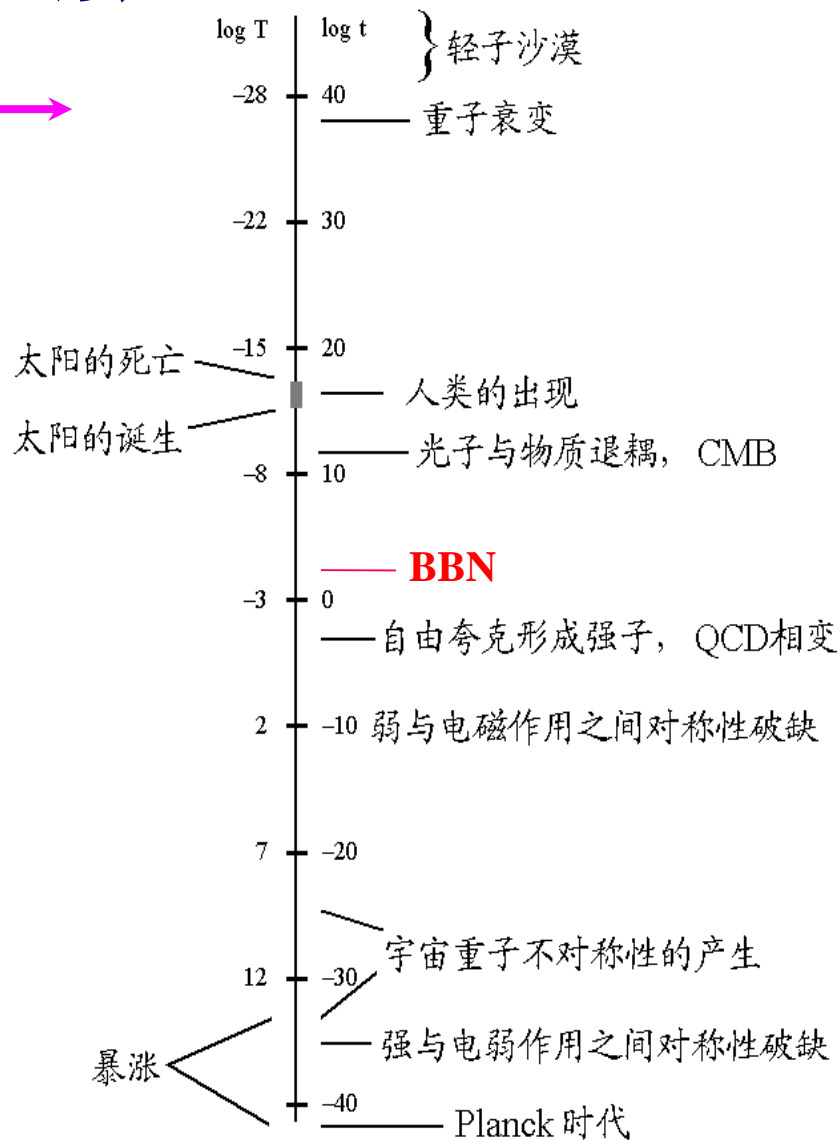


5, 暴胀

宇宙的热演化简史

- Planck时期：时空起源
- 重子起源：（Sakharov, 1960s）
B不守恒；C和CP破缺；偏离热平衡
- 辐射为主宇宙：

$$T \approx \frac{10^{10}}{\sqrt{t/s}} \text{ K} \approx \frac{1}{\sqrt{t}} \text{ MeV}$$



6, 辐射与物质间的脱耦

脱耦的条件

- 原初等离子体中粒子间的相互作用
 i 粒子作用截面 σ_i , 能够与它作用粒子数密度 n_i , 运动速度接近光速 c , 则单位时间内 i 粒子发生 $n_i \cdot \sigma_i \cdot c$ 次作用
- 脱耦: 在Hubble时间 H^{-1} 内作用的次数 $n_i \cdot \sigma_i \cdot c \cdot H^{-1} < 1$, i 粒子就几乎不再与其它粒子作用了而脱离原初等离子体而存在
- σ_i 越小的粒子脱耦得越早。脱耦粒子又称为背景遗迹粒子。
如果它们是相对论性的, 则称为背景辐射。

三种背景辐射

- 引力波背景辐射 (CGB): 起源于Planck时期, 年龄 $\sim 10^{-44}$ s
- 中微子背景辐射 (CNB): $T \sim 1\text{MeV}$ ($t \sim 1\text{s}$) 时, 中微子脱耦
- 微波背景辐射 (CMB): 年龄 $t \sim 10^{12}$ s时, 温度降至 $T \sim \text{eV}$

7, 宇宙早期核合成

QCD相变(强子化过程)

- **QED**描述荷电粒子间作用； **QCD**描述带色荷夸克、胶子间作用
- **渐近自由**：高温或高密状态下夸克、胶子间作用可忽略
- **色禁闭**：低温且低密时带色粒子间作用强，只局限于强子内部
- **QCD相变**：宇宙膨胀 T 、 ρ 下降，“渐近自由” \rightarrow “色禁闭”
相变发生于 $T \sim (100-200)\text{MeV}$, $t \sim 10\mu\text{s}$
- **相变后果**：形成长寿命稳定存在强子（质子和中子）
- 相变产物质子和中子起初处于 β 平衡（因 ν 不透明）：

$$p + e^- \leftrightarrow n + \nu_e, \quad p + \bar{\nu}_e \leftrightarrow n + e^+$$

数密度之比满足Boltzmann公式： $\frac{n_n}{n_p} = \exp[-\Delta m / (kT)]$
($\Delta m = m_n - m_p \sim 1.3\text{MeV}$)

7, 宇宙早期核合成

原初核合成

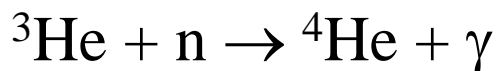
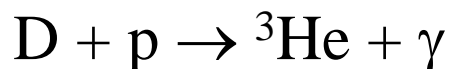
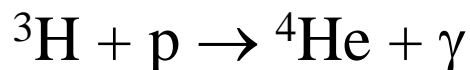
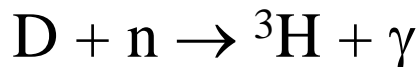
- 中微子脱耦: $T \sim 1\text{MeV}$ ($t \sim 1\text{s}$) 时, 弱作用率 \sim 宇宙膨胀率

此时中子、质子数目比: $\frac{n_n}{n_p} \sim \exp[-1.3]$

但尚不能很快核合成, 因为第一步是氘合成: $p+n \leftrightarrow D+\text{光子}$, 那时容易导致D裂变回中子和质子 (D的结合能 2.23MeV)。

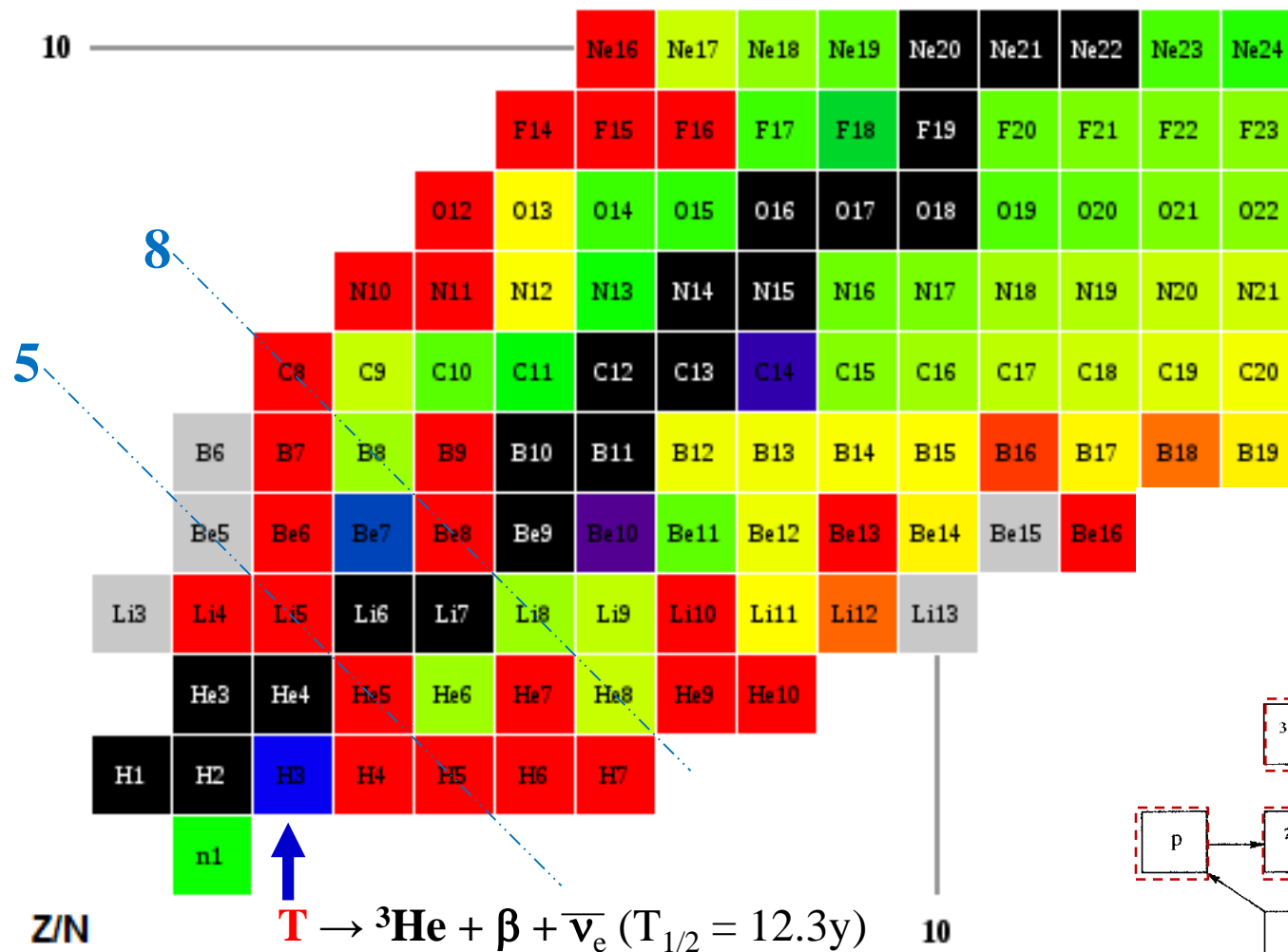
- D不被分裂的条件: 1, 温度较低; 2, η 值较高。
- 当 $T \sim T_D \sim 0.1\text{MeV}$ ($t \sim 100\text{s}$) 时, D才能大量合成, 并速合成 ^4He

宇宙最初
三分钟

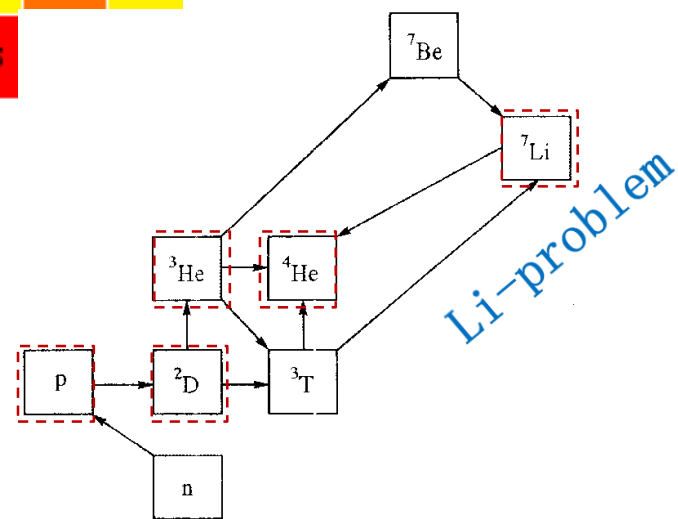


7, 宇宙早期核合成

原初核合成: 奇妙的核性质



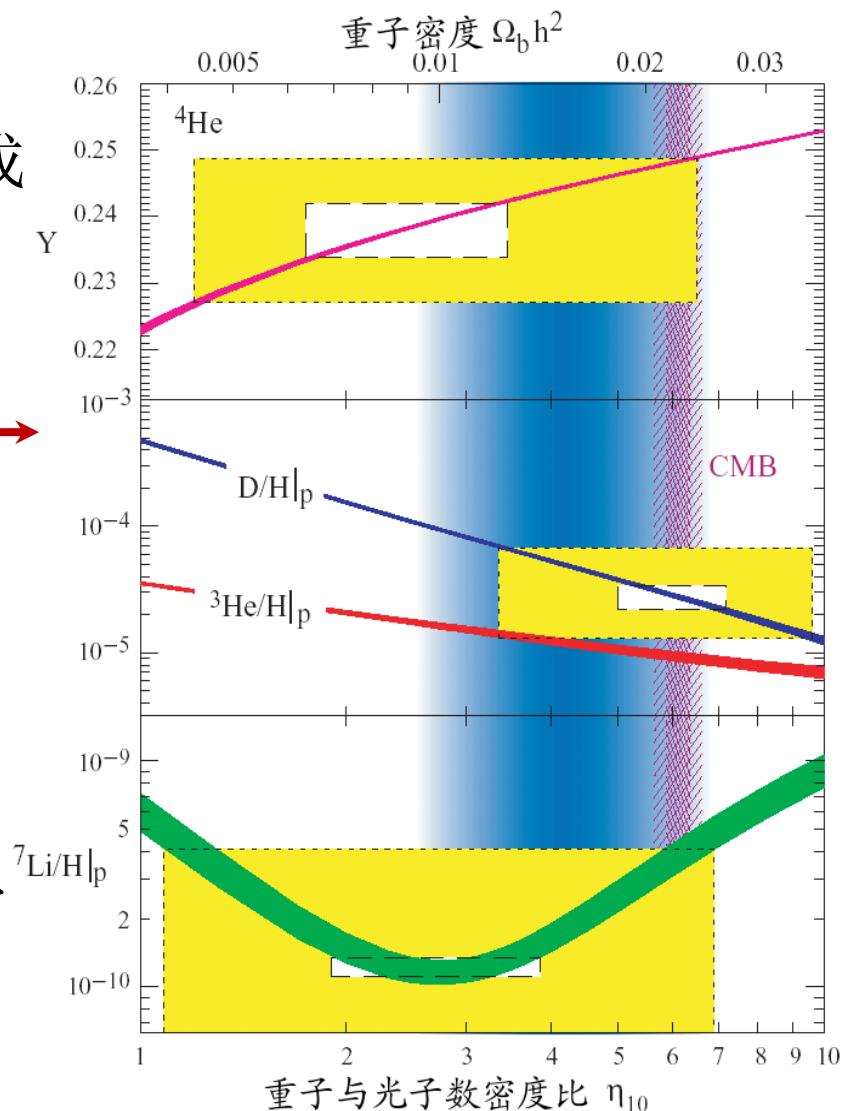
基因?
&
转基因?



7, 宇宙早期核合成

原初核合成

- 考虑到约100s内中子衰变, 核合成时粒子数之比值修正为 $n_n/n_p \sim 1/7$
 $\Rightarrow {}^1\text{H}$ 、 ${}^4\text{He}$ 质量比 $\sim 3:1$ (习题2)
- BBN还生成少量D、 ${}^3\text{He}$ 、 ${}^7\text{Li}$ 等
产物丰度是 $\eta_{10} \equiv \eta/10^{-10}$ 的函数!
 \Rightarrow 观测确定出 $\eta_{10} \sim 1$
- 背景光子数 $\sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$ } \Rightarrow $\Omega_B \sim 0.05$
- 重子总数对 Ω 的贡献: $\Omega_B \sim 0.05$
- 测光发现只占 $\Omega_L < 0.01 \Rightarrow$ 暗重子
- $\sim 4\%$ 的暗重子可能以弥散于星系际之间的气体形式存在



8, 暗物质与暗能量

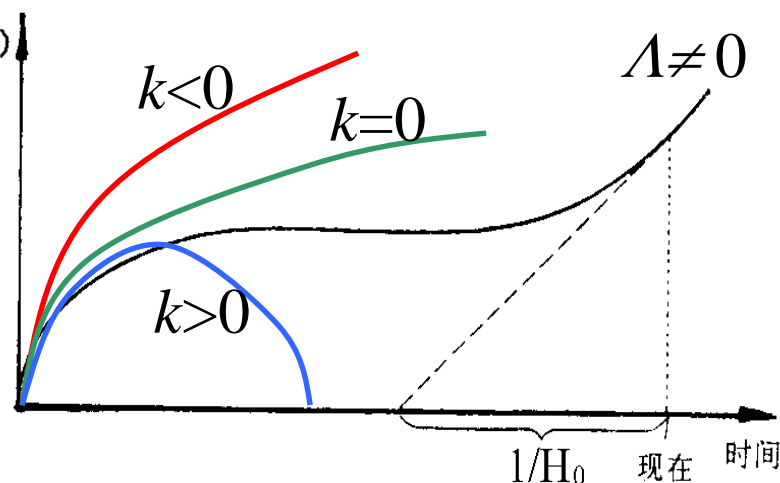
宇宙学常数

- Einstein曾先验地认为宇宙是静止的，而在场方程中添加一项

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

具有引力的粒子体系只能减速膨胀。新加项等效于粒子间斥力

- Hubble膨胀的发现使得Einstein认为引入宇宙常数是最大错误
- 宇宙常数非零的尺度因子演化 $\rightarrow R(t)$
- 曾被用来解决“宇宙年龄问题”
- 最近用来理解“宇宙加速膨胀”



8, 暗物质与暗能量

暗物质

- 暴胀宇宙学研究使我们相信 Ω 非常接近于1
- BBN理论 $\Rightarrow \Omega_B \sim 0.05$
- 星系旋转、星系或星系团动力学、引力透镜等 $\Rightarrow \Omega_{DM} \sim 25\%$
- 暗物质三大特点：长寿命、大质量、作用弱。（非重子）

暗能量

熵力？

- Ia型超新星巡天 \Rightarrow 宇宙正在**加速**膨胀
- 为什么加速膨胀？目前主要三种看法：

宇宙学常数 Λ 非零

真空能：Planck截断 \Rightarrow 差 10^{120} 量级！

存在“暗能量”物质： $p = \omega\rho, \omega < -1/3$

$$\rho_{\text{vac}} = \int_0^{M_p/c} \frac{4\pi p^2 dp}{(2\pi\hbar)^3} \cdot \frac{1}{2} pc$$

$$\frac{\ddot{R}}{R} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p)$$

标量场：Quintessence: $-1 < \omega < 1$, Phantom: $\omega < -1$, Quintom: ω 过 -1 ; Tachyon: $-1 \leq \omega \leq 0$.

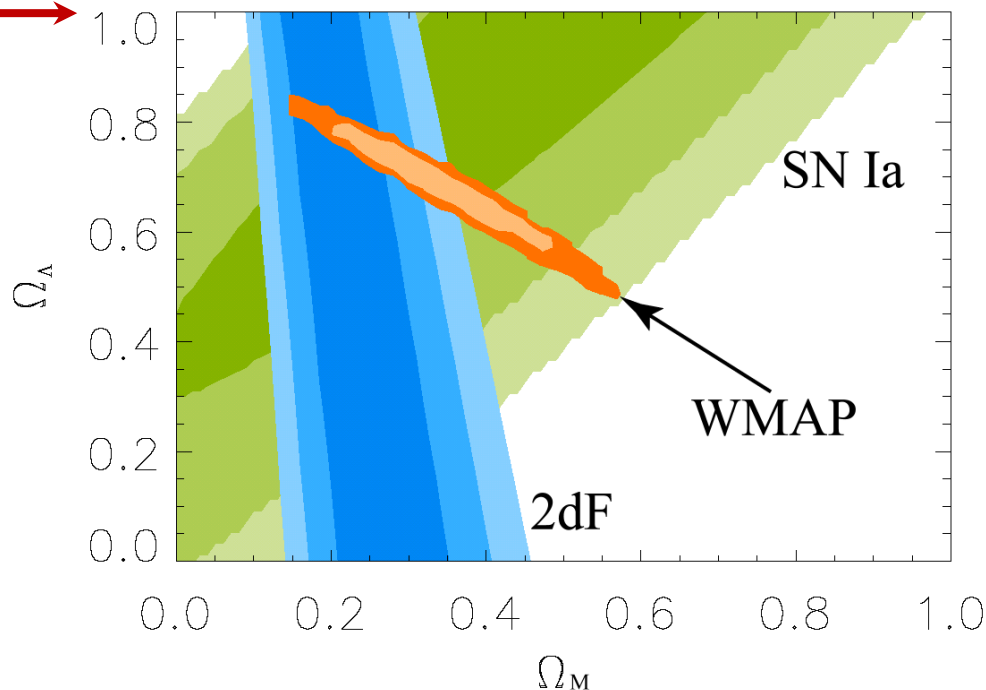
8, 暗物质与暗能量

暗物质与暗能量

- 除了Ia超新星外，CBM各向异性、2dF星系红移巡天也能够给出对 Ω_M 、 Ω_Λ 的限制

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega_B = 0.04 \\ \Omega_{DM} = 0.26 \\ \Omega_\Lambda = 0.7 \end{array} \right.$$

- 宇宙大尺度演化的数值计算也反映暗物质、暗能量的存在！
(若认为主要由重子构成，至今来不及形成星系)



9, 可观测宇宙之外?

宇宙观

- Ptolemy和Copernicus时代：宇宙就是太阳系
- “宇宙岛”：银河系
- 当代可观测宇宙的空间：尺度为百亿光年量级
-在可观测宇宙之外?
- 高维宇宙?
- Campbell定理：任一 N 维Einstein场方程解析解都可以局部地嵌入至 $(N+1)$ 维Ricci平直 ($T=0$) 的Rieman 流形中。

我们在这里?



总 结

- 0, 什么是宇宙?
- 1, 基本观测事实
- 2, Robertson-Walker度规
- 3, 宇宙膨胀动力学
- 4, 极早期宇宙真空相变
- 5, 暴胀
- 6, 辐射与物质间的脱耦
- 7, 宇宙早期核合成
- 8, 暗物质与暗能量
- 9, 可观测宇宙之外?

作业

习题： 2