

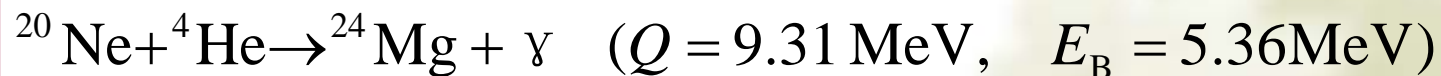
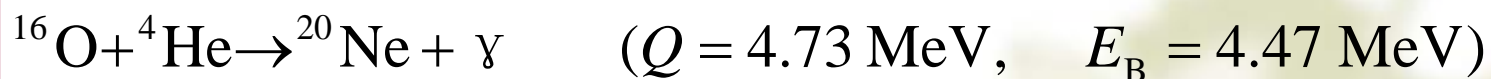
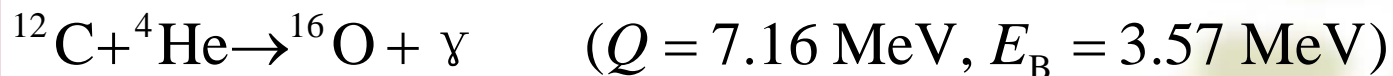
## § 13.3 恒星中的核反应

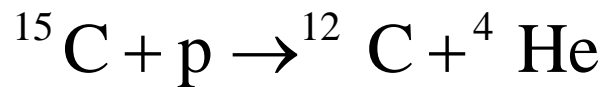
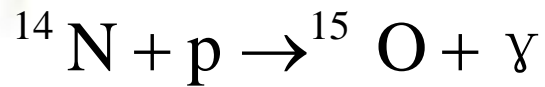
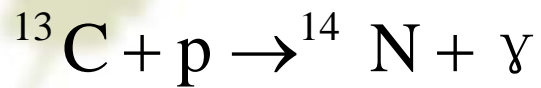
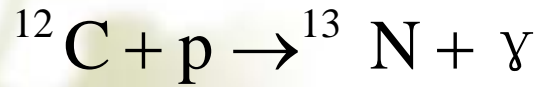
### 1. 恒星中 $A \leq 60$ 的原子核的合成

原子形成之后，由于某种不稳定的因素造成了星系的形成。一开始，星系是H和He原子的混合体。由于引力的作用，星系要发生坍缩，使得原子核的动能增加，也就是体系的温度增加。当温度足够高时，带电粒子间可以克服库仑势垒而发生熔合核反应，从而形成较重的原子核。熔合反应中释放出来的辐射能量形成向外的压力，阻止进一步的引力坍缩。这样星体就处于一段时期的平衡状态（比如太阳），时间可以持续高达 $10^{10}$ 年。当参与熔合反应的核被烧尽后，对外的压力减小，引力坍缩又开始，温度继续升高直到下一种更重的原子核开始燃烧。这种过程反复进行，不断产生出更重的核素。这是 $A \leq 60$  原子核形成的大致机制。

温度 $1-2 \times 10^8\text{K}$ （现在进行H燃烧的太阳的内部温度是约 $10^7\text{K}$ ）， ${}^4\text{He}+{}^4\text{He}\rightarrow{}^8\text{Be}$  熔合的库仑位垒被克服。熔合反应产生的辐射使星体的外层扩张100~1000倍，表层的能量密度和温度因此会降低，成为红巨星。 ${}^8\text{Be}$ 不稳定,平衡时 ${}^8\text{Be}$ 的含量约是 ${}^4\text{He}$ 的 $4 \times 10^{-3}$ 倍。

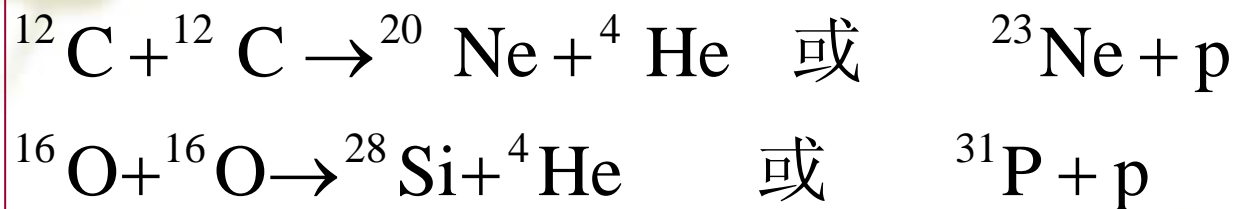
${}^{12}\text{C}$ 在7.65MeV处有一个激发态。 ${}^8\text{Be} + \alpha \rightarrow {}^{12}\text{C}$  反应释放的能量是7.45MeV。加上所处温度下体系的动能，足以使共振核反应发生。



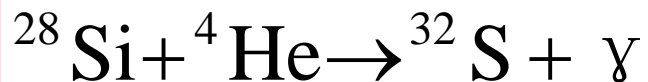


**CNO**循环的作用是协助将环境中的质子消耗掉，把它们转变成中子和正电子，使**He**的含量增加；同时，循环中的某些核素也会反应到更重的核。

当He燃烧开始减弱时，引力坍缩又开始了。只要星体质量足够大，就可以达到足够高的温度（约 $10^9\text{K}$ ），使 $^{12}\text{C}$ 和 $^{16}\text{O}$ 燃烧：



产生靠近质量数60的原子核的最后过程是Si燃烧。但此时由于库仑势垒太高，直接的熔合反应难于发生，主要靠 $\alpha$ 俘获反应产生更重的核：



## 2. 重核素的形成

对于 $A > 56$ 的原子核，熔合和带电粒子俘获反应不再是有利的形成方式，产生机制主要是中子俘获反应。

$$r \approx n_n \langle \sigma v \rangle$$

宇宙中的某些地方存在这样极强的中子源。

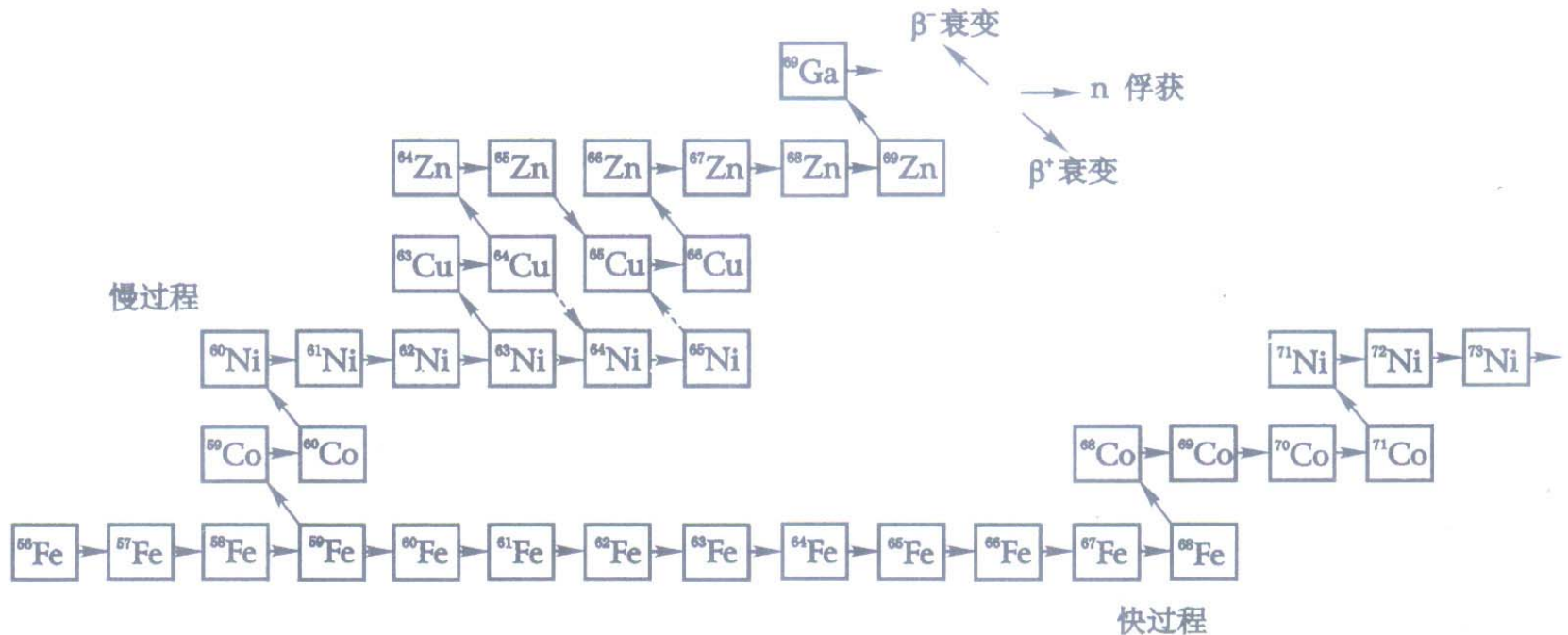


图 13-5 从 $^{56}\text{Fe}$ 开始的快(r)过程和慢(s)过程

(慢过程中的虚线表示达到 $^{65}\text{Cu}$ 的另一种可能的途径;

快过程可以有许多的可能性(取决于衰变寿命和中子流强),图中只画出了一种)

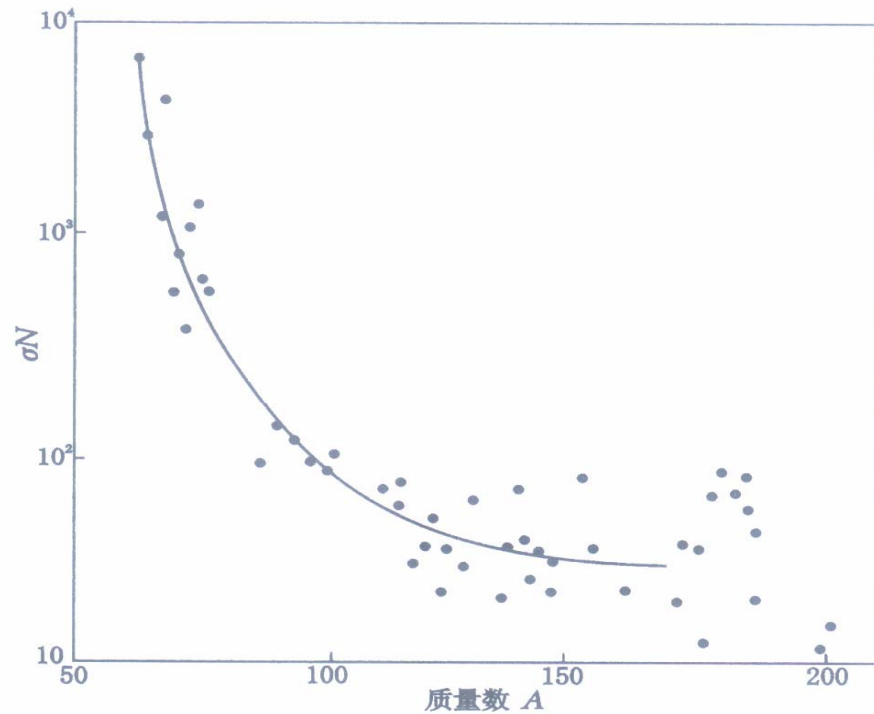


图 13-6  $\sigma N$  对  $A$  的依赖关系

$$\frac{dN_A}{dt} \propto \sigma_{A-1} N_{A-1} - \sigma_A N_A = 0$$

**Fe**的丰度不是由慢过程决定的，它比慢过程给出的值要高的多，因此在 $A \approx 60$ 附近 $\sigma N$ 出现高峰，

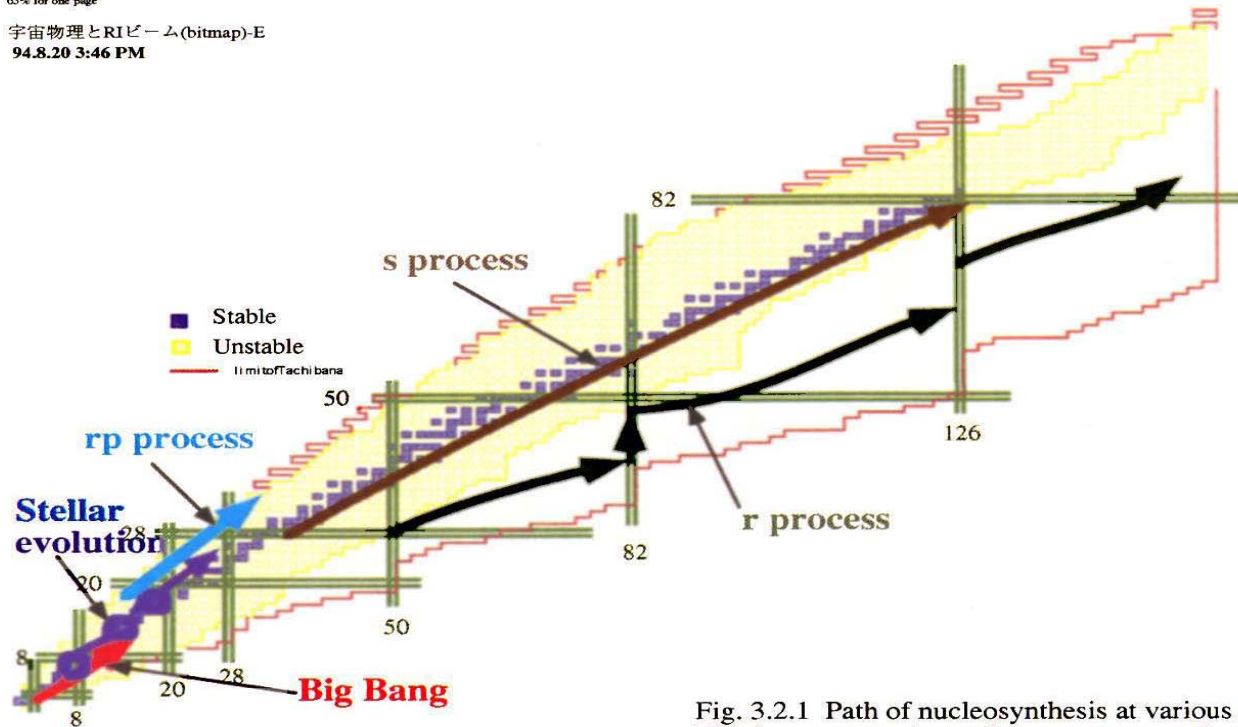


Fig. 3.2.1 Path of nucleosynthesis at various sites. The decay properties and the capture reaction rates of unstable nuclei are essential for understanding these path ways and thus the elemental abundances.

在靠近中子幻数的地方， $\beta$ 衰变的寿命变得特别短，中子的增加立即转化为质子的增加，于是在快过程中出现了沿 $N=50$ 、 $82$ 和 $126$ 的直线。

### 3. 恒星的演化

维里定理（**virial theorem**），对于一个开放的引力束缚系统，内部平均动能与引力势能之间满足关系：

$$2\bar{T} + \bar{\Omega} = 0 \quad (13.3-4)$$

$$E = \bar{T} + \bar{\Omega}$$

$$dB = -d(\bar{T} + \bar{\Omega}) = d\bar{T} \quad (13.3-5)$$

如果初始星体的质量小于 $0.1 M_{\odot}$ ，则由于电子简并形成的对外的压力足以抵抗引力坍缩，星体终止于冷却的电子、质子和 $\alpha$ 粒子的混合体。

如果初始星系的质量大于 $0.1 M_{\odot}$ ， $T_c$ 将达到 $10^7\text{K}$ ，使氢燃烧点火。核反应释放的能量补充了星体表面释放出去的能量，系统形成平衡。氢的燃烧可以持续很长的时间。比如在太阳中氢燃烧已进行了 $5 \times 10^9$ 年，并且还会继续 $5 \times 10^9$ 年。质量较大的系统核心的密度较高，氢的燃烧更快。



如果初始质量大于 $0.25 M_{\odot}$ ，核心的氢烧完之后，引力坍缩使 $T_c$ 可以达到 $10^8\text{K}$ ，核心处氢燃烧点火（而周围还是氢燃烧）。这种燃烧、坍缩、再燃烧的过程继续下去，按照初始质量的不同而产生不同的后果。质量大于 $4 M_{\odot}$ 的星体，核心的氢消耗之后发生碳燃烧，导致O、Ne和Mg的核心。质量大于 $10 M_{\odot}$ 的星体可以燃烧O、Si等，直到形成Fe的核心。这时星体的结构就象一个洋葱，从里到外依次是Fe、Si、Ne、O、C、He、H等。外层的燃烧使Fe的核心越来越大，引力的作用最终会打破电子简并的抗衡作用，造成急剧的坍缩，引起超新星爆发。巨大的能量在爆发中被释放出来，将外层的大量物质（多达 $1.4 M_{\odot}$ ）抛射到星际空间。剩下的部分将变成中子星，或者在质量特别大的情况下变成黑洞。

超新星爆发发生在差不多一秒钟的极短时间内，它在爆发中释放的能量比在此前整个星体演变期中释放的能量还多。爆发后的几天内，超新星将巨大的星际空间照亮。对于质量较小达不到Fe的核心的星体，最终的形成白矮星，即由电子简并支撑的由较轻原子核和电子构成的等离子体核心。白矮星形成过程中，也会将一部分物质抛向星际空间。中子星也是一种燃烧的残余物，只不过它的电子简并已被打破，支撑它的是中子的简并。而黑洞则是被引力完全控制的奇异天体现象。

燃烧和坍缩过程中被抛射到星际空间的H、He等，会成为新的星体的原材料，进入又一个循环。每一次循环都会留下一个质密的星体，并使重元素逐渐增加。

## § 13.4 宇宙中的中微子

### 1. 太阳中微子丢失

找到的高能量的太阳中微子只有预计的约**40%**。

中微子可能有质量，这样就会导致三种中微子之间的相互转化，电中微子的减少可能是它们部分转化成了其它中微子的结果。

### 2. 中微子质量问题

$$m_{\nu_e} / m_e \leq 1.6 \times 10^{-5}, \quad m_{\nu_\mu} / m_\mu \leq 2.4 \times 10^{-3}, \quad m_{\nu_\tau} / m_\tau \leq 2 \times 10^{-2}$$

$$\begin{aligned} \nu_\mu(t) &= e^{-iE_1 t / \hbar} \nu_1(0) \cos \alpha + e^{-iE_2 t / \hbar} \nu_2(0) \sin \alpha \\ &= e^{-iE_1 t / \hbar} (\nu_\mu(0) \cos^2 \alpha - \nu_e(0) \cos \alpha \sin \alpha) + e^{-iE_2 t / \hbar} (\nu_\mu(0) - \nu_e(0) \sin \alpha \cos \alpha) \\ &= (e^{-iE_1 t / \hbar} \cos^2 \alpha + e^{-iE_2 t / \hbar} \sin^2 \alpha) \nu_\mu(0) + \sin \alpha \cos \alpha (e^{-iE_2 t / \hbar} - e^{-iE_1 t / \hbar}) \nu_e(0) \end{aligned} \quad (13.4-7)$$

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \frac{1}{2} \sin^2 2\alpha [1 - \cos(E_2 - E_1)t / \hbar] \quad (13.4-10)$$

### 3. 中微子质量对宇宙演化的影响

如果宇宙的平均质量密度比较少，则引力作用不会减小和终止宇宙的膨胀，星系之间的距离会越来越远。假定重子都是可衰变的，则经过很长一段时间后，宇宙将只剩下光子、中微子和引力子，它们随宇宙的膨胀而不断冷却下去。

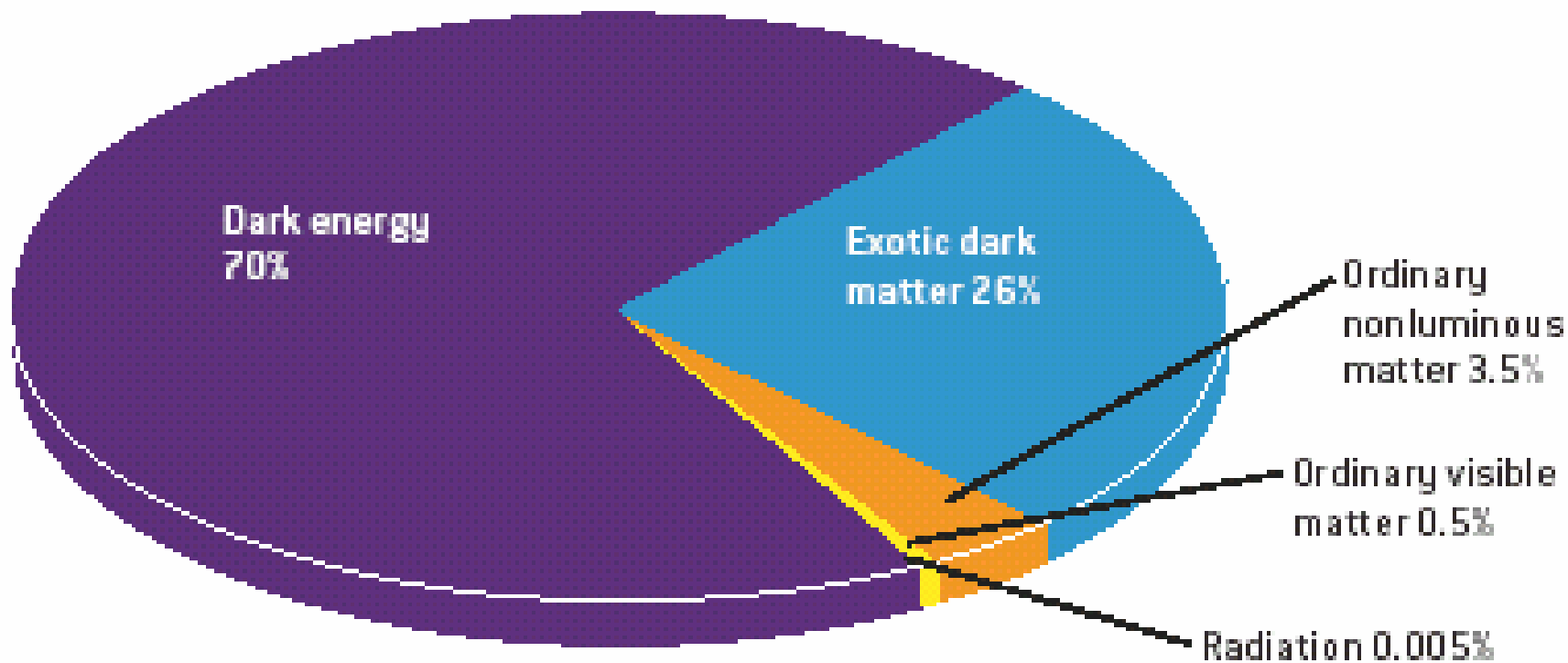
如果宇宙的质量超过一定限度，则宇宙膨胀会逐渐减缓，并且到一定极限后收缩，重新回到奇异点而发生又一次大爆炸，开始新的膨胀。

平缓的状态，对应的宇宙质量密度约为  $m_{\text{crit}} \approx 1 \times 10^{-26} \text{ kg/m}^3$ ，被称为临界质量密度。目前观察到的重子物质密度（称为明物质），只有临界密度的约5%，显然不足以停止宇宙的膨胀。然而，依据对星系运动的观察，人们估计宇宙间的物质密度接近于  $m_{\text{crit}}$ ，也就是说，大部分提供引力作用的物质并不以我们熟悉的重子形式存在，它们被称为暗物质（**dark matter**）。

$$\Omega_{\nu} = \frac{N_{\nu} m_{\nu}}{m_{\text{crit}}} = \frac{10^9 N_{\text{B}} m_{\text{B}}}{m_{\text{crit}}} \cdot \frac{m_{\nu}}{m_{\text{B}}} = 10^9 \Omega_{\text{B}} \frac{m_{\nu}}{m_{\text{B}}} \quad (13.4-13)$$

$$\Omega_{\text{B}} \approx 0.05$$

$$m_{\nu} \approx \frac{m_{\text{B}}}{10^9 \times 0.05} \approx 2 \times 10^{-8} m_{\text{proton}} \approx 20 \text{ eV} \quad (13.4-14)$$



暗物质和暗能量